国家出版基金项目

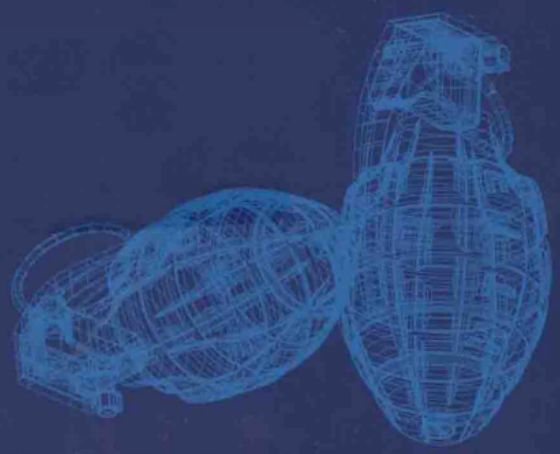
"十二五"国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

弹药制造工艺学

Projectiles and Rockets Producing Technology

董素荣　陈国光　编著



北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

国家出版基金项目
"十二五"国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

弹药制造工艺学

董素荣　陈国光　编著

北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

本书是由国家出版基金资助，按“十二五”国家重点出版物出版规划项目计划编著的。书中以弹药制造工艺技术为主线，系统介绍了弹药机械制造工艺和含能材料装药工艺的基本知识。全书共分16章，主要内容包括：制造弹箭零件用的材料及毛坯种类的选择；弹箭零件机械加工工艺规程的编制；制造弹箭零件常用的热冲压、冷挤压、冷冲压、强力旋压、铸造等加工方法，弹箭零件的机械加工及热处理和表面处理的方法；含能材料装药的基本知识及常用的装填方法；火箭弹的装配与验收；检验与验收；现代制造技术。

本书可作为高等院校国防特色学科的本科生、研究生教材，也可供教学和科研工作者参考。

图书在版编目（CIP）数据

弹药制造工艺学/董素荣，陈国光编著．—北京：北京理工大学出版社，2014.2
（现代兵器火力系统丛书）
国家出版基金项目及“十二五”国家重点出版物出版规划项目
ISBN 978-7-5640-8768-5

Ⅰ.①弹…　Ⅱ.①董…②陈…　Ⅲ.①弹药-生产工艺　Ⅳ.①TJ410.5

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第037729号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司
社　　址 / 北京市海淀区中关村南大街5号
邮　　编 / 100081
电　　话 / (010) 68914775（总编室）
82562903（教材售后服务热线）
68948351（其他图书服务热线）
网　　址 / http：//www.bitpress.com.cn
经　　销 / 全国各地新华书店
印　　刷 / 北京地大天成印务有限公司
开　　本 / 787毫米×1092毫米　1/16
印　　张 / 36.25
字　　数 / 665千字
版　　次 / 2014年2月第1版　2014年2月第1次印刷
定　　价 / 132.00元

责任编辑 / 杨志坚
张慧峰
文案编辑 / 张慧峰
责任校对 / 周瑞红
责任印制 / 王美丽

总　序

国防科技工业是国家战略性产业，是先进制造业的重要组成部分，是国家创新体系的一支重要力量。为适应不同历史时期的国际形势对我国国防力量提出的要求，国防科技工业秉承自主创新、与时俱进的发展理念，建立了多学科交叉，多技术融合，科研、实验、生产等多部门协作的现代化国防科研生产体系。兵器科学与技术作为国防科学与技术的一个重要分支，直接关系到我国国防科技总体发展水平，并在很大程度上决定着国防科技诸多领域的成果向国防军事硬实力的转化。

进入21世纪以来，随着兵器发射技术、推进增程技术、精确制导技术、高效毁伤技术的不断发展，以及新概念、新原理兵器的出现，火力系统的射程、威力和命中精度均大幅提升。火力系统的技术进步将推动兵器系统的其他分支发生相应的革新，乃至促使军队的作战方式发生变化。然而，我国现有的国防科技类图书落后于相关领域的发展水平，难以适应信息时代科技人才的培养需求，更无法满足国防科技高层次人才的培养要求。因此，构建系统性、完整性和实用性兼备的国防科技类专业图书体系十分必要。

为了解决新形势下兵器科学所面临的理论、技术和工程应用等问题，王兴治院士、王泽山院士、朵英贤院士带领北京理工大学、南京理工大学、中北大学的学者编写了《现代兵器火力系统》丛书。本丛书以兵器火力系统相关学科为主线，运用系统工程的理论和方法，结合现代化战争对兵器科学技术的发展需求和科学技术进步对其发展的推动，在总结兵器火力系统相关学科专家学者取得主要成果的基础上，较全面地论述了现代兵器火力系统的学科内涵、技术领域、研制程序和运用工程，并按照兵器发射理论与技术的研究方法，分述了枪炮发射技术、火炮设计技术、弹药制造技术、引信技术、火炸药安全技术、火力控制技术等内容。

本丛书围绕“高初速、高射频、远程化、精确化和高效毁伤”的主题，梳理了近年来我国在兵器火力系统相关学科取得的重要学术理论、技术创新和工程转化等方面的

成果。这些成果优化了弹药工程与爆炸技术、特种能源工程与烟火技术、武器系统与发射技术等专业体系，缩短了我国兵器火力系统与国外的差距，提升了我国在常规兵器装备研制领域的理论水平和技术水平，为我国兵器火力系统的研发提供了技术保障和智力支持。本丛书旨在总结该领域的先进成果和发展经验，适应现代化高层次国防科技人才的培养需求，助力国防科学技术研发，形成具有我国特色的“兵器火力系统”理论与实践相结合的知识体系。

本丛书入选“十二五”国家重点出版物出版规划项目，并得到国家出版基金资助，体现了国家对兵器科学与技术，以及对《现代兵器火力系统》出版项目的高度重视。本丛书凝结了兵器领域诸多专家、学者的智慧，承载了弘扬兵器科学技术领域技术成就、创新和发展兵工科技的历史使命，对于推进我国国防科技工业的发展具有举足轻重的作用。期望这套丛书能有益于兵器科学技术领域的人才培养，有益于国防科技工业的发展。同时，希望本丛书能吸引更多的读者关心兵器科学技术发展，并积极投身于中国国防建设。

丛书编委会

前　言

现代战争正向着信息化、数字化与智能化的方向发展，因此在现代武器系统的设计中，已广泛采用了各种新材料、新技术以及新的制造加工方法。与此相适应的弹药制造工艺也发生了重大的变化。例如在弹箭零件的制造工艺中大量采用了强力旋压技术、数控技术以及 CAD/CAM 集成技术。随着新型炸药和新型推进剂的应用，在装药技术、装药方法上也发生了很大变化，逐渐向着自动化的方向发展。先进的弹药制造技术是武器系统实现其战术技术性能的重要保证。因此，为适应这种新的发展变化的趋势以及知识更新的需要，迫切需要编写出一本新的弹药制造工艺学教材，较为系统全面地介绍新的工艺技术与工艺方法，以满足教学与科研的需要。

本书是由国家出版基金资助，按“十二五”国家重点出版物出版规划项目计划编著的。书中以弹药制造工艺技术为主线，系统介绍了弹药机械制造工艺和含能材料装药工艺的基本知识。

本书的编写宗旨是使学生能够系统地掌握基本的弹药制造工艺知识，并具备必要的弹药设计研究和产品管理工作中解决与工艺有关的实际问题的能力，从而为从事弹药科研和生产管理工作奠定扎实的基础。

在本书的编写中，作者根据多年来从事产品设计与技术管理的经验并结合现代新工艺、新技术的应用，力图为读者提供一本较系统的弹药制造工艺学教科书，供教学和科研工作参考。

全书共分 16 章。其主要内容为：第 1～8 章介绍一些主要零件所用的金属材料、非金属材料、高密度材料、工程塑料及复合材料在现代武器设计中的应用；机械加工工艺规程的编制；介绍了一些常用的机械加工方法，如热冲压、冷挤压、冷冲压、铸造等在弹箭零件制造中的应用。其中，第 6 章重点介绍了军工企业在弹药设计中制造关键零件采用的强力旋压技术；第 8 章重点介绍了数控机床在弹箭零件加工中的应用以及典型零

件的加工示例。第 9 章、第 10 章介绍了弹箭零件的热处理以及表面处理的基本知识。第 11～13 章重点介绍了弹丸、火箭战斗部与发动机装药的基本知识以及常用的装药方法。第 14 章重点介绍了火箭弹装配与验收的全过程。第 15 章重点介绍了弹药检验与验收的基本知识与技术要求。第 16 章介绍了现代制造技术，包括先进的 CAD/CAM 集成技术、柔性制造系统、快速成型技术等。

本书可作为高等院校国防特色学科的本科生、研究生教材，也可供教学和科研工作者参考。

本书第 3、4、7、12 章由董素荣编写，第 2、6、8 章由陈国光编写，第 1、16 章由周海英编写，第 5 章由田晓丽编写，第 10、15 章由辛长范编写，第 9、13 章由王芳编写，第 11 章由张树霞编写，第 14 章由刘婵媛编写。全书由董素荣和陈国光统稿。

周兰庭教授和陈惠武教授认真审阅了书稿，并提出了宝贵的意见，在此对两位专家的指导表示深深的谢意。在本书的编写过程中，引用和参考了许多文献资料，在此谨向参考文献的作者表示感谢，同时本书的编写还得到了中北大学的大力支持，一些研究生绘制了本书的插图，在此对他们表示衷心的感谢。

本书在力等量的单位的使用上，遵从行业习惯，使用了千克（kg）、吨（t）等单位，特此说明。

由于作者水平所限，书中错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

作者

2013 年 9 月

目　录

第1章　制造弹箭零件用的材料及毛坯种类的选择

制造炮弹和火箭弹(统称弹箭)零件用的材料在零件图中已予以规定。其确定依据首先是产品对零件性能的要求;其次是考虑制造工艺对材料的要求,即材料的工艺性。不同的工艺方法对所用材料有不同的要求。例如,用热冲压方法制造弹体时应采用性能符合要求的高碳钢;用冷挤压方法制造弹体时应采用塑性良好的深冲钢,并通过变形强化达到产品的性能要求;对锥度很小的风帽而言,目前都用冷冲压方法制造;而适合于冷冲压加工的材料必须是塑性好、变形抗力低的材料。再如,某些结构形状较复杂的零件有时只能用压力铸造的方法制造,而压力铸造本身对材料也有一定的要求,如熔点不宜过高等。

此外,选用材料时还应结合我国的资源情况,尽量选用有广泛来源的材料,对战时大量需要的炮弹和火箭弹来讲,这一点是非常重要的。

不同的炮弹和火箭弹,对其零件的性能要求各不相同,所用材料相当广泛,本章重点介绍一些主要零件所用的金属材料,对于非金属材料则仅作简单介绍。

1.1　制造弹箭零件的黑色金属材料

1.1.1　碳素结构钢

这类钢材在弹箭生产中应用最为广泛。按照它们的用途和性能可分为:炮弹用碳素钢、优质碳素结构钢、深冲钢和普通碳素结构钢等。

1. 炮弹用碳素钢(简称炮弹钢)

这是专门供制造炮弹零件用的热轧碳素钢。主要用于榴弹和一些特种弹以及杀伤爆破火箭弹战斗部的弹体,也用于制造头螺、底螺等。这些零件对所用材料的基本要求是应有一定的强度和塑性。例如大部分榴弹和特种弹的弹体对材料的要求一般为:屈服点在314～588 MPa,断面收缩率在15%以上,采用炮弹钢就可以满足这些要求。

根据加工方法的不同,炮弹钢可分为热压力加工用钢和机械加工用钢两类。

热压力加工用钢先经热冲压方法制造毛坯,后经机械加工制成零件,零件的机械性能取决于钢材的化学成分、热压力加工的规范以及必要的热处理。所以这类钢材进厂时,只检验其化学成分。

机械加工用钢则不经过毛坯制造而直接进行机械加工得到成品。因此,其机械性能

必须达到所要求的数值，并在钢材进厂时进行检验。

在制造榴弹或火箭弹弹体时，用得最多的是 D60 钢、58SiMn 钢、$60Si_2Mn$ 钢等。这类钢的屈服极限分别为 363 MPa、650 MPa 和 750 MPa 左右，断面收缩率不小于 30%。长期的使用经验证明，对现有弹体结构和所用炸药而言，这种钢具有必要的强度、满意的爆炸破片，同时具有良好的热压力加工性能和切削性能。

2. 优质碳素结构钢

在弹箭生产中还大量使用优质碳素结构钢。这类钢中的高碳钢经调质处理后，有较好的综合机械性能，可用于承受负荷较大的零件，如 107 mm 火箭弹的中间底，经淬火和低温回火后有较高的硬度，故某些弹的防滑帽即用 55 或 60 钢制造。在高碳钢中 65、70 钢用得较少。

中碳钢的强度不及高碳钢，但韧性较好，一般经调质或正火后使用。主要用于制作承受负荷较大而又要求有较高韧性的零件。如为保证与燃烧室相连接的喷管螺纹的强度，在不使用合金钢时，喷管常以 45 钢在调质状态下使用。其他很多中等受力的重要零件也经常采用中碳钢制造，如航空炮弹弹体、曳光管、曳光管螺帽等。

在优质碳素结构钢中，低碳钢也得到了广泛的应用。低的含碳量使它具有良好的塑性和较低的变形抗力，适合于冷压力加工。常用 08、10、15 等钢种制作冲裁件、弯曲件、拉伸件以及其他成型零件，如 130 mm 火箭弹的药包夹，一些炮弹或火箭弹的风帽、弹体、支持架、尾翼架等。此外，低碳钢的良好的焊接性能使得有可能用焊接结构来代替一些铆接或螺纹连接结构，例如不少火箭弹的尾翼片与整流罩的连接、一些爆破火箭弹战斗部壳体与传爆管及螺纹环的连接等。

从品种上看，优质碳素结构钢常用的有热轧和冷拉钢材以及薄钢板。在弹箭生产中使用的热轧钢材主要是热轧圆钢、圆角方钢和钢管。冷拉钢材的尺寸精度较高、表面粗糙度较低，便于在自动机床上直接进行机械加工，适用于一些小口径弹体和一些尺寸不大的零件。薄钢板的厚度一般在 4 mm 以下，按其冷变形性能可分为三级：ZF——拉延最复杂，HF——拉延较复杂，F——拉延复杂。其变形性能从 ZF 到 F 依次递减。

3. 深冲钢

随着冷冲压（如钢质风帽、药筒等零件的拉伸）和冷挤压工艺的发展，对原材料的变形性能提出了更高的要求。表 1-1 为深冲压用冷轧薄钢板和钢带的化学成分和机械性能。

从表 1-1 中可以看出，深冲钢属于低碳钢的范畴，但它和优质碳素结构钢中的低碳钢又有不同之处：

（1）平均含碳量相同的钢号，深冲钢较优质碳素结构钢的含碳量的波动范围要小。碳是强化钢的主要元素，故其含量波动范围小可有效地稳定钢的工艺性能和机械性能。

（2）锰、硫、磷的允许含量及其波动范围也较优质碳素结构钢小。其目的是减小硫、磷的有害作用和降低锰对低碳钢的强化作用。

表 1-1　深冲压用冷轧薄钢板和钢带的化学成分和机械性能

(GB/T 5213—2001,GB/T 228—2002)

材料	化学成分/%						屈服极限/MPa		A/%
	w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(P)	w(S)	w(Als)(酸溶铝)	R_m	R_e	
SC1	≤0.08	≤0.40	≤0.03	≤0.02	≤0.025	0.02～0.07	270～350	210～240	≥34～38
SC2	≤0.01	≤0.03	≤0.03	≤0.02	≤0.020	0.03～0.08	270～330	180	≥40
SC3	≤0.008	≤0.03	≤0.03	≤0.02	≤0.020	0.03～0.08	270～350	180	≥38
注:表中 R_m 为抗拉强度;R_e 为屈服强度;A 为断后伸长率。									

深冲钢中含硅量也较优质碳素结构钢低,其主要原因是硅能使钢在冷压力加工中产生强烈的硬化现象,降低其含量可增加钢的塑性和降低变形抗力。

(3) 在深冲钢中加入了少量的铝,其作用是抑制钢的应变时效,以提高钢在低温下的韧性。

此外,由于深冲钢在冶炼过程中还注意了对气体和非金属夹杂物的控制,因而使其有比较一致的纵、横向机械性能。

因为深冲钢具有上述适合于冷压力加工的特点,所以在弹箭生产中得到了日益广泛的应用,如某些冷挤压弹体、深度较大的传爆管及一些弹的尾杆等。

4. 普通碳素结构钢

对于一些性能要求不太高的零件可选用普通碳素结构钢。

1.1.2　合金钢

在弹箭生产中,合金钢主要是用于制造各种类型的穿甲弹弹体和火箭发动机中的主要零件(如燃烧室和喷管)。这两类零件的要求不同,所用的材料也不同。

1. 制造穿甲弹主要零件所用的合金钢

普通穿甲弹的作用是碰击目标时利用其动能将目标穿透,然后利用弹丸中少量炸药的爆炸作用对内部进行破坏。因此,穿甲弹的主要零件(弹体和被帽)首先要有足够高的强度和硬度;同时,为保证弹丸与目标碰击时弹体不致破碎,尤其是药室部分不致破裂,还要求所用材料有足够的韧性。为此,需采用合金钢,并经必要的热处理。这类钢主要用来制造穿甲弹和半穿甲弹的弹体、被帽或其他要求高强度的炮弹主要零件。这些钢在我国的具体应用情况见表 1-2。

表 1-2　穿甲弹弹体所用材料

弹　　种	所用材料牌号
23 mm Ⅱ型穿甲燃烧航空炮弹体	35CrMnSiA

续表

弹　　种	所用材料牌号
30 mm Ⅰ型穿甲航空炮弹弹体	35CrMnSiA
海双 30 mm 舰炮用杀伤爆破燃烧弹弹体	35CrMnSiA
海双 30 mm 舰炮用穿甲爆破弹弹体	35CrMnSiA
37 mm Ⅰ型穿甲燃烧曳光穿甲弹弹体	35CrMnSiA
37 mm55 式高射机关炮用曳光穿甲弹弹体	35CrMnSiA
57 mm59 式高射机关炮用曳光穿甲弹弹体	60Cr2MoA 或 35CrMnSiA
57 mm55 式反坦克炮用被帽曳光穿甲弹弹体	60Cr2MoA
57 mm55 式反坦克炮用钝头曳光穿甲弹弹体	35CrMnSiA
85 mm56 式加农炮用被帽曳光穿甲弹弹体	60Cr2Ni2MoA
100 mm44 式加农炮用被帽曳光穿甲弹弹体	60Cr2Ni2MoA 或 60SiMn2MoVA
100 mm 滑膛脱壳穿甲弹弹体	35CrMnSiA
双 130 mm 海岸炮(130/58)用半穿甲弹弹体	35Cr3NiMoA
单 130 mm 海岸炮(130/58)用半穿甲弹弹体	35Cr3NiMoA

从表 1-2 可知，穿甲弹所用的合金钢主要有铬钢、铬钼钢、铬镍钼钢以及铬锰硅钢。钢中合金元素铬、镍、钼均能显著地改善钢的性能。这些元素的主要作用是：

(1) 铬。钢中加入少量铬可增加钢的淬透性，铬还能提高钢的回火稳定性，对回火时消除应力和提高钢的韧性有利。不过，在碳钢中单独加入铬，对调质后的机械性能虽有改善，但其作用不显著，只有在加入铬的同时再加入其他元素，如锰、钼、镍等，才能显示出较好的性能。

(2) 镍。镍也是稳定过冷奥氏体的主要合金元素，它的加入能增加钢的淬透性。但是在钢中同时加入铬和镍要比单独加入铬或镍对淬透性影响的总和大得多。镍对钢的机械性能影响有两个最突出的优点，一是镍在提高钢的强度的同时不降低钢的塑性和韧性，适量时还会有所提高；二是镍能降低钢的低温脆性的转变温度，因此，含镍的钢，其低温韧性较好。

铬镍结构钢虽然有较好的综合机械性能，有高的淬透性和低温冲击韧性等优点，但铬镍钢对第二类回火脆性很敏感，当在 450 ℃～550 ℃回火时快冷和慢冷的冲击韧性可相差 6～8 倍之多，所以铬镍钢在高温回火时应快冷。铬镍钢的另一缺点是在锻件中有时会形成白点，故在热加工后应采取缓冷措施。

(3) 钼。它在钢中的作用是提高淬透性、传热性和防止回火脆性等。要特别指出的是钼有降低回火脆性的倾向(但若钼作为单一的合金元素存在时，它也增加钢的回火脆性)。铬镍钢中加入钼后，可使其有很高的冲击韧性和淬透性。

综上所述，将铬、镍和钼同时加入钢中可使钢具有良好的综合机械性能和工艺性能。其中，35Cr3NiMoA 钢主要用于大口径穿甲弹或半穿甲弹弹体。这种钢用于制造 152 mm 半穿甲弹弹体即使在油中淬火，也可完全淬透，使整个截面获得很高的强度和硬度。60Cr2Ni2MoA 和 60Cr2MoA 钢经淬火后可获得高硬度，调质后又具有较高的强度和韧性，因而被用于制造 85 mm 和 100 mm 被帽穿甲弹弹体。

炮弹用合金钢中的 35CrMnSiA 钢是比较成熟的少铬无镍高强度钢。其淬透性较好，强度较高，但其有显著的回火脆性倾向，韧性较低，故需正确地选择回火温度。它常用于中小口径的穿甲弹弹体、被帽和一些强度要求较高的弹丸零件。

用铬镍钼钢制造穿甲弹弹体，需消耗大量的铬和镍，而目前我国铬和镍尚比较稀缺，因此，我国在多年前就开始研制不含镍铬的炮弹用合金钢。其中比较成熟的有硅-锰-钼-钒系列钢，如 60SiMn2MoVA 钢，该钢的化学成分见表 1-3。

表 1-3　60SiMn2MoVA 钢的化学成分　%

w(C)	w(Mn)	w(Si)	w(Mo)	w(V)	w(S)	w(P)	w(Cu)
0.55～0.61	1.5～1.8	0.6～0.8	0.45～0.55	0.1～0.2	≤0.035	≤0.035	≤0.025

钢中钒的主要作用是细化奥氏体晶粒，消除锰钢的过热倾向，钼的加入则为消除硅-锰系钢固有的第二类回火脆性倾向并提高钢的淬透性和回火稳定性。

60SiMn2MoVA 钢由于含碳量较高以及合金元素的综合作用，具有高的淬透性、高硬度、高强度的同时兼有足够的韧性，因而能满足穿甲弹弹体的要求。

此钢种的不足之处是退火后硬度不易下降，切削性能不如铬镍钼钢，其塑性和韧性也较 60Cr2Ni2MoA 钢稍差，疏松等级也不易控制。

2. 制造火箭发动机主要零件所用的合金钢

火箭发动机中的关键零件是燃烧室和喷管。燃烧室工作时要承受较高的燃气压力的作用，因而要求材料有较高的机械性能，但因其壁厚较薄，因而对所用材料的淬透性要求不像穿甲弹那样高。为了减小燃烧室的壁厚从而减轻火箭弹被动段的重量，燃烧室所用的材料应有较高的强度。在压力上升阶段，燃烧室所承受的载荷有较大的冲击性（对装药燃烧时间短而又要求提供大推力冲量的燃烧室来说尤为如此），因此，所用材料又应有较高的冲击韧性。此外，对装药燃烧时间长而隔热条件又较差的燃烧室而言，尚要求所用材料在较高的温度下应有足够的机械性能。由此可见，正确地选用燃烧室的材料是很重要的。表 1-4 是几种火箭弹燃烧室所用的材料牌号及产品对材料性能的要求。

表 1-4　不同弹种的燃烧室对材料的机械性能要求

弹　　种	材　　料	强度指标/MPa	塑性指标/%
107 mm 火箭弹	40Mn2	$R_e \geqslant 637$	$Z \geqslant 35$
130 mm 火箭弹	40Mn2	$R_p \geqslant 588$	$Z \geqslant 45$

续表

弹　　种	材　　料	强度指标/MPa	塑性指标/%
180 mm 火箭弹	45MnB	$R_m \geqslant 1\ 029$ $R_p > 686$	$Z > 45$ $A \geqslant 10$
40 mm 火箭增程破甲弹	30CrMnSiA	$R_m \geqslant 1\ 078$	$A \geqslant 9$
62 mm 反坦克破甲弹	30CrMnSiA	$R_m \geqslant 1\ 078$	$A \geqslant 9$
"57-I"火箭弹	30CrMnSiA	$R_m \geqslant 1\ 078$	$A \geqslant 9$
122 mm 火箭弹	14MnNi	$R_m \geqslant 784$	$A \geqslant 2.5$
122 mm Ⅰ型火箭弹	40Cr	$R_m \geqslant 670$	$A \geqslant 15$
"红鹰-5"	28Cr3SiNiMoWVA	$R_m \geqslant 1\ 372 \sim 1\ 421$	$A \geqslant 6$
苏 M-14	40Cr	$R_p > 686$	$Z \geqslant 30$
注：表中 Z 为断面收缩率；R_p 为规定非比例延伸强度。			

下面对表中所列 30CrMnSiA、40Mn2、45MnB、14MnNi 和 28Cr3SiNiMoWVA 钢加以简单说明。

(1) 30CrMnSiA。属于铬-锰-硅系调质结构钢，经调质处理或等温淬火处理后有较好的综合机械性能。此钢且具有一定的冷变形性能及较好的焊接性能，故可用于强力旋压和焊接组合结构的零件。对于尺寸较小的实心零件或壁厚不大的管件，用 30CrMnSiA 钢制造时，可通过等温淬火处理来获得更好的综合机械性能，而且还可大大减小热处理过程中的变形和开裂。

(2) 40Mn2。强度较好的调质钢。经调质处理后有较高的强度和较好的冲击韧性。但由于锰增加了钢的过热敏感性和回火脆性倾向，所以这种钢的淬火和高温回火工艺应严格控制。107 mm 火箭弹和 130 mm 火箭弹的燃烧室均采用 40Mn2 钢制造。

(3) 45MnB。这种钢的含硼量仅为 0.001%～0.005%，但这样微量的硼却能明显提高低、中碳钢的淬透性，因而用于制造壁厚较大的燃烧室时，经调质处理后也能有较好的综合机械性能。硼是我国的富有元素，所以硼钢属于推荐用钢。但硼钢经高温回火后，其冲击韧性不如不含硼而其他成分相同的钢种，且锰硼钢也有一定的回火脆性倾向。此外，因硼的含量甚微，致使冶炼及热处理都较其他常用结构钢困难。

(4) 14MnNi。系低碳低合金钢，其含碳量相当于 15 钢的平均含碳量。低的含碳量使其有较好的塑性和低的变形抗力，因而有非常良好的冷压力加工工艺性，很适合于用冷拔伸和强力旋压等方法制造精化毛坯。由于锰可增加钢对冷加工硬化的敏感性，故其主要作用是通过压力加工的方法来提高钢的机械性能。由于镍基本上不与碳及其他元素形成化合物，从而在冷变形过程中，不会因形成过多的带状组织而使钢的性能有过多的降低，这正好符合燃烧室对切向强度要求较高的条件。目前除 122 mm 火箭弹前、后燃烧室

均采用此钢外，其他弹种也开始注意对它的选用。

(5) 28Cr3SiNiMoWVA。一种综合性能良好的超高强度钢。此钢的强度极限比其他常用结构钢所能达到的强度极限要高得多，故能有效地减小燃烧室的壁厚，从而减轻其重量。由于 28Cr3SiNiMoWVA 钢中含有较多的 Cr、Mo、W、V 等碳化物形成元素，这些元素在回火过程中以合金碳化物形式析出，产生弥散强化效应，因而使其具有较高的抗高温回火性，不仅在常温下而且在高温下也有较高的强度。例如，它在常规热处理条件(淬火加高温回火)下的常温强度极限值为 1 470 MPa 以上，在 500 ℃时为 1 005 MPa；而 30CrMnSiA 钢在上述条件下的强度极限则分别为 1 078 MPa 和 676 MPa。这种钢可通过不同的回火温度得到 1 372～1 764 MPa 的强度极限。由于这种钢的含碳量较低，所以它在具有很高强度的同时仍有良好的焊接性能和冷压力加工性能，因而不仅可降低燃烧室的重量，而且可采用工艺简单、结构紧凑的焊接组合件，并能采用强力旋压等先进的少、无切屑工艺。所以它是目前制造火箭发动机的一种比较满意的材料。但是，这种钢在冶炼设备和冶炼工艺的要求上均相当严格。

1.1.3　铸铁

铸铁在我国的弹箭生产中主要用于制造迫击炮弹弹体。常用的铸铁有钢性铸铁和稀土球墨铸铁。

1. 刚性铸铁

刚性铸铁是一种优质低碳灰口铸铁。所用原材料是优质原生铁和废钢。加入废钢的目的是降低原生铁的碳、硅量，以获得珠光体基体，并使游离石墨呈细片状，从而提高刚性铸铁的力学性能。

铸铁的化学成分对其机械性能有直接影响。不同产品对机械性能的要求也不同。刚性铸铁的强度低，脆性大，弹体爆破后有效破片数较少。有的迫击炮弹爆破后有效破片仅占弹体质量的 20%左右，所以杀伤威力不大，其优点是可以利用废钢，材料来源丰富。铸铁在弹箭零件中的应用举例见表 1-5。

表 1-5　铸铁在弹箭零件中的应用举例

材　料	应　用　举　例
稀土球墨铸铁	60 mm 迫弹弹体，82 mm 迫弹弹体，100 mm 迫弹弹体，120 mm 迫弹弹体等
刚性铸铁	60 mm 迫弹弹体，82 mm 迫弹弹体，160 mm 迫弹弹体等

2. 球墨铸铁(以下简称球铁)

球铁是利用球化剂(一般用镁、稀土元素或稀土镁合金，我国主要是用后两者)对铁水进行炉前处理，以得到在铸态呈球状或团状的游离石墨和致密的金属基体，从而使铸铁有较高的强度和一定的延伸率。由于其组织和性能较刚性铸铁优良，所以球铁弹体的有效

破片数较刚性铸铁弹体的有效破片数有显著提高。目前我国已用稀土或稀土镁球铁替代刚性铸铁铸造 60 mm,82 mm,100 mm 及 120 mm 等口径的迫弹弹体,并且试验研究了球铁在榴弹弹体上的应用。

球铁的炉前处理包括球化处理和孕育处理。球化处理是在已经熔化并具有一定温度的铁水中加入适量的球化剂使石墨呈球形析出;孕育处理则是在球化处理后的铁水中加入强烈促进石墨化的物质——孕育剂,以防止产生白口组织,从而确保得到球状石墨。

球墨铸铁的基体组织有:铁素体、珠光体以及铁素体加珠光体三类。以铁素体为基体的球铁有高的塑性;以珠光体为基体的球铁有较高的强度;以铁素体加珠光体为基体的球铁则有适中的强度和塑性。铸造的迫弹弹体除要求强度高以外,还要求有一定的塑性,因而稀土球铁迫弹弹体的基体组织是以铁素体为主,并有部分珠光体。

由于我国炮弹和火箭弹生产中所用的球铁均有稀土元素,故称这种球铁为稀土球墨铸铁(简称稀土球铁)。

1.1.4 铸钢

铸钢用于对强度和韧性要求较高的零件,例如 40 mm 火箭增程破甲弹的喷管、130 和 180 mm 火箭弹的挡药板等。这些零件若用锻造毛坯,则往往因加工余量大而使材料利用率下降;若用铸铁毛坯,其强度和韧性又不能保证产品性能。

在选用铸钢时,要在满足产品性能的前提下考虑材料的铸造性能(如流动性、收缩性等)。

随着武器的发展,弹箭所用的黑色金属材料也有一定的发展。例如为提高弹丸和火箭弹战斗部的破片性能,需要提高破片的飞散速度和增加破片数量。提高破片飞散速度系靠提高炸药威力或装药量来实现,为此,就需要相应地提高弹体材料的强度,如有的国家已将弹体的屈服点从 245～392 MPa 提高到 980 MPa。提高破片数量,目前有两种途径,一是增加钢中的脆性合金元素,如碳、锰、硅、磷、硼的含量,如有的国家已建成了珠光体可锻铸铁、球墨铸铁、中碳锰钢、高碳锰钢、锰磷钢等高破片率铁、钢体系;另一途径是以铸造孕育方法,控制掺杂元素含量、形变热处理、产生网状晶界的热处理等工艺方法来控制破片,改进破片特性。

此外,火箭发动机所用的铸钢也在向着高强度、高韧性方面不断发展。

1.2 制造弹箭零件的有色金属材料

目前在弹箭生产中使用的有色金属主要有铜及铜合金和铝及铝合金两大类。此外,还有钨合金。

1.2.1 铜及铜合金

铜及铜合金主要用作弹带和药型罩材料。此外,对一些需要有高导电性的零件也选

用铜或铜合金。

弹带是弹丸的重要组成部分，由于使用性能和弹带压合时的冷压加工性能的要求，弹带材料必须有一定的强度、高的塑性和较低的硬度。目前制造弹带的金属材料有工业纯铜、铜镍合金和黄铜。

通常用作弹带的工业纯铜都具有一定的强度、高的塑性和良好的压合加工性能。

对于配用膛压较高、初速较大的弹丸如 100 mm 高榴、152 mm 加榴等弹丸所用弹带，要求有较高的强度，一般采用 H96 黄铜或铜镍合金 B5。

药型罩是破甲弹的关键性零件，目前通常采用冷轧退火的 T2 铜板制造，这主要是因为它的密度较大，强度较好，在超动载下塑性较高，能获得能量密度高的金属射流，破甲效果较强之故；此外，其冷成型性能良好也是主要原因之一。

铜板的机械性能应抗拉强度不小于 196 MPa，延伸率不小于 30%，表面光洁，晶粒细小而均匀，此外，对铜中杂质也应严格控制。

由于铜是价高而稀有的金属，在弹箭生产中用量又很大，因而各国都在寻找代用品，如用陶铁弹带、塑料弹带和复铜弹带等。

1.2.2　铝及铝合金

铝及铝合金密度小，可减轻弹重，故在弹箭生产中的应用日益增多，不仅一些非重要零件，而且有的火箭发动机中的一些重要零件如燃烧室、喷管等也采用了铝合金。

铝合金之所以得到广泛应用还因其具有一系列的其他优点，如一定的机械性能，良好的工艺性能和高的耐腐蚀性等。

在弹箭生产中变形铝合金和铸造铝合金均有应用，由于两者在机械性能和工艺性能上各有特点，所以具体应用也不同。

包括工业纯铝在内的热处理不强化型铝合金的强度较低，但塑性较高，焊接性能良好，耐蚀性强，主要用于载荷不大的零件。热处理强化型变形铝合金中常用的有以铝-铜-镁-锰系为基础的硬铝如 LY11、LY12，以铝-铜-镁-锌系为基础的超强度硬铝如 LC4、LC9；以铝-镁-硅系为基础的锻造铝合金如 LD2、LD 6、LD10 等。因它们的强度通过热处理可以有较大幅度的提高，所以用于制造负荷较大的零件。

铸造铝合金的强度和塑性往往较低，多用于制造负荷不大而结构形状比较复杂的零件。由于各种压力铸造新工艺的发展，压铸后已可通过热处理来提高铸件强度，使得铸造铝合金也可用于制造一些负荷较大的零件。

上述各种铝合金在弹箭中的具体应用见表 1-6。其中各种牌号的化学成分及机械性能可在有关手册中查阅。

表 1-6　铝及铝合金在弹箭上应用情况举例

合金牌号	应　用　举　例
L3	40 mm 火箭增程破甲弹内锥罩；180 mm 火箭弹防潮盖、导电环体等

续表

合金牌号	应 用 举 例
LF1	“K－D”空-地火箭弹导电销；107 mm 火箭弹及 130 mm 火箭弹的导电盖
LF21	40 mm 火箭增程破甲弹密封盖
LY11	40 mm 火箭增程破甲弹内锥罩；180 mm 火箭弹导电片
LY12	40 mm 火箭增程破甲弹风帽、弹壳、点火具体、燃烧室底、尾杆、支撑环；62 mm 反坦克破甲弹风帽、弹壳
LC4	62 mm 反坦克破甲弹燃烧室、中间室、喷管；“K－K2”空-空火箭弹中间底
LC9	“K－K2” 空-空火箭弹燃烧室、喷管
ZL7	40 mm 火箭增程破甲弹衬套
ZL104	40 mm 火箭增程破甲弹涡轮(所用材料与 ZL104 略有差别)
其他	40 mm 火箭增程破甲弹压铸尾杆(材料为 AL-8Si-1Zn-0.3Mn)

1.3 制造弹箭零件的高密度材料

穿甲弹的穿甲能力与弹芯密度有关，为提高穿甲能力，弹芯都用高密度材料制造。为确保穿甲能力，弹芯所用高密度材料必须具有足够的强度、硬度和韧性。目前穿甲弹所采用的高密度材料主要有碳化钨、钨基合金材料和铀基合金材料。

1.3.1 碳化钨

碳化钨弹芯系由碳化钨粉等材料用粉末冶金方法加工而成，即将它们按规定质量混合后加入一定的润滑剂进行压型、烧结，使其具有一定的强度和硬度(一般 HRC 应不小于 55)。

由于碳化钨的密度很大(为 19.3 g/cm^3)，所以它除具有高强度、高硬度外，尚有高密度的特点，故可用以制造穿甲弹弹芯。但碳化钨的韧性较差，在与目标碰击时会发生脆裂而影响其穿甲性能。此外，若弹芯长径比太大时还容易折断。

1.3.2 钨基合金材料

1. 钨合金

钨合金比碳化钨的韧性好，所以国外对它很重视。如美、英、德等研制的 105 mm 和 120 mm 尾翼稳定脱壳穿甲弹弹芯均采用钨合金制作。所用合金的成分为：w(W)：95%～97.4%，w(Ni)：1.4%～7.5%；w(Fe)：1.5%～1.6%；w(Cu)：0.2%～2.5%，其密度相当于钢的两倍多。

制作钨合金弹芯的方法是将钨-镍-铁粉末混合后进行烧结，经真空热处理和型锻，再经机械加工而成。

国外两种大口径钨合金（W7Ni3Fe；W3.5Ni1.5Fe）弹芯的性能水平分别为：R_m = 1 147 MPa，1 127 MPa；R_e = 1 107 MPa，1 068 MPa；A = 11.4%，6.8%；Z = 26%，14.1%。

为减小脆性并提高硬度，美国研究往钨粉中加入 5%～20%的金属黏合剂（成分为 w(Ni)：65%～90%；w(Er)：5%～20%；w(P)：5%～15%），并添加碳化钛、碳化钨或碳化钽，烧结后的钨合金密度为 14～16.5 g/cm^3，硬度为 HRC 40～45。

2. 钨基复合材料

由于复合材料弹芯表现出的良好穿甲性能，各国都非常重视，并不断推出新的结构和制造方法。

英国以传统钨或铀合金弹芯材料为基相，以金属、合金或陶瓷纤维、颗粒为增强相，采用高温烧结或浇铸的方法制造复合弹芯材料。

德国迪尔公司用环氧树脂、丙烯酸酯等作黏合剂，将高强度钨、钽或其他合金材料薄板卷制黏结成复合弹芯。其制造方法简单、成本低，并可在室温下制造。经不同热处理或锻造而得到侵彻性能高的材料。

美国正在研制的钨基复合弹芯材料的金属基体可以是液相烧结钨或钨合金，其中增强材料可以是添加铪元素的碳化钨丝及其类似的金属丝。增强钨丝可以是长丝、短丝或金属纺织体。据研究结果表明，复合弹芯用金属丝编织（四向编织）增强物效果最好。因为当复合弹芯碰击靶板时，这种多向编织增强物不容易成喇叭形散开，编织节也不易散开。而且，弹芯每一段都有编织增强体，即使弹芯前端部被烧蚀，其后面的编织增强体仍保持完整。每一段的增强作用都不会减弱，因此整个弹芯的穿甲作用也极大地增强了。

1.3.3　铀基合金材料

1. 铀合金

国外从 20 世纪 60 年代起开始研究将铀合金用于制造穿甲弹弹芯。目前已有显著成效。

铀合金弹芯的主要成分是从天然铀中提取或利用铀 235 作为核裂变材料时产生的副产品铀 238，即贫铀（贫铀中铀 238 的含量大于 99.28%）。

铀的密度很大，随温度和制作方法的不同而略有变化。一般取块状铀的密度平均值为 18.7 g/cm^3。金属铀被制成铀合金后，其机械性能将得到改善，且通过热压力加工和热处理后可进一步提高其物理机械性能。据报道，美国目前应用的铀合金主要是铀钼合金和铀钛合金。

美国用于 30 mm 航炮用穿甲弹、105 mm 尾翼式脱壳穿甲弹弹芯的铀钛合金是 U-

0.75 Ti 或 U-$\frac{3}{4}$Quad(为 U-0.75,Ti-0.75,Mo-0.75,Nb-0.75,Zr 合金)两种合金。

用铀合金制造穿甲弹弹芯有其有利方面,也有不利方面。有利方面是:密度大,穿甲能力强;铀和钨相比,除具有高强度、高密度、高硬度等一系列优点外,还具有钨所没有的韧性好、塑性高的优点;铀合金可避免碳化钨性脆易裂的弱点,因而可制成大长径比、高断面比重的弹芯;当弹芯与目标碰击时不致因脆裂而影响穿甲性能;铀可用普通真空熔炼成合金,其加工性(压力加工、机械加工等)比碳化钨好得多,而一般碳化钨只能用粉末烧结成型。不利的方面是:铀及其合金有微弱的放射性,其粉尘被吸入人体后,对内脏有害,所以要特别注意设置通风、空气过滤等装置。铀本身易氧化,细粉尘的铀易自燃,给加工、使用和保管都带来一定的不便。

2. 贫铀三元素合金

美国一直在 U-0.75Ti 的基础上,探索加入第三种合金,构成三元合金,以改善贫铀合金的性能。如 20 世纪 70 年代研究的 U-0.75Ti-0.25V 是通过加入钒细化碳化钛杂质,从而提高合金的强度,又不降低合金的延展性。近几年研究的 U-0.4Ti-0.3Nb 是以铌代替部分钛,以改善合金的淬透性,从而避免了淬火时形成中心缩孔,而又不降低合金的强度。U-0.75Ti-3.0Hf 是通过添加不与铀生成金属间相的铪,进一步对合金强化,而又不降低合金的延展性。

苏联用 U-Nb-Zr 三元合金作穿甲弹弹芯材料,铌和锆与钛、钼、铪元素一样在铀中有高的熔接度。但合金元素添加过多,会使铀合金密度降低得太多。添加铌还有利于提高铀合金的抗腐蚀能力。

3. 铀钨合金

铀钨合金是美国在研究用钨丝增强贫铀基材料的基础上发现的一种高钨合金。在通常的浇铸温度下,钨在铀中的溶解度约为 1.4%。如果把钨丝与贫铀金属一起置于坩锅中进行感应熔融,可浇铸成钨含量高达 35%的铀钨合金锭。加入 2%的钨粉即可大大提高合金的强度和弹性模量,弹性模量的提高弥补了贫铀合金作为穿甲弹材料之不足。钨粉含量超过 2%后,钨含量的增加仅使强度稍有递增。美国洛斯阿拉莫斯科学实验室所作的研究表明:溶解在铀中的钨相间沉淀引起了沉淀硬化,使屈服强度大幅度提高。

当钨的含量高于铀时,可看成是钨铀合金,此时合金的性能变化较大,弹性模量 E 提高较多。

4. 贫铀基复合材料

用钨丝增强的铀合金复合材料是一种高性能的弹芯材料,钨丝增强铀基复合材料屈服强度高达 1 300 MPa,高于目前任何铀钨合金的值。

美国研制成功的一种短钨丝增强的铀合金弹芯材料,是将钨丝成水平方向镶嵌在铀合金中制成的弹芯。这种钨丝增强的合金棒,从头部到尾部的增强钨丝体积是逐渐增加

的。头部钨丝体积百分比可低到 25%，而尾部则高达 50%。这种头部硬度较低、尾部硬度较高的复合弹芯有利于攻击多层复合装甲。

1.3.4　钼合金

钼合金熔点较高(熔点约为 2 610 ℃)，属于难熔金属材料。它具有良好的高温强度、高温延展性和对熔融玻璃侵蚀性能良好等特性。最高使用温度可达 2 000 ℃。可制成板、棒、丝、管、带、舟、异型件等各种形状。主要用于鱼雷发动机中的配气阀体、火箭喷管、燃气管道、喷管喉衬以及彩管玻壳熔炉用铂铑包覆搅拌器的主轴、导弹的结构件以及大炸高条件下的破甲弹药型罩等。

1.3.5　钽合金

钽合金是一种高强度、高熔点(熔点约为 2 985 ℃)、高冲击阻抗材料。较为典型的钽合金为钽钨合金，即 Ta4W 和 Ta8W。Ta4W 中包含有粗晶和细晶，在局部范围内细晶不够完全，而粗晶则比较粗大。Ta8W 为一种细结晶的硬化态材料。两种材料中细晶较好，粗晶较差。通过实验发现：两种钽钨合金的层裂强度随入射应力增加而增加。在 10 GPa 入射应力下，层裂强度为 4.7～5.8 GPa，而且粗晶粒钽化钨的层裂强度比细晶粒的要低；当碰撞速度约在 290 m/s 时，Ta4W 主要表现为韧性断裂，而 Ta8W 则表现为韧-脆断裂。当碰撞速度约为 500 m/s 时，两种钽合金均表现为完全的脆性断裂。随着钨含量增加，钽钨合金断裂强度会随之下降。一般来说，粗晶的抗断裂能力不如细晶优越。

目前，钽合金主要用于高性能电容器、核反应堆及 EFP 药型罩。

1.4　制造弹箭零件的工程塑料及模压成型

塑料由于其本身的特殊性能和原料来源丰富等原因，应用日益广泛。近年来，一系列具有高强度和其他特殊性能的塑料新品种陆续问世，并能成功地替代一些金属作为工程上的结构材料，所以，已被国民经济各部门广泛采用。在弹箭中，塑料零件也日益增多，例如 40 mm 火箭增程破甲弹、122 mm 火箭弹等都有一些塑料零件；又如某反坦克导弹有 80%的零件系由塑料制成，其中仅用酚醛玻璃纤维增强塑料 FX-501 制作的零件就有 38 件之多。

1.4.1　塑料的组成

塑料的主要成分是合成树脂。有的塑料系单一的合成树脂，大部分塑料除合成树脂外，还添加某些必要的添加剂。

1. 合成树脂

合成树脂是相对于天然树脂而言，来自自然界中植物或动物分泌而得到的一些有机

物质；例如松香、虫胶和琥珀等都是天然树脂，天然树脂产量少，性能也不理想，为寻求天然树脂的代用品，用化学方法人工地将低分子物质合成为各种高分子聚合物，即为合成树脂。

合成树脂的原料主要有煤、电石、石油、天然气及某些农副产品，其来源极其广泛。

2. 添加剂

不同的树脂，需根据各种技术性能和工艺要求以及外观上的需要加入不同的添加剂才能得到各种适用的塑料。常用的添加剂有：

(1) 填料和增强材料。有的树脂很脆，需加入一些填料以改善其性能；有的则在其中加入石墨、石棉纤维、玻璃纤维以及其他纤维等做增强材料，以弥补某些性能的不足。

(2) 固化剂。有些树脂在成型前必须加入固化剂才能成为永久固定的形状。

(3) 增塑剂。增塑剂是用来提高树脂可塑性与柔软性的一种添加剂。例如在聚氯乙烯树脂中加入邻苯二甲酸二丁酯等增塑后可变成类似橡胶一样的软塑料。

(4) 润滑剂。为防止塑料在成型过程中粘在模具或其他工具上以及为使制品表面光洁美观，某些塑料要加入少量润滑剂。

(5) 稳定剂。许多树脂在成型加工和使用过程中由于受热和光的作用，性能会变坏，加入少量稳定剂能阻滞这种作用。稳定剂有抗氧剂和紫外线吸收剂等。

此外，不同的塑料还有着色剂、阻燃剂、发泡剂等添加剂。

1.4.2 塑料的分类

塑料的分类方法有很多，根据其加工性能，塑料可分为热塑性与热固性两大类。

热塑性塑料系以热塑性树脂为基本成分的塑料。

热塑性树脂是指可反复受热软化(或熔化)和冷却凝固的树脂。在软化状态下能模塑成型，冷却至软化点以下时，能保持模具所赋予的形状，如聚氯乙烯、聚乙烯、聚苯乙烯等树脂。

由于热塑性塑料是以热塑性树脂为基本成分，故其加工性能与热塑性树脂有相似之处，即它也可反复受热成型和冷却凝固。

热固性塑料则是以热固性树脂为基本成分的塑料。

热固性树脂与热塑性树脂不同，前者经过一次受热软化(或熔化)和冷却凝固后即成为不熔的树脂，它由于在热和催化剂或热和压力的作用下发生化学反应而变得坚硬，所以，一般成型后再次受热时，不会重复软化。属于这类的有酚醛、环氧、呋喃、不饱和聚酯等树脂。

同样，由于热固性塑料系以热固性树脂为基本成分，故经加工成型后将变为不熔状态，不能反复成型塑制。

塑料也可从使用角度划分为通用塑料和工程塑料。通常把那些产量大、适用范围广的塑料称为通用塑料；把机械强度比较高，可以代替金属在机械结构上作为零部件的塑料

称为工程塑料。

1.4.3　工程塑料和金属材料性能的比较

工程塑料的种类很多，不同的塑料有不同的物理、机械性能。和金属材料相比，用工程塑料制造弹箭零件的主要优点有：

(1) 制品重量轻。工程塑料的密度一般在 0.83～2.2 g/cm^3 之间，只有钢铁的 1/9～1/4，铝的 1/2 左右。这对要求减轻自重的机械或武器弹药来说具有重要意义，很多火箭弹大量使用工程塑料即与此有关。

(2) 比强度高。某些工程塑料的比强度比一般金属材料要高得多。例如，用玻璃纤维增强的环氧树脂，其单位质量的抗拉强度比一般钢材要高 1 倍左右。

(3) 化学稳定性好。工程塑料一般对酸、碱等化学药品均有良好的抗腐蚀能力，其中聚四氟乙烯和聚氯醚尤为突出。

(4) 电气绝缘性能优良。几乎所有的工程塑料都有优越的电绝缘性能。火箭弹和反坦克导弹中很多零件(如绝缘垫、绝缘环、电线插座等)也都是利用了塑料的这一特性。

(5) 减摩、耐磨性能优良。不少工程塑料制造的零件可以在各种液体(包括腐蚀介质、油及水等)摩擦、半干摩擦和干摩擦条件下有效地工作。这一特性使塑料可以用于制造各种自润滑轴承、齿轮和密封圈等，在弹丸上则可用工程塑料制造弹带、闭气环等，从而减小对炮膛的磨损。

(6) 良好的成型加工性及经济性。塑料可用注射、模压、浇铸、挤压、缠绕等多种方法成型，且往往是一次成型，而金属制品总要经过几道、十几道，甚至几十道工序才能加工完成。

但是，和金属材料相比，工程塑料存在刚性差、成型收缩率大、温度变化时尺寸稳定性差、易发生老化等缺点。

1.4.4　热塑性塑料

热塑性塑料可用多种方法直接加工成所需形状的制品，且工艺简便、设备简单、成本低廉。但和热固性塑料相比，其强度、刚度、耐热性及尺寸稳定性一般均较差(有些缺点可通过纤维增强的途径得到适当改善)。常用的热塑性塑料有聚酰胺(尼龙)、ABS、聚碳酸酯、聚四氟乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚砜、聚氯醚等。

1. 聚酰胺(尼龙)

它具有优良的机械性能，经纤维增强后其强度和硬度还能进一步提高。此外，其耐磨、减摩性能也非常突出。

尼龙的品种很多，有尼龙 4、5、6、7、8、9、11、12、13、66、68、610、1010 等。此外还有上述品种的二元、三元共聚物，它们各有其特点和应用。

在弹药生产中可用尼龙做某些弹带或低膛压闭气环。国外已从原来只用于小口径低

膛压炮弹发展到用于高射速、大口径炮弹上。所用的尼龙弹带主要是尼龙 12、尼龙 11 等。应用表明，塑料弹带不仅可改善弹道性能，并能减轻对火炮的烧蚀。我国对尼龙弹带的研究也做了不少工作，如用尼龙 1010 做某些低膛压炮弹的闭气环等。

2. ABS(苯乙烯—丁二烯—丙烯腈共聚物)

ABS 塑料的综合性能比较好，冲击强度高，在热塑性塑料中尺寸稳定性较强，易于成型加工，耐热和耐蚀性能也较好，成本低廉，且经玻璃纤维增强后性能可有较大的提高，所以在工业上得到了广泛的应用。62 mm 单兵反坦克火箭弹中的绝缘板即用此料。

3. 聚碳酸酯

聚碳酸酯的品种很多，目前大规模生产的是一种以“双酚-A”为基础的聚碳酸酯。

聚碳酸酯的突出优点是具有高的冲击韧性。它的强度与尼龙接近，但冲击韧性却比尼龙高 10 倍左右。此外，其成型精度高，尺寸稳定性好，耐磨性也好，工作温度范围宽(从 −100 ℃～130 ℃)，所以应用较广。

在弹箭生产中利用聚碳酸酯的上述优点可制作形状复杂、尺寸精度要求高或受冲击载荷较大的零件，如某反坦克导弹的验电器、片簧盖，电机底盖以及某些弹丸的弹带或闭气环。有的国家并进行了对聚碳酸酯经玻璃纤维增强后制作某些弹体和旋转破甲弹药型罩的研究工作。

4. 氟塑料

氟塑料是含有氟原子的塑料的总称。它是 20 世纪 40 年代开始发展起来的一类特种高分子材料，由于其综合性能优异，产量与品种都得到了迅速的发展，其中聚四氟乙烯就是目前应用较广的品种之一。

聚四氟乙烯最突出的性能是它有极高的化学稳定性和耐高温、低温的能力以及极低的摩擦系数。其化学稳定性是目前已知塑料中最优越的一种，甚至超过贵金属(金和钼)、玻璃、陶瓷，几乎任何浓度的强酸、强碱和强氧化剂在高温下也不能对它发生任何作用，因此，被称为“塑料王”，它可在 −195 ℃～250 ℃温度范围内长期使用而不降低其机械性能；同时，它又是塑料中摩擦系数最低的一种。此外，其绝缘性能也很好，最大缺点是成型性较差，价格较贵。

在弹丸生产中，主要是利用其摩擦系数小的特点用于制作弹带。

1.4.5 热固性塑料

热固性塑料的组分中除合成树脂外，一般都含有填料。按填料的不同，热固性塑料有增强和不增强之分。

塑料中的填料为粉状时，因其对塑料强度无明显影响，故塑料为非增强塑料(电木就是在酚醛树脂中加入木屑作填料的非增强的热固性塑料)，这类塑料因其强度和韧性均较低，故在弹箭生产中只能制作一些受力较小的零件，如防潮塞、隔板之类。

用各种纤维如玻璃纤维、碳纤维等为填料时，塑料的拉伸、弯曲、压缩和冲击等强度均

能提高，同时，脆性降低、收缩减小，并可防止开裂，故称之为增强塑料。受力较大的构件主要采用这种塑料。

当塑料以玻璃纤维及其制品（玻璃布，玻璃带，玻璃毡等）为增强材料时，统称为玻璃纤维增强塑料。因其强度高、质地硬，比强度可超过高级合金钢，故得名“玻璃钢”，它是目前我国使用得最多的热固性增强塑料。除玻璃纤维增强塑料外，还有性能优良的碳纤维、硼纤维以及石墨纤维等增强塑料。

玻璃纤维增强塑料是由合成树脂、玻璃纤维及其制品以及其他辅助材料组成。

合成树脂是玻璃纤维的黏结剂，其品种很多，目前用得较多的是酚醛、环氧和聚酯树脂等。辅助材料则主要是使树脂固化、增加韧性、便于施工及降低成本之用。

玻璃纤维是由熔化的玻璃液以极快的速度拉成非常细的丝。强度低而性脆的玻璃经拉成细丝后即成为光滑柔软而强度较高的纤维。它与天然纤维和化学纤维一样，可以纺纱，织成布、带等织物。

玻璃纤维及其制品经浸渍混有其他辅助材料的合成树脂后即成玻璃纤维增强塑料。目前玻璃纤维的种类虽然很多，但在弹箭生产中应用的主要是酚醛和环氧两种玻璃纤维增强塑料。

1. 酚醛玻璃纤维增强塑料

酚醛玻璃纤维增强塑料所用的合成树脂系酚醛树脂。酚醛树脂是以苯酚（或甲酚、二甲酚）与甲醛为原料，在酸性或碱性催化剂存在下缩聚而成。

酚醛玻璃纤维增强塑料具有耐热性高（能在 150 ℃～250 ℃范围内长期使用）、强度高、耐腐蚀、尺寸精确、稳定性好及耐烧蚀等优点。此外，其原料丰富，价格便宜，对中小型零件成型较容易，所以广泛用于多种工业，也是火箭弹中应用得最多的玻璃纤维增强塑料，很多重要受力构件如喷管、挡药板、隔热盖、喷嘴等均可用酚醛玻璃纤维增强塑料制造。

酚醛玻璃纤维增强塑料产品有玻璃布板及玻璃纤维模压塑料两大类，在弹箭生产中用的主要是后者。按玻璃纤维形式的不同，玻璃纤维模压塑料又有两种不同的产品：一种是由短纤维呈散乱蓬松状态均匀而无定向地分布在树脂之中，机械性能基本没有方向性；一种是平行排列的长纤维分布在树脂之中的连续带状塑料，它在顺纤维方向（纵向）的抗拉强度很高，而在另一方向（横向）的抗拉强度则很低，使用时可根据制品受力要求的不同，将纤维适当地组合排列，热压成某一方向上具有较高抗拉强度的制品。

2. 环氧玻璃纤维增强塑料

环氧玻璃纤维增强塑料是由环氧树脂或改性环氧树脂与玻璃纤维或玻璃纤维制品采用模压、缠绕或喷射等成型方法制成。由于环氧树脂具有优良的综合性能，所以用它制成的玻璃纤维增强塑料具有较高的机械强度、较小的收缩率和良好的耐化学腐蚀性能，故可作为制造机械构件、大型壳体和高压容器等的材料。与酚醛玻璃纤维增强塑料相比，其主要优点是环氧树脂在较小的压力下即能固化成型，故宜于制做酚醛玻璃纤维增强塑料不

易成型的大构件。用于火箭发动机时，可以根据发动机的受力状况用浸渍环氧树脂的玻璃纤维以最有利的参数用缠绕而不是模压的方法成型，且可在不太高的温度（如 100 ℃左右）下固化。由于玻璃纤维增强塑料能大幅度地减轻发动机的重量，故其在弹箭生产中，尤其是在火箭弹生产中有很大的实用价值。

由于塑料具有一系列的优点，用它制作的零件不仅能代替金属、提高生产率和降低成本。并且塑料的性能在许多方面为金属所不及，所以它已成为工业部门不可缺少的材料。

当然，和其他材料一样，塑料在某些方面也有不足之处，加之，不同的塑料又有不同的性能，因此，在使用塑料时必须根据零部件的性能要求及工作条件等合理地选择。

1.4.6 塑料成型及加工方法

1. 成型方法

塑料的成型方法很多，常用的有注射、挤出、吹塑、浇铸、模压成型等。根据所用材料及制品的要求选用不同的成型方法。

(1) 注射成型（又称注塑成型）。将塑料原料在注塑机料筒内加热熔化，通过推杆或螺杆向前推压至喷嘴，迅速注入封闭模具内，冷却后即得塑料制品。注射成型主要用于热塑性塑料，也可用于热固性塑料。能生产形状复杂、薄壁、嵌有金属或非金属的塑料制品。

(2) 挤出成型（又称挤塑成型）。塑料原料在挤出机内受热熔化的同时通过螺杆向前推压至机头，通过不同形状和结构的口模连续挤出，获得不同形状的型材，如管、棒、带、丝、板及各种异型材，还可用于电线、电缆的塑料包覆等。挤出成型主要用于热塑性塑料。

(3) 吹塑成型。熔融态的塑料坯料通过挤出机或注射机挤出后，置于模具内，用压缩空气将此坯料吹胀，使其紧贴模具内壁成型而获得中空制品。

(4) 浇铸成型。在液态树脂中加入适量固化剂，然后浇入模具型腔中，在常压或低压及常温或适当加热条件下固化成型。此法主要用于生产大型制品，设备简单，但生产率低。

(5) 模压成型。将塑料原料放入成型模具内加热熔化，通过压力机对模具加压，使塑料充满整个型腔，同时发生交联反应而固化，脱模后即得压塑制品。模压成型主要用于热固性塑料，适用于形状复杂或带有复杂嵌件的制品，但生产率低，模具成本较高。

2. 加工方法

塑料制品可以进行二次加工，主要方法有机械加工、焊接、黏接、表面喷涂、电镀、镀膜等。

塑料可进行各种机械加工，由于塑料强度低、弹性大、导热性差，塑料切削加工时刀刃应锋利，刀具的前角与后角要大，切削速度要高，切削量要小，装夹不宜过紧，冷却要充分。

1.4.7　弹箭零件的模压成型

工程塑料具有密度小、导热性低、耐腐蚀等优点，因此在火箭弹设计中被广泛应用。

1. 弹箭零件模压成型的性能特点及对工艺的要求

1）火箭弹塑料压制零件的性能特点

火箭弹中的挡药板、喷管等零件，在工作过程中要经受高温、高压、高速燃气流的冲刷，同时有的火箭弹在飞行时高速旋转，受到很大的离心作用，并要有良好的通气性，这就要求制造挡药板、喷管等零件的材料要有足够的强度、刚度、良好的化学稳定性，导热性低、耐烧蚀、耐瞬时高温。用玻璃纤维增强的酚醛热固性塑料（FX-501）制造的挡药板、喷管，不但能满足产品的上述要求，而且由于其密度小，强度高使产品自重减小有利于产品性能的提高。由于一次成型，减少了加工工序，提高了劳动生产率，取代了特种金属材料，因而成本下降，适合大量生产。

2）对工艺的要求

要制造出理想的产品，除合理地选用塑料材料外，还必须考虑塑料件的成型工艺性。因塑料件的成型和模具设计有直接的关系，只有塑料件的几何形状适合成型工艺要求，才能设计出结构合理的模具，加工出合格的产品。

为确保塑料件的质量，塑料件设计对制件结构的工艺性保证要求如下：

（1）避免内外凹陷。塑料制品的成型工艺与机械加工不同，必须考虑制品成型后能从模具中取出，若有内外凹槽就难以脱模。

（2）脱膜斜度。塑料制件，由于塑料冷却时要收缩，塑料件紧缩在凸模或成型芯上不易脱模，为此必须有脱模斜度，其大小取决于塑料件的形状、壁厚及塑料的收缩率。

（3）壁厚均匀性。塑料制品的壁厚对制品的质量有较大影响。如制品壁厚有急剧过渡，局部加厚或减薄，由于压制时收缩不均，而产生内应力，往往造成制件翘曲、起泡和裂纹。因此要求塑料件的壁厚尽可能均匀，连接处的壁厚不能相差太大，应用圆弧连接。若结构要求必须有不同壁厚时，其过渡必须平缓或在较厚部分做成空心。

各种塑料件都有一定的厚度，以确保其应有的机械强度。制件壁若太厚不仅浪费原材料，增大塑料件成本，还会延长固化时间。因此为了提高制件的强度，单纯增加壁厚是不恰当的，应采取增补加强筋的措施，使制品壁厚均匀。

（4）圆角。在制件的内外转角处都应为圆角过渡，尽量避免锐角或直角，这样可避免应力集中，并可改善塑料在压制中的流动性。同时通过改变圆角半径的大小，也可使制件各转角处厚度均匀。

（5）嵌件。由于产品的要求，塑料件中常镶嵌不同形状的金属嵌件，以提高制件的机械强度及使用性能。

① 为了增加塑料和金属嵌件间的结合力，使嵌件牢固地嵌于制品中，嵌件与塑料的接触表面加工成环形沟槽、滚花或其他增加结合力的形状。

② 为避免收缩产生的应力而引起塑料破裂，嵌件所有的尖角部位都应加工成圆角。

③ 金属嵌件周围的塑料层不能太薄，否则塑料件会因冷却收缩而破裂，其最小厚度应符合表 1-7 规定。

表 1-7 嵌件内外塑料层最小厚度

金属嵌件直径/mm	塑料层最小厚度/mm
≤4	1.5～2
>4～8	2～2.5
>8～12	2.5～3
>12～16	3～4
>16～25	4～5

④ 嵌件高度不应超过其直径的两倍，高度应标注公差。

⑤ 嵌件应能牢固地固定在模具上，为此在嵌件上应有凸缘，凸缘的凸出部分为 1.5～2 mm，如图 1.1 所示。

(6) 支撑面。为提高制件的基面支撑效果，一般不采用整个底平面作为支撑面，而是将塑料件底面设计成凹形或设置加强筋。

(7) 孔。制件上往往有各种形状的孔，如通孔、盲孔、螺纹孔等，应尽可能开设在不减弱制件机械强度的部位，孔的形状应力求不使模具制造工艺复杂化。热固性塑料孔间距、孔边距与孔径见图 1.2、表 1-8、表 1-9。

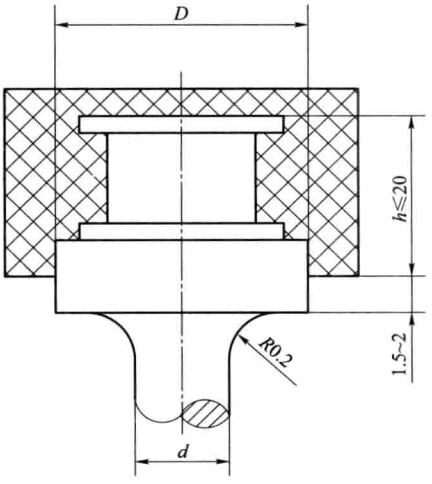


图 1.1 嵌件

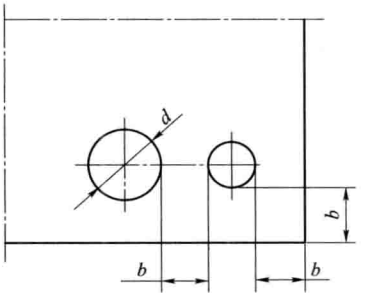


图 1.2 孔边距与孔径关系图

表 1-8 孔径与孔间距、孔边距的关系

孔径 d/mm	<1.5	1.5～3	3～6	6～10	10～18	18～30
孔间距、孔边距 b/mm	1～1.5	1.5～2	2～3	3～4	4～5	5～7

表 1-9　孔径与孔深的关系

类　别		孔的深度	
		通　孔	不通孔
压	横孔	2.5 d	<1.5 d
塑	竖孔	5 d	<2.5 d
挤塑或注塑		10 d	4～5 d
注：采用纤维塑料时，表中数值乘系数 0.75。			

(8) 螺纹。塑料螺纹的机械强度比金属螺纹低，成型过程中螺距易变化，因此螺纹直径一般不应小于 2 mm。为了增加成型螺纹的强度，对螺纹的进刀与退刀长度，应加以规定，见表 1-10。

表 1-10　螺纹退刀尺寸

螺纹直径 d_0/mm	螺距 s/mm		
	≤1	1～2	>2
	退刀尺寸/mm		
≤10	2	3	4
>10～20	3	4	5
>20～30	4	6	8
>30～40	6	8	10

(9) 尺寸精度。产品设计力求尺寸公差的精确，以满足产品性能的要求。但由于塑料制件尺寸的收缩率不是常数，而是受材料成分、制件几何形状、模具结构以及成型工艺条件等因素的影响，在一定范围内变动。对于新设计的塑料件，要认真分析产品尺寸公差值，看其是否能够塑制出合格品。

塑料制品的尺寸公差用公式表示为：

$$\Delta \geqslant \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$$

式中　Δ——制品尺寸公差，mm；

δ_1——收缩率的变动范围所引起的尺寸偏差，mm；

δ_2——模具制造公差，mm；

δ_3——模具磨损量，mm。

在进行制件设计时必须考虑塑料的特点，不能照搬金属件的尺寸要求。塑料件的形状和尺寸应尽量采用圆角，避免内外凹陷，壁厚尽可能一致，孔与孔或孔与边缘应留有足够的距离。为提高制件的强度可适当增加加强筋，对大型制件要有一定的脱模斜度等。

工艺应根据产品图和技术条件，选择合适的成型方法并设计模具，制订出合理的工艺和确定工艺参数，并进行工艺试验。试验合格后，制订正规工艺。

2. 弹箭零件的塑料压制

1) 57-Ⅱ航空火箭弹挡药板的塑料压制

(1) 挡药板塑压工艺流程。

压制坯片⟶压制成型⟶去毛刺⟶检验⟶包装。

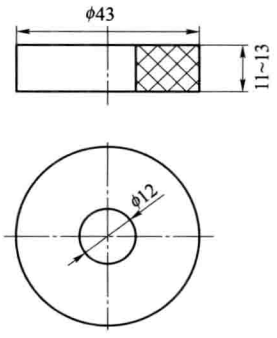


图 1.3 坯片

压制坯片前如遇原材料水分及挥发物含量大时，投产前要进行预烘处理，预烘处理的温度和时间应根据原材料的具体情况而定。

① 压制坯片。将麻状的酚醛玻璃纤维塑料(FX-501)压制成易于装入模腔的坯片(见图 1.3)。

压制坯片的要求：

称料：每份 18～20 g；

模具温度：40 ℃～30 ℃；

保压时间：15 s；

单位压力：30～40 MPa。

压坯采用固定式四槽模，在 Y71-100 型液压机上，由顶杆顶出毛坯。

② 压制成型。压制成型的工步有：加料、闭模、排气、固化、脱模、模具的清理等。

加料：将毛坯孔对准型芯放入模腔，为保证毛坯的质量，加料前重新称重，每个坯片质量为 18～20 g。

闭模：加料后立即闭模，应尽量加快空行程速度，以避免塑料过早固化。工作行程速度放慢，使模腔内的塑料软化比较均匀，防止提早产生高压，且可充分排气。闭模速度也不宜过慢，过慢易在分型面处塑料提前固化，增加分型面的厚度，影响制品的尺寸，闭模时间一般为 8～12 s。

排气：压制热固性塑料时，在模具闭合后有时需将阳模再抬起一定的高度，然后再闭模，连续进行几次，以便排尽模腔内的气体，排气可缩短固化时间，而且有利于制品性能和外观质量的提高。排气次数和时间视原材料水分和挥发物含量的大小而定。压制挡药板的排气次数为 1～2 次，排气时间 5～8 s。有时原材料水分和挥发物含量很低而干燥，也可不进行排气。

固化：热固性塑料的固化是保温一段时间，以待其性能达到最佳状态。模内的固化时间一般为 30 s 至数分钟不等。固化时间取决于塑料的类型、制品的厚度、物料的形式以及预热和模具温度，一般通过试验来确定。挡药板的固化时间为 8～9 min。

脱模：固化后，使制品与塑模分离的过程为脱模。脱模主要靠顶杆来完成。

模具清理：脱模后，用铜铲清理黏附在模具上的残留塑料，并用压缩空气吹净模具，然后在模具成型表面涂脱模剂。该工艺用油酸做脱模剂。

(2) 57-Ⅱ航空火箭弹挡药板压制应注意的问题。

① 原材料问题。挡药板采用酚醛玻璃纤维塑料(FX-501)。FX-501 塑料原材料中的挥发物含量为 3.0%～7.0%,储存期为 6 个月,若出厂后就投入生产,极易产生废品。因新料中水分和挥发物含量大,树脂与玻璃纤维流动不同步,易造成树脂和玻璃纤维各自集中而产生废品。另外,压制时产生大量的气体不易排出,易生成气孔、疏松等缺陷。为此新出厂的玻璃纤维料,要先进行预烘处理,使水分和挥发物含量控制在 4.5%左右。预烘处理的温度和时间视原材料的具体情况,通过模压试验而定。

② 压制压力。压制压力是由压机通过模具对塑料施加的压力,使塑料充满型腔和进行固化。通常情况下,根据制品的深度、密度、压缩率和流动性等因素确定压力。挡药板要求有较高的强度和密度,所以需要较高的模压压力,其模压压力为(45±5)MPa。

③ 压制温度与保压时间。压制温度与保压时间有着密切的关系,在一定范围内,压制温度越高,保压时间越短。因此,提高温度对缩短压制周期和提高制品质量有一定好处。但模压温度过高,易造成塑料烧焦,对于厚度大的制品,易造成内部尚未完全固化,表面已过烧的现象。反之,如压制温度过低,则增长模压周期、制品固化不完全、表面灰暗、性能下降、质量不能保证。因此,模压温度与保压时间的选择,必须通过模压试验选出最佳模压温度和保压时间。

通过多年模压生产实践,确定挡药板模压温度为(166±5)℃,保压时间为 8～9 min。

④ 57-Ⅱ航空火箭弹挡药板成型时产生废品的类型、原因及解决办法见表 1-11。

表 1-11　57-Ⅱ航空火箭弹挡药板成型时产生废品的类型、原因及解决办法

废品的类型	产生的原因	解决的办法
起泡或鼓起	塑料中水分和挥发物含量太大	将坯片进行干燥或塑料经预烘处理
	塑料硬化不完全,温度低,保压时间短	提高模温或延长保压时间
	模温过高,使塑料中某些成分气化或分解	降低模温,保持正常控制温度
	模腔内的气体不能逸出	清理排气槽,使之畅通或增加排气槽
	压力太低,气体释放不出来	提高压力
缺料	加料称量不足	标准料量
	塑料流动性大或小	改善工艺条件,调整塑料的流动性
	压力不足	提高压力
	将料散失模外	精心装料
	操作太慢,部分料过早硬化	调整合模速度,控制模温
	脱模剂用量过多	使用脱模剂要均匀、适量
树脂集中	新料树脂嫩,压制时树脂与纤维流动不同步	新料进行预烘处理促使树脂与纤维同步流动

续表

废品的类型	产生的原因	解决的办法
制品表面无光泽	温度过低或过高	控制模温
	闭模速度太快	放慢闭模速度
	硬化不完全	调整延长硬化时间
高度超差	加料量大	适当减小加料量
	压力不足	适当提高压力
	模具型腔尺寸不当	调整模具型腔尺寸

2）122 mm 火箭弹喷管、尾管前后段、导电盖等塑压制造

（1）压制工艺过程。

① 准备工作：称重、塑料及金属嵌件预热；

② 安装嵌件；

③ 装料；

④ 闭模、排气；

⑤ 固化；

⑥ 脱模；

⑦ 清理模具；

⑧ 修飞边、自检。

（2）压制过程中的注意事项。

① 塑料预热、嵌件预热。预热不但能增加塑料的流动性，降低压制压力，减少压模磨损，提高设备利用率，节约塑压时间，而且可提高制件的外观质量、物理机械性能和尺寸稳定性。

压制喷管、尾管前后段、导电盖等较大金属嵌件的制品时，为了减小嵌件与塑料收缩率的差异，提高制件强度，压制前嵌件一定要预热。

② 后处理。制件出模后，为防止因冷却发生变形，可将它放在与模具型腔形状类似的模内缓慢冷却。为防止冷却不均，引起塑料件内应力和尺寸不稳定性，可将塑料件放在烘箱中缓慢冷却。

（3）成型工艺条件。

① 材料：FX-501、FX-501-1。

② 预热温度：塑料预热 80 ℃～120 ℃，时间 5～10 min；嵌件可在加热板上预热。

③ 成型温度：(160±5) ℃。

④ 成型压力：(45±5) MPa。

⑤ 保温时间：见表 1-12。

表 1-12　制件生产中的保温时间

产品名称	隔热盖	前支架	尾管前段	尾管后段	喷　管	导电盖
保温时间/min	8～12	8～10	10～15	10～12	13～18	10～15

(4) 122 mm 火箭弹塑压件生产中出现的问题及解决办法。

122 mm 火箭弹共有八个塑压件，其中四个是带有金属嵌件的塑压件。这些塑料嵌件的最大特点是金属件内嵌塑料，和一般塑料件内嵌金属件正相反。这给生产带来一定困难。

① 隔热盖。该零件(见图 1.4)装在战斗部底部，主要起隔热作用。该件为纯塑料件，最大的特点是直径大，比较薄，最厚处为 5 mm，最薄处为 2 mm，且外圆有 M114.8×2 的外螺纹，不平度要求不超过 0.5 mm。

试制初期，由于制件截面厚度不同，收缩不均产生的内应力，造成零件严重翘曲，为此曾采用石英砂袋压整冷却，但未完全校正。最后调整工艺参数，增加保温时间，按经验 1 mm 厚的制件保温时间应为 1～1.5 min，此件按最厚 5 mm 计算，保温时间应为 5～7.5 min，为了使塑料在压模中硬化进行得更加充分，将保温时间延长到 8～12 min。考虑到制件从热的压模中取出后，它的硬化过程还在继续，为此采用了小型手摇螺旋压整冷却器，减小了制件的翘曲，保证了生产的顺利进行。

② 尾管前段和尾管后段。122 mm 火箭弹采用了长尾管结构，在尾管前、后段本体内镶嵌 FX-501 酚醛玻璃纤维塑料(见图 1.5)。

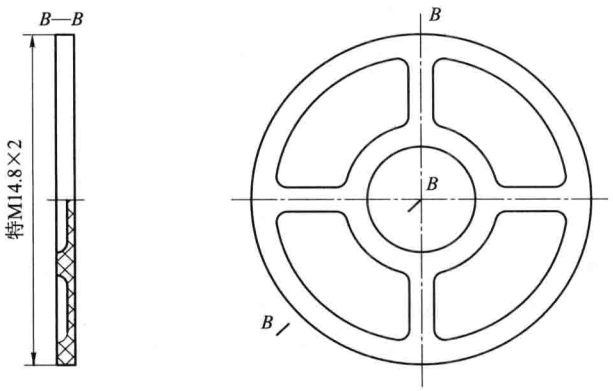


图 1.4　隔热盖

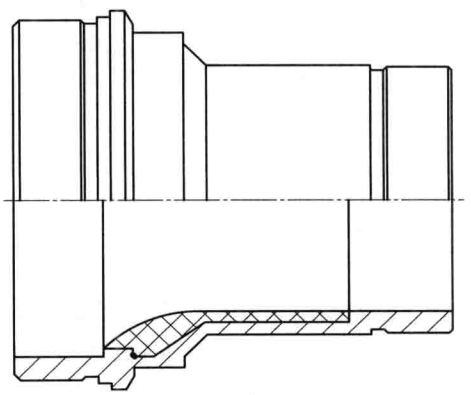


图 1.5　尾管前段

由于塑料的收缩率比金属件大，因此金属和塑料间拉缝现象严重。尤其是尾管前段，其内壁厚度最大为 2.2 mm，最小处为 1.8 mm，嵌件内腔除扩张段有 ϕ102 mm 的环形沟槽外，在 70 mm 高度上其余都是粗糙度 Ra 为 6.3 μm 的面，由于金属和塑料的膨胀及收缩相差大，制件脱模后在室温中自然冷却，尤其是冬季脱模后的制件温度仍很高，而室温低于 15 ℃，温差较大，出现此种疵病的概率更大，甚至在静止试验和靶场飞行试验时，尾

管前段内壁的塑料有被燃气流冲刷掉的现象。

根据试生产中出现的问题，对产品结构进行了修改。为增加塑料和金属的结合力，将嵌件与塑料接触表面的粗糙度，由原 Ra 6.3 μm 改为 Ra 12.5 μm 以下，尾管前段内孔 $\phi 80^{+0.46}_{+0}$ 与斜面相交的尖角改为 $R20$ 的圆角，这样可以避免应力集中，改善塑料的流动性，使塑料层截面圆滑过渡。再适当增加成型压力，使制件有较均匀的密度。出模后的塑压件放在带盖的搬运箱内，让其缓慢冷却，这样制件开裂现象减少，经静止试验和飞行试验，没有再出现内壁塑料被燃气流冲刷掉的现象。

另外尾管前段和尾管后段，虽然制件的塑料层壁厚较小，但高度都在 70 mm 以上，所以保持硬化时间最好在 12～15 min，时间太短，制件除因固化不完全出现裂纹外，卸模时常出现尾部塑料被上模拽掉的现象。在条件许可的情况下，上模与制件的分离最好在机外再延长 10～15 min，这样塑压件质量会更好。

③ 喷管。为了减轻火箭弹的消极质量，喷管的扩张段用 FX-501 酚醛玻璃纤维塑料一次模压成型，见图 1.6，既能保证喷火孔的同心度还可以减小发动机的推力偏心。

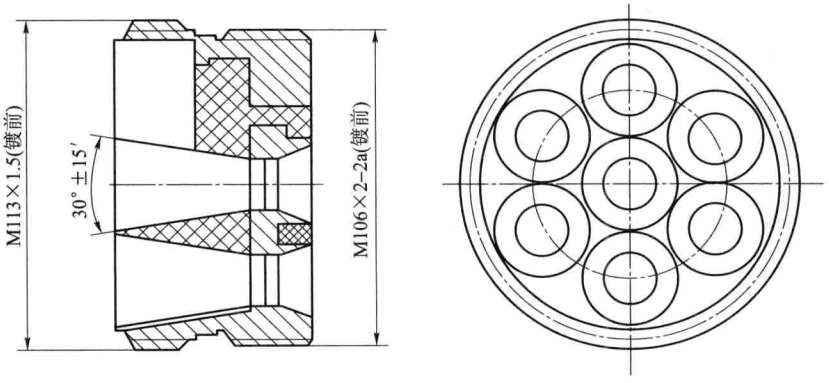


图 1.6 喷管

喷管座的镀锌钝化处理主要是为了防锈。工艺摸底时是先加工好 M113×1.5 和 M106×2 的外螺纹，再进行镀锌表面处理，然后再模压塑料。这样不但使模具结构复杂化，还常因螺纹上挤入塑料，给卸模和清理制件带来困难。同时由于制件较大，试验成型需 90 t 压力，引起螺纹变形，通螺纹环规通不过。为此，调整为先压塑料后加工螺纹，杜绝了螺纹变形和压制过程中的螺纹碰伤。

工艺模底阶段存在的最大问题是难于成型。当时采用 FX-501 麻状料压制，由于制件较大，用料多，加大了模具的加料室，不利于模具加热；加之材料预热不均匀，料的流动性差，所以难于成型。后改用经挤塑后的块料，模具的三个浇口开在三个喷火孔交接面上，由于平面较小，使浇口直径受到限制，有时温度过高，出现早期局部固化，造成制件下部缺料而报废。后经再次修改模具，把浇口开在喷火孔的外缘，注口由原直径 4 mm 的 3 个，改为直径 6.5 mm 的 6 个，同时降低了成型温度，制件的良品率才得以提高。

④ 导电盖。导电盖采用不锈钢导电片为嵌件，采用 FX-501-1 酚醛玻璃纤维塑料模压成型，见图 1.7。

在试制过程中，存在的主要问题是螺纹部分收缩不均造成椭圆，常出现通螺纹样柱不通。后采取制件出模后置于螺纹芯子上冷却，制件的不圆度减小，通螺纹样柱正常通过。另一问题是在弧形过渡处出现裂纹的制件较多，其主要原因是制件底部较薄，壁较厚，易产生应力集中，同时卸模时，使用卸模工具不当，使制件底部受力不均，造成弧形过渡处的裂纹现象。为了减少应力集中，将产品图原 $R4$ 修改为 $R7$、使 R/T 的比值（R 为内圆角半径，T 为制件厚度）由原来的 0.44 加大到 0.77，从而提高了制件良品率。

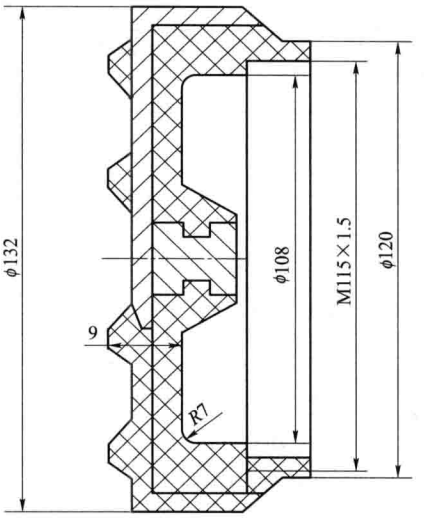


图 1.7　导电盖

1.5　复合材料

复合材料是由两种或两种以上在物理或化学上性质不同的材料组合起来而得到的一种多相固体材料。它保留了各自的优点，得到单一材料无法比拟的综合性能，是新型的工程材料。

不同的非金属材料可以相互复合，非金属材料与金属材料可以复合，不同的金属材料之间也可以相互复合。

复合材料是多相体系，一般分为两个基本组成相：一是连续相，称为基体相，主要起黏结和固定作用；另一为分散相，称为增强相，主要起承受载荷作用。增强相常用高强度、高弹性模量和脆性大的材料，如玻璃纤维、碳纤维、硼纤维，也可用金属和陶瓷等。基体相常用强度低、韧性好、低弹性模量的材料组成，如树脂、橡胶、金属等。

1.5.1　复合材料的特点和分类

1. 复合材料的特点

（1）比强度、比模量高。比强度、比模量是指材料的强度或模量与相对密度之比。复合材料的比强度和比模量都比较大。如碳纤维和环氧树脂组成的复合材料，它的比强度是钢的 7 倍，比模量比钢大 3 倍。这对高速运转和承受复杂载荷的构件具有重大的意义。表 1-13 列出了常用金属材料和复合材料的比强度、比模量的性能比较。

表 1-13 常用金属材料与复合材料的性能比较

类别	材料名称	相对密度 /(g·cm^{-3})	抗拉强度 /(MPa×10^3)	弹性模量 /(MPa×10^5)	比强度 /(m^2·s^{-2}×10^6)	比模量 /(MPa×10^5)
金属材料	钢	7.80	1.03	2.10	0.13	0.270
	铝	2.80	0.47	0.75	0.17	0.260
	钛	4.50	0.96	1.14	0.21	0.250
复合材料	玻璃钢	2.00	1.06	0.40	0.53	0.210
	碳纤维Ⅱ/环氧	1.45	1.50	1.40	1.03	0.965
	碳纤维Ⅰ/环氧	1.60	1.07	2.40	0.67	1.500
	有机纤维 PRD/环氧	1.40	1.40	0.80	1.00	0.570
	硼纤维/环氧	2.10	1.38	2.10	0.66	1.000
	硼纤维/铝	2.65	1.00	2.00	0.38	0.750

(2) 抗疲劳性能好。大多数金属材料的疲劳极限是其抗拉强度的 40%～50%，而碳纤维增强的复合材料则可高达 70%～80%。这是因为复合材料中，基体和增强纤维间界面能够有效地阻止疲劳裂纹的扩展，因此，具有较高的疲劳极限。

(3) 减摩、耐磨、自润滑性能好。用塑料和钢板制成的复合材料，可作轴承材料。由于钢板的增强作用，再加上塑料摩擦系数较低，有的还有自润滑性能，因此塑料轴承的耐摩擦磨损性、尺寸稳定性以及承载能力都能显著提高。

(4) 减振性能好。结构的自振频率除与结构本身的质量、形状有关外，还与材料比模量的平方根成正比。材料的比模量大，则其自振频率也高，可避免在工作状态下产生共振。纤维增强复合材料的自振频率高，同时，纤维与基体的界面具有吸振能力，阻尼很高。所以即使产生振动，也会很快衰减。

(5) 化学稳定性好。选用耐蚀性良好的树脂为基体，用高强度纤维作增强材料，能耐酸、碱及油脂等的侵蚀。

此外，复合材料还有其他特殊性能，如隔热性及特殊的电、光、磁等性能。但是复合材料抗冲击性能差，横向强度和层间剪切强度低，成本也较高等。

2. 复合材料的分类

复合材料的分类，目前国内尚无统一的标准。通常可按以下方法分类：

(1) 按结构特点。复合材料一般可分为纤维复合材料、层叠复合材料、细粒复合材料和骨架复合材料等。其中以纤维复合材料发展较快，应用最广。

(2) 按性能特点。复合材料一般可分为结构复合材料和功能复合材料。

因为复合材料一般是由增强材料和基体所组成，所以通常将增强材料的名称放在前面，基体材料的名称放在后面，再加“复合材料”而构成。例如，碳纤维环氧树脂复合材料，

可简化为碳纤维/环氧。

1.5.2　常用复合材料

1. 纤维增强复合材料

纤维复合材料大部分是纤维和树脂的复合。根据所用的纤维和树脂的不同，可分为玻璃纤维复合材料、碳纤维复合材料、石墨纤维复合材料、硼纤维复合材料、晶须复合材料、石棉纤维复合材料、植物纤维复合材料、合成纤维复合材料等。复合后的性能一般都能发挥长处，克服短处。

(1) 玻璃纤维树脂复合材料。玻璃纤维树脂复合材料是以玻璃纤维或玻璃纤维制品(如玻璃布、玻璃带、玻璃毡等)为增强材料，以合成树脂为基体材料制成的。

玻璃纤维是由熔化的玻璃液以极快的速度控制形成细丝状玻璃，直径一般为 5～9 μm。玻璃虽然呈脆性，但玻璃纤维质地柔软，比玻璃的强度和韧性高得多，纤维愈细，强度愈高。单丝抗拉强度高达 1 000～2 500 MPa，比高强度钢约高 2 倍，比普通天然纤维高 5～30 倍。玻璃纤维的弹性模量约为 7.0×10^4 MPa，约为钢的 1/3，而其相对密度为 2.5～2.7 g/cm^3，因此，它的比强度和比模量都比钢高。

玻璃纤维与热塑性树脂制成的复合材料称为玻璃纤维增强塑料。它比普通塑料具有更高强度和冲击韧性。其增强效果随所用树脂种类不同而异，以尼龙的增强效果最为显著，聚碳酸酯、聚乙烯、聚丙烯的增强效果也较好。

玻璃纤维与热固性树脂制成的复合材料，通常叫做玻璃钢。常用的树脂是：环氧树脂、酚醛树脂、聚酯树脂及有机硅树脂等。玻璃钢的性能是随着玻璃纤维和树脂的种类不同而异。但其共同的特点是强度较高，强度指标接近或超过铝合金和铜合金。但由于玻璃钢的相对密度小(为 1.5～2 g/cm^3)，因此它的比强度高于铝合金和铜合金，甚至超过合金钢。此外，玻璃钢还有较好的介电性能和耐腐蚀性能。但玻璃钢的弹性模量小，只有钢的 1/10～1/5，因此刚性差，易产生变形。此外，玻璃钢耐热性差，易老化等。玻璃钢常用于要求自重轻的受力结构件，如：飞机、舰艇以及火箭上高速运动的零部件，各类车辆的车身、驾驶室门窗、发动机罩、油箱以及齿轮泵、阀、轴承、压力容器等。

(2) 碳纤维树脂复合材料。碳纤维树脂复合材料是由碳纤维与合成树脂复合而成的一类新型材料。目前用于制造碳纤维树脂复合材料的合成树脂主要有热固性的酚醛树脂、环氧树脂、聚酯树脂和热塑性的聚四氟乙烯等。工业中生产碳纤维的原料多为聚丙烯腈纤维，经预氧化处理、碳化处理工艺而制得高强度碳纤维，或再经石墨化处理而获得高弹性模量、高强度的石墨纤维，又称高模量碳纤维。

从基体看碳纤维树脂复合材料与玻璃钢相似，但碳纤维树脂复合材料的许多性能优于玻璃钢，其关键是碳纤维。碳纤维与玻璃纤维相比，相对密度更小，弹性模量比玻璃纤维高 4～5 倍，强度也略高，因此比模量和比强度均优于玻璃纤维，并有较好的高温性能。碳纤维树脂复合材料不仅保留了玻璃钢的许多优点，而且某些特性远远超过玻璃钢。

碳纤维树脂复合材料在宇航、航空、航海等领域内可作为结构材料，取代或部分取代某些金属或其他非金属材料用来制造某些要求比强度、比模量高的零部件。常用于制造喷管、翼片等结构件。

(3) 硼纤维树脂复合材料。硼纤维树脂复合材料是一种新型材料，发展历史较短，应用远不及玻璃纤维和碳纤维树脂复合材料普遍。

硼纤维的抗拉强度与玻璃纤维相似，但弹性模量为玻璃纤维的5倍。该复合材料所用的树脂主要是环氧树脂。这种复合材料的各向异性非常明显，其纵向与横向的抗拉强度和弹性模量的差值达10倍以上。因此，常用多向叠层复合材料。目前仅在航空工业上用于制造飞机的某些零件，因其价格贵，应用受到了限制。

近年来，由金属或陶瓷自由长大的针状单晶体——晶须，代替或部分代替纤维制成的复合材料发展很快，由于它不存在晶体缺陷，强度很高，可接近于晶体的理论强度。但晶须成本高，目前多用于尖端工程方面。在一般工业上只作为特殊需要，如在应力特别高的部位上撒上晶须，以起到局部增强的作用。

2. 其他复合材料

(1) 层叠复合材料。层叠复合材料是由两层或两层以上不同材料结合而成的。其目的是为了更有效地发挥各分层材料的最佳性能而得到更为有用的材料。用层叠法增强的复合材料可使强度、刚性、耐磨、耐腐蚀、绝热、隔音、减轻自重等性能得到改善。常用的层叠复合材料有：双层金属或三层金属复合材料，塑料—金属多层复合材料、夹层结构复合材料等。

最典型的双层金属或三层金属复合材料是合金钢与普通钢复合钢板、锡基轴承合金等。

塑料—金属多层复合材料常用于制作自润滑轴承，如：SF型三层复合材料是以钢为基体，烧结铜网或铜球为中间层，塑料为表面层的自润滑材料。

夹层结构复合材料是由两层薄而强的面板(或称蒙皮)，中间夹着一层轻而弱的芯子组成的。面板(金属、玻璃钢、增强塑料等)在夹层结构中主要起抗拉和抗压作用。夹芯结构(实芯或蜂窝格子)起着支撑面板和传递剪力的作用。常用的实心芯子为泡沫塑料、木屑等，蜂窝格子常用金属箔、玻璃钢等。面板与芯子的连接，一般采用胶黏剂黏结或焊接方法连接起来。夹层结构的特点是相对密度小、比强度高、刚度和抗压稳定性好，还可根据需要选配面板和芯子材料，以获得所需要的绝热、隔音、绝缘等性能。该材料已用于飞机上的天线罩、隔板，火车车厢、运输容器等方面。

(2) 细粒复合材料。细粒复合材料是由一种或多种材料的颗粒均匀分散在基体材料内所组成的材料。金属陶瓷就是一种常见的细粒复合材料，它具有高硬度、高强度、耐磨损、耐高温、耐腐蚀和膨胀系数小等优点，是一种优良的工具材料。如可制作硬质合金刀具、拉丝模等。

(3) 骨架复合材料。骨架复合材料包括多孔浸渍材料和夹层结构材料。多孔材料浸

渗低摩擦系数的油脂或氟塑料，可作油枕及轴承；浸树脂的石墨可作抗磨材料。夹层结构材料质轻、抗弯强度大，可作大电机罩及飞机机翼等。

1.6　投产前钢材的检验

原材料的质量是决定零件质量的重要因素，尤其是对弹丸和火箭弹而言，其零件的性能不能百分之百地进行试验，而只能靠抽验来判断同批零件合格与否，故确保原材料质量的可靠性就更为重要。因此，用于制造上述零件的各种材料在材料标准中都规定有严格的技术条件。对于主要零件所用的原材料在产品图和技术条件中还常常提出特殊的要求。为保证得到质量合格的产品，工厂检验部门在材料投产之前应根据材料验收标准和产品图及技术条件对原材料进行质量检验。鉴于弹箭生产中所涉及的金属材料较多，且技术条件又不尽相同，故此处仅介绍主要材料——钢材的检验。

钢材检验按炉进行，由同一炉炼出的钢材作为一个检验单位，从一炉内最易产生疵病的部位抽取试样进行检验。

1.6.1　尺寸检验

钢材的形状和尺寸应符合规定要求，其中主要是检验断面尺寸，因其对加工有直接影响。

1.6.2　外观检验

外观检验的目的是发现钢材外部缺陷。钢材表面应无结疤、裂缝、夹渣和砂眼等疵病。但可以允许有深度不超过钢材直径或正方形边长 2%的外表面小疵病。

1.6.3　低倍组织检验

进行低倍组织检验的目的是发现钢材内部缺陷。检验方法是将试样断面(纵向或横向)加工成 Ra 为 1.6 μm 的粗糙度，然后用热酸浸蚀，以目力或 30 倍以下的放大镜观察酸蚀后的试样断面，不允许有下列缺陷：肉眼可见的缩管残余、内裂、疏松、翻皮、分层、外来金属夹杂物、非金属夹杂物、气泡和白点等。其中，白点、金属夹杂和内裂缝是钢材的严重疵病，而且它们往往遍及整炉钢材，因此，一经发现，整炉钢材都应报废。

1.6.4　化学成分

对采用热压力加工或生产过程中需热处理的钢材，其化学成分与钢材的加热规范或热处理规范有密切关系，同时，化学成分对零件机械性能也有直接影响。因而投产前应对其进行检验。检验的方法是：从钢材中抽取试样，在试样表面的垂直方向钻孔以取得切屑，对其进行化学成分的分析(定性和定量)，要求各元素的含量不超出所规定的数值。对

于直接用于机械加工的钢材，其化学成分只作参考。

1.6.5 机械性能试验

对于不经热加工而直接经机械加工制成的弹箭零件所用钢材，应进行机械性能试验。常用的是拉伸和硬度试验，检验其强度极限（或屈服点，或其他强度指标）、断面收缩率和布氏硬度是否符合要求。对用热加工获得零件毛坯或需热处理的零件所用的钢材，此项检验没有意义，因而不必进行。

1.6.6 淬透性试验

此项检验仅限于零件制造过程中需要淬火的钢材。试样规格由有关标准规定，如一般取其长度为钢材直径的 3 倍。按规范进行淬火后，对试样中部横断面进行硬度试验，其数值应达到技术标准的规定。

1.6.7 其他试验

除上述检验外，对某些钢材还要进行一些特殊检验，其中主要是工艺性试验。诸如：对冷冲压板材需进行冲盂或弯曲性试验；对冷拉圆钢需进行冷顶锻试验；对热轧钢视需要做塔形试验，以便和低倍组织检验配合来检验钢材的皮下缺陷深度；用高倍组织检验钢中的非金属夹杂物等。

1.7 弹箭零件的毛坯种类及其选择

1.7.1 弹箭零件毛坯种类

制造弹箭零件所采用的毛坯是多种多样的，也是不断发展的，但归纳起来不外下列三类。

1. 采用轧材下料获得毛坯

将热轧或冷拉圆钢以及无缝钢管下料后作为毛坯直接进行机械加工是获得毛坯的最简单易行的方法，但一般来说，这种毛坯的材料利用率很低，机械加工量很大。因此，这种毛坯主要用于制造弹箭产品中的小零件和管状零件，例如用冷拉圆钢在自动机上加工口径为 23～37 mm 的小弹体和航空穿甲弹的弹芯，用无缝钢管加工火箭弹的燃烧室等。

2. 采用对轧材进行压力加工的方法获得毛坯

这是获得弹箭零件毛坯的主要方法。因为它能提高材料利用率，减少机械加工量，并能获得较高的产品质量和性能。用这种方法制造毛坯时，毛坯的制造成本较高，并要求具备不同程度的设备条件。

压力加工毛坯按变形工艺的不同，可分为下列几种，它们各具有不同的特点。

(1) 热成型毛坯。热成型毛坯是将金属坯料加热到再结晶温度以上后在压力机上用模具加压成型的毛坯。热成型可分为热冲压和热锻两种，各用于不同结构形状的弹箭零件。

热冲压方法主要用来获得具有大药室的大中口径炮弹弹体毛坯和火箭弹战斗部壳体毛坯，图 1.8 示出了几种弹体的热冲压毛坯。

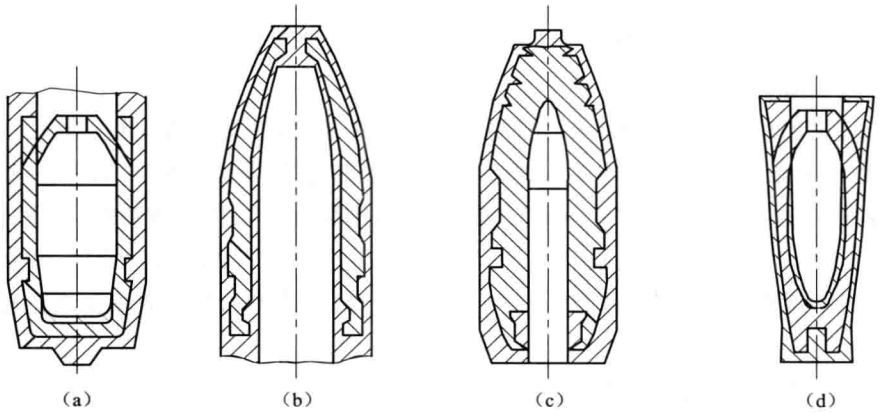


图 1.8　几种弹体的热冲压毛坯

(a) 收口弹体的热冲压毛坯；(b) 带底螺弹体的热冲压毛坯；(c) 半穿甲弹体的热冲压毛坯；(d) 迫击炮弹弹体的热冲压毛坯

热锻方法主要用来获得穿甲弹弹体、底螺、火箭弹中的喷管和连接头等不带大孔的零件毛坯。图 1.9 示出了尖头穿甲弹弹体的锻造毛坯(图中虚线部分)，从图中可看出锻造能节省不少贵重的合金钢。

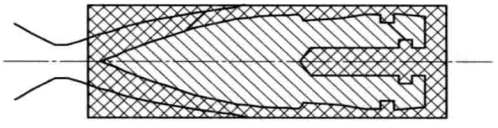


图 1.9　轧制棒料与锻造毛坯制作尖头穿甲弹弹体

热成型毛坯需要的压力设备吨位低，工序少，一般比较容易实现。但热成型有氧化皮生成，并且成型的精度低，因而材料利用率不如冷成型，仍然需要付出较大的机械加工劳动量，而且需要有加热设备，工人在高温下和烟雾中操作劳动条件不好。

(2) 冷成型毛坯。冷成型与热成型的区别在于金属坯料是在室温状态下受压成型的，因而没有氧化皮产生，也不会像热成型那样因坯料温度不均而造成成型误差，模具装置可以更合理地设计与使用，因而成型精度相当高，毛坯表面光洁，大大提高了材料利用率，使机械加工劳动量减到最少。但冷成型的变形抗力很大，需要较高吨位的压力设备，变形工序和中间辅助工序多，在技术上也比较复杂。

毛坯的冷成型有冷挤压、冷冲压和强力旋压三种变形方式。

冷挤压毛坯是以热轧或冷拉圆钢作坯料，在压力机的模具中处于三向压应力状况下

变形而获得的，一般用于制造中小口径榴弹弹体。美国用冷挤压方法制造 105 mm 弹体，材料利用率达 97%，仅弹口部、定心部和弹带槽等少数部位进行机械加工。但适于冷挤压的材料有一定限制，对于用高合金钢作材料的高性能弹箭零件不能采用冷挤压毛坯，为解决这个问题，国内外正在研究中温挤压、静液挤压和液态挤压等新工艺。

冷冲压毛坯是以冷轧薄板为坯料，在压力机模具的作用下变形而获得的，这是传统的冷成型方法。它的材料利用率比冷挤压低，但变形抗力小得多。冷冲压主要用来制造薄壁零件，如风帽、药型罩和尾翼等。有些火箭弹战斗部壳体毛坯也采用冷冲压成型后进行焊接的方法制造。

强力旋压毛坯是以金属薄板或筒形件、管形件为坯料，在旋压机旋轮的作用下变形获得的，这是一种新发展起来的冷成型方法，它适用于制造壳形金属零件，如药型罩、燃烧室等。这种方法在一次变形工序中允许的变形量大，例如制造同样的药型罩，用冷冲压方法要 4～6 道变形工序，但用强力旋压方法只要 1～2 道工序，且毛坯的性能好，质量高。这种方法的另一优点是可以获得形状较复杂的毛坯。但是成型的生产效率低是这种方法的缺点。

(3) 热冷结合成型毛坯。为了使热成型低变形抗力的优点和冷成型高质量的优点结合起来，热冷结合成型毛坯也在国内外得到广泛应用。这种方法是先将坯料加热后进行热变形(一般是变形抗力较大的工序)，然后进行冷变形(一般是变形抗力较小的工序)。122 mm 火箭弹的前、后燃烧室和美国部分弹药厂生产的 81、105、203 mm 榴弹弹体就是利用热冲孔冷拔伸来制造毛坯的。这种毛坯的优缺点介于热成型和冷成型之间。

3. 采用铸造方法获得毛坯

用铸造方法获得弹箭零件毛坯的优点是材料来源丰富不需要复杂的设备，因而制造成本低，适应性强。但是铸造毛坯存在着机械性能低、内部质量不易保证的严重缺点，因此平时只用来制造性能要求不高的迫击炮弹弹体(见图 1.10)。近几年来国外很重视铸造弹体毛坯的研究，已经试制成功一些可锻铸铁和铸钢榴弹弹体。

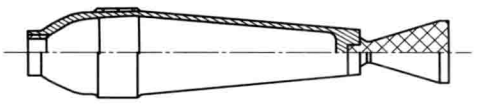


图 1.10 迫击炮弹弹体铸造毛坯

铸造可获得形状复杂的毛坯，当采用熔模铸造和压力铸造时还可提高毛坯的质量和性能。弹箭零件中采用熔模铸造的有 100 mm 脱壳超速穿甲弹尾翼，40 mm 火箭增程弹的喷管与涡轮等，采用压力铸造的主要是涡轮、衬套和尾杆等铝质零件。

1.7.2 弹箭零件毛坯选择原则

弹箭零件毛坯的选择是一个很重要的问题，需要从多方面加以考虑研究，以下是几个主要的考虑因素。

1. 质量要求

毛坯的质量基本上决定了成品的质量，因此，毛坯应具备符合弹箭零件使用要求的内

部结构和物理机械性能，这是最基本的考虑因素。例如，对于榴弹来说，主要应满足发射时的安全要求和爆炸时的破片要求，目前地面榴弹冷挤压弹体的破片没有达到预定要求，暂时就不能采用冷挤压毛坯。又如大、中口径海军炮弹的底螺，为了提高其抗弯与抗剪能力，要求底螺内部金属纤维分布方向与炮弹轴线垂直，为满足这一要求需要采用镦锻毛坯。

2. 生产经济性

毛坯的制造成本是产品总成本的一部分，毛坯制造应使产品的总成本最低。由于炮弹生产属于大量生产类型，因此，提高毛坯的精度以减少材料消耗和减少机械加工是获得最低总成本的有效途径。虽然毛坯的制造成本提高了，但是由于材料费和机械加工费用大大降低，而材料费在产品成本中又往往占有很大的比重，因此总成本还是降低了。为此，不断改进毛坯制造技术以提高其制造精度是弹箭生产者十分关切的问题。弹体生产由轧材毛坯到热冲压毛坯，再到冷挤压毛坯的发展过程就反映了这一方向。

3. 满足战时的需要

战争时期弹药的消耗量十分巨大，为了满足前方的需要，弹箭生产必须具有高度的生产率，因此，毛坯选择应考虑提高生产率的要求。尤其重要的是要有利于动员民用厂迅速投入军品生产，以扩大生产量。由于一般民用厂往往缺乏大型的压力设备，但具备良好的铸工车间和较强的机械加工能力，因此，民用厂的弹箭生产就势必要用经济性不太好的轧材毛坯和性能比较差的铸造毛坯。

1.7.3　弹体毛坯制造方法的发展概况

弹体是弹箭产品中最重要的金属零件，正确选择弹体毛坯是十分重要的问题。

钢质弹体最早采用轧材毛坯，材料利用率仅 30%左右，机械加工量很大。20 世纪 20 年代出现水压机后，开始采用热冲压毛坯。到了 40 年代，热冲压已成为广泛使用的毛坯制造方法，这种方法使材料利用率达到 60%左右。但是，热冲压方法不适用于小弹体，因为坯料的体积小冷却太快，冲头的磨损又相当严重，导致热冲压工作很难进行。

“二战”末期开始出现制造弹体的冷挤压毛坯，国外冷挤压技术发展很快，冷挤压毛坯的使用达到了相当普遍的程度，例如美国先后建成了 60、75、81、105、155 mm 口径的弹体冷挤压生产线。采用冷挤压毛坯，使材料利用率达到 60%以上。为了引用这一新工艺，我国从 20 世纪 60 年代初开始试验研究用冷挤压方法生产弹体毛坯，已在 57 mm 口径以下的弹体生产中成功地采用了冷挤压毛坯，并投入大量生产。85 mm 和 100 mm 两种口径高射榴弹弹体的冷挤压试验研究工作也取得了相当大的进展。

由于冷挤压毛坯对钢材的质量要求比较高（战时大量供应这种优质钢是困难的），并且需要大吨位的压力设备、高质量贵重模具和一整套退火润滑设备，这就使它的适应性和经济性受到影响。从 20 世纪 70 年代开始，国外大量采用热冷结合成型和精密热冲压的方法制造弹体毛坯。据 1976 年对美国 9 家大弹厂的调查，采用热冷结合成型方法制造弹

体毛坯的有 4 家，采用热冲压毛坯的有 5 家。由于热冲压技术的发展，国外精化的热冲压毛坯材料利用率可达 75%～80%。

总之，目前生产钢质弹体毛坯的热冲压、冷挤压和热冷结合成型的方法以及将来可能采用的中温挤压和静液挤压等方法，都要根据具体的设备条件、技术水平和经济性，加以综合考虑。

第 2 章　弹箭零件机械加工工艺规程的编制

2.1　总工艺设计

2.1.1　总工艺设计的依据和工作内容

火箭弹制造工艺是火箭弹生产建设项目的核心。总体工艺方案和具体的工艺规程的确定，对保证产品图样和技术条件的实现，保证产品质量以及生产效率和经济效益有着极其密切的关系。一般在初步设计阶段，总是提出几种工艺方案，经过多次分析、比较、论证才能确定一个符合实际的最佳方案，因此确定工艺方案是一项复杂而又重要的工作，是生产建设项目的主要环节。

在确立火箭弹生产建设项目，编制设计任务书时，总体工艺设计人员必须参加。此时工艺人员的任务是遵照有关的方针、政策和上级主管部门的指示精神，根据我国的经济状况和实际条件，采用新技术和新工艺，编制技术先进且经济可靠的生产流程，并提出重大的技术措施和采用的主要设备。这部分工艺资料将是建设项目、投资概算的基础资料。

1. 依据

(1) 设计任务书：上级有关部门下达的建设项目设计任务书。

(2) 设计定型的产品图样和各种技术条件。

(3) 工厂有关部门提供的资料和数据：如可利用的厂房、动力设施、设备等明细和数据。

(4) 各级领导有关建设项目的指示、文件和精神。

2. 主要工作内容

(1) 消化产品图样和技术条件，了解产品的基本性能和作用。

(2) 确定生产规模，明确生产纲领。

(3) 确定协作关系，提出外协件和外购件明细。

(4) 确定主要零部件的工艺路线。

(5) 确定产品从制造到装配过程的生产总体布局。

(6) 确定工作制度和年时基数。

(7) 明确各工种工艺设计的主要工艺方案及要求。

(8) 计算劳动量和人员配备。

(9) 根据生产节拍配备所需生产设备。

(10) 计算各工种生产线所需生产面积和辅助面积,并汇总产品生产线所需总面积。

(11) 统计主要数据和技术经济指标。

(12) 提出设备和面积的投资额。

(13) 说明存在问题和建议。

2.1.2 设计方法和内容

1. 生产准备

消化产品图样和技术条件,提出重要件和关键件明细,确定关键工艺方案,并做必要的工艺摸底试验。

2. 确定生产纲领

说明全年生产任务类别、产量和确定备品的依据。

3. 工艺路线

工艺路线是从原材料投入到零部件制造、试验、装配、包装、交验等生产过程中各工种间的流转过程。

4. 协作关系

简述专业化协作原则和生产协作落实情况。

2.1.3 工艺

炮弹、火箭弹是一种特殊的复杂产品,它是由许多关键和重要零部件组成的一个串联系统。其中任一关键或重要零部件的失效,都会导致整个系统的失效。在战争中,炮弹与火箭弹是消耗量较大的武器,也是需要长期储存的战备资源。因而其生产特点是:生产批量大、分工细、机械化和专业化程度高、产品质量要求相对较高、检验和试验项目复杂而严格。军工产品的生产单位都有较完善的质量保证体系,产品生产和质量要求严格按照《军工产品质量管理条例》和系列国、军标执行。

在制定产品的工艺方案时,需要根据产品的结构特点和生产纲领,优先采用新工艺、新技术,同时结合生产单位的基本条件,对拟采用的工艺方案,经充分分析、论证和工艺摸底试验后,证明确实可行,方可用于产品的批量生产。

军工产品一经设计定型和生产定型后,产品结构相对较稳定。生产单位需严格按照产品图样、技术条件和工艺规程生产。未经反复试验验证,不允许轻易变更生产工艺。因此在采用固定流水线的生产中,专用工艺装置较多。由于产品结构多为旋转体,因而制造设备有一定的通用性。

下面以火箭弹制造工艺为例加以说明。

火箭弹一般由引信、战斗部、火箭部和稳定装置四部分组成,较为典型的火箭弹是122 mm 火箭弹,它由带有预制破片圆筒的战斗部和带尾翼的稳定装置组成。107 mm 和130 mm 火箭弹等属涡轮式火箭弹,战斗部近似于榴弹弹体(无弹带),而火箭部除有要求

较高的燃烧室外，还有较为复杂的组合喷管。有的火箭弹战斗部内预制有钢珠衬套。对结构不同的火箭弹其生产工艺也各有差别。

厚壁弹体(类同于榴弹弹体)和薄壁弹体的制造工艺过程不同。对于类同于榴弹类弹体的制造工艺采用热冲→热拔→机加→收口→机加→表面处理等工艺过程；对于薄壁类弹体的制造工艺可采用热冲→冷拔→机加→冷拔→热处理→酸洗磷化→机加→收口→机加成型→表面处理等工艺过程。热冲冷拔工艺较热冲热拔工艺可节约原材料和减少机械加工的工作量。

随着加工工艺的发展，弹体的收口可采用较先进的热旋口工艺。

战斗部中的预制破片圆筒的制造，在 122 mm 火箭弹原技术资料中介绍的制造方法为：钢板下料→加热→用 1 000 t 摩擦压力机压制破片槽→热处理→卷圆→焊接→多次整形→机加→表面处理等多种工序。这种制造方法工艺流程长、设备投资大。经多次分析、论证、试验，运用了一种较为简便的工艺方案，在无缝钢管上刨制预制破片槽的工艺方法，为在刨床上实现加工圆筒表面的螺旋槽，设计了一套工艺装置，已被弹箭行业广泛采用。为减少圆筒的切削量，还运用高频焊管坯料进行了试验，高频焊管既节省原材料又提高了生产效率。圆筒刨槽工艺方案确定后，经产品性能试验，有效破片数大为提高。

燃烧室的制造，要根据产品结构和制造条件而定，从技术角度选用热锻→冷拔→机加→旋压→热处理→机加，此工艺较为先进。这种工艺方法要配备多台旋压机。如采用热冲→冷拔工艺方法可利用部分原有设备，设备投资较少，生产效率也高，是一种较为适用的工艺方法。

107 mm 和 130 mm 火箭弹的燃烧室，采用无缝钢管为原材料，经机加、热处理，最后机加成型，再进行表面处理的工艺方法。这种工艺较为落后，生产效率也低，消耗钢材较多。其优点是工艺简单。

火箭弹发动机的喷管属重要零件。涡轮式火箭弹的喷管，结构较复杂，一般由多个喷孔组成，每个喷孔又分收敛段、喷喉和扩张段，且加工精度要求较高。各单位的加工方法也不尽相同，有普通车床加工、六角车床加工、立式钻床加工和采用组合机床加工等几种工艺。随着工艺水平的提高，采用数控机床加工是最佳方法，能提高各种零件的加工精度，有效地提高火箭弹的制造精度，并有利于射击精度的提高。采用数控机床可以显著地提高生产效率，节省人力和物力。目前 30 km 火箭弹的燃烧室和喷管均已采用数控机床进行加工。

尾翼式火箭弹的翼片也是重要零件。例如 122 mm 火箭弹的翼片是等厚度翼片，采用冷冲压、机加工艺即可满足产品要求。30 km 火箭弹的翼片是变截面翼片，形状复杂，加工比较困难，在产品研制阶段由人工修锉成型，要求工人技术水平较高，生产效率低，一致性差，精度很难满足要求，不适应大量生产的需要。现在翼片坯料经大量的攻关试验已制成成型的条状型材，采用数控铣床加工较为合理。

各种塑料件的压制，隔热涂料的涂敷方法随着科技进步也相应在不断改进。

总之，火箭弹的制造技术包含的专业较多，技术上涉及面也较广，寻求新工艺、新技术是不断改进制造技术的方向。

2.2 机械加工工艺过程与工艺规程

2.2.1 产品生产过程与机械加工工艺过程

产品生产过程是指从原材料到产品出厂的全部过程。它既包括毛坯的制造、机械加工、热处理、装药装配、检验、试车、涂漆等主要过程，还包括包装、运输、储存等过程。随着产品复杂程度的不同，其生产过程可以由一个或几个单位联合完成。

机械加工工艺过程是弹箭产品生产过程的一部分，是对零部件采用各种加工方法（例如：切削加工、磨削加工、电加工、超声加工、电子束及离子束加工等），使其改变毛坯的形状、尺寸、表面粗糙度以及力学物理性能，最终成为合格零件的过程。

2.2.2 机械加工工艺过程的组成

机械加工工艺过程由若干个工序组成。机械加工中的每一工序又可依次分为安装、工位、工步和走刀。

1. 工序和安装

机械加工工艺过程中的工序是指：一个或一组工人在一个工作地点对一个（或同时对几个）工件连续完成的那一部分工艺过程。同一零件，同样的加工内容，可以有不同的工序安排。如图 2.1 所示阶梯轴的加工：① 加工小端面；② 对小端面钻中心孔；③ 加工大端面；④ 对大端面钻中心孔；⑤ 车大端外圆；⑥ 对大端倒角；⑦ 车小端外圆；⑧ 对小端倒角；⑨ 铣键槽；⑩ 去毛刺。这些加工内容可以安排在两个工序中完成（见表 2-1），也可以

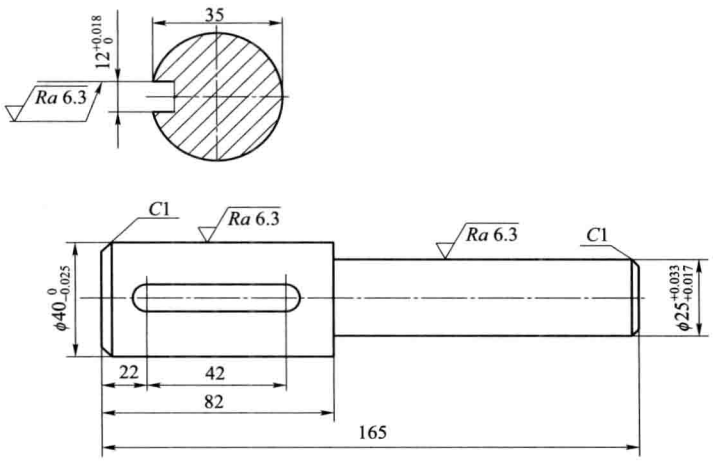


图 2.1 阶梯轴零件图

安排在 4 个工序中完成(见表 2-2),还可以有其他安排。工序安排和工序数目的确定与零件的技术要求、零件的数量和现有工艺条件等有关。

表 2-1　阶梯轴第一种工序安排方案

工序号	工　序　内　容	设备
1	加工小端面,对小端钻中心孔,粗车小端外圆,对小端倒角;加工大端面,对大端钻中心孔,粗车大端外圆,对大端倒角;精车外圆	车床
2	铣键槽,手工去毛刺	铣床

表 2-2　阶梯轴第二种工序安排方案

工序号	工　序　内　容	设备
1	加工小端面,对小端钻中心孔,粗车小端外圆,对小端倒角	车床
2	加工大端面,对大端钻中心孔,粗车大端外圆,对大端倒角	车床
3	精车外圆	车床
4	铣键槽,手工去毛刺	铣床

如果在一个工序中需要对工件进行几次装夹,则每次装夹下完成的那部分工序内容称为一个安装。例如表 2-1 中的工序 1,在一次装夹后尚需有三次调头装夹,才能完成全部工序内容,因此该工序共有 4 个安装;表 2-1 中工序 2 是在一次装夹下完成全部工序内容,故该工序只有一个安装(见表 2-3)。

表 2-3　工序和安装

工序号	安装号	工　序　内　容	设备
1	1	加工小端面,对小端钻中心孔,粗车小端外圆,倒角	车床
	2	加工大端面,对大端钻中心孔,粗车大端外圆,倒角	车床
	3	精车大端外圆	车床
	4	精车小端外圆	车床
2	1	铣键槽,手工去毛刺	铣床

2. 工位

在工件的一次安装中,通过分度(或移位)装置,使工件相对于机床床身变换加工位置,把每一个加工位置上的安装内容称为工位。在一个安装中,可能只有一个工位,也可能需要有几个工位。

图 2.2 是通过立轴式回转工作台使工件变换加工位置的例子。在该例中,共有四个工位,依次为装卸工件、钻孔、扩孔和铰孔,实现了在一次装夹中同时进行钻孔、扩孔和铰孔加工。

可以看出，如果一个工序只有一个安装，并且该安装中只有一个工位，则工序内容就是安装内容，同时也就是工位内容。

3. 工步

加工表面、切削刀具、切削速度和进给量都不变的情况下所完成的工位内容，称为一个工步。

按照工步的定义，带回转刀架的机床（转塔车床、加工中心）其回转刀架的一次转位所完成的工位内容应属一个工步，此时若有几把刀具同时参与切削，该工步称为复合工步。图 2.3 是立轴转塔车床回转刀架示意图，图 2.4 是用该刀架加工齿轮内孔及外圆的一个复合工步。

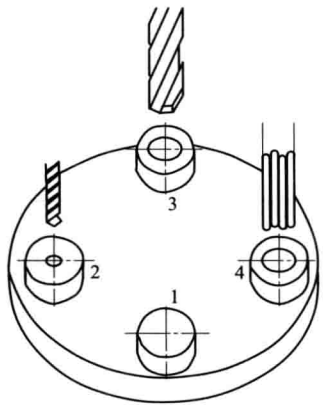


图 2.2 多工位加工

1—装卸工件工位；2—钻孔工位；3—扩孔工位；4—铰孔工位

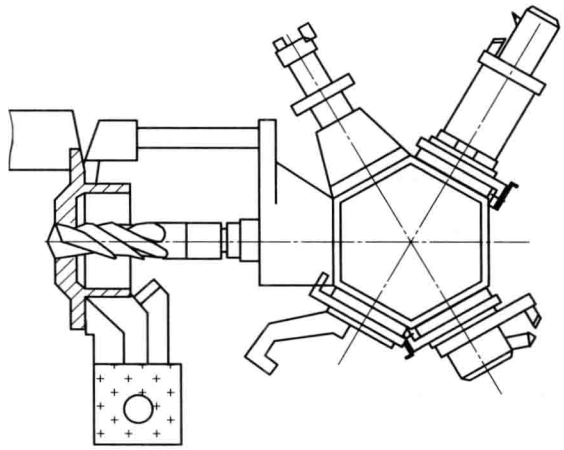


图 2.3 立轴转塔车床回转刀架

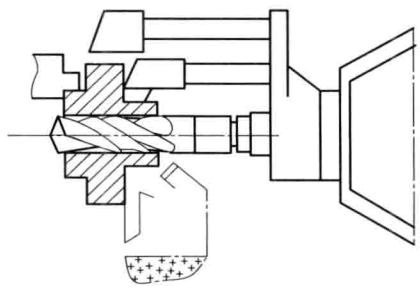


图 2.4 立轴转塔车床的一个复合工步

在工艺过程中，复合工步有广泛的应用，图 2.5 是在钻床上用复合钻头进行钻孔和扩孔加工；图 2.6 是在铣床上，通过铣刀的组合，同时完成几个平面的铣削加工等。可以看出，应用复合工步主要是为了提高工作效率。

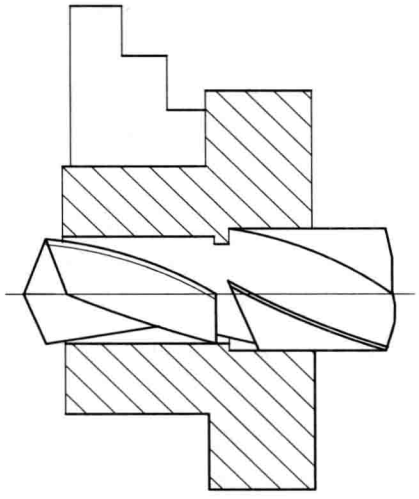


图 2.5　钻孔、扩孔复合工步

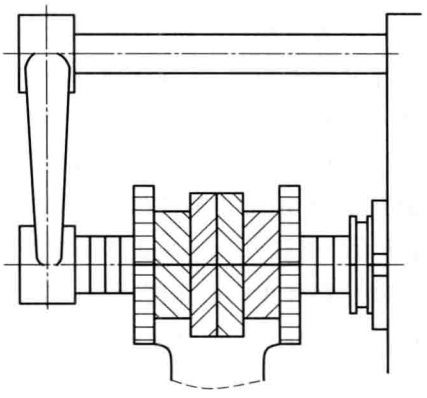


图 2.6　组合铣刀铣平面复合工步

4. 走刀

切削刀具在加工表面上切削一次所完成的工步内容，称为一次走刀。一个工步可包括一次或数次走刀。当需要切去的金属层很厚，不能在一次走刀下切完，则需分几次走刀，走刀次数又称行程次数。

2.2.3　工艺规程

机械加工工艺过程是由一系列工序、安装、工位、工步及走刀等要素组成。以工序为单位，用图表、文字把工艺过程表达出来，按顺序装订成册，并以文件形式颁发作为生产依据的技术资料，即为工艺规程。

工艺规程是在具体生产条件下，说明并规定产品工艺过程的一个综合性技术文件。它是指导生产，保证产品质量，使产品生产在最低成本条件下，有最高的生产效率和保证生产计划性的一个最有效的技术性措施。它全面和系统地反映了一个生产单位的生产水平，是一切相关的生产人员都应严格执行、认真贯彻的纪律性文件。

根据生产工艺过程的性质不同，工艺规程分为毛坯制造、零件机械加工、热处理、表面处理、装药以及装配等不同的工艺规程。本章讨论的是弹箭零件机械加工工艺规程的编制。

2.3　编制工艺规程的设计原则、程序与要求

2.3.1　机械加工工艺规程的作用

正确的机械加工工艺规程是在总结长期的生产实践和科学实验的基础上，依据科学

理论和必要的工艺试验而制订的，并通过生产过程的实践不断得到改进和完善。机械加工工艺规程有三个主要作用：

(1) 机械加工工艺规程是工厂组织生产的主要技术文件。机械加工工艺规程是一切从事生产的人员都要严格、认真贯彻执行的工艺技术文件，按照它组织和进行生产，就能使各工序科学地衔接，实现优质、高产和低消耗。

(2) 机械加工工艺规程是生产准备和计划调度的主要依据。有了机械加工工艺规程，在产品投入生产之前就可以根据它进行一系列的准备工作，如原材料和毛坯的供应，机床的调整，专用工艺装备(如专用夹具、刀具和量具)的设计与制造，生产作业计划的编排，劳动力的组织以及生产成本的核算等。有了机械加工工艺规程，就可以制订所生产产品的进度计划和相应的调度计划，使生产均衡、顺利地进行。

(3) 机械加工工艺规程是新建或扩建工厂、分厂的基本技术文件。在新建或扩建工厂、分厂时，只有根据机械加工工艺规程和年生产纲领，才能准确确定生产所需机床的种类和数量，工厂或分厂的面积，机床的平面布置，生产工人的工种、等级、数量，以及各辅助部门的安排等。

2.3.2 工艺规程的设计原则

工艺规程的设计原则是：在保证产品质量的前提下，能尽量提高生产率和降低成本。同时，还应在充分利用本企业现有生产条件的基础上，尽可能采用国内外先进工艺技术和经验，并保证有良好的劳动条件。

由于工艺规程是直接指导生产和操作的重要技术文件，因此工艺规程还应做到正确、完整、统一和清晰，所用术语、符号、计量单位、编号等都要符合相应标准。

2.3.3 编制工艺规程的原始资料、程序与要求

1. 编制工艺规程的原始资料

工艺规程的编制必须根据产品对象、生产规模和具体生产条件进行，为此需有下列原始资料作为依据。

(1) 产品图与技术条件。编制产品装配工艺规程时，需要有产品总装配图和部件装配图以及产品装配与验收技术条件等。编制零件加工工艺规程时，需要有零件图和零件所属部件装配图以及零件技术条件、部件装配与验收技术条件等。

炮弹、火箭弹的产品图主要有：总装配图、部件图、零件图、全弹标志图、靶场试验图、包装图等。

炮弹、火箭弹的制造与验收技术条件有两大类，一类是专用技术条件，一类是通用技术条件。专用技术条件仅适用于某产品，通用技术条件适用于相同类型的产品，它是通用技术条件的补充。以炮弹产品为例，它的通用技术条件按弹种划分有：钢质榴弹(杀伤弹、爆破弹和杀伤爆破弹)装配弹体及其零件的制造与验收技术条件，穿甲弹装配弹体及其零

件制造与验收技术条件等。

(2) 生产纲领。生产纲领决定产品生产规模的大小与生产类型。在计算零件生产纲领时,应知道产品的年产量,零件在每一产品中的数量以及需要的备品率和生产的废品率。

(3) 现有生产条件和生产设备资料。现有生产条件是指工厂车间的设备、工艺装置、生产组织情况和运输方法等。生产设备资料主要是指机床说明书、机床制造厂的产品目录和产品样本等。

(4) 现有生产能力和资料。它包括毛坯的生产条件或协作关系、工艺装备及专用设备的制造能力、有关机械加工单位的设备和工艺装备的条件、技术工人的水平以及各种工艺资料和标准、加工余量与加工方法经济精度的确定等有关技术资料、手册等经济核算所需要的有关资料或文件。

(5) 国内外同类产品的有关工艺资料等。

2. 编制工艺规程的程序与要求

设计工艺规程的程序如下:

(1) 研究零件的工作图,并参考零件所属部件的装配图,分析零件结构工艺性。

(2) 根据零件的生产纲领决定生产类型和确定生产组织形式,并规定生产节奏,拟定工艺路线。

(3) 选择毛坯的种类和制造方法,绘制毛坯图,计算总余量、毛坯尺寸和材料利用率等。

(4) 选择零件各表面的加工方法,确定零件加工工序数目、内容和先后顺序。决定每个工序所用设备与工具等。确定各主要工序的技术要求及检验方法。

(5) 计算工序间的加工余量、工序尺寸及其公差,绘制工序图,确定切削用量和工时定额。必要时应修改最初决定的毛坯尺寸,即由各工序余量及公差来校核毛坯尺寸及公差。

(6) 对各种不同的加工方案进行经济分析,确定最合理的工艺方案。对连续流水生产还要计算机床负荷率,进行工序同期化等。

(7) 填写工艺文件并提出与工艺规程有关的设计任务,如专用夹具、刀具、量具、检验工具的设计,一些专用辅助工具和靠模装置的设计等。

编制工艺规程时,应从实际情况出发,考虑质量、生产率、经济性三原则,并需参考同类零件的生产经验,因为在实践中往往会发现未曾考虑到的情况。零件生产条件的变化、技术革新和企业管理的变革,都要求工艺规程不断修订,使之完善。因此工艺规程不是一成不变的,“工艺定型”只能是相对的,经常革新陈旧工艺,制订新工艺,才能促使我国弹箭产品制造工业得到更快的发展。

为新建工厂或分厂编制工艺规程时,应尽量采用新工艺、新技术和新设备,使工艺规程先进合理。在为现有工厂或分厂编制工艺规程时,应从实际情况出发优先考虑如何发

挥原有设备的潜力，大搞技术革新，使之在现有的条件下编制出最合理的工艺规程。

总之，一个正确的工艺规程应能做到技术上先进、经济上合理和有良好的劳动条件。

2.4 工艺规程的内容与格式

不同的生产类型，工艺规程的内容与格式也不同。对大批量生产的弹箭零件而言，所用工艺规程的内容较详细，其基本格式有以下几类。

1. 工艺路线表

零件的机加工艺路线表能说明一个零件的全部机械加工工艺过程，主要内容见表 2-4。零件总的工艺路线表则综合说明制造该零件的全部工艺顺序，包括各工序的名称、所用设备及完成各工序的单位等。

表 2-4 零件机械加工工艺路线表

工序目录					产品代号			零部件名称			零部件代号		
								130 mm 火箭弹战斗部					
材料		供应状态	毛坯种类	毛坯尺寸	毛坯重量			每一毛坯可制零件数		零件重量	每一产品零件数		
部门	工序号	工序名称	设备		张次	备注	部门	工序号	工序名称	设备		张次	备注
			名称	型号						名称	型号		
	1	定中心孔	普通车床	C620-1				15	精挖底	普通车床	C620-1		
	2	荒车外形	多刀半自动车床	1722C				15J	检验				
	3	粗车外形	多刀半自动车床	1722C				16	车弹尾螺纹直径	普通车床	C620-1		
	4	切余料	普通车床	C620-1				16J	检验				
	5	挖药室	六角车床	C365L				17	修弹重	普通车床	C620-1		
	5J	检验						17J	检验				
	6	冷收口	曲轴压力机					18	钻扳手孔				
	7	加热	立式多眼加热炉					19	药室喷砂	喷砂机	S-181		
	8	热收口	曲轴压力机					19J	检验				
	9	冷却						20	车弹口螺纹	半自动螺纹车床			

续表

部门	工序号	工序名称	设备		张次	备注	部门	工序号	工序名称	设备		张次	备注
			名称	型号						名称	型号		
	9J	检验						20J	检验				
	10	镗弹口	六角车床	C365L				21	车弹尾螺纹	半自动螺纹车床			
	11	粗车弧形	多刀半自动车床	1722C				21J	检验				
	12	精车外形	多刀半自动车床	1722C				22	修整外表面	普通车床	C620-1		
	12J	检验						22J	全检				
	13	切定心桩	普通车床	C620-1				23	打标记	滚字机			
	14	粗挖底	普通车床	C620-1				23J	检验				

											编制			共　张
											校核			
														第　张
更改标记	处数	文件号	签字	日期	更改标记	处数	文件号	签字	日期					

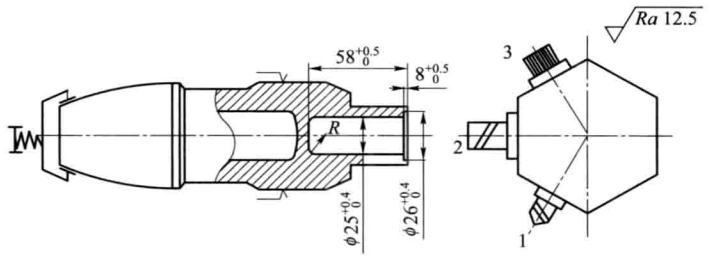
2. 工序卡片

它是工艺规程的主要表格，是为机械加工过程中的每一工序而编制，是零件加工的指导性文件。它详细规定了工序加工的内容，包括材料牌号、工序图（表明本工序的加工尺寸和公差、表面粗糙度、定位基准及相互位置公差等技术要求）、各工步顺序内容（指明必要的加工方法和尺寸等）、所用设备名称与型号、所用工艺装置的名称代号等，对于大量流水生产的工序卡片还具体地规定出切削规范，如表 2-5 所示。

表 2-5　工序卡片

工序卡片	产品代号	零部件名称	零部件代号	工序号	7
	WB011A	57 mm 高射榴弹弹体		工序名称	镗曳光孔

续表



设备	名称	型号	冷却
	六角车床	C3163	乳化液

辅助材料	名称	规格牌号
	手套	
	乳化油	
	钻套	
	铰刀套	

工步号	工步名称	加工规范					夹辅具		刀具		量具	
							名称	代号	名称	代号	名称	代号
1	钻孔						弹簧夹筒夹具	2/JJ004	1. 麻花钻 $\phi24.7$ 或 $\phi24.8$	外购	光滑塞规 $\phi25^{+0.4}_{0}$	2/JL011
2	平底						车头气缸	2/JF2003	2. 平底钻 $\phi24.7$ 或 $\phi24.8$ ($l=170$ mm)	外购	光滑塞规 $\phi26^{+0.4}_{0}$	2/JL014
3	铰孔						半圆锉		3. 铰刀($\phi26$、$\phi25$)组合	2/JD001	深度样板 $\phi58^{+0.6}_{0}$	2/JL026
							喷嘴				深度样板 $\phi8^{+0.58}_{0}$	2/JL023

											编制			共 张
											校核			
														第 10 张
更改标记	处数	文件号	签字	日期	更改标记	处数	文件号	签字	日期					

3. 机床调整卡片

在自动机床和半自动机床上完成工序则需编制专门的工序卡片——机床调整卡片。卡片的格式应适合于该机床的调整特点，因此各类机床调整卡片的格式各不相同。

其内容是说明调整机床时所需要的全部数据和安排。调整卡片是操作工和调整工用的指导性文件。

4. 检验卡片

它是为保证产品加工质量进行技术检验使用的指导性文件之一，卡片列出了检验对象、进行检验的部位、允许偏差、检验方法和所用工具及必要的图示等。如表 2-6 所示为检验卡片。

表 2-6　检验卡片

检验卡片	产品代号	零部件名称	零部件代号	工序号	J
	WB011A	57 mm 高射榴弹弹体		工序名称	中间检验

1. 弹体必须分炉检验，不许同时检验两个炉号的产品 2. 发现超差产品，及时交机加车间修理，返修后的产品，经检验合格后，可随原炉号进入下一道工序 3. 待处理品或废品交隔离室及时处理，经处理合格的处理品应随原炉号进入下一道工序	序号	检验内容及技术要求	设备及工艺装置		检验率/%
			名　称	代号	
	1	紧口槽	圆形卡规 $\phi53.975_{-0.475}^{0}$	2/JL006	
			形状样板	2/JL056	
	2	弹带槽	圆形卡规 $\phi53_{-0.4}^{0}$	2/JL069	
			圆形卡规 $\phi52.5_{-0.4}^{0}$	2/JL047	
			位置样板 $35_{-0.02}^{0}$	2/JL059	
			非全形塞规 $26_{0}^{+0.52}$	2/JL048	
	3	螺纹孔	光滑塞规 $\phi33.34_{0}^{+0.25}$	2/JL040	
			位置样板 $23_{0}^{+0.84}$	2/JL063	
			刻线卡钳 $\phi37_{0}^{+1}$	2/JL024	
	4	弹体长度	高度量规 $177_{-1.6}^{0}$	2/JL045	

										编制			共　张
										校核			
													第 14 张
更改标记	处数	文件号	签字	日期	更改标记	处数	文件号	签字	日期				

将毛坯图、全部工序卡片和技术检验卡片按顺序装订在一起，前附工艺路线表，就成为内容完备的机械加工工艺规程。

弹箭零件的生产属于大规模批量生产，但在设计定型阶段，由于研制的产品结构及生产工艺方法变动较为频繁，一般在样件试制阶段，是单件或小批量生产，因此在这个阶段中无需制订较为完善的工艺规程。在生产定型阶段，属于批量生产，此时应制订较为详细和完善的工艺规程及其他技术文件，设计和制造专用的工艺装置和设备。同时应结合试制生产中出现的问题，在保证产品质量和战术技术指标实现的前提下，对产品的生产工艺进行一定的改进，以适合军工产品的批量生产。

2.5 加工余量与工序尺寸的确定

各种方法制造的毛坯，通常都不能直接达到成品的形状、尺寸与表面质量的要求，需经一系列的切削加工才能得到合乎技术要求的零件。在加工过程中切去的金属层厚度称为加工余量。零件的某一表面由毛坯转变为成品所切去的金属层总厚度称为加工总余量。余量的大小在垂直于被加工表面方向上确定。

零件的某一表面往往要经过若干个工序或工步才能加工而成。先后进行加工的各工序的工序尺寸(或工步尺寸)需在制订零件机加工艺规程时，根据每次加工的工序余量进行计算确定。

2.5.1 加工余量的确定

余量数值大小的确定对零件生产有着很大的影响。余量过大，必然会使机加劳动量增加，材料、动力、刀具损耗增大；余量过小，则可能使毛坯表面某些部分未被加工到，或切去过薄的金属层后得到的零件表面达不到质量要求，甚至会使刀具在硬的夹砂层和氧化皮中进行切削而增加刀具的损耗。因此，必须正确地决定在技术上合理、经济上有利的加工余量。

一般来说，减少加工余量的根本途径是提高毛坯的制造精度，使毛坯的形状、尺寸和表面质量尽量接近于成品，从而能够少切削或不切削加工。但是，加工余量的大小还和零件在切削加工与热处理过程中所造成的误差等因素有关。

决定加工余量的基本原则是在保证质量的前提下尽量减小加工余量，其具体方法有经验估计法、查表法和分析计算法三种。经验估计法一般用于单件或小批生产。查表法在工厂中应用较为广泛，它是从有关的手册中查阅确定毛坯余量和工序余量，然后根据实际加工情况进行适当的修正，最后确定合理的加工余量。用经验估计法和查表法确定加工余量虽然比较简便，但因未曾充分考虑具体加工过程的特点，确定的余量数值往往偏大，所以在大批量生产中，加工余量的确定往往是在对工艺过程进行了全面分析，了解余量的组成因素的前提下加以制订的。这就是余量的分析计算法。

下面结合弹体外形和药室的加工来说明采用分析计算法确定工序余量和总余量的原理。

工序余量，就是为完成某一工序所必须切去的金属层，即上道工序所得零件加工面的尺寸与本工序所得同一加工面的尺寸之差。由于工序尺寸一般规定取单向公差(孔为“+”，轴为“−”)，所以随着两个工序尺寸公差 IT_a 和 IT_b 的变化，在本工序中将得到三种大小不同的加工余量。

图 2.7 和图 2.8 分别为加工弹体外表面和内表面时直径方向上的工序余量分布图。

图中，A_a 和 IT_a 为上道工序尺寸及公差；A_b 和 IT_b 为本道工序尺寸及公差。

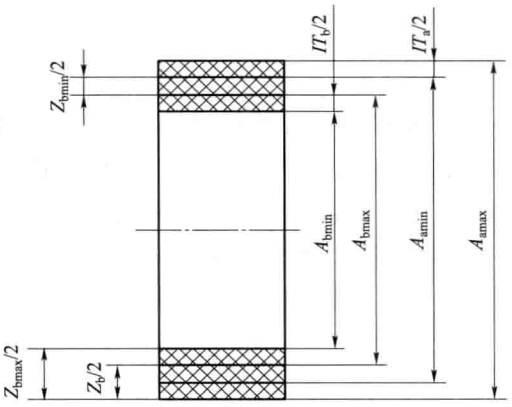


图 2.7　外表面余量分布

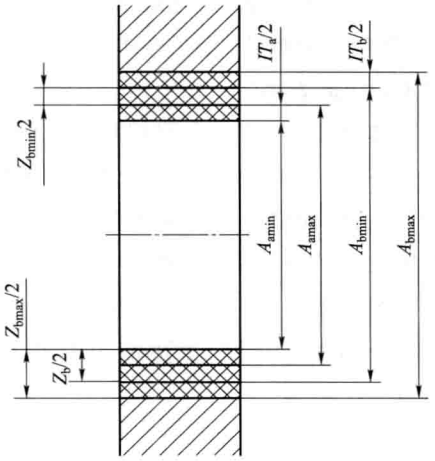


图 2.8　内表面余量分布

对图 2.7 所示的外表面(工序尺寸分别为 A_a-IT_a 和 A_b-IT_b)：

最大余量——上道工序所得加工尺寸为最大尺寸，而本道工序所得加工尺寸为最小尺寸时，即：

$$Z_{bmax}=A_{amax}-A_{bmin}$$

最小余量——上道工序所得加工尺寸为最小尺寸，而本道工序所得加工尺寸为最大尺寸时，即：

$$Z_{bmin}=A_{amin}-A_{bmax}$$

名义余量——$Z_b=A_a-A_b=A_{amax}-A_{bmax}=Z_{bmin}+IT_a$

对图 2.8 所示的内表面(工序尺寸分别为 A_a+IT_a 和 A_b+IT_b)同样可得到：

最大余量　　$Z_{bmax}=A_{bmax}-A_{amin}$

最小余量　　$Z_{bmin}=A_{bmin}-A_{amax}$

名义余量　　$Z_b=A_b-A_a=A_{bmin}-A_{amin}=Z_{bmin}+IT_a$

由此可知，名义余量为本工序最小余量与上道工序尺寸公差之和。通常所指的加工余量即为此名义余量。上一道工序尺寸公差 IT_a 是针对该工序采用的加工方法所能达到的经济精度而确定的，是一个已知值，由此可见，正确地选择工序余量的问题，可归结为如何正确地制订本工序最小余量的问题。

最小余量由下列四个因素决定：

(1) 上一工序的已加工表面（或毛坯面）上留有的高低不平的粗糙度(微观)，其值用 Ra 表示(见图 2.9)。

(2) 上一工序中产生的表面缺陷层(破坏层)，在本工序加工中必须切除，其值用 T_a 表示(见图 2.9)。

(3) 上一工序形成的表面相互位置误差。它是指平面间的不平行度、轴心线的不直

度、阶梯轴的不同轴度、孔轴线对端面的不垂直度等。这类误差与上一工序尺寸公差无关，具有独立的数值，为了在本工序矫正这类误差，就必须将余量相应加大。这类误差是向量值，用 $\boldsymbol{\rho}_a$ 表示。

弹体加工中，这类空间相互位置误差主要有两种形式。

① 待加工表面（外表面或药室）的轴心线与定心基准面轴心线间的偏移量 e_a（见图 2.10）。这种偏移量对于冲压弹体来说，就是毛坯或工序半成品的壁厚差之半，对以棒料为毛坯加工的弹体来说，则是中心孔与毛坯外圆或工序半成品外圆的不同轴度误差（当以中心孔定心车外圆时）；或内外表面轴心线间的不同轴度误差（当以外圆定心镗孔或以孔定心车外圆时）。当在上述情况下所发生的偏移量为 e_a 时，则在直径上应有补偿余量为 $2e_a$；

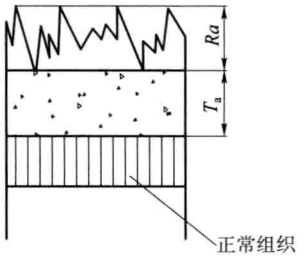


图 2.9 外表面微观粗糙度及缺陷层

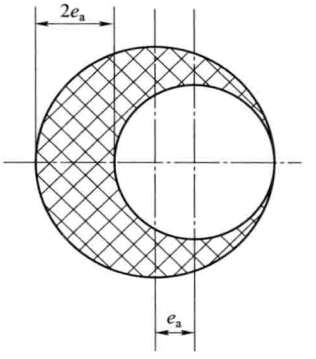


图 2.10 内外表面不同轴度误差补偿余量

② 毛坯或半成品轴心线的不直度（见图 2.11）。这类轴心线不直度误差主要发生在轧制棒料毛坯或长细比较大的轴类零件热处理以后的半成品上。当轴心线的不直度用 Y_a 表示时（即最大挠度），则矫正此弯曲度误差，直径上的最大补偿余量应为 $2Y_a$。

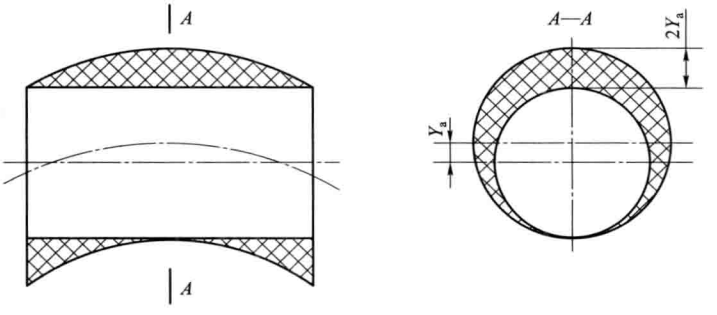


图 2.11 轴心线不直度补偿余量

（4）本工序中工件的安装误差。安装误差由定位误差和夹紧误差两部分组成，这两部分误差均可根据工件的具体定位和夹紧情况加以确定。为了在本工序加工中消除这一

误差的影响，须将余量加大。安装误差用 $\boldsymbol{u}_b$ 表示，也是一个向量。

在车床上加工弹体的内外表面（车削或镗削）时，工件的安装误差在径向上反映的主要是径向跳动量。这一误差是由夹具上的定心表面轴线与机床主轴旋转中心线的偏心量 e 所造成的，径向跳动量为 $2e$。夹具的这一径向跳动量误差，是用标准样品（或样柱）装夹在夹具上用千分表量得。由于这种检验不是在实际加工条件下进行的，所以夹具的实际跳动量会稍大一些。如果用 $2e'$ 表示夹具检验时允许的跳动量，则实际夹具跳动量为

$$2e = K \times 2e'$$

至于上道工序加工后工件的几何形状误差，如：椭圆度、不平度等均要在本工序中得以矫正，但因其值通常都包括在上道工序尺寸公差（IT_a）范围之内，所以在无特别指明的情况下，计算本工序最小加工余量时，可不予考虑。

综上所述，加工弹体的内外表面时，某一工序直径上的最小加工余量（属对称余量）可用下式表示

$$Z_{b\min} = 2(Ra + T_a) + 2|\boldsymbol{\rho}_a + \boldsymbol{u}_b|$$

名义余量则为　$$Z_b = 2(Ra + T_a) + 2|\boldsymbol{\rho}_a + \boldsymbol{u}_b| + IT_a$$

对于单边的最小加工余量为 $\frac{1}{2}Z_{b\min} = (Ra + T_a) + |\boldsymbol{\rho}_a + \boldsymbol{u}_b|$

单边名义余量则为　$$\frac{1}{2}Z_b = (Ra + T_a) + |\boldsymbol{\rho}_a + \boldsymbol{u}_b| + IT_a$$

加工总余量（即毛坯余量），则为各工序余量之和 $Z = \sum_{i=1}^{n} Z_i$

式中　Z——加工总余量；

Z_i——工序余量；

n——工序数。

以上所列的工序最小加工余量的计算公式是考虑所有因素共同存在的情况，在各种具体加工情况下还需区别对待。

当采用无心磨削加工圆柱表面时，则安装误差可以不考虑。采用浮动铰刀或拉刀加工孔时，上一工序所得孔的轴线偏移无法在本工序中加以纠正，而与安装有关的误差也可以忽略，故式中的 $\boldsymbol{\rho}_a$ 和 $\boldsymbol{u}_b$ 都可不计算。光整加工时，加工余量主要取决于表面粗糙度，故只要 $Z_b \geqslant Ra$ 就能满足加工需要。

在一次安装中，同一表面如经几个工步加工，则与安装有关的误差只计算在第一工步的加工余量中。零件在精加工某一孔时，如果是由该孔（经粗加工）作为定心基准加工而成，则计算孔的精加工余量时，该孔在粗加工所造成的空间位置误差就可以不考虑。

采用分析计算法计算工序余量能否实用，取决于数据是否齐全以及这些数据的可靠性。显然在零件产量不大的情况下，可不必进行繁琐的计算。当零件产量很大时，采用分析计算法有一定价值，因为可以从余量的构成因素中寻找出减少机加余量的途径。

2.5.2 工序尺寸的计算

确定工序尺寸、公差及表面粗糙度的一般原则是：先按零件图要求确定出最终工件的工序尺寸及公差，然后再按已选定的各道工序余量的具体数值，确定出前一道工序的工序尺寸，直至毛坯。工序尺寸的公差和粗糙度等级则按工序加工方法的经济精度来确定。

对于零件的内、外圆柱表面和简单的长度尺寸，按上述方法确定工序尺寸和公差一般不会有困难。但对轴向尺寸标注复杂、加工工序较多，且又有工序基准与设计基准无法重合的零件表面，工序尺寸及公差的确定就比较复杂，需进行尺寸换算才能确定，但基本原则仍然相同。

对零件的内、外圆柱表面和简单的长度尺寸来说，工序尺寸的确定常借助工序尺寸分布图来分析确定。

工序尺寸分布图是用图形来表达零件某一表面所经历的各工序的工序尺寸、公差和工序余量。例如：某弹体定心部表面需经粗车、半精车、精车三道工序完成。其工序尺寸、余量及公差的分布图如图 2.12 所示。

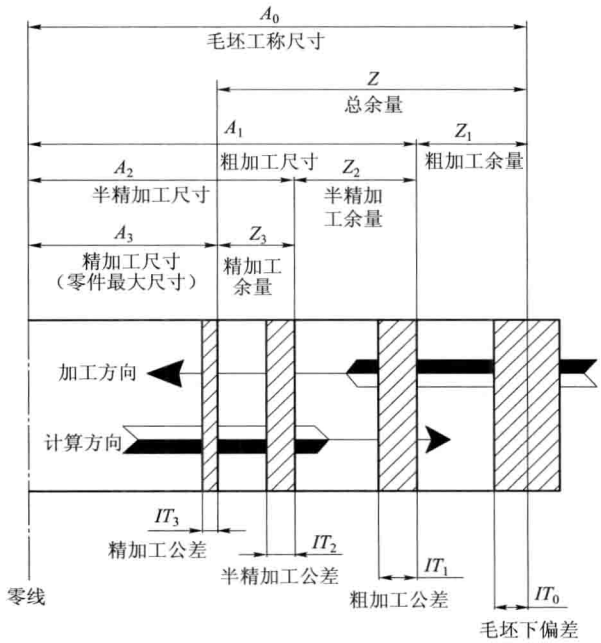


图 2.12 外圆表面加工工序尺寸分布图

精加工的工序尺寸就是根据零件图确定的尺寸 A_3，公差为 IT_3；

半精加工的工序尺寸为：$A_2 = A_3 + Z_3$，公差为 IT_2；

粗加工的工序尺寸为：$A_1 = A_2 + Z_2 = A_3 + Z_3 + Z_2$，公差为 IT_1；

毛坯的尺寸为：$A_0 = A_1 + Z_1 = A_3 + Z_3 + Z_2 + Z_1$。

由于一般铸、锻等毛坯都规定为双向的尺寸公差，所以在计算总余量时，第一道工序的余量可不考虑毛坯的全部公差，而只取入体方向的偏差，如图 2.12 所示。

2.5.3　绘制毛坯图

加工总余量确定以后，便可绘制毛坯图。从余量的计算过程中可以看出，毛坯的尺寸取决于零件各表面加工工序数目、每一工序的工序余量以及毛坯制造方法本身所能达到的精度。所以在规定毛坯尺寸、绘制毛坯图之前必须首先分析零件的加工过程。但最后确定零件的加工过程则又以毛坯图作为依据。

用型材、棒料、板料等原材料为毛坯时，可不需设计毛坯图。但在零件加工工艺规程中需确定材料的规格及毛坯的尺寸。

当采用铸、锻、冲压等毛坯时，需要有毛坯图。在决定毛坯的具体形状时，应充分考虑其结构工艺性。此外，也应考虑机械加工时零件初次定位的基准面设置问题。

毛坯图的绘制方法与要求为：

(1) 以实线表示毛坯表面的轮廓，以双点划线表示经切削加工后的零件轮廓。在剖面上以交叉十字线表示加工余量。

(2) 毛坯图上的尺寸值包括加工总余量在内。为清楚起见，可在毛坯图上标注出成品尺寸，但应外加括号，并且只注名义尺寸，如(ϕ91.75)。

(3) 在毛坯图上可以用符号表示出第一道机械加工工序的定位基准面(对于铸造毛坯这一点很重要)。

(4) 在毛坯图上注有需要检验的主要尺寸及其公差，一些次要尺寸可以不注出公差。

(5) 在毛坯图上注有材料的规格及必要的技术条件。

图 2.13 示出了 130/58 mm 海岸炮用半穿甲弹弹体热冲压毛坯图。

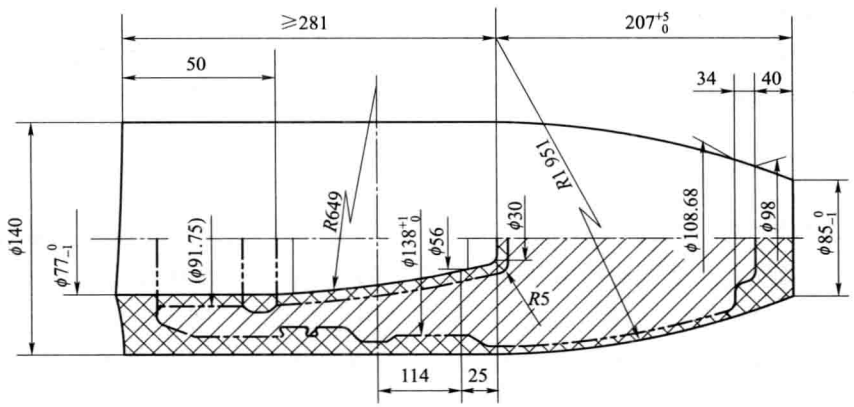


图 2.13　130/58 mm 海岸炮用半穿甲弹弹体热冲压毛坯图

毛坯的技术要求可根据零件的使用要求和加工要求加以规定。

2.6 定位基准的选择

工件在机床上加工时，为了获得符合要求的成品零件，就必须使工件在机床上或夹具内能被正确地定位。定位的正确与否直接影响着零件的尺寸精度和表面相互位置精度。工件正确定位的主要措施之一就是合理地选择工件的定位基准。根据作为定位基准的工件表面形态不同，定位基准有粗基准（未经过机加工）和精基准（经过机加工）两种。

弹箭零件定位基准的选择，除了应遵循定位基准选择的一般原则外，还必须考虑弹箭零件生产中的某些特殊要求。

2.6.1 粗基准的选择

粗基准的选择应能保证加工面与不加工面之间的位置要求并合理分配各加工面的余量，同时要为后续工序提供精基准。具体选择时一般应遵守下列原则：

（1）保证相互位置要求的原则。如果必须保证工件上加工面与不加工面的相互位置要求，则应以不加工面作为粗基准。

（2）保证加工表面的加工余量合理分配的原则。如果必须首先保证工件某重要表面的余量均匀，应选择该表面的毛坯面为粗基准。

（3）便于工件装夹的原则。选择粗基准时，必须考虑定位准确、夹紧可靠以及夹具结构简单、操作方便等问题。为了保证定位准确，夹紧准确，要求选用的粗基准尽可能平整、光洁和有足够大的尺寸，不允许有锻造飞边，铸造浇、冒口或其他缺陷。

（4）粗基准一般不得重复使用的原则。在同一尺寸方向上（即同一自由度方向上），通常只允许使用一次。因为毛坯的定位面很粗糙，在两次装夹中重复使用同一粗基准，就会造成相当大的定位误差（有时可达几个毫米）。

上述原则，每一条都只说明一个方面的问题，实际应用时往往会出现相互矛盾的情况，应根据产品图的技术要求，在保证产品性能的情况下，合理地选择粗基准。

2.6.2 精基准的选择

在零件的机械加工过程中，除起始工序采用粗基准外，其余工序应采用精基准定位，因此，应合理选择精基准。选择精基准时要考虑的主要问题是如何保证设计技术要求的实现以及装夹准确、可靠、方便。为此，一般应遵循下列5条原则。

（1）基准重合原则。应尽可能选择被加工表面的设计基准为精基准。这称为基准重合原则。

在对加工面位置尺寸有决定作用的工序中，特别是当位置公差要求很小的时候，一般不应违反这一原则。因为违反了这一原则就必然会产生基准不重合误差，增大加工难度。

（2）统一基准原则。当工件以某一精基准定位，可以比较方便地加工大多数（或所

有)其他表面,则应尽早地把这个基准面加工出来,并达到一定精度,以后工序均以它为精基准加工其他表面。这称为统一基准原则。

采用统一基准原则可以简化夹具设计,可以减少工件搬动和翻转次数,在自动化生产中有广泛应用。

应当指出,统一基准原则常常会带来基准不重合的问题。在这种情况下,要针对具体问题进行认真分析,在可以满足设计要求的前提下,决定最终选择的精基准。

(3) 互为基准原则。某些位置要求很高的表面,常采用互为基准反复加工的办法来达到位置粗度要求。这称为互为基准原则。

(4) 自为基准原则。旨在减小表面粗糙度,减小加工余量和保证加工余量均匀的工序,常以加工面本身为基准进行加工,称为自为基准原则。

(5) 便于装夹原则。所选择的精基准应能保证定位准确、可靠,夹紧机构简单,操作方便,这称为便于装夹原则。

在上述 5 条原则中,前 4 条都有各自的应用条件,唯有最后一条,即便于装夹原则是始终不能违反的。在考虑工件如何定位的同时,必须认真分析工件夹紧机构的设计原则。

2.7　弹箭零件机械加工工艺过程和工序安排

2.7.1　弹箭零件机加工艺过程

弹箭零件整个机加工艺过程由以下几类工序组成。

(1) 基本工序(或称主要工序)。基本工序是在金属切削机床上进行切削加工或在特种设备上进行特种工艺加工的工序。这类工序在整个机加工艺过程中占有重要的地位,所占比重也较大。弹箭零件加工中的主要切削方式有:

① 主要用于加工弹体、燃烧室等零件外表面的靠模车削与成型刀车削;

② 主要用于加工弹体药室、弹口端面、燃烧室内孔等的钻、镗和靠模镗削;

③ 主要用于加工尾杆的传火孔及喷管的喷喉等的精密小孔的铰削;

④ 主要用于加工弹体口螺纹、底螺纹或其他零件螺纹等的螺纹车削、铣削与滚压螺纹;

⑤ 主要用于加工小口径弹体定心部的无心磨削;

⑥ 其他切削方法(平面车削、切槽、切断等),主要用于加工弹体底端面、口端面、紧口槽、断裂槽、切余料等。

此外还有针对零件的结构、材料硬度等特点而采用的一些特种工艺,如用钢球挤压火箭弹喷管的喷孔等。

(2) 固定连接工序。包括压装弹带、钎焊被帽、滚压风帽等。

(3) 试验和检验工序。试验的目的是为了确保产品的材料性能、零件间固定连接强

度等。根据产品种类、用途、材料及结构特点等，弹箭零件试验项目与内容有：

① 与材料性能和质量方面有关的试验。包括非破坏性试验，如硬度试验，水压或气压试验、磁力探伤、超声波探伤等；破坏性试验，如热处理淬透性、金属低倍组织检验等。

② 与产品零件间固定连接强度有关的试验。如被帽与弹体连接强度试验——落锤试验等。

检验的目的是为了保证零部件加工质量。检验工序有：工序检验、半成品检验、成品检验和军代表验收。

(4) 辅助工序。弹箭零件机加工艺过程中的辅助工序有：打炉号、年号、厂号、批号，试验和检验印记，去除毛刺，内外表面的清理、清洗和中间防腐以及清洗后的擦干、烘干等。

清理是指用压缩空气吹风或在专用设备上进行喷砂、机械打磨、去除锈斑和氧化皮等。

清洗是指用汽油、酒精冲洗或擦拭内外表面，去除污垢等。

中间防腐工序根据需要而定，主要是指零件的表面氧化、磷化等处理。

(5) 完成工序。完成工序主要是指弹体、燃烧室等零件的药室喷漆，表面涂油、涂漆，烘干及装箱等。这些工序一般均放在机加工艺过程的最后阶段进行。

此外，收口和热处理虽然不属于机加工艺，但由于前后工序加工的要求，也都安排在弹箭零件机加工艺过程中实施，因此机加工艺过程工序的安排也必须考虑与这些工序的衔接要求。而收口和热处理工序以及固定连接工序又具有较大的独立性和特殊性，对弹箭零件的加工质量有很大的影响，尤其是收口和压弹带工序常成为弹体加工的关键性工序。

2.7.2 弹箭零件机加工艺过程的阶段划分

根据弹箭零件的结构形状、质量要求、毛坯种类的不同，机加工艺过程基本上可分为两个主要阶段：粗加工阶段和精加工阶段。

对于需经收口的弹体，粗、精加工阶段的划分，往往以收口工序的位置划分，收口前为粗加工阶段，收口后为精加工阶段。

对于不收口的弹体与壳体，粗、精加工阶段的划分往往以精车外形工序的位置分界，精车外形前为粗加工阶段，精车外形后(包括精车外形工序)为精加工阶段。

对于以锻造或轧制棒料为毛坯的弹体或其他零件的加工，粗、精加工阶段的划分不十分明显，往往视具体加工情况而定，一般以热处理工序或精车外形工序的位置来确定。

划分粗、精加工阶段的目的是为了易于保证加工质量，便于管理和恰当地选择工装及设备等。粗加工阶段的工序余量较大，所用机床的功率要大而且刚性要好。如粗加工阶段所切除的直径方向余量一般为总余量的60%～70%。可见，粗加工是精加工的准备阶段。此外，在粗加工阶段能较早地发现毛坯内部存在的缺陷，及时地处理废品，

以减少工时的损失。

因此，粗加工阶段一般应安排下列表面的加工：

(1) 主要定位基准面；

(2) 易出废品的重要表面和关键工序；

(3) 其他一些表面的粗加工。

在上述工序完成后，可以在加工中间阶段视加工的便利与否安排一些不重要表面加工。如：带自由尺寸的表面、不重要的内孔与螺纹、零件上某些结构细节的加工（倒角、切凸肩和沟槽、去毛刺等）；为装配连接件（螺钉、销钉）而进行的钻孔工序；为改变外观和减轻重量而进行的工序等。不重要表面的加工工序的安排，一般来说没有严格的要求。

零件加工的最后阶段主要是进行重要表面的精加工和光整加工。如果这些工序在前面阶段中进行，则已加工好的高精度、低粗糙度表面就可能会在后续工序中被损坏。由于这些工序应达到零件的最后技术要求，所以选定的加工方案应有效地保证工件的质量。精加工时，各工序间的相互关系尤为重要，因为它决定了零件各表面相互位置精度及各表面本身的加工精度，所以要正确选择加工时的定位基准，正确地安排其加工顺序。

2.7.3　弹体加工工序安排原则

由上可知零件加工工序的安排应针对具体情况而定，这样才能拟定出合理的工艺路线。现以弹体的加工为例讨论工序安排的原则与方法。

1. 基本工序的安排

安排弹体加工基本工序的原则是：

(1) 加工顺序的拟定与定位基准的选择应保证弹体外形各表面间及与药室、弹口的同轴度。为了获得较高的同轴度，光药室弹体（即药室需机械加工者）的加工应为内外表面互为基准交替地进行。即：粗车外形→粗镗药室→精车外形→精镗药室。这样可使被加工表面与定位基准间的尺寸精度、相互位置精度（主要指同轴度）、表面粗糙度等不断地提高。

加工时的定位基准应选择为：外形加工以药室口部作为主要定心基准，尾部中心孔作为辅助定心基准；药室加工以定心部或圆柱部作为主要定心基准，尾锥部表面作为辅助定心基准；外形上各部位（指弹带槽、紧口槽等）的加工则以弹体头部弧形和尾锥部表面作为定心基准；轴向定位一般是以弹底端面、弹口端面及药室底部等作为基准。

(2) 收口弹体的收口工序应排在切余料和外形粗车之后，因弹体在经过粗车之后才能取得收口前所要求的形状。收口弹体在加工过程中如有热处理时，热处理工序应紧跟在收口工序之后进行。这样可使在收口和热处理两个工序中产生的变形，在以后的精加工阶段一并得以修正。此外，热处理后还应对中心孔进行修正。

(3) 定心部的精加工一般尽量往后安排，而弹带外形的加工应排在整个加工过程的最后阶段，以避免这些表面在工序间周转过程中受到损伤。

以上这些原则对于任何弹种弹体的加工都是适合的。

对于其他一些基本工序的安排原则如下。

(1) 药室的加工总是在外形加工之后。药室的粗镗和精镗两道工序,如前所述,应分别在粗车和精车外形之后进行;粗药室的镗底部工序必须位于粗车外形之后和收口之前,因为在收口后镗刀板无法进入药室。

(2) 镗弹口与齐端面常作为收口后的第一道工序,以便使后续的精车外形工序能以此作为定位基准。

(3) 精车外形之后即可切除定心桩及切齐弹底端面。因为后续弹体各部位加工不再用定心桩,而改用弧形部和尾锥部作为定心基准。

(4) 对于燕尾式弹带槽的加工,如弹带槽与定心部相接者,应在精车定心部之后进行。否则,在定心部精车时,由于定心部余量的影响将使弹带槽上部宽度尺寸产生误差。如需先加工弹带槽,则应适当缩小弹带槽上部宽度尺寸。对弹带槽不与定心部相接者,定心部的精车一般放在机加的最后阶段。

(5) 弹口螺纹的加工:对于进行水压试验的弹体,应安排在水压试验之后进行,目的是防止水压试验时引起螺纹变形。当弹口螺纹加工安排在水压试验之前进行时,为了防止水压试验引起螺纹变形,水压试验时应在螺纹部位加一个防护环。

穿甲弹弹体的螺纹加工:如是等强度弹体,常安排在热处理之前的低硬度下进行加工,以便于切削。但热处理后一般应加一道螺纹校正工序。

(6) 弹带槽槽底滚花应列为一道独立工序。因为滚花时切削力较大,如与其他工序合并进行,则不易保证其他工序的加工精度。滚花工序一般应排在水压试验和磁力探伤试验之后。滚花过早,则在水压试验时容易在花纹处引起应力集中,在探伤时不易发现槽底部缺陷,并在后续工序间周转时易碰伤和积聚脏物。故滚花和压带两工序应连续进行(中间仅可安排清理工序和弹体的氧化或磷化工序)。

2. 热处理工序的安排

穿甲弹的热处理往往进行两次,其工序顺序为:为改善材料切削性能的热处理,一般在机加之前或粗加工之后进行;而决定零件材料最终性能的热处理,应排在接近工艺过程的最后阶段。过早热处理,材料硬度的提高会给机械加工带来很多困难,且对于淬透性差的材料来说,热处理以后再切去一层金属,显然会降低零件表面机械性能。

3. 试验和检验工序的安排

(1) 硬度试验应在精车外形之后进行。因为这时外表面的余量已全部切除,所得试验结果更能表明金属内部的实际性能。

(2) 水压试验应在外形和药室全部加工之后,并且在精平弹体底端面和切弹带槽直槽之后进行。因为这时弹体才具有成品所要求的壁厚和底厚。弹丸发射时,弹带槽部位是危险断面,弹底受力较大,只有在这些部位加工后进行水压试验,才能进一步发现这些重要部位是否有穿透性裂纹以及大的非金属杂物等缺陷,以确保弹体强度。水压试验前

一般并不扩出燕尾槽，这是因为在水压试验中易在燕尾夹角处积聚污垢，不易清除，影响压带质量。水压试验的压力与保压时间根据产品的工作时间而确定。

(3) 磁力探伤一般紧跟在水压试验之后进行，是用来检测铁磁性材料表面或近表面的缺陷。因为在水压试验时弹体受不同方向的拉力与变形，弹体表面或近表面的裂纹、发纹、非金属夹杂、折叠等缺陷经水压试验后将有一定程度的扩大，容易在探伤时被发现。穿甲弹弹体的磁力探伤一般紧接在保证弹体性能的热处理之后进行，这样便于发现由于热处理而造成的弹体缺陷，如肉眼不能观察到的微裂纹等缺陷。

检验工序视如下情况进行安排：

(1) 由其他分厂或本分厂其他工段完成的半成品，在加工之前进行检验。

(2) 某些重要工序加工的前后进行检验。

(3) 在零件全部加工完毕之后进行检验。

4. 辅助工序的安排

辅助工序的安排应根据具体加工情况视需要而定。如被帽与弹体连接前一定要安排打磨弹体头部弧形工序，其目的是为了去除热处理后头部弧形表面的氧化皮和锈迹，保证钎焊质量，压带之前需清洗弹带槽，以便去除污垢，保证压带质量。

2.7.4　工序的集中与分散

弹箭零件机加过程中除需正确地拟定工艺顺序外，对工序数目与工序内容也需予以合理地确定。工序总数及其内容的确定与零件的结构、技术要求和生产设备情况有关。解决这一问题有两个不同的原则，即工序的集中与工序的分散。

1. 工序的集中

零件的加工过程由少数工序来完成，而每道工序负担的工作较为复杂，工步较多，适宜于小批量生产。

工序集中的优点是：

(1) 可减少机床、夹具、生产面积和工人数量，提高生产的经济性。

(2) 可利用高生产率以及自动化程度高的机床，如多刀机床、多工位机床以及各种高生产率的夹具和刀具(如多工位夹具、组合刀具等)。

(3) 减少了零件安装次数，有利于提高零件各表面间相互位置精度。对质量较大的零件来说，则可减少搬运和安装的困难。

(4) 可缩短产品的生产周期。因为工序集中后可减少总的机动时间、辅助时间及各工序间停放与运输时间，因而提高了劳动生产率。同时由于工序数目减少，简化了生产计划及调度工作，减少了分厂在制品数量和流动资金的数额。

2. 工序的分散

与工序集中相反，是将加工过程尽可能地分细，使零件加工过程由许多简单的工序来完成，适用于大批量规模生产。工序分散的优点是：

(1) 可采用较简单的机床、夹具,并可简化机床的调整工作。

(2) 工序内容简化后对操作技能要求降低,且每道工序可选择合理的切削用量。

(3) 技术准备工作简单,投产快。

严格地划分工序集中与工序分散的合理应用范围是很困难的,应根据生产的具体情况来考虑,要结合具体生产条件比较不同方案的加工经济性,要适应战时动员大量民用工厂的通用设备以及动员大批人员参加军工生产的需要;应考虑零件的形状和尺寸、毛坯种类以及分厂现有设备情况等。

弹箭零件生产中,对以棒料为毛坯制造口径小于 37 mm 的弹体及其他零件时,多采用工序集中法在多轴自动机床上加工。而对 37 mm 口径以上的弹体,在现行工艺中大多采用工序集中与工序分散的中间方案,根据具体生产条件的差异,有的集中工序多些,有的分散工序多些。大量采用高效率的组合机床和改装现有设备,使工序向集中化方向发展,是弹箭生产单位当前技术改造的重要任务之一。

第 3 章　弹体毛坯热冲压

3.1　概　　述

热冲压是大、中口径钢质弹体毛坯和火箭弹战斗部壳体毛坯的主要成型方法。由于各类弹体结构上的不同，其热冲压工艺也有所区别。弹体结构一般可分为两种类型：一种是整体弹体，如地面榴弹和高射榴弹的弹体；另一种是带底螺的弹体，如后膛炮特种弹、半穿甲弹和混凝土破坏弹弹体。杀伤爆破火箭弹的战斗部壳体上述两种类型的结构都有。迫击炮榴弹的弹体为整体的，但特种弹弹体则是由上、下弹体以螺纹连接的非整体结构。热冲压成型的基本工序是冲孔，但随着弹体结构的不同，还需要配合其他的成型工序。

对于带底螺的弹体，由于其弹头弧形部在冲孔时成型比较困难，故需在冲孔前先通过压型工序初步压出弹头弧形部。对于像混凝土破坏弹这种弹头部很尖长的弹体，压型前还要先对坯料进行锻尖，以利于弹头部的成型。整体弹体的弹头弧形部是通过专门的收口变形工序来获得的，冲压变形只是获得带尾锥的圆筒形毛坯。考虑到热冲压毛坯的壁厚差随着冲孔深度的增加而增大，为了提高毛坯的制造精度，通常采用冲孔后再拔伸的成型方法来减少冲孔的深度。即在冲孔时先压出尾锥部和冲出药室初形，然后通过拔伸将毛坯拔细拔长至所需的尺寸（见图 3.1）。这种方法由于冲孔深度小，减小了冲孔时的壁厚差，而拔伸时对壁厚差还会有所纠正，因而可获得壁厚差较小的毛坯。冲孔后再进行拔伸，还可以提高材料的致密性，从而改善毛坯的性能。

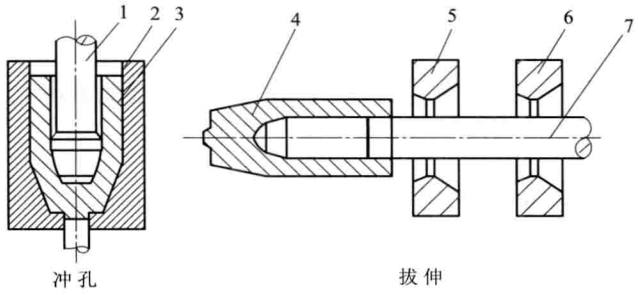


图 3.1　冲孔—拔伸示意图

1—冲孔冲头；2—冲孔毛坯；3—冲孔模；4—拔伸毛坯；5，6—拔伸模；7—拔伸冲头

整体弹体收口前需将弹头部外形加工成一定的成型表面，以保证收口后的弹头部内

形符合要求。当采用成型辊轧代替拔伸时，可直接获得弹头部收口前所要求的外形，而取消收口前的车削工作。

综上所述，整体弹体的热变形工序为下料→加热→压型→冲孔→拔伸→收口，弹体毛坯形状的成型过程如图 3.2 所示。整体弹体的热冲压工艺流程如图 3.3 所示。

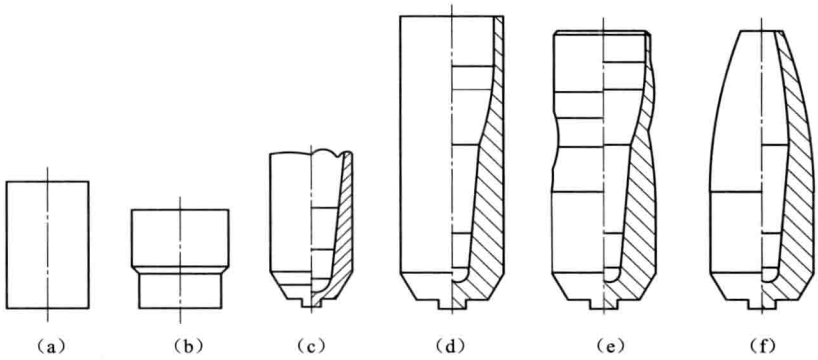


图 3.2 弹体毛坯形状的成型过程

(a) 下料；(b) 压型；(c) 冲孔；(d) 拔伸；(e) 收口前车削；(f) 收口

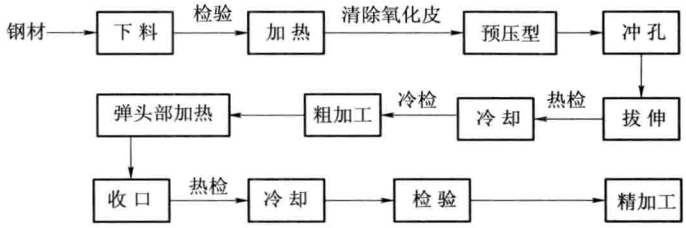


图 3.3 整体弹体的热冲压工艺流程

本章主要介绍制造榴弹弹体毛坯的冲孔、拔伸和收口工艺，这种热冲压方法已经有很长的历史，目前仍然被国内外所广泛采用。

3.2 金属压力加工成型的基础知识

3.2.1 金属塑性变形的若干概念

1. 弹性变形和塑性变形

当作用于物体的外力消失后，由外力引起的变形随即消失，这样的变形称为弹性变形。

当作用于物体的外力消失后，由外力引起的变形仍然保持，这样的变形称为塑性变形。

弹性变形和塑性变形都是在不破坏变形体的条件下进行的。物体在外力作用下的变形情况可用拉伸试验图(见图 3.4)来说明。拉伸曲线的 OB 段是符合虎克定律的弹性变形阶段，BA 段是塑性变形阶段。对物体加载到 A 点时，其作用力的大小由 Oa 表示，总变形由 Oc 表示。当卸载时，弹性变形的消失仍然依照虎克定律，所以 bA 平行 OB，由此得 Ob 为总变形中的塑性变形，bc 为总变形中的弹性变形。这一情况说明物体在塑性变形阶段仍然有弹性变形发生，bc 是 OB 段的弹性变形和 BA 段的弹性变形之和。

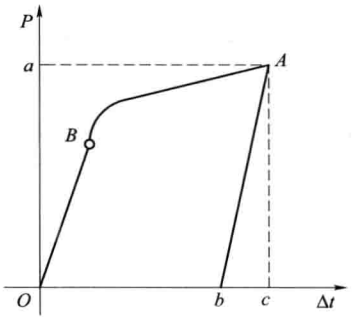


图 3.4　拉伸试验图

由于物体的总变形中总是包含有弹性变形，所以任何种类的压力加工都必然会发生“回弹”现象，在冷弯变形时，这种回弹非常明显。

2. 变形程度

物体塑性变形的大小可用绝对变形或相对变形来表示。绝对变形表示任一线尺寸、角尺寸、截面面积或整个物体(用三个方向上的尺寸表示)的绝对变化；相对变形则是上述任一参数的绝对变形与该参数的原始值之比。一般所说变形程度即是相对变形。

设物体原来的尺寸为 L_0，变形后的尺寸为 L，变形程度以 A 表示，则

绝对变形
$$\Delta L = L - L_0 \tag{3.2.1}$$

相对变形(变形程度)
$$A = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \tag{3.2.2}$$

由上式可知：当 $L > L_0$ 时，A 为正值，当 $L < L_0$(压缩变形)时，A 为负值。

由于变形过程中的每一瞬间，其相对变形都是不等的，为了正确地表示物体塑性变形的大小，物体的变形程度应以每一瞬间物体的绝对变形 $\mathrm{d}l$ 与该瞬间的尺寸的比值积分来表示。即

$$\overline{A} = \int_{L_0}^{L} \frac{\mathrm{d}l}{l} = \ln \frac{L}{L_0} \tag{3.2.3}$$

$\overline{A}$ 称为真实变形或对数变形。

$\overline{A}$ 与 A 之间存在一定关系：

$$\overline{A} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) = \ln(1 + A) \tag{3.2.4}$$

将上式展开可得，

$$\overline{A} = A - \frac{A^2}{2} + \frac{A^3}{3} - \frac{A^4}{4} + \cdots \tag{3.2.5}$$

当 $|A| < 1$ 时，上列级数收敛，当 $|A|$ 很小时，一般认为 $|A| < 0.1$ 时，$\overline{A}$ 与 A 的差值 $< 0.5\%$。

3. 主应力图和主变形图

(1) 主应力及主应力图。物体在外力的作用下变形时，其内部就要产生应力(单位面

积上的内力)。物体内任一质点的应力状态,都可用通过该点的三个坐标轴方向的应力来表示。一般把质点取为无限小的立方体,其三个方向的平面各垂直于相应的坐标轴。在任意坐标轴方向上,每个平面上都可以有正应力和切应力。如果坐标轴选择适当,使立方体的每个平面上都只有正应力而没有切应力,则这些平面称为主平面,作用于主平面上的应力称为主应力。

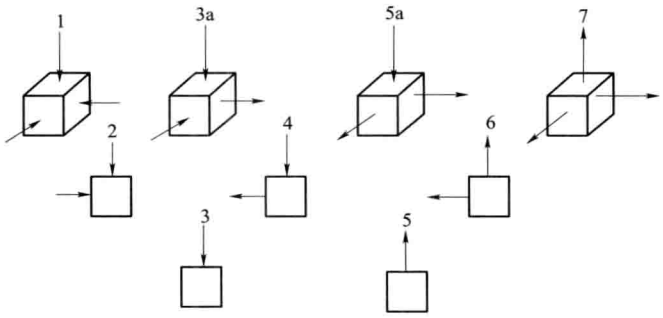


图 3.5 主应力图

在立方体上用箭头表示主应力及其符号(拉应力为正,压应力为负)的图形称为主应力状态图,简称主应力图。主应力图有 9 种形式(见图 3.5),4 种是三向主应力图(图中 1、3a、5a、7),3 种是平面主应力图(图中 2、4、6),2 种是单向主应力图(图中 3、5)。平面主应力图和单向主应力图可用正方形来代替立方体。主应力图中主应力符号都相同的称为同号主应力图,否则称为异号主应力图。

(2) 主变形及主变形图。在主应力方向发生的变形称为主变形,拉伸变形为正,压缩变形为负。在立方体上用箭头表示主变形符号的图形称为主变形图。主变形图与主应力图的表示方法完全相同,两者可用标注不同字母来加以区分,主应力图在箭头处标注 R,主变形图在箭头处标注 A。必须指出,由于塑性变形从宏观来说只有物体形状的变化而没有体积的变化,也就是说一个方向的拉伸变形必然引起另一个方向的压缩变形,因此不可能存在同号主变形图而只能有异号主变形图,这就使主变形图的形式只有 3 种(相当于图 3.5 中的 3a、4、5a),而不像主应力图那样有 9 种。

(3) 变形力学简图。将主应力图和主变形图放在一起,就构成变形力学简图。图 3.6 示出了几种不同变形方式的变形力学简图。由图可见,主应力图与主变形图可以有各种不同的组合。主变形的符号不一定与相应的主应力的符号相同,例如挤压时,在轴向压应力的情况下产生轴向拉伸变形。另外,在没有主应力的方向仍然可能有主变形,例如理想无摩擦镦粗时,轴向压缩变形引起径向的拉伸变形。

变形力学简图反映了外力的作用,决定了变形的方向,说明了对塑性和变形抗力有影响的物理状态,因而是分析塑性变形的重要依据。

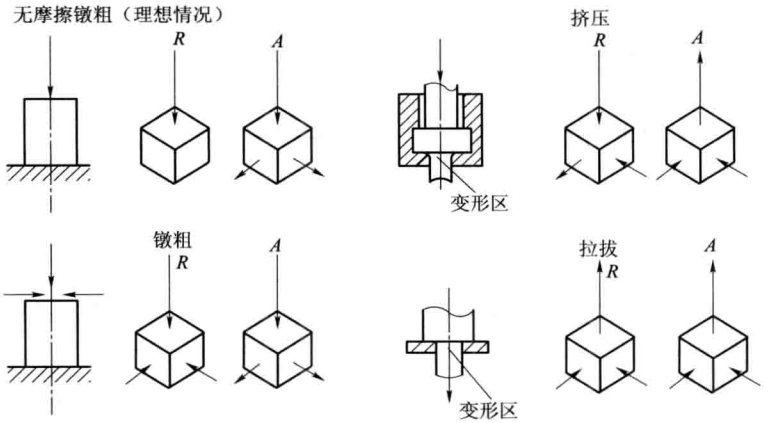


图 3.6　几种不同变形方式的变形力学简图

3.2.2　金属塑性变形的几条规律

1. 体积不变条件

塑性变形时金属密度的变化很微小，这种微小的变化在解决与应力和变形有关的问题中，没有什么实际意义，所以一般承认下述条件：物体塑性变形前的体积，等于塑性变形后的体积，即塑性变形体的体积保持不变，这就是体积不变条件。它是压力加工工艺设计的计算依据。

图 3.7 示出了塑性变形前后物体的形状和尺寸。根据体积不变条件：

$$L_0 \cdot B_0 \cdot H_0 = L \cdot B \cdot H$$

由此得：

$$\frac{L}{L_0} \cdot \frac{B}{B_0} \cdot \frac{H}{H_0} = 1$$

两边取对数：

$$\ln \frac{L}{L_0} + \ln \frac{B}{B_0} + \ln \frac{H}{H_0} = 0$$

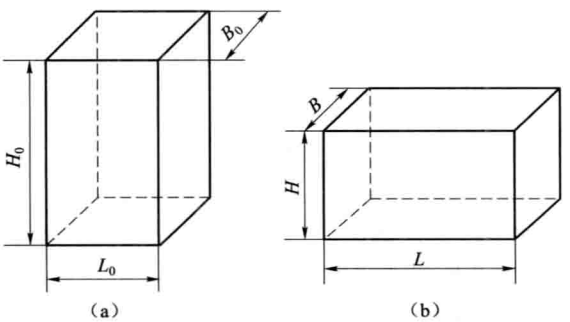


图 3.7　物体变形前后的形状尺寸

(a) 变形前；(b) 变形前

即 $$\vec{A}_x+\vec{A}_y+\vec{A}_z=0$$

式中 x,y,z——变形的坐标轴方向。

由此可得两点结论：

(1) 三个互相垂直方向上的对数变形的代数和为零；

(2) 三个对数变形中必有一个具有最大绝对值，并且等于另外两个变形的绝对值之和，但符号相反。

2. 最小阻力法则

最小阻力法则可表述为：当变形体的质点有向各个不同方向移动的可能时，质点总是沿阻力最小的方向移动。

由上述法则可知，最大变形总是发生在物体的大多数质点移动时遇到阻力最小的方向上。因此，只要适当改变摩擦和模具形状等影响阻力的因素，就可以控制金属的流动，以达到预定的变形要求。在压力加工成型中，常因变形体的温度不均匀、润滑不均匀和模具工作部分的形状不对称等导致金属流动的不均匀，产生成型误差。

3. 塑性条件

受力物体由弹性状态过渡到塑性状态的条件称为塑性条件。只有满足塑性条件，物体才能进行塑性变形。

对于塑性条件，有下列两种学说。

(1) 切应力条件。物体塑性变形的过程主要是通过滑移来实现的，因而塑性变形只能在切应力的作用下才能产生。所谓切应力条件是指：一定金属在一定变形条件(温度、速度)下开始滑移变形的切应力值为常数。此切应力可取为材料的屈服点 R_e 的一半，即当物体内的切应力达到 $R_e/2$ 时，物体开始进入塑性状态。

由塑性变形原理知：受力物体内部的最大切应力与主应力之间存在下列关系

$$\tau_{\max}=\frac{1}{2}(R_1-R_3) \tag{3.2.6}$$

式中 $\tau_{\max}$——最大切应力；

R_1——最大主应力(代数值)；

R_3——最小主应力(代数值)。

由此可得出结论：当物体内部最大代数值主应力与最小代数值主应力之差达到材料屈服点时，物体即进入塑性状况，其表达式为：

$$R_1-R_3=R_e \tag{3.2.7}$$

(2) 变形能条件。此塑性条件认为：一定金属在一定变形条件(温度、速度)下，只要单位变形能达到一定值，就开始塑性变形。其表达式为：

$$(R_1-R_2)^2+(R_2-R_3)^2+(R_3-R_1)^2=2R_e^2 \tag{3.2.8}$$

上式可简化为：

$$R_1-R_3=\beta R_e \tag{3.2.9}$$

式中　R_1, R_2, R_3——依代数值由大至小排列的主应力；

R_e——材料的屈服点；

β——系数(表示 R_2 的作用)，其值为 1～1.155。

由上式可见，上述两塑性条件的最大差值为 15.5%。

由于塑性变形将产生硬化，使材料的屈服强度提高，因此为保持塑性状态，必须加大外力，故以上塑性方程式中的 R_e 值应根据变形程度由硬化曲线上的真实应力确定。

由上述塑性条件可知：物体进入塑性状态的条件只与材料的性质、变形温度、速度及变形程度有关，而与物体内部的应力状态无关，即不论哪种变形方式，进入塑性状态的条件都是一样的。

3.2.3　金属的塑性和变形抗力

1. 塑性和变形抗力的概念

(1) 塑性。固体获得塑性变形的能力称为塑性。塑性可用变形体在不破坏条件下能获得塑性变形的最大值来评定，例如拉伸变形时的延伸率 A 和断面收缩率 Z。塑性是一种状态，它不仅决定于材料的性质和组织状况，而且在很大程度上取决于变形条件。

(2) 变形抗力。变形抗力指引起塑性变形的单位变形力，它与加载条件、变形的温度、速度条件有关。在单向拉伸或单向压缩时，变形抗力就等于材料的真实应力。

2. 硬化曲线

硬化曲线给出单向应力状态下，塑性变形体内作用的应力数值与变形数值间的关系。每种金属的硬化曲线都应当建立在具体的变形温度——速度条件之上。硬化曲线一般由拉伸试验所得数据来制订，纵坐标是塑性变形应力，等于某一瞬时的变形力与当时试件的真实横截面积之比，此应力称为真实应力，以 $\overline{R}$ 表示，它比按试件原始横截面积计算的名义应力要大。曲线的横坐标是变形程度，当以延伸率 A 表示时称第一类硬化曲线，以断面收缩率 Z 表示时称第二类硬化曲线。图 3.8 示出了第一类硬化曲线。由图可知，在变形的初始阶段，真实应力随变形程度的增加而很快增加，当变形程度增加至某一阶段后，真实应力的增加显著减慢。硬化曲线上某一点的切线表明金属在该变形程度下的冷加工

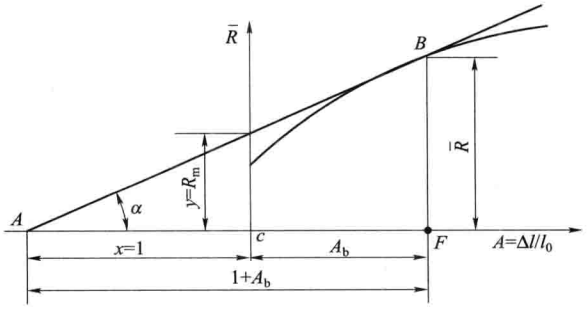


图 3.8　硬化曲线

硬化的敏感性。

第一类硬化曲线有如下特性：过颈缩点（拉伸试验时开始出现颈缩的瞬间）B 作硬化曲线的切线，它与变形轴交于负向，截距等于 1，对应力轴的截距等于强度极限 R_m。

3. 变形条件对金属的塑性和变形抗力的影响

（1）变形温度的影响。图 3.9 示出了随着温度的升高，材料的强度指标和塑性指标的变化情况。总的来说，材料的塑性随温度的升高而提高，变形抗力则随温度的升高而减小。但是在局部的温度区域，情况有所不同。首先，在蓝脆区域（图中 200 ℃～400 ℃），塑性显著降低，变形抗力显著增大。其次，在不完全热变形（再结晶不充分）的温度范围和相变温度范围内，塑性也有所降低，在接近熔化温度时，塑性急剧下降。

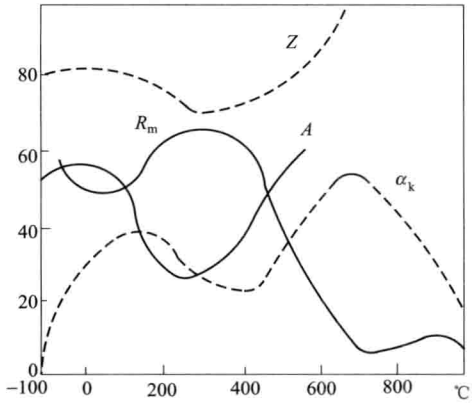


图 3.9 碳钢（$w(C)\approx0.15\%$）的机械性能随温度变化的曲线

在热变形（再结晶充分）的温度范围内，材料具有最高的塑性和相当低的变形抗力。

（2）变形速度的影响。变形速度是指单位时间内变形程度的改变量。

$$v=\frac{dA}{dt} \tag{3.2.10}$$

式中 v——变形速度；

A——变形程度；

t——时间。

应当把变形速度与工具的运动速度相区别，工具运动速度的单位是 m/s。对长度不同的拉伸试件进行拉伸试验时，在同样的工具运动速度下，两者的变形速度不同，变形速度与试件的长度成反比。但就同一变形体而言，工具运动速度大就意味着变形速度大。

变形速度对塑性和变形抗力的影响比较复杂。在通常的速度范围内，可以认为，变形速度增大时，材料的塑性降低变形抗力增大。需要考虑的一个问题是变形热效应问题，它的作用与变形速度有关。当变形速度加大时，变形热来不及散失而使材料的温度升高，这有利于提高塑性和减小变形抗力。这一点对冷压力加工特别明显。在热压力加工时，热效应的影响比较小，变形速度主要影响再结晶过程，当变形速度的加大使再结晶过程不能完成时，就会降低材料的塑性而加大变形抗力。

在非常大的变形速度下，例如采用高速锤或爆炸成型方法，材料的塑性会有很大提高。而另一方面，在塑性极大的超塑性成型时，最佳变形速度又非常小。

（3）主应力图的影响。塑性变形时，变形体内主应力图的形式对塑性和变形抗力的影响很大。由于拉应力会促使材料在应力集中处产生裂纹，又易于使晶粒之间产生晶间

变形，因而降低材料的塑性。而压应力则能压合材料内部的缺陷，同时能抑制晶间变形而促进晶内变形，因而有利于提高材料的塑性。由此可见，主应力图中压应力所起的作用越大(数量多，数值大)，则塑性越高。在图 3.5 主应力图的排列中，由序号 1 至 7，塑性渐次降低，序号 3a 介于序号 3 与 4 之间，序号 5a 介于序号 4 与 5 之间。挤压变形时，材料处于强烈的三向压应力状态下成型，因而具有最好的塑性。

主应力图对变形抗力的影响，表现为异号主应力图的变形抗力小于同号主应力图。由塑性条件知，当 $R_1-R_3=(1\sim1.155)R_e$ 时，物体开始进入塑性状态。对于同号主应力图，(R_1-R_3) 为两个主应力的绝对值之差，而对于异号主应力图，则为两个主应力的绝对值之和。在后者情况下，R_1 和 R_3 可以比较小就能产生塑性变形，因而变形抗力较小。主应力图对变形抗力的影响可如图 3.10 所示的排列，上下并列两排由序号 1 至 6，变形抗力逐渐增大。

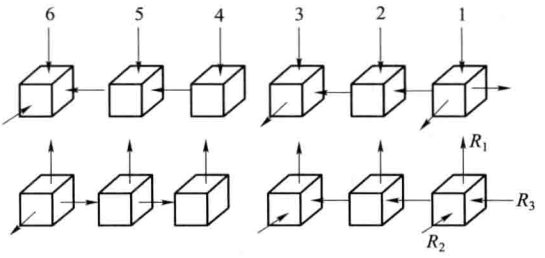


图 3.10　按变形抗力顺序排列的主应力图

图 3.11 所示为挤压与拉拔时由于主应力图不同而造成的变形抗力的差异。所用试件的材料为紫铜，变形条件和变形程度相同。拉拔时的主应力图为一向拉应力和两向压应力，变形抗力只有 215.6 MPa，而挤压时的主应力图为三向压应力，变形抗力达 441 MPa。

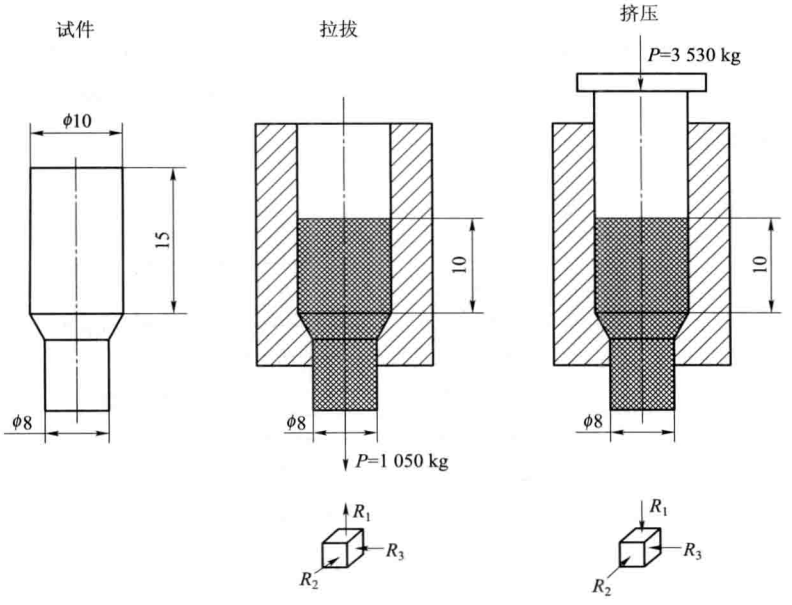


图 3.11　拉拔与挤压时的变形抗力比较

3.2.4 塑性变形对金属组织和性能的影响

塑性变形时，金属内部的晶粒发生滑移和破碎，并沿力的方向伸展，形成纤维组织，使机械性能产生方向性，即沿纤维方向的机械性能高于横向的机械性能。在冷变形后，金属内部为加工硬化组织，强度和硬度提高，塑性降低。冷变形后的金属可以通过退火处理进行再结晶而恢复原来的组织和性能。在热变形时，金属组织的硬化与再结晶过程同时进行，因而热变形后金属组织和性能的变化不大。

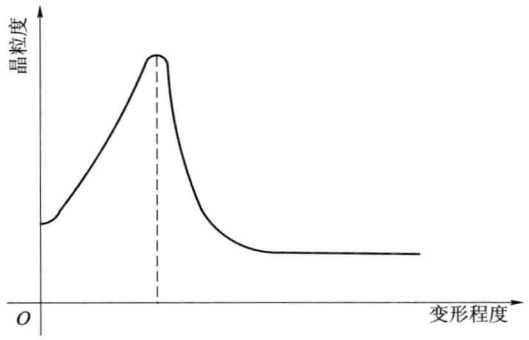


图 3.12 再结晶后的晶粒度与变形程度的关系

值得注意的是，金属组织在再结晶后的晶粒度与变形温度（或退火温度）及变形程度有很大的关系。晶粒度随着变形温度或退火温度的提高而增大，高温变形时的晶粒度很粗大。晶粒度与变形程度的关系可用图 3.12 所示的曲线来表明。由图可知，在某一变形程度下，金属的晶粒度（冷变形是退火后的晶粒度）急剧增大，此即临界变形程度，其数值与温度有关。一般来说，当温度升高时，临界变形程度减小。在再结晶开始温度附近，临界变形程度之值一般不超过 8%～10%。粗大的晶粒不仅大大地降低了材料的塑性，而且也使强度指标下降。

变形温度和变形程度对晶粒度的综合影响可用再结晶全图来表示，图 3.13 是低碳钢的再结晶全图。由再结晶全图可以确定每一种温度和变形程度下再结晶后的晶粒度，从而可以选择适当的工艺参数。

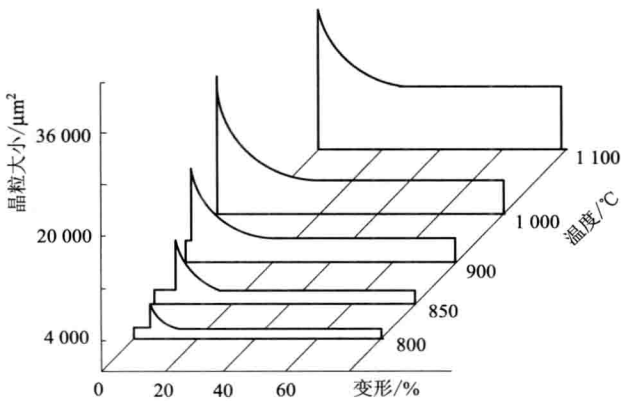


图 3.13 低碳钢的再结晶全图

3.3　坯料尺寸及下料方法

下料是弹体毛坯热冲压的准备工序，其质量对毛坯的壁厚差和材料消耗量以及工艺装置的寿命都有一定程度的影响。

3.3.1　坯料截面形状和尺寸的确定

用作弹体毛坯的原材料为热轧钢材，其截面形状是按照产品结构形状和成型的难易程度加以选定，有圆形截面和带圆角的方形截面（简称方形截面）两种。方形截面较圆形截面有一定的优点，当坯料放入冲模时，能较好地对准中心，且易放稳，冲孔后毛坯的壁厚差较小；其次，在相同的条件下，方形截面冲孔时所需的压力较小，可从图 3.14 所示的(b)、(c)两种不同截面的坯料用同一冲头冲孔时的压力—行程曲线看出。这是因为方形截面坯料冲孔时，金属容易被冲头挤向四周以填充坯料与模壁之间的空隙。圆形截面的坯料则不同，冲压时冲头将材料挤出，并使材料产生与冲头方向相反的流动（反挤变形），变形区的材料处于强烈的三向压应力状态，正由于两者冲孔时材料的主要变形方式的不同，导致了两者所需压力和消耗功的差异。

然而方形截面坯料冲孔后，其开口端的边缘起伏不齐，不如圆形截面的冲孔开口端平整。虽两者拔伸后都要经车削切除口部余料，但前者的切除量显然较大。

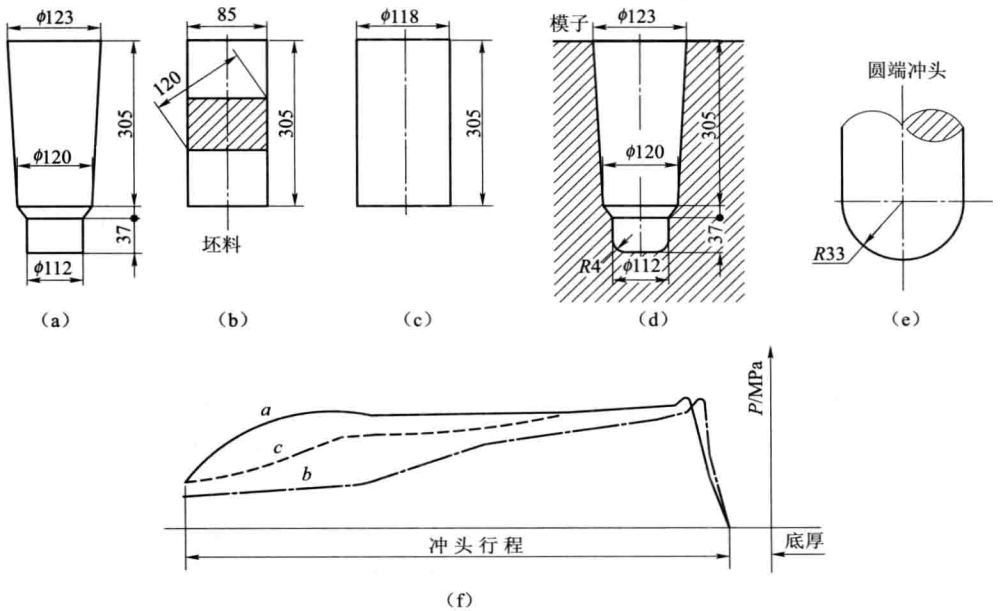


图 3.14　三种坯料冲孔时的压力—行程曲线

(a) 圆形变截面坯料；(b) 方形截面坯料；(c) 圆形截面坯料；

(d) 模子；(e) 圆端冲头；(f) 压力—行程曲线

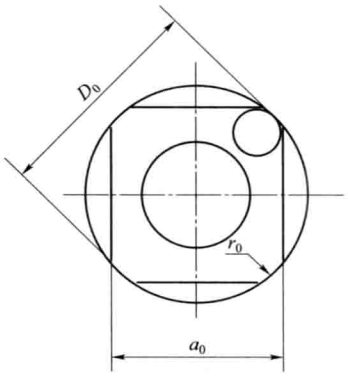


图 3.15 圆角方钢的截面尺寸

为避免方形截面的尖角迅速地使冲模模壁磨损，生产中采用带圆角的方钢，如图 3.15 所示。其截面尺寸包括边长 a_0、圆角半径 r_0 和对角线 D_0。

坯料截面尺寸的确定是考虑使冲头挤出的材料能良好地充满坯料与模壁间的 4 个空隙部分，避免冲孔时材料产生反挤变形。事实上在冲头进入材料内部之前，坯料已被镦粗，因此在冲孔的后阶段也还会有一定程度的反挤变形产生。

D_0 是方形截面坯料的最大直线尺寸，此尺寸影响坯料能否方便入模以及在模内的定位，因此首先确定 D_0。D_0 使其在热态下与冲模下锥部的上端直径相等，其余尺寸则按下面方法计算。

冲孔毛坯的截面积 S_1 为：

$$S_1=\frac{\pi}{4}(D_m^2-d_m^2) \tag{3.3.1}$$

式中 D_m——冲孔后毛坯的平均外径，mm；

d_m——冲孔后毛坯的平均内径，mm。

计算上述平均直径时，不包括冲孔毛坯的尾锥在内。

方形截面坯料的截面积 S_0 为

$$S_0=a_0^2-0.86r_0^2 \tag{3.3.2}$$

令 $S_0=S_1$ 则 $a_0^2-0.86r_0^2=S_1$

而方形截面坯料的截面尺寸之间又存在以下关系：

$$1.4a_0-0.8r_0=D_0 \tag{3.3.3}$$

联立式(3.3.2)和式(3.3.3)，即可计算出 a_0 及 r_0 值，并按实践经验加以修正。综合现行生产数据来看，方形截面坯料的边长与弹体口径相接近。

当药室深度较浅，弹体外形曲率又较大时，则采用圆形截面坯料较合适。因为此时若采用方形截面坯料，金属变形量较大，成型较困难。另外，下部金属开始流动时金属在棱角处发生变形，使棱角处压塌，棱角处金属向侧向流动，有可能形成弹体外表面上的皱褶或重皮。对于圆形截面坯料，其直径应在热态下等于冲孔模下锥部的上端直径。

坯料截面尺寸确定以后，即可确定单个坯料的长度。为此应先计算出单个坯料的重量，单个坯料的重量应包括：弹体毛坯重量，加热时的火耗量以及断料时的损耗量。断料时材料的损耗量与断料方法有关。火耗量则依据加热温度与加热炉类型而定，对于重油炉可取 2%～3%，对于煤气炉可取为 1%～2%。

坯料长度对材料利用率有着重要的影响。为了保证毛坯的尺寸要求，又能减少不必要的机械加工余量以降低材料的消耗，考虑到目前热轧钢材的尺寸公差很大，因而必须根

据热轧钢材的实际截面积确定单个坯料的长度。

3.3.2　断料方法

将棒料切断成为单个坯料的方法有多种，各种断料方法各有其适用的情况，其断料质量也有差异，因而对毛坯质量及其制造成本有着不同的影响。

断料的端面质量对毛坯的内腔质量影响较大，因而是评定断料方法优劣的标志之一。断料端面粗糙、存在毛刺等缺陷时，经冲孔后，就造成冲孔毛坯内腔底部的凹坑、裂纹等疵病，拔伸后，这些疵病有时可能转移或延伸到内腔壁部，或者造成内腔表面的不光滑，严重时甚至造成弹体毛坯的报废，并且也会加速冲头的磨损。

断料端面的平直度也是评定断料方法优劣的标志之一。断料端面平直，冲孔后毛坯的壁厚差小。此外，断料端面歪斜会造成单个坯料的重量偏差大，使拔伸后的毛坯长度差别较大。为保证重量最小的坯料也能满足毛坯最小长度的要求，单个坯料的断料长度需要增加。特别是采用感应加热时，断料端面斜度过大，将使单个坯料在感应加热器内的推送产生困难，并且坯料容易翘起而在感应加热器的内衬上造成划痕。

断料质量的其余两个标志是单个坯料的质量控制和断料时的材料损耗，它们都对材料利用率产生影响。

目前生产中断料的方法主要有：锯切、压力机冷剪切以及开槽后压力机折断，通常采用开槽后压力机折断的断料方法。

锯切断料的端面质量较好，端部形状规整，端面平直偏斜为 1°左右，能精确控制断料质量。此法的缺点是材料的损耗和锯片的消耗量大以及生产率低。锯切低碳钢比较容易，但锯切未经特殊处理的高碳钢比较困难。

压力机上冷剪切也能有满意的质量控制，且生产率很高，但端面质量和端面平直度低于锯切。如坯料需感应加热，则应控制剪切过程以提高其断料端面的平直度。由于冷态剪切时的剪切抗力很大，故一般用于剪切中、低碳钢。

开槽后在压力机上折断的方法是首先在棒料上按单个坯料的长度划线，依线的位置开槽，然后在压力机上以弯曲力矩将棒料折断。

开槽的目的在于形成应力集中区域，以降低折断坯料所需的压力，并使断口平整。通常都采用氧炔焰开槽，开槽时会使显微组织发生变化，即开槽部位产生淬火马氏体，有利于下一步的折断，这种断料方法均用于中碳或高碳钢。氧炔焰开槽时的槽宽通常为 1～4 mm。槽深则一般为 10～15 mm，最深不能超过 20 mm。因为开槽过深时，在凹槽表面处可能形成大面积淬火效应和严重的氧化现象，影响弹体毛坯的质量。开槽后的棒料在压力机上折断时所用的装置如图 3.16 所示。棒料放在两个支垫上，冲头下压进行折断。

开槽后折断的断面质量较差，粗糙、多毛刺、端面不平直。这不仅影响冲孔毛坯质量，而且增加材料的消耗。

尽管如此，由于这种方法生产率高，简易，且能满足要求，所以仍然用得较多。采用此

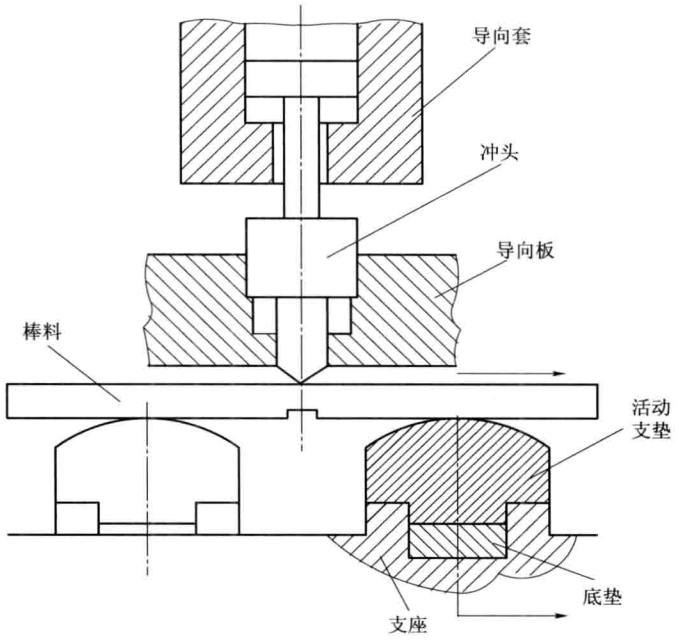


图 3.16 活动式折断装置

法断料后，必要时需进行凿除毛刺的工作。

上述的几种断料方法虽都能用于不同的情况，但都不理想，目前已出现一种能排除上述几种现行断料方法所存在的缺点，并适用于各种弹体材料（包括高破片率材料）的新下料方法——热剪切下料。

热剪切的过程是：

(1) 棒料送进加热炉加热；

(2) 热剪切棒料；

(3) 单个的热坯料被传送往压力机。

国外对用于弹体，w(C)分别为 0.18%及 0.46%的碳素钢以及高破片率弹体材料热剪切的研究结果表明，热剪切断料工艺是目前一种良好的弹体下料方法，能获得优质的弹体毛坯。热剪切单个坯料的长度、质量偏差和断面平直度及端部质量都能达到较高的水平，剪切断面光洁、无氧化，能显著提高弹体毛坯的内腔质量。

获得优质坯料的热剪切温度范围：

对于 w(C)为 0.18%的碳素钢为 982 ℃～1 232 ℃；

对于 w(C)为 0.46%的碳素钢为 927 ℃～1 176 ℃；

对于高破片率的高碳合金钢为 982 ℃～1 093 ℃。

严格控制剪切刀片间隙，也是获得优质坯料的重要因素。

国外将加热、下料和成型组成高度自动化的生产线。待剪切棒料被自动送至称重平

台称重，得到的棒料质量数据被传送到微型计算机，计算机则假设在棒料全长上截面积均匀分布而算出棒料长度、能剪切的单个坯料数量、每单位长度的重量，并将计算结果传送到热剪切压力机的调节装置，调节装置则按每根棒料的单个坯料最佳长度进行校正，获得所需的剪切长度。棒料在称重后经感应加热装置加热，而后送入热剪压力机热剪下料，热剪后的单个坯料随即被冲压成型。

除了坯料的质量高以外，热剪切下料还具有简化工艺和减少中间材料运输等优点。

3.4　坯料的加热

温度对金属的塑性和变形抗力有着重要的影响。当金属被加热到某一温度范围时，其塑性提高，变形抗力降低，例如室温下 R_m 为 588～686 MPa 的碳钢，加热到 1 100 ℃～1 200 ℃时，其 R_m 下降到 29.4 MPa 左右，约是其室温时的 1/20，在此温度下，高碳钢和低碳钢均有极好的塑性，断面收缩率 Z 可达 90%以上。此时坯料即能顺利成型，能减小所需成型设备的压力和所消耗的能量，热冲压前坯料加热的目的即在于此。坯料的加热还对热冲压毛坯的质量和材料的损耗有影响，正确的加热应能使热冲压毛坯有良好的组织，使其性能符合技术要求，并使材料的损耗尽可能地减少。

3.4.1　热冲压温度范围的确定

热冲压都在一定的温度范围进行，温度范围是指始冲温度和终冲温度之间的一段温度间隔。这一温度范围随材料化学成分的不同而各不相同。

从降低变形抗力的角度出发，加热温度应尽可能提高。显然，对于碳钢，加热温度的上限（始冲温度）应在固相线 AE 以下（见图 3.17）。因此，始冲温度将随含碳量的增加而降低，对于合金钢，通常更为明显。由于材料开始熔化之前在高温氧化性炉气下长时间加热，氧化性气体会渗入其内部，使晶粒界面被急剧氧化而形成过烧。过烧的金属因晶粒之间的结合被破坏，以致丧失塑性，冲压时会产生裂缝，甚至碎裂，故只能报废。此外，金属被加热到某一临界温度并在该温度下长期保温时，晶粒会急剧增大，导致金属塑性下降而形成过热。因此许可的最高始冲温度受到过烧与过热温度的限制，一般应低于固相线 100 ℃～200 ℃。

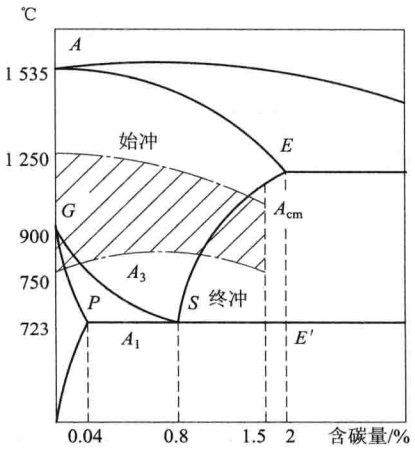


图 3.17　热冲压温度范围

冲压终了的最低温度主要应保证获得组织均匀、晶粒细小而没有硬化现象和裂纹的热冲压毛坯。所以冲压终了的最低温度必须保证能充分进行再结晶，同时也不能过高，以免在冲压后

的冷却过程中晶粒继续长大而降低了机械性能，特别是冲击韧性。

钢料在高温单相区（如图 3.17 所示 *GSE* 线以上的奥氏体区）具有好的塑性，而在两相区冲压时，则金属变形不均匀，变形抗力提高，塑性下降。所以对于亚共析钢一般应在 A_3 以上 15 ℃～50 ℃时停止冲压，但对于低碳钢（$w(C)<0.3\%$），其终冲温度低于 A_3 也是允许的，因为虽然是两相区，但其塑性仍然相当高。对于过共析钢，在 A_{cm} 以下时将析出二次渗碳体，并沿晶界呈网状分布，材料的机械性能下降，切削性能将恶化。为了打碎网状渗碳体，在 A_{cm} 时还应继续冲压，否则工件必须迅速冷却，以防止网状渗碳体析出。但过共析钢的终冲温度也不能过低，过低时金属的塑性将显著下降，再结晶过程不完全，过共析钢的终冲温度一般应高于 A_1 50 ℃～80 ℃。碳钢热冲压温度范围如图 3.17 阴影区所示。表 3-1 列出了碳钢及合金钢的热冲压温度范围。

表 3-1 钢的热冲压温度范围

钢种	$w(C)/\%$	始冲温度/℃	终冲温度/℃
碳素钢	0.1～0.3	1 200～1 150	800～850
	0.3～0.5	1 150～1 100	800～850
	0.5～0.9	1 100～1 050	800～850
	0.9～1.45	1 050～1 000	800～850
合金钢	低合金钢	1 100	825～850
	中合金钢	1 100～1 150	850～875
	高合金钢	1 150	875～900

由于生产条件的不同，各生产单位采用的热冲压温度范围也不尽相同。表 3-2 列出了生产弹体毛坯的热冲压温度范围。

表 3-2 各种口径弹体毛坯的热冲压温度范围

弹体口径/mm	坯料尺寸/(mm×mm)	钢号	冲压温度/℃		炉温/℃
			始冲	终冲	
85	85×85	D60	1 100～1 180	≥850	≤1 250
100	105×105	D60	1 100～1 150	≥800	≤1 250
122	115×115	D60	1 100～1 180	≥820	≤1 280
130	115×115	D60	1 120～1 180	≥850	≤1 250
152	154×154	D60	1 100～1 160	≥850	≤1 300
130	ϕ125	35Cr3NiMo	1 080～1 150		1 280

对于弹体毛坯的热冲压来说，其全部热冲压工序在一次加热后完成。确定热冲压温

度范围的原则应该是首先确定合适的终冲温度，然后根据热冲压过程中的温度下降值确定其始冲温度，以避免由于始冲温度过高，致使热冲压完成时的终冲温度过高而影响弹体毛坯质量。

3.4.2　钢在加热过程中的氧化与脱碳

钢在火焰炉内加热的过程中，其表层金属与炉气中的 H_2O 和 O_2 等氧化性气体进行化学反应生成氧化皮。氧化皮由三层组成，外层为 Fe_2O_3，中间层是 Fe_3O_4，金属与氧化层的交界处为 FeO。

影响金属氧化的主要因素是加热温度、加热时间、炉气成分和金属的化学成分。200 ℃以下钢表面没有显著氧化的痕迹；加热到 600 ℃～700 ℃时开始显著氧化；900 ℃～950 ℃时则剧烈氧化；高于 1 300 ℃时，氧化皮熔化，氧化更剧烈进行。加热时间愈长，氧化皮的生成量愈多，尤其在高温下其影响更大，所以必须使钢在高温下停留在加热炉中的时间尽量短，即加热速度应尽量快。在氧化性炉气中加热钢，氧化皮就会大量产生；在中性炉气中加热钢，就不易产生氧化皮。

加热过程产生的氧化皮直接造成了金属的烧损，脱落在炉内的氧化皮对耐火砖炉衬产生腐蚀作用，附着在坯料上的氧化皮会使热冲压模具的磨损加剧，同时可能被压入热冲压毛坯表面，降低毛坯的表面质量。

因此，加热后的坯料，在冲压之前必须将氧化皮清除干净。特别应注意清除坯料朝向热冲压冲头的端面上的氧化皮，否则氧化皮将被冲头压入弹体药室底部，造成严重的弹底缺陷。通常采用喷射高压水的方法清除氧化皮。由于喷射的时间很短，坯料表面只有很薄一层受到高压水的冷却，而坯料内部的热量又能很快地使其重新升温。

脱碳是加热过程中钢表层中的碳与炉气中的 H_2O、O_2、CO_2、H_2 等产生化学反应，形成 CO 被烧掉或生成非金属碳化物。脱碳层深度也是和加热温度、时间、钢的化学成分以及炉气等有关。脱碳层的深度随加热温度、时间的增加而增加。钢的含碳量愈高，脱碳层愈深。

脱碳造成了钢料表层含碳量下降，对中碳及高碳钢尤其明显。脱碳后，其硬度和强度降低，如脱碳层深度小于机械加工余量，则对工件没有危害，否则将影响其使用性能。

3.4.3　加热速度和加热时间

正确的加热应保证坯料达到所要求的始冲温度以及坯料的连续、完整和温度均匀，在此前提下，尽量减少坯料的烧损和提高生产率。

如坯料加热不均匀，则各部位的变形抗力也不相同，冲压时就会使弹体毛坯的壁厚差增大、弹口部偏斜以及弹底厚薄不匀。

为满足上述要求，加热过程中必须控制加热温度、加热速度和加热时间。

加热速度是指在单位时间内坯料表面升高的温度（℃/h），或在单位时间内坯料被热

透的深度(mm/min)。坯料在炉内加热的过程是热量由表层向内部传递的过程,所以加热时坯料截面上会有温差存在,温差将在坯料内部引起热应力。加热速度愈快,坯料烧损量愈少,但却导致热应力进一步增大。当热应力高达一定程度时,坯料就会发生开裂。

坯料许可的加热速度取决于其金属的物理性质、结构状况及其质量的均匀性。坯料的导热性能良好,则有助于减小其内外层的温差,因而加热速度可以提高。坯料的截面尺寸大则会加剧其内外层的温差,所以应相应地降低加热速度。

加热过程的低温阶段(<550 ℃～600 ℃),如加热速度很快,坯料内部将引起高的热应力,并且低温时内部还可能存在残余应力,特别是低温阶段金属塑性还不高,当热应力超过金属本身的强度极限时,将导致产生裂纹或开裂。高温阶段(>550 ℃～600 ℃),则由于金属塑性的迅速提高,任何原因引起的内应力,都可能通过金属产生塑性变形而使之减弱或消失,因此提高加热速度不会破坏坯料的完整性。所以一般碳素钢或合金钢在低温阶段,其加热速度宜缓慢,高温阶段的加热速度则可以有很大的提高。

低碳钢由于导热性能良好,并且有高的塑性,因此热应力问题不突出,一般可直接高温装炉。高合金钢则由于其低温导热性能较差,塑性不足,因而要降低装炉温度,分段加热,并在各温度阶段给予一定的保温时间。

考虑到截面尺寸对热应力的影响,对于直径小于 150～200 mm 的碳素结构钢和直径小于 80～100 mm 的合金结构钢都可高温直接装炉,最后可在 100 ℃～150 ℃的温度下进行保温。

由于炮弹与火箭弹是大量生产,所以坯料加热都采用连续加热炉以提高生产效率。整个加热炉炉膛分成预热区、加热区和均热区,室温的坯料通过预热区的时间最长,在加热区坯料温度升高较快并达到规定的温度,最后在均热区使坯料的内外温度达到一致。一般坯料在断料后,先经过一定时间的储存以消除应力,而后送入加热炉加热,如断料后立即进入加热炉加热,则容易产生裂口。

坯料由室温加热到热冲压温度所需要的时间直接取决于加热速度。加热时间的长短可参考以下数据:

碳素结构钢　每 10 mm 0.1～0.15 h(半连续炉加热);

合金结构钢　每 10 mm 0.15～0.2 h(半连续炉加热)。

表 3-3 列出了生产弹体毛坯热冲压的加热时间。

表 3-3　弹体毛坯热冲压的加热时间

弹种及口径/mm	材料	坯料尺寸/mm	加热炉类型	加热温度/℃	加热炉温度/℃	加热时间/min
85 加榴	D60	85 或 75 方钢	煤气连续炉	1 100～1 180	1 200～1 280	70～100
100 加榴		105 方钢	重油连续炉	1 100～1 150	1 200～1 250	100～120
100 加榴			煤气连续炉	1 100～1 180	1 200～1 280	110～140

续表

弹种及口径/mm	材料	坯料尺寸/mm	加热炉类型	加热温度/℃	加热炉温度/℃	加热时间/min
100 加榴	D60	105 方钢	天然气旋转炉底连续炉	1 140～1 180	1 240～1 280	40～72
122 榴		115 方钢	重油连续炉	1 100～1 150	1 200～1 300	100～130
130 加榴			重油连续炉	1 100～1 150	1 200～1 250	110～140
152 榴		154 方钢	重油连续炉	1 140～1 190	≤1 300	100～150
130/58 半穿加弹	35Cr3NiMoA	ϕ125	重油连续炉	1 100～1 180	≤1 300	90～110
130 火箭弹			煤气连续炉	1 100～1 180	1 200～1 280	120～150

3.4.4　加热方法和加热炉结构

按热能来源的不同，加热方法可分为两类：一类是利用燃料在炉膛内燃烧以加热金属，为火焰加热；另一类是由电能转化为热能以加热金属，为电加热。目前弹体毛坯热冲压的加热普遍采用火焰加热炉。

火焰炉采用的燃料是重油、煤气及天然气，用这类燃料的加热炉比用原煤作燃料具有加热质量高、加热速度快、劳动条件比较好的优点。这种加热炉便于调节，炉温易于控制，其变化值一般可控制在 20 ℃左右。

火焰炉加热时，燃料燃烧所产生的炉气即为热源，由于热源与坯料之间的温差，高温炉气的热量传给金属坯料，同时也有一大部分热量传给炉壁，使炉壁温度升高，高温炉壁则以辐射形式将热量传给坯料。

热冲压弹体毛坯的坯料加热主要采用带推料机的连续加热炉，带旋转炉底的连续加热炉也已有采用。连续加热炉能使金属坯料逐渐加热，加热均匀，并能充分利用火焰的热量，组织连续生产。

图 3.18 是弹体毛坯热冲压用的连续加热炉。这类加热炉炉身很长，其左端是燃烧室，装有喷油嘴或煤气喷嘴，不停地向炉内喷射燃料，调节喷射量可以控制炉温，鼓风机经空气管道鼓入所需空气。火焰经弧形炉顶反射向右端伸展，炉温由燃烧室向进料口方向逐渐下降，加热炉左端是高温区，右端是低温区。燃烧生成的废气由烟道排出。加热的坯料排列在进料口轨道上，由推料机周期性地推入炉膛，坯料在轨道上一个推一个地由低温区向高温区推移，在推移过程中实现了加热。坯料在低温区预热，在加热炉的中间段加热到所需温度，最后在高温区均热，因而整个截面加热比较均匀。加热炉的两边侧墙上开有一排翻料口，热透后的坯料由出料口取出。

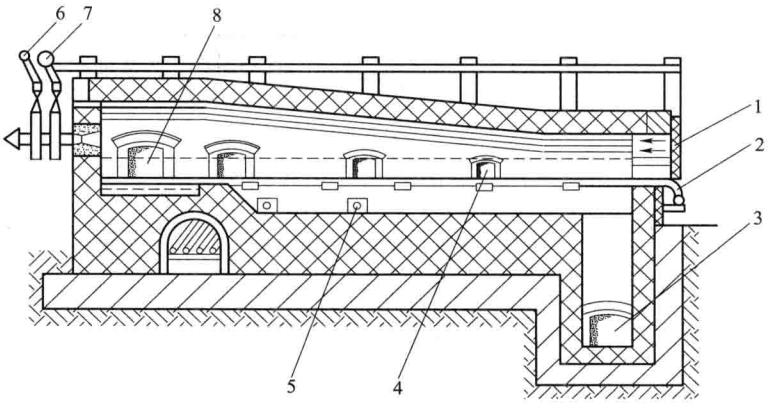


图 3.18 连续加热炉

1—进料口;2—轨道;3—烟道;4—翻料口;5—喷嘴;6—油管;7—空气管道;8—出料口

弹体毛坯热冲压生产中也常采用电感应加热。电感应加热的基本原理是:将坯料置于感应器内,根据坯料直径的大小,将适当频率的交变电流通入感应器,在其周围就产生交变磁场,位于交变磁场内的坯料内部便产生交变电势,在其作用下,金属坯料的内部产生涡流,通过坯料本身的电阻使电能转变为热能,这是坯料加热的热量主要来源。此外,坯料在磁性转变点以下的磁滞现象也是加热坯料的热量来源的一部分。

感应加热采用交变电流,因此在被加热金属的内部产生了电流沿金属截面不均匀分布的现象,中心部分电流密度较外表面的电流密度小,即产生趋肤效应。电流频率愈高,则趋肤效应愈严重,电流透入深度愈小。

由于趋肤效应现象的存在,感应加热时,坯料表面层金属主要靠电流通过而被加热,内层金属则是靠外层热量向内层传导而被加热。因此,对于大截面坯料,为了缩短内层金属的加热时间,提高加热速度,应选用较低的电流频率,以增大电流进入深度,提高热效率并且能避免表面层的过热。对于小截面坯料感应加热时,由于截面尺寸小,可以采用较高的频率,以提高电效率。

铁磁性材料如碳钢等,感应加热时,由于金属的电阻率随温度的升高有较大的增加以及由于相对导磁率在温度超过 760 ℃(居里点)时有很大的下降,因而电流透入深度将急剧增加。为节约电能,提高加热速度,可采用双频加热(或称混频加热),即 760 ℃前采用低频,760 ℃后采用中频或高频。坯料直径与电流频率的关系见表 3-4。

表 3-4 坯料直径与电流频率的关系

被加热的钢坯直径/mm	单频加热		双频加热时电流频率/Hz	
	电流频率/Hz	电流透入热钢中深度/mm	低于 760 ℃时	高于 760 ℃时
≤20	10 000 或更高	6	2 500	100 k～200 k

续表

被加热的钢坯直径/mm	单频加热		双频加热时电流频率/Hz	
	电流频率/Hz	电流透入热钢中深度/mm	低于 760 ℃时	高于 760 ℃时
15～40	8 000	6.7	1 000	10 k～100 k
30～80	2 500	12	50	2 500
50～120	1 000	19	50	1 000
70～160	500	27	50	500
160～500	50	85	50	50

感应加热时加热温度均匀，氧化脱碳很小，且机械化、自动化程度高。

3.5　弹体毛坯的冲孔

热冲压毛坯的质量，其中特别是弹体毛坯壁厚差的大小，很大程度上取决于冲孔。

冲孔前必须调整好冲孔模具高度，使冲孔冲头与冲孔模的中心线重合，并且调整好模具高度，以保证弹体毛坯的底部厚度。为使坯料放入模具后，不致因二者的温差过大而使坯料温度急剧下降，导致变形抗力增加，同时也是为了避免模具因激热所产生的热应力而降低其使用寿命，甚至导致胀裂，模具需经预热，但预热温度不宜过高，一般在 200 ℃左右。

冲孔前还应对冲头和冲模涂抹一层润滑剂，以降低冲孔模具与坯料之间的摩擦力，从而可使冲孔所需的压力减小，提高模具的使用寿命，获得光滑的弹体毛坯表面。目前应用于弹体毛坯热冲压的润滑剂是重油和石墨粉组成的混合物。尽管这种石墨在重油中的悬浮液是一般钢材热成型最通用的润滑剂，然而重油燃烧所产生的烟雾和油气会严重恶化工作环境。

对进入冲孔模冲孔的坯料其加热必须均匀。否则，冲孔冲头会由于侧向力的作用而偏向变形抗力较小的一侧，从而增大弹体毛坯的厚度差，严重时，作用于冲孔冲头的弯曲力矩可能折断冲头。因此，若用肉眼能区分出亮面和暗面的坯料都不应送入冲孔模冲孔。

3.5.1　弹体毛坯冲孔的变形过程

方形截料在模具内冲孔的变形过程比较复杂，整个变形过程由如下 4 种变形方式组成。

(1) 坯料被压至模底。如图 3.19(a)所示，坯料放入冲孔模后，位于冲孔模下部锥孔上方，冲头下行时，顶住坯料端面，将坯料压向冲孔模的下部锥孔，此时坯料处于其下部由方形向圆锥形趋近的局部变形过程。随着此局部变形的发展，坯料逐渐接近锥底，材料继

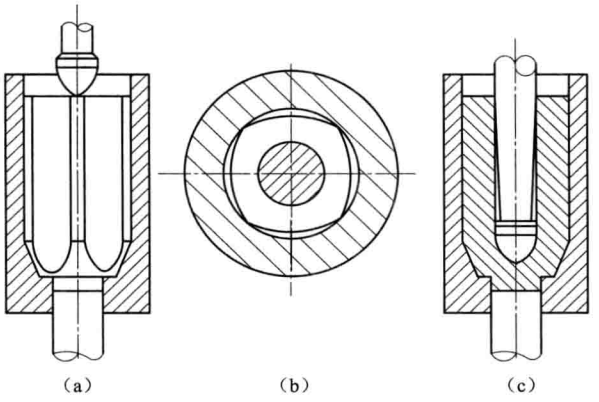


图 3.19 弹体毛坯的冲孔变形过程

(a) 压至模底;(b) 挤向四周;(c) 反挤压

续填充,尾锥的阻力也逐渐增大。

(2) 坯料全长被镦粗。当填充尾锥的阻力增大到大于材料被镦粗的流动阻力时,坯料即转向以镦粗变形为主。坯料全长被镦粗的阶段比较短,镦粗到一定程度后,冲头开始进入材料内部。

(3) 坯料被挤向四周。如图 3.19(b)所示,冲头压入材料后,挤开材料使之向四周空隙充填,随着冲头压入材料内部,挤向四周空隙的材料增多,直至填满全部空隙。

(4) 坯料反挤。由于坯料全长上被镦粗,因而被冲头挤开的材料除了一部分填满坯料与模壁之间的空隙外,另一部分材料将沿着冲头运动相反的方向流动,形成反挤变形。反挤变形是冲头压入材料一定深度后,伴随着材料被挤向四周时开始出现的,当四周空隙被全部填满后,冲头继续下行时,就出现了材料的纯反挤变形,如图 3.19(c)所示。

然而,上述各变形方式并不能截然分开,而是互相重叠的,它取决于变形阻力。材料总是按最小阻力法则变形,随着各变形过程变形阻力的改变,材料的变形方式也随之改变,各变形方式可能交替进行,也可能同时进行。特别是生产中,坯料的截面积和高度、弹体毛坯的结构形状多种多样,其变形过程更不可能按上述顺序截然地分阶段进行。例如当冲孔模的内腔底锥很长时,由于材料充填底锥的阻力增大,坯料直接冲孔时,可能孔腔已被冲成,而尾锥尚未充满。

圆形截面坯料冲孔变形过程则比较简单,主要是尾锥的局部成型和材料的反挤变形。

3.5.2 冲孔力

图 3.20 示出了以钝头冲头和圆头冲头分别对方形截面坯料冲孔时的压力—行程曲线。

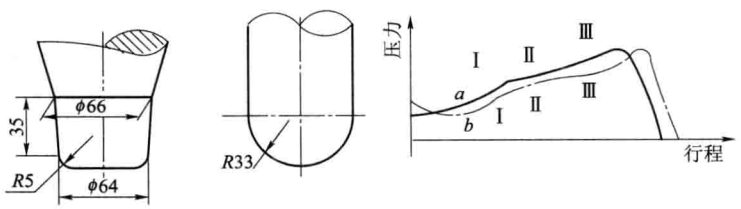


图 3.20 冲孔压力曲线比较

a—钝头冲头及其冲孔压力曲线;b—圆头冲头及其冲孔压力曲线

当将坯料压向模底并镦粗时，冲孔压力均匀上升(图中曲线起始点至点Ⅰ段)，冲头压入坯料，将材料挤向四周时，压力基本保持稳定(点Ⅰ至点Ⅱ段)，反挤开始后，压力增高，直至最后出现高峰。

冲孔时，坯料与冲头接触面上的摩擦力阻碍了金属的流动，在与冲头端面紧接的坯料体内形成一个变形困难的圆锥形区域，此圆锥区内的材料通常不变形或变形较小，该锥形区域称为滑动锥体。滑动锥体在冲孔的过程中，随着冲头的下压而整个地往下移动。当底部厚度被冲到一定数值时，冲头继续下行，就迫使圆锥形难变形区内的材料产生流动，显然此时需要冲头施加更大的压力。加之该部分材料与冲头端面接触，热量散失得快，温度下降，因而导致冲孔压力—行程曲线最后阶段的急剧上升。

冲孔的压力—行程曲线受到一系列因素的影响，如坯料的性能、温度、坯料截面形状以及冲孔过程的工艺措施润滑与预热模具等，前面已有叙述，现对另外两个主要因素进行阐述。

1. 冲头最大直径对冲孔模平均直径之比

当此比值为 0.3～0.5 时，冲孔力最小，比值较大或较小时，都将导致冲孔力增大。

2. 冲头形状

冲头形状对冲孔力的影响由图 3.20 可看出。不同的冲头形状有不同的坯料接触面积，这将对挤入坯料的难易程度产生影响，从而导致了冲孔力的变化。图 3.21 示出各种形状的冲头，若以实线所画冲头的冲孔力作为标准，则虚线画的冲头的冲孔力较小，点划线表示的冲头冲孔力稍大，双点划线所示冲头的冲孔力最大。图 3.22 为不同外形的两种冲头，尽管图 3.22(b)所示冲头的外形对挤入坯料有利，但和图 3.22(a)所示冲头相比，与材料之间的摩擦面有很大的增加，故冲孔力仍然较大。

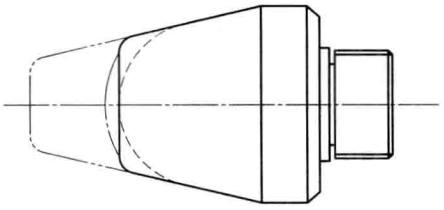


图 3.21　表面积不同的各种冲头

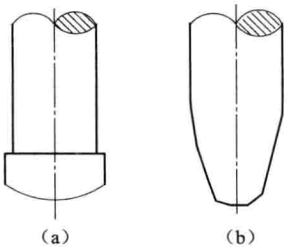


图 3.22　两种外形不同的冲头

(a) 钝头；(b) 尖头

影响冲孔力的因素很多，故精确地计算方形截面坯料的冲孔力比较困难，生产中都应用一些简单而实用的经验公式，以下是计算冲孔力的两个经验计算式。

(1)
$$P=S_p p \tag{3.5.1}$$

式中　S_p——冲孔冲头工作部分的最大横断面积；

p——单位流动压力。指塑性变形时，冲头与坯料的接触面在垂直于作用力方向

的投影面积上的单位压力。单位流动压力的数值取决于材料的变形抗力、摩擦系数、应力状态等。具体可根据坯料的断面和高度，坯料的机械性能、冲孔温度，冲头形状以及冲孔毛坯的结构等因素予以确定。当钢坯强度 R_m 为 784 MPa，冲孔平均温度为 1 230 ℃时，冲孔的平均单位流动压力为 196～245 MPa，最多不超过 343 MPa。式(3.5.1)的有效性依赖于 p 值的正确确定。

(2)
$$P=S_pK_1R_m \tag{3.5.2}$$

式中 S_p——冲孔冲头工作部分最大横断面积；

K_1——系数，由 d_p/t 之值确定，d_p 为冲孔头工作部分最大直径，t 为冲孔毛坯壁厚。K_1 与 d_p/t 之间关系见图 3.23；

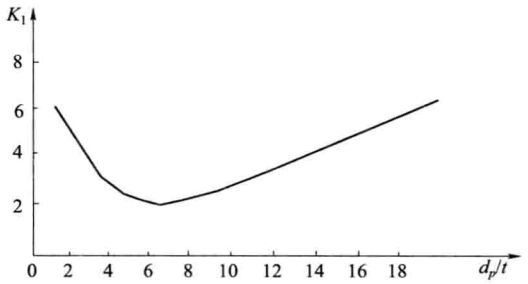


图 3.23 系数 K_t 与 d_p/t 的关系曲线

R_m——钢材在冲孔温度下的强度极限，见表 3-5。

表 3-5 钢材在冲孔温度下的强度极限

温度/℃	钢号					
	15	30	45	55	12CrNi3A	30CrNi3
20	43.70	55.40	74.00	78.30	62.00	100.00
600	20.75	24.15	29.07	33.45	24.60	27.45
700	11.17	14.08	16.81	17.70	15.26	18.96
800	7.52	9.63	11.00	9.83	11.89	13.03
900	7.14	7.14	7.60	7.02	8.79	9.16
1 000	5.16	5.27	5.62	5.02	6.27	6.05
1 100	3.56	3.54	3.69	3.69	4.53	4.15
1 200	2.56	2.53	2.58	2.58	2.96	2.77

3.5.3 冲孔前的压型和定心

前已述及，弹体毛坯的壁厚差主要在冲孔时产生，为减小壁厚差，冲孔时要保证坯料

在模具中正确地定心，这可以通过冲孔前的压型或采用定心工具来达到。

1. 冲孔前的压型

坯料冲孔前先压型（见图 3.24）成为压型毛坯，经压型后，坯料上端面被压出形状与冲孔冲头端部形状相同的凹窝，使坯料在冲孔时与冲头对准中心，坯料下部被压成锥形，使坯料能稳定地与冲模对准中心。

目前坯料压型时已不再在坯料端面上压出定心凹窝，而是将坯料端面压平。由于消除了断料时产生的断面斜度和断面上的凸凹不平，因而能避免冲孔开始时受偏心载荷的作用，有利于减小壁厚差。冲孔前的压型具有减小壁厚差的作用。某些弹体毛坯在冲孔成型前必须先压型，断料后直接冲孔，头弧部分不容易充满。若先压型，则可保证金属能充满冲孔模的各个部分。

2. 采用定心工具定心

坯料放入冲孔模时，先借助定心工具定心，而后冲孔。

定心工具之一是定心圈，图 3.25 表明了冲孔时应用定心圈定心的情况。首先将定心圈放在冲孔模上，然后将坯料装入冲孔模，坯料的四个角受到定心圈内径的限制，因而获得了正确的模中位置。接着冲头下压坯料，在其端面压出一定心孔之后，去掉定心圈，冲头第二次下压坯料，完成冲孔工作。定心圈的内径应为热态坯料的对角线长度再加上适当的间隙。这种定心方法压型能保证较小的弹体壁厚差，因而得到了普遍的应用。

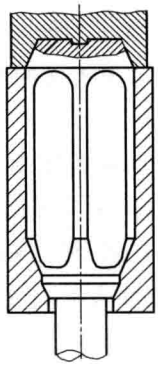


图 3.24　坯料压型

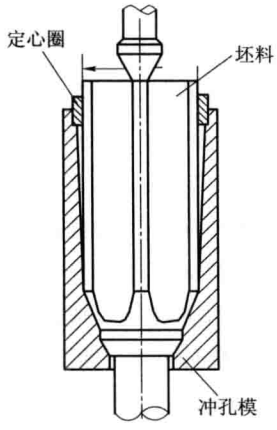


图 3.25　定心圈的使用

3.6　弹体毛坯的拔伸

拔伸紧接冲孔后进行，在同一次加热中完成。拔伸时，冲孔后的毛坯套在拔伸冲头上，拔伸冲头紧顶着冲孔毛坯的内腔底面，迫使其通过一系列的拔伸模模孔，从而减薄壁厚、增长长度并获得内腔的形状。

拔伸可以是将冲孔毛坯套在冲头上通过一系列连续排列、直径逐步减小的环形拔伸模或成组滚轮进行，也可以套在心轴上通过一组轧辊进行。弹体毛坯拔伸采用的是前者。

3.6.1 弹体毛坯的拔伸过程

图 3.26 示出了坯料在拔伸过程的受力情况。拔伸过程的重要特征是：冲头紧顶冲孔毛坯内腔底部通过拔伸模，在拔伸模截面Ⅰ-Ⅰ和截面Ⅱ-Ⅱ之间的区域内产生塑性变形，在拔伸模出口处的截面Ⅱ-Ⅱ上，冲头和坯料金属有相同的速度。

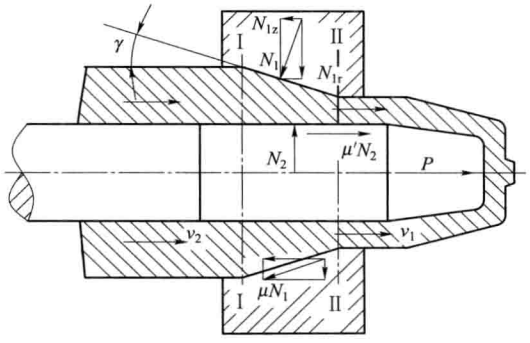


图 3.26 弹体冲孔毛坯拔伸时受力分析

N_1 为拔伸模作用于坯料变形部分外表面的压力，其径向分力 $N_{1r}=N_1\cos\gamma$（γ 为拔伸模的半锥角），迫使坯料压向拔伸冲头；轴向分力 $N_{1z}=N_1\sin\gamma$ 与坯料在拔伸的运动方向相反，阻碍坯料的移动。冲头对坯料变形部分内表面的作用力 N_2 垂直于坯料轴线。由于冲头与拔伸模的作用，坯料变形部分的金属径向受压应力作用。坯料外表面金属运动的方向是相对于固定的拔伸模而言，是朝向模孔出口端，因而摩擦力 μN_1（μ 为模孔与坯料外表面间的摩擦系数）的方向朝向是模孔进口端。由于进出变形区的金属体积必须相等，因而模孔进口端金属质点的流动速度 v_2 小于出口端金属质点的流动速度 v_1，即小于冲头的运动速度，坯料相对于冲头的运动方向指向模口的进口端，因此作用于内表面的摩擦力 $\mu' N_2$（μ' 为冲头与坯料内表面间的摩擦系数）的方向与坯料的运动方向一致。

拔伸弹体毛坯所需的拔伸力通过两种方式传递。一部分由冲头紧顶药室底部，并经拔伸后的毛坯壁部传递；另一部分则通过沿冲头表面的摩擦力传递。可见，摩擦力的存在可以使作用于药室底部的拔伸力 P 相应减小，从而减少了毛坯被顶穿或拔断的可能性，提高了许可的拔伸变形程度。刚开始拔伸时，毛坯松动地套在冲头上，故拔伸力几乎全部由药室底部传递，所以在拔伸变形程度较大的情况下，拔伸开始时，底部就可能被顶穿。

冲孔毛坯拔伸时在上述外力作用下，其变形区的应力状态是：沿毛坯轴向受拉伸，沿切向及径向受压缩。变形区内的材料愈接近截面Ⅱ-Ⅱ，所承受的拉应力愈大。当拔伸模的表面粗糙、进入角 γ 大以及拔伸变形程度大时，毛坯已经拔伸的壁部内将引起很大的拉应力，有可能导致壁部变薄甚至断裂。

3.6.2 拔伸力

弹体冲孔毛坯若具有合适的尾锥部，则拔伸力—行程曲线的变化比较平稳，坯料的断面缩减量由小逐步增大至正常值，拔伸力随冲头行程均匀上升。在继续保持正常的断面

缩减量的拔伸过程中，拔伸力变化很小。拔伸终了时，拔伸力下降。对于没有尾锥部的冲孔毛坯或拔伸模的进入角选用不当时，则拔伸一开始拔冲力就很大，并形成冲击，以致影响工具寿命和拔伸工件质量。

以下是计算拔伸力的两个计算式。

(1) 理论计算式

$$P=S_2\ln\frac{S_1}{S_2}R_m[1+\mu(\cot\gamma+\tan\gamma)] \tag{3.6.1}$$

式中　S_1——拔伸前毛坯的环形断面积；

S_2——拔伸后毛坯的环形断面积；

R_m——材料在拔伸温度下的强度极限，考虑到拔伸时速度的影响乘以系数 1.1～1.5；

μ——外摩擦系数，取 0.2～0.4；

γ——拔伸模的进入角(半锥角)，一般为 15°左右。

(2) 根据实践资料数据积累而得的经验计算式

$$P=S_Dp \tag{3.6.2}$$

式中　S_D——拔伸面积，等于拔伸前后毛坯环形断面积之差；

p——拔伸面上的单位流动压力。

式(3.6.2)中的 p 值给定为 196～245 MPa，大多数情况下，此数据有一定的准确性，但在大直径及薄壁毛坯拔伸时，此数据与实际情况不符。上述数据可作参考之用。

3.6.3　拔伸变形程度和拔伸次数

毛坯的拔伸变形程度可用下列表达式之一来表示：

$$Z_a=\frac{S_1-S_2}{S_1},\qquad Z_d=\frac{S_1}{S_2},S_D=S_1-S_2$$

式中　Z_a，Z_d，S_D——分别为弹体毛坯拔伸时的断面收缩率、拔伸率及拔伸面积；

S_1、S_2——分别为拔伸前后毛坯环形断面积。

从成型工艺角度出发，希望每次拔伸达到的变形程度尽可能大，以减少拔伸次数，并有利于减小冲孔毛坯的壁厚差和改善材料机械性能。但如上所述，每次拔伸的许可变形程度要受到毛坯拔伸力传递区强度的限制。如拔伸变形量超出毛坯一次拔伸许可的变形量时，则可在一系列直径逐步缩小的拔伸模中连续拔伸。

设拔伸前冲孔毛坯的环形断面积为 S_1；

冲孔毛坯经第一模拔伸后，其环形断面积为 S_{21}；

冲孔毛坯经第二模拔伸后，其环形断面积为 S_{22}；

……

冲孔毛坯经第 n 模拔伸后，其环形断面积为 S_{2n}。

各次拔伸后的拔伸率 Z_d 分别为

$$Z_{d1}=S_1/S_{21}, \qquad S_1=Z_{d1}S_{21}$$
$$Z_{d2}=S_{21}/S_{22}, \qquad S_{21}=Z_{d2}S_{22}$$
$$\cdots\cdots$$
$$Z_{dn}=S_{2(n-1)}/S_{2n}, \qquad S_{2(n-1)}=Z_{dn}S_{2n}$$

因而

$$S_1=Z_{d1}Z_{d2}\cdot\cdots\cdot Z_{dn}S_{2n}$$

总拔伸率 $$Z_d=S_1/S_2$$

所以

$$Z_d=Z_{d1}Z_{d2}\cdot\cdots\cdot Z_{dn}$$

设各次拔伸模承担的拔伸率相等为 Z_{dm}，则：

$$Z_d=Z_{dm}^n$$

由此可得

$$n=\frac{\lg Z_d}{\lg Z_{dm}}=\frac{\lg(S_1/S_{2n})}{\lg Z_{dm}}=\frac{\lg S_1-\lg S_{2n}}{\lg Z_{dm}} \tag{3.6.3}$$

Z_{dm}一般可取 1.35，S_1 及 S_{2n}为已知，由此即可算出拔伸模数 n。

实际生产中，各拔伸模所担负的拔伸率并不平均分配，为得到良好的拔伸效果，一般都是第一模担负的拔伸量较大，以后各模担负的拔伸量则逐次递减，最后一模则起校正作用。以 3 模连续拔伸为例，第一模承担约三分之二的拔伸变形量，第二模约承担三分之一，第三模进行校正。

各拔伸模之间的间距，应安排成使毛坯全部通过一个拔伸模后，再进入下一拔伸模拔伸，所以拔伸模的数目受到压力机行程的限制。当拔伸模数目较多时，此规则不一定合适，在这种情况下，要根据工艺试验的结果，适当调整拔伸模的位置，以保证只在变形量较小时，毛坯才同时通过两个拔伸模。至于拔伸模的数目，以 2 个或 3 个拔伸模的连续拔伸采用得较多。

3.7 热冲压毛坯形状及尺寸的确定

实际的毛坯制造过程是先冲孔后拔伸，对于整体式弹体毛坯再经车削后进行收口。然而确定各成型工序的毛坯形状和尺寸却是由后向前推算得出，也即由产品零件图制定收口后毛坯形状和尺寸，而后逐步制定出收口前的毛坯、拔伸毛坯和冲孔毛坯的形状和尺寸。毛坯形状和尺寸的确定既涉及产品的经济性，又影响产品的质量，同时也是毛坯制造技术水平的标志之一。必须从节约原材料，产品加工的经济性以及技术上的可能性加以确定。

3.7.1 拔伸毛坯形状和尺寸的确定

确定拔伸毛坯时，对于不需收口的弹体毛坯，其依据是弹体产品图及技术条件；而对

需经收口的弹体，其依据是收口前的弹体毛坯图。确定时，应使毛坯形状及尺寸尽可能与成品尺寸、形状相接近，同时也必须考虑毛坯制造所能达到的精度以及表面可能产生的缺陷。不同弹种的弹体，其结构形状多种多样，这里以需经收口而药室壁部不再机械加工的榴弹弹体拔伸毛坯（见图 3.27）为例，说明其形状、尺寸确定的原则和方法。

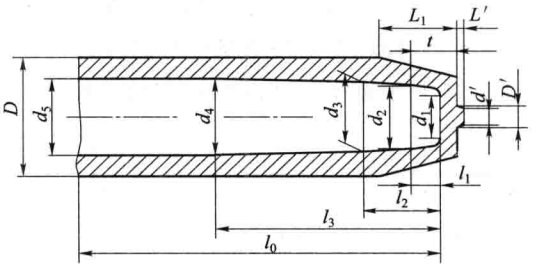


图 3.27　弹体拔伸毛坯图

1. 拔伸毛坯形状的确定

一般榴弹弹体的药室由尾部截锥、头部截锥及头部弧形所构成。头部弧形是通过收口形成，因而拔伸毛坯的相应部分呈截锥形，至于截锥锥度的大小，则应考虑节省材料，减少收口前的车削量，并保证拔伸和收口工作顺利进行等几个方面。药室在热冲压后不再机械加工，因而尺寸 d_3、d_4 与弹体成品药室上的尺寸相同。

热冲压弹体毛坯药室底面必须机械加工，这是由于该部分金属组织疏松，氧化皮及杂质等易被压入，是热冲压毛坯最易产生缺陷的部位。药室底面若存在严重缺陷，极有可能造成重大事故，同时药室底面又是弹体轴向上的重要基准面，所以机械加工药室底面的目的是为了发现和消除金属疵病及热冲压疵病，并有助于药室底面更有效地起到基准作用。

为使药室底面加工后，不致在加工部位和未加工部位之间的过渡处形成棱角，也即保持药室尾锥的平滑连续，并尽量减少加工量，一般都在药室尾锥的末端引入一高为 l_1 的过渡锥体（见图 3.27）。加工药室底部时，只限于切除此过渡锥体，而获得所需的药室底部形状尺寸。

拔伸毛坯外形，除弹体毛坯尾锥部由冲孔时成型外，其余部分经拔伸后为圆柱形。底部则在大多情况下都设置定心桩，以备钻中心孔，在机械加工时作辅助定心基准。设置定心桩既增加原材料消耗，又增加机械加工量，因而非必要时不应设置。

2. 拔伸毛坯各部分主要尺寸的确定

确定拔伸毛坯的主要尺寸实质上就是确定其机械加工余量，这需要考虑消除热冲压产生的壁厚差、表面缺陷和为达到弹体要求的尺寸精度和表面粗糙度。

由于影响的因素很多，随着生产技术的发展，毛坯的余量和公差都日趋缩小，实际生产中，都依据积累的经验确定。以下为拔伸毛坯主要尺寸的简单计算方法。

（1）拔伸毛坯外径 D

$$D = D_1 + z_1 + z_2 + z_3 + \delta_t \tag{3.7.1}$$

式中　D_1——弹体定心部公称直径，mm；

z_1——定心部直径上的光车余量，mm；

z_2——定心部直径上的精车余量，mm；

z_3——定心部直径上的粗车余量，mm；

δ_t——弹体毛坯技术条件规定允许的壁厚差，mm。

表 3-6 是根据生产实际而得到的弹体热冲压毛坯外圆总余量及壁厚差数值。

表 3-6 外圆总余量及壁厚差

弹种及口径 /mm	总余量 /mm	壁厚差 /mm	弹种及口径 /mm	总余量 /mm	壁厚差 /mm
85 加榴 85 高榴	6	3	122 榴	6	2.5
100 高榴	5	2.5	130 加榴	8	3.5
100 加榴	7	3	152 榴	8	3

毛坯外径的公差

$$IT_1 = D\alpha'(T_{max} - T_{min}) + IT_d + IT_2 \tag{3.7.2}$$

式中 D——弹体毛坯外径，mm；

α'——钢的线膨胀系数；

T_{max}——拔伸终了的最高温度；

T_{min}——拔伸终了的最低温度；

IT_d——拔伸模的制造公差；

IT_2——拔伸模的磨损公差，$\leqslant 1$ mm。

(2) 拔伸毛坯底厚。其计算式为：

$$t = t_b + z_4 + z_5 + z_6 \tag{3.7.3}$$

式中 t_b——弹体底厚，mm；

z_4——药室底面加工余量，mm；

z_5——精车弹底端面的加工余量，mm；

z_6——收口前粗车弹底端面的加工余量，mm。

(3) 药室深度。其计算式为

$$l_0 = l - z_4 + z_7 \tag{3.7.4}$$

式中 l——弹体药室深度，mm；

z_7——弹体口部加工余量，mm。

(4) 过渡锥体。过渡锥体直径 d_2 可按下式计算：

$$d_2 = (d_3 - d)\frac{l'_1}{l'_2} + d \tag{3.7.5}$$

式中 d——弹体药室底部直径，mm；

d_3——弹体药室相应部位直径，mm；

l'_1——$l'_1 = l_1 + z_4$；

l'_2——$l'_2 = l_2 + z_4$；

拔伸毛坯药室的底部直径 d_1 则可按下式计算：

$$d_1 = d - (z_8 + \delta_3) \tag{3.7.6}$$

式中　z_8——底部在直径方向上的加工余量，mm；

δ_3——拔伸冲头头部直径的允许磨损量，mm。

(5) 定心桩尺寸。应该保证能在其上钻出定心孔(起辅助基准作用)的前提下，尽可能的小。按目前生产情况，对于 85 mm 以上口径的弹体：$d' = 30 \sim 35$ mm；$D' = 35 \sim 50$ mm；高度 L' 视中心孔深度而定，一般为 15～20 mm。

目前热冲压弹体毛坯的材料利用率还比较低，一般在 60%～70%。因此采取有效措施精化热冲压毛坯，始终是弹体毛坯热冲压成型的努力方向。弹体毛坯的壁厚差以及弹体毛坯口部长度方向和弹底厚度(该尺寸公差较大)的实际加工余量是原材料消耗的主要组成部分，也是为提高材料利用率需要加以改进的主要部位。

3.7.2　冲孔毛坯形状和尺寸的确定

冲孔毛坯因有后续的拔伸工序，其形状、尺寸的确定应主要从冲孔工艺角度出发。

图 3.28 是冲孔毛坯的一般形状。药室的过渡锥体部分应与拔伸毛坯相同，其目的是为了拔伸时拔伸冲头有稳定的定位。过渡锥体以上的截锥部分和圆柱部分，以拔伸冲头能方便地进入药室为设计依据。

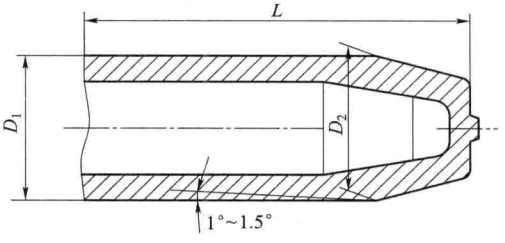


图 3.28　冲孔毛坯的一般形状

冲孔毛坯尾锥部分的尺寸形状与拔伸毛坯完全相同，仅尾锥的高度因拔伸时直径 D_2 被减小而有变化。为便于将冲孔毛坯自冲孔模中顶出，冲孔毛坯的体部有 1°～1.5°的斜度。由体部直径 D_1 及 D_2、毛坯长度 L，则可确定出体部的平均直径 D_m，而后按变形前后体积不变的原则算出 L，并可根据 D_m 及体部锥度求得 D_1 及 D_2。

平均直径 D_m 取决于拔伸变形量，即取决于拔伸面的数值。如前所述，拔伸面的数值受到毛坯强度的限制，如果选得不适当，则可能在拔伸过程中，毛坯底部被冲穿(在拔伸面积 S_D 比拔伸冲头的平均横断面积 S_{pm} 大得多时)；或已经拔伸的筒壁被拉细，甚至被拉断(拔伸面积 S_D 比拔伸毛坯的平均环形断面积 S_{2m} 大得多时)。

拔伸面积 S_D、拔伸冲头平均横断面积 S_{pm} 及拔伸毛坯平均环形横断面积 S_{2m} 之间应有恰当的比值。为避免上述两种现象，拔伸时应保持下列关系：

$$S_D \leqslant 0.4 S_{pm}\,;\ S_D \leqslant 0.7 S_{2m}$$

连续拔伸时，每一个拔伸模承担的拔伸面都应符合这两个关系式。冲孔毛坯成型为拔伸毛坯的总拔伸面可由拔伸模数以及每一拔伸模所承担的拔伸面计算决定。

总的拔伸变形量的选择要考虑各种因素，如总变形量取得稍大时，冲孔毛坯的孔深就

可较浅，从而有利于减小壁厚差；冲孔毛坯药室底部若是平的，则拔伸变形量可取得稍大，如为尖弧形时，则应取得较小；拔伸设备的行程长，则拔伸变形量可取得稍大，此外还应结合坯料尺寸考虑选择。通常总的断面收缩率 Z_a 在 40%～60%之间。

根据拔伸总变形量确定的冲孔毛坯平均直径 D_m，还需在生产实践中加以调整，以最有利于冲孔时金属的流动和减小冲孔力等确定。

3.8 弹体毛坯的收口

弹体毛坯收口的目的在于获得弹体的弧形部，其外弧形借助于收口模的型腔成型，药室弧形部则在收口过程中自然形成。

为使药室的弧形部能正确成型以及便于刀具进入药室加工，所以收口安排在粗加工之后。

收口时，总是先将毛坯参与变形的区域加热到一定温度，因为冷收口时金属变形抗力大，在变形大时有可能在金属的内部产生极细微的裂纹。

由于收口时金属变形情况复杂，药室弧形部尺寸难以控制，并且影响的因素又多，因而收口是弹体毛坯成型难度最大的工序。

3.8.1 轴向力收口的基本过程

最常用的毛坯收口方法，是以轴向力将毛坯待收口部分压入收口模型腔使之成型（见图 3.29）。在收口过程中，其口部从直径 D_b 逐渐减小至 D_a，中心面在口部的切线与弹轴的夹角 γ 从 0 增加到 γ_a。

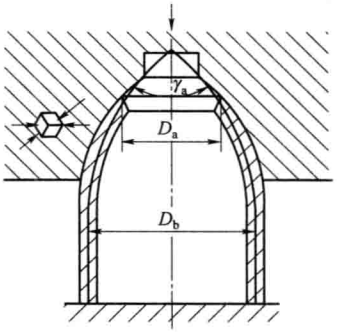


图 3.29 收口工作原理图

分析弹体弧形部任一单元体的应力变形状态可知：切向应力 R_θ 和弧形方向的应力 R_ρ 均为压应力，R_θ 在弧形部基面为零，而在弹头部达到最大值；R_ρ 在弧形部基面最大，而在弹头部为零。强烈的切向压应力引起切向压缩变形而使弧形部直径缩小，并引起壁厚方向的拉伸变形而相应地增大壁厚。在弧形方向上的变形主要取决于模具与毛坯表面的摩擦力，还有毛坯的温度和模具的速度。当润滑良好而摩擦力较小时，弧形方向产生拉伸变形而使弧形部增长；当摩擦力很大时，弧形方向产生压缩变形而使弧形部缩短。弧形部增长或缩短将影响壁厚增大的程度，从而影响药室弧形部的形状和尺寸。

收口变形程度可用收口系数 m_n 表示：

$$m_n = D_a / D_b$$

收口系数过小时，收口变形区材料在压应力 R_θ 的作用下，可能失稳而形成纵向皱褶；此外，变形区的材料还受到压应力 R_ρ 的作用，当此压应力达到材料所能承受的临界数值时，材

料也将失稳而产生横向皱褶。所以收口时的变形程度主要受到材料失稳条件的限制。

收口系数的许可极限值主要与材料种类、坯料厚度等因素有关。材料塑性愈好、壁愈厚、润滑愈好、模具型腔表面光洁度愈高，其许可的变形程度可较大。对于坯壁愈薄、口部直径愈小，则收口愈困难；弧形部过长，也将增加收口的困难，必要时，要分几次进行收口。弹体收口时，通常圆柱部非变形区不会出现材料的横向失稳和起皱，这是由于这些部位壁较厚，且又未加热。

3.8.2　收口前的加热

收口前的加热只限于毛坯收口变形区，是局部加热。加热温度、加热长度是影响收口质量的重要因素。

1. 加热温度

确定收口前加热温度的原则与确定热冲压温度的原则相同。首先应保证弹体弧形部收口完成的温度不低于终冲温度，即 800 ℃～850 ℃，而后根据由加热炉运送到收口工作地点中的下降温度以及毛坯在收口模内的下降温度而确定。收口前的加热温度一般不超过 1 000 ℃，大多在 850 ℃～950 ℃之间。

收口前加热温度过高或过低将导致收口后出现尺寸及形状偏差。加热温度过高时，毛坯易被镦粗，使金属向其内腔流动的量增大，以致形成药室弧形局部尺寸变小或毛坯长度缩短；温度过低时，出现的情况则相反。此外，加热应均匀，否则将由于金属的变形抗力不一致，造成收口后弹头部与圆柱部不同轴，或引起壁厚差增大。

2. 加热长度

加热长度指达到规定收口温度的那部分毛坯长度。通常加热长度都比收口变形区短，以使加热部分到圆柱部之间有一段温度过渡区，避免圆柱部温度过高而导致收口时被镦粗。生产中也有加热长度大于变形区长度的，这样可以避免收口时在温度过渡区可能产生的硬化现象。因此，应视收口具体情况，由工艺试验确定加热长度。

3. 加热时间

在保证达到规定的温度和加热均匀的前提下，应力求缩短加热时间，以避免向圆柱部传热过多，并可减少加热时的氧化和烧损。加热时间主要与口径、弹头部壁厚、加热长度及加热设备有关。收口加热规范见表 3-7。

表 3-7　弹体毛坯收口加热规范

弹　　种	收口加热规范			
	加热温度 /℃	加热长度 /mm	收口长度 /mm	加热时间 /min
85 加榴	920～980	90～110		8～12
100 加榴	920～980	125～145	≥145	10～15
100 加榴	850～870	120	146	11～13

续表

弹　　种	收口加热规范			
	加热温度/℃	加热长度/mm	收口长度/mm	加热时间/min
122 榴	850～890	100～120	157	8～10
130 加榴	900～1 060	255～275	280	27～40
152 榴	880～910	220～240	241	18～20

对需经多次收口的弹体毛坯，每次收口前加热规范的确定原则与一次收口时相同。

4. 加热设备

目前收口前加热的设备主要是带窗孔的旋转炉壁加热炉。墙上有两排窗孔，待收口的毛坯插入其中加热，随炉壁转动，经一定时间，即加热完成。对于不同口径的弹体，可在窗孔内插入相应的套筒，并保持与弹体毛坯有一定的间隙。这种加热炉的优点是加热长度比较容易控制，加热迅速且比较均匀。

弹体收口前的加热也可在盐浴炉或感应加热炉内进行。感应加热要比煤气或油加热迅速而均匀，表面质量好。加热迅速可减少向圆柱部传热，使圆柱部保持原有的强度，因此可允许长而壁薄的弧形部以较少的收口次数完成收口工作。此外，表面质量好能提高模具寿命以及有利于机械加工。

3.8.3 收口方法

轴向力收口采用的设备是立式水压机和机械压力机。

轴向力收口有两种方法。一种是弹口部向上，弧形在上模型腔内成型(见图 3.30)；另一种是弹口部向下，弧形在下模型腔内成型(见图 3.31)。

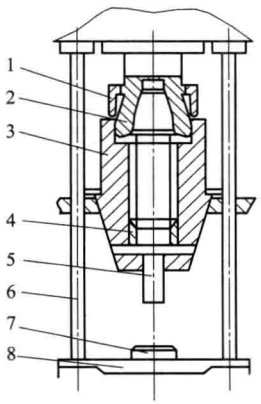


图 3.30　上模内收口装置简图

1—水套；2—上模；3—下模；4—底垫；5—顶杆；6—拉杆；7—顶座；8—横梁

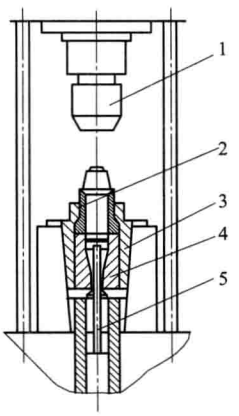


图 3.31　下模内收口装置简图

1—上模；2—下模上部；3—外套；4—下模下部；5—顶杆

比较上述两种轴向力收口方法可以看出，下模腔内收口成型时，由于下模在收口过程中固定不动，下模上部的圆柱形内腔起收口时弹体毛坯定位的作用，下模型腔起成型作用，二者组成一体，保证了收口后外弧形对圆柱部有良好的同轴度。此外，上模为一简单的平面压头，仅起下压作用，上模的细微偏斜和振动不致引起收口时弧形部的偏歪。而前一种收口方法，收成的弧形部与圆柱部的同轴度常受机床精度和作为定位的上、下模定心部分配合精度的影响。因此下模内收口有较高的质量，且能将毛坯方便地顶出。

当收口系数很小时，材料的变形将很剧烈，收口力也很大，可能使材料丧失稳定性或使壁部被严重镦粗，并且内弧的形状也不易控制，因而需将整个收口工作分成几次逐步完成。在多次收口的情况下，每次热收口后收口部分尺寸和形状的偏差可能叠加，如果先采用冷收口，以减少尺寸、形状和相互位置的偏差，再以热收口完成收口工作，则对提高收口质量比较有利。

弹体毛坯收口时的润滑条件将影响收口质量和模具寿命，所以每次收口前，模具内腔应均匀地涂抹润滑剂。特别对于弧形部较长、壁较薄的收口工作，润滑被认为是关键。热收口弹体毛坯用的润滑剂是石墨粉和机油的混合物。

轴向力收口时，模具调整应特别注意，需正确地调整上模下行的终点位置，此位置过高或过低，都会导致弹体长度及药室直径的变化。

3.8.4　收口毛坯形状和尺寸的确定

首先由零件图确定收口后的弹体毛坯图，而后由收口后弹体毛坯图确定收口前的弹体毛坯图。

图 3.32(a)示出了收口后的弹体毛坯。各部位的机械加工余量数值可按生产经验确定。确定数值时，应该考虑到收口后弧形口部可能产生严重的歪斜，为保证机械加工时能

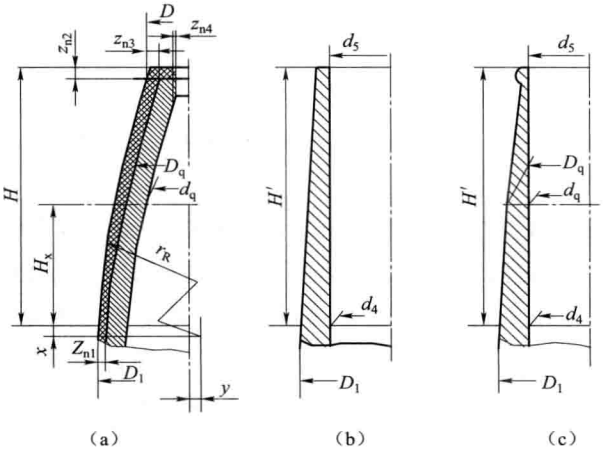


图 3.32　收口前后的弹头部形状

(a) 收口后；(b)，(c) 收口前

消除其对圆柱部的歪斜现象，口部直径方向的余量应留得较大。

各部分的余量确定后，即 D_1、D 及 H 确定后，就可用作图的方法确定合适的弧形半径 r_R 及其圆心位置 x 及 y。确定的原则应该是保证全部弧形部在直径方向上有足够的加工余量的前提下，r_R 尽量取大。也可用计算的方法精确地确定圆心的位置。

收口前后的弹体毛坯仅有弹头变形区形状及尺寸的区别。确定收口前弹头部的轮廓和尺寸应保证通过收口获得符合要求的弧形部。

收口前的药室是拔伸成型，药室上部呈截锥形（见图 3.32(b)及图 3.32(c)），药室直径 d_4 收口前后不变，即为成品尺寸，故收口前药室待定尺寸仅有 d_5。榴弹和杀爆火箭弹弹体，一般愈接近口部壁愈薄，但收口时，愈接近口部，壁厚的增加量愈大，因此，收口前弹头部的壁厚应小于圆柱部壁厚，且愈接近口部壁愈薄。对此可用扩大药室口部直径 d_5 或增加收口前弹头部外形的车削量的方法来达到，显然，扩大 d_5 值既可减少机械加工量又能降低材料消耗。但若值过大（即截锥的锥度过大），则拔伸时口部的变形量增大，会增加拔伸工作的困难，并且在收口过程中毛坯容易被镦粗。所以确定 d_5 值的原则应是在不使拔伸和收口工作产生困难的前提下，尽量取最大值。通常在厚壁及弧形部较短时取较大值，而壁较薄，弧形部较长时宜取较小值。

收口前弹头部的外径可用等面积法计算确定。等面积法是假设收口时弹头部长度不变，收口前后相应截面的面积相等。

高度为 H_x 的截面，其收口前的外径 D_a 为：$D_a=\sqrt{D_h^2-d_h^2+d_q^2}$。式中符号所表示的意义见图 3.32。

由弧形底面开始，每隔一定距离进行上述计算，直至口部。间距愈小，则外形愈精确。

计算时，D_h、d_h 及 d_q 的值可从精确作出的弹体弧形部图上直接量出，也可计算出，公式如下

$$d_q=(d_5-d_4)\frac{H_x}{H'}+d_4$$

$$D_h=2(\sqrt{r_R^2-(H_x+x)^2}-y)$$

d_h 与 D_h 的计算式一致，但 r_R、x 及 y 的数值不同，计算时各尺寸均取尺寸公差的中值。

最后连接计算所得的各点，并且调整成圆锥面和圆柱面的组合体。由于收口时金属变形情况相当复杂，所求得的收口前的头部外形都只是近似的，例如收口时高度不变的假设与实际情况就有一定出入，因而还需经试验修正。需要指出的是：即使经过修正的外形，由于是在一定的试验条件下获得的，当生产条件与之不符时，仍然不能获得良好的收口弹体毛坯。这些条件主要有：加热温度与加热长度、润滑情况、加热炉类型及模具新旧等。

3.9　弹体毛坯热冲压的其他方法

在立式水压机上冲孔，而后在立式或卧式水压机上拔伸是热冲压弹体毛坯的传统成型方法。为精化弹体毛坯，降低材料消耗和提高生产率，国外采用了一些其他的热成型方法。

3.9.1　一次冲孔成型

这种方法是在冲头的一次行程中完成弹体毛坯的成型工作。由于无后续拔伸，故冲头外形必须与弹体毛坯药室轮廓一致。一般榴弹弹体的药室，其长度与直径的比率较大，故一次冲孔成型用冲头较细长，因而要求坯料的加热温度较高，加热更应均匀。

图 3.33 是这种方法成型过程的各阶段示意图。其工艺装置的特点是：安在模座中的凹模由两半组成，压力机可通过模座使之开启和闭合；凹模中安有可下降的底座，底座能承受的压力可预先调整，当作用于底座上的压力超过此值时，底座开始下降，冲头则继续下行使坯料成型，直至完成。

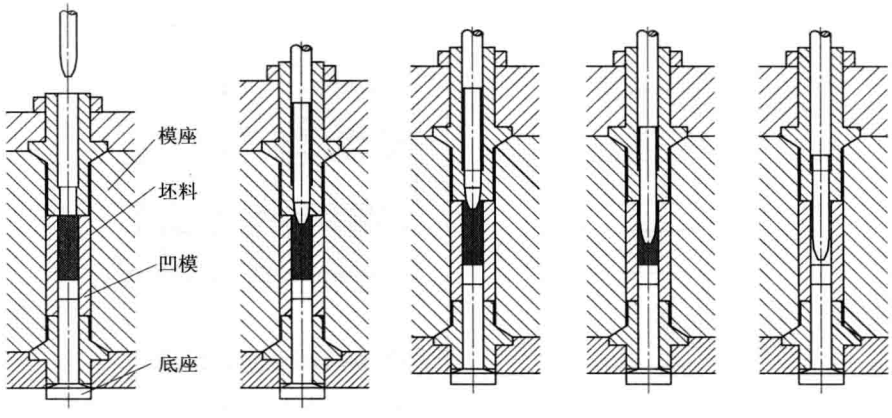


图 3.33　一次冲孔法成型过程

由于冲头细长，冲头的运动必须有良好的导向，图中模具的顶部有导向装置，给冲头以充分导引。弹体毛坯底部的成型则需在另一台压力机上进行。

一次冲孔成型法获得的弹体毛坯内腔光滑，无须再机械加工，因有充分导引，冲头与冲孔模同轴性好，能减小成型后毛坯的壁厚差，热冲压过程中金属的反挤变形可减少到一定程度，从而减轻作用于冲头的载荷。

3.9.2　反向冲孔

反向冲孔因冲孔模倒置，去除氧化皮方便。更主要的是冲头在下部固定不动，冲孔时

不易歪斜；冲头、冲孔模及坯料有共同的定心装置，使三者能良好地保持同轴；此外，坯料不致产生因被竖直地安放在冲孔模下锥部的上端，而趋向于停靠在模壁一侧的情况，因而能减小冲孔毛坯的壁厚差。

3.9.3 辊轧拔伸

辊轧拔伸是以轧辊组成的孔型代替一系列直径逐步缩小的拔伸模。

辊轧拔伸毛坯的同轴度高，能够减少粗车余量，并使粗车余量分布均匀，能降低原材料消耗，且轧辊寿命高。

3.9.4 平锻机连续冲孔

平锻机锻造弹体毛坯是顶锻和深冲孔的过程。

图 3.34 是平锻机锻造弹体毛坯的过程图。原坯料是圆形或方形截面棒料。锻前先加热棒料的一半，夹持其未加热部分锻造，锻成弹体毛坯后，再掉头加热和锻造另一半棒料。坯料进入模具的长度，由预先经调整的挡料装置控制。坯料送入模具后，通过模具的闭合夹紧坯料。

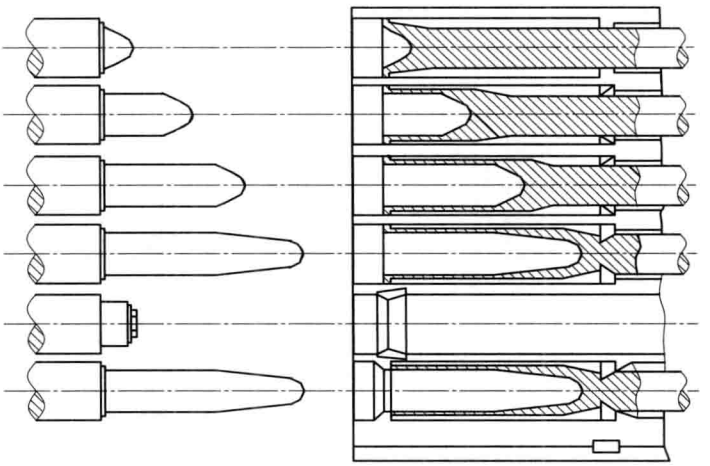


图 3.34 平锻机上成型弹体毛坯

第一次冲击时，冲头顶镦坯料，同时冲出中心孔，并使坯料表面氧化皮碎裂。冲中心孔是很重要的工步，关系到后续深冲孔的壁厚差大小；此后为连续冲孔，以加深药室深度。最后一次冲击则起定形校正作用。

平锻机上成型的弹体毛坯，内腔质量较好，壁厚差较小，生产率也比较高。

虽然弹体毛坯有上述的各种成型方法，但目前普遍采用的仍然是热冲孔后连续热拔伸的成型方法。

图 3.35 为国外 155 mm 弹体毛坯热冲压成型工艺流程。采用热挤压—热拔伸方法

成型。口部壁厚差一般为 0.5～0.7 mm，最大不超过 1 mm；弹体毛坯口部平整；弹体毛坯轴线弯曲度不明显，底厚公差可控制在 0.1 mm，材料利用率可达 80%左右。

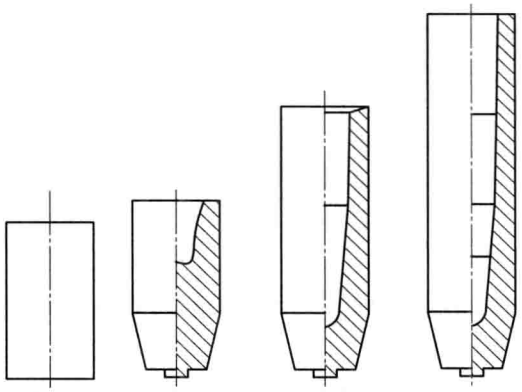


图 3.35　155 mm 弹体毛坯热冲压成型过程

全线自动化生产的弹体毛坯质量高，其主要原因是：

(1) 原材料为圆形截面钢料，尺寸精度较高。采用自动锯切下料，质量好，端面平直，无毛刺，且与轴线垂直。

(2) 采用双频分段电感应加热。先以工频电流加热到 750 ℃，后用 1 000 Hz 中频电流加热到 1 150 ℃～1 200 ℃，最后保温，因之加热均匀，毛坯各部位温差小。炉内导轨为双层结构，内导轨中通冷却水，以保持导轨刚度，外导轨以耐热钢制造，其表面接近炉温，保证坯料与外导轨接触面上的温度不致下降。

(3) 采用结构先进的多工位油压机。机架为钢板焊接的框架式整体结构，满载时，机架的弹性变形量很小，承受偏心载荷时，滑块的倾斜度也很小；压力机具有独特的导向系统，能保证在较大偏心载荷作用下，仍有可靠而精确的导向性能；油压机在滑块行程末端设有可精确调整的限位挡块，可保证冲压毛坯底厚的精度，油压机并设有由油缸带动的导向和退料装置，能在冲头下行时，起冲头运动的导向作用。

(4) 采用浅冲孔后再深冲孔的两次冲孔工艺，有利于提高毛坯精度和药室表面光洁度。各次冲孔模模口均设有导向圈，使冲头在冲孔过程中始终有良好的导向。

由上可知，影响弹体热冲压毛坯精度的因素很多，涉及成型过程的各个方面。为精化热冲压毛坯，就必须从下料开始，对工艺过程各环节严格要求，使坯料在成型前就已经处于外形规正、尺寸精确、温度均匀，并已经去除氧化皮的比较理想的状态。成型过程中，成型设备的刚度、精度应良好，能精确控制滑块行程，并且滑块的运动应有良好的导向。模具结构上应有冲头运动的导向装置，能使坯料正确地定心和可靠地控制坯料成型。当然，工艺设计的合理性也是重要因素之一。

第 4 章　弹体毛坯冷挤压

4.1　冷挤压成型的一般原理

1. 冷挤压的基本变形方式

冷挤压加工按成型时金属流动的方向和冲头运动方向的关系可分为正挤压、反挤压和复合挤压三种基本变形方式。

(1) 正挤压。其特点是挤压时金属流动的方向与冲头运动的方向一致(见图 4.1 及图 4.2)。

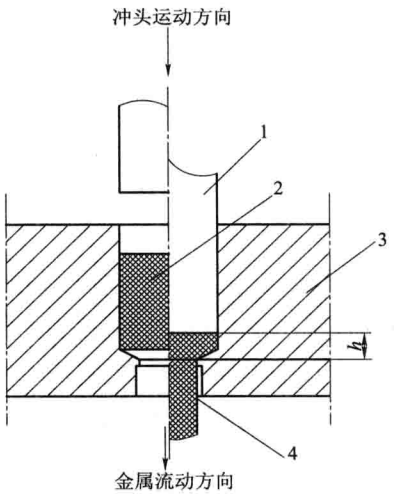


图 4.1　正挤压杆件

1—冲头;2—坯料;3—凹模;4—杆件

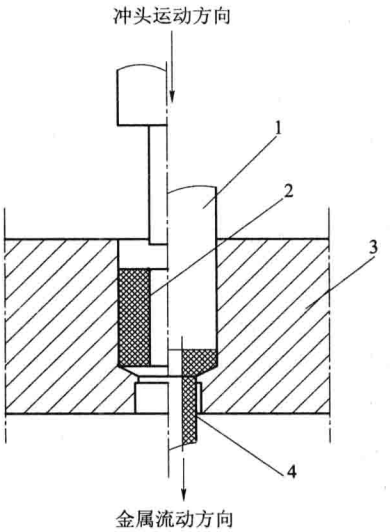


图 4.2　正挤压管件

1—冲头;2—坯料;3—凹模;4—管

正挤压杆件时,坯料直径略小于凹模筒部内径,杆件外径则由凹模模孔控制。冲头对坯料施加压力,使金属坯料产生塑性变形,并迫使变形金属自凹模模孔流出成型。

正挤压管件则采用空心坯料。冲头细端直径与管件内径相应,挤压时,细端先插入坯料内孔,然后冲头凸肩部对坯料施加压力,迫使金属从冲头细端与凹模模孔间的环形间隙流出,形成管壁,管件外径则由凹模模孔控制。

正挤压亦可用杯形坯料,挤出筒形件(见图 4.3)。

正挤压时应剩有一定的金属留量，若剩余厚度 h 过薄，则除挤压力急剧增加外，坯料中心部分金属将与冲头脱离形成缩孔（见图 4.4）。

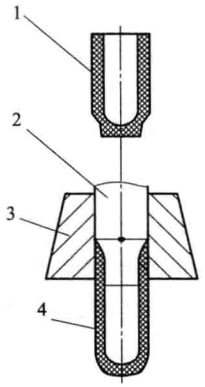


图 4.3　正挤压筒形件

1—坯料；2—冲头；3—凹模；4—筒形件

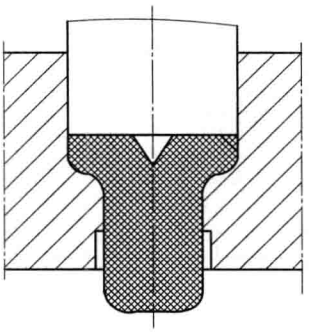


图 4.4　正挤压时形成的缩孔缺陷

正挤压管件时，冲头细端因与管件内壁接触面上有较大的摩擦力而受到轴向拉应力作用，所以用整体冲头正挤管（筒件）时，管（筒）件的内径应有一定的限制。

（2）反挤压。其特点是挤压时金属的流动方向与冲头运动方向相反（见图 4.5）。

反挤压冲头与凹模在半径上的间隙等于杯形件的壁厚，冲头对坯料施加压力后，坯料金属被迫围绕冲头，沿间隙并向与冲头运动方向相反的方向流动成型为杯壁。反挤时的坯料可以是实心件，也可以是盂形件。

反挤压时，坯料的剩余底厚 h 一般也不宜过小，否则将引起挤压力剧增和底部充填不满（见图 4.6）。

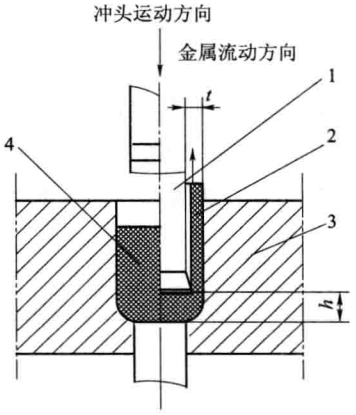


图 4.5　反挤压杯形件

1—冲头；2—工件；3—凹模；4—坯料

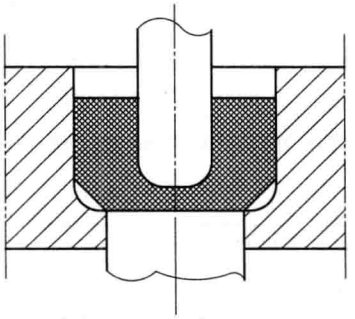


图 4.6　凹模底部充填不满

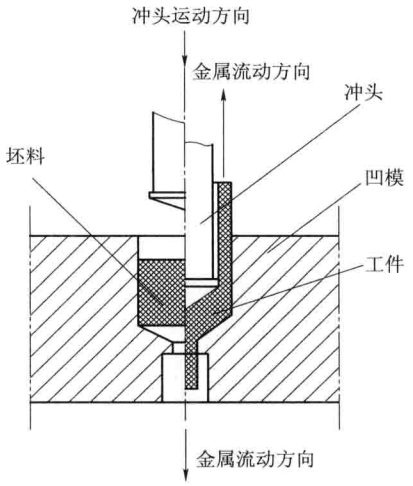


图 4.7 复合挤压

由于反挤压时，冲头承受相当高的负荷，为使冲头不致在此高负荷下产生轴向弯曲，杯形件的孔深对其内径的比值应有一定的限制，反挤钢件时，此值一般不超过 2.5。

(3) 复合挤压。其特点是一部分金属的流动方向与冲头运动方向相同，另外部分则相反(见图 4.7)。

复合挤压能挤出由杯形和杆形件组成或上下均为杯形件组成的复合挤压件。其坯料则根据工件的外形及挤压工艺过程而定，可以是圆柱实心坯料，也可为空心坯料。

2. 冷挤压的工艺特点

冷挤压成型时，坯料在挤压变形区内产生塑性变形。变形区的金属处于三向压应力状态，此三向压应力状态愈强烈，则金属所呈现的变形抗力与塑性也愈高，因此冷挤压所需挤压力很大。但一次冷挤压成型可达到较高的变形量，从而仅需较少的工序即可使工件成型。

根据现用模具材料的承载能力，其挤压时的单位挤压力一般应低于 2 450 MPa，这样，冷挤压工艺的应用范围也就相应地受到了限制。为了尽量降低冷挤压压力，并尽可能地提高模具的承载能力，一般采取下列措施：选用适合于冷挤用的材料；选用最佳热处理方案；挤压前对坯料进行软化处理；采用有效的表面处理及润滑方案；设计工艺性良好的零件结构外形；合理安排冷挤压工艺方案；选用合适的模具材料及提高模具加工质量；改善模具结构等。

目前冷挤压工艺已成为一种广泛应用的、先进的压力加工方法，其优点如下：

(1) 节约原材料。冷挤压弹体毛坯与热冲压弹体毛坯相比，其外形及尺寸更接近于弹体成品，节省了材料的消耗，又大幅度地减少机加工作量。

(2) 提高材料的强度。冷挤压是室温状态下成型的工艺，金属冷变形硬化的特性，将使零件抗拉强度、屈服强度和硬度提高，而其延伸率和断面收缩率下降。表 4-1 列出了含碳量为 0.15%的碳钢在不同的冷挤压变形程度时的强度极限。通常以 S15A 和 S20A 钢作为冷挤压弹体毛坯材料替代热冲压弹体用钢 D60。

表 4-1 不同冷挤压变形程度的强度极限

冷挤压变形程度/%	0	20	40	70	75	80
强度极限/MPa	343	490	617	764	784	823

(3) 冷挤压件具有良好的尺寸精度和表面粗糙度。冷挤压件尺寸精度一般可达 IT7～IT8 级，其表面粗糙度一般可达 1.6 μm，所以冷挤压件一般可不再进行机械加工或

只需少量机械加工。冷挤压弹体由于其壁厚差小，表面质量高，弹体的重量一致性好，因而改善了弹丸的弹道性能，提高了弹丸的射击精度。

应该指出的是：正挤压、反挤压及复合挤压是冷挤压工艺中最基本的变形工序。一些形状较为复杂的冷挤压件，例如弹体，往往要经过多次的冷挤压工序并与其他冷成型工序（冷镦、冷拔伸和冷收口）组合而成型。

3. 冷挤压成型时金属的流动

分析冷挤压成型时金属的流动，对控制挤压件的正确成型、制订比较完善的工艺规程、分析冷挤压过程中出现的缺陷、提高模具寿命和降低压力机负荷都有重要的作用。

分析金属的流动，除从最小阻力法则出发外，还需结合挤压件具体的结构形状加以分析。

(1) 观察成型时金属流动和变形分布的主要方法。

① 坐标网法：将坯料加工成为两块半圆柱体，其中一块的拼合面上刻有坐标网格（见图 4.8(a)、(b)、(c)中的上图），并在该拼合面上涂以润滑剂后，将两块拼合进行挤压。由于坐标网格随金属的流动而变形，因而可通过坐标网格的变化显示金属的流动及变形分布情况。

② 硬度法：由于冷塑性变形时金属的硬度随变形程度的增大而提高，通过测定变形体各部分的硬度值，即可掌握其变形的分布情况（见图 4.8）。图 4.9 为 82 mm 无坐力炮破甲弹头螺冷挤压前后的硬度分布，由图可见冷挤压成型时变形的不均匀性。

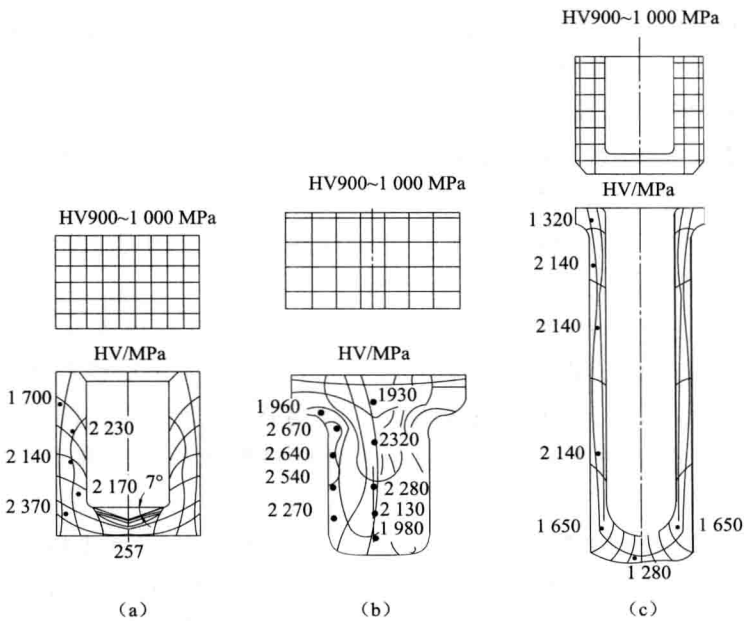


图 4.8　坐标网法及硬度法显示挤压件各部分的变形情况

(a) 变形一；(b) 变形二；(c) 变形三

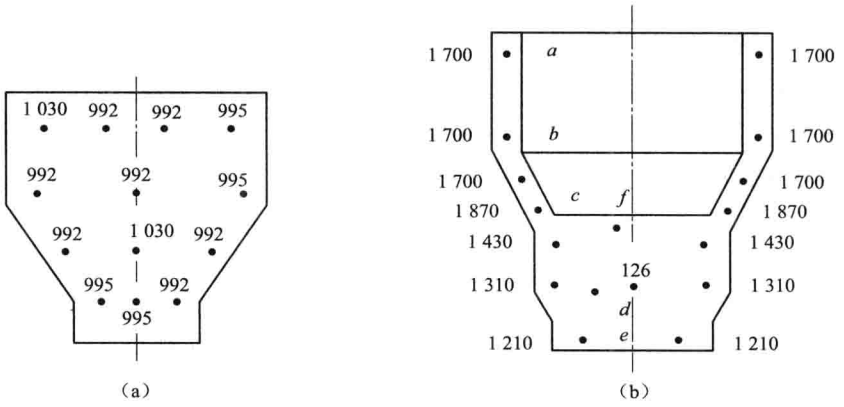


图 4.9 头螺冷挤压后的硬度分布

(a) 挤压前坯料(经退火);(b) 复合挤压后的头螺

③ 观察变形物体的显微与宏观组织:根据冷变形后金属晶粒的形状、分布与变形程度有关的事实,可以通过观察冷挤压件的显微组织和低倍流线来估计各部分的变形程度和金属的流动情况。图 4.10 所示为图 4.9 所示头螺冷挤压变形后其 a、b、c、d、e 各部位的显微组织。由图知,a 点仍为等轴晶粒,说明该部位的金属在挤压过程中未变形或仅有很微小的变形,反挤开始后,该部位的金属只是在变形金属的推动下向上作刚性移动;b 点和 c 点的显微组织表示了该部位金属有激烈的变形,晶粒被拉长,沿金属流动的方向分布,且呈纤维状;d 点及 e 点的组织仍为等轴晶粒,说明该部位也只有较小的变形。

图 4.11 示出了冷挤压弹体毛坯的低倍流线图,由流线的分布情况可以清楚地看出该弹体毛坯在反挤冲孔时金属的流动。

硬度法、观察显微组织和宏观组织的方法现已被广泛应用于弹体的冷挤压生产中。

(2) 冷挤压各基本变形方式的金属流动。

① 正挤压杆件时金属的流动。图 4.12 是杆件正挤压后剖面上坐标网格的变化图,分析此图可得下列结论:

• 由于凹模与金属表面间摩擦力的作用,挤压时坯料内外层金属流动速度不同,外层金属滞后于中心部分金属,以致被挤出,部分横向坐标线弯曲很大。杆件的端部由于挤压开始时位于凹模工作部分出口处附近,受摩擦力及凹模工作部分的影响很小,因此该部分横向坐标线的弯曲及坐标网格形状的畸变都很小,表明该部分金属的变形程度不大。

• 挤出部分横向坐标线的间距 $l_1, l_2, l_3, \cdots, l_n$ 愈来愈大,纵向坐标线的间距愈来愈小,即坐标网格的形状愈来愈扁长,表明了挤出部分金属的拉伸变形愈来愈大。

• 从中心部位的原正方形网格变形为近似矩形,外层则有歪扭的情况可知:挤出部分的金属除有拉伸变形外,还承受剪切变形。愈接近外层,剪切角 γ 愈大,γ 角还随着变形的进行而增大($\gamma_1 > \gamma_2$),这表明了挤出部分金属纵向和横向的变形都不均匀。

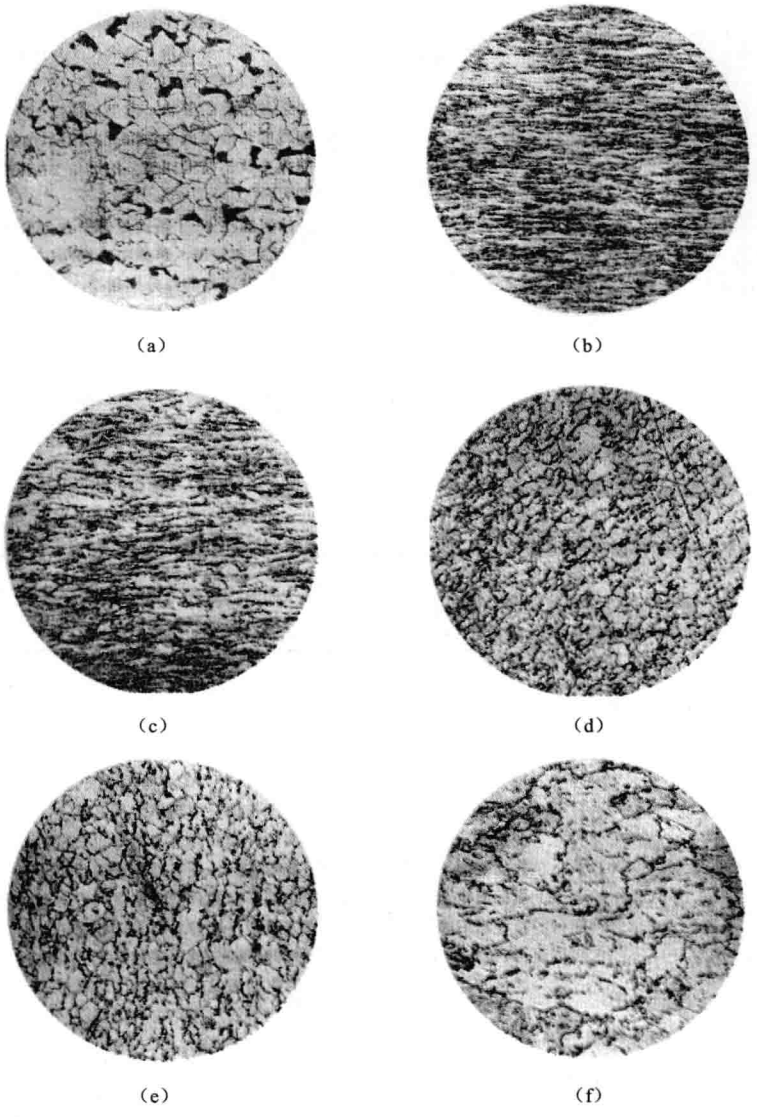


图 4.10　冷挤压头螺各部位金相组织（100×）

(a)～(f) 是图 4.9 中 a、b、c、d、e、f 点相应的金相组织

• 凹模中未被挤出的金属，其坐标网线也产生弯曲，横向坐标网线的弯曲度由冲头附近向凹模口部逐渐增大，表明了摩擦力及凹模工作部分的形状对挤压金属变形的影响在增大。

• 纵向坐标网线在Ⅰ-Ⅰ断面处向中心倾斜，在Ⅱ-Ⅱ断面处又向反方向倾斜，将

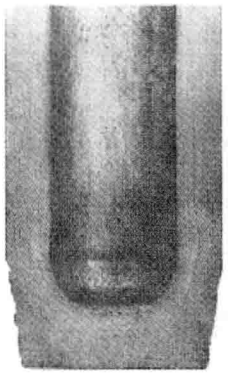


图 4.11 冷挤压弹体毛坯的低倍流线图

纵向坐标网开始向中心倾斜的点和开始反向倾斜的点分别相连，则可得曲线 A 及 B，曲线 A 及 B 所包括的区域是剧烈变形区。一般情况下，变形区集中在凹模工作部分附近。在有些情况下，坯料的未挤出部分的纵、横向坐标线都发生弯曲，这表明变形区已扩大到未挤压部分，金属流动不均匀程度将更严重，这主要是摩擦力的强烈作用以及凹模工作部分形状、坯料直径与高度之比等因素影响的结果。

• 凹模工作部分 C 附近的金属在挤压过程中不流动，称为“死角”区。摩擦力愈大，凹模工作部分的中心锥角愈大，则死角区愈大。

② 正挤杯形件时金属的流动。正挤杯形件的金属流动情况如图 4.13 所示。挤压过程的各阶段，变形剧烈的区域总是集中

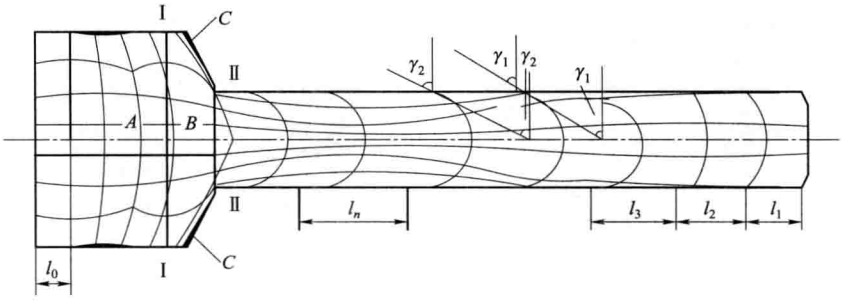


图 4.12 正挤压杆件时坐标网格的变化

于凹模锥形工作部分附近的高度上，而位于变形区以上的坯料金属则并不同时参与变形。挤压后，在杯件的底部，其内表面变形最大；外表面则变形很小，该处的坐标网格几乎未曾变化。杯壁部分沿其厚度的方向上变形分布不均匀，但沿高度方向则较均匀。

③ 反挤杯形件时金属的流动。图 4.14 是以实心坯料反挤成杯形件时的金属流动情况。挤压时，坯料位于冲头端面以下一段距离的部位变形强烈，称为强烈变形区，其余部分几乎没有变形。

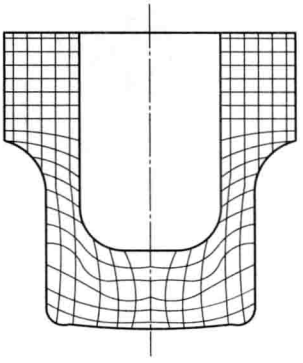


图 4.13 正挤杯形件时坐标网格的变化

由于冲头端面与坯料间的摩擦阻碍了金属的流动，因而靠近冲头端面的部分——滑动锥体（或称黏滞区）变形甚微。黏滞区的形态及大小随冷挤压条件变化，其最主要的影响因素是冲头端面与坯料间的摩擦力和冲头端部形状。强烈变形区内的材料沿黏滞区界面向外和向上流动，对于

塑性好的金属，这种相对滑动一般并不破坏金属的连续性；对于低塑性金属，特别是如果坯料中心部位存在严重的缺陷时，则有可能产生圆锥形的黏滞区沿界面剥落或沿界面产生内裂的现象。黏滞区在低倍组织的观察中可容易地辨认出来，见图 4.15。图中金属流线是沿黏滞区的锥形界面分布的。

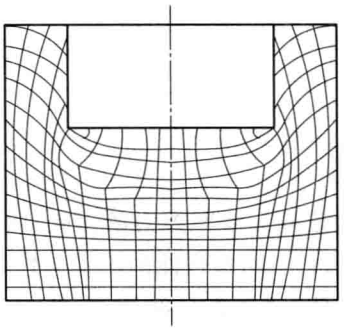


图 4.14　反挤杯形件时坐标网格的变化

图 4.15　平端面冲头反挤杯形件的黏滞区

位于强烈变形区以下的金属，开始时并不参与变形，随冲头的不断下压，这部分金属便被逐步地扩展成强烈变形区而产生流动。反挤过程中，强烈变形区内的金属不断地被挤出，强烈变形区也逐步向下移动。当坯料厚度被挤到较薄时，冲头下面的金属将全部参与变形。变形区内的金属被挤出向上流动成为杯壁后，在随后的挤压过程中不再变形，而仅作向上的刚性移动。

反挤杯形件，沿壁厚方向的变形分布不均匀，杯面的内表面变形最大，外表面变形程度则较小。沿轴线方向，下部的变形比上部大。

④ 复合挤压时金属的流动。由坐标网格显示的复合挤压时金属的流动（见图 4.16(c)）可以看出，挤压件的上部和下部分别具有反挤和正挤的金属流动特性，而中间部位的金属则由于正挤和反挤金属的相互牵制，使该部分金属的流动状况显得更为复杂。

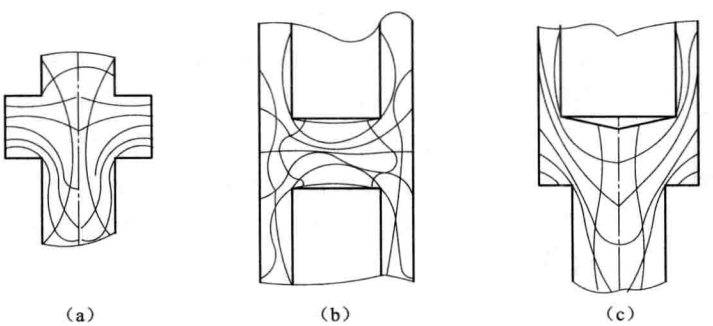


图 4.16　复合挤压时金属的流动

(a) 上、下杆件；(b) 上、下杯件；(c) 上杯、下杆件

冷挤压时影响金属流动的主要因素有：模具和变形金属接触面上的摩擦力，模具工作部分的形状，变形程度，坯料的形状和尺寸以及金属材料本身组织的不均匀性。

4. 附加应力和残余应力

(1) 不均匀变形。由以上分析金属冷挤成型时的流动情况可知，冷挤压件各部分金属的变形是不均匀的，造成冷挤时变形不均匀的原因是：

① 变形金属和模具工作部分接触面上存在摩擦力；

② 冷挤压件形状的不对称等自身结构上的原因；

③ 变形金属自身组织性能的不均匀性；

④ 冷挤压模具结构形状和尺寸的影响。

所有上述原因都导致变形金属各部分流动阻力的差异。如摩擦力的影响，将使变形金属表面层的流动阻力大于其中心层的流动阻力；金属自身组织性能的不均匀性，将使金属的某些部分难以变形等。然而被挤压金属是一个整体，其相邻各部位不可能互不影响而自由地变形。由于相互牵制的结果，内部便产生了内应力，例如在摩擦力的作用下，表面层的金属则对其相邻内层金属产生压应力，而相邻内层的金属则对表面层的金属产生拉应力，这种内应力称之为附加应力。

(2) 附加应力。附加应力成对地、相互平衡地在挤压过程中产生。附加应力的存在将对冷挤压过程带来不良的效果。尽管弹体冷挤成型时由变形力引起的基本应力是三向压应力，但出现附加应力后，变形金属各质点的有效应力将是基本应力和附加应力的叠加，使变形金属内部的应力状态和变形状态复杂化。而附加拉应力在很多情况下，往往是被挤压金属产生裂纹的主要原因。

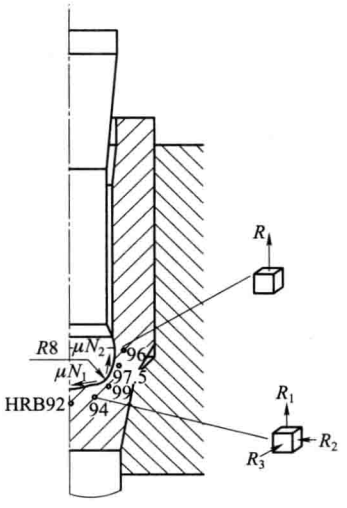


图 4.17 挤中心孔时的应力状态

图 4.17 是 85 mm 高射榴弹弹体挤中孔时的应力状态。由于摩擦力的影响，表层金属将受到附加拉应力的作用，在反挤变形区，金属承受的三向压应力很大，因而附加拉应力没有明显的作用；但当金属流动进入冲头的圆柱工作带时，由于应力状况的突然变化，附加拉应力在该部位的作用就极为显著，使内腔的表面层处于单向拉应力状态。当此附加拉应力足够大，或该部位表层金属有缺陷时，就会形成裂纹。由此可见，冷挤压弹体虽然总的说是在压应力状态下成型，但仍然有可能因附加拉应力的作用而产生裂纹。

(3) 残余应力。当挤压力消失后，由之而引起的基本应力也随之消失，而附加应力仍然存在于挤压件内而成为残余应力。残余应力一般认为是有害的，它会引起物体的形状及尺寸的改变、降低金属抗腐蚀性能、引起物体机械性能的变化，在严重的情况下会导致物体的破裂。冷挤压过程中产生附加应力一般是不可避免的，只能尽

量地减弱它。

适当地润滑低度粗糙的冲头和凹模的工作表面、改善冲头和凹模工作部分的结构形状以及冷挤成型前对坯料进行均匀化处理，往往是降低附加应力的主要措施。

5. 冷挤压成型的挤压力

(1) 冷挤压压力。

冷挤压压力是指压力机对变形金属所施加的变形力。杯形件反挤时的挤压力—行程曲线见图 4.18。

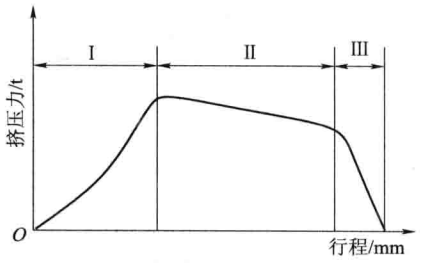


图 4.18　反挤压压力—行程曲线

曲线可以划分成与变形过程三阶段相对应的三个区间：

区间Ⅰ：挤压力上升阶段。此阶段中，冲头接触并挤压坯料，使坯料受镦粗而产生径向流动，直至充满凹模，并开始反向流动。

区间Ⅱ：挤压力稳定阶段。此阶段中，冲头继续向下运动，迫使金属沿冲头与凹模之间的环形空隙向上流动。此时，变形主要集中在冲头端面以下一定距离的区域内，在金属被挤出反向流动的同时，变形区的形态及其大小保持不变，只是随冲头的下压，其轴向位置下移。已形成杯壁的金属则在被挤出的金属推动下，向上作刚性平移。

区间Ⅲ：挤压力下降阶段。这是压力机施压停止后的一小段惯性运动。

若坯料的剩余厚度过薄时，会出现挤压力急剧上升的现象。其原因在于黏滞区内的金属此时也被挤出。而黏滞区是变形困难的区域，故挤压力急剧上升。因此，冷挤压过程在出现挤压力急剧上升现象之前就应该结束。冷挤压弹体毛坯时，弹底厚度较大，一般在挤压过程中不致产生挤压力急剧上升的现象。

阶梯形空心件与杯形件反挤压压力—行程曲线的比较见图 4.19。反挤阶梯形空心件时首先形成直径为 d_2 的孔，而后已冷加工硬化的金属向上流动时，受到冲头台阶部分的作用而形成直径为 d_1 的孔，此时金属的流动既复杂又困难，成型所需的变形力将大得多。

单位挤压力是冷挤压成型的一项重要工艺参数，其数值大小在一定程度上反映了该挤压工序成型的难易程度，同时也是冷挤压模具结构设计与模具材料选择的重要依据。

冷挤压压力机的所需吨位可按下式计算：

$$P = K_e p S / 1\,000 \tag{4.1.1}$$

式中　P——所需压力机吨位，t；

p——单位挤压力，MPa；

S——冲头工作部分在与冷挤压压力方向相垂直的平面上的投影面积，mm^2；

K_e——考虑冷挤压坯料组织的不均匀、性能的波动、软化处理及润滑不良等因素的修正系数，一般取 1.3。

(2) 影响单位挤压力的主要因素分析。

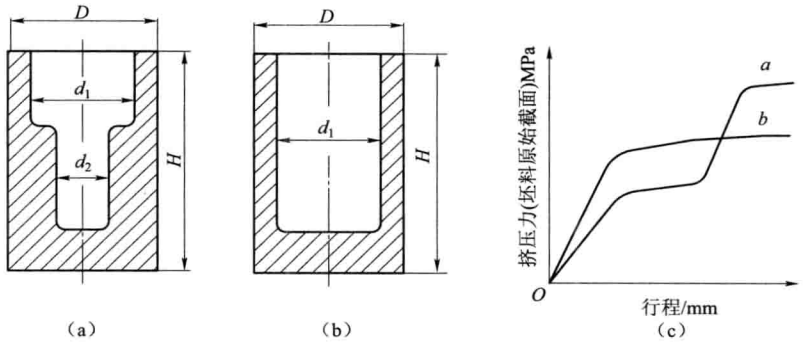


图 4.19 阶梯形空心件反挤压压力—行程曲线

(a) 阶梯形;(b) 直孔形;(c) 压力—行程曲线

① 冷挤压材料性能的影响。冷挤压材料的性能是决定单位挤压力的基本因素。化学成分和组织结构不同的材料,其强度指标及对冷加工硬化的敏感性也不相同。冷挤压材料的 R_e 高,则单位挤压力也较大(见图 4.20)。经软化处理后,材料的 R_e 值显著下降,因而冷挤压前要对坯料进行软化热处理。而经过冷加工硬化的材料,都将使单位挤压力增高。

② 变形方式的影响。图 4.21 示出了 3 种不同的挤压方式挤压相同材料时,对单位挤压力的影响。其中以反挤压的单位挤压力最大,其余两种正挤的单位挤压力比较接近。

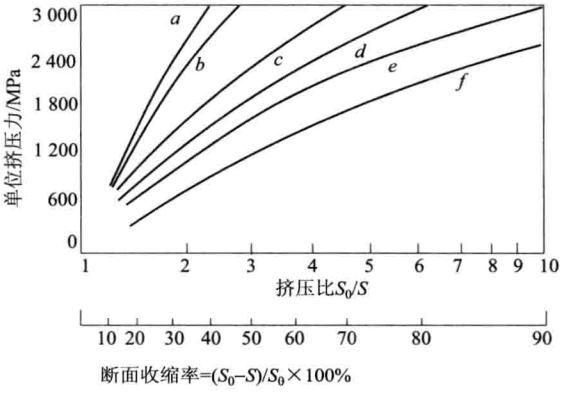


图 4.20 钢的含碳量对挤压力的影响(正挤杆件)

a—含碳 0.78%,Re:539MPa;b—含碳 0.61%,Re:410MPa;c—含碳 0.43%,Re:347MPa;d—含碳 0.24%,Re:273MPa;e—含碳 0.15%;f—含碳 0.03%,Re:149MPa

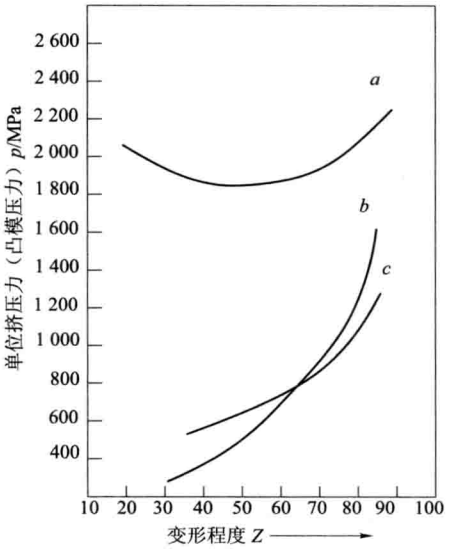


图 4.21 挤压方式对单位挤压力的影响

a—反挤压杯形件;b—正挤压杆形件;c—正挤压空心件

复合挤压挤压力的影响如图 4.22 所示。由图可知：对相同的坯料尺寸用复合挤压成型所需的挤压力，比单一的挤压变形方式（正挤或反挤）成型时其中较小的挤压力略低或相等，因此复合挤压可达到较高的变形程度。

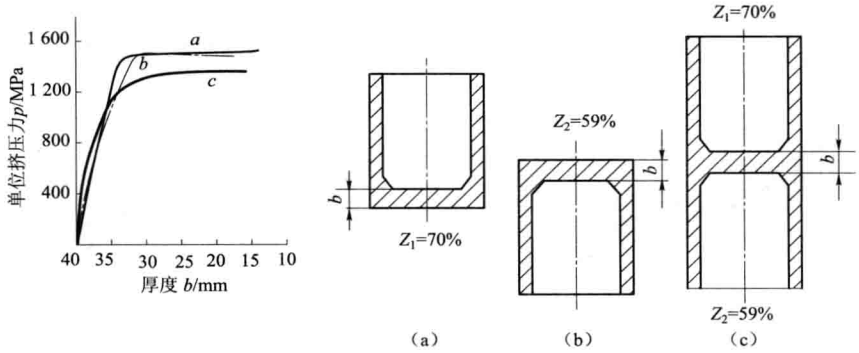


图 4.22　复合挤压时挤压力特性曲线

复合挤压挤压力的上述特性，是由于复合挤压时金属有两个方向流动的可能性，从而减弱了三向压应力状态强烈程度之故。然而这一特性只是在同时挤压坯料的两端，而金属的流动方向为自由状态时，也即挤压件的正挤与反挤部分的轴向长度不予控制的情况下才能保持。

③ 冷挤压变形程度对挤压力的影响。冷挤压变形程度有各种不同的表示方法，如：断面缩减率 Z、挤压比 K_R 及对数挤压比 ψ_e。

断面缩减率
$$Z=\frac{S_0-S_1}{S_0}\times 100\% \tag{4.1.2}$$

挤压比
$$K_R=\frac{S_0}{S_1} \tag{4.1.3}$$

显然 Z 与 K_R 之间存在下列关系：

$$Z=1-\frac{1}{K_R} \tag{4.1.4}$$

对数挤压比
$$\psi_e=\ln K_R=\ln\frac{S_0}{S_1} \tag{4.1.5}$$

式中　S_0——冷挤压变形前坯料横截面积；

S_1——冷挤压变形后挤压件横截面积。

由以上各式可知：Z、K_R 及 ψ_e 愈大，则表示变形程度愈大。

变形程度对单位挤压力的影响如图 4.21 所示。正挤压时单位挤压力随变形程度的增大而增大，反挤压的单位挤压力曲线表明在不同的变形程度下，存在一个单位挤压力的最小值。此最小值位于 Z 为 30%～50%之间。

恰当地选取变形程度的数值是冷挤压成型中的重要问题。显然，大的变形程度可减少挤压成型工序数，缩短工艺流程。但过大的变形程度，导致单位挤压力过大，则可能使模具损坏或过早磨损。在模具钢所能承受载荷的条件下，一次挤压许可采用的变形程度

称为许用变形程度。

在模具承载能力一定的情况下，各种冷挤压变形方式的许用变形程度取决于所挤压材料的硬度和含碳量(见图 4.23、图 4.24、图 4.25)。图中斜线以下是许用区域，斜线以上是待发展区域，中间阴影部分是过渡区域，阴影区域上端适用于模具质量良好、润滑条件好的冷挤压成型工作，其下端适用于模具钢质量一般和润滑条件一般的冷挤压成型。

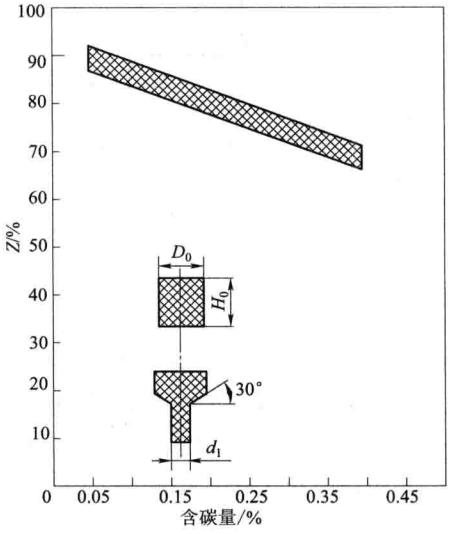


图 4.23 正挤压碳钢实心件的许用变形程度

($H_0/D_0=0.7\sim1.0$，磷化+润滑，坯料退火)

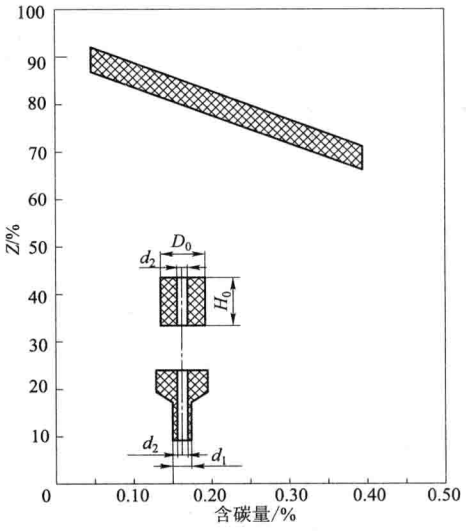


图 4.24 正挤压碳钢空心件的许用变形程度

($H_0/D_0=0.7\sim1.0$，磷化+润滑，坯料退火)

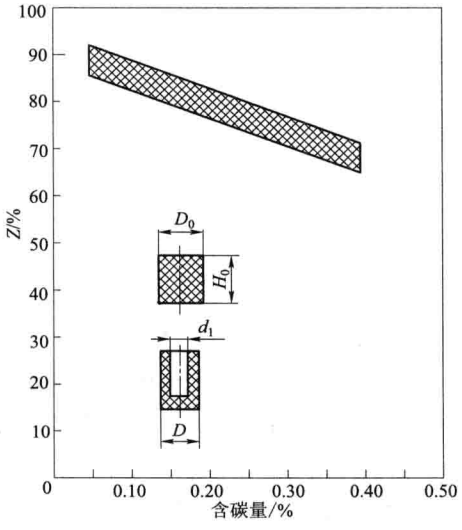


图 4.25 反挤压碳钢杯形件的许用变形程度

($H_0/D_0=0.7\sim1.0$，磷化+润滑，坯料退火)

④ 模具几何形状的影响。模具几何形状是通过改变被挤压金属与模具工作部分接触面上的摩擦力和金属的流动状况对挤压力产生影响的。

反挤压模具对挤压力的影响主要取决于冲头端部形状。图 4.26 所示的三种冲头端部形状，以图 4.26(c)所示的端部外形最符合于金属自然流动的趋向，由图 4.26(a)到图 4.26(c)逐个地减小了由于金属的不均匀流动而产生的材料内摩擦阻力；对于金属流动的摩擦阻力的影响则相反。因此冲头端部的外形设计应力应使金属流动时的内摩擦阻力和外摩擦阻力之和为最小。

不同端部形状的冲头对单位挤压力的影

响见图 4.27。平底冲头的单位挤压力最大；半球形冲头较小，但变形程度达到一定值后（$Z>60\%$），单位挤压力将急剧增大；带锥角冲头的挤压力比平底冲头的挤压力小，但其降低的幅度与其中心锥角的大小有关。由图 4.28 可知，当 α_B 为 9°～11°，挤压力有较大幅度的降低。

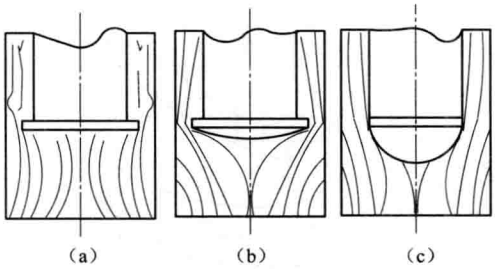


图 4.26　冲头端部形状对金属流动的影响

(a) 平底冲头；(b) 锥角冲头；(c) 半球形冲头

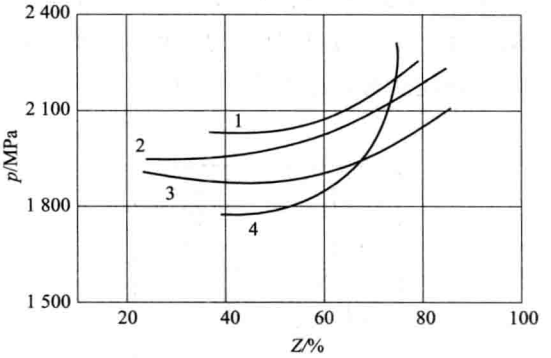


图 4.27　反挤压冲头形状对单位挤压力的影响

1—带圆角的平底冲头；2—168°的锥角冲头；3—120°的圆角冲头；4—半球形冲头

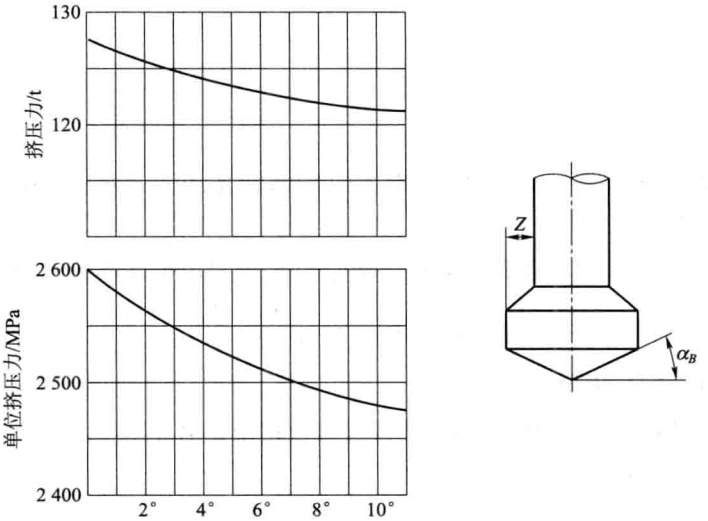


图 4.28　冲头斜角对挤压力的影响

正挤压模具对挤压力的影响主要取决于正挤压凹模的锥角（入口角）α（见图 4.29），正挤压对经球化退火的 15 钢产生作用时，锥角 α 挤压力的影响见图 4.30。

图 4.30 中曲线表明在各个变形程度下都存在一个挤压力最小的锥角 α。当小于此 α 值时，则由于在相同的变形程度下，被挤压金属将在凹模锥面上流过较长的距离，将导致摩擦力增大；而大于此 α 值时，被挤压金属在锥面上不易流动，导致流动阻力增大。

图 4.30 指出了在不同的变形程度下，挤压力最小时的凹模锥角为 40°～60°的范围，

随变形程度的增加，α 值增加，对其他材料，上述的 α 值大致相同。

⑤ 坯料相对高度的影响。显然，坯料的高度愈高，金属与模具接触面的摩擦也会随之增大，变形也更不均匀。坯料高度的这种影响与其直径有关，因此用坯料高度对其直径的比值，即相对高度予以衡量。正挤时，挤压力随相对高度的增加而增大；反挤时，则当相对高度小于 1 时，反挤压力随相对高度的增加而增大，当相对高度大于 1 后，反挤压压力则不再随相对高度的增加而增大。

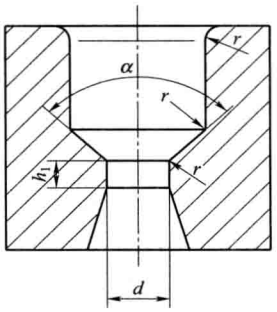


图 4.29 正挤压凹模形状

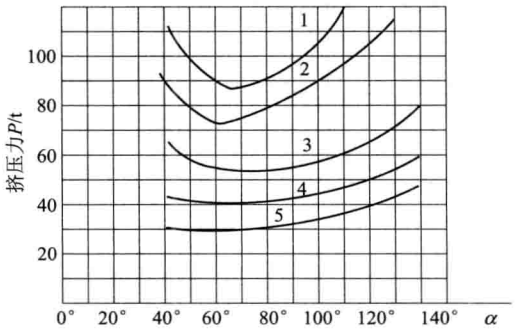


图 4.30 正挤压凹模锥角对挤压力的影响

1—对数挤压比 $\psi_e=1.33$；2—对数挤压比 $\psi_e=1.08$；3—对数挤压比 $\psi_e=0.71$；4—对数挤压比 $\psi_e=0.49$；5—对数挤压比 $\psi_e=0.31$

除上述因素外，对挤压力有影响的因素还有：润滑状况、变形速度以及挤压件的尺寸等。

(3) 挤压力的计算。

理论公式计算挤压力。正挤实心杆件的单位挤压力理论计算公式如下

$$p=2\overline{R}\left(\ln\frac{D_0}{d}+2\mu\frac{h_1}{d}\right)e^{\frac{2\mu H_0}{D_0}} \tag{4.1.6}$$

式中 p——单位挤压力，MPa；

$\overline{R}$——被挤压材料的变形抗力，可根据对数挤压比 ψ_e 查得（见图 4.33），MPa；

D_0——坯料直径，mm；

d——挤压件直径，mm；

h_1——凹模工作带高度（见图 4.31），mm；

H_0——坯料高度，mm；

μ——摩擦系数，有润滑时 $\mu=0.1$。

反挤杯形件的单位挤压力理论计算公式如下：

$$p=\overline{R}\left[\frac{D_0^2}{d^2}\ln\frac{D_0^2}{D_0^2-d^2}+(1+3\mu)\left(1+\ln\frac{D_0^2}{D_0^2-d^2}\right)\right] \tag{4.1.7}$$

式中符号所表示的意义见图 4.32，其余与式(4.1.6)相同。

几种常用于冷挤压成型的钢材的硬化曲线见图 4.33。

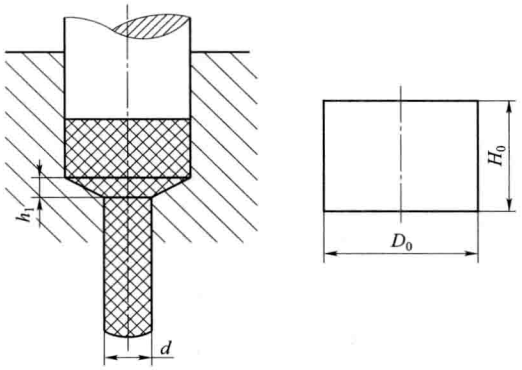


图 4.31　正挤压杆件及其坯料

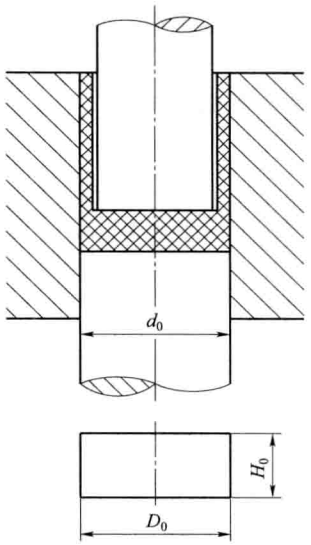


图 4.32　反挤压杆件及其坯料

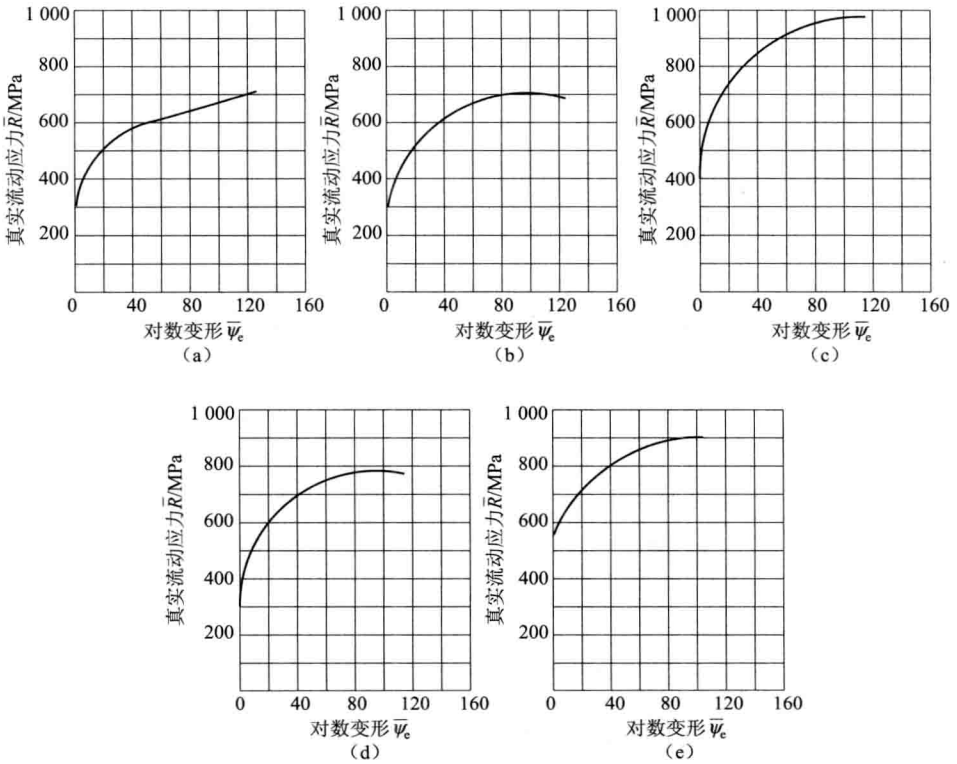


图 4.33　几种常用的钢材硬化曲线

(a) 08、10 钢硬化曲线；(b) 15 钢硬化曲线；(c) 35 钢硬化曲线；

(d) 15Cr 钢硬化曲线；(e) 20CrMn 钢硬化曲线

国内一些单位也通过试验研究方法建立了我国常用钢材的冷挤压压力计算图表和计算式。

图 4.34 和图 4.35 分别为几种常用钢材正挤压和反挤压的冲头单位挤压力与变形程度间的关系曲线。

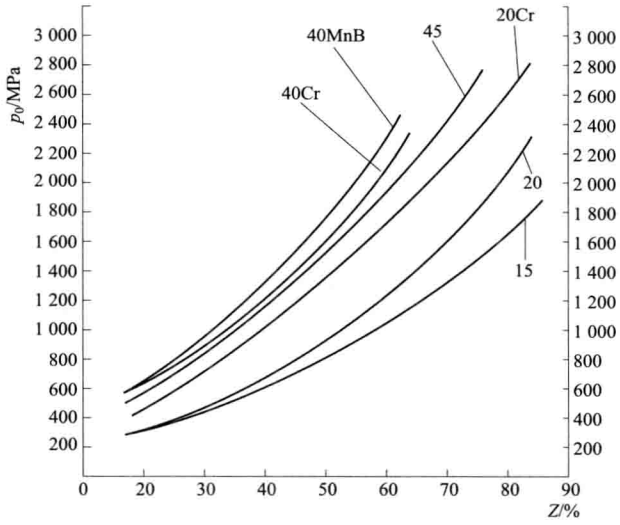


图 4.34 正挤压冲头单位挤压力与变形程度关系

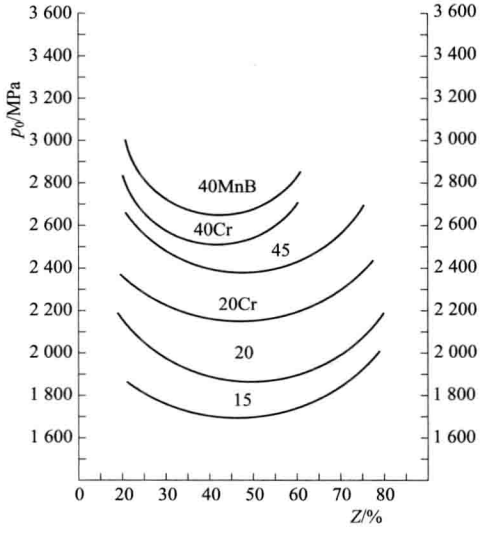


图 4.35 反挤压冲头单位挤压力与变形程度关系

考虑到凹模锥角及冲头锥角对单位挤压力的影响，需要对由图 4.34 或 4.35 查得的单位挤压力 p_0 进行修正，其修正值 K_a 可由图 4.36 曲线查得。

同样考虑到相对高度 H_0/D_0 对单位挤压力的影响，也应对由图 4.34 及图 4.35 查得的单位挤压力 p_0 进行修正，修正系数 K_h 可由图 4.37 曲线查得。

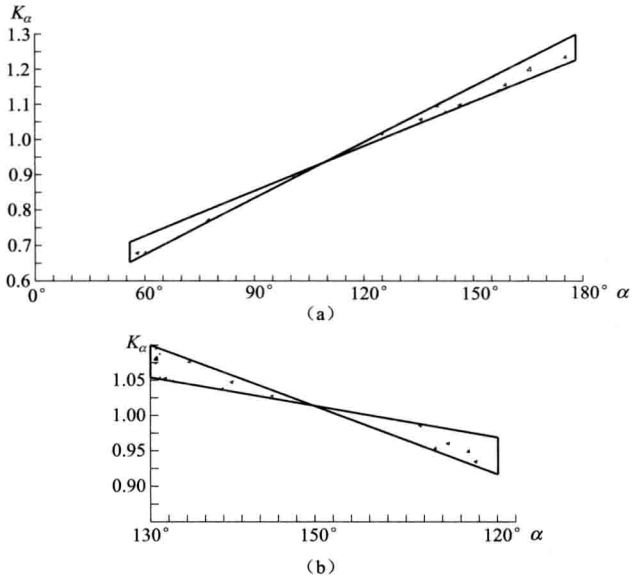


图 4.36　α 角的修正系数 K_α

(a) 正挤压凹模入口角 α 的修正系数；(b) 反挤压冲头锥角 α 的修正系数

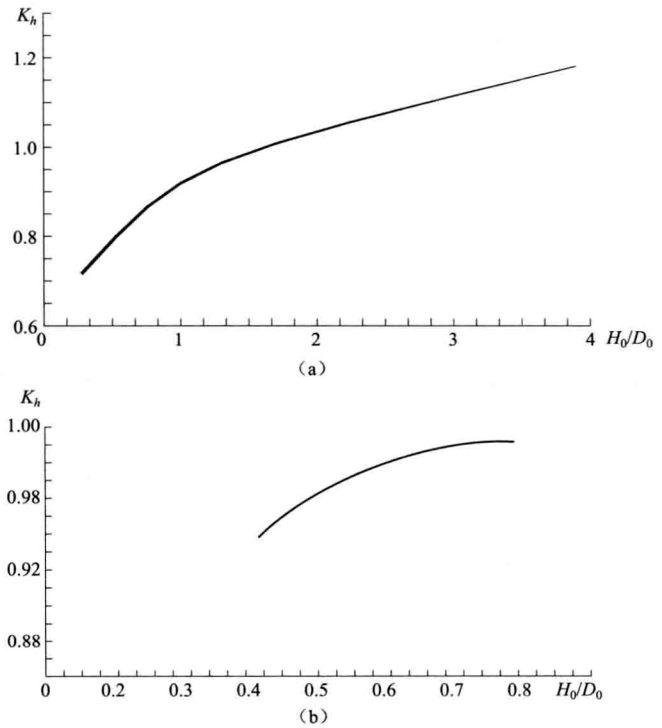


图 4.37　坯料相对高度的修正系数 K_h

(a) 正挤压的相对高度修正系数 K_h；(b) 反挤压的相对高度修正系数 K_h

因而实际的单位挤压力 p 为：

$$p=K_aK_hp_0$$

冲头的单位挤压力也可用计算式求得。

正挤时的实际单位挤压力：

$$p=K_aK_h(0.8+w(\mathrm{C})+0.12w(\mathrm{Cr}))\left(101\ln\frac{1}{1-Z}+24\right) \tag{4.1.8}$$

反挤时的实际单位挤压力：

$$Z\leqslant 45\%\text{时：}p=K_aK_h[0.875+1.25(w(\mathrm{C})+0.12w(\mathrm{Cr}))]\left(201-55\ln\frac{1}{1-Z}\right) \tag{4.1.9}$$

$$Z\geqslant 45\%\text{时：}p=K_aK_h[0.875+1.25(w(\mathrm{C})+0.12w(\mathrm{Cr}))]\left(141+44.5\ln\frac{1}{1-Z}\right) \tag{4.1.10}$$

式中 $w(\mathrm{C})$——材料中含碳量；

$w(\mathrm{Cr})$——材料中含铬量；

Z——变形程度(断面缩减率)；

p——冲头单位挤压力，MPa；

K_a，K_h——由图 4.36、图 4.37 查得。

4.2 冷挤压用钢材及挤压件性能

1. 冷挤压用钢材

(1) 对冷挤压用钢材的要求。冷挤压所用钢材的选择应兼顾制件的使用性能要求和材料对冷挤压成型的适应性，既要技术上可行，又应有良好的经济效果。

在变形量一定时，冷挤压强度高的材料，相对冷挤压强度低的材料而言，模具寿命势必有一定下降；如若为延长模具寿命，而减小每次挤压成型的变形量，则将对冷挤压成型的经济效果产生不良的影响。

冷加工硬化敏感性不同的材料，经一定程度的变形后，两者的变形抗力也不相同，显然，冷加工敏感性强的钢材将限制每次冷挤压成型的变形量，并对模具有不利影响。

因此，冷挤压钢材应具备的性能条件是：

① 尽可能低的变形抗力；

② 尽可能低的冷加工硬化能力；

③ 具备一定的塑性。

冷挤压用钢材，大致有三种类型。一种是只通过冷挤压成型，并不要求提高材料强度，对这种冷挤压用钢材最主要的性能要求是可成型性，属于这类的主要是含碳量在 0.1%以下的碳钢；另一种是既要通过冷挤压成型，又要提高材料的强度，对这类钢材的要

求除了应具有良好的成型性能外，还应具有一定的冷加工硬化的能力，弹箭零件冷挤压成型常用的 S20A、S15A 等都属于这种类型；第三种是经冷挤压成型后还需经热处理以提高材料的机械性能，当零件所要求的强度非冷挤压成型后所能达到者，或者对零件横截面上的强度要求很严格时，则挤压后需经热处理，对这类钢材的要求应具有较高的淬透性，挤压前材料应经适当的软化处理，以便于冷挤压，低合金钢就属于这种钢材。

碳钢的冷挤压性能取决于化学成分及组织结构。

(2) 化学成分对钢材冷挤压性能的影响。碳钢中除碳外，还含有少量的锰、硅、硫、磷等元素，这些元素对碳钢的冷挤压性能将产生一定的影响。

① 碳的影响。随着含碳量的增加，钢的强度、硬度都将上升，冷加工硬化能力也随之增强，其塑性则下降。碳是碳钢中增大单位挤压力最强烈的元素，因此冷挤压用钢材的含碳量应尽可能低些。实践证明，平均含碳量不超过 0.2%的碳钢，其冷挤压性能良好。

② 锰的影响。锰对低碳钢的强化能力也比较显著，使碳钢的强度指标上升，但锰对单位挤压力的影响程度只及碳含量影响程度的 1/4。锰对低碳钢的塑性则无显著的影响。

③ 硅的影响。硅能显著地提高钢的强度极限和使低碳钢冷加工硬化的能力加强，并使塑性和韧性指标下降，含硅量过大，将使含碳量较低的钢材也变为脆而硬，致使其冷挤压性能下降。

④ 硫的影响。钢中硫化物夹杂的存在，将促使钢材在轧制及其后的冷却过程中，内部组织呈带状分布，这种带状组织使钢的纵横向性能不一，降低钢的横向机械性能，致使钢材的冷挤压性能下降。

⑤ 磷的影响。磷溶于铁素体中会显著降低钢的塑性，提高其强度和硬度，磷的含量超过 0.1%时，其影响更显著。磷还能使钢材的冷加工硬化现象加剧，并引起剧烈的偏析现象和促使钢材的时效敏感性增加。故冷挤压钢材的含磷量愈少愈好，一般均应低于 0.06%。

此外钢中的氮、氧含量对钢材的冷挤压性能都有不利的影响。

(3) 组织结构对钢材冷挤压性能的影响。冷挤压用碳钢的室温组织是软的铁素体基体上分布有硬的珠光体颗粒，钢材含碳量愈高，则珠光体数量愈多。用于冷挤压的钢材，珠光体应成球状并尽可能地均匀分布，否则将引起钢材性能上的不均匀。

晶粒细小的钢材，塑性好、强度高，但由于强度的提高，也将使挤压力增大；晶粒粗大，则降低钢材的塑性，且成型后表面粗糙，甚至产生裂纹。冷挤压用钢材应有尽可能均匀的球形晶粒，其晶粒大小的范围应为：

晶粒的平均直径	0.02～0.06 mm；
每平方毫米的晶粒数	250～2 300 个；
晶粒平均面积	400～4 000 μm^2；

钢材中的非金属夹杂物对钢材性能的影响与夹杂物的性质、形状、数量及其分布状况有关。细小而均匀分布的夹杂物对钢材冷挤压的性能危害不大，粗大的或虽细小但局部

集中分布的夹杂物则危害性较大，将造成应力集中和纵横向性能的差别显著增加。

带状组织因造成钢材纵横向性能的差异，严重的带状组织会使材料冷变形时沿其横向开裂，所以冷挤压用钢材应该是带状组织不明显以及尽可能有均匀的纵横向性能。

低碳钢中，当硬而脆的游离碳化物呈网状分布在铁素体晶界上时，在变形力的作用下，易于产生应力集中，使金属出现裂纹，即使在三向压应力状态下也会产生脆裂，所以冷挤压用材料沿晶界有严重的游离碳化物时，挤压前必须消除。

2. 冷挤压件的机械性能

冷挤压件各部位的机械性能是不一致的。图 4.38 是弹体反挤压成型后纵剖面上沿厚度方向的硬度分布曲线，可以看出由于变形的不均匀而导致挤压件各部位机械性能的差异。所以，为表明冷挤压件的机械性能，需在冷挤压件的各部位上切取试样。

正挤压杆件的拉伸试验结果见图 4.39。表面层附近的冷加工硬化效应比中心部分大，其纵向延伸率略有降低，断面收缩率则变化不大。

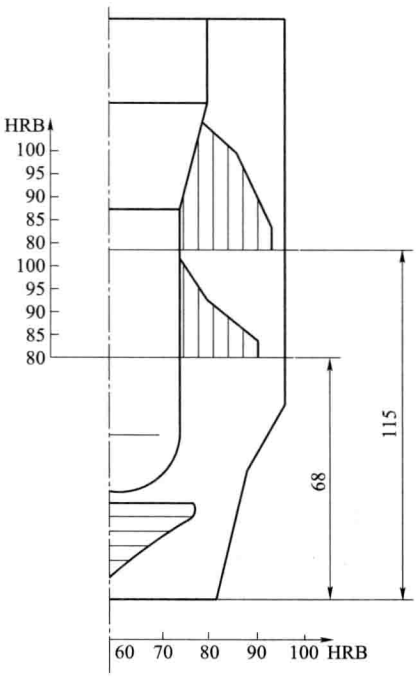


图 4.38 弹体反挤中孔后的硬度分布

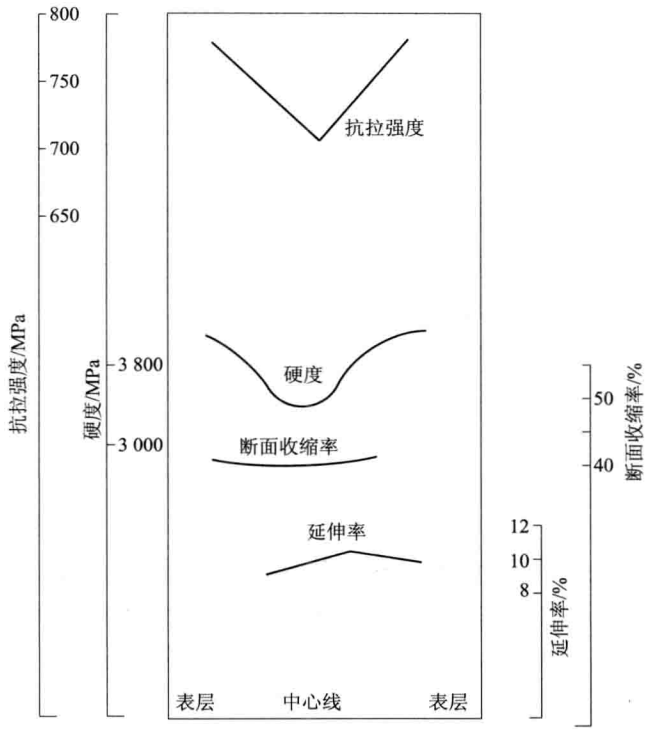


图 4.39 正挤压杆件横截面不同部位的纵向机械性能

材料：钢，经退火；挤压比：4；120°模具中心角

反挤压杯形件的机械性能同样与试样在冷挤压件上所在的部位有关，取决于局部变形量。由图 4.40 所示的厚壁冷挤杯形件部位上切取试样，其试验结果见表 4-2。

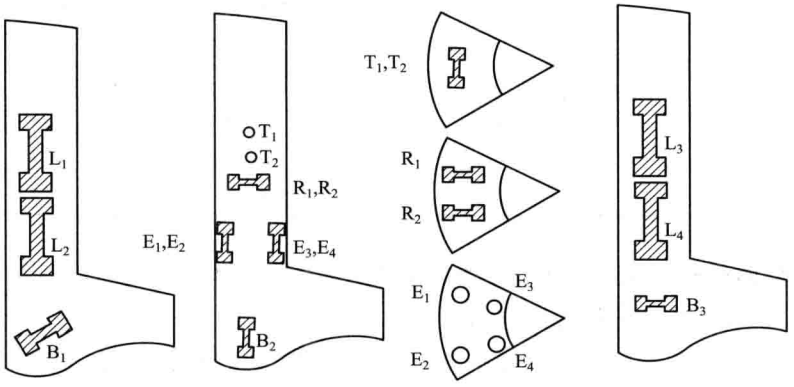


图 4.40　反挤成型的厚壁杯形件的试样切取部位

表 4-2　反挤成型的厚壁杯形件的拉伸试验数据①

试件部位		试件代号	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	断面收缩率 /%	硬度 /(HV30)
纵向		L_1	637	13.4	62.8	213
		L_2	657	14.8	52.7	225
纵向	外壁	E_1、E_2	598	14.3	60.1	211
	内壁	E_3、E_4	804	10.0	43.3	274
圆周		T_1	676	8.5	42.3	—
		T_2	681	9.5	39.9	—
径向		R_1、R_2	593	10.0	41.4	—
底部		B_1	666	11.8	56.5	216
		B_2	676	12.3	57.3	—
		B_3	608	5.0	25.5	—

注：① 材料与正挤压杆件(见图 4.39)相同；退火坯料；挤压比 1.36。

反挤压杯形件开口端壁部的变形量很小，因而强度差、塑性好。从开口端到底部，由于变形量的增大，其强度和硬度增加；从外壁到内壁也由于变形量的增加，强度和硬度也在增大。挤压比更大时，此情况更其明显。横向塑性低，特别是坯料的原始组织为层状珠光体时。

表 4-3 是 85 mm 口径高射榴弹弹体反挤成型后挤压件的机械性能，同样反映出由于变形程度的不均匀而导致机械性能不均匀。

表 4-3 挤压成型后材料机械性能的变化

变形工序	退火状态				挤压成型后							
					底部(横向)				壁部(纵向)			
	$R_{0.2}$ / MPa	R_b /MPa	A / %	Z / %	$R_{0.2}$ / MPa	R_m / MPa	A / %	Z / %	$R_{0.2}$ / MPa	R_m /MPa	A / %	Z / %
冲大孔(反挤)	216	397	37.5	71.5	632	647	5	48.5	549	564	12	66
冲中孔(反挤)	216	382	35	71.5	657	666	3	58.5	539	559	10	67
挤压成品	—	—	—	71.5	549	613	9	60	470	519	13	66

冷挤压件的机械性能还与坯料的原始组织有关。表 4-4 为不同原始组织的坯料被正挤成杆件后，切取试样进行拉伸试验的结果。

一般说来，具有细的原始组织的坯料，冷挤压后挤压件可得到高的强度，层状组织的原始坯料较球化组织的原始坯料冷挤后的塑性低。

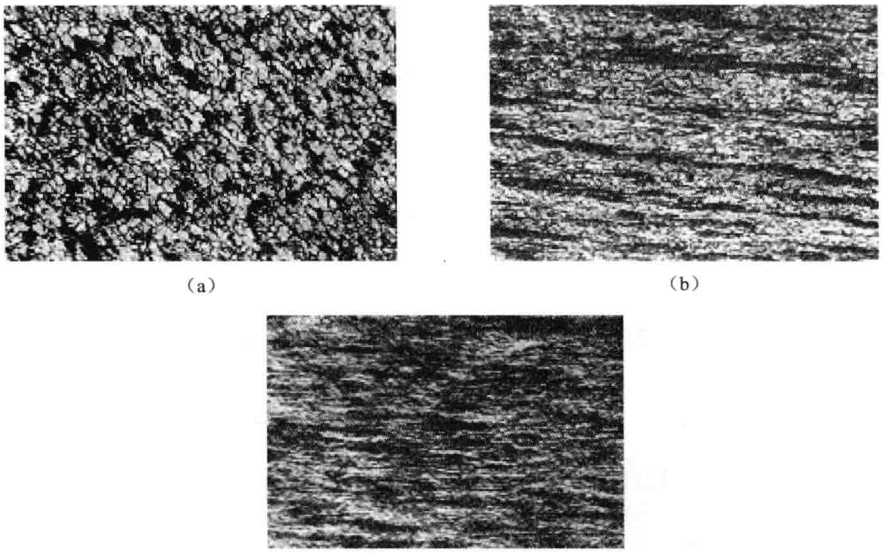
表 4-4 正挤压杆件纵横向的拉伸性能①

原始组织	试验方法	抗拉强度 R_m/ MPa	延伸率 A/ %	断面收缩率 Z/ %
粗大珠光体(910 ℃退火，1 h，在真空中极缓慢炉冷，每小时 50 ℃)	纵向	87	8.4	37.6
	横向	87.5	2.5	14.2
中等珠光体(910 ℃退火，1 h，在真空中炉冷，每小时约 200 ℃，通过转变点)	纵向	89	8.6	38.7
	横向	83.5	2.9	15.5
细小珠光体(910 ℃退火，1 h，空冷)	纵向	89	11.7	51.6
	横向	94.5	2.8	10.5
极细珠光体(910 ℃退火，1 h，开水淬)	纵向	108	10.0	44.9
	横向	100	2.6	9.5
球化组织(910 ℃退火，700 ℃时，再加热 20 h，全部在真空中)	纵向	84.5	10.8	45.7
	横向	82	4.0	17.4
细化分散的碳化物(910 ℃水淬，700 ℃真空回火 20 h)	纵向	90	16.0	63.7
	横向	94.5	4.2	19.6
注：① 材料与试验条件与正挤压杆件(见图 4.39)相同。				

对冷挤压件所作缺口冲击性能试验表明，坯料的原始组织对冷挤压件的冲击性能影响也很大。原始组织为粗大珠光体者最差，中等珠光体次之，细化的珠光体坯料冷挤后的冲击性能有一定程度的提高，特别是非层状组织(细化的分散碳化物)坯料与其他原始组织的坯料相比较，在挤压成型后，其冲击性能有明显的提高。

经冷挤压成型后的显微组织一般是细长的铁素体、纤维状的碳化物和细长的夹杂物，

这样的组织显示了冷挤压变形过程中金属的流动方向。当变形量很大时，原始晶界已失去其原有形状，不能再被辨认，而形成纤维组织。图 4.41 示出了冷挤压弹体材料 S15 冷挤前后的显微组织。



(a)　(b)　(c)

图 4.41　冷挤压成型前后的显微组织 100X

(a) 再结晶退火组织(未变形)；(b) 已变形的显微组织；

(c) 变形严重的显微组织

冷挤材料为 S15A、S20A 的弹体等主要零件时，由于冷加工硬化效应，其强度增高，断面收缩率 Z 虽有下降，但下降幅度较小，下降后的 Z 值仍然很高，并且由于冷挤后纵横向机械性能的差异，导致弹体爆破后弹壁的破片呈长条状(沿弹体轴向尺寸大，沿横向尺寸小)，且破片较大，所以目前材料为 S15A 或 S20A 的冷挤压弹体的破片性能不如 D60 钢经机加或热冲—机加而成的弹体。弹体爆破后的破片主要与弹体材料、成型方法、装药以及弹体结构设计有关。就深冲优质碳素钢弹体而言，其破片性能虽与变形程度有关，但通过变形程度以改善破片性能的幅度将不会很大，因此为改善破片性能需要寻找新的冷挤压材料。

4.3　冷挤压坯料的制备

钢质零件冷挤压成型之前，其坯料的制备包括：下料、软化处理及润滑处理，目的是为了提供质量符合冷挤压成型要求的坯料。虽然这些都不是使坯料直接成型的工序，但对冷挤压件的质量和冷挤压过程均有一定影响。

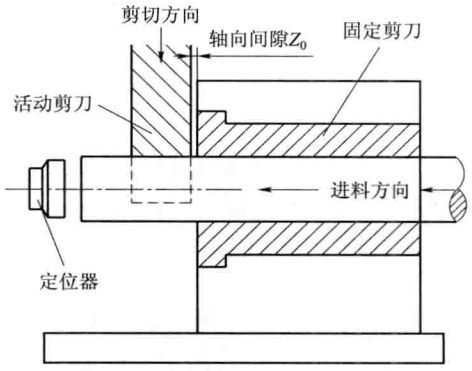


图 4.42 棒料的剪切装置

1. 下料

棒料的下料方法有：车床切割，锯床锯切及压力机剪切等。压力机剪切的下料方法有其一定的优越性：生产率高，材料消耗少，但一般剪切下料的断面质量不高，在冷挤压成型前往往要将坯料整形。

图 4.42 示出了棒料的剪切装置。

坯料的剪切质量由其形状、尺寸的精确度、切割断面的状态以及剪切端头附近的状态来衡量。剪切下料最常见的缺陷（见图 4.43）有：塌头 a，压痕 g，端面不平直度 b、端面倾斜度 ψ、椭圆度、切割表面的鱼鳞片层状、端头毛刺、撕裂等。

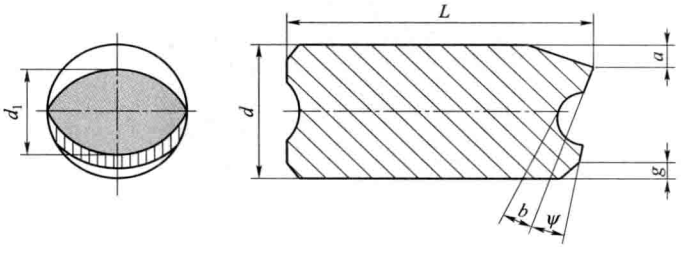


图 4.43 剪切坯料的缺陷

剪切坯料的质量与被剪切棒料及坯料的尺寸有关。一般说来，硬度高的材料比硬度低的材料容易获得较好的质量。坯料的长度与其直径之比愈小，则剪切越困难，也容易出现疵病。

在相同的材料和坯料尺寸的条件下，坯料剪切的质量主要取决于剪切工艺因素，这类因素主要有：剪刀之间的轴向间隙 Z_0、棒料与剪刀孔之间的径向间隙 Z_r、棒料剪切时的受力状况（有无轴向压力和径向夹紧力）、棒料温度、剪切速度、剪刀刀刃部分几何形状及刃口状态。

小口径冷挤压弹体采用蓝脆方法剪切棒料，剪切后的坯料紧接着被送入退火用感应加热器内，继续加热到退火温度。

这种下料方法的主要工艺参数是加热温度与剪刀间的轴向间隙。低碳钢被加热到 350 ℃以上的一段温度区间时，由于夹杂物（Fe_4N）的沉淀析出，钢材的脆性增大。剪切过程主要是脆性破坏，减小了坯料的变形，剪断后的断面呈蓝色，因而称为蓝脆下料，此温度区称为蓝脆温度。

为提高下料质量和坯料的下料精度，目前已发展有：利用高速度使坯料脆性断裂的高速剪切法；考虑了径向夹紧力对剪切质量产生有利影响的差动剪切法；对被剪切棒料施加

相当大的轴向压力的轴向加压剪切法；使剪切力沿径向依次作用在被剪切棒料断面整个圆周上的渐进剪切法。

2. 冷挤压坯料的软化热处理

坯料在冷挤压成型前一般都要进行软化热处理，在多工序的冷挤压成型中，还进行工序之间的软化热处理，其目的都是通过软化热处理降低坯料的强度和硬度，提高其塑性，得到良好的金相组织，使坯料具备良好的冷挤压性能。因此后续的冷挤压成型与软化热处理有密切的关系。

常用的钢质坯料冷挤成型前的软化热处理方法有：完全退火、球化退火和不完全退火等。其中球化退火对降低变形抗力（特别对中碳钢）和提高坯料的塑性有利，但因其工艺繁杂，经济性较差，在大量生产中应用受到限制。不完全退火一般只应用于低碳钢。

对于中间工序热处理方案的选择，应根据上道工序的变形量以及后续工序对材料性能的要求确定。如上道工序冷加工硬化不严重，而后续工序变形量不大时，则可不进行中间软化热处理；弹体冷挤压成型时热处理目的主要是降低变形抗力，而拔伸成型时热处理目的则主要是提高其塑性，以防止裂纹；弹体冷挤压成型时，在冷成型强化工序以后，不能再进行软化处理。

采用中频感应加热进行软化热处理，其加热速度快，保温时间短，氧化皮很少、易于去除，所以目前低碳钢冷挤压弹体的软化热处理，大多采用中频感应加热。

3. 钢质坯料的润滑处理

（1）润滑处理的作用和方法。为减小坯料与模具接触面上的摩擦，以减小挤压力，减缓模具的磨损和减轻金属成型过程中应力和变形的不均匀分布，挤压前，坯料都需经润滑处理。

润滑处理要解决的主要问题是：有效地分隔坯料和模具表面的接触以及减小摩擦。在单位挤压力可能高达 2 000～2 500 MPa 的情况下，一般通常应用的润滑剂已不能起到上述的作用，因为润滑剂极易被从接触面上挤出而丧失其作用。

目前在挤压低碳钢和低碳合金钢时，普遍地采用在坯料表面形成磷酸盐覆盖层的磷化处理和皂化处理结合的方法。磷酸盐覆盖层能有效地分隔变形金属与模具工作表面，同时变形过程中磷酸盐覆盖层又能起润滑剂支撑层的作用。磷化处理与皂化处理结合制备的坯料润滑层能起良好的降低挤压力、提高模具寿命和保证制件质量的作用。

坯料润滑层制备的内容与顺序是：

① 去除坯料表面的油脂、污垢等；

② 去除坯料表面的氧化皮；

③ 磷化处理，在坯料表面形成磷酸盐覆盖层；

④ 皂化处理。

目前常用化学法去油脂和污垢。用酸洗法去除氧化皮。弹体酸洗时应适当控制酸液温度和酸洗时间，以免腐蚀过度和防止产生氢脆现象。

(2) 磷化处理。磷化处理是将经过清理、表面洁净的金属坯料置于磷酸锌、磷酸锰或磷酸铁等磷酸盐的稀磷酸溶液中进行处理。钢坯料在磷化处理过程中表面生成的磷酸盐覆盖层不溶于水。根据磷化液成分的不同,薄层呈暗灰色、浅灰色或褐色。磷化膜由于具有下列特性,故在钢的冷挤压过程中能有效地起作用。

① 磷化膜是在坯料表面上由金属置换而成,与金属基体有很大的结合力,能坚实地附着于坯料表面。它是很细小的结晶,且多孔,这种覆盖层的孔隙能吸收和贮存润滑剂。

② 覆盖层是一种塑性物质,具有与金属基体一起伸长变形的能力,能在高压力下不被挤掉,从而有效地使变形金属与模具表面隔离。

③ 钢在挤压过程中,温度将升高到 300 ℃,在此温度下,覆盖层具有高黏度润滑剂的作用。

④ 磷酸锌处理后的磷化膜,在坯料浸入皂化液进行润滑处理时,还能与皂化液起反应,形成良好的润滑层。

磷化膜要有足够的厚度,其厚度依照坯料在槽液中的时间和槽液温度而定。由于处理层的表面往往凹凸不平,因此通常以单位面积上处理层的质量来间接表示。

在冷挤压变形程度相当大时,坯料表面随变形而扩展其磷化膜面积,过薄的磷化膜有可能破裂,而不能覆盖整个坯料表面,使坯料金属与模具接触,造成金属黏附到模具表面上并使挤压件表面受损伤。覆盖层过厚,将有过多的润滑物质在冷挤过程中被挤离坯料表面而粘在模具上,增加清理模具的工作量,更主要的是过厚的磷化膜将使摩擦系数上升。目前一般认为经济合理的磷化膜厚度为 $1.1\times10^{-3}\sim2.2\times10^{-3}\ \mathrm{g/cm^2}$。磷化处理后常用冷水清洗,有些情况下,还需热水洗,以防止残留的磷酸液对润滑剂起不良影响。

(3) 皂化处理。皂化是将磷化后的坯料浸入皂液—硬脂酸钠的热水溶液中处理的过程。处理时,硬脂酸钠深深地渗入磷化层毛细孔内,并且部分到达基体金属。同时硬脂酸钠的热水溶液与磷酸锌产生反应,锌置换皂液中的钠,形成磷酸钠和硬脂酸锌——锌皂,锌皂能牢固地黏结磷化膜表面。

弹体的皂化都直接采用肥皂或皂片和水调制而成。依据皂化液浓度的不同,皂化处理的温度分别为 30 ℃~40 ℃、40 ℃~50 ℃以及 50 ℃~70 ℃。

皂化后的坯料应在干燥状态下成型,坯料的干燥可以利用在皂化时所获得的热量,使之自然干燥,也可用 75 ℃~110 ℃热空气进行干燥。

磷化后加皂化处理的方法,虽能获得良好的润滑效果,但工艺流程长,劳动条件差,占用车间生产面积多,在一定程度上降低冷挤压工艺的优越性。国内外现都在研究新的润滑剂和处理方法,以取代磷化和皂化处理,较多的是研究用高分子化合物作为润滑剂。

4.4 弹体毛坯的冷挤压

1. 弹体毛坯冷挤压方案的拟订

冷挤压成型方案的拟订是一项比较复杂的工作,一般都要经过下列步骤的分析研究

过程。

(1) 分析研究弹体零件图。其主要内容包括有：

① 弹体材料对冷挤压成型的适应性。

② 弹体结构形状分析，包括弹体长度对外直径比值、药室深度对药室直径的比值、壁厚以及壁厚对内直径的比值、药室结构形状、弧形部的长度及曲率等，这些结构形状上的特点影响着成型工序的确定和冷挤压成型的难易程度。

例如：当药室深度对药室直径的比值较大时，则除了采用反挤压挤出药室初形外，还需采用拔伸或正挤加深药室深度；当弹体药室由多个截锥体组成时，则需采用多次反挤的方案挤出药室初形，并通过正挤或拔伸获得药室的形状。这样，还需要恰当地确定各次反挤成型工序之间的药室形状的衔接及多次反挤后的药室形状和正挤或拔伸时冲头形状的衔接；弧形部的长度及其曲率则影响收口的次数及收口方法的确定。

③ 弹体各部分的尺寸精度、表面粗糙度和位置精度要求，均可在后续的机械加工中实现。

④ 弹体机械性能的要求，应符合弹体机械性能强化工序的安排。

⑤ 产品破片性能的要求。

(2) 拟订冷挤压成型方案。拟订冷挤压成型方案的步骤如下：

① 制订弹体冷挤毛坯图。分析弹体上可不经机械加工而直接成型的部位和需要机械加工的部位，制订出冷挤弹体毛坯图。

制订冷挤弹体毛坯图时，一般采取下列方法之一。

- 挤压成型后，弹体外表面除定心部、弹带槽、口螺部分外，其余不再机械加工。这种方法可节省材料和减少机械加工，但弹体外形各部分的同轴度不易保证，且材料表层疵病不能清除。
- 挤压成型后，精加工整个弹体毛坯的外形表面。这种方法容易保证弹体外形的同轴度，并能通过车削清除材料表层的疵病，但材料利用率较低，机械加工较多。

这两种方法的选择取决于具体生产条件和经济分析。

② 确定收口前冷挤压弹体毛坯的形状和尺寸。收口是为了获得弹体弧形部和药室的最后形状，为此，需要在冷挤压弹体毛坯图的基础上确定收口前冷挤压弹体毛坯的尺寸和结构形状。

获得冷挤压弹体收口前毛坯的方法与获得热冲压弹体收口前毛坯的方法不同。后者是在热拔伸后，通过车削外表面得到；而前者则是经拔伸或正挤后得到，其外形是圆柱形，而将收口前所需的形状调整到毛坯的内形上，此内形则在拔伸或正挤时由冲头成型。

收口前冷挤压弹体毛坯的形状和尺寸同样可根据收口前后体积不变的原理，按收口后弹体冷挤压毛坯的形状和尺寸，逐个地求得收口前弹体冷挤压毛坯收口部分各截面上的药室尺寸，而后连成光滑曲线或几个截锥形，其形状尺寸的最后确定，还需经过试验修正。

③ 初步确定冷挤压成型方案。确定冷挤压成型方案的顺序是由最后一道工序，逐道工序地往前确定。

根据弹体冷挤压毛坯的弧形部长度及其曲率初步确定收口的方法及收口次数。

对于冷挤压后不再机械加工全外形的弹体毛坯，冷成型时，应成型出弹体毛坯定心部。为了成型方便，在保证弹丸发射精度的条件下，一般只设一条上定心部而将弹体的下定心部取消，如 37、100 mm 高射榴弹弹体。也有的冷挤压弹体仍然保留上、下定心部，如 57 mm 高射榴弹弹体。对于有上、下定心部的弹体，其定心部一般不宜以冷成型方法成型，而在车削弹体外形时加工而成。

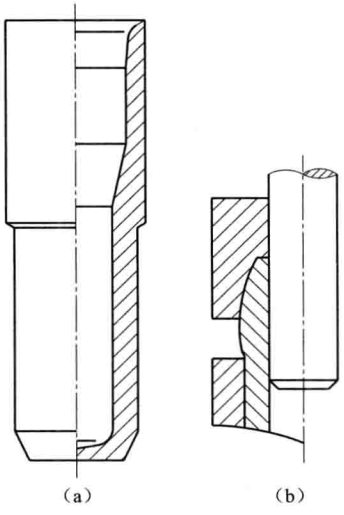


图 4.44 定心部的成型方法

(a) 拔带；(b) 镦粗

冷成型定心部的方法有三种：一种是拔带（见图 4.44(a)），拔带是局部的拔伸成型，定心部以下部位经拔伸减小直径，以上部位经收口后即能使定心部成型；另一种是与收口工序合并，在收口的同时将定心部镦粗成型（见图 4.44(b)）；第三种是利用胀形的办法胀出定心部。

获得收口前药室最后形状的方法可以采用正挤，也可以采用拔伸。正挤特别适宜于内孔结构形状比较简单而变形量较大的情况，具有允许的变形量大、工序少的优点，但对于和上道工序内腔尺寸的衔接上要求比较严格。拔伸与正挤的选择，应根据具体的生产条件，进行对比后予以确定。

冷挤压弹体毛坯在拔伸或正挤前，按照弹体的结构，可采用复合挤（用于小口径冷挤弹体毛坯同时挤出曳光管孔的情况）或多次反挤，以获得药室初形和曳光管孔。在多次反挤时都是先挤出直径较大的孔，而后再挤直径较小的孔，在挤小直径孔时，已挤出的孔仅作向上的刚性移动，不再参与变形。

坯料下料后，在反挤药室初形前，冷挤压弹体毛坯都安排有压型工序，其目的是规整下料后的坯料和压出弹体尾锥部初形，为反挤工序作准备。

④ 冷成型强化工序的安排。用深冲优质碳素钢替代原 D60 钢作弹体材料时，成型过程中必须安排有一定变形程度的冷成型强化工序。冷成型强化工序的变形程度，应按弹体机械性能的要求，根据材料的硬化曲线确定。冷挤压成型过程中，最后一次软化退火以后的成型工序变形量必须满足上述数值。获得弹体机械性能的冷成型强化工序的安排，与冷挤压成型过程和坯料直径的选择都有密切的联系。

⑤ 确定各成型工序的形状和尺寸。经上述的分析和安排后，即可从收口前的冷挤压弹体毛坯图向前推算，得到各成型工序的形状和尺寸。同时对每道反挤或复合挤压工序，应保持有适当的冲孔深径比。

在确定各成型工序的形状和尺寸时，需要特别注意上下成型工序药室形状和尺寸的衔接，以免药室表面产生裂纹或其他缺陷。

确定每道工序的形状、尺寸后，应对各成型工序的变形程度进行核算。弹体毛坯的冷挤压成型过程可以分为两个阶段。最后一次中间退火以前的成型阶段，是为了改变坯料的形状；在此之后的成型阶段，除进一步改变形状外，还具有强化材料的目的。因此不同的成型阶段，选择工序变形程度所考虑的因素不同。前阶段的各成型工序选择变形程度时，一般倾向于采用大变形程度，以减少成型工序和中间退火、润滑处理次数；但在大量生产的条件下，不宜追求过高的变形程度。后阶段工序变形量的选择，则应在满足产品性能要求的基础上，采用较小的变形程度，以使模具的寿命增长和避免裂纹等缺陷的产生。

⑥ 中间退火和磷化、皂化处理的安排。

⑦ 试验修改成型方案。

2. 小口径榴弹弹体毛坯的冷挤压工艺

(1) 工艺流程。图 4.45 示出了 57 mm 高射榴弹弹体毛坯的冷挤压工艺流程。

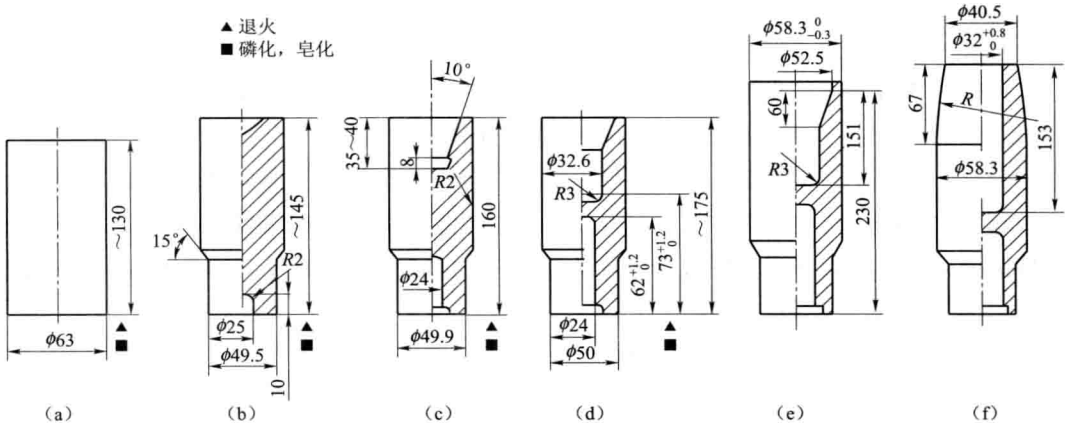


图 4.45　57 mm 高射榴弹弹体毛坯的冷挤压工艺流程

(a) 下料；(b) 压型；(c) 第一次挤压；(d) 第二次挤压；(e) 拔伸、切口；(f) 收口

① 下料。两种弹体毛坯材料均为 S15A，由中频感应加热器加热到 350 ℃～450 ℃的蓝脆温度，而后在压力机上蓝脆剪切下料。若采用热轧棒料，则在蓝脆下料之前，要清除棒料的表面缺陷及校直棒料。下料时主要控制下料质量和剪切断面质量。下料后为消除坯料下料时的冷加工硬化效应，降低坯料的强度、硬度，改善坯料组织，需对坯料进行退火处理，随后进行磷化和皂化处理。

② 压型。其目的主要是：

• 蓝脆下料的坯料断面质量均较锯切和车削差，通过压型以压平端面及规整外形，使坯料端面与轴线垂直。

• 基本挤出外形，使坯料在后续工序的凹模内能正确定位，同时保证了上、下两部分

的同轴度。

• 挤出药室(或压出凹坑)和曳光管初形(或浅孔),使坯料在下一道挤压成型时,上冲头和底冲头在坯料上有正确的位置。

采取了压型工序,有助于弹体冷挤压毛坯壁厚差的降低,提高了上冲头与底冲头的稳定性,能延长冲头寿命,并使增大冲孔深度成为可能。

③ 挤压。挤压工序的目的是挤出弹体的药室初形和使曳光体成型。57 mm 冷挤弹体的内孔深径比较大,因此需经二次挤压才能成型。

④ 拔伸。拔伸的目的是进一步减薄弹体毛坯的壁厚,得到弹体毛坯的外径,形成弹体药室的深度和收口前所需的头部形状。因此,拔伸冲头的轮廓形状必须与收口前所需的药室形状一致。拔伸工序是弹体毛坯的冷成型强化工序,因此需有一定的变形量,拔伸后不再进行退火处理。

⑤ 切口。由于轧制棒料本身的尺寸公差以及因下料尺寸的变化而引起坯料质量的差异,拔伸后,弹体毛坯的长度不可能完全相同,并且弹口边缘不可能很平整,所以拔伸后需通过车削口部余料,得到所要求的收口前弹体轴向长度和平整的弹口端面。

⑥ 收口。目的是获得弹体弧形部外形。

弹体毛坯成型后,为消除残余应力及考虑长期贮存过程中形变时效的影响,对 57 mm 弹体冷挤压毛坯最后还需进行低温回火处理。

(2) 工艺特点。在成型过程中应尽可能减小金属流动阻力。如果金属的流动通道愈窄,流动阻力就愈大,则导致挤压力的增大,有可能使冲头断裂或降低模具寿命。57 mm 冷挤压弹体药室的底部由平底改为半径为 50 mm 的球面与斜角为 7°的锥面组合而成的型面,是减小金属流动阻力的实例。

从以上弹体的冷挤压工艺流程中可以看出,57 mm 弹体的冷成型强化是通过拔伸成型(见图 4.45)得到强化。拔伸前的直径与拔伸后毛坯直径的差值应保证强化所需的变形量。因此 57 mm 弹体毛坯的坯料大于其直径。

3. 大、中口径榴弹弹体毛坯的冷挤压工艺

(1) 工艺流程。图 4.46 示出了 100 mm 高射榴弹弹体毛坯冷挤压工艺流程。

(2) 工艺特点。大、中口径弹体与 57 mm 以下的小口径弹体及其他的冷挤压件相比有明显的特点:首先是其质量大,尺寸大,结构复杂,其结构的复杂性表现在药室深径比大,特别是 100 mm 高榴弹体毛坯的药室是由多个截锥体组成,致使这类弹体的挤压成型比较困难,必须采用多工序的冷挤压成型过程;其次是大、中口径弹体毛坯的壁厚大,使其冷挤压成型时的变形不均匀性加剧。

① 多工序成型。大、中口径弹体毛坯多工序成型的特点,要求弹体毛坯成型过程中尺寸的演变必须有很好的衔接,各工序的变形应有恰当的分配。工序间尺寸的衔接不良或变形的分配不当,都有可能形成应力集中或使坯料的某些部分在不利的应力状态下变形,使成型过程中产生缺陷或造成后续工序成型的困难。例如 100 mm 高射榴弹毛坯,其

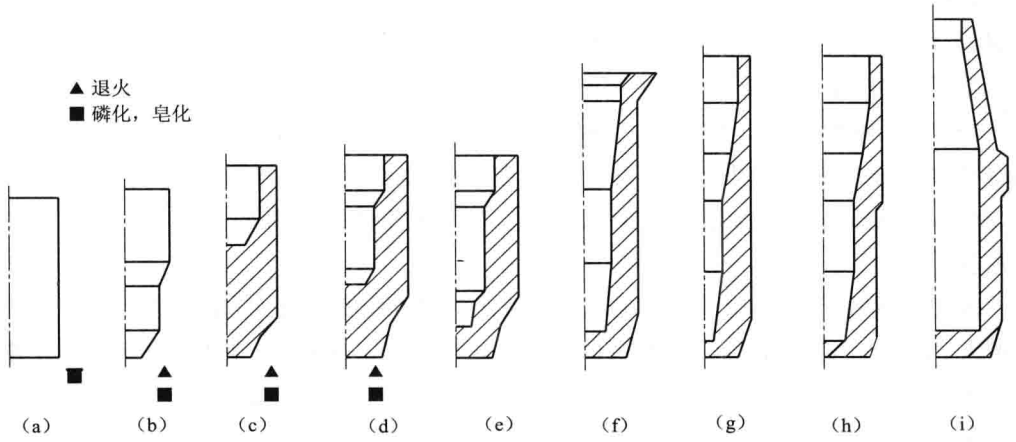


图 4.46　100 mm 高射榴弹弹体毛坯冷挤压工艺流程

(a) 下料；(b) 压型；(c) 冲大孔；(d) 冲中孔；(e) 冲小孔；
(f) 正挤；(g) 校正；(h) 拔定心部；(i) 收口

药室系由多个锥面构成，此型面主要在正挤压时成型。为了在正挤压时获得这样的药室形状，正挤前的坯料需要具有与之相应的锥角不同的锥面，而这些锥形面应在正挤前的反挤或复合挤压中成型。多锥面内孔的冷挤压工艺性能不良，因此一般都采用多次反挤的变形方式挤出多锥阶梯孔，然后再通过正挤成型出多个锥面组成的内孔。正挤时，挤压件的内孔与正挤冲头不能良好地贴合，沿轴向存在着大小不等的间隙。正挤压时，变形区以上的金属由于未能与冲头贴合，在挤压力作用下，壁部将产生镦粗变形。当内壁的转折部位存在凹痕等缺陷时，在镦粗变形后，凹痕将变得窄而深入壁部，形成应力集中的部位。当此部位进入正挤变形区后，由于变形的不均匀性以及外摩擦所引起的附加应力的作用，该部位金属容易在转向拉伸变形中被拉裂。

图 4.47 是 100 mm 高射榴弹弹体在正挤时产生的情况。图中的(a)是未改进前的情况，A 处明显地间隙过大，且该部位存在环形凹痕，又是退火后产生粗晶带的部位，因而正挤时容易在该处出现裂纹；B 处虽间隙较小，但因有凹痕存在，也是一个正挤时产生裂纹的敏感部位。图中(b)为改进后的正挤前内腔形状，由于减小了第一次反挤的深度，增加了第二次反挤的深度，采用锥面过渡，使内腔与正挤冲头的间隙减小，同时将反挤冲

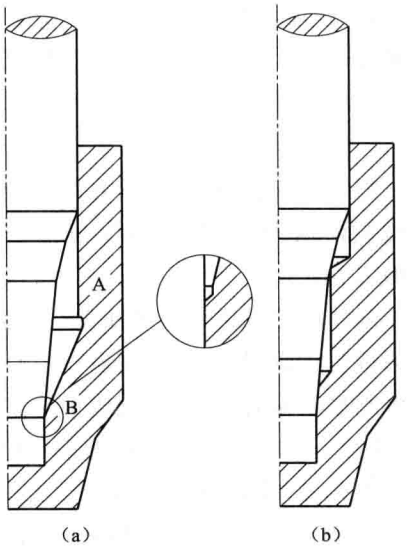


图 4.47　100 mm 高射榴弹弹体正挤前的内腔形状

(a) 改进前；(b) 改进后

头的圆角加大，减轻了凹痕，使各次反挤成型时衔接处的形状得到改善，因而该部位因工序间形状和尺寸衔接不良而出现的裂纹得到消除。

② 变形不均匀严重。大、中口径弹体毛坯由于弹壁大而使变形的不均匀性加剧。反挤时，壁厚愈大，冲孔愈深，则变形的不均匀性愈严重，附加应力愈大。一般内壁的变形条件最差，因而内壁材料若存在脆性夹杂物或其他形成薄弱环节的因素时，就会在局部高应力作用下形成裂纹，所以反挤压时易在内壁产生缺陷，并且主要是内壁下部。

拔伸成型时，壁厚及变形程度愈大，则变形不均匀程度也愈大，随着壁厚对内径比值的增大，变形的不均匀性对变形程度的敏感性也增大，这说明了厚壁弹体与薄壁件拔伸成型时在变形特点上的差别，如果厚壁弹体采用较大的拔伸变形量时，强烈的变形不均匀而引起的附加拉应力很可能将弹体内壁拉裂。

因此挤压成型时，变形程度的选择，除了与材料性质、变形方式、模具承载能力等有关外，对于大弹体还必须考虑其厚壁的结构特点，以免由于变形的不均匀常常容易在局部位置上形成高应力区而出现表面裂纹，因而限制了各成型工序变形程度的增大。

③ 粗晶的影响。大、中口径弹体成型时的变形极不均匀，因此各工序成型时，总有某些部位的变形量处于临界变形区，经退火后，该部位的晶粒粗大，出现了粗晶区。粗晶区金属的塑性很差，往往是大弹体冷挤压成型过程中促进裂纹产生和扩展的部位，并且使弹体该部位的表面粗糙。

由于变形的不均匀性，临界变形区难以避免，为了消除粗晶区对成型过程的不利影响，可以采取下列措施之一：采用调质或正火代替工序间的退火处理，避免产生粗晶带；或是通过改变工序形状和尺寸以改变粗晶区的位置，使之避开后续工序成型时要求材料有良好塑性的部位。

4. 弹箭零件的其他成型方法

为消除冷挤压工艺的不足，同时充分利用冷成型的优越性和适应一些弹箭零件新材料的成型，在弹箭零件毛坯的生产领域已经采用和正在研究一些改进的和新的成型方法。

国外现已广泛采用热冲盂—冷拔伸的方法成型大、中口径弹体毛坯。即先用热成型方法将坯料成型为盂形，而后在室温下进行冷拔伸成型。这种成型方法与冷挤压相比能减少所需设备的吨位，简化成型工艺，与热冲压相比则能提高材料利用率。

122 mm 火箭弹燃烧室即采用热冲盂—冷拔伸的方法，其工艺流程见图 4.48。

122 mm 火箭弹燃烧室外形结构的基本特点是：相对壁厚（壁厚/直径）很小，长径比（长度/直径）和孔的深径比（孔深/孔径）都比较大，并且还具有较厚的底部。类似这种薄壁、细长的筒形件是热冲盂—冷拔伸成型方法的典型制件。对于这类零件外形结构上的其他特点，例如该零件外形上具有不同直径的凸台，则可采用半拔伸圆柱部和局部扩胀圆柱部的方法成型。

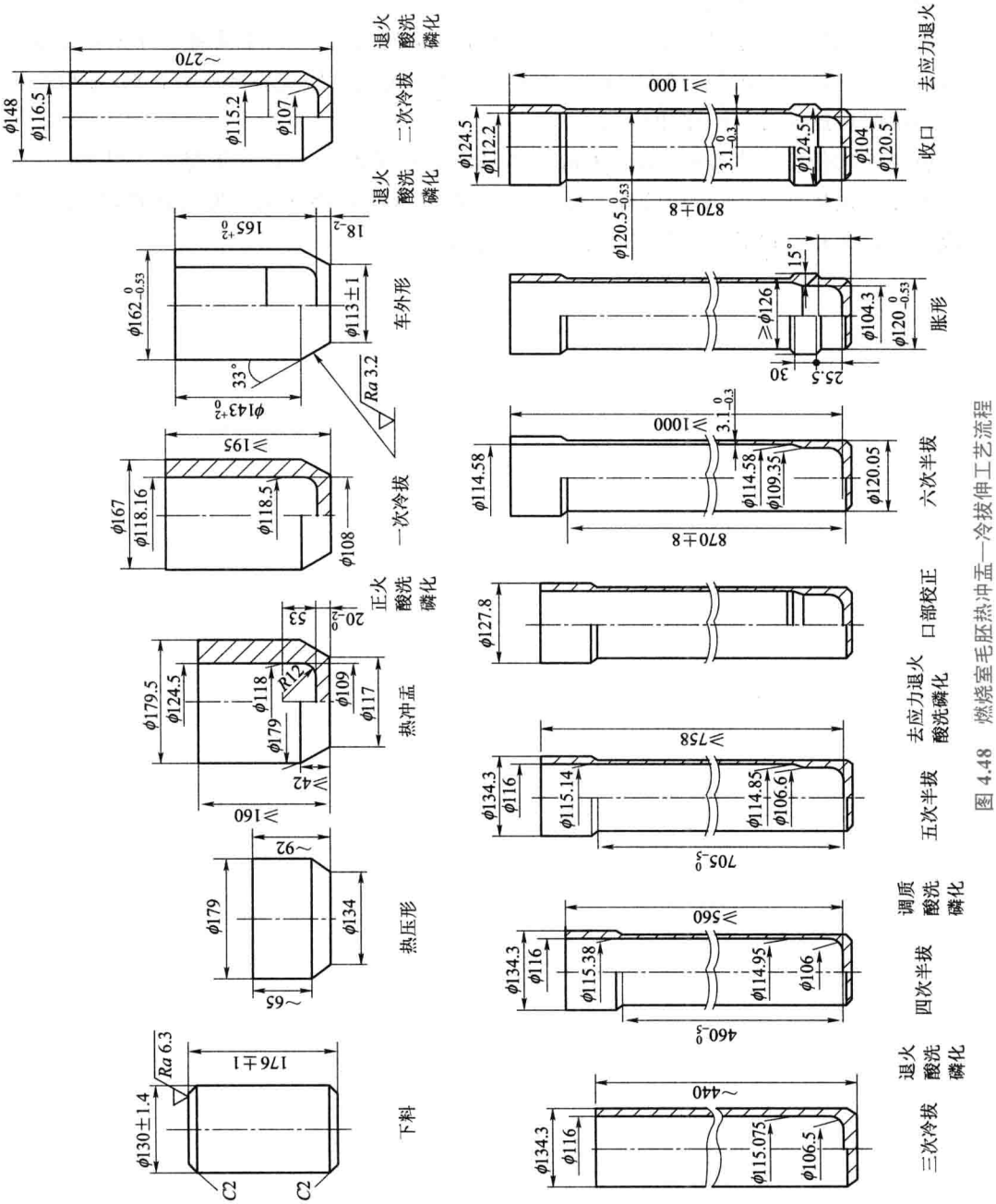


图 4.48　燃烧室毛胚热冲盂—冷拔伸工艺流程

由图 4.48 可以看出，通过采用精备料、热压型和浅冲孔的方法可以获得壁厚差较小的盂坯。为保证零件内、外表面的同轴度，在第一次冷拔伸后，对坯料外表面进行车削，以消除材料表面的宏观缺陷和控制壁厚差。

燃烧室的定心部是最后由胀形而成，扩胀定心部的局部胀形，实质就是在定心部胀出部分所需的材料留在内腔，即在内腔成型过程中预先留出扩胀定心部所需材料，而后在扩胀定心部时将这部分材料胀出成型。

燃烧室的强度要求较高，因而采取了在调质后给予坯料一定变形量的方法，使之强化。为保持强化效果，在后续的成型过程中，不再进行使坯料软化的退火处理，只是分别在成型过程中和收口后各进行一次消除应力退火。

第 5 章　弹箭零件的冷冲压

5.1　概　　述

冷冲压包括很多变形方式不同的工序，适用于冲制各种不同结构的零件。应用于弹箭零件制造的冷冲压工序主要有三种，如图 5.1 所示。

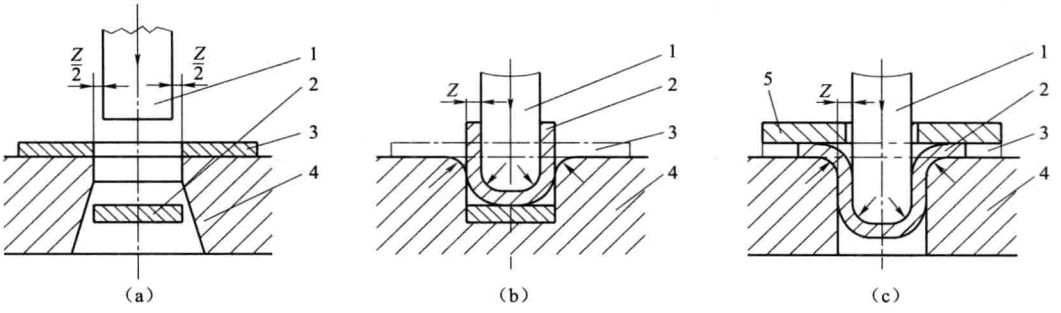


图 5.1　冲裁、弯曲、拉伸工序原理图

1—凸模；2—冲压件；3—板料；4—凹模；5—压边圈

(a) 冲裁；(b) 弯曲；(c) 拉伸

图 5.1(a)为冲裁工序。冲裁是利用具有剪切刃口的凸、凹模，使材料的一部分和其余部分沿一定的轮廓周边分离的冷冲压工序。它包括落料和冲孔，从板料上冲下所需形状的零件(或坯料)称为落料；从工件上冲出所需形状的孔(冲下的材料是废料)则称为冲孔。冲裁可以是冲制零件的工序，如用落料和冲孔冲制垫圈，也可作为后续的弯曲、拉伸等成型工序的备料工序。

图 5.1(b)为弯曲工序。弯曲是利用模具将坯料弯成所需形状和角度的冷冲压成型工序。随弯曲模具结构的不同，可以冲制各种结构形状复杂的弯曲零件。

图 5.1(c)为拉伸工序。拉伸是利用模具将坯料成型为杯状零件的冷冲压成型工序。按板料厚度在拉伸过程中是否变薄而有变薄拉伸与不变薄拉伸之分。后者在拉伸过程中材料厚度基本保持不变；前者则主要是通过减薄筒壁以增加筒深，筒底厚度基本保持不变。

冷冲压生产中为提高生产率和冲裁件精度，常将两个或两个以上的基本工序结合，使材料在模具内一次定位的情况下，在压力机的一次行程中完成。落料和冲孔的复合、落料和拉伸的复合，这类工序称之为复合工序。

冷冲压加工生产率及材料利用率高，又便于机械化、自动化。可以在压力机简单的往返行程中冲制出形状复杂、重量轻且刚度要求较高的薄壁零件。由于是在室温状态下用模具成型，故冲压件具有较高的表面光洁度和尺寸精度，尺寸稳定性较高，一般情况下可不经机械加工而直接装配。但这种加工方法也有其局限性，模具制造比较复杂，制造成本也较高，因而主要用于大批量生产。

5.2 冲裁类零件的冷冲压

弹箭的冲裁类零件，如 40 mm 火箭增程破甲弹的翼片和垫圈，翼片的原材料为板料，其冷冲压工艺是：先将板料剪裁成条料，而后在条料上经落料成为翼片，如图 5.2 所示；垫圈则采用卷料，故不经剪裁，直接在卷料上用落料—冲孔复合工序一次冲成。

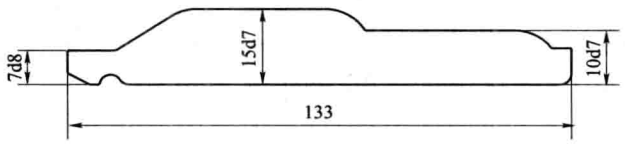


图 5.2 翼片

1. 剪裁

剪裁在弹箭零件冷冲压中是作为备料工序，通称下料，通常在平口或斜口剪床上进行。

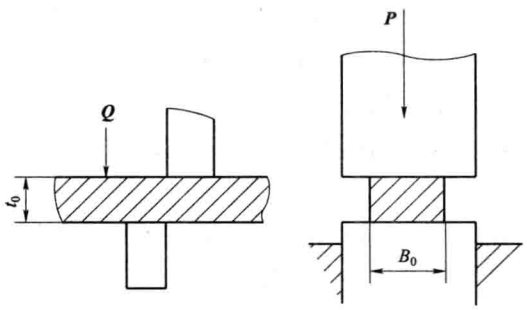


图 5.3 平口剪床剪裁

(1) 平口剪床上剪裁。上刀刃与下刀刃并行，剪裁在整个接触长度上同时进行(见图 5.3)，刀刃的剪裁行程较短，而剪裁力则较大。为防止剪裁过程中板料产生翻转现象，剪床上设有压紧装置，以产生 Q 力。这样既有利于提高板料剪裁断面质量，也可避免因板料转动而作用于刀刃上的侧压力所造成的不良影响。

(2) 斜口剪床上剪裁。上下两剪刀刃之间倾斜 φ_0 角(见图 5.4)。斜口剪裁并不在整个板料宽度上同时进行。开始时，上刀刃仅有一点与板料接触，随上刀刃的下降，剪裁宽度逐渐增加，达到一定值后，剪裁宽度不再增加，在剪裁的后阶段又逐渐减小，因而剪裁力可大为降低，且剪裁过程较平口剪床平稳得多。刀刃与板料的接触长度和板料宽度无关，仅取决于板料厚度及 φ_0 角。

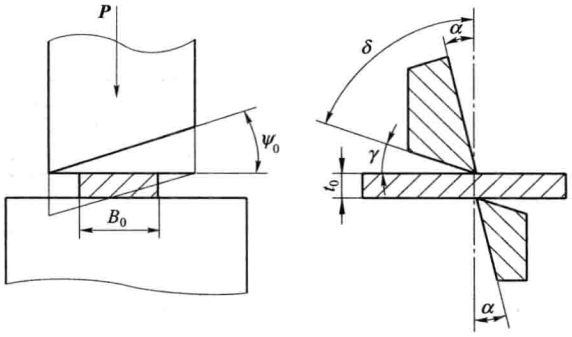


图 5.4　斜口剪床剪裁

ψ_0角的存在，使剪裁后的条料产生卷曲。材料愈厚，ψ_0角愈大，条料卷曲现象愈严重。卷曲变形严重的条料在后续的冷冲压工序之前必须校平。

比较平口剪床与斜口剪床的剪裁过程，可见斜口剪床适宜于剪裁薄而宽的板料，平口剪床则适宜于剪裁窄而厚的板料。

2. 冲裁

冲裁是冷冲压加工最基本的工序。落料和冲孔在冲裁过程和模具构造上无本质区别，仅用途不同而已。

(1) 冲裁过程。冲裁凸模与凹模的锋利边缘组成了上、下刃口，上、下刃口之间有一定的间隙。冲裁过程大致可划分为三个阶段。

① 弹性变形和塑性变形开始阶段。凸模施加压力，使材料产生弹性压缩和弯曲，材料略有被挤入凹模洞口的现象。

② 塑性变形阶段。凸模继续加压，材料中应力达到屈服点，部分材料被挤入凹模，产生塑性剪变形。由于间隙的存在，材料同时发生弯曲与拉伸现象。压力继续增大时，在凸、凹模刃口处由于应力集中，该部位应力首先达到抗剪强度极限，而出现裂纹。

③ 剪断阶段。随凸模的继续下压，裂纹向材料内部扩展，直至被拉断分离。当间隙值恰当时，上、下裂纹应在中部会合，而使材料完全断裂分离。

此后凸模下降仅是克服摩擦力，将冲裁件推出凹模。

冲裁过程也可从冲裁力曲线(见图 5.5)看出，AB 段是弹性变形阶段，BC 段是塑性变形阶段，CD 段是裂纹向中心扩展，直至分离的断裂阶段，DE 段则为将冲裁件推出凹模阶段。材料机械性能不同，冲裁力曲线的形态也有变化。

(2) 冲裁件质量。冲裁件的截面质量见图 5.6。截面并不光滑平整。其上的圆角带是开始塑性变形时，由于材料的纤维受弯曲及拉伸而形成，材料软则圆角大。光亮带是塑性剪变形时形成，此部分光亮且与底面垂直，软材料光亮带宽，硬材料则窄。断裂带是在断裂阶段形成，在拉应力作用下，裂纹不断扩展，金属纤维被拉断的结果，所以表面粗糙且带锥度。正常的冲裁件截面上应无毛刺、撕裂、裂纹等缺陷，冲裁件底面则略向外鼓。

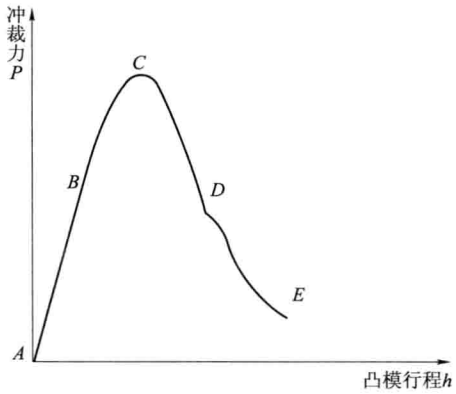


图 5.5 冲裁力曲线

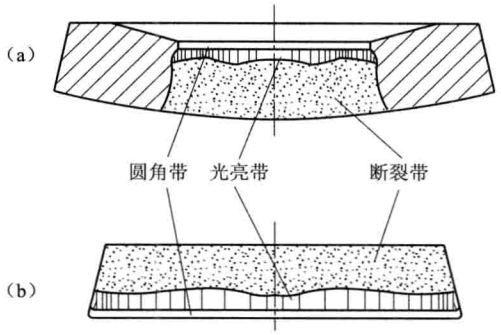


图 5.6 落料及冲孔件截面质量

(a) 冲孔件;(b) 落料件

① 影响冲裁件截面质量的因素较多,其中最主要的因素是模具间隙大小及其分布的均匀性和模具刃边状态对冲裁件截面质量的影响。

间隙大小及其分布的均匀性对冲裁件截面质量的影响。间隙过小(见图 5.7(a))或过大(见图 5.7(c))时,上下裂纹不会合拢,相隔一定距离,材料最后分离时断裂层出现毛刺与夹层。若间隙分布不均匀,则冲裁件产生局部毛刺。

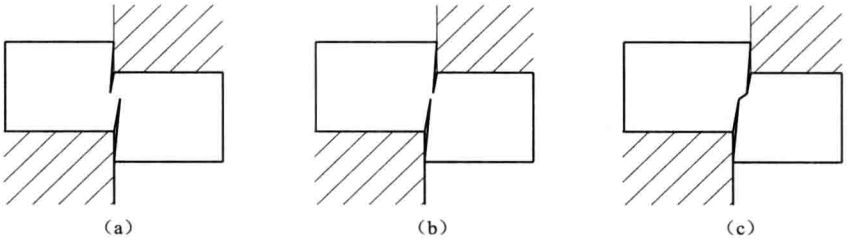


图 5.7 间隙对冲裁件截面质量的影响

(a) 间隙过小;(b) 间隙适中;(c) 间隙过大

刃口状态对冲裁件截面质量的影响。凸模刃口钝时,落料件上产生毛刺(见图 5.8(a));凹模刃口钝时,冲孔件周边产生毛刺(见图 5.8(b));两者均钝时,则冲孔件与落料件上都产生毛刺(见图 5.8(c))。刃口变钝后,虽间隙恰当,也避免不了会产生毛刺;刃口锋利,虽可能产生毛刺,但不致太大。

② 影响冲裁件尺寸精度的因素。冲裁件尺寸精度是指冲裁件实际尺寸与其公称尺寸的差值。此差值由两方面的偏差所组成:一是冲裁件与凸模或凹模工作部分的尺寸偏差;二是凸、凹模本身的制造偏差。前者主要是冲裁件脱离凸模或凹模后,由于材料回弹所造成。间隙是影响冲裁件尺寸的最主要因素。间隙合适时,落料件最接近凹模工作部分尺寸,冲孔件则最接近凸模工作部分尺寸。间隙过大,落料件将产生负的偏差(即工件

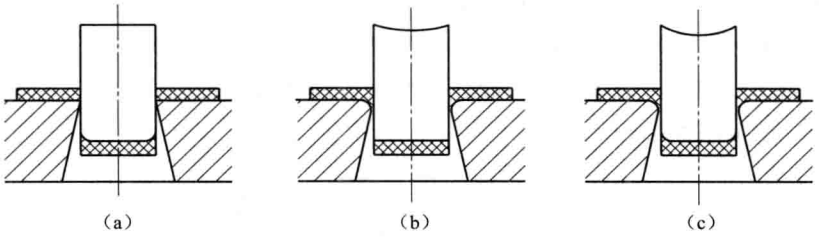


图 5.8　刃口变钝时产生毛刺的情况

(a) 凸模刃口钝；(b) 凹模刃口钝；(c) 凸、凹模均钝

尺寸小于凹模工作部分尺寸)；间隙过小，落料件则产生正的偏差(即工件尺寸大于凹模工作部分尺寸)。冲孔时也具有相同的规律，但其偏差符号与落料时恰好相反。材料的厚度及其性质对冲裁件的回弹量有影响。材料厚度与冲裁件直径之比愈大，材料愈软，冲裁件的弹性恢复量愈小，故尺寸精度高。反之，则尺寸精度降低。冲裁件的外形愈复杂，则冲裁件尺寸偏差愈大。

凸、凹模的制造精度也是一个主要因素，若凸、凹模制造精度不高，则冲裁件的尺寸精度也就无法保证。

(3) 冲裁件排样。排样是指冲裁件在条料上的布置。排样的合理性可以用材料利用率衡量。材料利用率是冲裁件面积对冲裁此工件所消耗材料面积的比率。

排样的方法有各种各样，在图 5.9 所示的三种排样方法中，显然采用图 5.9(c)所示双排参差排样法时材料利用率最高。

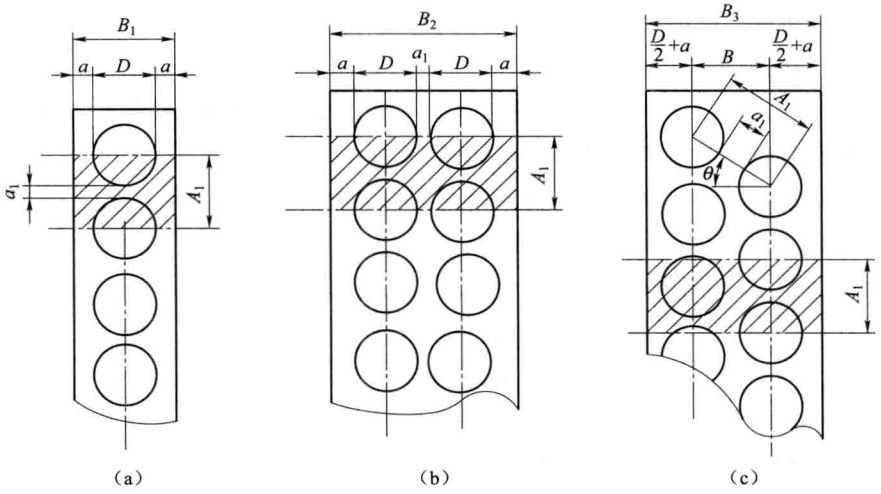


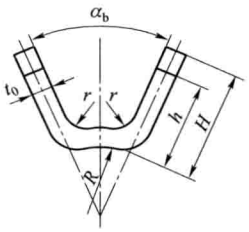
图 5.9　圆片排样法

(a) 单排排样；(b) 双排排样；(c) 双排参差排样

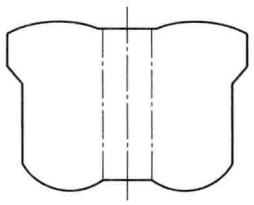
冲裁件的结构外形对排样方法有重要影响，所以设计冲裁件时，应在满足使用要求的

条件下，使其结构外形有利于提高材料利用率。

此外，排样时还应考虑后续成型工序的要求。例如迫击炮弹尾翼片落料后，需经弯曲成型（见图 5.10），由于 r/t_0 较小，弯曲成型要求弯曲线与轧板方向垂直，这样就决定了尾翼片的排样方式（见图 5.11）。



(a)



(b)

图 5.10 尾翼片及其展开

(a) 尾翼片；(b) 展开外形

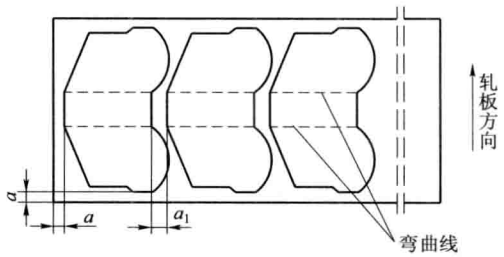


图 5.11 尾翼片排样图

排样时，冲裁件之间以及冲裁件与条料侧边之间的余料称为搭边。搭边 a 及 a_1 的作用是保持条料有一定的强度和刚度，便于送料和冲裁，搭边就其本身而言是工艺废料，应尽可能小，但也应保持其必要的数值。

（4）冲裁力的计算。计算冲裁力的目的在于正确选用压床和设计模具。冲裁力 P 可按下式计算：

$$P=(1.0\sim1.3)Lt_0\tau_0 \tag{5.2.1}$$

式中 L——冲裁件周边长度，mm；

t_0——冲裁件厚度，mm；

τ_0——材料抗剪强度，MPa。

式中系数（1.0 ～1.3 ）是考虑到实际生产中模具刃口的磨损、间隙的变化、材料厚度的偏差以及机械性能波动等因素对冲裁力的影响。

沿冲头运动方向将工件或废料自凹模内推出的推件力，或逆冲头运动方向将工件或废料自凹模内顶出的顶件力以及从凸模上将工件或废料卸脱的卸料力，可分别按经验公式（5.2.2）、公式（5.2.3）及公式（5.2.4）计算：

$$Q_1=n'K_{c_1}P \tag{5.2.2}$$

$$Q_2=K_{c_2}P \tag{5.2.3}$$

$$Q_3=K_{c_3}P \tag{5.2.4}$$

式中 Q_1，Q_2，Q_3——分别为推件力、顶件力和卸料力；

P——冲裁力；

n'——同时阻塞在凹模洞口内的工件（或废料）数；

K_{c_1}，K_{c_2}，K_{c_3}——分别为推件力、顶件力和卸料力系数，与较多因素有关，其值见表 5-1 所示。

表 5-1　推件力、顶件力和卸料力系数数值

材料厚度/mm		K_{c_1}	K_{c_2}	K_{c_3}
钢	>0.1～0.5	0.063	0.08	0.045～0.055
	>0.5～2.5	0.055	0.06	0.040～0.050
	>2.5～6.5	0.045	0.05	0.030～0.040
铝、铝合金		0.03～0.07		0.025～0.080
紫铜、黄铜		0.03～0.09		0.020～0.060

5.3　弯曲类零件的冷冲压

弯曲类零件以弯曲为主要成型工序。如图 5.12(a)所示，环形尾翼支撑片是经图 5.12(c)所示单角弯曲方法两次弯成；迫击炮弹尾翼片和图 5.12(b)所示的环形尾翼支撑片则用图 5.12(d)所示的双角弯曲方法一次弯成。

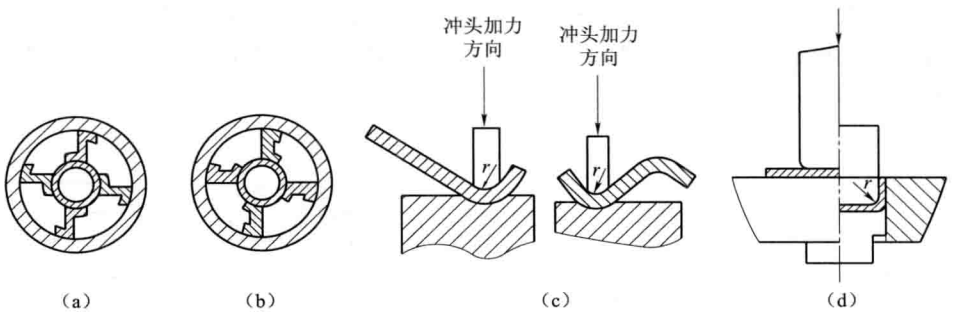


图 5.12　火箭弹环形尾翼支撑片及其弯曲成型

(a)～(b) 不同形状环形尾翼；(c) 单角弯曲；(d) 双角弯曲

以迫击炮弹尾翼片为例，其工艺流程如下：

剪裁条料 → 落料 → 滚光 → 厚度分类 → 弯曲 → 校正

1. 弯曲成型过程及变形特点

图 5.13 所示为单角弯曲的成型过程。

开始弯曲时，坯料为自由弯曲成型过程。随着凸模的下行，坯料的直边逐渐靠向凹模工作表面，弯曲半径 r、力臂 l 及弯曲变形区逐步变小，弯曲件形状也逐渐与模具工作部分形状相接近；待坯料与凸模三点接触时，坯料的直边部分则在与之前相反的方向被弯曲。弯曲的最后阶段，凸、凹模校正弯曲件的弯角与直边，使之与模具工作部分完全贴紧。

弯曲过程中，坯料先是处于弹性状态，随着弯曲半径的缩小，坯料表层纤维进入塑性

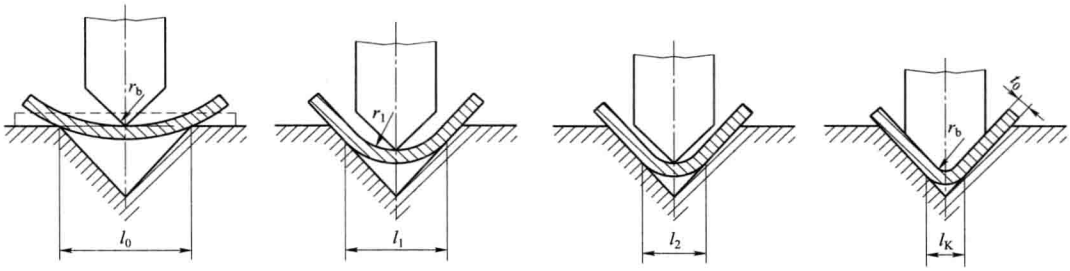


图 5.13 单角弯曲成型过程

状态，开始塑性变形，而后塑性变形向中心部位扩展。变形区集中在弯曲件的弯角部分，直边部分几乎没有变形。变形区内，外层（靠凹模一侧）纤维被拉长，内层（靠凸模一侧）纤维缩短，由表面至中心，其伸长或缩短的程度逐渐减小。伸长变形区过渡到缩短变形区之间，总存在一层纤维其纵向长度保持不变，该层纤维称之为变形中性层。

在弯曲变形区内，坯料厚度减薄，其减薄的程度与弯曲变形的程度有关。坯料的横截面产生畸变，中性层以内，纤维纵向受压而使横向增宽；中性层以外，纤维纵向受拉而使横向收缩。但由于宽板（$B_0>2t_0$）和窄板（$B_0\leqslant 2t_0$）在横向的变形阻力不同，因此横截面畸变的现象在窄板弯曲时才比较明显。宽板与窄板弯曲成型时的应力应变状态及横截面畸变如图 5.14 所示。

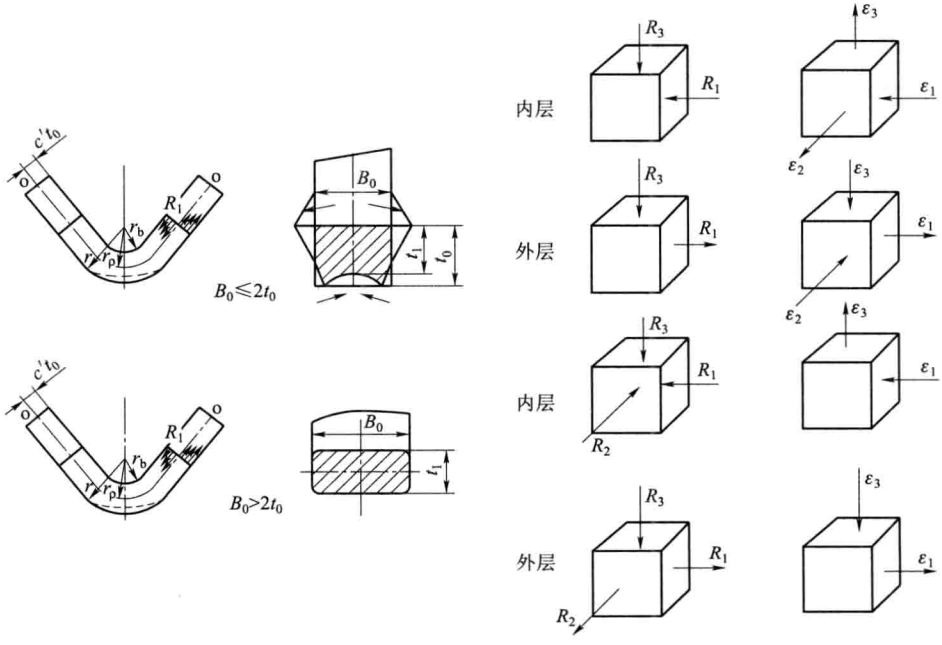


图 5.14 弯曲成型时应力应变状态及横截面畸变

2. 最小弯曲半径

由上述可知，弯曲变形区外侧表层拉伸变形及承受的拉伸应力最大，且随弯曲变形程度的增加而加剧，因此极限弯曲变形程度取决于外侧表层纤维所能承受的极限拉伸变形程度。

弯曲变形程度可用相对弯曲半径 r_b/t_0 表示，其中 r_b 为弯曲半径，t_0 为坯料厚度。r_b/t_0 愈小，表示弯曲变形程度愈大。材料允许的最小弯曲半径 r_{bmin}，主要与下列因素有关：

(1) 材料的机械性能及厚度。材料塑性愈好，坯料厚度愈薄时，许可的最小弯曲半径 r_{bmin} 数值愈小。

轧制板料的机械性能具有方向性，沿轧板方向的机械性能优于横向机械性能。因此，若弯曲线方向与轧板方向垂直时，许可的 r_{bmin} 可小一些。只有当材料塑性好，且弯曲半径数值不大时，弯曲线与轧板方向的相对位置才可不作为排样的主要决定因素，此时，展开件在条料上的位置安排应由排样的经济性决定。

(2) 落料的表面质量。坯料上有毛刺会引起弯曲时的应力集中，导致产生裂纹，特别是弯曲变形程度大时更是如此。若毛刺较小，弯曲半径又较大时，可使有毛刺的部位处于纵向受压应力作用的一侧，使坯料不致因应力集中而产生裂纹。

(3) 落料截面的冷加工硬化层。由于冷加工硬化层的存在，降低了材料的塑性，故许可的 r_{bmin} 值较大。若弯曲件要求较小的圆角半径时，落料后要经退火处理。

设计弯曲零件时，应尽可能增大圆角半径，以便于冲压成型，各种不同情况下的许可最小弯曲半径值见表 5-2。

弯曲线与轧板方向成一定角度时，r_{bmin} 可采用垂直和平行纤维方向二者的中间值。

表 5-2　许可最小弯曲半径值 r_{bmin} 数值

材料	经退火或正火		冷加工硬化	
	弯曲线位置			
	与轧板方向垂直	与轧板方向平行	与轧板方向垂直	与轧板方向平行
08、10	$0.1t_0$	$0.4t_0$	$0.4t_0$	$0.8t_0$
15、20	$0.1t_0$	$0.5t_0$	$0.5t_0$	$1.0t_0$
25、30	$0.2t_0$	$0.6t_0$	$0.6t_0$	$1.2t_0$
35、40	$0.3t_0$	$0.8t_0$	$0.8t_0$	$1.5t_0$
45、50	$0.5t_0$	$1.0t_0$	$1.0t_0$	$1.7t_0$
55、60	$0.7t_0$	$1.3t_0$	$1.3t_0$	$2.0t_0$
半硬黄铜	$0.1t_0$	$0.35t_0$	$0.5t_0$	$1.2t_0$
软黄铜	$0.1t_0$	$0.35t_0$	$0.35t_0$	$0.8t_0$
紫铜	$0.1t_0$	$0.35t_0$	$1.0t_0$	$2.0t_0$
铝	$0.1t_0$	$0.35t_0$	$0.5t_0$	$1.0t_0$

3. 弯曲件展开

为确定弯曲件的展开长度，应首先确定变形中性层的位置。

板料的弯曲变形较轻微时，可以认为变形中性层在板料厚度的中间位置上。但随弯曲变形程度的增大，变形中性层向弯角内侧移动，其移动量取决于 r_b/t_0 的数值，这是因为变形中性层的位置 r_ρ（见图 5.15）可按下式确定：

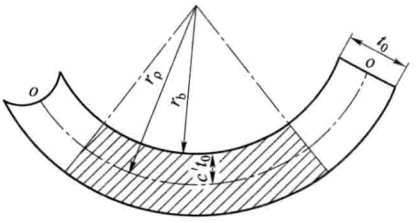


图 5.15 弯曲时中性层位置

$$r_\rho = r_b + c' t_0 \tag{5.3.1}$$

式中 c'——系数，按表 5-3 查得。

表 5-3 确定中性层位置的系数

r_b/t_0		0.1	0.2	0.25	0.3	0.4	0.5	0.8	1	1.5	2	3	4	5	>6.5
c'	Ⅰ①	0.26	0.26	0.31	0.32	0.35	0.37	0.40	0.41	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48	0.5
	Ⅱ②	0.3	0.33	0.35	0.36	0.37	0.38	0.41	0.42	0.44	0.46	0.47	0.48	0.49	0.5

注：① 适用于有顶板或压板的单角和双角弯曲。
② 适用于无顶板的单角弯曲。

掌握中性层位置后，弯曲件的弯曲部分按中性层长度展开，并与弯曲件的直边长度相加，即可计算出整个弯曲件长度，但对精度要求高的弯曲件，需最后经试验确定。

4. 弯曲件的回弹

由于塑性变形总伴随有弹性变形以及弯曲变形中性层两侧存在一定范围的弹性变形区，所以弯曲件离开模具后，其弯角与弯曲半径都将产生变化，造成与模具的尺寸及形状不一致（见图 5.16）。

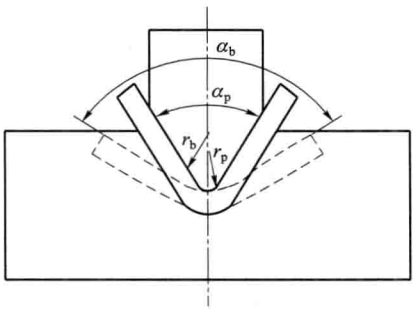


图 5.16 弯曲件的回弹

回弹的方向与变形的方向相反，直接影响弯曲件的精度，是弯曲成型必须考虑的现象。回弹程度可用回弹角 $\Delta\alpha_b$ 表示，等于弯曲件的实际弯角 α_b 与模具的弯角 α_p 的差值。回弹的程度与材料的屈服强度成正比，而与材料的弹性模数成反比；相对弯曲半径 r_b/t_0 值愈大，则回弹愈大，这是由于弯曲变形区内弹性变形所占比例较大之故。形状复杂的弯曲件，若一次弯曲成型时，由于各部分的相互牵制，回弹困难，故回弹角较小，如双角弯曲时的回弹一般要比单角弯曲的回弹小。此外模具的结构也对回弹值有影响。

弯曲成型时，要采取措施来补偿回弹所产生的误差。通常可先经试验确定回弹值，设计模具时，视回弹方向增大或减小模具弯角，以使弯曲件回弹后与所要求的弯角相符。

5.4　圆筒件的不变薄拉伸

拉伸类零件占弹箭冷冲压零件的大多数。这类零件以拉伸为主要成型工序，经过一次或多次的拉伸或再附加以少量的成型工序，可以获得复杂的薄壁零件。图 5.17 所示是典型的拉伸类零件。这些零件成型的共同点是：先经落料成圆片，通过一次或多次不变薄拉伸成圆筒形，而后成型为各自的特有形状。

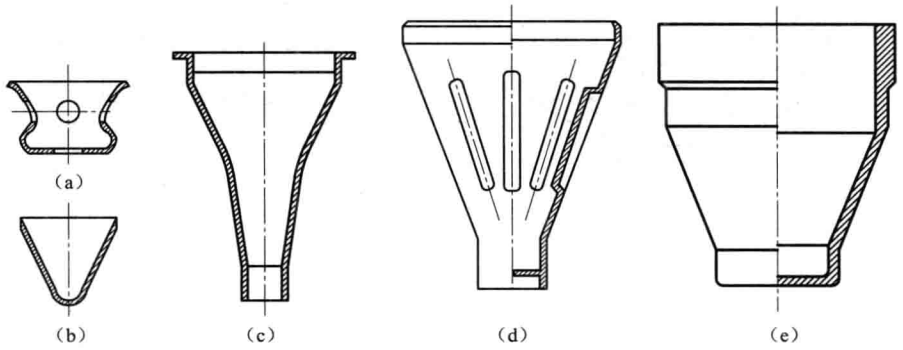


图 5.17　拉伸类零件

(a) 点火药盒；(b) 药型罩；(c) 内锥罩；(d) 风帽；(e) 弹壳

1. 圆筒件的不变薄拉伸变形过程

圆筒件的不变薄拉伸是拉伸类零件的基本成型工序。通过坐标网格的变化可以看到平板拉伸成圆筒件时的金属流动过程(见图 5.18)。拉伸成型后，圆筒件底部网格基本保持不变。在圆筒件壁部，坯料上的同心圆变成为水平圆周线，且间距 a 增大，原分度相等的辐射线成为垂直平行线，且间距完全相等；单元扇形 A_0 成为矩形 A_2，因为是不变薄拉伸，材料厚度变化很小，故可认为 $A_0 \approx A_2$。由此可知拉伸过程中，材料切向被压缩，径向被拉长，也即由于直径的缩小，周边有部分材料被挤出，转移形成筒壁并增加其高度。由此，各单元材料在径向承受拉应力 R_1，切向则承受压应力 R_2。

拉伸后筒形件的厚度与硬度的分布情况见图 5.19。底部略有变薄，基本保持原平板厚度，筒壁上段增厚，下段变薄，筒壁与底部圆角交界处偏上位置变薄最多。圆筒件各部位的硬度分布是：愈接近圆筒口部硬度愈高，说明了圆筒件拉伸时变形的不均匀分布。

上述现象的出现与拉伸过程中各部分材料所处的应力应变状态有关。图 5.20 所示为拉伸过程中各部分材料的应力应变状态。图中角标 1、2、3 分别表示径向、切向以及厚度方向。

(1) 坯料未进入凹模的凸缘部分。此区域内各单元材料由扇形转变为矩形，是拉伸过程的主要变形区。材料在拉应力 R_1 及压应力 R_2 的作用下，产生塑性变形，逐渐进入凹模。若采用压边圈，则还有 R_3 的作用；反之，则 $R_3=0$。拉伸时材料主要是由切向

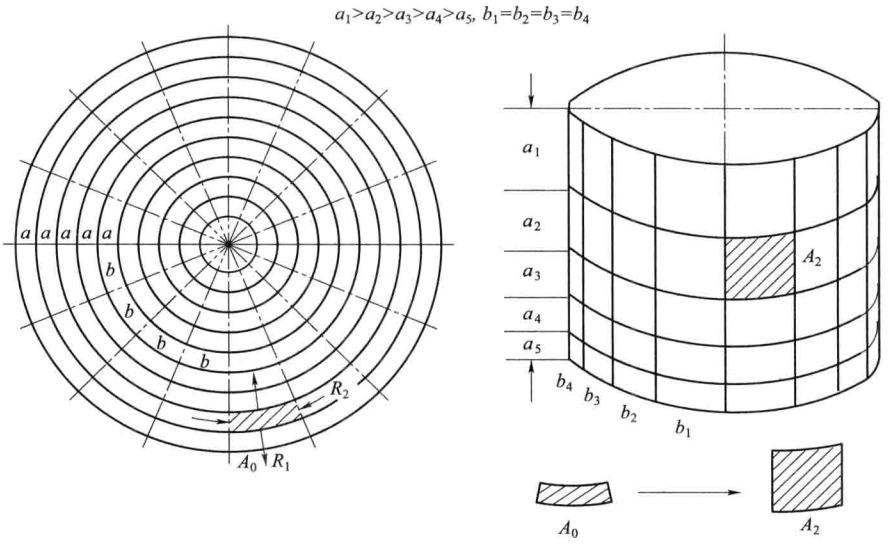


图 5.18 平板拉伸成圆筒件时的网格变化

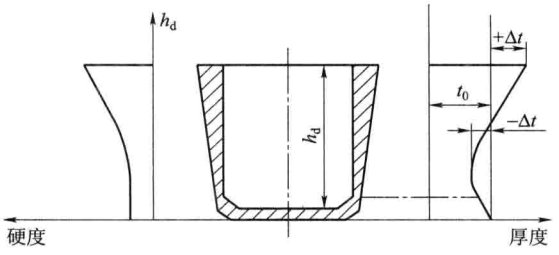


图 5.19 圆筒拉伸件沿高度方向的厚度及硬度分布

向径向转移，也有部分材料向厚度方向流动，使厚度增厚。接近凸缘外缘的材料，因切向挤出的材料最多，变形程度最大，故该部分材料的冷加工硬化最严重，其厚度方向的增值也最大。

(2) 凹模圆角部分。是凸缘到筒壁的过渡区，材料的变形比较复杂，除有与上述区域相同的特点外，还有由于承受凹模圆角的压力和弯曲作用而产生的压应力 R_3。

(3) 筒壁部分。材料已成型为筒形，将不再继续有大变形量产生。但筒壁是将凸模施加的拉伸力传递到坯料主要变形区的传力区，它承受单向拉应力 R_1 作用，产生少量的拉伸和厚度减薄的变形。

(4) 凸模圆角部分。这也是过渡区。材料承受拉应力 R_1 及 R_2 的作用，厚度方向同样由于凸模的压力和弯曲作用而产生压应力 R_3。

(5) 筒底部分。此区域材料的变形量很小。只是由于凸模所施加的拉伸力作用，使材料在两个方向承受拉应力，导致厚度略有减薄。

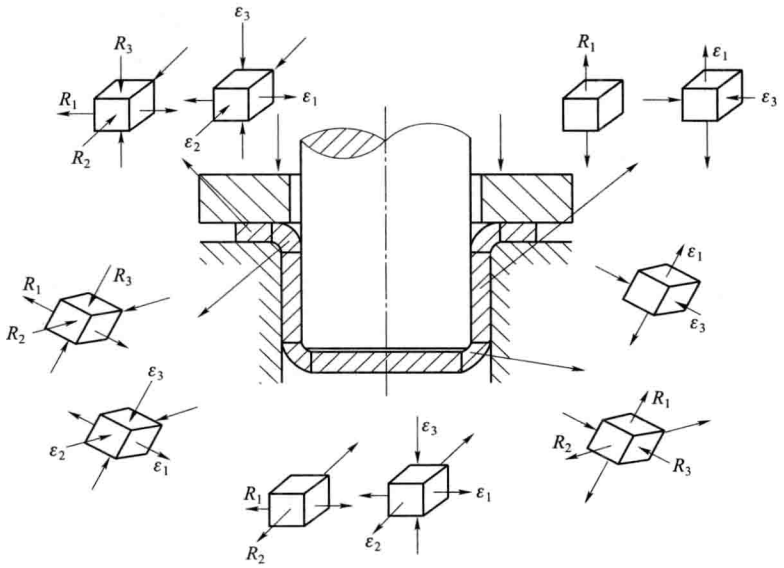


图 5.20　拉伸过程中坯料的应力应变状态

材料在拉伸过程中形成凸缘的某瞬间，其径向和切向的应力分布见图 5.21。凸缘的内边缘上，径向拉应力 R_1 具有最大值 $R_{1\max}$，而切向压应力 R_2 为最小；外缘上则相反，R_2 具有最大的绝对值 $R_{2\max}$，R_1 则为零。

不同的拉伸时刻，即由平板原始直径 D_0 拉伸成为不同的凸缘外直径 D 时，$R_{1\max}$ 与 $R_{2\max}$ 的数值也不相同。由 D_0 拉伸成直径为 d 的圆筒件的整个拉伸过程中，$R_{1\max}$ 的变化规律如图 5.22 所示。当拉伸到凸缘外直径 $D=(0.7\sim0.9)D_0$ 时，$R_{1\max}$ 达到最大值，$R_{2\max}$ 只与变形程度有关，随着拉伸的进行，变形程度增大，$R_{2\max}$ 也不断增加。

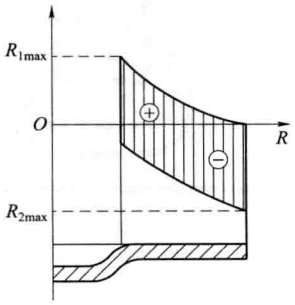


图 5.21　拉伸过程中凸缘上的应力分布

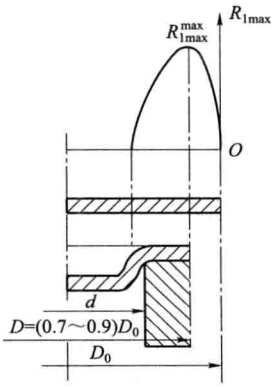


图 5.22　拉伸过程中 $R_{1\max}$ 的变化

2. 拉伸过程的起皱与破裂

当凸缘部分材料所承受的 R_2 达到相当大的数值，且凸缘相对厚度 $t_0/(D_0-d)$ 较小时，凸缘部分的材料将失稳而形成皱褶（见图 5.23）。由于凸缘外边缘处的 R_2 最大，所以拉伸过程的任一时刻，如果产生皱褶，则首先出现在外边缘。整个拉伸过程中，R_{2max} 不断增大，使材料的失稳趋势增加；另一方面，凸缘变形区（$D-d$）不断缩小，厚度 t 不断增大，使材料抵抗失稳的能力增强。实验表明，凸缘材料失稳起皱大致在 R_{1max} 的最大值出现的时刻最强烈。

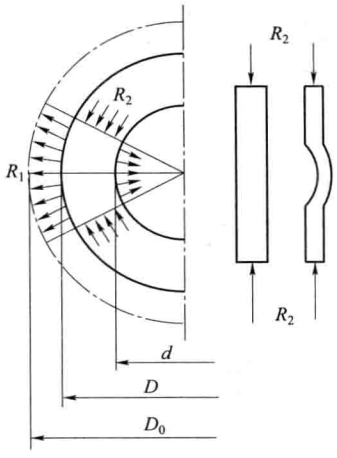


图 5.23 拉伸过程的凸缘起皱

当已起皱的部分被拉入凹模时，由于起皱部分材料厚度增厚，将使拉伸力剧增，有可能导致材料破裂。为防止凸缘起皱，可采用压边装置，但压边力需恰当选择，过小时不能防止凸缘起皱，过大则会因拉伸力增大而可能使材料破裂。

凸模施加的拉伸力 P 需通过筒壁传递到凸缘内缘，将变形区材料拉入凹模。作用于筒壁的拉应力是下列几部分应力的总和：

（1）凸缘变形区的最大拉应力 R_{1max}，其数值取决于材料性质及坯料直径 D_0 对筒件直径 d 之比。材料的屈服点愈高、冷加工硬化敏感性愈强及 D_0/d 值愈大，R_{1max} 值也愈大；

（2）由压边力引起的作用在凸缘上下表面的摩擦力；

（3）凸缘材料绕过凹模圆角部分时与凹模圆角部分产生的摩擦力以及由于凹模圆角对材料的弯曲引起作用于筒壁的拉应力。凹模圆角半径愈小，所引起的拉应力愈大。

上述作用于筒壁的拉应力超过材料所能承受的限度时，材料开始破裂。拉伸件壁部与底部交界处偏上位置的壁厚变薄最为严重，传递拉伸力的截面积最小，因而筒壁上该截面的拉应力最大；此外，由于该部位的变形程度最小，因而得到强化的程度最差，材料的强度较低，所以最可能在此位置破裂。

3. 拉伸系数及拉伸次数

由板料拉伸成圆筒件时，其拉伸系数 m_{d_1} 可表示为 $m_{d_1}=d_1/D_0$，以后各次拉伸，即由直径较大的圆筒件拉伸成直径较小的圆筒件时，其拉伸系数可分别表达为（见图 5.24）：

$$m_{d_2}=d_2/d_1;m_{d_3}=d_3/d_2;\cdots;m_{d_n}=d_n/d_{n-1}$$

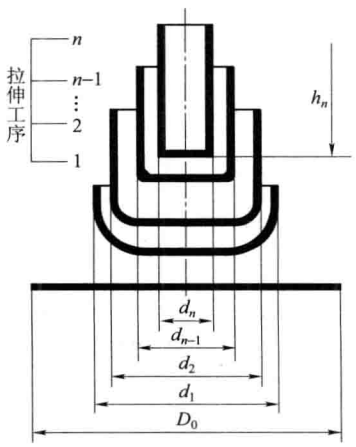


图 5.24 拉伸系数及拉伸工序顺序

式中　$m_{d_1}, m_{d_2}, m_{d_3}, \cdots, m_{d_n}$——第 1,2,3,…, n 次的拉伸系数；

D_0——平板直径；

$d_1, d_2, d_3, \cdots, d_n$——各次拉伸后的筒形件直径。

拉伸系数是拉伸成型的重要工艺参数，表明了材料的变形程度。m_d 值小则表明拉伸时需被挤出转移到筒壁的材料多，因而变形程度大。m_d 值取得过小时，材料的凸缘部分起皱、破裂、壁厚变薄的情况将趋严重；所以拉伸时的 m_d 不能低于极限拉伸系数（见表 5-4、表 5-5、表 5-6）。

表 5-4　圆筒件用压边圈拉伸时的极限拉伸系数①②③

各次拉伸的拉伸系数	坯料的相对厚度(t_0/D_0)/%					
	2.0～1.5	1.5～1.0	1.0～0.6	0.6～0.3	0.3～0.15	0.15～0.08
m_{d_1}	0.48～0.50	0.50～0.53	0.53～0.55	0.55～0.58	0.58～0.60	0.60～0.63
m_{d_2}	0.73～0.75	0.75～0.76	0.76～0.78	0.78～0.79	0.79～0.80	0.80～0.82
m_{d_3}	0.76～0.78	0.78～0.79	0.79～0.80	0.80～0.81	0.81～0.82	0.82～0.84
m_{d_4}	0.78～0.80	0.80～0.81	0.81～0.82	0.82～0.83	0.83～0.85	0.85～0.86
m_{d_5}	0.80～0.82	0.82～0.84	0.84～0.85	0.85～0.86	0.86～0.87	0.87～0.88

注：① 表列数值适用于 08、10 和 15 Mn 等普通拉伸用钢。拉伸性能较差的材料应比表列数值增大 1.5%～2.0%，对于塑性较好的材料，可较表列数值减小 1.5%～2.0%。

② 表列数值适用于不经中间退火的拉伸成型工作，若有中间退火时，可较表列数值降低2%～3%。

③ 表中较小值适用于大的凹模圆角半径[$r_d=(8\sim15)t_0$]；较大值适用于小的凹模圆角半径[$r_d=(4\sim8)t_0$]

表 5-5　圆筒件不用压边圈拉伸时的极限拉伸系数①

各次拉伸的拉伸系数	坯料的相对厚度(t_0/D_0)/%				
	1.5	2.0	2.5	3.0	>3
m_{d_1}	0.65	0.60	0.55	0.53	0.50
m_{d_2}	0.80	0.75	0.75	0.75	0.70
m_{d_3}	0.84	0.80	0.80	0.80	0.75
m_{d_4}	0.87	0.84	0.84	0.84	0.78
m_{d_5}	0.90	0.87	0.87	0.87	0.82
m_{d_6}	—	0.90	0.90	0.90	0.85

注：① 表列数值适用于 15、08 及 15 Mn 等材料。

表 5-6 其他材料的拉伸系数①②

材料名称	牌 号	首次拉伸系数 m_{d_1}	以后各次拉伸系数 m_{d_n}
黄铜	H62 H68	0.52～0.54 0.50～0.52	0.70～0.72 0.68～0.72
铝及铝合金	L6M、L4M、LF21M	0.52～0.55	0.70～0.75
硬铝	LY11M、LY12M	0.56～0.58	0.75～0.80
紫铜	T_2、T_3、T_4	0.50～0.55	0.72～0.80
酸洗钢板		0.54～0.58	0.75～0.78
合金钢	30CrMnSiA	0.62～0.70	0.80～0.84

注：① $r_d<6t_0$ 时，取较大值；$r_d\geqslant 6t_0$ 时，取较小值。

② $t_0/D_0\times 100\geqslant 0.62$ 时，取小值；$t_0/D_0\times 100<0.62$ 时，取大值。

由表列数值可见，与拉伸系数有关的主要因素是材料的性能及状态、相对厚度 t_0/D_0 和凹模的圆角半径 r_d，而凸模圆角半径 r_p 对 m_d 的取值无显著影响。采用或不采用压边圈对拉伸系数的影响表现在：相对厚度小的材料，拉伸时易于起皱，采用压边圈后，有利于采用较小 m_d 的值；相对厚度大的材料，则因其本身抗失稳能力较大，若采用压边圈时，将增加拉伸时危险截面上的拉应力，反而不利于采用较小的 m_d 值。所以当相对厚度及拉伸系数较小时采用压边圈，反之则不用压边圈。

确定各次拉伸的工序尺寸时，可先按拉伸系数的表达式逐次求得各次拉伸后的直径，然后按拉伸前后体积不变条件和忽略厚度变化求出其余尺寸。

4. 圆筒件的进一步拉伸

图 5.25 所示为圆筒件的各次拉伸情况，图中已标示出凸、凹模工作部分结构及有关尺寸的相互关系。

首次拉伸的坯料为板料，其各部分厚度与机械性能比较均匀。以后各次拉伸用的筒形毛坯，因经过拉伸成型，壁厚及机械性能的分布都不均匀。

首次拉伸时拉伸力的变化曲线见图 5.26 中曲线 a。在拉伸过程中，凸缘不断缩小，材料冷加工硬化程度不断增加，前者使拉伸力下降，后者使拉伸力上升。在拉伸的前阶段，冷加工硬化的影响起主要作用，拉伸力上升较快，以后则由于凸缘部分缩小的影响起主要作用，故拉伸力下降。在以后各次拉伸时，主要变形区（d_1-d_{n-1}）在大部分拉伸过程中保持不变，只是整个筒壁进入变形区后才开始缩小，因此拉伸力在整个拉伸过程中由于冷加工硬化作用而不断增加（图 5.26 中曲线 b），直至拉伸的最后阶段才开始下降。所以，材料的破裂在首次拉伸时是在开始阶段，以后各次拉伸则在将近结束的阶段。以后各次拉伸时，因主要变形区外有筒壁的刚性支撑，故材料的抗失稳能力增强。只是筒壁全部进入主要变形区后，因外部失去刚性支撑，才易于起皱。

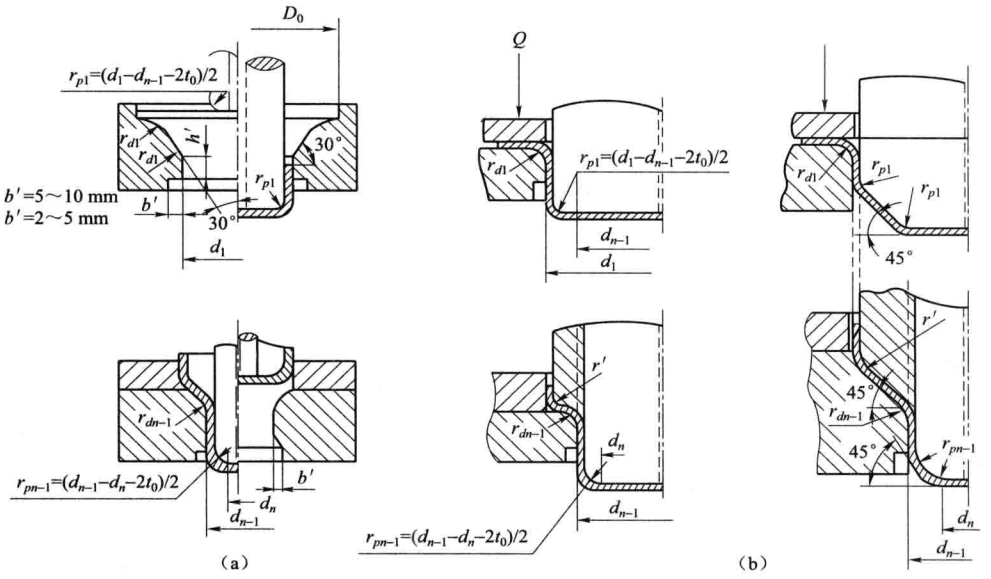


图 5.25　圆筒件的各次拉伸

(a) 不用压边圈；(b) 用压边圈

5. 拉伸力及压边力

实用上，拉伸力按下式计算：

$$P=\pi d t_0 R_m K_d \tag{5.4.1}$$

式中　d——拉伸件中径，mm；

t_0——板厚，mm；

R_m——材料强度极限，MPa；

K_d——修正系数。对于首次拉伸，拉伸系数为 0.55～0.80 时，K_d 值为 1.0～0.4；以后各次拉伸，拉伸系数为 0.79～0.95 时，K_d 值为 1.0～0.5。较小的拉伸系数取较大的 K_d 值，反之则取较小的 K_d 值。

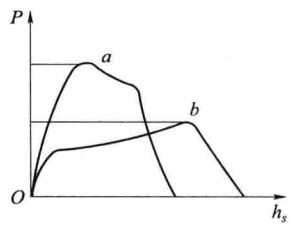


图 5.26　拉伸力曲线

a 为首次拉伸；b 为以后各次拉伸

采用压边圈是为了解决拉伸时材料的起皱。是否采用压边装置取决于材料的相对厚度及拉伸变形程度，可按表 5-7 决定。

表 5-7　压边圈的采用条件

拉伸方法	首次拉伸		以后各次拉伸	
	$(t_0/D_0)/\%$	m_{d_1}	$(t_0/D_0)/\%$	m_{d_n}
用压边圈	<1.5	<0.6	<1	<0.8
可用可不用	1.5～2.0	0.6	1～1.5	0.8
不用压边圈	>2.0	>0.6	>1.5	>0.8

压边力为坯料在压边圈下的受压面积与单位压边力的乘积。单位压边力的数值可在0.98～4.41 MPa之间选用，主要与材料种类有关，较高强度的材料可采用较高数值的压边力。

5.5 拉伸类零件的冷冲压

1. 药型罩的冷冲压

(1) 药型罩成型工艺特点。药型罩的拉伸特点在于其锥壁的成型。由板料直接拉伸成锥形件(见图5.27)，其拉伸过程与圆筒件的拉伸过程基本相同，但较之复杂。由于凸模与板料的接触面积很小，拉伸力集中作用在此很小的接触面上，因而使接触部位材料局部减薄程度加剧，甚至使材料破裂；其次，拉伸时处于悬空状态的那部分材料，在切向压应力作用下极易起皱，特别当相对厚度较小时，起皱现象更为严重；此外，因顶部与底部的直径相差很大，其回弹现象显著。

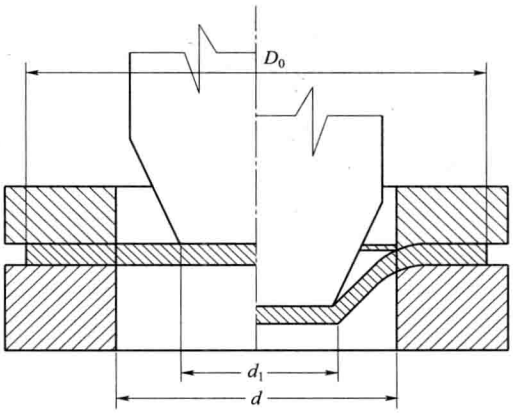


图5.27 锥形件拉伸

这类锥形件拉伸成型的难易程度取决于锥形件深度对其底部直径的比值(h_d/d)以及相对厚度的大小。

目前国内药形罩所采用紫铜板料的厚度为2～2.5 mm，一般相对厚度$(t_0/D_0)\times100$在1.5～2.5之间，在此条件下，按h_d/d的数值，可将药型罩分成两类。

① $h_d/d=0.4\sim0.8$的药型罩为中深药型罩。在上述相对厚度时，这类药型罩经落料—拉伸成盂形后，只进行一次锥形拉伸，再经整形，即可获得所需形状和尺寸。如40 mm火箭增程破甲弹药型罩h_d/d为0.75，相对厚度为2，其冷冲压成型的工艺流程为：

剪裁条料 → 落料—拉伸 → 拉伸 → 整形 → 冲顶部小孔

② $(h_d/d)>0.8$的药型罩为深锥药型罩。这类药型罩的特点是需经多次锥形拉伸，在锥形拉伸工艺流程中并安排退火、酸洗等中间工序，初步成型后，再经整形而成。82 mm无坐力炮破甲弹药型罩及85 mm汽缸尾翼破甲弹药型罩均属此类。图5.28示出了后者的成型过程。

将板料拉伸成盂形件时，盂形件口部直径应与锥件口部直径相接近。在以后的锥尖引伸工序中，每经一次锥尖引伸都使直筒部分的直径与高度缩小一部分，锥形部则不断增高，直至最后整形。

深锥药型罩的锥尖引伸次数取决于拉伸系数：

$$m_d = \frac{d_n}{d_{n-1}} \tag{5.5.1}$$

式中，d_{n-1} 与 d_n 分别为前后两次锥尖引伸时的圆筒部直径，其值可取为 0.7～0.8，由此即可确定锥尖引伸次数。

整形通常在摩擦压力机上进行，整形后可使药型罩的几何形状、尺寸及表面粗糙度符合要求，保证壁厚和机械性能均匀，有利于提高破甲性能。

(2) 药型罩成型过程中的退火。成型过程中退火的目的是使材料具有继续变形的能力和降低变形抗力。按硬化敏感性，可将冷冲压用材料分成普通硬化的金属和高度硬化的金属两类，前者如 08、10、15 钢、黄铜及退火铝，后者如退火紫铜、不锈钢等，硬化能力很弱的金属不用于拉伸。普通硬化的金属在工艺及模具结构恰当时，不经退火可拉伸的次数如下：08、10、15 钢为 3～4 次；铝 4～5 次；H68 为 2～4 次。高度硬化金属一般经1～2 次拉伸后即需退火。工序间退火一般采用低温退火(再结晶退火)和高温退火，紫铜药型罩的低温退火温度为 400 ℃～450 ℃，高温退火温度为 600 ℃～650 ℃。

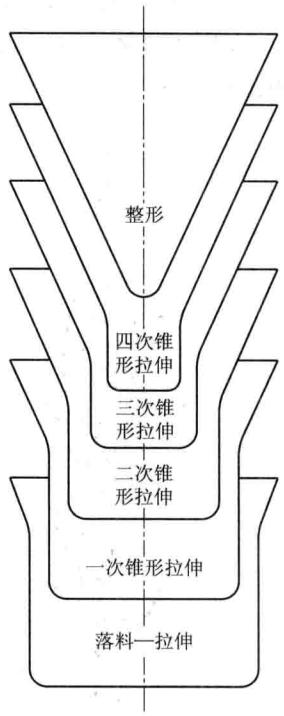


图 5.28　85mm 破甲弹药形罩成型过程

对于药型罩而言，虽然高温退火后金属的变形抗力小、塑性好，但试验表明：药型罩的工序间退火次数愈多，退火温度愈高，则破甲性能愈差。所以应尽可能减少退火次数和采用低温退火。最后一次拉伸后不能再退火，确保药型罩的破甲性能。

2. 内锥罩及风帽的冷冲压

40 mm 火箭增程破甲弹内锥罩(见图 5.17(c))亦是深锥零件之一。其成型过程与药型罩相类似(见图 5.29)，板料落料—拉伸后，再经拉伸成型为口部带有小段锥形的圆筒件，其锥形直径与成品接近，而后再经七次冲尖，最后校正成型。

内锥罩的校正工序是为了口部的最后成型以及将冲尖形成的锥壁校正成为弧形壁，并将环形波纹校平。由于内锥罩的母线为圆弧，用金属模校正比较困难。因为校正用的凸模与凹摸的配合不可能非常精确，这就会使内锥罩各部位不能均匀受压；凸模顶住内锥罩底部而进入凹模进行校正时，容易穿底；校正后的内锥罩紧卡在凹模内，顶出校正后的内锥罩有困难。采用橡皮凹模校正(见图 5.30)时，上述问题即能解决。当校正件放入橡皮凹模内时，由于橡皮凹模的孔腔稍大，因而校正冲头能轻易地顶住内锥罩底面，使之到

位，凸模继续下行，橡皮凹模受压缩，将被校正工件紧压在校正凸模上，使工件各部位均匀受压，并依凸模外形校正成型。校正后的内锥罩再经切边模冲切大端凸缘的毛边，小端底部则由机械加工切除。

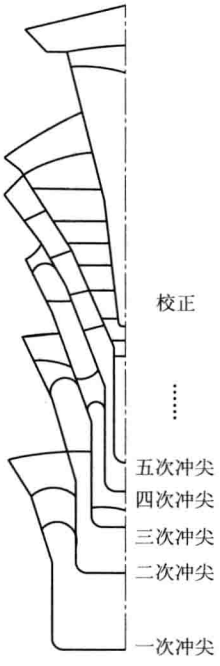


图 5.29 内锥罩成型过程

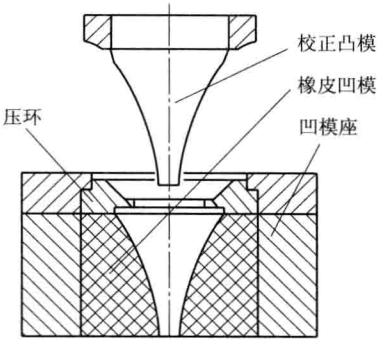


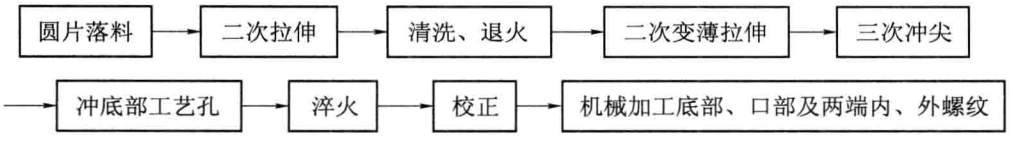
图 5.30 内锥罩校正模示意图

40 mm 火箭增程破甲弹的风帽（见图 5.17(d)）及穿甲弹风帽（见图 5.31）是由圆筒部与锥形部组合而成的深锥件。两种风帽的成型过程基本相同。在经落料—拉伸后，需经二次或三次拉伸，才能使拉伸筒形件与风帽大端的圆筒部直径相近。在此后的冲尖过程中，圆筒部的材料不再参与变形，只是使圆筒件的部分材料向锥壁过渡（见图 5.31 及图 5.32），最后经校正成型。

校正后的破甲弹风帽，需对其底部和口部进行机械加工，以获得风帽的全长，并经车削外表面，以符合风帽各部位不同壁厚的要求，在机械加工两端螺纹后，再在压力机上冲出 8 条加强筋。

3. 40 mm 火箭增程破甲弹弹壳的冷冲压

该弹壳（见图 5.17(e)）为变壁厚、由直筒与锥形组合构成的薄壁零件，是由铝合金板料经冷冲压和少量机械加工而成，其工艺过程是：



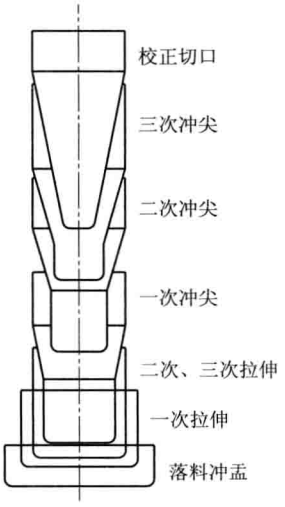


图 5.31　穿甲弹风帽及其成型过程

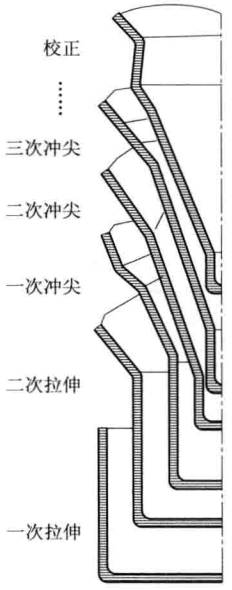


图 5.32　破甲弹风帽成型过程

弹壳冷冲压成型的特点之一是通过变薄拉伸的方法使两端筒壁厚度与中间锥壁厚度不同。弹壳的变薄拉伸及冲尖成型过程见图 5.33。变薄拉伸前，圆片已经通过二次拉伸成为内径与大端内径相近的圆筒件。

圆筒件经二次变薄拉伸，使部分筒壁厚度减薄。变薄拉伸主要用于制造壁厚与底厚不同的筒形件(见图 5.34)，它是利用凸、凹模之间的间隙小于毛坯壁厚的方法，使坯料壁厚减薄而增加其高度，坯料的内径则基本不变。变薄拉伸用的毛坯一般是圆筒件，有时也可直接用板料作为毛坯。

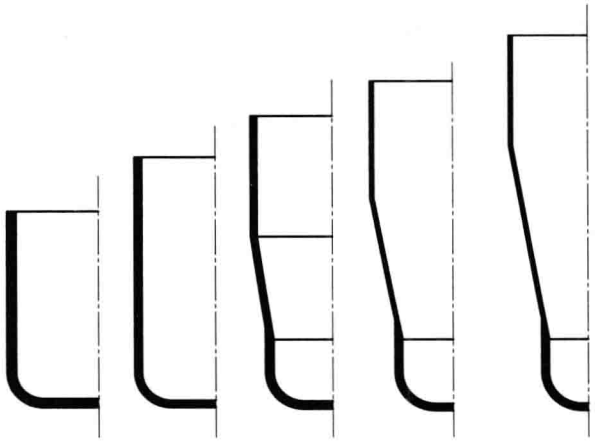


图 5.33　弹壳变薄拉伸及冲尖成型过程

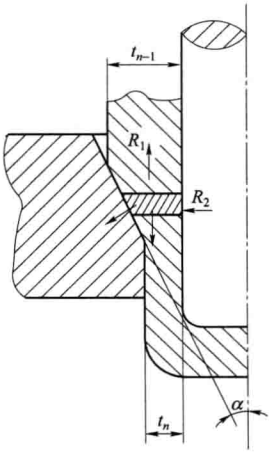


图 5.34　变薄拉伸过程

变薄拉伸的变形程度以变薄系数 φ 表示，

$$\varphi_n=\frac{t_n}{t_{n-1}} \tag{5.5.2}$$

式中 φ_n——第 n 次变薄拉伸的变薄系数；

t_{n-1}，t_n——分别为前后两道工序的壁厚，mm。

每次变薄拉伸的变形程度受到传递拉伸力的筒壁强度的限制，其极限值见表 5-8。

表 5-8 变薄系数 φ_n 的极限值①

材　料	首次变薄系数 φ_1	中间各次变薄系数 φ_m	末次变薄系数 φ_n
铜、黄铜(H68、H80)	0.45～0.55	0.58～0.65	0.65～0.73
铝	0.50～0.60	0.62～0.68	0.72～0.77
软钢	0.53～0.63	0.63～0.72	0.75～0.77
中等硬度钢②(0.25～0.35)	0.70～0.75	0.78～0.80	0.85～0.90

注：① 厚料取小值，薄料取大值；

② 中等硬度钢为试用数据。

由于变薄拉伸时，材料变形程度大，硬化严重，为了恢复材料的塑性，几乎每次变薄拉伸后，都要进行退火。弹壳变薄拉伸后的冲尖过程与上述穿甲弹风帽相同。大端筒部在冲尖时基本不再参与变形。小端厚度较大的筒部是在冲尖时由底部拉伸形成。弹壳经校正后获得所要求的外形。

由于弹壳有较高的强度要求，需经淬火及时效处理，因此校正应在淬火之后进行，以消除弹壳淬火时产生的变形。为利用铝合金在淬火后时效过程完成之前具有良好塑性的特点，应在淬火后 24 h 内校正完毕。为了使淬火时冷却液能流动通畅，在弹壳冲尖之后、淬火之前冲出底部工艺孔。

在上述所有零件的拉伸成型过程中，为了降低摩擦系数，保护模具表面和降低工件表面粗糙度，拉伸成型时要进行润滑。应用于冷冲压工作中的润滑剂种类很多，有机油、凡士林、植物油、植物油乳化液、肥皂与油的乳化液以及滑石粉等，可根据冷冲压材料与不同的成型工序选用不同的润滑剂。

第6章　弹箭零件的强力旋压

6.1　概　　述

旋压技术随着旋压设备的更新换代已运用于旋压火箭弹的燃烧室和战斗部本体以及破甲弹药型罩等多种零件的加工。目前，国内在研究和发展旋压技术过程中，可根据各自产品的需要自行设计制造一批旋压设备。

6.1.1　旋压的基本过程与机理

旋压是金属压力加工的一种方法，在旋压加工时，将坯料固紧在模具上，坯料与模具一起旋转，旋轮转动并位移使坯料变形，成为与模具外形或旋轮运动轨迹相应的工件。当改变坯件的形状而其厚度不变时，称为普通旋压，工件厚度变薄时称为强力旋压。

普通旋压不改变坯料的厚度而只改变坯料的形状，如：收口、缩颈、翻边、杯、盘、盒、罩等零件的加工。

强力旋压是一种局部变形的工艺方法，按零件形状分为锥形件、筒形件和复合形状件的旋压。按旋压时坯件是否加热又分为热旋压与冷旋压。按金属流动方向又可分为正旋压、反旋压、剪切旋压。

正旋压时，材料流动的方向与旋轮进给方向相同，一般适用于有底或有颈的坯料的旋压加工，如图6.1所示。

反旋压时，材料流动的方向与旋轮进给方向相反，一般适用于通孔件坯料的旋压加工，如图6.2所示。

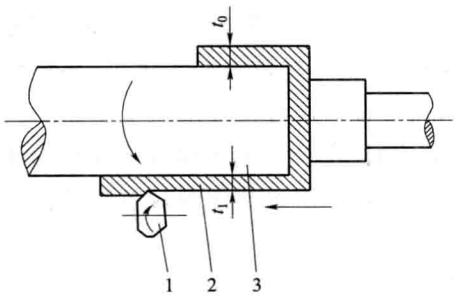


图6.1　正旋压示意图

1—旋轮；2—工件；3—芯模

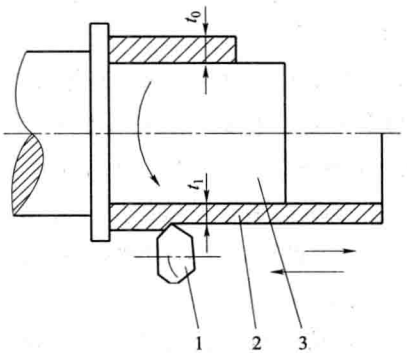


图6.2　反旋压示意图

1—旋轮；2—工件；3—芯模

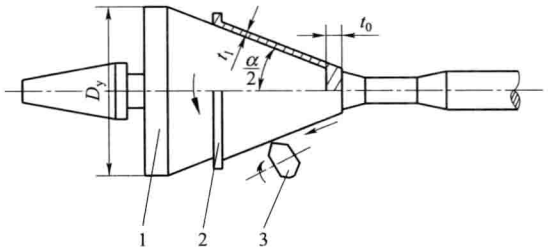


图 6.3 剪切旋压示意图

1—芯模;2—工件;3—旋轮

剪切旋压时,金属的变形过程是金属在旋轮的推动下沿轴向滑动的纯剪切变形。在此情况下,被旋零件的轴向厚度总是与坯件的厚度相等。旋压按正弦规律:$t_1 = t_0 \sin\alpha$,其法向壁厚等于板料厚度与锥形件半锥角正弦的乘积,也可表达为锥形件强力旋压前后,其轴向厚度不变,如图 6.3 所示。

6.1.2 强力旋压的特点

强力旋压是一种无切削或少切削的压力加工方式,工艺简便,应用范围广泛,概括起来有下列特点:

(1) 强力旋压时,坯料发生塑性变形,受力状态好,每一瞬间产生塑性变形的区域很小。由于是逐点受压变形,显示出较高的塑性且达到较大的变形比。因此,对塑性较低、难以变形的金属材料更显示出其优越性。

(2) 对所有塑性金属坯料壁厚在 0.1~150 mm 的回转体零件均可进行旋压。

(3) 单位压力高,变形比大,消耗功率小。由于变形区小(近似点接触),单位压力可达到 2.80 GPa,而 800 t 压力机的正常工作压力为 1.00 GPa(破坏压力为 1.60 GPa),因此,加工同样零件,旋压机的吨位仅为压力机的 1/20,旋压中切向分力仅为轴、径向分力的几十分之一,所以消耗功率小。同时在变形时材料处于三向受压的有利状态,不但适用于各种锻、焊、离心铸造等金属零件,而且钛、钼、钨等低塑性难熔金属和超高强度合金通过加热旋压也易于成型。此外旋压的道次变薄率可达 80%,虽然实用上为保证尺寸和形状精度,一般分几次旋压,但总变薄率可达 90%,中间不需任何处理。

(4) 材料利用率高,产品成本低,与机加相比可节约材料 20%~50%,最高可达 80%,成本降低 30%~70%。

(5) 强力旋压属冷成型,硬化效应使变形金属的金相组织晶粒变细拉长,提高了零件的强度和硬度。根据有关旋压资料和实际试验结果,强度可提高 60%~90%,不但可以省去热处理强化工序,还可以用普通或低合金材料代替合金材料。

(6) 旋压加工有自检作用。旋压过程中逐点成型时,将会对毛坯材料中存在的细小裂纹、夹杂等破坏金属连续性的疵病扩大和暴露,因此对旋压成型件的材料起了自检作用,保证了产品质量的可靠性。

(7) 可旋制纵剖面内外形有变化的零件。旋压过程中极易仿形,因此对母线有变化的零件容易旋压成型。

(8) 旋压零件的壁厚偏差小,表面粗糙度值较低。一般旋压零件的壁厚偏差小于

0.05 mm，最小可达 0.005 mm，其他加工方法较难实现，因此旋压零件的同心度高。

(9) 适用于薄壁高强度、高精度及长径比大的零件加工。由于其单位压力高，对高强度材料较容易加工。如对 $R_m > 1.00$ GPa、壁厚 0.1～2 mm、长径比大于 15 的零件进行旋压就显示出旋压技术的独特优点。

(10) 旋压加工工艺流程短，工艺装置简单，只需一根芯模和一套旋轮即可旋压成型。与其他压力加工工艺相比，可省去大量冲头和模具，且旋压芯模和旋轮磨损量小，还可修复使用。

(11) 旋压过程采用大流量冷却，冷却液用到 600 L/min。保证了零件尺寸的精度和稳定性。

(12) 工作要求严格，强力旋压工艺是一种新的加工技术，所用设备集中了机、电、液各方面的先进技术，因此要求旋压技术人员和操作工人有较高的技术素质，以适应生产和维修工作的要求。筒形零件加工前的毛坯内径是成品直径，一般要求也较高。

6.1.3　强力旋压的适用范围

从上述特点中可以看出，强力旋压的适用范围很广。结合所属工厂生产的产品，适合用旋压工艺加工的零件很多，如各种火箭弹的燃烧室，火箭布雷弹的雷舱、风帽、战斗部壳体，破甲弹药型罩，大、中口径榴弹药筒，车辆负重轮壳以及各种薄壁炮管等零件。

6.2　火箭弹战斗部本体与燃烧室的强力旋压

从多种火箭弹战斗部本体的外形看，其形状有圆柱部和弧形部连接而成，形状大同小异，因此宜采用复合旋压。目前生产的主要方式有：

(1) 无缝钢管旋压而成。

(2) 先旋压筒体圆柱，再旋压弧形部收口。

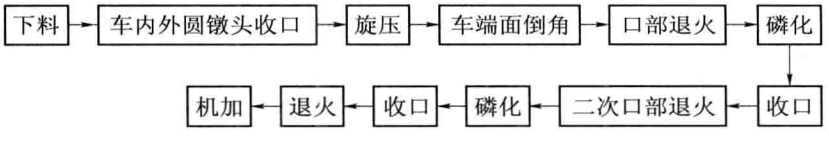
下面简述战斗部本体的旋压工艺。

1. 122 mm 火箭弹战斗部本体毛坯的旋压

工件材料：15 钢，$\phi 133 \times 12$ 热轧钢管。

产品结构特点：长径比大于 5，圆柱部任意断面壁厚差小于 0.6 mm，弧形部小于 1 mm，抗拉强度 $R_m \geqslant 350$ MPa，$Z \geqslant 45\%$，主要尺寸见图 6.4。

工艺流程：



选用机床：QX63-20 三旋轮卧式旋压机。旋轮：有修光带的台阶旋轮，$\alpha_p = 25°$，$h =$

4，$R=3$，$\delta_p=30°$，毛坯尺寸：$\phi132\times\phi112\times320$，主要工艺参数见表 6-1。

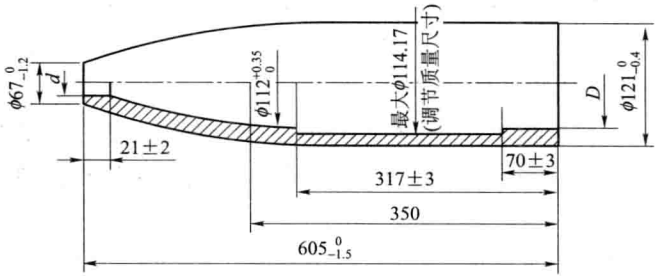


图 6.4 产品图主要尺寸

表 6-1 主要工艺参数

旋压道次	压下量/mm	变薄率/%	转速/(r·min^{-1})	进给比/(mm·r^{-1})
一旋	3.4	34	180	1～1.3
二旋	2.3	35	280	0.6～0.9

实践证明，旋压与挤压的本体毛坯相比，圆柱部内外径的尺寸精度提高一级，壁厚差减小，减小了质量偏心；强度比挤压本体有较大的提高，各向异性增大，战斗部本体破碎性好，有效破片增多，消除了 50 g 以上的纵向长条状破片；金属回收率提高 11%，材料利用率提高。

采用旋压工艺，使弧形部收口不易产生歪头，保证了产品质量。因此火箭弹战斗部本体的毛坯采用旋压复合工艺，为同类型毛坯的设计和生产提供了新的途径。

强力旋压比热冲、机加、冷挤工艺均优越。D60 钢冷旋性能良好，毛坯进行适当的热处理，便可以得到较小的屈服强度，较高的断面收缩率，可以承受较大变形。总之，冷旋成筒形件，再热旋压收口，这是目前大口径火箭弹战斗部本体最理想的成型工艺。

2. 107 mm 火箭弹战斗部本体的旋压

工件材料：30 Mn；屈服强度 $R_e=350$ MPa。

产品结构特点：要求弧形部 $R_e>480$ MPa。

工艺流程：锻造毛坯 → 机加 → 旋压 → 收口

选用机床：QX63-20 三旋轮卧式旋压机。

主要工艺参数见表 6-2。

表 6-2 主要工艺参数

旋压道次	间隙/mm	变薄率/%	转速/(r·min^{-1})	进给比/(mm·r^{-1})
一旋	5.3	35.3	115	1～1.5
二旋	3.2	36.5	140	0.5～1

旋轮：带修光带的双锥面旋轮，$\alpha_p=22.5°$，$R=3$，$\delta_p=7°$。

生产试验中，弧形部按剪切旋压设计，变薄率取 40%，圆柱部按流动旋压设计，变薄率取 60%，试制结果性能完全可以满足产品图要求。

3. 火箭弹燃烧室的强力旋压

火箭弹的燃烧室是重要部件，一般为圆柱体，分有底和无底两类。有两个或三个定心部，内腔有直管式或口部有内凸台式。

燃烧室属筒形件强力旋压，整个变形过程大致可划分为三个阶段，即旋入阶段、稳定旋压阶段和旋压终了阶段，见图 6.5。

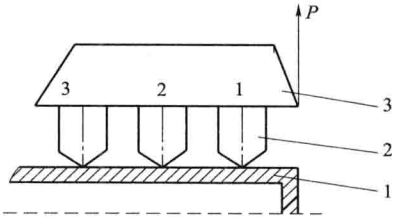


图 6.5　强力旋压变形阶段

1—工件；2—旋轮；3—旋压力变化曲线

旋入阶段：从旋轮开始接触毛坯至达到所要求的壁厚减薄率为旋入阶段。这个阶段的特点是壁厚减薄率逐渐增大，旋压力也相应增大。虽然这一阶段比较短，但当减薄率过大时，将发生断裂或失稳。

稳定阶段：当旋轮旋入达到所要求的壁厚减薄率后，旋压变形进入稳定阶段。在这一阶段中，旋压力基本保持不变。

旋压终了阶段：从距毛坯末端约五倍毛坯厚度处开始至旋压结束。在这一阶段旋压力逐渐下降（主要指正旋时），毛坯剩余部分的刚性显著降低，造成旋压件内径的明显增大，壁厚减小，出现“喇叭口”。

目前中小型火箭弹燃烧室的长度为 200～2 000 mm，直径为 40～130 mm，壁厚为 1.5～4 mm，长径比为 4～15。其结构特点如图 6.6、图 6.7、图 6.8 所示。

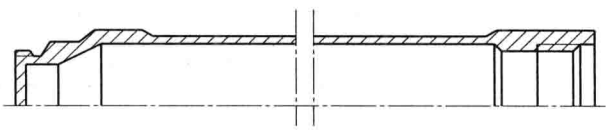


图 6.6　带底内凸台式

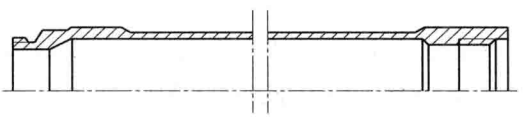


图 6.7　无底内凸台式

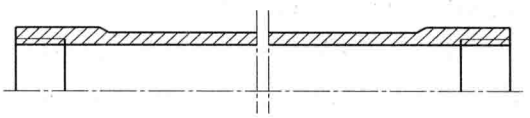


图 6.8　直管式

一端带底或有内凸台（缩颈）的零件采用正旋，无底或无内凸台的零件采用反旋。

强力旋压可将零件的内外圆柱部和定心部旋压为成品尺寸。两端口部都有内凸台的零件，一般在旋前用收口的方法将一端缩颈，另一端在旋压后用压力机或旋压机进行收口。在产品允许的情况下，尽量取消内凸台，这将会使加工更为方便。零件端部的连接螺

纹、肩、台等均由机加完成。零件壁厚越薄，长径比越大，采用强力旋压的优越性就越明显。

通常燃烧室的一端带底时，采用棒材经热冲、冷拔或热冲、热引伸、机加，再旋压成型。无底时，采用无缝钢管机加、旋压而成。工艺流程如图 6.9 所示。

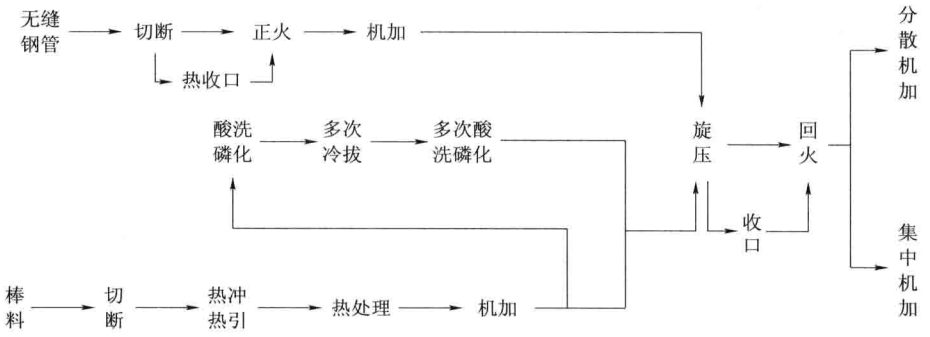
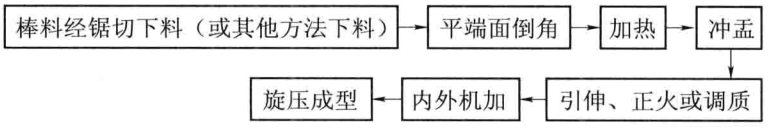


图 6.9 工艺流程

(1) 热冲冷拔旋压工艺。棒料经锯切下料(或其他方法下料)、平端面倒角、加热冲盂引伸，经多次冷拔后旋压成型。为了减小壁厚差，需在冷拔前进行车削。冷拔的道次需按总的变形程度考虑。这种工艺方案的特点是成型容易、效率较高，但需热造型、多次冷拔及多次酸洗磷化和热处理等辅助工序，流程较长。另外，要求材料塑性高，强度较低。否则不宜冷拔伸加工。

(2) 热冲热引伸旋压工艺：



其特点是可选用较高强度的材料，适用于高强度零件加工。此方案可省去多次冷拔伸、酸洗磷化及热处理等工序所用的设备和设施。经济效益、生产效率都比较好，但需机加内孔和内底且比较困难。

(3) 无缝钢管机加旋压方案。目前除生产的小口径 40 mm 燃烧室选用冷轧无缝钢管外，中、大口径的燃烧室，一般采用国家规定的热轧管材。但由于其规定的偏差较大，不能直接进行旋压，因此需增加机加工序。

管状坯料机加前的正火是为了获得均匀的机械性能，根据产品性能的要求也可进行调质处理。

对于口部有内凸台的零件，在下料后先粗加工消除壁厚差后，再进行热收口，然后正火、机加、旋压成型。

(4) 收口。对两端口部均有内凸台的零件，旋压后需进行一次冷收口。可在旋压机

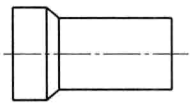
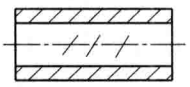
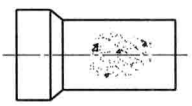
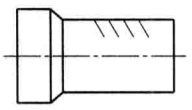
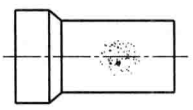
或压机上进行。

(5) 机加。燃烧室两端定心部及螺纹等连接部位由机加完成。采用流水作业，或采用数控车床一次完成。

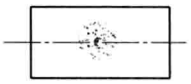
4. 旋压件表面缺陷的分析

影响筒形件旋压成型的因素很多，在生产过程中产生的各种缺陷及产生的原因见表 6-3。

表 6-3　生产过程中产生的各种缺陷及原因

种　类	形　状	产　生　原　因
端部裂纹		1. 硬化度高　2. 变薄率过大 3. 管状坯料端部、有伤痕
轴向裂纹		1. 硬化度高　2. 变薄率过大 3. 进给比过大　4. 旋轮圆角半径大 5. 材料本身有裂纹，或有严重夹杂
内表面横向裂纹		1. 厚壁管减薄率过大 2. 材料晶粒粗大，金相组织不均
表面龟裂		表面起皮后，再次进行旋压
壁部裂折		1. 最终道次之前坯料与芯模贴合太紧 2. 进给比过小
旋轮压痕		1. 旋轮顶端有伤 2. 材料黏附在旋轮上
波纹状起伏	波纹纹路与工件直径平面之间有倾角	1. 旋压工艺系统强烈振动　2. 转速过高 3. 机床刚度不足　4. 仿形阀不稳
局部重皮	形状无规律	1. 毛坯表面有伤。如：磕碰并未经修圆滑 2. 材料夹杂、材质不均匀

续表

种　类	形　状	产　生　原　因
鳞状剥离或起皮		1. 减薄率过大　2. 进给比过大 3. 冷却不足　4. 旋轮成型角过大 5. 毛坯表面粗糙或有缺陷　6. 材料硬度低 7. 旋轮轴刚度不够，颤动
内外表面起毛刺		1. 毛坯表面粗糙 2. 芯模和旋轮工作表面粗糙 3. 润滑不良 4. 坯料金属黏附在旋轮和芯模上

6.3 药型罩的强力旋压

药型罩是破甲弹和反坦克火箭弹的重要性能件，其破甲性能除与药型罩的结构形状、尺寸等有关外，还与药型罩材料、制造方法及加工质量有直接关系。

强力旋压是药型罩大量生产的一种主要加工方法，它适用于单锥、双锥、喇叭形及双曲线等各种复杂形状的药型罩的加工。相对于其他加工方法，工艺简单，生产效率高；产品质量稳定，加工精度高。旋压后的药型罩，对低速旋转的弹丸具有一定的抗旋补偿作用，给动破甲带来一定好处。近年来逐渐取代了其他加工方法。

1. 旋压原理及受力分析

药型罩旋压原理(见图 6.3)：尾顶将毛坯(或板料)压紧于芯模端面上，并使之随同芯模绕机床轴线旋转。旋轮在液压作用下，沿靠模板移动，保持与芯模一定间隙，以足够压力辊轧毛坯材料，使之沿轴向逐点一次成型。旋压时，由于旋轮与毛坯料接触面积较小，因此用较小的变形压力即可获得较大的金属变形。

在旋压条件下，药型罩受力可分解为：圆周方向的切应力 F_t，沿母线方向的拉应力 F_r，垂直于罩壁的压应力 F_z。当采用板料直接旋压时，根据小林公式可推导出三向分应力之间的关系：

$$F_t = c\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \cdot f \cdot \bar{R} \cdot \cos\alpha \tag{6.3.1}$$

$$F_r = F_t\frac{S_r}{S_t} \tag{6.3.2}$$

$$F_z = F_t\frac{S_z}{S_t} \tag{6.3.3}$$

式中　t_0——材料厚度；

f——旋压进给量；

$\bar{R}$——材料的平均应力；

α——药型罩半锥角；

c——修正系数(通常取 $c \geqslant 1.5$)；

S_r——旋轮与坯料接触面积在径向的投影面积；

S_t——旋轮与坯料接触面积在切向的投影面积；

S_z——旋轮与坯料接触面积在轴向的投影面积。

当采用预制件旋压时：

$$F_t = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \cdot f \cdot \bar{R} \cdot (\cos\alpha - \sin\alpha \cdot \cot\alpha_0) \tag{6.3.4}$$

式中　α_0——预制件半锥角。

从公式中可看出：在 α 已确定的条件下，影响三向分应力的主要参数是坯料的厚度 t_0 和旋轮的进给量 f。

旋压用的紫铜板是一种面心立方的多晶体金属。在旋压过程中，由于变形量很大，会使原来位向零乱的各晶粒，出现择优位向，即出现形变织构。不同的作用力方向会产生不同的晶粒滑移状态和形变织构，反映在破甲穿深和抗旋补偿作用上也有一定的区别。因此在进行工艺设计时，掌握变形过程中的受力状态，优化毛坯设计，选择合理的工艺流程和工艺参数，确定最佳的外力作用方向和晶粒位向，对获得良好晶粒状态和破甲效果是十分重要的。

2. 单锥药型罩毛坯设计

旋压药型罩坯料设计的优劣，直接影响到药型罩的加工质量和破甲性能。一般按正弦定律进行毛坯设计，即药型罩旋压遵循着在同一截圆上，坯料某长方形单元 $abcd$ 面积与旋压后成品罩对应长方形单元 $a'b'c'd'$ 的面积相等(见图 6.10)。在轴线方向 $ab = a'b'$，或者 $t_0 = a'b'$，即毛坯尺寸按下式计算：

$$t_1 = t_0 \sin\alpha \tag{6.3.5}$$

式中　t_1——成品罩壁厚；

t_0——毛坯壁厚；

α——成品罩半锥角。

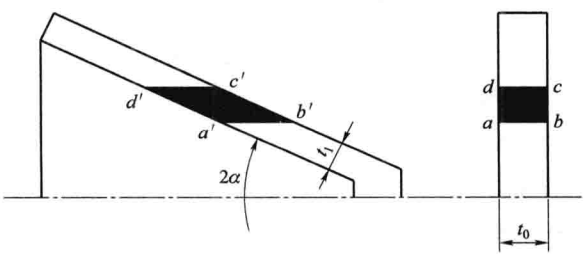


图 6.10　旋压变形示意图

(1) 等壁厚单锥药型罩毛坯设计。

等壁厚单锥药型罩(如 105 mm 坦药型罩)毛坯尺寸,按式(6.3.5)求出厚度 t_0,直径按等体积法加适量的切边余量求得。毛坯形状多为方形板料,边长取毛坯的计算直径。

(2) 变壁厚单锥药型罩毛坯设计。

变壁厚单锥药型罩毛坯尺寸和形状的确定,首先按式(6.3.5)求出毛坯的理论厚度 t'_0,即:

$$t'_0=\frac{t_{\min}}{\sin\alpha} \tag{6.3.6}$$

式中 t'_0——毛坯的理论壁厚(即最小厚度);

$t_{\min}$——成品罩最小壁厚;

α——成品罩半锥角。

确定毛坯的板料厚度 t_0 时,应考虑在制取毛坯过程中,小端部分壁厚减薄量 $\Delta t'_0$,一般为(20%~40%)t'_0。即毛坯板料厚度为:

$$t_0=t'_0+\Delta t'_0$$

然后按图解法进行计算(见图 6.11)。

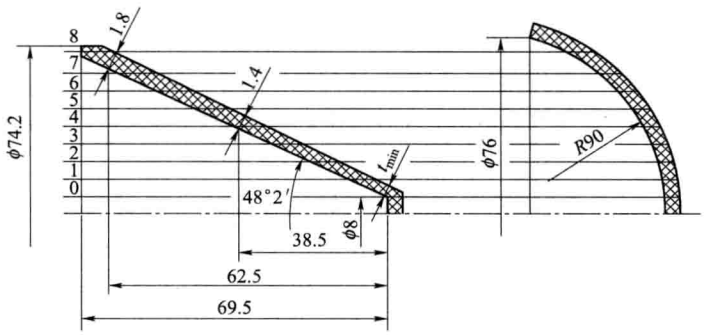


图 6.11 毛坯图解法

① 公式:

$$\frac{t_i}{\sin\alpha}=\frac{t_{0i}}{\sin\alpha_{0i}} \tag{6.3.7}$$

$$\sin\alpha_{0i}=\frac{\sin\alpha\cdot t_{0i}}{t_i} \tag{6.3.8}$$

$$\alpha_{0i}=\arcsin(t_{0i}\cdot\sin\alpha/t_i) \tag{6.3.9}$$

式中 t_i——成品罩单元壁厚;

t_{0i}——毛坯单元壁厚;

α——成品罩半锥角;

α_{0i}——毛坯的半锥角。

按公式(6.3.9)求出各单元的半锥角。

② 作图。根据求出的各单元的半锥角和各单元的分界线,划出单元小线段,连成光

滑曲线即为毛坯内壁曲线。毛坯外部曲线应保持与内壁曲线相差板料厚度(t_0)。

③ 毛坯单元壁厚的取值。按式(6.3.9)计算毛坯各单元半锥角 α_{0i} 时，毛坯单元壁厚 t_{0i} 的取值十分重要。它不仅影响毛坯的设计与制造，同时影响成品罩的旋压加工质量和破甲性能。一般有两种方法，下面以图 6.11 所示的 82 mm 破甲弹药型罩为例。

方法一：选取毛坯板料厚度 t_0。

82 mm 破甲弹药型罩材料为 T2-M 紫铜板，厚度为 $3.14^{+0}_{-0.14}$ mm，计算时 t_0 取 3 mm。

将成品罩从顶部至口部按壁厚 $t_i=1+n\times0.1$ 沿母线分成 n 个单元。代入式(6.3.9)进行计算，结果见表 6-4，按表中数值作图，其毛坯盂内壁曲线见图 6.12 中折线 O-a-a。

方法二：若制取毛坯时，毛坯壁厚是从顶锥部至口部均匀减薄的，顶锥部最小壁厚为毛坯计算的理论壁厚 t'_0，口部为毛坯板料厚度 t_0。

按式(6.3.6)，$t'_0=\dfrac{t_{\min}}{\sin\alpha}=\dfrac{0.97}{\sin24°1'}=2.38$ (mm)；$t_0=t'_0(1+0.2\sim0.4)=2.86\sim3.33$ (mm)

取 $t_0=3$ mm 时，毛坯壁厚的总减薄量 δ' 为：$\delta'=t_0-t'_0=0.62$ mm

每个单元的壁厚变化量 δ'_i 为：$N=9$；$\delta'_i=\delta'/N=0.07$ mm

每个单元的壁厚 t_{0i} 为：$t_{0i}=t'_0+n\times0.07=2.38+n\times0.07$ (n 为 1,2,3,…,9)

计算结果见表 6-4。

将 t_{0i} 值代入式(6.3.9)中，α_{0i} 的计算结果见表 6-4。

表 6-4　毛坯单元半锥角 α_{0i} 计算结果

成品罩 t_i/mm		1.1	1.2	1.22	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
毛坯 $t_0(t_{0i})$/mm	方法一	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	方法二	2.45	2.52		2.59	2.66	2.73	2.8	2.87	2.94	3.01
$\dfrac{t_{0i}\cdot\sin\alpha}{t_i}$	方法一	1.11	1.02	1.001	0.939	0.872	0.814	0.763	0.718	0.678	0.643
	方法二	0.907	0.855	0.832	0.811	0.773	0.741	0.712	0.687	0.665	0.645
α_{0i}	方法一			≈90°	69°53′	60°42′	54°29′	49°44′	45°53′	42°43′	39°59′
	方法二	65°02′	58°43′	56°18′	54°11′	50°39′	47°47′	45°25′	43°24′	41°40′	40°09′

按表 6-4 中数值作图，其毛坯盂内壁曲线见图 6.12 中折线 O-b-b。

图中折线 O-b-b 是按方法二求得毛坯半锥角 α_{0i} 后所作的曲线，$b'b'$ 是用半径 $R=85$ mm 所连的光滑曲线。折线 O-a-a 是按方法一所作的折线，$a'a'$ 是用半径 $R=90$ mm 的光滑曲线。

从图中可看出，选取毛坯板料厚度 t_0 作为毛坯单元壁厚 t_{0i}，计算各单元半锥角 α_{0i}(即

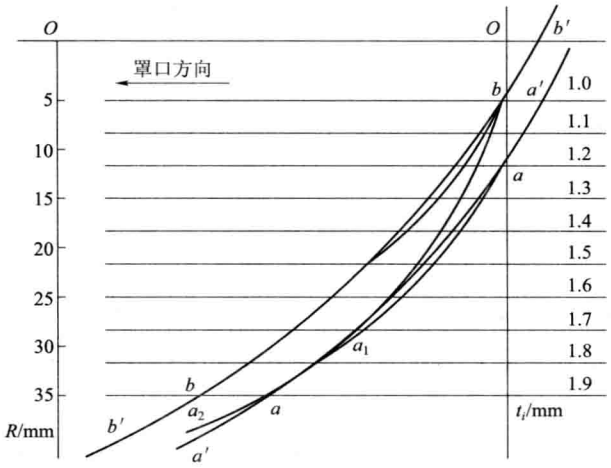


图 6.12 毛坯内壁曲线

方法一所作曲线),存在下列问题。

问题 1:成品罩壁厚 $t_i=1.22$ mm 时毛坯单元的半锥角 α_{0i} 为 90°,即为平板状(见图 6.10)。而 $t_i<1.22$ mm 时,毛坯单元的半锥角 α_{0i} 的正弦值即 $\sin\alpha_{0i}$ 大于 1,不成立,此时 α_{0i} 如何取。

问题 2:所取毛坯内壁的光滑曲线 ba_1a,越靠近顶部与计算值偏离愈大,失去了设计计算的意义,设计的毛坯偏离了正弦定律。

问题 3:毛坯多采用冲压自由成型(见图 6.13),这种方法所制取的毛坯是变壁厚的(见图 6.14),按等壁厚设计毛坯形状,偏离必然增大。

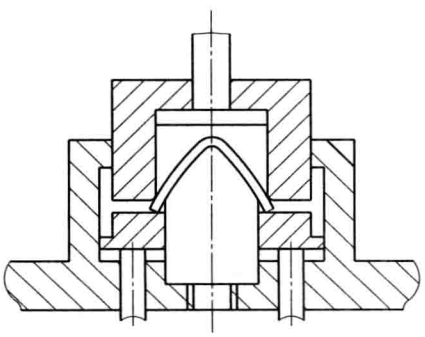


图 6.13 毛坯冲压示意图

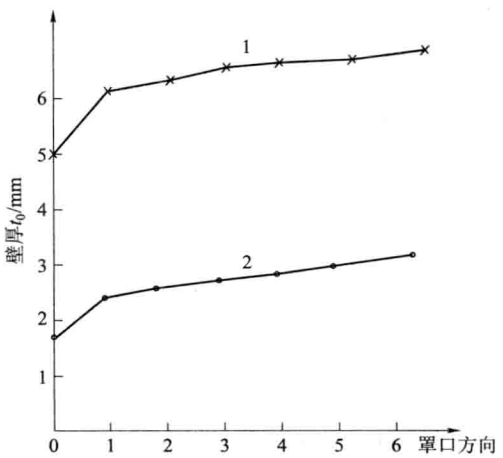


图 6.14 几种毛坯壁厚变化情况

1—105 mm 无破;2—95 mm 无破(测量点距离为 5 mm)

由于毛坯设计偏离了正弦定律，因此在进行旋压试验时，要冲制出几种不同形状和尺寸的毛坯。通过试旋，最后确定毛坯的尺寸和形状。由于紫铜板的可旋性能好，采用这种方法虽能加工出符合图样尺寸的药型罩，但因毛坯设计偏离了正弦定律，造成药型罩各部位的变形量不一致，影响药型罩晶粒组织的均匀性。从保证产品性能的观点讲是不可取的。

3. 105 mm 坦药型罩工艺流程及特点

单锥变壁厚药型罩（如 105 mm 无破）的工艺流程如下：

下料 → 落料冲盂 → 酸洗钝化 → 旋压 → 车口部 → 车小端 → 钻导线孔 → 酸洗镀锡 ……

105 mm 坦药型罩采用板料直接旋压，其工艺流程见图 6.15。

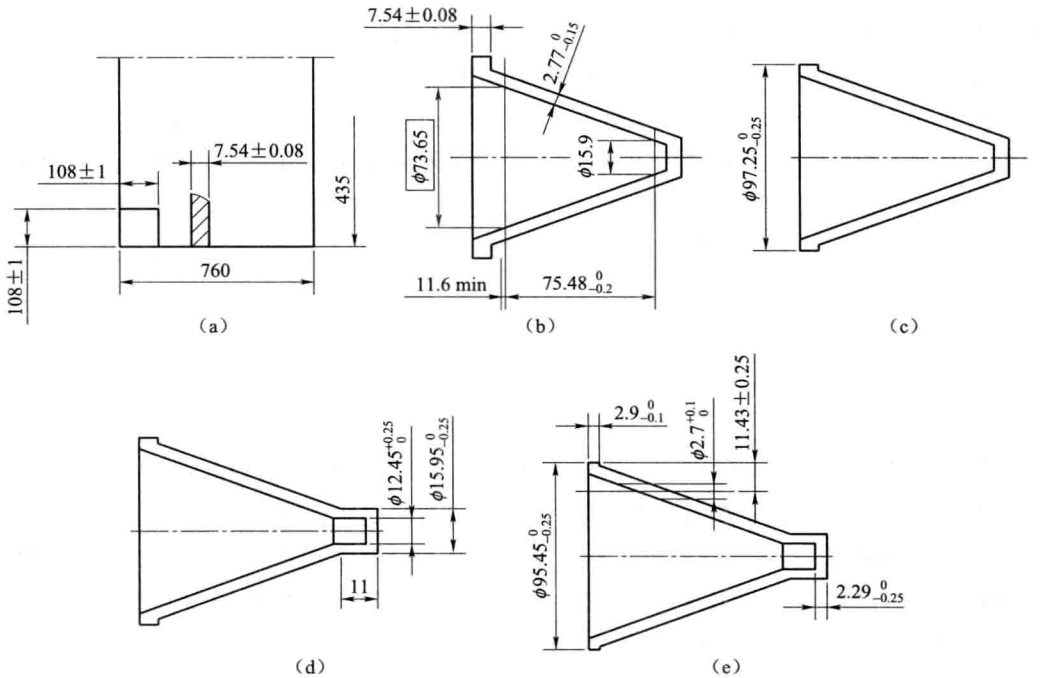


图 6.15　105mm 坦药型罩工艺流程图

(a) 下料；(b) 旋压；(c) 切边；(d) 挤小圆柱头；(e) 车凸缘和底厚、钻孔

其特点如下：

① 采用板料直接旋压。该药型罩为等壁厚药型罩，毛坯设计符合正弦定律要求。

② 旋压前的板料为方形。旋压时将其放在带方孔的同步夹具中，可防止毛坯与芯轴间相对转动，故也称同步旋压法。这样，可避免药型罩旋压后，底部变薄而造成挤小圆柱头时缺料以及底部内表面出现重皮等问题。

③ 采用双旋轮旋压。由于铜板为自然状态，硬度较高，厚度较大（7.54 mm）。采用

双旋轮能使铜板在芯轴上受力平衡，防止铜板翻倒而使旋压中断。另外采用双旋轮可以增加旋压变薄率。

④ 冷挤小圆柱头。利用药型罩底部的材料，挤压成小圆柱头。

4. 强力旋压药型罩的性能

强力旋压的药型罩变形程度较大，晶粒沿旋轮进给方向被拉长，其内部形成纤维组织，纤维保持连续，从大端到小端的组织基本一致，进一步比较可见外表层变形最大，内表层次之，中心部位则相对较小。就整体而言，药型罩的组织比较均匀。

药型罩在旋压成型过程中不经过退火处理，一次旋成。其强度和硬度都有较大幅度的提高，各部位的机械性能也比较均匀。批量生产时，旋压药型罩的尺寸及机械性能的一致性也较好。

旋压药型罩在静破甲时，静破甲深度的跳动量较小；在旋转破甲时，旋压药型罩的破甲深度也有较大的提高，这是由于旋压药型罩在旋转破甲时具有抗旋补偿能力之故。

旋压药型罩的旋转破甲性能与其旋压成型时的芯模旋转方向有关，这已被国内外的试验所证实。由于旋压药型罩在爆轰波作用下形成的射流具有自旋能力，当射流自旋时的方向与弹丸赋予射流的旋转方向相反时，二者能相互抵消而削弱旋转对射流破甲深度的不利影响；若二者的旋转方向相同，由于叠加作用，使射流破甲深度下降的幅度增大。因此为提高药型罩的破甲性能，在旋压药型罩时，应合理匹配芯模旋转方向与弹丸发射时的旋转方向。

6.4 强力旋压时的变形及应力分析

强力旋压是坯料在旋轮压力下产生塑性变形而成型。塑性变形时，材料晶粒内部在一定的滑移面上沿一定的方向产生滑移，由此引起晶粒形状的改变。同时，部分晶粒还发生转动，使滑移面与金属流动的方向趋近于一致。不同滑移方向的晶粒间相互推挤，使晶粒破碎，因此，材料在旋压过程中的变化，最明显的是旋压方向形成纤维组织的变化。40Mn2 材料的金相组织由旋压前的等轴晶粒经旋压后成为细长晶粒。

由于旋压过程中材料内部的变化不均匀，旋压件的不同部位的纤维组织状况有差异，旋压件外表面的纤维组织较内表面的细长。旋压减薄率较大的部位，纤维组织较细长，但当旋压减薄率增加至 40%以上时，这种组织上的不均匀就很轻微。冷旋时，金相组织的另一变化是晶粒细化，如 18%Ni-S50 级马氏体时效钢，在经减薄率 75%的旋压变形后，其晶粒大小可由原始晶粒度 7 级细化至 11 级以上。材料中夹杂物的形态也发生了一定变化，氧化物和铝酸盐等脆性夹杂物，在旋压中被破碎成小块分散于金属基体中，因而减轻了它们对材料强度的影响。硫化物等塑性夹杂物随材料产生塑性变形而被拉长，形成带状，使材料性能产生方向性。

旋压件金相组织的变化带来机械性能的变化。旋压后，强度指标提高，屈服强度的提

高快于强度极限的提高；塑性指标降低，断面收缩率的降低快于延伸率。根据对不同热处理状态的毛坯进行旋压试验，结果表明，在同样的减薄率条件下，毛坯的强度越低，则其旋压后强度的增量越大，塑性的下降也越多。根据对 40Mn2 材料进行旋压试验积累的资料，提出了形变强化计算公式如下：

$$R_m = R_{m0} + 57\varepsilon_t^{1.18k} \tag{6.4.1}$$

式中　R_m——旋压件的强度极限；

R_{m0}——毛坯的强度极限；

ε_t——壁厚减薄率；

k——修正系数，$k=0.8\sim1.5$。

式中 k 值按 R_{m0} 值的大小确定，R_{m0} 值越大，则 k 值越大，例如 $R_{m0}=66$ MPa 时，取 $k=0.9$；$R_{m0}=860$ MPa 时，取 $k=1.1$。

材料机械性能的变化随旋压壁厚减薄率的增大而加剧，而且产生明显的方向性，用 X 光反射法测定极图证明旋压件有明显的织构。此外，旋压对材料的物理性能和化学性能也有影响，例如，电阻增大，导电率和导磁率降低，抗腐蚀能力降低，密度减小。

旋压件除因各部位壁厚减薄率不一致而产生性能的不均匀外，性能的不均匀性还反映在壁厚方向上。在旋压件较厚而减薄率又不大时，这种性能的不均匀性较为明显。图 6.16 示出毛坯硬度 HV＝272～292、厚度为 t 的 40Mn2 热轧管，旋压后沿壁厚方向逐点测量得出在不同变形程度下的硬度分布。

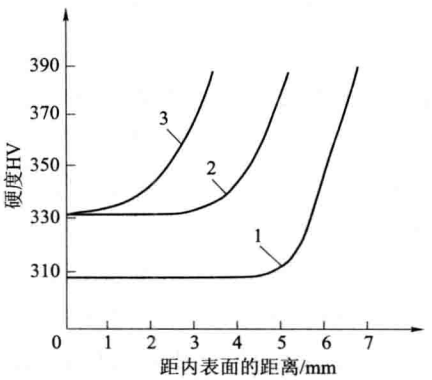


图 6.16　旋压件沿壁厚方向的硬度分布

曲线 1：一旋（$\varepsilon_{t1}=38\%$）$t_1=6.2$ mm；

曲线 2：二旋（$\varepsilon_{t2}=35.5\%$，$\varepsilon_{总}=60\%$）$t_2=4$ mm；

曲线 3：三旋（$\varepsilon_{t3}=27.5\%$，$\varepsilon_{总}=71\%$）$t_3=2.9$ mm。

强力旋压时，材料内部除存在由外力引起的材料附加应力外，还存在着内应力。所有附加应力都是材料本身的弹性力在附加应力处存在着的应力状态，在旋压变形结束后都成为残余应力。影响旋压变形均匀性的所有因素，都影响旋压件的残余应力。旋压件表面残余应力较大，根据以前的研究、测量，表面残余应力随旋压变形的减薄率的增大而增大。以 107 产品旋压燃烧室为例，其表面轴向残余应力可达 700 MPa。旋压件表面残余应力集中在表层（不超过 15 μm），在表层内下降幅度很大（轴向残余应力可下降 150 MPa 以上）。

研究结果表明，一般情况下轴向残余应力大于切向残余应力（绝对值），轴向一般呈现

拉应力状态；切向多数呈压应力状态，随着旋压道次的增加，切向有向拉应力状态转化的趋势。旋压件的残余应力是旋压变形过程中各个部位的变形不均匀而形成的，由于变形不均匀，变形体的各部位将产生不同的尺寸变化。因此，对于相邻的各层金属来讲，尺寸变化大的金属层承受使其尺寸变化较小的附加压应力，尺寸变化小的金属层则承受使其尺寸变化增大的附加拉应力。影响旋压变形的所有因素均影响旋压件的残余应力。其中主要因素有：

(1) 旋压工具对材料的摩擦；

(2) 旋压件的壁厚和变形率；

(3) 金属的金相组织和性能的均匀性；

(4) 旋压过程中各部位温度差别的影响；

(5) 工艺因素中的旋压道次、进给比和旋轮几何形状面。

在上述各项影响因素的综合作用下，旋压件的残余应力往往呈现相当复杂的状况。残余应力对旋压件使用性能的影响是令人关切的重要问题。弹药要求长期储存，残余应力由于自然时效将减小和消失，旋压件内部发生弹性状态向塑性变形的转变，可能导致旋压件变形。试验证明，应力释放引起的零件变形很小，不会影响火箭弹的性能。例如内径为 ϕ84.5 的 30CrMnSi 筒形旋压件经 300 ℃时效处理后，其尺寸变化仅 0.03 mm。107 产品燃烧室旋压后经 390 ℃去应力退火，其平均尺寸变化不到 0.01 mm。

能否产生应力腐蚀是令人关切的又一个问题，应力腐蚀与下列因素有关：

(1) 材料的应力腐蚀敏感性；

(2) 腐蚀介质的性质和材料表面的拉应力大小。

因此，当旋压件表面存在较大的残余拉应力时，在一定的外界条件下将产生应力腐蚀。

表面残余拉应力 280 MPa 的试件，在 20%浓度的硫酸溶液中浸泡不到 8 小时即产生应力腐蚀开裂的情况。但是到目前为止，还没有发现压应力所引起的应力腐蚀。只要从工艺上保证旋压件表面的残余应力是压应力或轻微的拉应力，就可排除产生应力腐蚀开裂的可能。

当旋压仅作为一种成型工艺，产品性能由旋压后热处理工序来保证的零件，如 40 mm 火箭弹燃烧室，就不必考虑旋压对性能的影响。若旋压不仅作为成型工艺，而且作为强化手段，旋压后不再进行热处理时，则要充分考虑旋压工艺对产品性能可能引起的影响。旋压后材料性能的各向异性、不均匀性应充分注意，例如燃烧室的定心部壁厚大于圆柱部，旋压时减薄率有较大的差别，因此两个部位的强度极限也有较大差别，如果忽视这一点，就可能导致定心部强度不足。对残余应力的状态要引起重视。

对于战斗部本体的旋压，由于旋压的金相织构比挤压突出，材料的各向异性更大，强度又有较大的提高，所以在战斗部爆炸时，旋压弹体易破碎。对 122 mm 火箭弹弹体旋压表明，旋压弹体消除了 50 g 以上的纵向长条状破片，有效破片比挤压弹体多 203 块，金属

回收率提高 1.1%。

采用旋压工艺后的战斗部本体、燃烧室的壁厚差大幅度减小，减少了质量偏心，提高了火箭弹的射击密集度。对于长径比大的产品、强度要求高的薄壁零件，采用旋压工艺比其他工艺有很大的优越性。

6.5　旋压工艺和工艺参数的确定

1. 强力旋压零件图的制定

强力旋压时，旋成品的形状一般非常接近于产品图规定的尺寸和形状，但因受旋压加工精度和综合经济效益的限制，往往某些部位不能完全满足产品图的要求，或者用强力旋压不能直接成型，这就需要通过机械加工的方法最后完成。因此，旋压件某些部位，如弹头、燃烧室的定心部、螺纹等部位就必须留有一定的加工余量。

基于旋压工艺的变形特点，旋压件两端成型精度较差，为保证旋压件的尺寸精度，在旋压件的两端必须留有一定长度的余量，以便切除。

对于旋压后不再加工的部位，其尺寸精度、形位精度、表面粗糙度和其他要求可直接按成品图的要求旋成。对于尚需加工的部位，要求按旋压的经济精度来确定，鉴于旋压可获得较高的壁厚精度和以内孔为基准施旋，一般标注内径尺寸和壁厚尺寸，而不再标注外径尺寸（特殊情况例外）。

强力旋压后，旋压件表面有较大的残余应力，要根据旋压件的使用性能要求，决定是否进行去应力热处理。对变壁厚的零件，若机械性能由形变强化决定，应充分注意各部位形变强化程度不一致的影响，要明确提出各取样部位的性能指标。对长径比大的零件，旋压时，会因材料的性能不一致和毛坯壁厚差等因素产生母线不直，要根据产品性能要求增加具体指标。有台阶的部位，均应改为圆滑过渡，以利旋压时材料的顺利流动。

2. 旋压方向的确定

正旋和反旋是两种不同的变形方式，虽同样可以达到成型的目的，但其变形特征有明显的差别。反旋时，材料处于三向压应力的塑性变形最佳状态，其贴模较好，还具有旋轮行程短的优点。但反旋隆起比正旋大，这就引起旋压力的增大，并降低施压变形的壁厚减薄率极限。此外，反旋时的仿形精度不如正旋容易掌握。旋压方向的选择除要考虑上述因素外，一般决定于旋压件的结构。筒形件一般采用正旋，管形件一般采用反旋。

3. 壁厚减薄及旋压次数的确定

旋压壁厚减薄率代表旋压变形程度的大小，它受材料最大减薄率和零件性能指标的制约。因此，强力旋压必须有足够的壁厚减薄率，又不能超过材料最大减薄率。每道次旋压的减薄率，从提高生产效率来说希望大一些，使旋压次数尽可能少。但减薄率过大，会带来一系列的工艺问题，例如，旋压力过大，造成模具寿命降低、材料流动失稳和旋压成型困难等。因此，一般不选取最大减薄率。根据实践经验，筒形件一次旋压的减薄率宜取

30%～50%。材料较软时，容易产生隆起，壁厚减薄率宜取小些。对于薄壁件，例如，壁厚在 0.5 mm 以下时，一次旋压的减薄率以不超过 25%为宜。但一次旋压的减薄率也不宜过小，否则工件的回弹量太大，影响旋压件的精度。各道次的壁厚减薄率 ε_{ti} 与壁厚总减薄率 ε_t 之间具有如下的关系

$$\ln(1-\varepsilon_{t1})+\ln(1-\varepsilon_{t2})+\cdots+\ln(1-\varepsilon_{tn})=\ln(1-\varepsilon_t) \tag{6.5.1}$$

式中 n——道次数。

设各道次的平均壁厚减薄率为 $\bar{\varepsilon}_{ti}$，则上式变成：

$$n\ln(1-\bar{\varepsilon}_{ti})=\ln(1-\varepsilon_t) \tag{6.5.2}$$

一般情况下，在多道次旋压时，后期道次的壁厚减薄率可以加大。

4. 毛坯的选择和尺寸计算

旋压毛坯常用的有板材，冲压成预成型件，经冷拔、热冲、锻造、焊接、铸造及机械加工等工艺制成毛坯。为了保证旋压件的质量，通常对旋压毛坯有严格的要求。主要有以下几方面的要求：

(1) 较高的尺寸精度、形位精度。对筒形件旋压时，为了保证毛坯与芯模有稳定的合理间隙，毛坯内径尺寸精度往往比成品尺寸要求高。例如燃烧室毛坯的壁厚差会引起旋压件弯曲，故一般要对毛坯壁厚差加以控制。

(2) 一定的表面粗糙度。旋压毛坯的表面不能太粗糙，否则旋压时对模具的磨损十分严重，还直接影响旋后工件的表面质量，常见的疵病是产生轻微的表面重皮，一般要求毛坯的表面具有 Ra 为 6.3 μm 的粗糙度。

(3) 良好的材质。毛坯的材质必须均匀，不得有夹层、夹杂、气孔、裂纹等破坏金属连续性的疵病，强度差异应小于 60～80 MPa。

(4) 毛坯表面不得有腐蚀、氧化皮等附着的污物。不得有磕碰、机械损伤等破坏金属连续性的伤痕。轻微的局部疵病应修锉圆滑后再进行旋压。

(5) 预制毛坯不得有过大的残余应力。

(6) 毛坯的尺寸计算。对异形件旋压主要根据正弦定律进行计算，对于筒形件的旋压，可假定旋压前后工件的内径不变，根据旋压工艺图和旋压前后体积不变的原则计算。如图 6.17 所示，按简要公式计算毛坯的长度。

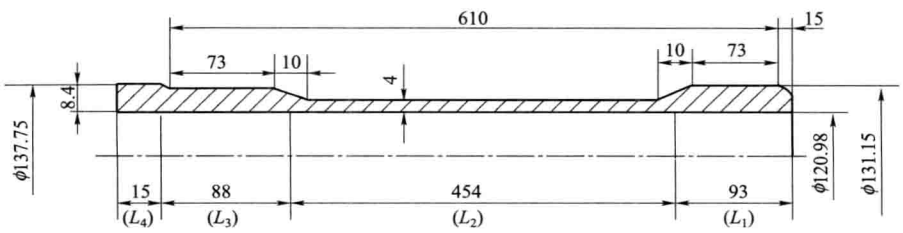


图 6.17 毛坯长度计算图

$$L_m = \sum L_{mi} = \sum_i \left(\frac{T_{ei}}{T_m} \times L_i\right) \tag{6.5.3}$$

把图中尺寸代入上式

$$L_m = \frac{5.1}{8.4}(93+88) + \frac{4}{8.4} \times 454 + 15 \approx 341.5 \approx 340(\text{mm})$$

式中　L_m——毛坯的长度，mm；

L_{mi}——毛坯各段的长度，mm；

T_{ei}——成品零件各段壁厚，mm；

T_m——毛坯壁厚，mm。

5. 进给比和芯模转速的确定

在强力旋压过程中，旋轮的进给速度 v_s 和芯模的转速 n 是与旋压设备和生产率直接有关的工艺参数，而进给比 f 和旋轮与旋压件接触点的线速度 v_0，则是与旋压变形过程有关的工艺因素。它们之间的关系为

$$f = v_s / n,\ v_0 = \pi n D$$

式中　D——旋压件变形处的直径。

旋压时进给比的大小，对旋压变形有明显的影响。一般情况下，增大进给比将降低旋压件的表面质量。并使材料的隆起增大，容易造成表面疵病。但适当增大进给比，可以改善工件的贴模情况，使扩径减轻，直线度提高。进给比应与减薄率有合理的配合。当采用大减薄率时，应选用较小的进给比。一些国外资料推荐，对钢件的进给比可在 0.1～2 mm/r 的范围内选取。在某一变形条件下，一定有一个最佳的进给比 f。若 f 取得过小，则工件内径扩大，使精度降低。f 取的过大，则毛坯会因与芯模贴得太紧，工件难以取下，多道次旋压时，会出现壁部起皱现象。f 还受毛坯厚度制约，壁厚越小，f 的许用范围越窄。f 应随着壁厚的减薄而减小。

旋压时，v_0 的大小对变形影响不明显，可在较大的范围内选取。速度的提高，主要受旋压设备的功率、刚度和冷却条件的限制。对于多数材料来说，v_0 取 50～300 mm/min。

6. 旋轮与芯模之间间隙的确定

强力旋压时，旋件的厚度决定于旋轮与芯模之间间隙的调整。如果按所要求的壁厚 t_f 调整间隙的大小，则旋压后所得实际壁厚 t'_f 将大于 t_f。图 6.18 示出了旋压件壁厚的变化情况。Δh_1 是由于旋压工艺系统（设备—芯模—旋轮）在旋压力的作用下产生弹性变形，造成旋轮相对于芯模的退让量，其大小主要决定于旋压力的大小和旋压工艺系统的刚性。Δh_2 是旋压件在减薄变形后产生的弹性恢复量，简称回弹量，其大小决定于材料的种类和壁厚减薄率的大小等因素。退让量和回弹量的大小。一般难以计算，实际采用测量壁厚增量 Δt_f 的方法。实际加工中旋轮与芯模之间的间隙应等于 t_f 减去 Δt_f。

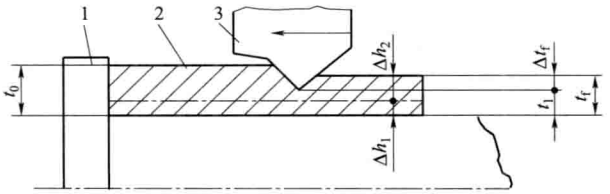


图 6.18 旋压变形的退让和回弹

1—芯模;2—工件;3—旋轮

6.6 错距旋压的应用

错距旋压是采用两个以上旋轮,在轴向互相错开,而径向又依次使毛坯厚度减薄的旋压成型方式。通常是将数个旋轮置于同一横截面上,以便使径向力互相平衡。随着旋压技术和旋压设备的发展,尤其是数控旋压机使用以后,各个旋轮轴可分别自动控制使错距旋压更加方便。采用错距旋压时,将数个旋轮在轴向和径向错开一定距离,把一道工序的压下量分配给数个旋轮分别承担,如图 6.19 所示。

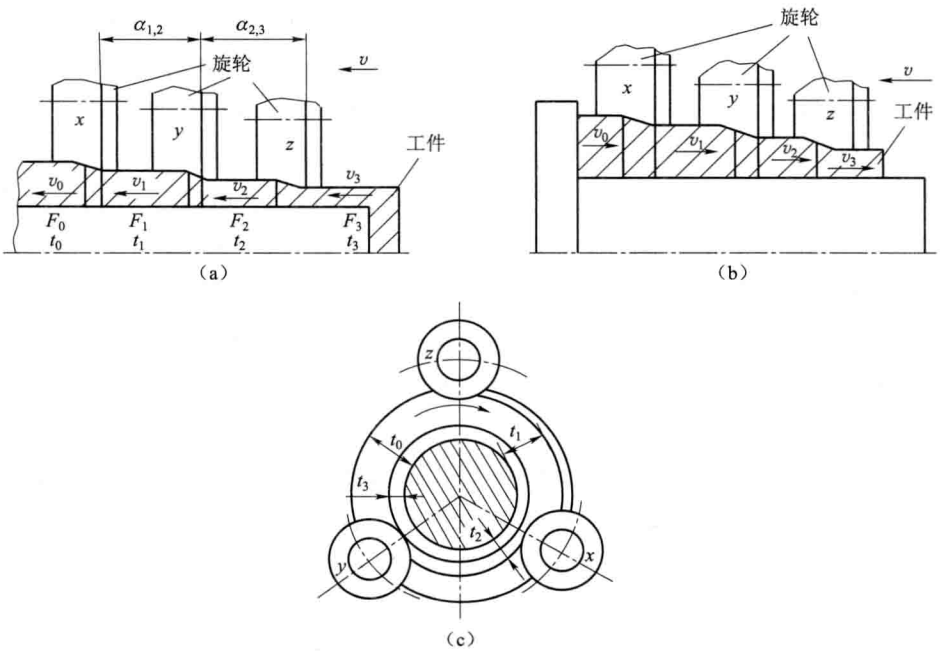


图 6.19 错距旋压简图

(a) 正旋;(b) 反旋;(c) 横截面

由图 6.19 可见,错距旋压改善了变形区的状态,解决了厚壁毛坯大压下量旋压时存

在的工艺参数和旋轮型面适应范围窄的问题。错距旋压是保证旋件质量、提高生产效率的旋压工艺。

旋轮压下量分配的中心问题是保证旋轮径向旋压力基本一样，避免芯模在旋压力作用下产生弯曲，使壁厚差增大。当几个旋轮几何形状一致时，可对压下量采取平均分配。当各旋轮几何形状不一样时，一般通过工艺试验来摸索合理的分配方案。根据保持径向力一致的原则推导出一种简易的计算旋压力可变因素 K_i 的公式：

反旋时　$K_1=t_0\ln\frac{t_0}{t_1}\sqrt{\cot\alpha_{p1}}$；$K_2=t_1\ln\frac{t_1}{t_2}\sqrt{\cot\alpha_{p2}\times\frac{t_0}{t_1}}$；$K_3=t_2\ln\frac{t_2}{t_3}\sqrt{\cot\alpha_{p3}\times\frac{t_0}{t_2}}$

正旋时　$K_1=t_1\ln\frac{t_0}{t_1}\sqrt{\frac{t_3}{t_0}\cot\alpha_{p1}}$；$K_2=t_2\ln\frac{t_1}{t_2}\sqrt{\frac{t_3}{t_1}\cot\alpha_{p2}}$；$K_3=t_3\ln\frac{t_2}{t_3}\sqrt{\frac{t_3}{t_2}\cot\alpha_p\ p3}$

式中　t_0——指本道次旋压前的壁厚；

t_1,t_2,t_3——为相对应的旋轮旋压后的壁厚；

$\alpha_{p1},\alpha_{p2},\alpha_{p3}$——分别为各旋轮的成型角。

实践证明，只要计算所得各旋轮的 K_i 值差在 20%以内，即可获得满意的结果。

正确的轴向错距值，既要保证多个旋轮的负荷均匀，又要保证材料正常合理流动。为了使变形连续，应该使材料质点由前一旋轮流到后一旋轮的相应点时，芯模的旋转数为 N，对三旋轮旋压而言：

$$N=m+1/3$$

式中，m 为整数值。

由图 6.19 的相互关系可推导出：

反旋时：　$\alpha_{1,2}=v_s\frac{F_0}{F_1}\cdot\frac{N}{n}\approx f\frac{t_0}{t_1}N$　　$\alpha_{1,2}\geqslant\frac{ft_0}{3t_1}+\Delta t_2\cot\alpha_{p2}$

$\alpha_{2,3}=v_s\frac{F_0}{F_2}\cdot\frac{N}{n}\approx f\frac{t_0}{t_2}N$　　$\alpha_{2,3}\geqslant\frac{ft_0}{3t_2}+\Delta t_3\cot\alpha_{p3}$

正旋时：　$\alpha_{1,2}=v_s\frac{F_3}{F_1}\cdot\frac{N}{n}\approx f\frac{t_3}{t_1}N$　　$\alpha_{1,2}\geqslant\frac{ft_3}{3t_1}+\Delta t_2\cot\alpha_{p2}$

$\alpha_{2,3}=v_s\frac{F_3}{F_2}\cdot\frac{N}{n}\approx f\frac{t_3}{t_2}N$　　$\alpha_{2,3}\geqslant\frac{ft_3}{3t_2}+\Delta t_3\cot\alpha_{p3}$

式中　f——为旋轮每转进给量，mm；

α_{p2},α_{p3}——分别为旋轮Ⅱ、Ⅲ的成型角；

Δt_i——为各旋轮的压下量，mm；

t_0——为旋前坯料壁厚，mm；

t_i——为相应旋轮旋压后的壁厚，计算时可近似地用旋轮对芯模的间隙代替，mm。

1. 错距旋压参数的确定

(1) 道次压下量 Δt 及各旋轮分别承担的压下量 Δt_1、Δt_2、Δt_3 的确定(见图 6.20)。

每一道次的压下量 Δt，一般是根据工艺流程、工件结构、旋前毛坯的壁厚及设备功能

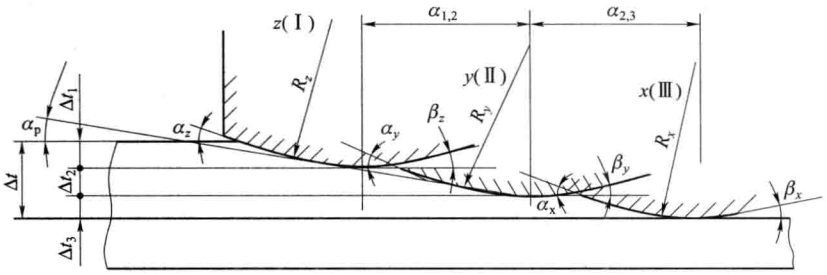


图 6.20 错距旋压压下量分析图

来确定。不采用错距旋压时，通常 $\Delta t=0.3t_0$，但采用错距旋压时可以加大。例如用 ST56-75CNC 旋压机时，壁厚可一次从 7.5 mm 旋到 1.6 mm，一次变薄率可达 79%。

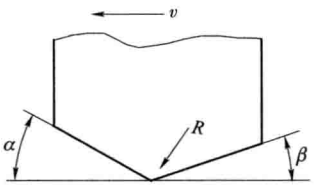


图 6.21 旋轮型面

Δt_1、Δt_2、Δt_3 即三个旋轮径向压下量的分配目前大致采用两种方案：一种为等量分配，即各取三分之一；另一种为不等量分配，即按各旋轮型面、坯料强化状况，在三个旋轮径向力大致相等的原则下，使三个径向压下量有所不同。

(2) 旋轮成型角 α、圆角半径 R 和退出角 β 的确定(见图 6.21)。

单个旋轮各参数的作用及影响与不错距时相同，不同之处是三个旋轮的相互配合。一般情况下 $\alpha_z<\alpha_y=\alpha_x$。这样使最前面旋轮的成型角 α_z 较小时，可防止坯料堆积。通常 $\alpha_z=15°\sim20°$，$\alpha_y=\alpha_x=30°$。圆角半径 R 根据坯料壁厚和性能以及工件粗糙度确定，一般取 1/2～1 倍坯料厚度，$R_z>R_y=R_x$。有时为改善工件表面粗糙度和装卸工件方便，可使 $R_x>R_y$，甚至在 R_x 后面加一段 1°～3°的压光带。退出角 β 一般取 15°～45°，可避免对工件的干扰。旋轮无压光带时，β_x 也可取较小值，以利于装卸工件，并代替压光带改善工件表面粗糙度。

(3) 旋轮的轴向错距 $\alpha_{1,2}$、$\alpha_{2,3}$ 及其形成角 α_p 的确定(见图 6.22)。

较为理想的状态是 α_p 角与毛坯始旋端的倒角相同。这样在调整好三个旋轮的位置后，可保证从开始到终止的整个旋压过程中，三个旋轮均能同时参与变形，使旋压过程稳定，芯模不偏离中心。一般 $\alpha_p(10°\sim15°)\leqslant\alpha_z<\alpha_y=\alpha_x$。

当旋轮的径向压下量 Δt_1、Δt_2、Δt_3 和其形成角 α_P 选定后，轴向错距 $\alpha_{1,2}$、$\alpha_{2,3}$ 的数值即已确定，然而实际上往往是先确定各旋轮径向压下量 Δt_1、Δt_2、Δt_3 和 $\alpha_{1,2}$、$\alpha_{2,3}$，然后形成 α_p 角。

当形成如图 6.23 所示 $\alpha_p=\alpha_z=\alpha_y=\alpha_x$ 的极限状态时，旋压中将会增大 x 轮的负担。假定三个旋轮的径向压下量均匀分布，即 $\Delta t_1=\Delta t_2=\Delta t_3=\Delta t/3$。通过分析、计算可知：在旋轮接触工件的第一个三分之一周时，如 z 轮受力为 z_p，则 y 轮受力 $y_p=2z_p$，x 轮受力

$x_p=3z_p$。从第二周以后，$y_p=3z_p$，$x_p=5z_p$。由于三个轮受力相差如此之大，当旋压机的径向力足够时，相对工件和芯模（尤其是细长工件）在旋压中势必由原来理想的中心 O 向 O'偏移。如图 6.23 所示，使旋压变形极不正常。因此错距旋压，应严防上述极限状态的发生。

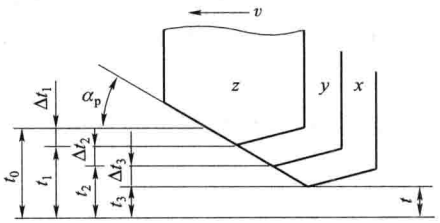


图 6.22　$\alpha_P=\alpha_z=\alpha_y=\alpha_x$ 时

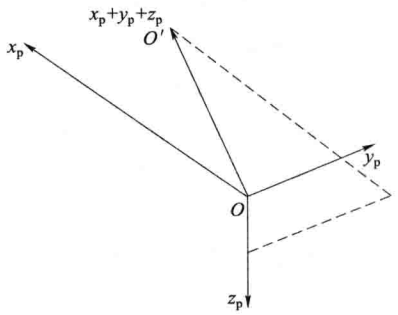


图 6.23　径向不平衡

当 $\alpha_p>\alpha_z=\alpha_y=\alpha_x$ 时，旋轮的非工作部位接触工件，而且几乎只有 x 轮工作而不能成型。

例如，在 TX1-200 旋压机上旋压某一工件时，旋轮的成型角 $\alpha=20°$，压下量 $\Delta t=2$ mm，轴向错距 $\alpha=3$ mm，则形成角 $\alpha_p=33°$。由于 $\alpha_p>\alpha$，使后面的轮旋负担太大，且与前面的旋轮严重干扰，导致机床振动。

在 ST56-75CNC 旋压机上旋某工件时，$\alpha_z=30°$，$\Delta t_2=1.67$ mm，$\alpha_{1,2}=1.8$ mm，使 $\alpha_p=43°>\alpha_z(30°)$，工件掉屑，压坑不正常。改 $\alpha_z=20°$，$\alpha_{1,2}=4.5$ mm 后，使 $\alpha_p=20°=\alpha_z$，问题基本解决。

又如，有一工件旋压时，$\alpha_y=20°$，$\Delta t_3=1.45$ mm，$\alpha_{2.3}=2$ mm，$\alpha_p=36°>\alpha_y$。旋后工件的始端壁厚比终端大 0.1 mm。改 $\alpha_{2.3}=5$ mm 后，使 $\alpha_p=16°<\alpha_y$，问题得到解决。

再一工件旋压时，$\alpha_z=15°$，$\Delta t_1=2.2$ mm，$\alpha_{1.2}=5.3$ mm，使 $\alpha_p=21°>\alpha_z$，旋后工件壁厚大。改 $\Delta t_1=1.83$ mm，$\alpha_{1.2}=7.5$ mm，$\alpha_p=13.7°<\alpha_z$，壁厚正常。以上为轴向错距太小，即形成角 α_p太大，这是在实际工作中已解决的问题。但错距太大时，同样在生产中也出现问题。

例如，旋压某工件时，$\alpha=30°$，$\Delta t_2=0.36$ mm，$\Delta t_3=0.22$ mm，$\alpha_{1,2}=\alpha_{2,3}=2.35$ mm，使 $\alpha_{zy}=8.7°$，$\alpha_{yx}=5.3°$。旋压工件通身失稳、扭曲、扩径，改 $\alpha_{1,2}=\alpha_{2,3}=1.35$ mm 后，$\alpha_{zy}=14.9°$，$\alpha_{yx}=9.3°$，质量明显好转。

此外，当旋压工件的母线有上坡结构时，旋轮形成角 α_p必须大于该结构上坡的角度，以免形成干扰。

应该强调的是 α_p角不是直接控制的参数，而是由几个旋轮轴向和径向错距相互配合使用后形成的一个空间角度，因此，常常被忽略。然而它的作用的确很大，从上述实际事

例可知，它将直接影响到旋压的成败和工件质量。

(4) 错距旋压在实际应用中的情况。

目前的旋压机，一般也只能控制各旋轮的径向位置，轴向位置的调节还是手动控制，不能编制在程序控制中。这样，对一次装夹工件、多道次旋压时，就只能保证在第一道次旋压中符合上述确定的旋轮间的相互关系。因而在开始确定轴向错距 $\alpha_{1,2}$ 和 $\alpha_{2,3}$ 时，一定要兼顾到后面旋压道次的合理运用。实际上对旋压某一工件来说，不论几道次旋成，一般轴向错距值固定不变(均指一次装卸工件时)，只改变压下量，从而形成角 α_p 也将随着改变，而且为调整各旋轮压下量以达到工件的尺寸要求，往往三个轮形成的角度 α_p 不是一个数值，而是两个值 α_{zy} 和 α_{yx}。

另外，除第一道次外，其余道次及遇有非直母线的凸凹台等结构部位的过渡段时，三个旋轮也不能保证同时参与变形和回转中心稳定。

2. 三个旋轮径向压下量不平衡时对工件的影响

前面曾提到错距旋压中如果三个旋轮配置不当时，对成型工件的影响是很大的。其中最突出的是当三个旋轮的径向压下量分配不当时，工件壁厚变化非常明显。比如，工作中曾多次发现旋压以后的工件壁厚比最后一个旋轮(x 轮)的间隙还小的不正常现象。这在不用错距旋压时，是不可能发生的。其原因是当前面的 z 轮和 y 轮的压下量过大时，将会把芯模连同工件一起挤向 x 轮，使其实际间隙小于调整值，如图 6.24 所示，曾发现因 z 轮误进 2 mm 使工件壁厚由 2.1 mm 变为 1.4 mm 的情况；又如，芯模与旋轮间隙 6.8 mm，而工件壁厚为 6.7 mm。

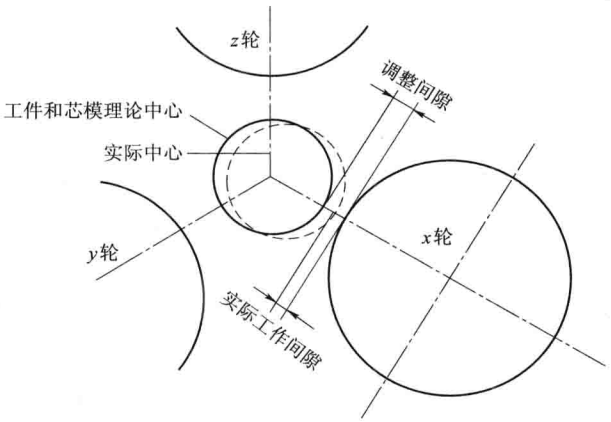


图 6.24 三个旋轮径向压下量不平衡对工件的影响

当三个旋轮的径向压下量不当时，沿工件轴向的壁厚差也较大，通常从始旋端到终旋端逐渐变化。分析其原因，主要是始旋端芯模刚性差造成的。三个旋轮压下量不当时除影响工件壁厚及轴向壁厚差外，对工件的平直度以及外径的影响也很大。

3. 错距旋压对工件质量的影响

采用错距旋压时，由于几个旋轮的互相配合使用，能够有效地控制一般强力旋压中难以避免的扩径、堆积等弊病，使工件质量明显提高。但如果使用不当时，出现的问题也较多，对工件质量的影响较大。

(1) 对工件内径、外径、壁厚、平直度等尺寸和形状精度的影响。

错距旋压中影响最大的因素是三个旋轮压下量的分配、它们之间的轴向错距量和轴向进给速度。当错距旋压的参数配合恰当时，尺寸精度明显提高。如工件内径可与芯模外径基本一致，对比情况见表 6-5。

表 6-5　错距旋压精度比较　　mm

名称	内径公差	外径公差	圆度公差	壁厚公差	壁厚差	摆　差			备注
						最大	最小	平均	
不错距	0.35	0.30	0.17	0.185	0.10	1.26	0.10	0.26	
错距	0.10	0.17	0.10	0.12	0.06	0.57	0.05	0.24	

为了提高工件的平直度(用摆差衡量)，曾在 TX1-220 旋压机上作过对比试验，该机的两个横向油缸对称分布，在采用错距旋压时，如果两个径向力不平衡，工件和芯模势必离开回转中心，偏向受力较小的旋轮一侧。试验时工件分为两组，第一组 58 件，旋压时通过检测和调整两侧旋轮的压下量使变形的任何一侧的偏摆均小于 0.25 mm。另一组 57 件，未予控制。对比情况见表 6-6。

表 6-6　摆差试验对比

名称	件数	摆　差/mm							备注
		≤0.3	0.3～0.5	0.5～0.7	>0.7	最大	最小	平均	
未控	57	32 件	16 件	6 件	3 件	0.87	0.02	0.32	
控制	58	55 件	3 件	0	0	0.34	0.04	0.15	

可见理想状态是调节旋轮的径向压下量 Δt_1、Δt_2、Δt_3，使其在旋压过程中不偏或少偏离回转中心。也使 z_p、y_p、x_p的合力尽量接近原点，避免出现图 6.24 所示的现象。

(2) 对表面质量的影响。

工件表面的质量，指表面疵病和表面粗糙度。

工件内表面的粗糙度主要取决于芯模的表面粗糙度、毛坯的材质及内表面状况、润滑条件等因素，一般与芯模表面大致相同。

工件外表面的粗糙度是由旋轮的工作型面和它的相对运动形成的。在错距旋压时，最先接触工件的旋轮成型角 α 及径向压下量 Δt_1 均较小，可防止材料堆积。第二、三个旋轮的前面紧接前一旋轮退出角 β 锥面的工作区，也可防止堆积，即变形影响、轴向尺寸大

大缩短，防止表面疵病的功能加强。对工件表面的粗糙度可通过调整最后一个旋轮（如 x 轮）的工作圆角半径 R、退出角 β 及旋轮进给量来达到要求。

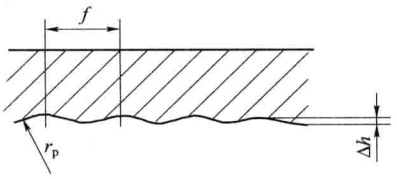


图 6.25 旋压表面波高

其理想成型的粗糙度如图 6.25 所示。图中工件外表面的最大理论波高为 Δh。

除上述因素外，工作表面质量还与旋轮工作的稳定性及润滑条件有关。当机床刚度不足或运动中有爬行和波动或者旋轮不正时，外表面会出现杂乱的波纹。严重时外表面波纹会影响到工件的内表面。

生产单位为降低旋压工件表面的粗糙度，常采取如下措施：

（1）防止机床振动和爬行，调整芯模转速。

（2）防止在旋轮前产生隆起和掉皮。

（3）加强润滑，防止旋轮工作面黏结。

（4）适当减小进给比，增大旋轮圆角半径 R，减小形成角 α_p。

（5）旋轮工作型面上转接圆滑，并进行抛光。

（6）在旋轮工作型面上设置修光带。

（7）适当改善毛坯的表面粗糙度。

总之，错距旋压与一般强力旋压相比，各参数的选配比较复杂，尤其是轴向错距量和几个旋轮的径向压下量的分配，靠手动调节很难控制在理想的回转中心。

目前，德国产的新型旋压机已具备了轴联动，解决了运行中轴向错距的调节问题，新的设备已具有自适应控制系统。在良好的设备和工艺条件下，多道次旋压的工件外表面粗糙度可达 $Ra=0.2\ \mu m$，对精度要求高的特殊工件，用旋压加工是可以得到保证的。

第 7 章　弹箭零件的铸造

铸造是将液态金属浇入铸型，凝固后获得一定形状和性能的铸件的成型方法。它是毛坯成型的主要方法之一，在机械制造中占有很重要的地位，也广泛用于军工产品的生产中。

铸造的适应性广，几乎不受零件的形状、尺寸大小和生产批量的限制。铸件的质量可由几克到几百吨，壁厚可由几毫米到几米，如箱体、机床床身、支架和机座等。

铸件具有良好的减振性能、耐磨性能和切削性能。铸件所用原材料来源广泛，价格低廉，而且不需要昂贵的设备，因而铸件的生产成本较低。铸件的形状和尺寸接近零件，加工余量小，可节省金属材料和加工工时。常用金属材料如钢、铸铁、铝合金等都可进行铸造。

但铸造工序多、铸件质量不够稳定，废品率较高，力学性能较差，且铸造生产劳动强度大，工作环境差。

铸造方法主要分为砂型铸造和特种铸造。砂型铸造应用较为广泛。

目前采用砂型铸造工艺的有迫弹弹体毛坯，273 mm 火箭弹的弹体毛坯等。

采用特种铸造工艺的有 130 mm 火箭弹钢质“挡药板”、122 mm 火箭弹“支架”“挡药板”、90 mm 航空火箭弹“十字块”及 40 mm 火箭增程破甲弹的“衬套”“蜗轮”“尾杆”等零件。

特种铸造是指与砂型铸造不同的其他铸造方法，如熔模精密铸造、压力铸造、金属型铸造、离心铸造等。特种铸造在提高铸件精度、降低铸件表面粗糙度、提高劳动生产率、改善劳动条件和降低铸件成本等方面，均有其优势。近些年来，特种铸造在我国发展特别迅速，方法也日益增多，在铸造生产中占有一定的地位。

7.1　砂型铸造

7.1.1　砂型铸造

用型砂制成的铸型称为砂型，其结构如图 7.1 所示。砂型在取出铸件后便损坏，所以砂型铸造也称一次性铸造。

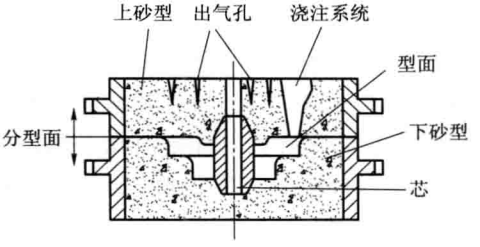


图 7.1　砂型结构

1. 型砂和芯砂

型砂和芯砂的性能对铸件质量有很大

影响。如铸件上的砂眼、气孔、裂纹等缺陷，往往是由于型砂或芯砂的性能不良所引起。每生产 1 t 合格铸件，需 4～5 t 型砂和芯砂。因此，合理选用型砂和芯砂，对提高铸件质量和降低铸件成本具有重要意义。

(1) 型砂和芯砂应具备的性能。

① 强度。型砂和芯砂抵抗外力破坏的能力，称为型砂强度。为了使砂型在搬运、合型和浇注时不致损坏，型砂应具有足够的强度。

② 透气性。紧实砂样的孔隙度称为透气性。在浇注时，砂型中会产生大量气体，液体金属中也会析出气体，这些气体若不能从砂型中排出，在铸件里就会形成气孔。

③ 耐火性。型砂或芯砂抵抗高温热作用的能力称为耐火性。若耐火性差，铸件表面将产生粘砂，使切削加工困难，甚至造成废品。

④ 退让性。铸件在收缩时，型砂和芯砂可以被压缩的能力，称为退让性。若退让性差，铸件就可能产生裂纹。

由于芯子大部分被金属液包围，故对芯砂的性能要求比型砂高。

(2) 型砂和芯砂的组成。

型砂和芯砂主要由砂和黏合剂组成。

砂的主要成分是石英(SiO_2)，并含有少量杂质。高质量的铸造用砂要求石英含量高，杂质少，砂粒均匀且呈圆形。

常用的黏合剂有普通黏土和膨润土两种。膨润土比普通黏土具有更强的黏结力。为了使普通黏土和膨润土发挥黏结作用，需加入适量的水。对于要求较高的芯砂，可采用特殊黏合剂，如桐油、合脂或树脂等。

在型砂和芯砂中，有时还加入一些附加物。例如，在型砂中加入少量煤粉，能防止粘砂缺陷，使铸件表面光滑；在型砂中加入木屑，可提高退让性。

2. 模样和芯盒

模样和芯盒是造型和制芯的模具。模样用来形成铸件外部形状；芯盒用来造芯，以形成铸件内部形状。在单件、小批生产中，广泛用木材来制造模样和芯盒；在大批量生产中，常用铸造铝合金、塑料等来制造。

铸造生产中用模样制造型腔，浇入液态金属，待其冷却后获得铸件。铸件经过切削加工即变成了零件。

在尺寸上，零件尺寸＋加工余量(孔的加工余量为负值)＝铸件尺寸，铸件尺寸＋收缩量＝模样尺寸。

在形状上，铸件和零件的差别在于有无起模斜度、铸造圆角，还有零件上尺寸较小的孔，在铸件上不铸出等。铸件和零件的差别因铸件结构、造型方法的不同而呈现多样化。铸件是个整体，模样则可能是由几个部分(包括活块等)组成。铸件上有孔的部位，模样则可能是实心的，甚至还多出芯头的部分。简单的铸件也可能与模样在形状上相似。

3. 造型方法

造型是砂型铸造的基本工序，其过程有填砂、紧砂、起模、合型四个基本工序。造型分

为手工造型和机器造型两种。在单件、小批量生产中，常采用手工造型；在大批量生产中，则采用机器造型。

(1) 手工造型。手工造型是全部用手工或手动工具完成的造型工序。它具有操作灵活、适应性强、生产准备时间短等优点，但生产率低、劳动强度大。

常用的手工造型方法有：整模造型、分模造型、活块造型、挖砂造型等。

(2) 机器造型。机器造型是用机器全部地完成或至少完成紧砂操作的工序，它是现代化铸造车间的基本造型方法。其特点是生产率高、铸件的尺寸精度和表面质量较好、对工人的技术要求不高、改善了劳动条件。在批量生产时，常采用机器造型。

4. 造型工艺

造型工艺主要指分型面、浇注位置的选择和浇注系统的设置，三者直接影响铸件的质量及生产率。

(1) 分型面、浇注位置的选择。分型面是铸型组元间的结合面，也就是上、下砂型的接触表面。它的表示方法是：水平细实线表示分型面的位置，箭头和“上”“下”两字分别表示上砂型和下砂型的位置。分型面的选择原则如下：

① 应在模样最大截面处分型。这样便于把模样从砂型中取出。应尽量把铸件全部放在一个砂箱中，以减少铸件产生错型，易于保证铸件的精度，也便于起模和合型。图 7.2 所示为圆盘铸件分型方案。

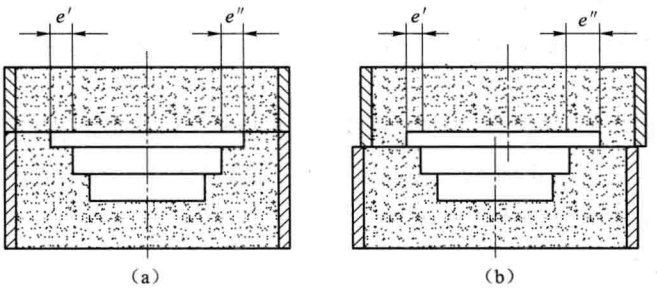


图 7.2　圆盘铸件分型方案

(a) 整模造型　正确($e'=e''$)；(b) 分模造型　不正确($e'<e''$)

② 应使铸型有最少的分型面。因为多一个分型面，铸型就多增加一些误差，使铸件的精度降低。图 7.3 所示为一绳轮铸件，在大批量生产时，为能使用机器造型，采用环状外芯，便于两箱造型。

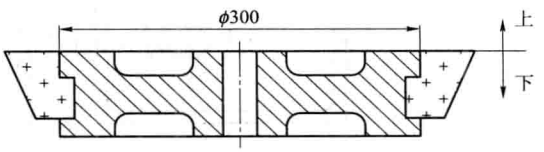


图 7.3　绳轮的分型面

③ 尽量避免活块。在成批或机器造型时，可用芯子代替活块，以提高效率(见图 7.4)。

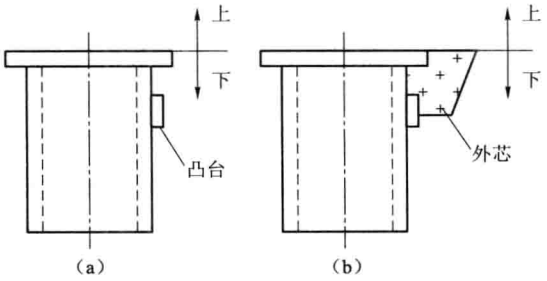


图 7.4 采用活块或外芯的两种方案

(a) 活块；(b) 砂芯

④ 铸件中重要的机械加工面应朝下或垂直于分型面。因为浇注时，液态合金中的渣子等杂物及气体等总是上浮的，铸件上部的质量较差。

(2) 浇注系统的设置。为把液态金属注入型腔和冒口而开设于铸型中的一系列通道，称为浇注系统。通常由浇口杯、直浇道、横浇道和内浇道组成(见图 7.5)。

浇口杯又称外浇口。其作用是承接浇注时的液态合金，减少对铸型的直接冲击，同时能使熔渣浮于表面。

直浇道是浇注系统中的垂直通道，一般呈圆锥形，上大下小。直浇道的作用是利用本身的高度产生一定的静压力，以改善充型能力。

横浇道一般为梯形截面的水平通道。其作用是阻挡熔渣流入型腔，并分配液态合金流入内浇道。

内浇道与型腔直接相连，截面多为扁梯形、矩形等。内浇道的作用主要是引导液态金属平稳进入型腔。为了防止液态金属冲毁芯子，对旋转体铸型及垂直安放的细长芯子，液态合金最好能沿切线方向进入型腔(见图 7.6)。

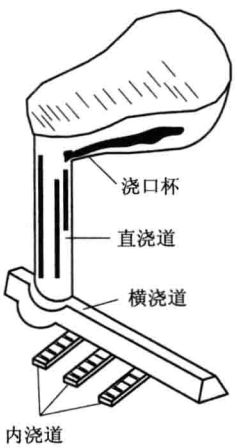


图 7.5 浇注系统

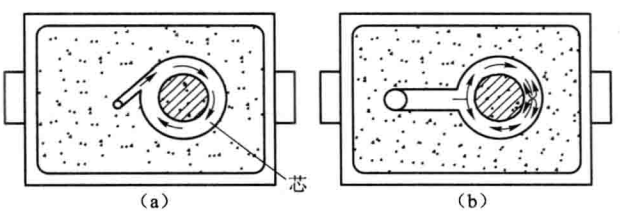


图 7.6 内浇道位置

(a) 正确；(b) 不正确

5. 造芯

造芯即制造芯子的过程。在单件、小批量生产中，多采用手工造芯；在大批量生产中，广泛采用机器造芯。通常用的造芯机有：震动造芯机和射芯机等。

6. 合型

将铸型的各个组元如上砂型、下砂型、芯子等组合成一个完整铸型的操作过程，称为合型。合型要保证铸型型腔几何形状及尺寸的准确和芯子的稳固。合型后，应将上、下砂型紧扣或放上压铁，以防浇注时上型被金属液抬起。

7. 熔炼、浇注、落砂和清理

(1) 熔炼、浇注。熔炼使炉料由固态转变为液态并达到一定的温度和化学成分。将液态金属注入铸型的操作称为浇注。

浇注液应在一定的温度范围内按规定的速度注入铸型。浇注温度过高，浇注液吸气多，液体收缩大，对型砂的热作用也强烈，容易产生气孔、缩孔、粘砂等缺陷；浇注温度过低，会产生浇不足、冷隔等缺陷。

在浇注过程中，不允许断流注入。

(2) 落砂。用手工或机械使铸件和型砂、砂箱分开的操作，称为落砂。

浇注后，过早的落砂，会使铸件产生应力、变形，甚至开裂，铸件还会形成白口而使切削加工困难。一般 10 kg 左右的铸件，需冷却 1～2 h 才能开型。铸件越大，冷却时间越长。

(3) 清理。落砂后从铸件上清除表面粘砂、型砂、多余金属(包括浇冒口、飞翅和氧化皮)等过程，称为清理。

灰铸铁件的浇冒口，可用铁锤打掉；铸钢件的浇冒口，可用气割割除；有色合金铸件的浇冒口，可用锯子去除。

粘砂可用清理滚筒、喷砂器、抛丸清理机等设备清理。

7.1.2　弹箭零件的砂型铸造

在弹箭生产中，砂型铸造主要用于制造迫弹弹体。弹体毛坯可以采用砂型、金属型或半金属型等铸型铸造，目前砂型铸造的应用仍较为广泛。

铸造迫弹弹体毛坯的材料有刚性铸铁和球墨铸铁两种。

迫弹弹体仅在口部、尾部及定心部留有加工余量，其余部位均不需机械加工。弹体尾端因铸造工艺的要求而带有冒口。

砂型铸造稀土球铁迫弹弹体的简要工艺流程如图 7.7 所示。

1. 稀土球铁迫弹弹体用铸型

为保证铸造弹体的质量(内部组织、机械性能、尺寸精度及表面粗糙度等)，应正确地设计铸型并选择合理的浇注方法。

图 7.8 所示铸型由两个砂箱组成，分型面位于弹体定心部。分型面处弹体的外形会

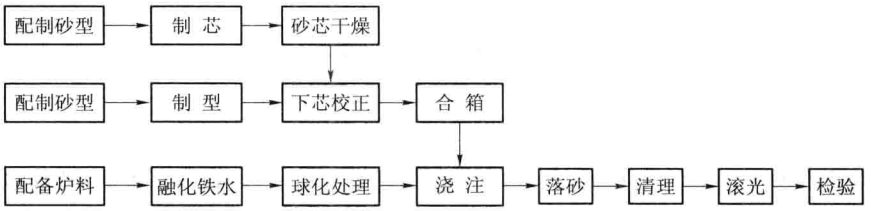


图 7.7 铸造迫弹弹体的简要工艺流程

受到错箱的影响，但该部分恰好需要机械加工，所以只要错箱量不超过一定的数值，错箱痕迹就可在机械加工时去除。

图 7.8 所示铸型是底注法铸型，即金属液从位于型腔最底部的内浇口注入。自下而上地充满整个型腔。底注法是曾被广泛用于铸造刚性铸铁迫弹弹体的有效方法，也应用于稀土球铁迫弹弹体的生产。此法浇注时铁水进入型腔速度均匀、平稳、不产生紊流，因而不易产生砂眼和夹渣等疵病，所得弹体比较坚实，表面质量较好。但这种方法的制型工艺比较复杂。同时铁水自型芯的一边流入型腔，冲击芯头，易使型芯产生侧向偏斜，导致弹体壁厚差增大；此外，下部铁水的温度较上部高，为保证弹体冷凝时有充分的补缩，冒口需相应增大，所以消耗在浇冒口上的铁水量较多。

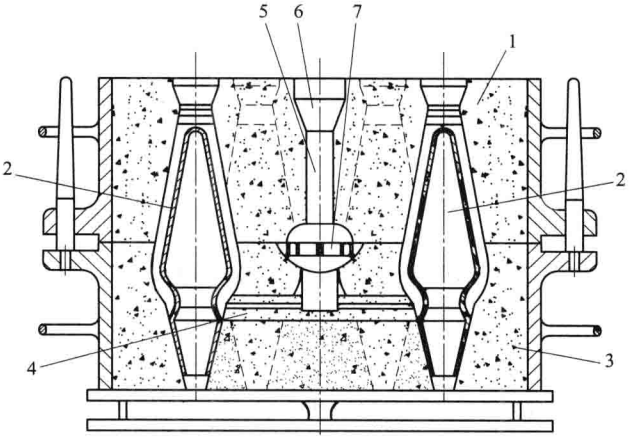


图 7.8 铸造迫弹弹体用铸型

1—上砂箱；2—树脂砂型芯；3—下砂箱；4—横浇道；5—直浇道；6—浇口杯；7—过滤网

铸造稀土球铁迫弹弹体除用底注法外，也有用沿分型面浇注的方法，如图 7.9 所示。这类铸型造型工艺比较简单，并节省铁水的消耗，浇注时铁水沿分型面进入型腔，不直接冲击型芯，故能显著减小弹体壁厚差。但由于在分型面浇注，浇注时会产生“抬箱”现象（上砂箱被铁水向上托起），因此，必须采取压箱或卡箱措施；其次，铁水进入型腔时，对下型腔有冲刷现象，易形成砂眼等疵病；此外，当铁水成分及温度波动较大时，弹口部位易出现白口。

铸造 100 mm 及 120 mm 稀土球铁迫弹弹体的铸型见图 7.10。该铸型用上、中、下三个砂箱造型，用底注法浇注。为提高冒口的补缩能力，以减少弹体厚壁部分的缩松，铸型采用了加有泥芯的暗冒口。

同一砂箱内铸造多个弹体的多型铸造法生产效率高。迫弹口径愈小，则型数可愈多。60 mm 稀土球铁迫弹弹体每箱浇 8 个，82 mm 稀土球铁迫弹弹体每箱浇 6 个。大口径迫弹也有采用单型铸造的，单型铸造的铸件精度较高，造型工艺也较简单。

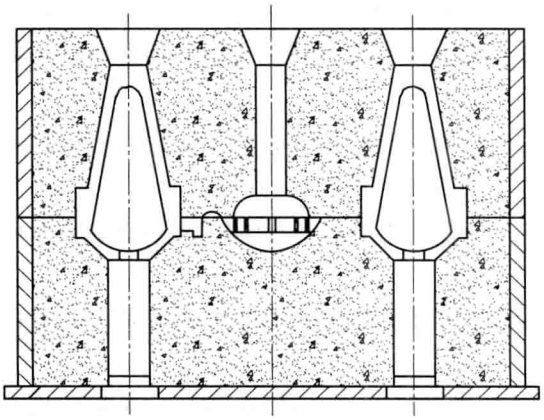


图 7.9　分型面浇注法铸型示意图

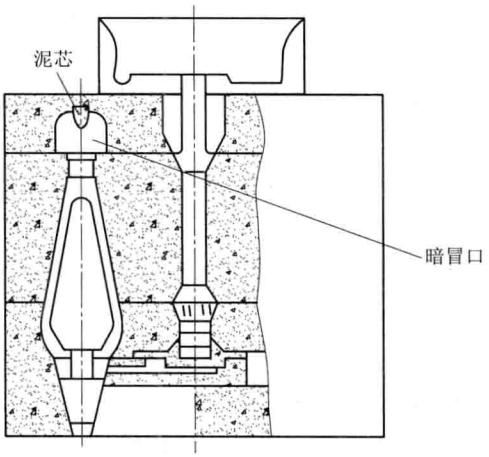


图 7.10　100 mm 及 120 mm 稀土球铁迫弹弹体铸型简图

由于球铁的浇注温度一般较灰铸铁低，为防止冷隔、浇不足等缺陷，要采用较快的浇注速度；而为减少皮下气孔等缺陷，又要求铁水流动平稳，因而球铁浇注系统的截面积，一般比普通灰铸铁的大，各部分（直浇道、横浇道及内浇道）截面积的比例应保证浇注时对铁水的流动有一定的缓冲作用。对于这样的浇注系统需加强挡渣措施，如设置过滤网等。浇注系统要流畅，以免引起铁水波动和紊流。

2. 稀土球铁迫弹弹体的熔炼

稀土球铁迫弹弹体的质量与原铁水的熔炼、球化处理和孕育处理以及浇注等因素关系很大，首先原铁水要符合要求，要有较高的温度、尽可能低的含硫量及气体含量等。

（1）稀土球铁迫弹弹体的化学成分。稀土球铁中几个常存元素（碳、硅、锰、硫、磷等）对其性能的影响简要介绍如下：

① 碳硅量。碳硅是 5 个常存元素中对球铁性能影响最大的元素，它们都是强烈地促进石墨化的元素。由于硅对促进石墨化的作用相当于碳的 1/3，故通常把 C%＋1/3Si% 称为碳当量。增加碳当量可减少球铁的白口倾向，有利于石墨的析出，且可增加铁水的流动性，减少铸件的缩松和缩孔缺陷。但碳当量过高会使高温液态时析出的初生石墨上浮到铸件表面并大量聚集，形成石墨漂浮缺陷，使球墨铸铁机械性能下降。实践表明，碳当量超过 4.55 时，对厚大铸件就会产生石墨漂浮缺陷。

硅量过高会增加球铁的脆性，因此，在碳、硅二元素中一般对碳量不作严格控制，而主要是控制含硅量。

② 锰。锰是阻碍石墨化的元素，能减弱硫的有害影响并起一定的脱氧作用。锰能提高球铁的强度，但含量过高时会使球铁的塑性和韧性下降，且含锰量高时铸件的缩松倾向也较大，故对含锰量应适当控制。对铁素体球铁而言，含锰量以低为宜，一般含量为0.3%～0.6%。

③ 磷。磷对球化虽无不利影响，但含量高时能构成硬而脆的磷共晶，分布在晶界上，显著地降低球铁的塑性和韧性。磷虽可提高铁水的流动性，但含量过高会明显增加铸件形成缩松、缩孔的倾向。铁素体球铁的含磷量一般应在0.15%以下，珠光体球铁的含磷量应小于0.2%。

④ 硫。硫在球铁中是有害元素。硫因与作为球化剂的稀土元素及镁均有极强的亲合力而消耗球化剂，易导致球化不良。硫使铸铁的铸造性能变坏，降低铁水流动性，增加收缩，并使球铁的硫化物夹杂或夹渣缺陷增加。所以不论对何种基体的球铁，其原铁水的含硫量都是愈低愈好。

(2) 炉料及其配比。炉料质量会影响原铁水的球化效果和弹体的机械性能。球铁的炉料较灰铸铁的要求严格。

① 新生铁。硫影响球化质量，磷会降低球铁的塑性和韧性，但在酸性冲天炉中熔化时，硫、磷没有去除的可能，故铁水的硫、磷量需通过控制炉料的成分来保证，所以新生铁的硫、磷量要低。同时，含硅量也应低，以便在孕育处理时允许使用较多的硅铁，从而提高孕育效果。

② 回炉铁。稀土球铁的废弹体、浇冒口等称为回炉铁。回炉铁上的杂质、泥砂等必须清除干净。

③ 废钢。少量废钢（中、低碳钢）的加入主要是为降低铁水中的含碳量。废钢中不能混入合金钢，也不能有严重锈蚀。

④ 焦炭。稀土球铁要求高温、低硫、低磷的优质铁水，冲天炉熔炼时焦炭的质量与铁水能否达到上述要求有很大关系。一般要求焦炭的固定炭高，灰分低、块度大，以提高铁水温度。原铁水中增加的硫量主要来自焦炭，因此应采用低硫焦炭。

⑤ 熔剂。配料中有一定量的熔剂是为了去硫造渣和提高炉渣的流动性。铸造稀土球铁迫弹弹体用的熔剂为含 $CaO \geqslant 50\%$ 的石灰石和含 $CaF_2 \geqslant 80\%$ 的萤石。

为得到化学成分符合一定要求的原铁水，必须计算各种炉料的配比。按照需要，炉料中还有硅铁、锰铁，以补充硅、锰在熔化过程中的烧损。

(3) 熔化。目前应用得最广泛的熔化设备是酸性冲天炉。特别是“热风酸性曲线炉膛多排小风口”冲天炉，其焦炭消耗少，并能获得高温、低硫的原铁水。也可采用碱性冲天炉来熔炼稀土球铁用的原铁水，这种冲天炉可使原铁水的含硫量控制在0.02%～0.04%。但因其炉衬为镁砖及碱性耐火材料，成本高，且焦炭消耗量大，故在弹厂应用得

较少。

金属炉料在熔铁炉内熔化后应进行过热，以使铁水有足够高的温度。温度不足将对铸件质量产生不良影响。一般达 1 380 ℃～1 400 ℃后，即可出铁水进行球化和孕育处理。

3. 球化处理和孕育处理

球化处理的目的是使铸铁中的石墨呈球形，以提高铸铁的机械性能。在实际生产中常用的球化剂是镁及其合金、稀土镁合金、稀土硅铁合金等。

镁作为球化剂的最大优点是球化能力强，经适量镁处理后的铁水，冷凝后能获得良好的石墨球。镁加入铁水后首先与硫、氧化合，同时，由于其汽化时引起铁水的强烈翻腾，使反应生成物和其他非金属夹杂物以及气体得以排除。正是镁的球化与净化，作用使加镁处理的铸铁机械性能有较大的提高。

镁又是阻碍石墨化的元素，镁残留量高虽对石墨球化有利，但将增加球铁的白口倾向，并且过高的镁含量反而使球铁铸件容易形成夹渣及皮下气孔，以及缩松的趋向增大，对铁水的流动性也不利。

稀土元素的球化能力不如镁，但稀土能抑制微量反球化元素（钛、砷、铋、铅、锑、锡等）对球化的干扰作用，并且对原铁水含硫量的敏感性小，不需要专门的脱硫措施。这些对使用杂质元素较多的地区性生铁熔制球铁来说有重要的意义。

稀土元素与氧、氢、硫等有很强的亲和力，形成难熔的氧化物、硫化物等，起净化和精炼铁水的作用，并且能强化金属基体，使铸铁有较高的机械性能。

稀土也是阻碍石墨化、使球铁具有白口倾向的元素，其阻碍石墨化的作用较镁更强烈，但稀土元素能提高铁水的流动性，减少铁水的夹渣缺陷，适量的稀土合金能减弱球铁的缩松倾向。

显然，若以稀土镁合金作为球化剂，则既可利用镁的球化能力强的特点，又可利用稀土合金能减少夹渣、缩松等铸造缺陷的特点。

82 mm、100 mm 和 120 mm 球铁迫弹弹体目前采用稀土硅铁合金为球化剂，因其球化程度不如用稀土镁硅铁合金处理得好，所以和上述 60 mm 迫弹弹体相比，其抗拉强度虽然基本相同，但延伸率较差，一般小于 9%，而 60 mm 迫弹弹体则一般在 10%～15%，高的能达 20%。在迫弹生产中将单纯用稀土硅铁合金处理的铁水称为半球化，而将以稀土镁硅铁合金处理的铁水称为全球化。

球化处理时加入稀土、镁等球化剂，使析出的石墨成球状，这一作用只有碳以石墨形态析出时才有可能。但是，稀土元素和镁本身是强烈阻碍石墨化的元素，尤其是对薄壁铸件，其白口倾向更大。因此，在铁水中必须加入强烈促进石墨化的物质，这种促进石墨化的过程就是球铁的孕育处理。

孕育剂的种类很多，如硅铁、硅钙等。我国铸造稀土迫弹弹体的孕育剂目前都采用含硅量为 75%的硅铁合金。

原铁水本身含有一定量的硅，球化剂中也含有硅，孕育处理时又将一定量的硅带入铁水。所不同的是，在球化处理后加入的硅，其石墨化作用比原铁水中的硅及球化处理时带入的硅要强烈得多，并且增加孕育处理时加入的硅量，可使消除渗碳体增加铁素体的效果更显著。所以，为避免碳当量过高，一般都选用含硅量尽可能低的原生铁，以降低原铁水的含硅量，增大孕育量。

4. 浇注

球化及孕育处理后的铁水应尽快进行浇注，否则随着时间间隔的延长，渗碳体将增多，石墨数量将减少，球径将增大，即产生孕育衰退现象。

有的生产单位为加强孕育作用，往往在临浇注前再加入少量孕育剂，进行二次孕育处理，对改善石墨形状或消除渗碳体都有好处。但量不宜多，且搅拌必须充分。

浇注温度对稀土球铁的流动性影响较大，提高浇注温度是改善球铁流动性的重要措施，也是防止铸件产生夹渣、皮下气孔等铸造缺陷的方法之一。浇注温度低，铸件还会产生皱皮和冷隔，也会因铁水流动性降低使补缩困难而形成缩松。由于稀土球铁在球化处理和孕育处理过程中有热损失，温度下降很多(100 ℃左右)，其实际浇注温度往往比灰铸铁的浇注温度低，因而要保证熔化时有较高的铁水温度。各种口径迫弹弹体的浇注温度见表 7-1。

表 7-1 各种口径迫弹弹体浇注温度

弹体口径/mm	60	82	100	120
浇注温度/℃	≤1 270	≤1 300	≤1 280	1 280～1 300

浇注速度也很重要，它随弹径不同而不同。浇注速度太快会冲坏砂型表面，太慢则会使温度梯度增大、产生断流等，导致铸件出现缺陷。

浇注后，弹体毛坯应在铸型中停留一段时间，冷却到一定温度，而后落砂，取出弹体毛坯。由于弹体要求有一定的延伸率，其组织应以铁素体为主，故落砂温度一般为 500 ℃以下。落砂后不能对弹体毛坯强制冷却，以防弹体毛坯硬度不均。待落砂后的弹体毛坯缓慢冷却后，再去除冒口，在滚筒内滚光弹体毛坯。

5. 稀土球铁迫弹弹体的检验

铸造的弹体毛坯要按规定的技术条件进行检验。毛坯检验的项目有：外表面检验；药室内表面检验；头、尾弧形部的摆差检验；壁厚差检验；硬度检验等。此外，每炉尚需选取 3 发硬度最小的弹体做机械性能试验；选取 3 发硬度最大的弹体做击碎检查。

一般稀土球铁弹体不直接做拉伸试验，而是用楔压试验的方法间接测量抗拉强度。通常试样的切取是：在铸造弹体毛坯的定心部切一圆环，而后在圆环上切下三个互成 120°角的弧形块(见图 7.11)。楔压试验时，把试样放在两顶角为 90°的淬硬钢楔之间施压，直至试样产生脆性断裂。此时，强度极限可按下式计算：

$$R=\frac{P}{A}\left(1+0.02\frac{P}{A}\right)$$

式中　R——抗拉强度极限，MPa；

P——试样断裂瞬间的测定载荷，N；

A——试样的横断面积，m^2。

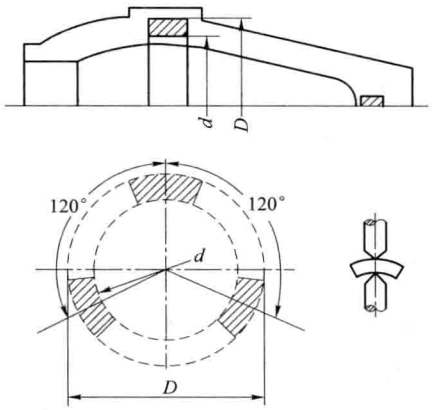


图 7.11　迫弹弹体楔压试验的试样切取部位及试验示意图

击碎检查是将弹体毛坯用压力机击碎成几块，以检验金属内部疵病，如气孔、夹渣、缩松和白口等。60 mm、82 mm 弹体规定击碎成 8～12 块。

7.2　熔模精密铸造

熔模精密铸造是目前应用较多的一种特种铸造工艺，它是由古代失蜡铸造发展成的一种精密铸造方法，所以熔模铸造又称失蜡铸造。通常是在蜡模表面涂上数层耐火材料，待其硬化干燥后，将其中的蜡模熔去可制成型壳，再经过焙烧，然后进行浇注，从而获得铸件。由于获得的铸件具有较高的尺寸精度和较低的表面粗糙度，故也称为“熔模精密铸造”。

熔模铸造具有以下几个特点：

(1) 铸件精密，尺寸精度可达到（100±0.3）mm，铸件表面粗糙度为 Ra 1.25 μm～Ra 2.5 μm。

(2) 可铸造出形状复杂的薄壁零件。

(3) 能铸造各种合金及高熔点合金的铸件。

(4) 适合大批量生产。

熔模铸造的工艺流程如图 7.12 所示。

可用熔模铸造生产的合金种类有碳素钢、合金钢、耐热合金、不锈钢、精密合金、永磁合金、轴承合金、铜合金、铝合金、镁合金、钛合金和球墨铸铁等。

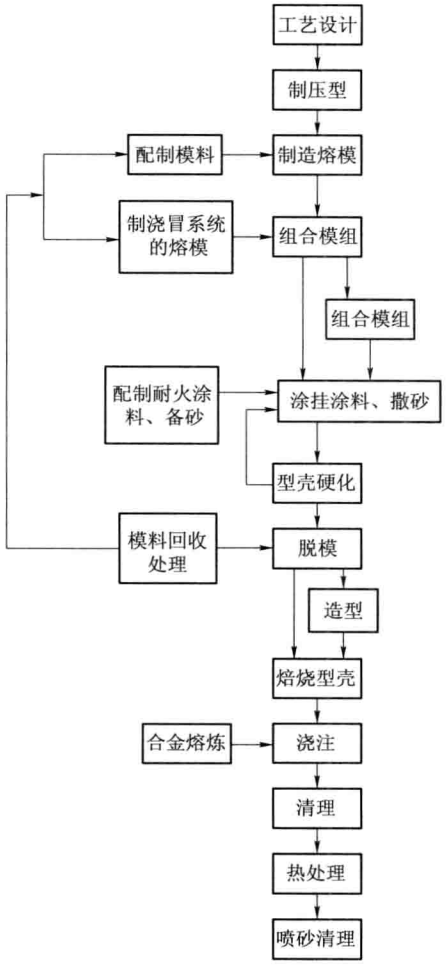


图 7.12 熔模铸造工艺流程图

用熔模铸造生产铸件的尺寸精度可达 5～7 级，铸件表面粗糙度为 $Ra=1.25\sim2.5\ \mu m$，在涡轮发动机叶片的熔模铸造生产中，铸件的精度已达到无加工余量的要求。

熔模铸件的形状一般都比较复杂，铸件最小壁厚可达 0.3 mm，铸件质量可以小到 1 g；大到直径近 2 m，质量近 1 t。由于铸模是一次性使用，尤其适合于制造具有复杂内部结构的零件，可以生产锻造机加工不能生产的零件。它既可以用于中小批量生产，如弹箭零部件，也可以用来大批量生产，如高尔夫球头等。

熔模铸造生产的第一个工序就是制造熔模，熔模是用来形成耐火型壳中型腔的模型，所以要想获得尺寸精度高和表面粗糙度低的铸件，首先熔模本身就应该具有高的尺寸精度和较低表面粗糙度。此外熔模本身的性能还应尽可能使随后的型壳制作等工序简单易行。为得到上述高质量要求的熔模，除了应有好的压型（压制熔模的模具）外，还必须选择合适的制模材料（简称模料）和合理的制模工艺。

7.2.1 模料

1. 对模料性能的要求

制模材料的性能不仅应保证能方便地制得尺寸精确、表面粗糙度低、强度好、重量轻的熔模，它还应为型壳的制造和获得良好铸件创造条件，所以模料的性能应满足以下要求：

（1）模料的合适熔点为 60 ℃～100 ℃，以便可以用简单的加热方法配制模料和从型壳中熔失熔模。

（2）模料开始软化变形的温度（称为软化点）要高于 40 ℃，以保证制好的熔模在室温下不发生变形。

（3）模料要有高的强度、韧性和表面硬度，防止在熔模生产和制型壳的过程中出现熔模的破损、熔模表面的破坏以及型壳的断裂。

（4）在压制熔模时，模料的流动性要好，使熔模能清晰正确地复制压型型腔的形状，而在熔失熔模时，模料也易从型壳中流出。

（5）模料在加热、冷却过程中的膨胀、收缩系数要小而稳定，使熔模上不易出现缩

孔等缺陷，熔模的尺寸稳定，而且在熔失熔模时，阻滞在型壳中的液态模料也不易便型壳胀裂。

(6) 模料应能被涂料很好地润湿，使涂料在制型时均匀涂覆在熔模上，正确复制熔模的几何形状。

(7) 模料的化学活性要低，它不应和生产过程中所遇到的物质（如压型材料、涂料等）发生化学作用，并对人体无害。

(8) 模料的密度要小，焊接性要好，能重复使用，它的价格要便宜，来源要丰富。

2. 模料的种类和性能

由于对制模材料有复杂的综合性能要求，单一的原材料不能满足上述要求，所以通常需要用两种或更多种的原材料来配制模料。模料一般用蜡料、天然树脂和塑料（合成树脂）配制。凡主要用蜡料配制的模料称为蜡基模料，它们的熔点较低，为 60 ℃；凡主要用天然树脂配制的模料称为树脂基模料，熔点稍高，为 70 ℃～120 ℃。

(1) 蜡基模料。它主要用蜡料配制而成，用得最广泛的蜡基模料由石蜡和硬脂酸配制而成。

目前广泛采用的石蜡—硬脂酸模料就是属于这一类，它由 50%的石蜡和 50%的硬脂酸配制而成，其熔点低于 60 ℃。这种模料的流动性好、制备方法简单、能多次反复使用，且对硅酸乙酯和水玻璃黏合剂涂料的涂挂性能好。但强度较低、稳定性差、冷却时的收缩率较大，在夏季及炎热地区使用时，蜡模容易变形，它只适用于制造小型零件。

用低分子聚乙烯替代硬脂酸配制蜡基模料也是近年来研究较多的配方。低分子聚乙烯的相对分子量小于 5 000，熔点为 60 ℃左右，能与石蜡互熔。一般以用高压法生产聚乙烯时获得的低分子聚乙烯为好。石蜡—低分子聚乙烯模料的合适配方为石蜡 95%加低分子聚乙烯 5%，它的强度高，收缩率小，熔点为 60 ℃～70 ℃，在使用时不会皂化，故模料回收容易，只需加热片刻即可。

(2) 树脂基模料。多以松香为主要成分，也可称松香基模料。主要用来生产精度要求高的熔模铸件，如涡轮发动机叶片等。

为进一步解决因模料软化而引起的熔模变形问题，目前正在试验用泡沫聚苯乙烯制造熔模。泡沫聚苯乙烯可用压力为 0.7 MPa（即 7 atm）的蒸气熔化，它也可被燃烧变成气体，还能用三氯乙烯熔化。聚苯乙烯的软化点为 60 ℃～70 ℃。制模时，将预发泡的聚苯乙烯颗粒放在压型中，将口堵死，放在 90 ℃～120 ℃的温度下进行发泡，形成熔模。但制模工艺复杂，不宜制造壁薄、形状复杂的熔模，且熔模的表面粗糙度高。

为尽可能地消除模料在成型时的收缩，提高熔模的精度，尿素粉填料模料也是一种正在试验的模料。尿素粉不是尿素，是尿素加热到 150 ℃时先形成液状的二缩尿，而后再继续加热到 170 ℃时形成的固体三聚氰胺，经球磨成粉状。尿素粉不溶于水，可混在模料之中。

7.2.2 熔模铸造工艺

1. 熔模精密铸造的工艺设计

熔模精密铸造的工艺设计应根据给定的产品图样、技术要求、生产批量及生产条件进行，工艺设计的内容包括对铸件的工艺分析、确定工艺参数及设计浇注系统等。

熔模铸造工艺参数主要包括铸件尺寸精度、铸件加工余量、铸造收缩率及模样的拔模斜度等，为获得正确、符合要求的铸造零件就必须确定铸件合理的工艺参数，诸多综合因素直接影响铸件的尺寸精度，除压型型腔尺寸是一个不变的数值外，铸件工艺条件、原材料性能等均属影响铸件尺寸精度的偶然因素，这些偶然因素使铸件尺寸精度波动较大。130 mm 火箭弹的铸造挡药板是火箭发动机中一个重要零件，形状复杂并要求有足够的承压强度。原产品图规定为 25 钢，但采用铸造工艺其性能却达不到产品设计要求，后经多次试验改用低碳硅锰钢，调整了硅锰含量，满足了产品性能要求。挡药板的尺寸精度除产品图给定的尺寸公差外，其余均按自由公差考虑。

铸造收缩率是影响铸件尺寸精度的一个重要因素，所以在确定工艺参数时必须正确选定铸造收缩率。130 mm 火箭弹铸造挡药板由于结构复杂，各部分收缩阻力不同，起模、烘型和浇注过程中都可能影响型腔尺寸，所以对查表所得数据必须通过实践来修正，确定合理的铸造收缩率。低碳硅锰钢自由收缩率为 1.6%～2.0%。模料收缩、新料收缩为 0.8%～1.0%，旧料收缩为 1.0%～1.3%，混合模料为 0.8%～1.1%。型壳在焙烧过程中要膨胀，由于多种因素存在，所以先查表得到综合收缩率范围，然后根据挡药板的结构特点对选择的收缩范围进行计算，经生产实践后再修正，以确定合理的铸造收缩率。

2. 熔模铸造工艺过程

1）制压型

制造蜡模的模具称为压型。压型是熔模铸造中最主要的工具。它决定着蜡模的精度和表面粗糙度，进而决定铸件尺寸精度和表面粗糙度，对铸件的成本也有很大的影响。为了保证蜡模的表面粗糙度和尺寸准确，压型必须有很高的精度和低的表面粗糙度。常用的压型有机械加工压型和易熔合金铸造压型。钢质或铝质机加工压型的特点是精度高、寿命长（钢质可达十万次以上，铝质可用数万次），适用于大批量生产以及批量虽小而尺寸精度高和表面粗糙度要求较低的铸件。目前，生产中这类压型使用最为普遍。易熔合金压型一般用锡锑合金或铅锑合金，利用母模直接浇注出来，制造比较方便，用于精度要求不高的铸件。易熔合金压型的特点是制造比较方便，周期短，有较高的导热性，制出的蜡模质量较好，生产率高。压型寿命长（数千次），压型报废后易熔合金可以回收利用，成本低，适用于中小批量的小型零件生产或试制。此外，在单件生产中还可采用石膏压型。石膏压型的特点是制造方便，但寿命短（50～150 次），一般用于小批量生产和新产品试制。石膏的成型性好，在凝固过程中体积略有增加（0.1%～0.12%），有利于制造轮廓清晰、表面光洁及尺寸精确的压型。缺点是导热性差、强度

低、吸湿性强、脆性大。

塑料压型所用的基本材料是环氧树脂和固化剂。其结构分全塑料压型和塑—金组合压型两类，全塑料压型制作简单，不需要机械加工，生产周期短，不易变形，但导热性差。塑—金组合压型能改善导热性，但生产周期长。

对压型加工精度的要求和材料选择原则如下：

(1) 压型加工精度主要是根据铸件精度和压型的使用条件来决定。机械加工压型型腔的表面粗糙度一般应比铸件低 1～2 级，甚至 3～4 级，一般表面粗糙度取 $Ra1.6\ \mu m$～$Ra0.8\ \mu m$。顶杆、镶块、活块等配合面取 $Ra3.2\ \mu m$～$Ra1.6\ \mu m$，浇注系统表面取 $Ra6.3\ \mu m$～$Ra3.2\ \mu m$，非工作部分的表面取 $Ra25\ \mu m$～$Ra12.5\ \mu m$。

(2) 压型材料选择主要是依据铸件的精度和表面粗糙度、生产批量和压型结构。对材料的要求是导热性好，热膨胀系数小，易切削加工，有足够的强度。

大量生产用的机械加工压型，常用的材料是碳素钢、铸铁和铝合金，且以碳素钢使用最多。

2) 制熔模

制模过程包括模料的配制、制模和组合模组三部分。

(1) 模料的配制。配制模料的目的是将组成模料的各种原材料混合成均匀的一体，并使模料的状态符合压制熔模的要求。配制时主要用加热的方法使各种原材料熔化混合成一体，而后在冷却情况下，将模料剧烈搅拌，使模料成为糊膏状态供压制熔模用。有时也有将模料熔化为液体直接浇注熔模的情况。

熔化模料通常采用蒸汽加热熔化装置，如图 7.13 所示；或带有水套的电加热熔化装置，如图 7.14 所示。

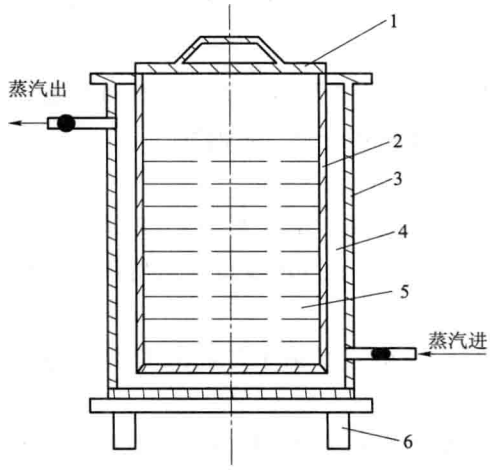


图 7.13　蒸汽加热熔化装置

1—盖；2—内套；3—外套；4—蒸汽；5—蜡料；6—底架

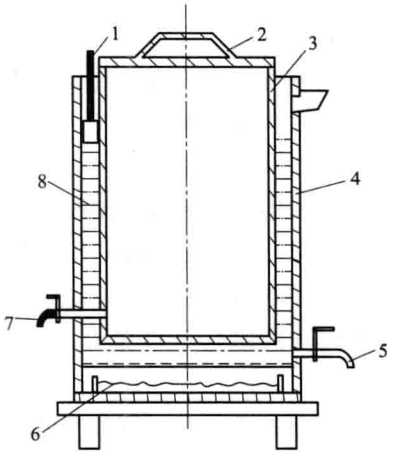


图 7.14　带有水套的电加热熔化装置

1—指示水位的浮标；2—盖；3—坩埚；4—水套；5—放水阀；6—电热丝；7—放蜡料阀；8—外壳

(2) 制模。模料注入压型中的方法有自由浇注法和压力注入法两种。自由浇注法应用较少，只用于制造尿素模等。对于石蜡—硬脂酸模料几乎全部采用压力注入法，因为用这种方法制成的熔模轮廓清晰、尺寸精度较高。

制模工艺主要是控制好压型的工作温度、模料的压注温度、压注时的压力及保压时间，不同的模料制模工艺是不同的。

(3) 组合模组。组合模组是将挂好蜡的直浇口棒放在卡具上，用电热刀将蜡模、内浇口与直浇口焊成一体。组装模组实际上是设计浇冒系统工作的一部分。熔模组合前需100%检验，熔模组合后应使模料熔失时便于流出，熔模焊合应平滑，模组不允许有蜡瘤、蜡屑，应有足够的强度，焊接处不允许有间隙、尖角、毛刺等。130 mm 火箭弹挡药板和 90 mm 航空火箭弹的十字块等精密铸件均采用熔模组合形式。

熔模铸造浇注系统除了把液体金属导入型腔外，还有以下特殊作用：在组合模组和制壳时，作为熔模和型壳的负载体，应有足够的强度，在铸件凝固过程中起补缩作用，在熔失蜡模时，作为顺利导出液态模料的通道。

3) 制壳

型壳制备是熔模铸造的重要环节之一，型壳质量的好坏将直接影响铸件的质量。目前型壳一般用涂挂法制取。在蜡模上涂挂耐火涂料层，最后制成具有一定强度的耐火型壳，制壳的工艺过程包括蜡模表面的活化处理；耐火涂料的配制和在蜡模上涂挂耐火材料；在涂料层上撒砂；型壳层的干燥和硬化；熔失蜡模及焙烧型壳等。

7.2.3 熔模铸造的特点及应用范围

(1) 铸件的精度高且表面光洁，其精度可达 IT11～IT14，表面粗糙度 $Ra1.25\ \mu m$～$Ra2.5\ \mu m$，可大大减小机械加工余量或不进行机械加工，显著提高金属材料的利用率，减少机械加工费用。

(2) 能够铸造各种铸造合金铸件，从铜、铝等有色合金到各种合金钢均可铸造，尤其适用于那些高熔点及难以切削加工合金的铸造，如耐热合金、磁钢等。

(3) 生产批量不受限制，从单件、小批量到大量生产均可。

(4) 熔模铸造的形状可比较复杂，铸件上可铸出的最小孔径为 0.5 mm，铸件的最小壁厚为 0.3 mm。有时可将几个零件组合而成的部件，通过改变设计由熔模铸造整体铸出，节省了机械加工工时和金属材料的消耗。

(5) 铸件的质量不宜太大，铸件一般不超过 25 kg，目前生产的最大熔模铸件为 80 kg 左右。

由于熔模铸造工艺过程较复杂且不易控制，使用和消耗的材料较贵，因而适用于生产形状复杂、精度要求较高或难以进行机械加工的小型零件，如涡轮发动机叶片和叶轮、高速工具钢、切削刀具及汽车、农机、小型精密零件的制造，用以代替锻件及砂型铸件，目前它的应用领域已日益扩大。

7.3　陶瓷型铸造

7.3.1　陶瓷型铸造的基本过程

陶瓷型铸造是在砂型熔模铸造的基础上发展起来的一种新工艺。陶瓷型是利用质地较纯、热稳定性较高的耐火材料作造型材料，用硅酸乙酯水解液作黏合剂，在催化剂的作用下，经灌浆、结胶、起模、焙烧等工序而制成的。

采用这种铸造方法浇出的铸件，具有较高的尺寸精度和较低的表面粗糙度，所以这种方法又叫陶瓷型精密铸造。

陶瓷型铸造可分为两类：一类是全部采用陶瓷浆料制造铸型法；另一类就是采用底套（相当于砂型的背砂层）表面再灌陶瓷浆料制造陶瓷型的方法。底套又分砂套和金属底套两种。

上述两类陶瓷的制造过程如下。

第一类是小型陶瓷型铸件，常采用全部以陶瓷浆料制造的陶瓷型，其造型过程如图 7.15 所示。其步骤是首先将模型固定于模板上，如图 7.15（a）所示；再套上砂箱，如图 7.15（b）所示；然后将预先调好的陶瓷浆料倒入砂箱，如图 7.15（c）所示；将上表面刮平，等待结胶硬化，如图 7.15（d）所示；待浆料一旦出现弹性即可进行起模，如图 7.15（e）所示；随即点火喷烧（吹压缩空气助燃），如图 7.15（f）所示。待火熄灭后，移入高温中焙烧即成所需的陶瓷型。

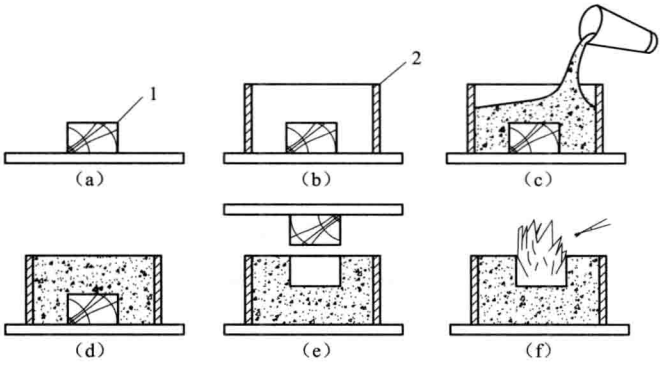


图 7.15　全部采用陶瓷浆料造型过程示意图

（a）模型；（b）准备灌浆；（c）灌浆；（d）结胶；（e）起模；（f）喷烧

1—模型；2—砂箱

第二类是带底套的陶瓷型。因为陶瓷型所用的材料一般为刚玉粉、硅酸乙酯等，这些材料价格较贵。对于大的陶瓷铸件，如果全部采用陶瓷浆料造型，成本太高，为了降低成本，应尽量节约陶瓷浆料。此外，为了降低铸件的表面粗糙度和提高尺寸精度，浆

料中所用耐火材料的细度很细，因此透气性很差。为了改善这一状况，应该使陶瓷型的灌浆层尽量薄。鉴于上述两个原因，生产中常用带底套的复合铸型，即与液体金属直接接触的面层灌注陶瓷浆料，而其余部分用砂套或金属套代替。

金属的底套经久耐用，适合于批量大的铸件。金属底套的另一优点是铸出的铸件尺寸精度比砂套的稳定。金属底套的常用材料是铸铁，为了使陶瓷能很好附在底套上，金属底套的表面应做得粗糙些。

目前生产上应用最广泛的是 CO_2 水玻璃砂底套陶瓷型。CO_2 水玻璃砂底套有强度高、透气性好和制作简便的优点。其特殊之处在于事先要准备两个模型：一个用于灌陶瓷浆料的铸件模（A 模）；另一个用于制造底套（B 模），其尺寸较 A 模大。

7.3.2 陶瓷型铸造的特点

（1）铸件的表面粗糙度低。由于陶瓷型采用热稳定性高、粒度细的耐火材料，所用的模型表面又很光滑，因而能铸出表面粗糙度很低的铸件，像头发丝那样细的纹路也可在铸件上反映出来。陶瓷型铸件的表面粗糙度可达 $Ra12.5\ \mu m \sim Ra3.2\ \mu m$。

（2）铸件的尺寸精度高。由于陶瓷型采用灌浆并在陶瓷层处于弹性状态下起模，陶瓷型在高温下变形又小，故陶瓷型尺寸精度高，可达 3～5 级。

（3）可铸出大型精密铸件。熔模铸造虽然能铸出尺寸精确、表面粗糙度低的铸件，但由于本身工艺的限制，浇注的铸件质量一般都较小，最大件只有几十千克；而陶瓷型铸件最大可达十几吨。

（4）投资少、投产快、生产准备周期短。陶瓷型铸造的生产准备工作比较简易，不需复杂的设备，一般铸造车间只要添置一些原材料和必要的工艺设备，很快即可投入生产。

7.3.3 陶瓷型铸造的使用范围

目前陶瓷型铸造已成为铸造大型厚壁精密铸件的重要方法，它广泛用于铸造冲模、锻模、玻璃器皿模、金属型、压铸型等。除能大量节约加工工时外，其使用寿命往往接近或超过机械加工的模具。此外，还能用陶瓷型铸造生产一些中型精密铸钢件。

7.3.4 陶瓷型铸造工艺

1. 陶瓷型铸造的工艺流程

工艺流程如图 7.16 所示。

2. 陶瓷型所用的造型材料

陶瓷型所用的造型材料包括耐火材料、黏合剂、催化剂、脱模剂、透气剂等。

（1）耐火材料。陶瓷型所用的耐火材料要求杂质少、熔点高和高温热膨胀系数小。

（2）黏合剂。陶瓷型常用的黏合剂是硅酸乙酯水解液。

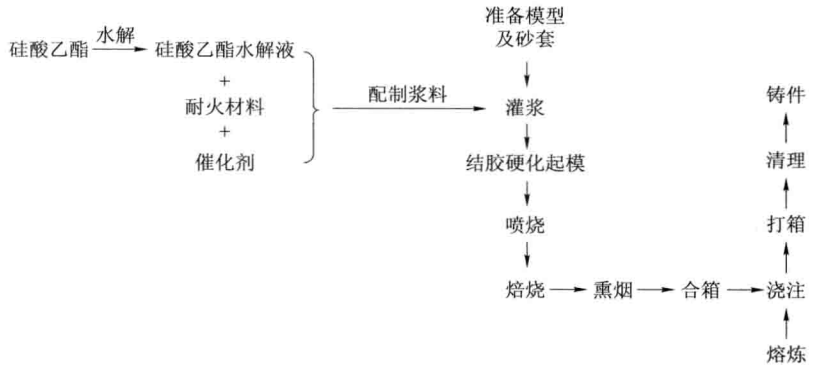


图 7.16　陶瓷型铸造的工艺流程

(3) 催化剂。为了使陶瓷浆料能按所要求的时间结胶，必须加入催化剂。

(4) 脱模剂。在造型时，为了防止粘模，损害型腔表面质量，需用脱模剂以使模型与陶瓷浆料表面容易分离。

(5) 透气剂。为了增加铸型的透气性，需向陶瓷浆料中加入透气剂以改善陶瓷型的透气性。

3. 陶瓷浆料的配制与灌浆

(1) 耐火材料的选择。在铸造尺寸精度高和表面粗糙度要求低的合金钢锻模、压铸型、玻璃器皿模具时，应采用耐高温的、热稳定性好的耐火材料。对于铸铁件或铝铸件可采用价格较便宜的耐火材料。

正确选择耐火材料的粒度组成，对于降低陶瓷型的表面粗糙度、提高尺寸精度和强度、防止铸型裂纹有十分重要的作用。实践证明，陶瓷层的紧实度愈高，它的质量愈好，因此，陶瓷浆料中的耐火材料都是由几种不同粒度的粉状物组成。

(2) 浆料的配制与灌浆。耐火材料与硅酸乙酯水解液的配比要适当，如粉料过多、水解液少，则浆料太稠，流动性差而无法灌浆，即使勉强成型，铸型上也易产生大的裂纹；如粉料太少而水解液多，则浆料太稀，灌浆后容易出现分层，浆料硬化时收缩大、强度低，并且浪费水解液。不同耐火材料所需水解液的比例也不同。

配制陶瓷浆料时，应使耐火粉料与水解液混合均匀，当混合料出现结胶的迹象时，立即进行灌浆。

开始结胶的时间与灌浆的时间对陶瓷型质量有很大的影响。催化剂含量和室温对结胶时间也有影响。灌浆时，浆料倒入速度不应过快，以防卷入空气，最好边灌浆边振动，以排除浆料内的气体。

4. 起模

灌浆后的陶瓷型经结胶、固化等阶段，在结胶开始后尚不能立即起模，因为这时陶瓷型的强度还很低，容易损坏。一般在结胶后 5～15 min，待陶瓷层稍有弹性时，起模

效果最好。起模后应立即点火喷烧，否则易产生裂纹。如果采用气化模，则不需起模即可喷烧。

5. 喷烧

起模后应立即点火并吹压缩空气进行喷烧，使型腔表面的乙醇同时燃烧起来。由于乙醇的挥发与加热，使陶瓷型的表面有一定的强度和硬度。此外，还由于喷烧的结果，使型腔表面形成无数网状显微裂纹，它们不仅不会影响铸件的表面粗糙度，相反却能提高陶瓷型的透气性和型腔尺寸的稳定性。

6. 焙烧

焙烧的目的是使陶瓷型内残存的乙醇、水分和少量的有机物烧去，并使陶瓷层强度增加。全部由陶瓷浆料灌制的陶瓷型，焙烧温度可高达 800 ℃，焙烧时间 2～3 h，出炉温度应在 250 ℃以下，以防产生裂纹。

带有水玻璃砂套的陶瓷型，焙烧温度（烘干）在 350 ℃～550 ℃。

7. 浇注与清理

陶瓷型浇注时一定要注意挡渣。浇注温度与浇注速度可比同类型的砂型铸件稍高，这样有利于获得轮廓清晰铸件。陶瓷型铸件最好冷却至室温时再开箱，以防止铸件产生裂纹和变形。

7.4 压力铸造

7.4.1 压力铸造的特点和工艺流程

压力铸造在专用的压铸机上进行。压铸机可分为热压室和冷压室两大类，目前在弹箭零件的压铸生产中采用冷压室压铸机。根据压室位置的不同，冷压室压铸机又有卧式与立式之分。图 7.17 是立式冷压室压铸机铸造过程原理图。压铸操作过程包括：模具型腔内涂涂料并合模、定量灌注金属液（见图 7.17（a））、压射充型并保持一定时间（见图 7.17（b））、切除余料并开模顶出铸件（见图 7.17（c））。

压力铸造与其他铸造方法的主要不同点是：铸造时金属液在高压（通常是几十到几百个气压）和高速下被射入金属模具的型腔，金属液充填压铸模具型腔的时间极短，而且其冷却凝固的速度很快。因此，压力铸造有很多优点。

（1）充填性能良好，可铸出结构形状复杂、薄壁深腔的零件，也可铸出很小的孔、螺纹和花纹等。

（2）金属是在压力下结晶，且在金属型腔中冷却，冷却速度大，故铸件晶粒细小，组织紧密。同时，由于对金属流动性要求低，故可用较低的浇注温度，从而减少金属液吸收气体和氧化的作用。这些都有利于提高铸件的强度。如同样是 ZL7 的铝合金，砂铸件的强度极限为 157 MPa，而压铸件则可达 216 MPa。

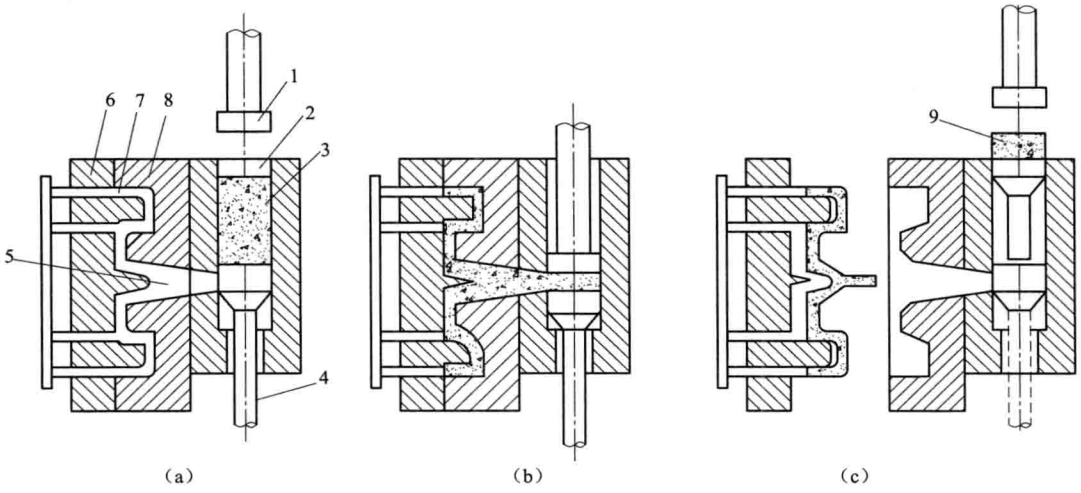


图 7.17　立式冷压室压铸机压铸过程原理图

1—压射冲头；2—压室；3—金属液；4—反料活塞；5—浇口；6—动模；7—型腔；8—定模；9—余料

(a) 灌注金属液；(b) 压射充型；(c) 切余料、开模

(3) 可铸出精度高、尺寸稳定和表面粗糙度较低的零件。一般压铸件的精度可达 6～8 级，个别尺寸可达 5 级，表面粗糙度为 $Ra3.2\ \mu m \sim Ra0.8\ \mu m$。因此，大多数情况下压铸件可不再进行机械加工或仅需少量加工即可进行装配。

(4) 节省原材料，如 40 mm 火箭增程破甲弹的尾杆从热挤压毛坯改为压铸件后，其材料利用率从 36%提高到 80%。

(5) 生产率高，便于实现机械化和自动化。

(6) 压铸生产可用镶铸的办法改善零件的加工性能。如 82 mm 无坐力炮破甲弹尾翼（见图 7.18），原制造方法是先车制尾杆与稳定环，然后再焊合尾翼片，不仅工作量大，而且存在稳定环与尾杆的不同轴度较大、尾翼片 90°分布角度不易保证等问题。现改进为在钢管车削的尾杆上直接镶铸出铝合金的尾翼片与稳定环的结构，不仅工艺简便，且质量易于保证。

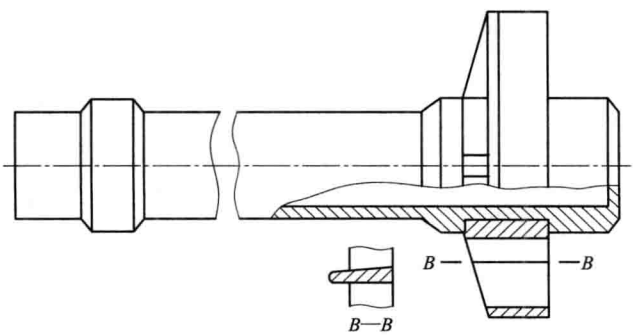


图 7.18　82 mm 无坐力炮破甲弹尾翼

但是，压力铸造也存在一系列的问题：由于金属液充填铸型的速度很大，冷却凝固又快，因而型腔中的空气不易排净，所以易在铸件中产生细小的气孔。由于压铸时的补缩条件差，铸件易出现缩松和缩孔，且壁厚愈大，缩松愈严重，因而压铸件的壁厚受到一定的限制；由于压铸件内部存在高压下形成的气孔，因而不宜进行热处理或在高温下工作；压铸件的冲击韧性较低，不宜在冲击载荷或振动情况严重的条件下工作。此外，还有压铸机和压铸模具较复杂、价格昂贵、不宜少量生产等。

弹箭零件中除上述 82 mm 无坐力炮尾翼外，尚有 40 mm 火箭增程破甲弹的衬套、蜗轮尾杆等有色金属制件已采用压铸法生产。

压铸生产的一般工艺流程如图 7.19 所示。

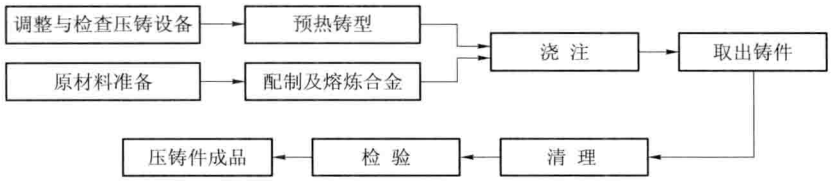


图 7.19 压铸生产的一般工艺流程

为获得优质压铸件，并使压铸生产能顺利进行，必须有质量良好的金属液，正确地设计压铸模具，正确地选用压铸机及选择合理的工艺参数。同时，铸件本身结构对压铸生产及其质量也有很大关系。

7.4.2 压铸过程中的主要工艺因素

压铸过程中的主要工艺因素有压力、充填速度、合金及模具温度以及持压时间等。

1. 压力

压铸压力由压铸机提供并由压射冲头施加于压室中的金属液上，其作用主要是将金属液充填到铸型中去，并在金属结晶时压实金属。它是使压铸件具有致密组织和清晰轮廓的重要因素。

在压铸过程中作用于液体金属上的压力不是一个常数，其变化情况如图 7.20 所示。

t_1阶段，金属液被浇入压室，冲头尚未加压，故金属液未承受压力作用。

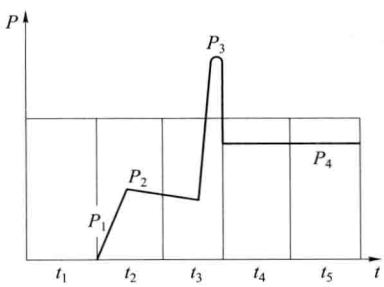


图 7.20 压铸过程中金属液压力的变化

t_2阶段，金属液在压射冲头推动下充填铸型，压射冲头作用于金属液的压力 P_1转变为金属液的流动压力 P_2，P_2使金属液获得一定的速度而充填整个铸型。

t_3阶段，在金属液充满铸型的一瞬间，因受到铸型型腔的约束，流动速度很大的金属液突然停止流动，形成流体冲击，使压力剧增，P_2即转变为金属液的冲击压力 P_3。P_3使铸件轮廓清晰、表面光洁、组织致密和尺寸精确。此时，液体金

属温度略有提高，有利于赋型。金属液的密度和速度愈大，P_2愈大。

t_4阶段，P_3作用瞬间后，压力迅速下降，变为最终静压力，使金属液在压力下结晶，获得组织致密的铸件。但在内浇口凝固以后，P_4实际上就不起作用了。

反映压力大小的一个重要参数是比压。所谓比压就是金属液在压室内单位面积上的压射压力。可用公式表示为：

$$p=P\times10^{-6}/A$$

式中　p——比压，MPa；

P——压射压力，N；

A——压室截面积，m^2。

提高比压可提高金属液的动压力 P_3，因而有助于金属液赋型，使铸件外形清晰。采用高比压后可允许选用较低的浇注温度，同时，高的比压有利于压实金属，这两者均有利于减少铸件的缩松和缩孔，提高其致密性，从而可提高压铸件的强度。但是，过高的比压将使模具受到金属液的强烈冲刷和增加铸件粘模的可能性，降低模具寿命和影响铸件表面质量；同时，由于比压过高会使金属液的充填速度不适当地增大，又将降低铸件的机械性能，所以过高的比压对提高铸件的机械性能并无益处。图 7.21 是 ZL105 铸件（外形不复杂的薄壁件）的机械性能和比压的关系。比压的数值与很多因素有关，应根据具体情况确定：当铸件壁厚较大，外形不复杂且致密性要求也不太高时，可采用较低的比压；若铸件致密性要求较高，则应采用较高的比压。对于薄壁、深腔、外形复杂的铸件，应增大比压以提高金属液的流动性能，提高动压力，在金属液进入型腔的流入口截面积比较大的情况下，为保证所要求的金属液流入速度和使其能连续而平稳地进入型腔，也必须增大比压。此外，比压的大小与铸件材料及浇注温度等也有关系，表 7-2 中的数值可供参考。

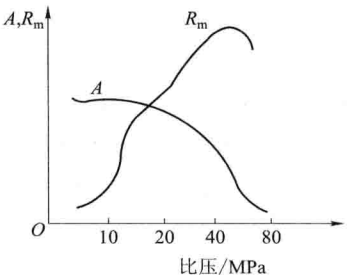


图 7.21　ZL105 合金铸件的机械性能与比压的关系

合金温度：680 ℃～700 ℃；
模具温度：150 ℃～180 ℃；
流入口厚度为铸件厚度的 40%

表 7-2　建议采用的计算比压

合金种类	计算比压/MPa			
	壁厚至 3 mm		壁厚至 6 mm	
	外形复杂	外形简单	外形复杂	外形简单
锌合金	29.4	39.2	49	58.8
铝合金	19.6	34.3	44.1	58.8
铝镁合金	29.4	39.2	49	58.8
镁合金	29.4	39.2	49	58.8
铜合金	49	58.8	68.6	78.4

通常，可用改变压室直径和调节压铸机的压射力来调整比压。

2. 充填速度

在压铸生产中常用充填速度这一参数表示金属液的流动特性。

充填速度是指金属液通过内浇口导入型腔的线速度。充填速度根据压铸合金和铸件结构特性来决定，既不能过高也不宜过低。过低会造成铸件轮廓不清晰，甚至充填不满，对形状复杂的薄壁件尤其如此。但若充填速度过高也会产生一系列的问题，如：

(1) 因高速金属流跑在空气前面，堵塞压铸模的排气系统，致使空气留在铸件内而形成气孔。

(2) 金属液呈喷雾状进入型腔并黏附于型壁上，继之而来的金属液不能与它熔合而使铸件形成表面缺陷时，喷雾状的金属液因与空气接触面积增大而增加氧化程度，所以铸件中氧化夹杂也较多。

(3) 冲刷模具型壁较严重，降低其寿命，并使铸件表面质量下降。

所以在生产中采用保证充填良好情况下的最低速度，各种合金压铸件的充填速度可参考表 7-3。

表 7-3 各种合金压铸件的充填速度

合金种类	充填速度/（$m \cdot s^{-1}$）	合金种类	充填速度/（$m \cdot s^{-1}$）
锌合金	简单厚壁件 10～15 复杂薄壁件 15～20	镁合金	简单厚壁件 20～25 复杂薄壁件 35～40
铝合金	简单厚壁件 10～15 复杂薄壁件 25～30	铜合金	简单厚壁件 10～15 复杂薄壁件 15～20

充填速度取决于压射速度（压射冲头的移动速度）、压室截面积与流入口截面积的比值等。生产中一般通过调整压射速度及内浇口截面的大小来调节充填速度。

3. 充填时间、持压时间及开型时间

充填时间是指金属液从进入型腔到充满型腔所需要的时间。一般充填的时间都很短，中小型铝合金压铸件的充填时间只有 0.1 s 左右。

持压时间是指金属液充满型腔到凝固之前在压力状态下持续的时间。在此段时间内，压射冲头可将压力传给未凝固的金属液，使之在压力下结晶。金属液从充填终了到完全凝固的时间并不很长，所以持压时间仅需 1～3 s。对于熔点高、结晶温度范围大的厚壁铸件持压时间应长些；对于低熔点、结晶温度范围小的薄壁铸件持压时间可短些。

开型时间是指从持压终了到顶出铸件的时间。开型过晚时，因压铸件在模具中停留过长，增加了铸件对模具的包紧力而会使顶出铸件困难，甚至可能导致铸件开裂，并增加模具的受热程度以及降低生产率。而过早开型，则常因铸件的温度还高，强度较低，

导致顶出时铸件变形，且铸件过早脱模会影响尺寸精度。因此，开型时间要适当，对于收缩大、壁薄且结构复杂的压铸件，开型时间应短些。反之，开型时间应稍长。镁合金和含镁量较高的铝合金铸件容易开裂，应及早开型。

4. 模具温度

使用未预热的模具或模具预热不足，压铸时金属液将因激冷而不易充满型腔，或即使充满型腔也可能因激冷而产生裂纹，或在铸件表面产生冷纹、麻点等缺陷。对模具而言也会因温差大而降低使用寿命，甚至开裂。但若模具预热温度过高，则易产生粘模现象，使铸件顶出时变形，模具各活动部分也容易卡住。模具预热温度对压铸件机械性能也有一定的影响，如图 7.22 所示为 ZL105 合金的机械性能随模具温度不同而变化的情况。由图 7.22 可知，到 250 ℃以后，随模具预热温度的提高，铸件强度有显著下降，而延伸率的变化幅度已经很小。所以，该合金的模具温度在 150 ℃～250 ℃较适宜。

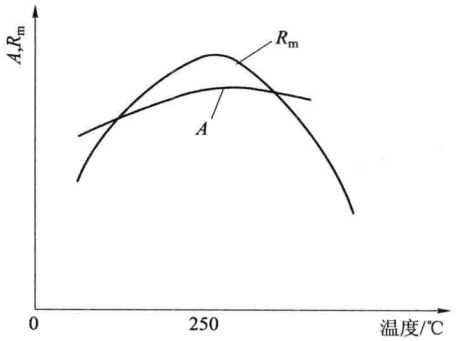


图 7.22　模具温度对压铸件机械性能的影响

浇注温度：680 ℃～700 ℃；比压：39.2 MPa；流入口厚度为铸件厚度的 40%

不同合金和不同铸件的模具预热温度可参看表 7-4。

表 7-4　压铸模具的预热温度

合金种类	预热温度/℃			
	壁厚至 3 mm		壁厚至 6 mm	
	外形复杂	外形简单	外形复杂	外形简单
锌合金	130～180	150～200	100～150	130～180
铝合金	150～200	180～250	120～180	150～200
镁合金	170～250	250～300	140～200	170～250
铝镁合金	170～250	250～300	140～200	170～250
铜合金	250～350	300～380	200～300	250～380

5. 浇注温度

浇注温度一般指金属液从压室进入型腔的平均温度，因不易测量，故一般用保温炉内金属液温度来表示。

为了能够充填铸型，金属液在保温炉内应过热。但随温度的升高，气体在金属液中的溶解度以及金属液被氧化的程度将增加，故一般保温炉内的金属液以不超过该合金的

液相线以上 20 ℃～30 ℃为宜。另外，浇注温度过高，铸型的熔蚀和粘模现象也将加剧，适当降低浇注温度可使金属液在压射过程中产生旋涡和卷入气体的可能性减小，可通过增加排气槽的深度以改善模具的排气条件，两者均有利于减少压铸件的内部气孔。并且，低的浇注温度又能使金属液在凝固过程中体积收缩减小，有利于减少铸件内部的缩松。

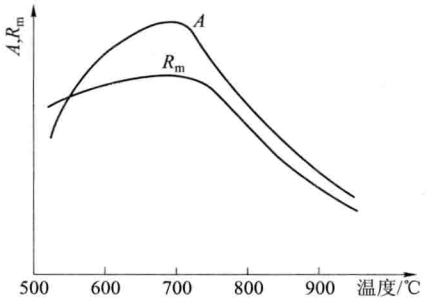


图 7.23 浇注温度对 ZL105 合金机械性能的影响

模具温度：150 ℃～180 ℃；

比压：39.2 MPa；

内浇口厚度为铸件厚度的 40%

浇注温度对 ZL105 合金机械性能的影响见图 7.23。由该图可知，ZL105 合金的浇注温度以 660 ℃～700 ℃为宜。

浇注温度的具体数值依一系列因素而定，如合金种类、铸件结构（壁厚、结构形状的复杂程度）、比压等。

6. 压铸所用涂料

在压铸过程中，为减少模具的导热率以保持金属液的流动性，防止粘模，减轻金属液对模具的冲刷以及为减小铸件与模具型腔、型芯之间的摩擦，从而延长模具使用寿命，并降低铸件表面的粗糙度，需对模具的型腔、型芯、压室和冲头等部分喷涂涂料。

由上可知，影响压铸件质量的工艺因素很多，应对各因素进行全面分析，在选择某一参数时应同时考虑其他因素的影响。

7.4.3 压铸件的结构工艺性

压铸件本身对压铸工艺的适应性是保证压铸件质量和提高压铸工艺生产率的重要因素。压铸件的工艺性主要是从零件材料的压铸性能、外形结构、尺寸精度、表面粗糙度及生产经济性等方面考虑。

1. 压铸件的结构

无论压铸件形状的复杂程度如何，均应使其从型腔中易于取出。图 7.24 是改进压铸件结构从而满足这一要求的例子。图中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ是消除侧凹，Ⅳ是用镶件消除深陷，Ⅴ是改变铸件侧壁孔。由于这些深孔、侧凹、侧壁孔以及深陷部分往往会妨碍压铸件的出模，或需增加用侧型芯或活动型芯，致使压铸模具结构复杂。因此，压铸件的外形要尽可能地使模具加工方便。

2. 铸件壁厚

铸造薄壁零件是压铸的特点，压铸件壁厚不宜过大。否则，其内部的气孔、缩松等将增加，抗拉强度亦随之降低。铝合金压铸件壁厚不同时，其密度强度见表 7-5。

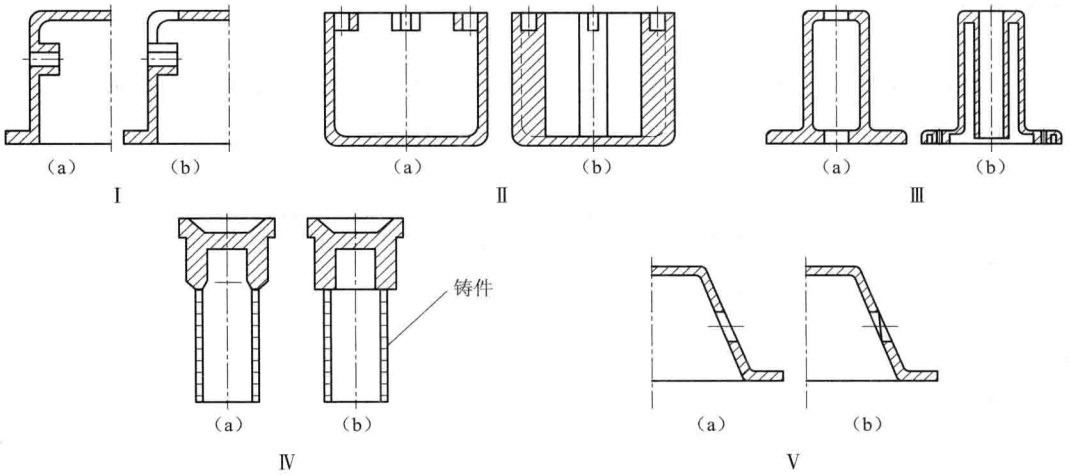


图 7.24　改变压铸件结构以改善其工艺性能的图例

a—原结构形状；b—改进后结构形状

表 7-5　不同壁厚铝合金压铸件的密度和强度

铸件壁厚/mm	密度/（g·cm^{-3}）	铸件壁厚/mm	抗拉强度/MPa
2	2.86	2	265
5	2.78	3	235
7	2.74	6.5～8	172

由此可见，在保证压铸件有足够承载能力的条件下，应适当减小壁厚。对铝合金而言，压铸件最适宜的壁厚是 1.5～4 mm，壁厚超过 8 mm 者不宜压铸。不同合金压铸件可达到的最小壁厚是不同的。

3. 铸造圆角

压铸件相邻两壁间应以圆角相连。圆角的存在有利于改善压铸件的组织，也可避免压铸件在夹角处产生应力集中，同时，还可延长压铸模的使用寿命。

压铸件上圆角半径 R 可由下式求得：

$$R=(b_1+b_2)/3$$

式中，b_1、b_2 是压铸件上相邻两壁的厚度；圆角半径 R 不得小于 0.5 mm。

4. 铸造斜度

为使压铸件易于出模和便于从铸件内抽出型芯，同时为防止拉伤压铸件表面和损坏型芯，压铸件上应有铸造斜度。设计压铸件时，最好在结构上就设计出结构斜度，此斜度的大小视收缩方向和收缩力的大小而定。同一压铸件的不同部位其铸造斜度的大小可以不等，压铸件内表面因收缩时紧裹型芯，故斜度要相应大些；铸件外表面则可小些；壁厚的铸件，因其对型芯的包紧力大，应有较大的斜度；收缩率大或熔点较高的合金，

其斜度也应较大。

5. 孔

压铸件上的孔及深陷，大多可直接铸出，但孔的形状应尽量简单。考虑到型芯在高温下的受载情况，孔的最小直径及其深度受到一定的限制，见表 7-6。

表 7-6 压铸出孔的尺寸

合金种类	孔的最小直径/mm		最大孔深（为该孔直径的倍数）/mm				孔的最小斜度/%
	一般的	技术上可能的	不通孔		通孔		
锌合金	1.0	0.8	$4d$		$8d$		0～0.3
铝合金	2.5	2.0	$>\phi5$ $<\phi5$	$4d$ $3d$	$>\phi5$ $<\phi5$	$7d$ $5d$	0.5～1
镁合金	2.0	1.5	$>\phi5$ $<\phi5$	$4d$ $3d$	$>\phi5$ $<\phi5$	$8d$ $6d$	0～0.3
铜合金	3.0	2.5	$>\phi5$ $<\phi5$	$3d$ $2d$	$>\phi5$ $<\phi5$	$6d$ $4d$	2～4

6. 镶铸结构

采用镶铸结构可以消除由于铸件过于复杂或无法脱出型芯而引起的铸造上的困难与障碍，改善和提高铸件的工艺性，消除铸件上的局部金属聚集以避免内部缩松等。

为使镶件结合得牢固，镶件联结部位必须滚花或制出凹槽或凸台，被镶件在镶件周围的壁厚应不小于 2～3 mm。

7. 尺寸精度及表面粗糙度

压铸件能达到较低的表面粗糙度和较高的尺寸精度，且尺寸稳定。尺寸精度和压铸生产的一系列因素有关，如压铸模具的制造精度、模具的热膨胀系数及磨损程度、合金的收缩率以及铸件的结构等。

7.4.4 铝合金的充氧压铸

随着对压铸件质量要求的提高，为克服普通压铸的缺点，现已广泛采用了真空压铸、双压射冲头压铸以及铝合金的充氧压铸等，铝合金的充氧压铸已在弹箭生产中得到了应用。

铝合金充氧压铸的基本原理是：在金属液充填前将干燥的氧气充入铸型以取代其中的空气，在压铸过程中，进入型腔的铝合金与氧气反应形成固态氧化铝微粒，这些氧化铝弥散分布在铸件中。由于型腔中的氧气与熔融铝合金化合，减少了压铸件内部的气孔，因而不仅提高了压铸件本身的机械性能，而且可用热处理的方法进一步提高材料的机械性能。用普通压铸、充氧压铸后不经热处理以及充氧压铸后再经热处理强化三种方

法制造的 40 mm 火箭增程破甲弹的尾杆强度见表 7-7。

表 7-7　不同压铸法尾杆的机械性能

压铸方法	机械性能	
	R_m/MPa	A/%
普通压铸	239	4.5
充氧压铸（铸态）	254	5.7
充氧压铸（经淬火和时效处理）	308	9.6
注：材料为 A1－8Si－1Zn－0.3Mn。		

充氧是在合模、插芯结束，合金液尚未浇铸入压室以前进行。充氧压力一般是 0.294～0.49 MPa，氧气进入型腔前应先通过干燥器滤掉水分，充氧 3 ～5 s 后即可浇注。

为达到充氧的预期目的，即大量减少压铸件内部的气孔，必须正确选择充氧口与排气口的位置，同时，压铸工艺参数也要结合充氧压铸的特点选择。

7.5　电铸工艺

电铸是一种利用电解作用获得金属“复制品”的方法。按照所要铸造的物件做成模型为阴极，并用复制所需的金属作阳极，一同放在金属盐电解液中，通以直流电。经过一定时间，在模型上沉积一层金属，去掉模型，就可得到形状与模型相同的金属复制品。电铸药型罩技术就是利用电解作用将所需金属沉积到药型罩形状基体上而获得所需药型罩的制造技术，即利用电铸工艺加工制造药型罩的技术。原理图见图 7.25。

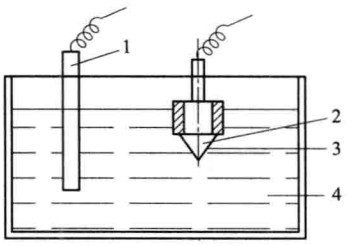


图 7.25　电铸药型罩原理图

1—预铸药型罩金属；2—罩芯模；3—沉积的药型罩；4—金属盐电解液

许多材料都可电铸，但相对来讲导电性好的材料电铸成型效果更好。电铸工艺既可用于制造单一金属药型罩，也可用于制造双金属药型罩，如铜—镍，铜—铝药型罩等。

电铸药型罩材质纯净，密度较高（电铸铜层密度为 8.92～8.93 g/cm^3），晶粒细密。电铸药型罩内表面是电铸而成，成型后不需要进行机械加工，表面粗糙度约为 Ra0.38 μm。电铸罩的外表面采用数控机床加工后，壁厚差小于 0.01 mm，所以电铸罩有较好的破甲性能，破甲稳定性也较好，并有一定的抗旋能力。因此，电铸加工药型罩是一种有发展前途的药型罩制造技术，特别适合形状复杂、尺寸较大的复合药型罩。

电铸工艺的工艺参数主要是：电解液浓度、电流大小、时间和温度等。目前需要解

决的问题：一是如何实现对电铸工艺参数的最优控制；二是如何提高生产率的问题，目前金属沉积速度较低，使得生产效率也低。

7.6 快速铸造技术

7.6.1 快速铸造技术的概念及优点

1. 快速铸造技术的概念

快速成型技术为实现铸造的短周期、多品种、低费用、高精度提供了一条捷径。快速成型技术与铸造技术相结合，产生了快速铸造技术。其基本原理是利用快速成型技术直接或间接制造铸造用消失模、模样、模板、型芯或型壳等，然后结合传统铸造工艺，快捷地制造铸件。快速铸造系统的组成如图 7.26 所示。

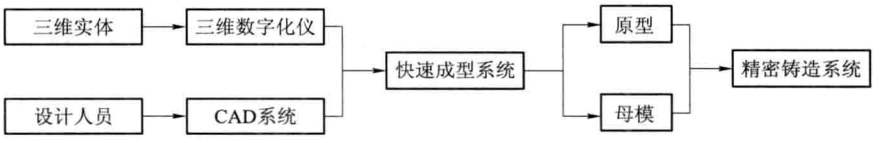


图 7.26 快速铸造系统示意图

2. 快速铸造技术的优点

快速铸造与传统铸造及计算机数控（CNC）机加工工艺过程的区别，如图 7.27、图 7.28 所示。

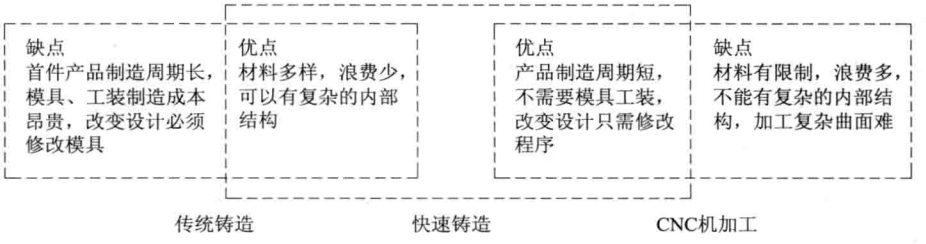


图 7.27 传统铸造、快速铸造和 CNC 机加工比较

快速铸造与传统铸造过程相比较，其优点在于：

(1) 适宜于小批量、多品种复杂形体的铸件。

(2) 尺寸任意缩放，数据随时修改，所见即所得。

(3) 工艺过程简单，生产周期短，制造成本低。

(4) 返回修改容易。

(5) CAD 三维设计，所有过程基于同一数据模型。

(6) 设计、修改、验证、制造同步。

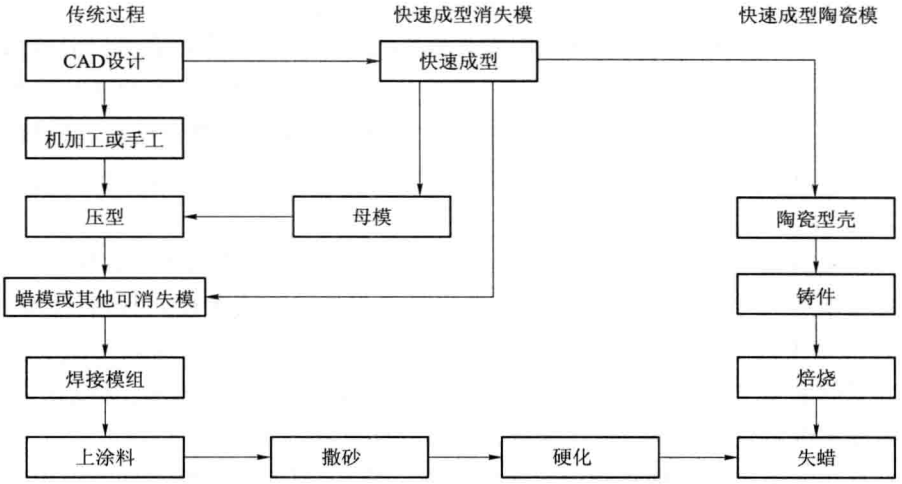


图 7.28　快速铸造与传统铸造过程比较

将快速自动成型技术与精密铸造相结合，能将 CAD 模型快速有效地转变为金属零件。它不仅能将过去小批量、难加工、周期长、费用高的铸件生产得以实施，而且将传统的分散化、多工序的铸造工艺过程集成化、自动化和简单化。这项技术的推广应用必将对日益增多的新产品的试制开发和单件小批量铸件的生产产生积极影响。

7.6.2　快速铸造技术的实现途径

如图 7.29 所示为快速成型技术在精密铸造中的应用。

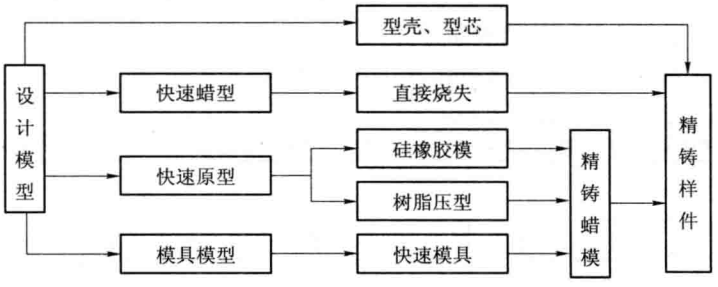


图 7.29　用快速成型实现快速铸造的方法

(1) 直接成型熔模铸造用蜡模或消失树脂模。利用熔化沉积成型（FDM）和选择性激光烧结（SLS）成型机，分别采用蜡丝或蜡粉，可以直接制造出合格的精铸用蜡模；利用立体印刷（SLA）、分层实体制造（LOM）、FDM、SLS 等工艺方法均可制造出消失树脂模，再用传统的精铸工艺，进行涂壳、脱蜡、焙烧等，得到铸造型壳用于精铸件的生产。对于树脂消失模，要采用高温闪烧法，迅速将树脂分解脱去。SLS 用树脂专用粉，如聚苯乙烯（PS）和聚碳酸酯（PC），具有分解温度低、残留灰分少、不涨

壳、精度高等优点，非常适宜于薄壁、复杂结构铸件的生产。

上述方法尤其适用于新产品开发时单件或小批量铸件的生产，它可以对收缩造成的尺寸误差进行校正，如果铸件成品的尺寸超差，可以立即对 CAD 模型进行修改，再做出第二件蜡模与树脂模。与传统精密铸造相比，解决了蜡模和消失模制造的瓶颈问题。这种方法尤其适用于形状复杂的单件或小批量的铸件生产，如飞机发动机叶片、叶轮等特殊件。

(2) 直接成型砂型铸造用砂型（芯）或木模。使用专用覆膜砂，利用 SLS 成型技术可以直接制造砂型（芯），通过浇注可得到形状复杂的金属铸件。利用 SLA、LOM、FDM、SLS 等工艺方法成型的树脂原型可以代替木模，不仅大大缩短了制模时间，而且快速成型的原型水平远比木模要高，强度和尺寸稳定性也优于木模。特别是对于难以加工、需要多种组合的木模，用快速成型制造的优点就更为突出。

(3) 直接成型陶瓷型精密铸造用陶瓷型壳（芯）。SLS 和三维打印（3DP）方法可以直接制得陶瓷型壳，用于精铸。这比起传统的精铸方法，省去了蜡型制作、压蜡、涂壳、脱蜡等多道工艺过程，是对传统铸造过程的重大变革，节省了大量的成本和时间。

SLS 技术以覆膜陶瓷粉为原料，通过激光烧结成型，可以将壳型的三维 CAD 模型，直接转换为陶瓷壳型，再配以浇冒口系统，进行精密铸造。型壳的厚度可取 5～10 mm。烧结过程中，非零件部分进行烧结，零件部分仍是粉末。烧结完成后，将成型型壳内松散粉末倒出，再经过固化处理就成为铸造用的型壳。

(4) 间接制造消失模或蜡模用模具。上述三种方法对于小批量生产非常有效，但对于大批量生产，用成型机逐个制造消失模、蜡模或陶瓷型壳，既不省时也不经济，所以不宜采用。但可以利用树脂原型作为母模翻制成消失模、蜡模、石膏模或陶瓷模，金属喷涂或硅橡胶模方法是常用的两种制造方法。

图 7.30 为硅橡胶—石膏型精密铸造工艺流程图。

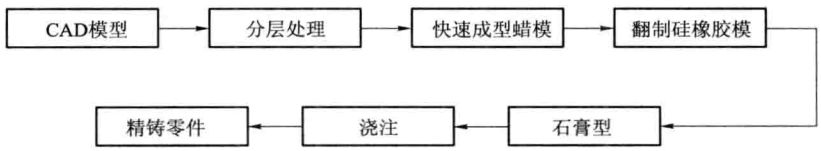


图 7.30 快速成型硅橡胶—石膏型精铸件工艺流程图

也可以利用 SLS 方法直接制造铸造用金属模具，其基本过程是：

(1) 将金属粉末用易消失性聚合物包覆，通过激光烧结得到金属黏结实体。

(2) 再将树脂在一定温度下分解消失，然后对成型的金属件在高温下烧结得到金属的烧结件，这种烧结件往往是低密度的多孔状结构。

(3) 渗入第二相熔点较低的金属后直接形成精密铸造用消失模、蜡模的金属压型或其他铸造金属模具。

目前，快速铸造技术是世界上工业发达国家都在研究的热点，特别适合于未来武器装备制造业中复杂零件的多品种、小批量研制及生产，如飞机发动机涡轮叶片、坦克发动机增压器叶轮等零件的制造。与传统的粉末冶金及机械加工的制造工艺相比，具有生产周期短、成本低的优势，并且可以灵活地改变设计方案，实现柔性生产。

国外利用选择性激光烧结技术（SLS）制造的金属模具已成功应用于铸造用模具的生产，模具寿命在数千件以上。

7.6.3　直接成型精铸用蜡模

以蜡粉为原料，利用 SLS 快速成型设备，可以方便快捷地直接制造出熔模铸造用的蜡模。用 SLS 直接制作铸造熔模无需传统压型就能生产出精铸件，对未定型产品试制过程中样件的制作有特殊的意义。

美国 Rorketdyke 公司利用此法制取了复杂六缸气缸体蜡模，然后结合熔模制造方法生产出了合格的铝合金精铸件。

下面以精铸蜡粉（PCP1）为例，对精铸蜡模的快速成型工艺进行介绍。

SLS 成型精铸蜡模的方法，快速成型精铸蜡模工艺流程如图 7.31 所示。

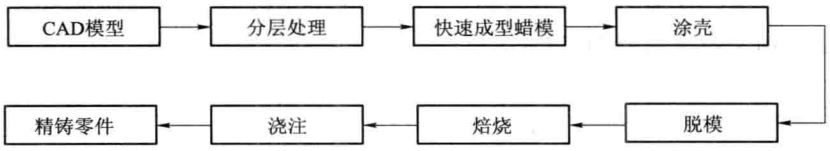


图 7.31　快速成型精铸蜡模工艺流程图

(1) 在计算机中建立要加工蜡模的三维实体 CAD 模型，然后用分层软件进行切片处理，得到每一加工层面的信息，并将其转化为电信号控制激光扫描系统工作。

(2) 在成型工作平台上铺设一层致密均匀的成型粉末材料，激光束在计算机控制下根据切片层面信息对成型粉末材料进行扫描烧结，被激光束照射的粉末熔化并在随后的冷却进程中黏结在一起，完成第一个层面的加工。

(3) 逐层铺粉，逐层扫描烧结，采用上述叠加成型法，最后制造出三维实体零件——蜡模。

7.6.4　直接成型铸造用消失树脂模

快速成型精铸蜡模的后续工艺与传统精铸工艺一样，但烧结成型的蜡模在精度和强度方面尚难以满足具有精细复杂结构铸件的要求，而用树脂制作的成型模强度比蜡模明显提高，可制作薄壁的熔模铸件。并且树脂模可以和浇口系统黏接，也易于进行表面修整，制壳过程与传统的蜡模制壳过程一样。利用 SLS、SLA、FDM 等方法均可制造消失树脂熔模，与蜡粉成型的蜡模相比，树脂模在制造小型、薄壁、复杂的高精度零件时

更具优势，但模料的脱除需采用高温焙烧汽化或高温燃烧法，成本高、环境污染严重。

美国 DTM 公司、北京隆源自动成型有限公司、华中科技大学及中北大学均开发出了低熔点高分子量的复合树脂粉，对精铸具有更好的适应性。已经利用上述方法直接成型了各种铸造熔模，为用户制作了包括叶轮、涡轮、泵壳体等各种精铸件，生产周期从 CAD 造型到铸件一般只需 2～3 周，大大缩短了铸件新产品的研制开发周期。

7.6.5 制造铸造用模样和模板

利用 SLA、LOM、FDM、SLS 等工艺方法成型的树脂或纸质原型可以代替木模，用做模样和模板，进行造型、制芯。美国福特汽车公司利用上述 LOM 技术制造出 685 mm 汽车曲轴模样，先分 3 块做，然后再拼装成砂型铸造用的模板，铸件尺寸精度达到 0.13 mm。

选用树脂粉末材料如尼龙粉，利用激光烧结快速成型技术制得原型模样或模板，再进行表面处理，如打磨或喷涂金属层，降低其表面粗糙度，然后便可直接在砂型铸造造型时使用，这样可大大缩短模样和模板的制备周期。

快速成型的树脂原型用于造型、制芯时，要求其与型砂不发生反应，且表面粗糙度要低，以便于分离。华北工学院开发的原型烧结粉（STP1）制作的原型经过浸树脂后处理，已成功用于制造芯盒和模板。

7.6.6 快速成型铸造用型壳（芯）

1. 直接成型铸造用型壳（芯）

利用 SLS 工艺，以反应性树脂包覆的覆膜陶瓷粉末为原料，可以直接成型铸造用型壳（芯），再结合传统精密铸造工艺，铸造金属零件，其工艺流程如图 7.32 所示。

图 7.32 快速成型陶瓷型精铸工艺流程图

（1）在 CAD 环境中，将设计好的零件三维实体模型直接翻成零件的反型，经过适当的处理并设计相应的浇冒口系统，即得到型壳的 CAD 图形。

（2）用激光束逐层烧结反应性树脂包覆的覆膜陶瓷粉，在烧结过程中，型壳部分成为烧结实体，零件部分仍是未烧结的粉末。

（3）烧结完成后，将壳体内部粉末清除干净，再在一定温度下使烧结过程未完全固化的树脂充分固化，就得到铸造用型壳。

（4）进行金属浇注，得到金属零件，一般用于低熔点金属浇注成型。

这种方法省去了传统陶瓷型精密铸造中又慢又费力的几道工序，如灌浆、结胶、起模、焙烧等，可以方便地进行大型厚壁件的精铸生产，是对传统铸造过程的重大变革。

这种方法的缺点是一次成型的陶瓷型壳（芯）只能制造一件铸件，不能用于批量

生产。

若用激光束直接烧结陶瓷粉末来制造型壳，因为陶瓷熔点很高，比热容又大，烧结时所需能量较大，大约是烧熔等量塑料所需能量的 10～20 倍，与直接烧结高熔点金属粉末成型所需能量相近，激光源的功率要在千瓦级以上。在陶瓷中加入对激光束能量吸收好的金属或非金属的氧化物制成复合陶瓷，可以在一定程度上降低对激光源功率的要求。

美国 DTM 公司和德国 EOS 公司均开发了上述制造陶瓷型壳的激光快速成型工艺。

国内，北京隆源自动成型有限公司利用快速成型的型壳进行了铝合金浇铸试验，型壳的强度、透气性和发气量均能满足要求，但表面粗糙度仍有待改善。

2. 间接成型铸造用型壳（芯）

利用快速成型的原型或模样间接制造铸造用型壳（芯），其工艺过程如图 7.33 所示。

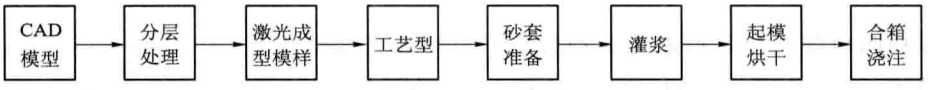


图 7.33　间接成型陶瓷型精铸工艺流程图

（1）利用快速成型方法制造树脂或纸质原型，作为模样；

（2）在模样四周粘 5～8 mm 的橡皮泥制成工艺型；

（3）充填水玻璃砂或黏土砂制造砂套；

（4）去掉工艺型，利用模样和砂套灌 5～8 mm 厚的陶瓷浆料，余下的空间用黏土砂填充，起模后焙烧型腔表面，制成陶瓷铸型（芯）；

（5）结合传统陶瓷型精铸工艺，起模烘干后进行合箱浇注，得到金属精密铸件。

7.6.7　直接成型铸造砂型（芯）

采用 SLS 工艺，用覆膜石英砂、锆砂等直接制造砂型，这是快速成型技术在铸造领域最具发展潜力的应用方向之一。其工艺流程如图 7.34 所示。

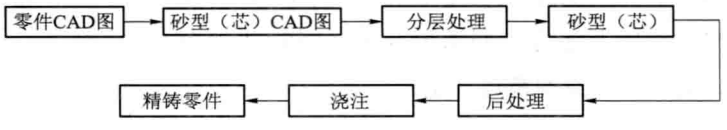


图 7.34　快速成型砂型（芯）精铸工艺流程图

覆膜石英砂和锆砂采用树脂做黏合剂（酚醛树脂或呋喃树脂等），砂型生产工艺如下：

（1）用激光束烧结石英砂或锆砂，通过熔化树脂来形成黏结实体。

（2）清理掉没有黏结的石英砂和锆砂，就做出了砂型原型。

（3）在热处理炉内对砂型原型进行烘烤，使黏合剂充分固化，得到高强度铸造用砂

型，结合传统的砂铸工艺或新型的电磁泵低压铸造技术，便可制得合格的金属铸件。这种方法尤其适用于大型复杂铸件的生产，用于新产品试制时单件或小批量铸件的制造，如航空发动机、坦克发动机缸体、缸盖等。由于激光能量只用来加热熔化黏合剂（树脂），所以对激光源功率要求并不高。

石英砂和锆砂在砂型铸造时的特点比较：

(1) 石英砂是应用最广、用量最大的用砂，资源丰富、价格低廉。存在的主要问题：热胀系数大，特别是 573 ℃相变时引起突然膨胀，使铸件易产生夹砂、变形等缺陷；铸型冷却能力弱，容易粘砂。它主要用来生产铸钢、铸铁件。

(2) 锆砂的耐火度高，激冷效果好，抗金属的渗透能力强，且易与各种黏合剂结合；热胀系数小，因而铸型尺寸稳定、准确；浇注后溃散好，铸件易清理。它尤其适用于大型复杂铝铸件的生产。

7.6.8 直接成型蜡模金属压型

以树脂包覆的金属粉末为成型材料，利用激光烧结快速成型技术，结合特定的后处理工艺，可以制造出蜡模的金属压型。具体制造过程如图 7.35 所示。

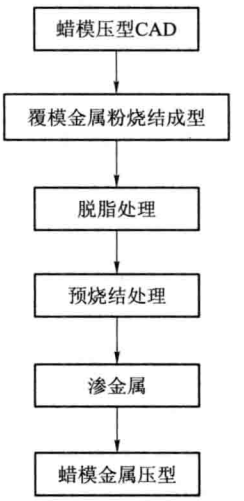


图 7.35 蜡模金属压型制造工艺

(1) 首先在 CAD 环境中，将设计好的蜡模三维实体模型直接翻成零件的反型，经过适当的处理，得到压型的 CAD 图形。

(2) 对覆膜金属粉，如树脂包覆的不锈钢粉进行激光逐层烧结成型，得到压型的原型件（Green Part）。

(3) 由于原型件中含有大量有机树脂，需在真空炉中经过脱脂处理彻底去除。

(4) 为了保证一定的连接强度，以便进行金属处理过程中不致被损坏，对脱脂件要进行预烧结，对不锈钢预烧结温度大约为 900 ℃。

(5) 在真空中对上述处理件进行渗金属（铜、锌均可），以提高其密实程度，再经过表面打磨、抛光处理，即可制得蜡模的金属压型。利用上述方法制备的压型，可以生产数十到数百件蜡模，适合小批量的精铸件生产。

7.7 铸造 FMS 技术

7.7.1 铸造 FMS 的概念

柔性制造系统（FMS）、计算机集成制造系统（CIMS）等作为目前世界上制造技

术最前沿的研究课题已为大家所熟知，它的高度集成、总体优化、足够柔性和最大效益等优势已受到世界各国的广泛重视。我国 FMS、CIMS 技术的研究也取得十分可喜的成果，在航空、航天、兵器、机械等行业中逐步得到应用，表现出良好的势头。

但是目前 FMS、CIMS 等先进制造技术主要还是局限于机械冷加工领域，热加工 FMS、CIMS 技术的开发研究还处于起步阶段。然而在一个机械产品或一种武器装备研制开发的过程中，通过热加工，特别是铸造生产提供零部件毛坯或直接提供最终形状的零件是一个很重要的阶段，成为整个产品开发、型号研制的“瓶颈”。正是由于目前热加工过程的高度刚性、生产方式和工艺技术的相对落后、生产工序的高度分散和信息集成度差等原因，不能及时提供合格的零部件毛坯，而使机械冷加工 FMS、CIMS 的优势得不到充分发挥，也严重地影响了产品开发和型号研制的速度。因而研究开发热加工领域，特别是铸造 FMS、CIMS 技术对提高我国的制造技术的整体水平就显得十分重要和迫切。

将快速成型技术、先进的制模与铸造技术，铸造工艺 CAD/CAE/CAM 技术相集成，构成了快速铸造柔性铸造系统，即铸造 FMS。该系统利用 CAD/CAE/CAM 分系统进行工艺过程仿真及工艺设计，应用快速成型及制模技术生产铸造用铸模、砂型（芯），根据并行工程的思想，在网络通信系统下实行信息集成和物理集成，整个集成制造系统在控制系统的管理下应用电磁泵低压铸造技术高效、快速地完成复杂铸件的研制及生产。该快速集成制造系统不仅具有先进性、实用性和示范性，并且具有可扩展性，在此基础上将其与冷加工 FMS 相集成，可以构成更高层次上的、功能更全的计算机集成制造系统（CIMS）。

7.7.2　铸造 FMS 的构成

1. 铸造工艺 CAD/CAE/CAM 分系统

铸造工艺 CAD/CAE/CAM 分系统是保证铸造工艺方案可行并优化铸造工艺方案的必备技术。近年来，提出把产品设计与制造过程设计 CAD/CAE/CAM 联系起来，在设计产品时不仅考虑其可使用性，同时也要考虑可制造性。而目前铸造 CAD、CAE、CAM 一般按各自方向分别研究，十分缺乏系统研究，这对铸造 CAD/CAE/CAM 一体化发展很不利，也不适应现代化产品设计方法，更不利于 CIMS 的建立。所以铸造工艺集成 CAD/CAE/CAM 研究势在必行。

（1）实现产品设计模型到铸件模型的转换。现代实体造型技术在产品设计中的应用越来越广泛，铸造工艺参数如分型面、拔模斜度和加工余量等的设计不再依靠蓝图，最有效的办法就是在三维铸件模型上进行设计。

（2）铸造工艺 CAD（补缩系统、浇注系统）最理想的办法就是在三维产品模型上进行工艺 CAD 设计。

（3）铸造过程数值模拟。对工艺 CAD 制定的工艺方案在计算机上进行“电脑试

浇”，模拟高温金属液的充型过程、凝固过程，确定铸造缺陷可能产生的位置，从而确定及优化工艺方案。

（4）工装设计（模样、模板、芯盒）及数控加工。一旦通过 CAD/CAE 确定工艺方案以后，可进行工装设计。工装设计也可在三维铸造工艺实体的基础上进行，之后通过数控加工中心或快速成型机加工出模样、模板和芯盒。

（5）集成 CAD/CAE/CAM 技术中关键的一项是产品数据交换及工程数据的共享研究，这是实现一体化的前提。

2. 物流分系统

物流分系统是铸造 FMS 的骨架，担负着传输工件任务，分布在快速成型机、制模设备及制造设备之间。物流传送由自动运输车结合人工传递方式，该系统重点放在解决制造信息的集成上，不追求物流系统的全面自动化。

3. 测量分系统

测量分系统以三坐标测量机为核心设备，建成满足铸造 FMS 技术要求的线内外检测系统，需解决的关键技术是：CMM 与 FMS 的物理集成技术、信息集成技术、CMM 与 CAD 工作站的信息转换技术、数据统计分析与处理技术。

4. 计算机控制分系统

FMS 控制体系一般采用分布式控制及递阶控制结构。递阶控制方式把系统的控制功能划分成若干层次，各层次分别进行独立处理，层与层之间保持信息交换，上层向下层传递命令，下层向上层反馈命令执行情况，同一层的协调由上层来完成。通过信息联系，构成完整的热加工 FMS。它的控制特点是面向控制结构，把复杂系统纵向分解为分层控制系统，减少了全面控制和开发的难度。

热加工 FMS 采用车间层、单元层、工作站层和设备层四层递阶控制结构组成的管理和控制体系。

车间层控制器执行计算机管理职能，在短期水平上组织车间生产；单元层控制器执行 FMS 管理职能，在日计划水平上安排单元生产；工作站层的基本功能是根据单元或车间的生产指令，监控任务的实施过程；设备控制器执行设备运行过程控制职能，实现实时控制，完成产品加工、运输、测量监控等任务，并根据要求反馈信息。

底层设备控制系统一般为 PLC 和 CNC 控制，底层设备控制器与上位计算机的通信连接是实现 FMS 信息集成的技术关键，整个分级控制系统以网络作为支持。

5. 网络通信系统

网络系统的任务是采用适当的网络协议，通过必要的硬件连接和软件系统设计，将整个热加工 FMS 系统连接成一个有机整体，实现递阶控制要求。

在网络通信中通常采用以下三种通信协议：MAP 协议、以太网和 TCP/IP 协议及 CCP 协议。若在一个系统控制层间采用不同的通信协议，则存在网际互联问题，通过采用网关（Gateway）技术来实现不同协议的转换。

6. 快速成型及制模分系统

以蜡粉、树脂粉、覆膜金属粉、覆膜陶瓷粉及覆膜砂为成型材料，应用激光烧结快速成型技术，可以快速制造铸造用模样、压型、砂型（芯）等。

7.7.3　铸造分系统

利用快速成型方法制造的铸模，结合先进的铸造工艺技术，如熔模铸造、陶瓷型铸造及电磁泵低压铸造技术，来生产高质量的铸件。

电磁泵低压铸造工艺（Cosworth Process，CP）采用锆英树脂自硬砂组芯造型，在可控压力下充型，巧妙地将铸件的精确成型过程与内在质量控制结合在一起，具有以下特点：

（1）锆英砂颗粒细、耐火度高、热膨胀小、热容量大，其冷却速度与金属相当，制得的砂型（芯）准确，得到的铸件内在组织致密、质量好。

（2）金属液取自液面以下未氧化的纯净铝（镁）液，由计算机控制电磁泵驱动铝（镁）液从铸型底部注入，上升平稳，卷气夹渣少，铸件在可控压力下结晶凝固，因而组织性能优良，铸件壁厚均匀，尺寸精度高，加工余量为 1.5～2.0 mm，质量比普通砂型铸造轻 10%～20%。

（3）该工艺尤其适合于薄壁高强度铝、镁合金铸造，如发动机缸体、缸盖、增压器叶轮等。

英国 Cosworth 铸造公司采用电磁泵充型系统专门生产一级方程式赛车铝合金发动机；美国的 Novecast 公司采用电磁泵充型的低压铸造技术生产各种铝铸件；苏联各国采用电磁泵充型低压铸造工艺生产火箭罩壳。世界许多国家都在采用该工艺技术生产高性能缸体、缸盖，如美国、英国、韩国、澳大利亚等。

国内对该项技术的研究及应用刚刚起步，华北工学院铸造工程中心从乌克兰引进了国内第一台电磁泵低压浇注系统，开发了电磁泵低压铸造技术，已成功应用于坦克发动机铝铸件的生产。

7.7.4　铸造 FMS 的工艺路线

铸造 FMS 的工艺路线及最终目标如图 7.36 所示。

7.7.5　铸造 FMS 的应用方向

铸造 FMS 技术可以满足形状复杂、精度要求高的单件或中、小批量的铸件的生产。该项技术可以在国防工业中得到广泛应用，特别适合于飞机、坦克、装甲车、导弹及精密武器中关键复杂零件的研制及中、小批量生产，如喷气发动机涡轮叶片、坦克传动箱、发动机及微观夜视仪、导弹发动机等复杂零件的生产。该先进制造系统可以显著提高试制水平，大幅度降低废品率及缩短试制准备周期。

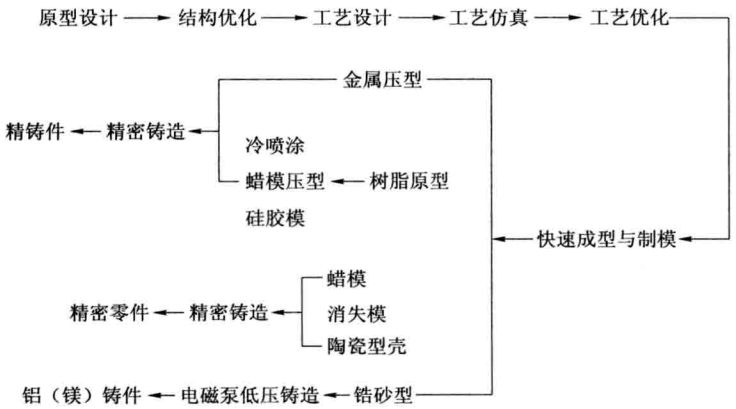


图 7.36 铸造 FMS 工艺路线及最终目标

在民用领域，可广泛应用于机械、汽车、电子、计算机、医疗器械等制造领域，用于形状复杂的零部件及模具的研制和生产。

第 8 章　弹箭零件的机械加工

工艺规程是指导生产的技术文件，机械加工工艺规程包括零件加工的工艺路线、各工序的加工内容、切削用量、技术要求、检验方法、工时定额及所采用的设备、工艺装置等。

8.1　弹体的机械加工

8.1.1　弹体的作用与结构特点

弹体是炮弹与火箭弹的主要零件之一，其加工质量直接影响炮弹与火箭弹的作战性能、弹体强度及射击密集度。

弹体的内外表面是大曲率圆弧及直线构成的回转体表面，具备良好的气动外形，可以减少炮弹与火箭弹跨、超音速飞行时的阻力，满足外弹道性能要求。弹体的前后端分别是弹口引信螺纹及弹底螺纹，分别与引信、底部装置或燃烧室连接（如 107 mm 火箭弹与连接底螺连接），药室内装炸药。在弹丸飞抵目标的瞬间靠引信作用引爆，以达到各种作战目的。

目前各类炮弹与火箭弹正向一弹多用途方向发展。对炮弹而言，针对不同的目标，可配用不同的弹丸；对火箭弹而言，同一种发动机可装配不同用途的战斗部，分别对目标进行杀伤、爆破、破甲、燃烧、布雷、扫雷等各种作用。如杀爆燃火箭弹、钢珠火箭弹、火箭子母弹、火箭布雷弹及火箭扫雷弹等，都通过改变战斗部结构达到不同的作战目的。

弹体的结构形式分整体式弹体、连接底螺结合式弹体及后装药式弹体等。

8.1.2　弹体加工的技术要求

弹体加工要保证弹体的尺寸精度、表面形状、相互位置精度及表面粗糙度达到产品图及技术条件的要求。

弹体各表面间相互位置精度，主要是指内外表面之间、外表面各部位之间的同轴度要求和装配基面与弹体轴线间垂直度要求。控制不同轴度误差主要是限制两表面轴心线间偏移量 e 的大小。

弹体内外表面之间的轴线偏移量 e 可用壁厚差的数值判定，即：

$$e=\frac{t_{\max}-t_{\min}}{2}$$

式中 t_{max}——弹体某横断面的最大壁厚，mm；

t_{min}——弹体同一横断面的最小壁厚，mm。

弹体表面粗糙度：外表面除定心部外，一般均为 $Ra6.3\ \mu m \sim Ra3.2\ \mu m$；内表面，有些为不加工药室，而有些为 $Ra6.3\ \mu m \sim Ra3.2\ \mu m$；定心部表面粗糙度要求较高，小口径弹体为 $Ra1.6\ \mu m \sim Ra0.8\ \mu m$，大口径弹体多为 $Ra1.6\ \mu m$。

8.1.3 弹体的机械加工

炮弹与火箭弹弹体的种类很多，不同弹种的弹体在结构上有一定的差异，即使同一品种的弹体随其口径、战术技术指标要求、所选毛坯种类等不同，其结构也有一定差异，但它们均属于回转体零件。除有些穿甲弹弹种的弹体为实心杆件外，其余各类弹体均为筒式零件，这就决定了弹体的加工方法与加工过程基本相同。各类弹体的加工内容大致分为外表面加工、药室内弧及螺纹加工等。为了保证弹体的药室形状，工艺安排有收口前的粗加工工序。锻造毛坯及钢管收口毛坯与热引伸收口毛坯的加工工序大体相同。热冲冷拔及旋压精化毛坯只对螺纹及装预制破片的内孔部位进行加工，其药室的内形及外形在毛坯的加工阶段已经形成。

弹体的加工工序还包括称重检验及其他辅助工序等。

1. 弹体的加工特点

弹体的加工主要是对内外表面及螺纹的加工，这里只介绍内外表面的加工特点。

弹体的内外表面是由大曲率圆弧与直线相接（相切或相交）而成的回转体表面；内外表面的形状是用车削方式，通过靠模及成型刀具来满足产品图要求的。为获得正确的表面形状及内外表面的位置精度，必须设计靠模，并正确地安装和调整靠模与工件的相对位置。靠模一般安装于床身的尾部或后部，对于液压仿形车床，靠模则安装在床身的上方。靠模可以为板状或圆柱状。

由于弹体的外弧形中心线是内弧形中心线及两端螺纹中心线的基准线，所以在编制弹体的加工工艺时，应首先加工外弧形，并在以后的加工工序应以外弧形表面作为精基准进行内弧形及两端螺纹的加工，以保证产品图同轴度的要求，并可减少加工误差，提高各表面的位置精度。

考虑弹体各部位尺寸精度要求较低，质量散布较大，为保证弹体的质量公差，工艺应尽量采用产品图的中间尺寸进行加工，并安排修重或修弧工序。

弹体结构简单、刚性好，尺寸精度及粗糙度要求都不高，所以具有较好的加工工艺性。

2. 弹体加工

主要加工工序及加工中有关技术问题的处理做以下介绍。

(1) 弹体的外表面加工。用车削方法，借助靠模来获得符合产品图要求的弹体外形。外形加工方案的选择及加工工序的安排与所选毛坯的种类关系较大。精化毛坯的弹

体外形在毛坯的冷拔伸或旋压等过程中已经形成，外表面无需加工；热冲压和热收口毛坯，为了切除余量，消除壁厚差，其外表面加工一般由粗车及精车外形两道工序完成。粗车外弧形是为了切除毛坯余量，消除收口过程中形成的壁厚差。精车外形是为了获得产品要求的尺寸精度及正确的弹体形状。

外弧形加工大都选用功率大、刚性好的液压仿形车床。粗车外弧形的夹紧方法与定位基准的选择，根据弹体的不同结构，其方法也各不相同。107 mm 火箭弹弹体的粗车及精车外形均以毛坯的内孔圆柱表面作为夹紧定心基准，以中心孔为辅助定心基准，以毛坯底部端面为轴向定位基准。130 mm 火箭弹的弹体则以小端口部内孔作为夹紧定心基准，以大端定心桩的中心孔为辅助定心基准，以小端口部端面作为轴向定位基准。由于上端口部内孔直径较小，而弹体的外圆直径较大，且毛坯加工余量及壁厚差也都较大，因此，在切削过程中夹具承受着较大的切削力矩，夹具损坏严重。为此改为以弹体大端的外圆柱表面作为夹紧定心基准，以小端口部作为辅助定心基准，解决了夹具损坏严重、工件装夹困难的问题。

精车外形工序是保证弹体获得产品图规定的尺寸精度、几何形状、粗糙度及位置精度要求的一道重要的加工工序。精车外形面作为以后工序的夹紧定位基准，以获得产品图及技术条件所规定的同轴度要求。

弹体外形是通过靠模获得的。但由于靠模安装不正确及加工中靠模窜动或者其轴向相对位置窜动，从而影响弹体壁厚差及质量，为此工艺上应采取必要措施防止靠模窜动，靠模固定后划出刻线，定期检查，并设计全形规，检查弹体内外形状及位置。

(2) 弹体的内表面加工。弹体的内表面包括内表面的圆柱部及内表面的弧形部。弧形部在弹体的收口工序及旋压等过程中已经形成，故机加工艺不安排内表面加工工序。对于热收口毛坯需按规定，检查内表面规定位置的直径尺寸、壁厚差及弹体质量，对于超差及超重工件应进行修正，故工艺安排有修弧或修重工序，修弧产品的数量一般不应超过工件总数量的 30%，否则就应检查收口工序的加工质量。

为保证内表面具有正确的弧形，修弧工序设计有靠模，修弧或修重时应按靠模进行内弧形加工并保证与未加工表面圆滑过渡。操作时按工艺规定的测量位置进行修正以及对可能造成弹体内表面形状不规则的残留尖棱、毛刺等进行修整，以免影响弹丸与战斗部的装药质量与装药安全。热冲压收口毛坯收口前的粗加工工艺安排有加工内底工序，目的是去除热冲压过程中形成的氧化皮、非金属夹杂及药室底部的滑动锥体，保证弹体底部强度，形成符合产品图要求的几何形状。加工药室采用成型刀具，刀具复磨后必须经专职检验人员检验合格后方可使用。例如，对 107 mm 火箭弹弹体的内表面加工时，由于内弧形状结构尺寸的限制，内表面加工可分作两段进行，即用成型镗刀镗削药室底部，并用普通镗刀借助靠模精镗削 ϕ75D8 圆柱表面及相邻近的一部分弧形表面。为保证加工质量，使两种刀具加工相接处平缓过渡，没有尖棱、毛刺及高度超过 0.3 mm 的凸台，工艺应使粗、精镗工序选择完全相同的夹紧定心基准及轴向定位基准。

107 mm 火箭弹弹体的外表面加工同样存在内外表面相对位置窜动问题，所以必须合理地选择加工基准，正确地安装与调整靠模的轴向位置。为保证夹具系统具有足够刚度，有时也在弹体的加工工序采用中心架支撑，并选用大主轴孔机床，从而提高了夹具系统刚度，有利于产品质量的提高。

(3) 弹体的螺纹加工。螺纹加工是弹体加工的一道关键工序。弹体螺纹包括弹口引信螺纹及大端螺纹，其加工过程如下：

车削备制螺纹直径 → 车削螺纹支撑端面 → 车、铣螺纹等

由于螺纹加工质量直接影响产品的装配质量、弹体强度及炮弹与火箭弹的散布精度，所以在产品图及技术条件中除对螺纹尺寸提出要求外，同时对螺纹的垂直度提出了小于 0.2 的要求。螺纹垂直度误差反映在产品上，表现为螺纹结合处出现单面缝隙，故工艺上规定了用塞尺检查单面缝隙的方法来控制螺纹垂直度误差，从而保证全弹摆差的要求。

① 弹口引信螺纹加工。弹口引信螺纹可采用车削方法，也可采用铣削方法。也曾分别采用苏式 KT35 及 TP3 半自动螺纹车床进行弹口引信螺纹加工，生产效率高。刀具采用硬质合金刀片，不需冷却、润滑，使用寿命长，操作方便。这是一种较为经济、方便的加工方法。但应注意刀具的安装与复磨，否则将影响螺纹加工质量。

铣削螺纹是弹口引信螺纹普遍采用的一种加工方法。铣削螺纹的优点是操作方便，可实现半自动或自动化生产，螺纹加工质量高。但螺纹铣床结构复杂，调试困难，铣刀制造周期长，铣削过程中要对螺纹铣刀进行冷却润滑，刀具复磨也较困难，因此限制了铣削方法的广泛应用。为解决弹口引信螺纹加工问题，在普通车床上安装一套附加装置——旋风头，用旋风车削方法加工弹口引信螺纹生产效率高，加工成本低，具有一定的推广价值。

螺纹加工及车削备制螺纹直径工序都以弹体外表面为定心基准，以弧形部为轴向定位基准，采用顶紧式夹紧方式，这种夹紧方法能够保证弹口引信螺纹与外弧形部的同轴度及弹口端面与引信螺纹的垂直度。

② 大端螺纹加工。弹体的大端螺纹，根据弹体的结构形式分大端外螺纹及大端内螺纹。大端螺纹加工大都选用精度较高的普通车床、硬质合金刀片，手工操作。由于螺纹较短，退刀槽宽度较小，因此操作比较困难，需配备技术较高的操作工人。也有在产品试制阶段选用 SB8918 型半自动螺纹车床加工大端螺纹，以减轻操作人员的劳动强度，但此设备调试困难，螺纹质量不易保证，因此限制了该机床的广泛应用。弹体大端螺纹加工与车削备制螺纹直径都是以弹体外圆柱面为夹紧定心基准，以外弧形部为辅助定心基准，以弹口引信螺纹口端面为轴向定位基准。基准选择合理，可以较好地保证大端螺纹对弹体外形的同轴度及螺纹的垂直度要求。

加工中，螺纹质量的检查应在机床上进行，否则对尺寸超差的产品就很难修复。为保证螺纹的加工质量，减少螺距累积误差，工艺上应设计磨刀样板及刀具安装时的对刀

样板，配备专职刀具检验人员。

弹体的机械加工还包括：毛坯收口前的粗加工、称重、修理、钻扳手孔及其他辅助工序等。

8.2　燃烧室的机械加工

8.2.1　燃烧室的作用与结构特点及加工的主要技术要求

燃烧室是火箭发动机的重要零件，燃烧室内装有推进剂，为火箭弹的飞行提供动力。其结构特点可以归纳为身长壁薄、两端带有螺纹的圆筒形旋转体。燃烧室两端外表面是定心部，在火箭弹发射时与发射器定向管内壁接触，起着确定射击方向的作用。燃烧室的加工质量直接影响火箭弹的内弹道性能、飞行状态及使用安全性。

燃烧室的尺寸精度及表面粗糙度除定心部要求较高外，其余部位均要求较低，从而缓解了燃烧室因身长壁薄、易产生变形带来的加工难度，为火箭弹大批量生产创造了条件。

燃烧室机械加工的主要技术要求如下。

(1) 对燃烧室同轴度的要求。燃烧室同轴度是指圆柱部对内孔、对定心部的同轴度。圆柱部对内孔的同轴度误差表现在产品上为燃烧室壁厚差。壁厚差的存在将直接影响发动机的强度，影响火箭弹在全弹道的飞行可靠性与安全性。同时在很大程度上将影响发动机的推力偏心，从而影响火箭弹的散布精度。

圆柱部对定心部的同轴度误差，只要工序安排合理，定心基准选择正确，一般是可以保证的。此外，产品图上规定了燃烧室两端螺纹轴线对两端定心部轴线同轴度误差的要求，工艺上采用以两端定心部为支撑，在距工件端面规定的位置检查螺纹量规凸台的摆差来测量同轴度误差。该同轴度误差直接影响全弹摆差，从而影响全弹的散布精度，所以两端螺纹对两定心部的同轴度误差必须控制在产品图允许的范围之内。

(2) 对燃烧室两端螺纹垂直度要求。燃烧室两端螺纹对燃烧室端面的垂直度为 0.2，该垂直度误差表现为螺纹量规支撑端面与燃烧室端面之间的单面缝隙，所以工艺上采用检查螺纹支撑端面单面缝隙的方法来检查燃烧室两端面的垂直度。

由于燃烧室前端螺纹垂直度误差影响全弹摆差，后端螺纹垂直度误差影响推力中心与弹体轴线的一致性，所以燃烧室两端面的垂直度误差直接影响火箭弹的散布精度。为满足产品图对燃烧室两端螺纹垂直度的要求，工艺上应选择合理的定心、定位基准，在螺纹加工工序及车端面工序对机床夹具精度提出较高的要求。

(3) 对燃烧室最小壁厚及质量的要求。发动机工作时燃烧室内腔承受着巨大内压力，所以，燃烧室壁厚直接影响弹体发射强度及使用安全，各类火箭弹都规定了燃烧室

的最小壁厚，最小壁厚一般靠控制燃烧室内外径来保证。

由于燃烧室壁厚尺寸较小，各部尺寸精度要求较低，按产品图给定的尺寸精度加工成的燃烧室成品，其质量往往超过图定值，所以产品图规定了对燃烧室质量误差的要求。当燃烧室质量误差与尺寸公差发生矛盾时，则需修正线性尺寸以满足质量要求。因此燃烧室各加工工序尺寸应压缩公差范围，按产品图规定的中值尺寸加工。

8.2.2 燃烧室的机械加工

1. 燃烧室的加工特点

燃烧室毛坯多为热轧无缝钢管或冷拔、旋压精化毛坯，一般燃烧室具有较好的工艺性。由于各部位尺寸精度要求不高，结构形状简单，只要合理地安排工序顺序，正确地选择定心、定位基准及夹具精度，就可以满足产品图及技术条件的要求。但火箭弹燃烧室属薄壁筒形件，系统刚性较差，零件壁厚较薄，内孔较深（如 90 mm 航空火箭弹燃烧室身长为 650 mm，壁厚为 2 mm）且镗孔时受零件内径限制，刀杆细长，所以车削中的切削振动、切削力及夹紧力都很容易导致工件变形，给燃烧室加工带来一定困难。目前，对燃烧室加工都有成熟的工艺。

针对燃烧室的结构特点及有关技术要求，燃烧室加工大体可分为粗加工阶段及精加工阶段，或者可分为外圆加工阶段及内孔加工阶段。精制毛坯的内外圆不需加工，只需安排定心部及螺纹的加工及其他一些辅助工序。燃烧室热处理工序安排在下料后机加前进行，在以后的加工中不再进行热处理。

由于燃烧室形状简单且尺寸精度要求不高，所以机加工序所选用的设备大都为普通车床。车外形工序可选用液压仿形车床，镗孔工序则选用长床身的 C630 型普通车床。

薄壁管加工时，切削振动是影响加工质量的一个重要因素。为避免加工中的切削振动，在条件允许的情况下应尽量增大镗刀杆的截面尺寸，并应安装牢固。

燃烧室加工工艺上安排了工序检验及全检，为检查材料缺陷，考核燃烧室强度，在燃烧室加工工序后部安排了水压试验及探伤工序。

对燃烧室的加工要求，首先应选用精制毛坯以降低材料消耗，在加工工艺方面应采用数控技术，选用数控车床、加工中心等新技术、新设备，有利于提高生产效率，降低劳动强度，以适应火箭弹大批量生产的要求。

2. 燃烧室加工

(1) 燃烧室的外表面加工包括燃烧室圆柱部及两端定心部加工，其加工工序可分为粗车外圆、精车外形及定心部。粗车外圆及精车外形工序都是以加工过的两端内孔为定心基准，以两端内侧面作辅助定心基准，以两端面为轴向定位基准，这样可以较好地保证外表面轴线对两端面的垂直度。粗车外圆的目的是切除毛坯的大部分余量，为后道工序加工创造条件。精车外形的目的是达到产品图对圆柱部尺寸精度及粗糙度要求，获得

定心部对圆柱部的平滑过渡表面，为定心部的精加工留有适当的加工余量。精车外形是通过安装在机床上的仿形靠模来获得外表面形状及直径尺寸的，靠模加工有利于保证各加工表面的同轴度及轴向尺寸。靠模加工应特别注意靠模的安装，保证靠模与机床轴线的平行，并应具有正确的位置，防止工件加工中的靠模窜动。

定心部是燃烧室的重要部位，其尺寸精度及表面粗糙度都有较高要求，是燃烧室加工的一道关键工序。为防止变形及定心部的损伤，定心部加工一般都安排在燃烧室加工工序的后部工序。定心部加工是以两端内孔侧向为定心基准，以两端面为轴向定位基准，加工中工件不需调头，一次装夹完成两端定心部的加工，有利于保证两端定心部轴线同轴度。107 mm 火箭弹燃烧室定心部加工是以圆柱部为定心基准，与螺纹加工基准一致，有利于满足螺纹轴线对定心部轴线同轴度要求。

燃烧室外表面加工所选用的设备大都为精度较高的普通车床，也可选用液压仿形车床。

(2) 燃烧室内孔是中间带有凹槽的通孔或不通孔，对于非精制毛坯，镗孔工序是燃烧室加工工作量较大的一道工序。热轧无缝钢管由于钢管生产时只控制外径和壁厚，所以内孔形状误差及尺寸误差波动较大，给燃烧室加工带来了困难，为保证内孔加工的尺寸精度及表面粗糙度，保证内孔对外表面的同轴度，消除壁厚差，工艺上大都分为粗镗孔和精镗孔两道工序完成对燃烧室内孔凹槽的加工。有时增加半精镗孔工序，以保证燃烧室的图定要求。

镗孔工序大都选用普通车床及整体夹具或者分离式蝶形夹具。加工中夹具转动偏心是影响燃烧室加工质量的一个不可忽视的重要因素。为解决燃烧室镗孔工序的加工质量问题，应选用大功率与大主轴孔机床，将夹具安装在大机床主轴孔内，进行镗孔以保证加工质量。

由于燃烧室内孔较深，刀杆截面尺寸较大，因此镗孔时凹槽内滞留过多的铁屑常常划伤内孔表面，所以工艺上应考虑镗孔工序的排屑问题，合理地选择刀具几何角度。

为提高刀具寿命，保证加工表面粗糙度，在燃烧室镗孔工序选用乳化液进行刀具冷却与润滑。

(3) 燃烧室前后端螺纹分别与战斗部及喷管组件或弹尾连接，螺纹的加工质量直接影响全弹的装配质量及使用安全，因此产品图及技术条件对燃烧室的前后端螺纹规定了两端螺纹轴线同轴度、端面垂直度及螺纹精度等要求。

燃烧室两端螺纹必须保证其连接可靠性。影响螺纹连接质量的一个重要原因是螺纹的中径误差，为减少螺纹的中径误差，工艺上应尽量将螺距的累积误差及牙型半角误差控制在最小范围内。

燃烧室前后端螺纹大都为标准细牙螺纹，也有些火箭弹选用了特种螺纹及锯齿形螺纹。

螺纹加工属燃烧室的精加工工序，所以工艺上一般安排在燃烧室加工之后、水压试

验之前进行。为保证螺纹的加工质量，应选用精度较高的加工机床，正确安装螺纹刀具，工艺上应设计刀具安装用对刀样板及磨刀样板，并配置专门的磨刀人员、刀具检验人员和熟练的操作工人，实践证明这是提高螺纹加工质量的基本保证。

加工燃烧室螺纹，有的工厂采用数控机床，这是燃烧室螺纹加工的方向。

目前，对燃烧室的螺纹加工大都采用精度较高的普通车床和硬质合金刀具，手工操作。今后，火箭弹的螺纹加工应设计出既能满足螺纹加工质量、自动化程度又较高的专用机床，以适应火箭弹大批量生产的需求。

(4) 关于燃烧室机加变形问题。燃烧室毛坯多为热轧无缝钢管及冷拔、旋压毛坯。燃烧室的最终壁厚较薄，若夹紧方式或夹持位置不当，容易造成加工变形，这是燃烧室加工的一个关键性技术。

燃烧室两端长短螺纹对定心部有同轴度要求，从理论上分析燃烧室的螺纹加工应以定心部为定心基准较为合理。但由于壁较薄，上道工序的变形会造成后道工序的重复变形，以至造成最终尺寸超差。为此在燃烧室的车削备制螺纹直径及螺纹加工工序时，将夹紧位置设计在距定心部一定距离的圆柱上。这样可避免燃烧室两端螺纹的加工变形，但使用这种夹紧方式应适当提高机床夹具精度。

针对燃烧室壁薄、易产生变形的技术关键，采取了不同的技术措施。除合理地安排工件使所受的夹紧力尽量均匀分布，以减少工件因装夹变形引起的几何形状误差外，精加工工序所选用的夹具也应尽量采用弹性夹管或涨胎夹具，必要时可增加辅助支承以增强工件刚性，尽可能地避免径向夹紧，而采用轴向夹压方式夹紧工件。实践证明，采用上述措施可避免至少可减少燃烧室的机加变形。

(5) 燃烧室的磁力探伤。磁力探伤是一种用于检验燃烧室材料表层裂纹、夹杂、折叠及其他破坏金属连续性缺陷的一种检测方法。

磁力探伤的原理是利用金属材料在磁场中被磁化，缺陷处产生漏磁，磁性铁粉聚集成与缺陷形状、大小都很相似的磁痕，从而显示出金属缺陷的现象。磁力探伤的操作程序是接通磁化电流将工件磁化，在工件表面浇洒磁性铁粉，然后目测，仔细观察被磁化工件磁粉分布情况，对于显示出金属缺陷的产品应予剔除。经磁力探伤的工件需擦拭及退磁。为了保证燃烧室的加工质量，正确判断材料缺陷，磁性悬浮液的配制必须符合规定要求，使用前应搅拌均匀，并应定期更换。探伤前应利用标准缺陷样品，对探伤机及磁性悬浮液进行鉴定，鉴定合格后方可使用。

(6) 燃烧室的水压试验及水压试验后的残余变形。为考核燃烧室壁及连接螺纹强度，要剔除工件贯通性缺陷及其他影响燃烧室强度的疵病，使燃烧室在最大工作压力下壁不开裂，保证发动机正常工作，全弹不解体，完成预定任务。在燃烧室机加完成后(制驻螺孔前)，工艺上都安排有燃烧室的水压试验。在生产过程中应100%地进行水压试验。水压试验是在专用水压试验机上进行，燃烧室两端与试验机上的螺纹胎具密封连接，燃烧室腔内充满液体，试验压力应逐步上升到规定值。各种火箭弹燃烧室水压试验

压力大小及持续时间长短，都在产品图及技术条件中有明确规定。为保证燃烧室强度具有一定储备系数，其试验压力都超过发动机的正常工作压力（一般是在发动机工作压力上增加 10%的余量）。

水压试验时，燃烧室内因承受较大压力而产生变形，个别工件可能出现液体渗漏。当变形超出技术条件规定或表面有水渗透时，应视为该工件强度不足或工件存在金属缺陷予以报废。燃烧室技术条件中规定：在燃烧室的规定部位测量燃烧室水压试验后的残余变形量，其残余变形值一般应小于 0.1 mm。但通过对燃烧室水压试验前后残余变形量大量的测量数据表明，除个别产品外，大部分产品的残余变形量都小于 0.1 mm，因此，在生产定型后的生产中一般不再进行水压试验前后残余变形量的测量，而是用卡规检查规定部位的尺寸，尺寸合格则认为残余变形量未超过规定值。

大部分产品在生产定型后采用了以卡规检查定心部的方法，取代了残余变形的测量。由于水压试验受金属材料、热处理强度等多种因素的影响，因此仍有一定数量的产品水压试验后其残余变形量超过规定值，致使一部分产品报废。

8.3　喷管的机械加工

8.3.1　喷管的结构特点

喷管是火箭发动机的一个重要零件，它以螺纹或其他方式与燃烧室等零件连接，构成火箭发动机本体。

发动机工作时，燃烧室内产生高压、高温燃气流通过喷管迅速喷出，产生巨大的轴向推力及旋转力矩，保证火箭弹正常飞行。所以喷孔尺寸精度、位置精度及喷孔的粗糙度直接影响火箭弹的飞行状态及散布精度。在发动机的结构形式确定之后，喷管的加工质量将直接影响火箭弹的弹道性能，因此，提高喷孔的加工质量对保证火箭弹的弹道性能极为重要。

喷管的结构形式有：单喷孔喷管、多喷孔喷管等，多喷孔喷管又分为整体式喷管、镶嵌式喷管及组合式喷管等。按喷管材料又可分为钢质喷管、石墨衬套喷管、碳纤维衬套喷管、玻璃钢衬套喷管以及其他合成材料喷管等。

任何喷管的喷孔都是由收敛段、喷喉及扩张段构成。

涡轮式火箭弹喷管是由多个倾斜喷孔构成，喷孔轴线与喷管体轴线沿其喷孔分布圆成切向倾角，均匀分布。构造复杂的倾斜喷孔给喷管的加工带来一定困难，所以可以认为喷孔加工是火箭弹生产最为复杂、最为关键的工序。

尾翼式火箭弹喷管大都为单喷孔直喷管，可以分为整体式单孔喷管及组合式单孔喷管，喷管与稳定器等零件组合成弹尾，是火箭发动机的一个重要部件。

8.3.2 喷管的尺寸精度及主要技术要求

喷管是火箭发动机上一个形状特殊、结构复杂的零件，所以喷管的尺寸标注及技术要求较为特殊，喷管具有其他弹体零件所没有的特殊要求。

以涡轮式火箭弹喷管为例，简述喷管的尺寸精度及主要技术要求如下。

(1) 喷管的尺寸精度及表面粗糙度要求。喷管加工分为喷管体加工及喷孔加工，喷管体的尺寸精度及表面粗糙度要求都不高，而喷孔的尺寸精度和表面粗糙度则要求较高，尤其喷喉的尺寸精度和表面粗糙度要求更高，所以喷孔加工是喷管加工的关键工序。

(2) 喷孔的位置精度。喷孔的位置精度是指喷孔分布圆中心对喷管体轴线的同轴度，各喷孔在其自身分布圆上分布的均匀性及喷孔轴线的切向倾角、喷孔本身三段（收敛段、喷喉、扩张段）的同轴度等。此外喷孔分布圆的自身误差也影响喷管的位置精度。不同类型的火箭弹，其位置精度要求也各不相同。

喷孔分布圆是喷孔轴线与入口端截面或出口端截面的交点所确定的圆，喷孔分布圆中心就是发动机工作时推力的合力中心。喷管用螺纹与燃烧室连接，螺纹的轴线就是弹体的轴线，即是弹体的质量分布中心。如果喷孔分布圆中心与螺纹轴线不同轴，就意味着推力中心与弹体质量中心不重合。因此，在发动机工作时就必然要产生推力偏心，直接影响火箭弹的散布精度，所以喷孔加工必须严格控制分布圆中心与螺纹轴线的同轴度误差。工艺上应以螺纹或螺纹外径为定心基准进行喷孔加工，这样有利于保证喷孔中心圆与螺纹轴线的同轴度。

喷孔的收敛段、喷喉、扩张段三段同轴度在产品图上未作具体的规定，其三段不同轴度反映在产品上则出现喷喉两边缘的孔边不平行，因此产品图及技术条件规定了对喷喉的孔边不平行的要求，通过检查喷喉的孔边不平行值来检查三段的同轴度，三段同轴度是由夹具保证的。喷孔轴线的切向倾角误差及喷孔分布圆的自身误差在喷管产品图上都有具体要求，也是通过夹具保证的。因此，喷孔加工中夹具设计的合理性及夹具制造精度尤为重要。

此外，产品图还规定了压装导线的铆钉孔、装配挡药板的销钉孔及扳手孔位置精度要求等。

8.3.3 喷管的机械加工

1. 喷管的加工特点

涡轮式火箭弹喷管是喷孔分布圆上均匀地分布着多个倾斜喷孔、构造复杂、加工困难的一个零件。喷孔的尺寸精度及位置精度要求大都由工艺保证，所以只要合理地安排工序顺序，设计、制造出正确的夹具及其他工艺装置，精心操作就可以加工出符合产品图规定要求的喷管。

喷孔的位置精度尚无法检测，为了检查喷孔位置的正确性，可定期将喷管成品安装在坐标镗床上借助其他辅具进行喷管位置精度的检查，对保证产品质量可起到一定作用。

喷管加工大体分为喷管体加工及喷孔加工。喷管体加工各生产单位大都选用普通车床，采用硬质合金刀片进行喷管体外形及两端大小孔加工，也可采用自动机连成生产自动线进行喷管体外形及两端孔的加工。

喷孔加工是喷管加工的关键，一般采用普通车床、六角车床、钻床及组合机床加工。

涡轮式火箭弹为了提高射程、解决喷孔的烧蚀问题，有些产品采用了石墨喷孔或压制成型不需加工的玻璃钢喷孔或合成材料喷孔等。

针对涡轮式火箭弹喷管构造复杂、加工困难、批量大等特点，对喷管的喷孔加工，最好选用较先进的数控机床。

2. 喷管加工

(1) 涡轮式火箭弹的喷管加工。涡轮式火箭弹的喷管加工是火箭弹零件中较为复杂的加工过程，其工序安排、设备选用及工艺装置的设计不同于火箭弹的其他零件。

① 喷管体加工。喷管体结构简单，由喷管外形及两端面大小孔构成。尺寸精度及表面粗糙度要求都不高，喷管体刚性好，因此具有较好的工艺性。操作工人只要按工艺规程精心操作即可满足产品图技术条件的要求。喷管体材料为优质碳素结构钢，例如，107 mm 火箭弹喷管材料为 D60 钢，130 mm 系列火箭弹喷管为 45 钢，具有较好的加工工艺性。

产品图对喷管体提出了机械性能的要求，因此，喷管体粗车后需进行热处理。130 mm 系列火箭弹喷管体的热处理是为了满足加工要求而提出的，如果喷管毛坯不进行热处理，其喷孔的粗糙度就很难满足产品图要求，也有将喷管体的热处理安排在毛坯锻造成型后进行余热调质处理的情形。

喷管体加工分外形加工及两端面大小孔的加工。外形加工有粗车削外圆、制备螺纹直径、加工弧槽及挂弹槽等，此外还包括铆钉孔及扳手孔的加工。喷管体的螺纹加工一般放在外形加工的后部工序，其目的是为了防止工序间的磕碰。喷管体加工设备的选择，大都选用立式钻床、普通车床及六角车床。

② 倾斜喷孔加工的工艺分析。倾斜喷孔加工包括收敛段、喷喉及扩张段的加工，由于喷孔轴线所处的空间位置较复杂，所以在确定喷孔加工方法前，首先应确定喷孔轴线的空间位置，为工艺编制、夹具设计提供设计条件。以 130 mm 火箭弹为例，在进行喷孔加工的工艺分析时，通过对产品图的分析可知，喷孔轴线分布在喷管体轴线的同心圆上。在这个分布圆上均匀地分布着产品图要求的数个喷孔；喷孔轴线与喷管体轴线不在一个平面内，在空间呈切向的倾角关系，如图 8.1 所示，其中 $N-N$ 剖面为包括某一喷孔轴线且平行于喷管体轴线剖面的一个剖切平面。

为表示喷孔轴线与喷管体轴线正确位置，可建立如图 8.2 所示的直角坐标关系。

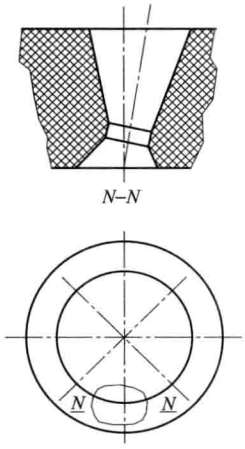


图 8.1 喷孔示意图

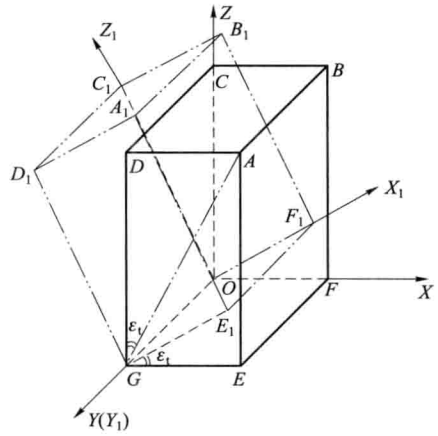


图 8.2 喷孔轴线与喷管体轴线直角坐标系

取 $ABCDGEFO$ 为平面六方体，设 OC 为喷孔体轴线，GA 为喷孔轴线且 A 点为喷孔的出口中心，G 点为喷孔的入口中心，由于喷孔轴线相对于喷管体轴线是剖切面平行的空间切向夹角关系，所以 GA 必然在与 OC 平行的 $ADGE$ 平面内，DGA 角为图定的切向角 ε_1，即喷孔倾角。

在进行喷孔加工时为获得喷孔倾角 ε_1，需设计专用夹具方可进行倾斜喷孔加工。如在钻床上进行倾斜喷孔加工，由于刀具只能沿垂直于工作台面方向送进，所以必须使喷孔轴线重合于钻床的主轴轴线，为此喷管体轴线相对于钻床工作台面就应旋转一个角度 ε_1，如图 8.2 所示，使平面六方体 $ABCDGEFO$ 绕 Y 轴旋转到新的位置获得另一个平面六方体 $A_1B_1C_1D_1GE_1F_1O$，其中 OC_1 是旋转后的喷管体轴体，GA_1 是喷孔轴线，加工喷孔时刀具中心应从 A_1 点沿垂直于工作台面方向送进。

为确定喷孔轴线与喷管轴线的相对位置，除应确定喷孔轴线的正确位置外，尚需确定喷孔轴线分布圆的位置，即 A（A_1）点、G 点在空间直角坐标系中 OX（OX_1），OY（OY_1），OZ（OZ_1）中的坐标位置，G 点在 X（X_1）轴及 Z（Z_1）轴的坐标值为零。对于 130 mm 火箭弹喷管体轴线在 N—N 剖面（见图 8.1）上投影与喷孔轴线交于收敛段入口中心即 G 点，所以 OG（即 G 点在轴上的坐标）即为收敛段入口分布圆的半径，A（A_1）点在 Y 轴上坐标与 G 点相同，在 Z（Z_1）轴与 X（X_1）轴上坐标见图 8.3。

喷孔加工夹具设计可参考上述分析考虑。

③ 喷孔扩张段加工。喷孔扩张段是燃烧气体的出口端，由于扩张段尺寸精度、表面质量要求较高，锥面尺寸较大，定位可靠，因此它可作为收敛段及喷喉的加工基准，这样有利于保证喷孔同轴度要求。扩张段加工比较重要，扩张段分布圆的直径公差及该分布圆对喷管体轴线同轴度、扩张段分布的均匀性及扩张段倾角等都直接影响着扩张段加工的位置精度。由于扩张段的位置精度是靠夹具保证，所以扩张段加工的关键是确定

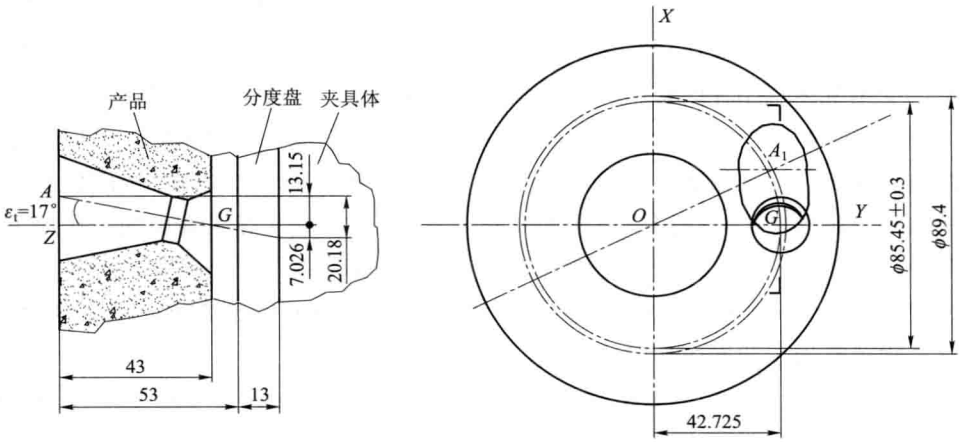


图 8.3　“130 mm 火箭弹”喷孔加工坐标尺寸

合理、可靠的夹具结构，保证夹具的制造精度，否则将无法保证上述要求。

扩张段加工可分为钻孔、粗扩孔、精铰孔等，为保证喷孔轴线具有正确的空间位置，防止钻孔时钻头跑偏，在钻孔工序之前，工艺上应安排铣平面工序或中心钻定位孔，如采用钻床加工则应设计钻模套，以保证钻孔时钻头导向。为减少粗扩孔的加工余量，钻通孔之前应安排钻台阶孔工序，提高钻孔工序的钻头刚度，避免钻孔轴线歪斜。

粗扩孔是在钻台阶孔的基础上用成型刀具粗加工扩张段，切削余量较大，因此要求成型刀具应具有较高的强度、较大的容屑槽。粗扩孔铰刀一般设计成带有三个切削刃的螺旋齿成型刀具，这样有利于容屑及排屑。

粗扩孔之后喷孔的轴线已基本确定，所以精铰孔只是切除粗扩孔留下的余量，获得扩张段的成品形状及要求的粗糙度。但由于扩张段锥孔角较大，加工中轴向切削速度变化大，排屑不畅及切削振动等原因，所以在扩张段表面常常出现拉沟、打棱、擦伤等疵病而影响产品质量。因此在进行刀具设计时应考虑在保证刀具具有足够强度的前提下，尽量增大容屑槽空间，选择合理的刃带宽及几何角度。通过多年的实践经验，刃带宽一般控制在 0.25 mm 左右较为合适，加工出的扩张段较光洁。为避免铰孔时打棱，出现周期性振动，刀具一般设计成不等分奇数齿形式。

锥形不等分螺旋齿形刀具刀齿截面形状见图 8.4。

扩张段加工可采用普通车床或六角车床。为提高生产效率有采用立式钻床进行喷孔扩张段加工，配用气动转位夹具可减轻操作人员的劳动强度。

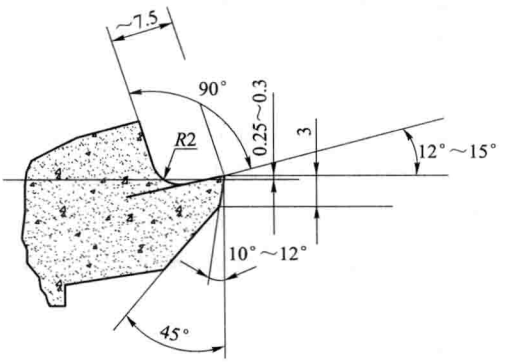


图 8.4　螺旋齿形刀具刀齿截面形状

车床加工因喷孔处于水平位置，排屑方便，因此可避免铁屑对扩张段表面的划伤，其夹具结构简单，刚性好，有利于扩张段加工。但由于车床加工的加工基准与测量基准不一致，受喷管体总厚等因素影响，尺寸公差不易保证；另外夹具质量偏心较大，对操作安全也有一定影响。钻床加工，生产效率高，适于火箭弹的大批量生产；但钻床加工排屑困难，粗糙度不易保证，常常影响产品交验；另外钻床加工切削系统刚性差。已研究成功的六工位小型组合机用于喷孔扩张段加工，工艺先进，使火箭弹的喷孔加工迈上了新的台阶。但由于加工中刀具更换需整机停车，从而限制了生产效率的提高。喷孔的组合机床加工对刀具的使用寿命及工人的操作维修水平都有较高要求，机床专用性强，作为火箭弹喷孔加工的方向，应予推广。

④ 喷孔的收敛段加工。喷孔收敛段是燃烧气流的入口端，尺寸精度及表面粗糙度要求略低于扩张段，所以收敛段加工只要按工艺规程要求进行钻孔，即可满足产品图要求。收敛段加工，关键是如何正确地选择与设计加工基准及夹具结构。为保证收敛段的位置精度要求，收敛段加工必须以扩张段锥孔为定心基准，以喷管体端面为轴向定位基准，这种加工基准的选择能够较好地保证收敛段与扩张段的同轴度要求。但由于收敛段的测量基准与定位基准不一致，加工基面受喷管体总厚度及大孔深度误差影响，因此，常造成收敛段孔深超差。为此工艺上采用压缩喷管体厚度公差的办法来减少收敛段孔深超差，这给喷管体外形加工带来很大不便。收敛段加工也可选择以喷管体大孔底端面为轴向定位基准的加工方案，这种加工方案，测量基准与定位基准一致，可较好地保证收敛段孔深要求。

由于扩张段孔深误差较大，在收敛段加工工序，为保证扩张段锥孔与夹具定位销有较好的接触，夹具设计时应考虑使定位销能沿扩张段轴线方向上下浮动，否则将影响收敛段的加工质量，导致收敛段分布圆尺寸变化及与扩张段同轴度超差。收敛段加工中应及时清理积存于夹具定位面的切屑，定期检查夹具精度等，以确保喷管的加工质量。

收敛段为深度较浅的锥形孔，比较容易加工，为提高生产效率，满足火箭弹大批量生产的要求，工艺上多采用钻床加工，选择锥体成型刀具，刀具结构简单，刚性好，可以较好地满足收敛段加工的要求。

⑤ 喷喉加工。喷喉的尺寸精度及表面粗糙度要求均较高，因此，喷喉加工是喷管加工的关键工序。

喷喉是在扩张段与收敛段成型后，在扩张段钻通孔的基础上进行的。

由于喷喉加工是在扩张段及收敛段加工之后，其剩余部位长度很小，所以在这种情况下加工喷喉，可以消除钻通孔时所产生的轴线歪斜，有利于保证喷喉与扩张段的同轴度。由于喷喉尺寸精度及表面粗糙度要求较高，所以，喷喉加工分为粗铰孔及精铰孔两步完成。

喷喉加工是以精加工成型的扩张段锥孔为定心基准，为保证夹具定位销在扩张段最浅、最深时与扩张段锥孔有较好的接触，完全贴合，其定位销必须能沿喷孔轴线伸缩，

在夹具设计时可采用弹簧或聚胺酯橡胶达到其伸缩目的。定位销中间有一轴向通孔，可供排屑及走刀用。喷喉加工夹具可采用收敛段加工夹具。粗铰喷喉的铰刀刀杆既可采用浮动刀杆，也可采用固定刀杆。由于固定刀杆有较好的刚性，刀具不浮动，其刀具轴线就是机床主轴轴线，因此，喷孔轴线的位置在一定程度上得以校正，保证了喷喉与扩张段的同轴性。

喷喉的精加工有铰孔及钢球挤压两种工艺方法。喷喉的精铰孔是采用成型铰刀对粗铰后的喷喉预制孔进行成型加工，由于喷喉的直径及表面粗糙度都是由刀具保证的，因此铰刀的结构形式及制造精度很重要。刀具材料可选用高速钢及硬质合金，由于喷喉直径公差较小，如果采用高速钢刀具则刀具寿命很短，采用硬质合金刀具可提高刀具的耐用度，并有利于喷喉表面粗糙度的提高。

喷喉的铰孔可采用普通车床，也可采用钻床加工。

喷喉加工是喷孔加工的最后工序，由于受多种因素影响，如三段的不同轴度，收敛段、扩张段深度公差及喷喉直径公差的变化等，所以反映在产品上就出现了喷喉两边缘距离不等，即喷喉的宽度不一致。由于影响因素较复杂，因此产品图对喷喉宽度往往不作具体规定，而只是提出最小宽度以及孔边不平行的要求。

喷喉的钢球挤孔是在油压机上利用专用钢球从喷喉的预制孔中挤压通过，使预制孔的表层金属在钢球作用下发生塑性变形，从而达到喷喉尺寸精度及表面粗糙度要求。钢球挤孔工艺曾首先用于 130 mm 火箭弹的喷喉加工，解决了喷喉加工粗糙度的技术关键。挤压后的喷孔其表层金属冷作硬化，因此提高了喷喉的加工质量。挤孔工艺具有操作方便、质量稳定、成本低、效率高等优点，目前这种工艺方法已推广于多种火箭弹的喷喉加工。由于喷喉预制孔宽度不一致，致使钢球在其出口附近因两侧抗力不同而向一边歪斜，因此喷喉挤压后，可视需要用专用钢柱进行校正，以获得正确的喷喉形状。

喷喉的钢球挤压是金属塑性变形过程，其多余金属往往在喷喉与扩张段相交处产生飞边，因此产品图规定了在一定范围内允许有挤压飞边存在，否则应进行修除。

喷喉挤孔工艺对钢球有较严格的要求，如钢球的尺寸精度、表面粗糙度、表面硬度及形状误差等，这些要求可参照钢球的国家标准。

为保证喷喉的挤孔质量，钢球应定期清洗及更换，以保持钢球清洁及钢球的尺寸、形状要求。

(2) 单喷管加工。单喷管大多用于尾翼式火箭弹，具有薄壁零件的特点。与燃烧室相比，工艺性较好，但结构复杂，其主要部位的尺寸精度、粗糙度及位置精度要求较高，因此，加工有一定难度。

单喷管大多为锻造或旋压毛坯，其机械加工大都在车床上完成，其产品图规定了喷管内外表面同轴度、壁厚差及收敛段、喷喉、扩张段三孔同轴度要求，因此在进行工艺设计时应注意加工基准的选择，在工艺安排上应尽量使内外表面互为定心基准交替加工，如粗车外表面后，以外表面为定心基准加工内表面，然后再以内表面为定心基准精

加工外表面，最后以精加工的外表面为定心基准精加工内表面，只有这样互为基准反复加工才能保证喷管内外表面同轴度要求。喷孔加工除喷喉因本身宽度较小不宜作定心基准外，其收敛段与扩张段的加工也是互为定心基准进行的。

为防止螺纹磕碰及对内外表面的同轴度要求，其螺纹加工一般应安排在内外表面加工之后进行。

由于单喷管外表面形状特殊，所以喷管的外表面加工一般采用靠模仿形加工，以保证外表面的加工精度并可提高生产效率，内孔加工可视喷管的具体结构确定。对于口径较小的火箭弹，其喷管的内孔加工可采用成型刀具；对于口径较大的火箭弹可采用靠模加工。

尽管单喷管结构形状简单，但由于技术要求较高，所以火箭弹的单喷管加工工序一般都比较多，工艺设计时应注意加工工序的安排，以最少、最合理的工序完成单喷管加工。

弹体、燃烧室及喷管是火箭弹的三个主要机加零件。火箭弹的其他加工零件包括：预制破片、连接底螺、挡药板及构成弹尾的翼片、尾翼架等。火箭弹的其他零件还包括驻螺钉、销钉等标准件。

连接底螺是以两端螺纹与弹体及燃烧室连接的一个形状较简单的机加零件，其作用是把战斗部与发动机隔开，在发动机工作时，承受燃烧室内产生的高温高压燃气的轴向压力并有隔热作用，阻止发动机工作时产生的高温迅速传给战斗部装药，以保证战斗部装药的安定性。产品图对连接底螺规定了各表面之间的位置精度、尺寸精度及热处理后的机械性能要求等。连接底螺为锻造毛坯，其加工方法与喷管体加工方法大体相同。在粗加工阶段选用相同的定心基准，主要是消除毛坯两端的锻造马蹄及内表面壁厚差。精加工阶段基本是按照内外表面互为基准的原则进行加工。连接底螺零件结构形状简单，具有适宜车削的机械性能，因此在工艺安排上大都选用普通车床进行加工，另外考虑连接底螺必须具有足够的强度及隔热作用，可剔除由于材料缺陷而产生的不合格品，工艺上可考虑安排性能试验或探伤。预制破片是为了提高战斗部的威力性能而装在弹体内的一个筒形零件，其加工方法是在普通车床上进行内外圆加工，在液压牛头刨床上刨削棱形槽，内外破片圆筒焊接后进行端面加工。

火箭弹其他零件的加工，由于产品图无特殊要求，工艺上无特殊加工方法，可参照有关资料进行工艺编制。

8.4 数控机床的应用

8.4.1 概述

随着数控技术的发展，数控机床已日臻完善，基本上已不受被加工零件复杂程度的

限制，应用范围很广。

机床行业正在大力发展数控机床，有数控车床、数控铣床、数控钻铣床和数控加工中心等，经济型数控车床和铣床也有生产。还可运用单板机、单片机对普通车床和铣床进行简易数控改造。随着电子技术的高速发展和大面积普及，在技术改造中逐步以数控机床和简易数控机床取代普通车床、铣床和磨床等，可使弹箭机加工厂的制造水平提高一步。

8.4.2　选用数控机床加工 122 mm 火箭弹几种零件的工艺方案

火箭弹的主要零件多为旋转体，只有少数零件属非旋转体。燃烧室、尾管前段本体、尾管后段本体、钢雷舱和中间体等零件的加工方案如表 8-1 所示。

表 8-1　零件加工方案

序号	产品代号	零件名称	毛坯类型	机加工艺方案
1	WH113	燃烧室	旋压	车定位面→后端车成→前端车成和中间定心部车成
2	WH113	尾管前段本体	热收	车定位面→小端车成→大端车成
3	WH113	尾管后段本体	热收	车定位面→小端车成→大端车成
4	WH213	钢雷舱	旋压	车定位面→前端车成→后端车成
5	WH213	中间件	无缝钢管	车定位面→后端车成→前端车成

上述 5 种旋转体零件形状较复杂，加工面多，内外表面全加工，加工精度要求高，选用数控车床加工最为适宜。燃烧室、钢雷舱等管形件选用两台 NST30/200 数控车床进行加工，尾管前段本体和尾管后段本体、中间体等盘形件则选用两台 NST30/100 数控车床进行加工，并配有机械手和传送装置，构成两条自动生产线，由两道工序代替原来十几道工序，节约了普通机床、操作工人和生产面积，提高了劳动生产率和加工精度。

8.4.3　数控机床的选择

零件的工艺方案确定后，数控机床的选择就显得十分重要，特别是数控系统的层次和质量，在性能和价格上差别很大，必须根据被加工零件的尺寸和精度要求、生产效率和投资，对数控机床的功能作取舍，以达到经济合理的目的。

（1）选择数控机床的类型。根据零件的加工要求，数控机床可按运动轨迹、数控装置有无插补功能、伺服机构的控制方式以及工艺用途来选择数控机床类型。

（2）选择数控机床的规格。数控机床最主要规格是几个数控坐标的行程范围和主轴电机功率。一般情况下，零件的轮廓尺寸应在机床的加工空间范围之内，要尽可能在厂家系列范围内选择规格。

被加工零件的轮廓尺寸是选择机床规格的基本依据，同时要考虑零件的装夹、检测和刀具循环运动的范围，并留有一定余地。另外要充分考虑产品的发展以及军民品的开发，适当选择较大的加工范围。

(3) 选择机床精度。选择机床的精度等级应根据被加工零件关键部分加工精度的要求来定。定位精度和重复定位精度综合反映了该轴各运动元部件的综合精度。尤其是重复定位精度，它反映了该控制轴在行程内任意定位点的定位稳定性，这是衡量该控制轴能否稳定可靠工作的基本指标。因此，要求提高每个数控坐标轴的重复定位精度。

提高重复定位精度主要依靠数控系统功能，一般数控系统都具有控制轴的螺距误差补偿功能和反向间隙补偿功能，能对进给传动链上各环节系统误差进行稳定的补偿。

(4) 选择数控系统。选择数控系统的基本原则：

① 根据数控机床类型选择相应的数控系统。

② 根据数控机床的设计指标选择数控系统。应对性能和价格等综合分析后，选用合适的系统。

③ 根据数控机床的性能选择控制系统功能。一个数控系统具有许多功能，有系统中原已具备的基本功能，有供用户特定选择的选择功能。

(5) 选择机床附件和辅助装置。数控机床主机选定后，还应该选择机床附件和辅助装置。根据加工要求选择必要的附件，如中心架、尾架、夹紧油缸、夹具和刀库等。同时，根据需要选择一定的辅助装置，如切屑排除装置、对刀装置、切削液供给装置和机内检测等装置。另外，应考虑的项目有自动编程系统和机外检测系统等。

(6) 数控机床选择实例。122 mm 火箭弹系列产品的主要零件、燃烧室和钢雷舱选用 NST30/200 数控车床，尾管前段本体、尾管后段本体和中间体选用 NST30/100 数控车床。NST30/100、NST30/200 数控车床配备 FANUC 控制系统，属于全功能数控系统。

① NST30/200。加工最大直径为 ϕ400，加工最大长度为 2 000 mm。配有一个装 12 把刀的回转刀盘，属 2 轴型。带有一个数控中心架和一个数控尾座，配有 FANUC 6T-B 控制系统。

② NST30/100。加工最大直径为 ϕ400，加工最大长度为 1 000 mm。配有上下两个回转刀盘，上刀盘装 12 把刀，下刀盘装 8 把刀，属 2 轴＋2 轴型，配有 FANUC 6T-C 控制系统。

两种数控车床均配有机内对刀装置、工件机内检测装置、切屑吹除及自动排屑装置等辅助装置，机床功能全，性能好。机床配有机械手上下工件，并配有工件传送装置，两台 NST30/100 数控车床和两台 NST30/200 数控车床，各组成一条自动生产线。

8.4.4 数控装置及其功能

1. 数控装置

数控装置是数控机床的核心，用于实现输入数字化的零件程序，并完成输入信息的

存储、数据的变换、插补运算以及实现各种控制功能。

数控装置包括输入回路、几何运算回路、操作控制及辅助功能控制。

由于加工零件的不同，要求数控装置所实现的功能也不同，大致可分为：点位数控系统、直线数控系统和轮廓数控系统。

一般数控装置方框图见图 8.5。

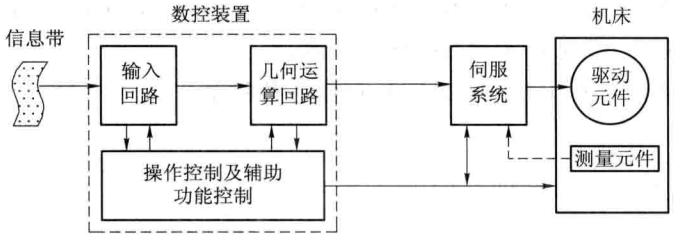


图 8.5　数控装置方框图

下面简单介绍 FANUC CNC 系统（见图 8.6）。

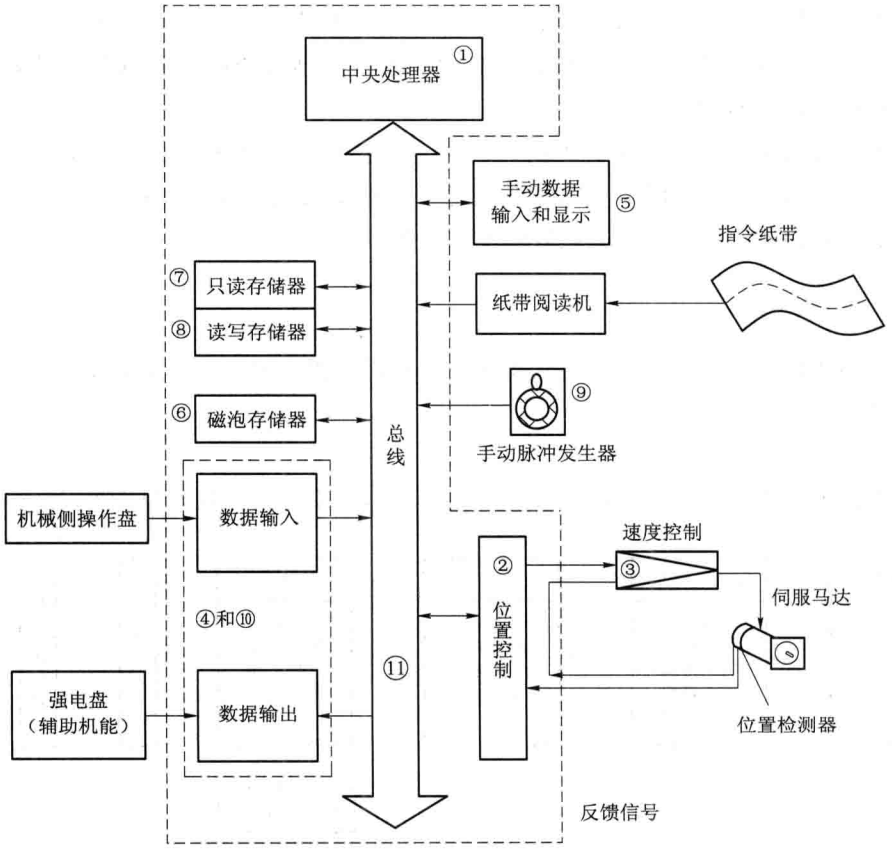


图 8.6　FANUC CNC 系统原理框图

框图说明：

(1) 中央处理机 CPU。通过地址总线和数据总线实现对各部分的控制。

(2) 位置控制。通过检测反馈脉冲使实际机械位置与中央处理机设定的指令位置一致。

(3) 速度控制。用检测器的速度的反馈信号来控制电机速度的速度指令值。

(4) I/O 控制。控制机械和 CRT/MDI 输入、输出信号的数据传送部分。

(5) CRT/MDI。显示和手动数据输入装置。

(6) 磁泡存储器。利用磁泡存储元件存储各种程序。

(7) ROM。只读存储器。

(8) RAM。读写存储器。

(9) 手动脉冲发生器。进行手动进给。

(10) 连接装置。输入、输出信号接口。

(11) 地址总线和数据总线。中央处理机与外围设备的通路。

2. 数控装置的功能

随着数控技术的发展，数控装置的功能正在不断增强。一般有控制功能、准备功能、主轴功能、进给功能、补偿功能、辅助功能、刀具系统控制和管理功能以及子程序、宏程序、自诊断程序等。

数控装置的类别随着用途的不同而不同，且每种功能的内容和表达形式也不尽相同，因此在使用数控机床时，一定要按照说明书给定的功能及其表示方法、使用规则，灵活准确地应用各种功能，使其很好地发挥作用。

8.4.5 程序编制

从零件图到获得数控机床所需介质的全部过程为程序编制。一般有手工编程和自动编程两种。

1. 手工编程

手工编程主要靠人的直接参与来完成编程过程。手工编程流程见图 8.7。

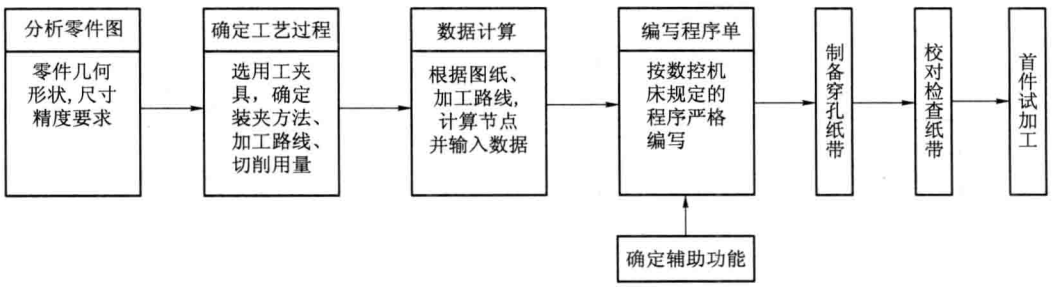


图 8.7 手工编程流程示意图

(1) 工艺处理。编制一个零件的程序时，必须熟悉机床的切削规范、工夹刀具，并根据毛坯的类型和状态确定走刀路线、加工顺序以及切削用量等。工艺处理流程示意图见图 8.8。

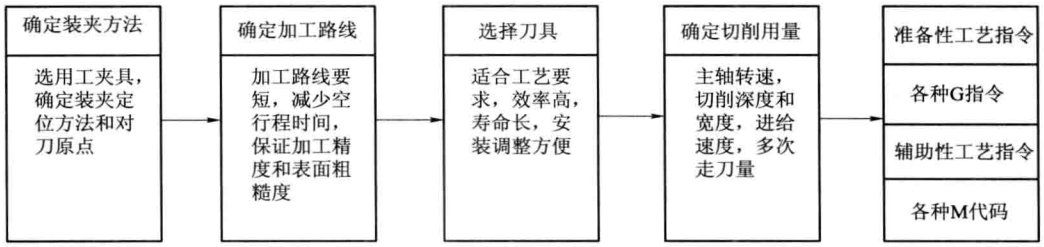


图 8.8　工艺处理流程示意图

① 选择定位基准确定夹紧方法。在数控机床上加工时，由于工序高度集中，每一工序包含的加工内容很多。要求定位准确，装夹方便可靠，必要时可加工出定位基准面再上数控机床。

② 确定对刀点。刀具相对于零件的起点为对刀点，可在零件上，也可在零件之外，与机床和零件的坐标原点有一定的关系。通过对刀点，可确定机床坐标系和零件坐标系的相互关系。当用多刀加工时，要确定换刀点，要定在零件外部，以免换刀时碰伤工件。

③ 确定加工路线。确定加工路线时，必须考虑零件的加工精度和表面粗糙度，应使加工路线最短，空行程最少，并便于计算等。

加工路线的表示方法有表格式、图形式和轨迹式等。

一般图形表示较为明确，可将加工部位、定位和夹紧符号用图形标出。用刀具通路流程把加工路线和所用的刀具以及对刀点、换刀点都表示出来，并注意上、下刀盘，工件，夹具以及机床有关辅助运动间的干涉，确保在加工、进刀、退刀和换刀等动作中不得相互碰撞。

④ 选择刀具。使用数控机床加工时，刀具的选择尤为重要。根据被加工零件形状和尺寸精度，要求刀具精度高、刚性好、耐用度高且安装调整方便。

目前数控机床所用刀具和刀杆在国外已形成各种体系，每类刀具已系列化，并专业化生产。

⑤ 确定编程允许误差。编程误差：

$$\Delta c = f(\Delta b + \Delta t_j)$$

其中，Δb 为用直线或圆弧逼近零件轮廓线而产生的误差；Δt_j 为计算过程中产生的误差。

一般程序误差主要指逼近误差。在数控加工中除程序误差外，还有控制装置的插补误差、拖动系统的误差、工件定位误差和对刀误差等。

(2) 进行数据计算，确定刀位数据。数据计算主要是根据确定的走刀路线和工艺参数，计算出刀具运动轨迹的坐标值，即计算出刀位点的坐标数据。

对于由直线和圆弧组成的轮廓，需计算各几何元素的起点、终点，圆弧的圆心，两几何元素的交点或切点等基点坐标值以及刀具运动中心轨迹坐标值。对非圆曲线，需算出逼近线段的交点坐标。

(3) 编制零件加工程序。

① 程序编制的有关规定。穿孔带和代码：常用的穿孔纸带有 5 单位和 8 单位两种，8 单位穿孔纸带有 EIA 和 ISO 两种。程序格式：程序格式是指一个程序段中各字排列顺序及表达形式，以字地址程序段格式应用最多。

② 填写程序单。按数控机床使用的指令代码及程序格式，逐段填写加工程序单。

③ 制作控制介质。将程序单上的内容按 ISO 或 EIA 标准代码，在穿孔机上打孔制成数控纸带。通过光电阅读机可将穿孔纸带上的指令代码输入数控系统。

④ 程序校核及试切。制作的程序介质必须经过校核和试切后方能正式加工。校核的方法是以笔代刀、坐标纸代替工件，进行空运转画图，检查刀具运动轨迹和切削过程是否正确。也可利用图形显示屏幕或绘图机进行校核。

程序核校后还必须进行试切，经过实际切削的验证，检查程序是否有误，加工精度是否符合要求。如发现问题需修改程序或采取尺寸补偿等措施。

2. 自动编程

计算机自动编程可取代手工编程，特别是对于具有非圆曲线、自由曲线、自由曲面和组合曲面的复杂零件的程序编制，采用数控语言以计算机代替人工完成编程过程。

这种计算机储存有大量的子程序。这些子程序是专业人员在仔细分析作图方法、程序分段、编程规则、刀具特点和材料信息等一系列问题后，将实现某种功能的一些常用的并带有共同性的程序独立出来，每个子程序都能使计算机完成某种数字运算或逻辑运算。当计算机接收到用数控语言和规则编写的源程序后，通过编译程序译成目标程序。

(1) 自动编程系统的组成及编程过程。自动编程系统框图见图 8.9。

图 8.9 表示出了计算机数控自动编程系统的组成及其编程过程。编程人员根据零件图 1 的要求，使用数控语言 2 编出零件加工的源程序 3，输入计算机 4，经过编程软件 5 处理后，在显示器 6 的屏幕上显示出零件加工过程的刀具运动轨迹或在绘图机 7 上绘出零件加工的走刀轨迹。确认正确后，计算机自动在打印机 8 上打出程序单，同时在穿孔机 9 上打出数控纸带。有的数控机床可用 RS-232C 标准接口，将程序直接输入机床。

(2) 数控语言。数控语言是由字母、数字及规定的一套符号，按一定的词法和语法规则组成的语言，用它来描述加工零件的几何形状、几何元素间的相互关系、走刀路线及工艺参数等。

数控语言系统有美国的 APT、APT-V，德国的 FXAPT，日本的 FAPT；我国有 EAPT，MAPT 和 HZAPT 等。

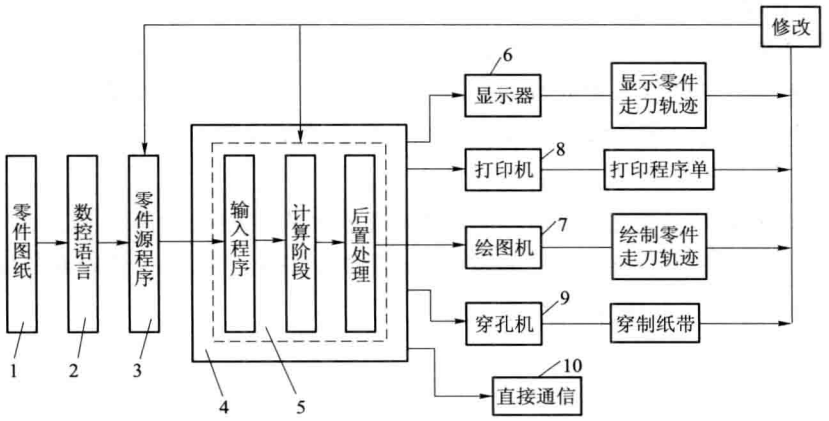


图 8.9　自动编程系统框图

将数控语言按某种书写格式编成语言程序称为源程序，可输入编程计算机。编写源程序的格式和规则称为语句表。

(3) 计算机数控自动编程系统的程序设计。自动编程系统包括前置处理程序和后置处理程序。程序总体结构框图见图 8.10。

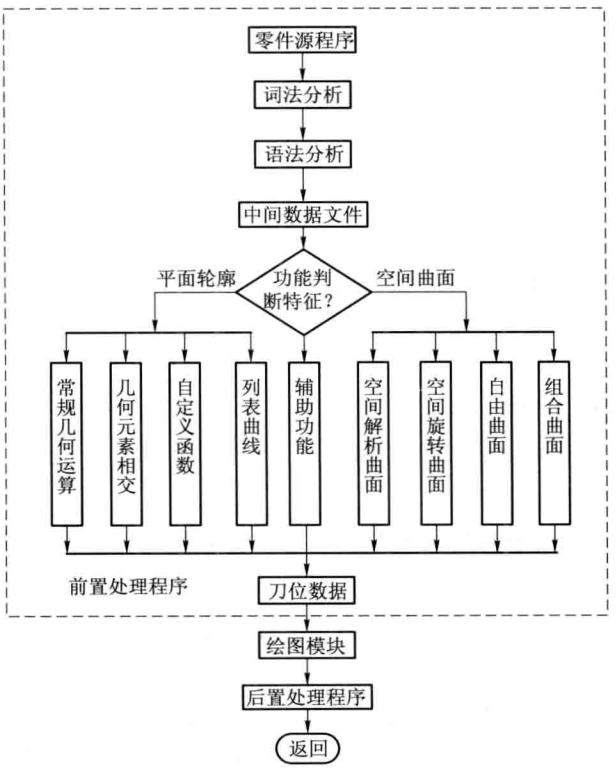


图 8.10　计算机数控自动编程系统程序总体结构框图

① 前置处理程序。前置处理程序包括输入翻译和数值计算两部分。输入翻译即是对输入的零件加工源程序进行词法、语法分析，得到正确的语句，并将得到的点、线、面等相互联系的信息等存入中间数据处理文件。再通过对平面轮廓或空间曲面计算等程序模块进行数据处理，得出零件加工各基点、节点的坐标值，以及刀具运动轨迹，获得刀位数据。

② 后置处理程序。后置处理程序是将前置处理程序得到的零件加工的刀位数据、有关的工艺参数、辅助功能等信息转换成符合数控机床要求的指令代码和程序格式，并打印出零件加工程序。后置处理程序一般为专用。

8.4.6 数控机床的维护与故障排除

数控机床为机—电—液一体化设备，机床工作原理较复杂，机、电、液各部件的关系既相互联系，又相互制约，因此维护保养工作的好坏直接关系到机床的利用率。维修保养包括日常预防性维护和故障诊断及处理。

1. 日常维护

根据机床说明书的规定对纸带阅读机、过滤器、电机电刷以及润滑系统、运动件、连接件等进行定期检查和更换。

主要维修备件有机械、液压、电器的易耗易损件。

2. 故障判断与排除

机械和液压部分的故障容易发现和排除。主要是控制系统故障的诊断和排除。

(1) 根据报警排除故障

当报警时，自动显示在 CRT 上。

FANUC6T-B 系统报警号：

① 程序和操作原因报警：000～170；

② 与行程开关有关的报警：210～225；

③ 伺服系统报警：400～427；

④ 连接单元报警：600～607；

⑤ 控制元件或马达过热：700～702；

⑥ 存贮器报警：900～999。

机床说明书对每个报警号所报警的内容和排除故障的方法都有详细说明。

(2) 无报警号的故障

对故障原因、检查步骤以及应采取的措施在机床说明书上均以表格形式列出来。

(3) 故障排除实例

① 刀架超程的恢复。刀架行程的两端设有两个保护装置，一个是由控制系统调定的软件极限位置（B、C、F、G），一个是由限位开关调定的超越极限位置（A、D、E、H）四点。极限位置图示见图 8.11。

当刀架运动到软件极限位置（B、C、F、G）时停止，只要点动即可使刀架回到其正常运动区域内。

当刀架运动到超越极限位置（A、D、E、H）时压下极限开关，切断电源而停止，此时要恢复到运动区域有两种方法：第一种方法是用手盘动伺服电机的皮带，使丝杠运动刀架脱离极限开关，启动电源，点动刀架回到运动区域；第二种方法是用螺丝刀按接触器 ICR、接通电源、点动刀架回到运动区域。

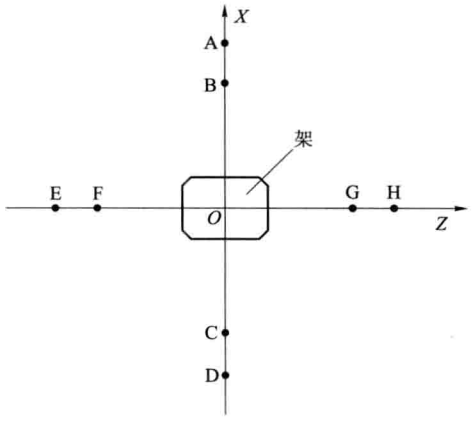


图 8.11　极限位置图示

② 用 MDI 方式不能将有关 M 指令输进去；自动走程序时主轴时转时停；冷却液时有时无，上述现象主要是有关 M 指令变换信号有问题，经逐级查寻是微型继电器触点间接触不良，致使变换信号时有时无。需更换元件。

③ 有的程序段输不进程序。其原因，一种是储存的程序已满而溢出，需取出一部分程序，再存入新的程序；另一种是局部字符间无空位，需进行程序整理后再输入新程序。

④ 显示值与实际进给值不符。一般有两种可能：其一，脉冲编码器出问题，可能丢脉冲；其二，如显示值与实际值之差在 0.5 mm 之内，可能是前把刀的刀具补偿值在本程序段未清除。

⑤ 机床送电后即开始运动。这种情况很危险，必须及时处理。产生的原因可能是脉冲编码器的光源灯泡坏了或是测速电机的电刷接触不良。

⑥ 键盘输入时，有的字不能输入和清除或程序不能复位。绝大多数情况是有关按键接触不良造成的，需更新按键或采取其他应急措施。

⑦ 撞车的原因和预防。数控机床在使用过程中经常出现撞车，因此必须分析其原因和采取预防措施。

• 撞车的原因

原因之一：操作引起的撞车

刀架不在起始位置状态时，启动程序。

刀架处于起始位置状态，而程序处于中途时，启动机床。

手动操作快进或快退时，按钮扳手慢或错认方向。

刀架离工件过近而转位。

刀具补偿时，漏掉“+”号或小数点。

工件装夹不正确或调错程序等。

原因之二：程序原因造成撞车

首先是手工编程时的计算错误；其次对各种程序指令的含义和编程规则理解不透、记忆不清；另外由于失误在写程序单或手动输入时，错漏数字、小数点、符号以及程序段或程序字等。

原因之三：其他原因撞车

如调错刀具补偿号，刀具的刀片脱落、碎裂或毛坯余量不均，吃刀量过大等。

• 预防撞车的措施

根据产生撞车的原因应采取相应的措施来防止撞车。

措施之一：编程与调试

认真消化机床说明书及其编程规则，仔细校对，可在绘图机或用图形显示器复核。

认真调试，程序输入机床后，先启动主轴后移动刀架，试切后再联动加工。

措施之二：操作时应注意

用穿孔纸带输入程序时，启动程序前必须检查阅读机是否位于穿孔带开始位置。

手动操作刀架快进、快退时，要求手动脉冲接近或离开工件。

如需手工转动刀盘的刀位时，首先使刀架离开工件退到起始位置再转位。

某把刀首次设定补偿值时，一定要检查输入的位置、数值和“+”“-”号是否有无误。

调用程序后，认真检查程序号、程序名及其有关鉴别的内容。

对不合格的毛坯必须剔除，同时要注意刀具和机床的完好正确。

第 9 章　弹箭零件的热处理

热处理在弹箭生产中占有重要地位，弹箭零件的热处理一般有两个方面的目的：一是改善材料的内部组织从而提高其物理机械性能（如强度、硬度、冲击韧性等）以满足产品的技术要求，例如火箭弹燃烧室等零件需通过热处理提高其性能；另一目的是为了改善材料的可加工性，例如各种冷压力加工中要进行再结晶退火以利于材料的进一步变形，大多数铸件在机械加工前需要退火以利于切削等。

因此，在弹箭生产中热处理是不可缺少的工序。但是增加热处理工序会使生产过程复杂化，提高产品总成本。所以必须合理选用材料和确定技术要求，使之能在满足使用性能要求的前提下尽可能简化热处理工序。

9.1　弹箭零件加工中常用的热处理工艺

为使弹箭零件具有所需要的力学性能、物理性能和化学性能，除合理选用材料和各种成型工艺外，其热处理工艺是弹箭零件制造中的重要工艺之一，与其他加工工艺相比，热处理一般不改变零件的形状和整体的化学成分，而是通过改变零件内部的显微组织，或改变零件表面的化学成分，赋予或改善零件的使用性能。其特点是改善零件的内在质量。

热处理工艺一般包括加热、保温、冷却三个过程，有时只有加热和冷却两个过程。这些过程互相衔接，不可间断。

弹箭零件加工中常用的热处理工艺主要有以下几种。

（1）退火：指将金属材料加热到适当的温度，根据材料和工件尺寸的不同采用不同的保温时间，然后进行缓慢冷却的热处理工艺。常见的退火工艺有：再结晶退火、去应力退火、球化退火、完全退火等。退火的目的：主要是降低金属材料的硬度，提高塑性，以利于切削加工或压力加工，减少残余应力，使金属内部组织达到或接近平衡状态和成分的均匀化等。

（2）正火：指将钢材或钢件加热到钢的上临界点温度以上的 30 ℃～50 ℃，保温一段时间后，在静止的空气中快速冷却的热处理工艺。正火的目的：主要是提高低碳钢的力学性能，改善切削加工性，细化晶粒，消除组织缺陷等。正火的效果同退火相似，只是得到的组织更细。

（3）淬火：指将钢件加热到钢的下临界点温度以上某一温度，保温一段时间后，在水、油或其他无机盐、有机水溶液等淬火介质中急速冷却，获得马氏体（或贝氏体）组

织的热处理工艺。常见的淬火工艺有：盐浴淬火、马氏体分级淬火、贝氏体等温淬火、表面淬火和局部淬火等。淬火的目的：是使钢件获得所需的马氏体组织，提高工件的硬度、强度和耐磨性，为后道热处理做好组织准备等。

淬火后钢件变硬、变脆，为了及时消除脆性，一般需要及时回火，即将淬火后的钢件在高于室温而低于 650 ℃的某一适当温度下进行长时间的保温，再进行冷却，这种工艺称为回火。

（4）回火：指钢件经淬硬后，再加热到钢的下临界点温度以下的某一温度，保温一定时间，然后冷却到室温的热处理工艺。根据工件性能要求的不同，常见的回火工艺有：低温回火（150 ℃～250 ℃），中温回火（250 ℃～500 ℃），高温回火（500 ℃～650 ℃）和多次回火等。回火的目的：主要是消除钢件在淬火时所产生的应力，使钢件具有高的硬度和耐磨性，并具有所需要的塑性和韧性等。

（5）调质处理：指将钢材或钢件进行淬火和高温回火的复合热处理工艺。调质处理广泛应用于各种重要的结构零件，特别是那些在交变负荷下工作的构件等。调质处理后得到回火索氏体组织，它的机械性能均比相同硬度的正火索氏体组织优。它的硬度取决于高温回火温度，并与钢的回火稳定性和工件截面尺寸有关，一般在 HB200～350 之间。使用调质处理的钢称为调质钢。它一般是指中碳结构钢和中碳合金结构钢。

（6）时效：分自然时效和人工时效两种。自然时效是把形变后的工件在室温下放置一定的时间，其性能随时间而变化的现象。人工时效是指把形变后的工件放在较高的温度下（100 ℃～200 ℃）保温几小时至几十小时，使其强度得到提高的过程。时效的速度与温度有密切的关系，不论是自然时效还是人工时效，降低温度都会延缓时效的过程。

（7）渗碳：指使碳渗入到钢表面层的过程。也是使低碳钢的工件具有高碳钢的表面层，再经过淬火和低温回火，使工件的表面层具有高硬度和耐磨性，而工件的中心部分仍然保持着低碳钢的韧性和塑性。

（8）碳氮共渗：指向钢的表层同时渗入碳和氮的过程。习惯上碳氮共渗又称为氰化，目前以中温气体碳氮共渗和低温气体碳氮共渗（即气体软氮化）应用较为广泛。中温气体碳氮共渗的主要目的是提高钢的硬度、耐磨性和疲劳强度。低温气体碳氮共渗以渗氮为主，其主要目的是提高钢的耐磨性和抗咬合性。

热处理过程中的加热温度是热处理工艺的重要参数之一，选择和控制加热温度，是保证热处理质量的主要问题。加热温度随被处理的金属材料和热处理的目的不同而异，但一般都是加热到相变温度以上，以获得高温组织。另外组织转变需要一定的时间，因此当金属工件表面达到要求的加热温度时，还需在此温度保持一定时间，使内外温度一致，使显微组织转变完全，这段时间称为保温时间。采用高能密度加热和表面热处理时，加热速度极快，一般就没有保温时间，而化学热处理的保温时间往往较长。

冷却也是热处理工艺过程中不可缺少的步骤，冷却方法因工艺不同而不同，主要是控制冷却速度。一般退火的冷却速度最慢，正火的冷却速度较快，淬火的冷却速度更

快。但还因钢种不同而有不同的要求。

9.2　弹箭零件的热处理

9.2.1　燃烧室

目前生产的火箭弹基本上属于涡轮式和尾翼式两种类型，这两种不同结构类型的火箭弹燃烧室所采用的工艺方法也不相同。涡轮式系列火箭弹燃烧室选用 30CrMnSi 或 40Mn2 无缝钢管，下料后调质处理，然后经机械加工完成。而尾翼式如 122 mm 火箭弹燃烧室，则采用热冲盂后 6 次冷拔伸完成，在每次拔伸前均安排有正火、再结晶退火、调质、消除应力回火 4 种不同的工序，从而保证了产品的工艺性及成品的机械性能。90 mm 航空火箭弹开始采用管材机械加工，选用调质热处理以保证产品性能，以后改用旋压成型工艺，以调质、旋压、时效 3 种工艺使零件强化，达到了图样规定的机械性能要求。

总之，由于成型方法及材料选择的不同，相应的总体工艺流程及热处理工艺方案也各不相同，因此，对燃烧室热处理工艺的选择也就不同。下面选择典型零件加以论述。

1. 122 mm 火箭弹的燃烧室

采用 14MnNi 材料，经热冲盂及多次冷拔伸成型工艺。其中间工序的热处理分别为：正火、再结晶退火、调质及消除应力回火。

1）工艺过程（见表 9-1）

表 9-1　122 mm 火箭弹前、后燃烧室的热处理工序

热处理工序		热处理上、下工序		热处理要求	
中间热处理	最终热处理	上工序	下工序	工艺性能要求	产品性能要求
正火		热冲盂	机加→一次拔伸	消除热加工缺陷，细化晶粒，提高塑性，以便进行拔伸加工	
第一次退火		一次拔伸	二次拔伸	消除加工硬化，降低强度，提高塑性，以便继续进行拔伸加工	
第二次退火		二次拔伸	三次拔伸	消除加工硬化，降低强度，提高塑性，以便继续进行拔伸加工	

续表

热处理工序		热处理上、下工序		热处理要求	
中间热处理	最终热处理	上工序	下工序	工艺性能要求	产品性能要求
第三次退火		三次拔伸	四次拔伸	消除加工硬化，降低强度，提高塑性，以便继续进行拔伸加工	
调质		四次拔伸	五次拔伸	消除加工硬化，改善综合机械性能，得到均匀细化的组织，以便继续进行拔伸加工，并满足产品最终性能要求	
第一次去应力退火		五次拔伸	六次拔伸	消除部分内应力，以便进行最后一次拔伸，并满足产品的最终性能要求	
	第二次去应力退火	六次拔伸	机加		消除部分内应力保留加工硬化 圆柱部：$R_m \geqslant 785$ MPa $R_e \geqslant 2.5\%$ 定心部：$R_m \geqslant 706$ MPa $R_e \geqslant 2.5\%$

2）工艺参数（见表 9-2）

表 9-2　122 mm 火箭弹前、后燃烧室热处理工艺参数

热处理工序	工序内容	设　备	装炉件数	保温		总时间/min	冷却介质
				温度/℃	时间/min		
正火	正火	中频感应加热正火炉，可控硅中频电源 KGPS-250-2.5		930±20			空气（在水套中冷却）
第一次退火	退火	中频感应加热、退火炉（一）可控硅中频电源 KGPS-250-2.5		840±20			空气

续表

热处理工序	工序内容	设　备	装炉件数	保温		总时间/min	冷却介质
				温度/℃	时间/min		
第二次退火	退火	中频感应加热退火炉（二） 可控硅中频电源 KGPS-250-2.5		840±20			空气
第三次退火	退火	中频感应加热退火炉（三） 可控硅中频电源 KGPS-250-2.5		840±20			空气
调质	淬火 清洗 回火 测硬度	箱式电炉 RJX-75-9 淬火槽清洗槽 井式回火炉 RJJ-75-6 磨平面机（Z512 台钻改装） 硬度计 HB-3000 型	≤12 ≤30	920±5 630±20	10 90		20%NaOH 水溶液 空气
第一次去应力退火	去应力退火	井式电炉（非标） 功率 180 kW	≤50	370±10	120		空气
第二次去应力退火	去应力退火 测硬度	井式电炉（非标） 功率 180 kW 磨平面机（Z512 台钻改装） 硬度计 HB-3000 型	≤50	320±10	120		空气

3）工艺方案的确定

（1）加热设备的确定。因成型工艺采用热冲盂冷拔伸，因此，必然有与拔伸配套的正火、退火及消除应力回火等工序。针对产品为旋转体这一特点，为了节省作业面积，节约能源，提高工作效率，减少氧化，故高温加热的正火、退火等工序选用可控硅中频感应加热炉。为了使温度均匀一致，低温消除应力处理选用热风回火炉。在实践生产过程中发现热冲压氧化皮过多，正火用感应加热，因加热速度快，没有松动高温氧化皮的能力，使酸洗去除氧化皮困难增大，后改用煤气圆转炉加热使高温氧化皮易于去除。

（2）工艺方法的确定。依照工件成型工艺的需要，采用以下几种热处理工艺。

① 正火。燃烧室所用材料为 14MnNi 钢，毛坯制造采用热冲盂冷拔伸工艺。为消除由于终锻温度和冷却速度差异所引起的冲盂后金相组织及机械性能的差别，冲盂后采用了正火工艺，为以后的拔伸变形创造了良好的基础，从而避免了由于变形应力分布不均匀而造成的变形以及裂纹。

② 一、二、三次拔伸后退火处理。退火选用 840 ℃加热、空气冷却，除恢复冷变形的金属组织（再结晶）外，并增加其塑性，便于进行冷拔伸工序。

③ 调质处理。为进一步改善工件的综合机械性能，为五、六次连续拔伸准备条件，在第四次冷拔伸后采用调质处理。因为在五、六次连续拔伸中，为提高零件强度不再进行中间退火，只进行消除应力退火。如零件没有较好的综合机械性能，则难以随两次冷变形达到符合其图样要求的几何形状及机械性能。

④ 消除应力退火。为使工件在连续较大冷变形中不产生由第一类应力造成的疵病，在第五次与第六次冷拔伸之间增加消除应力退火，第六次引伸完成后进行第二次消除应力退火，其目的是消除工件第一类应力，以保证工件在长期储存中几何形状的稳定性。同时，由于变形后时效作用使工件强度略有提高。

2. 130 mm、107 mm、273 mm 火箭弹的燃烧室

选用 40Mn2 及 30CrMnSiA 管材，采用机械加工成型工艺。

燃烧室要求有良好的综合机械性能，产品图样规定中使用的都是合金钢管材。热处理选用调质工艺即可满足产品的要求。130 mm 和 107 mm 火箭弹燃烧室的调质热处理可安排在管材下料之后粗加工之前，也可在粗加工之后，但各有利弊。对强度要求较高、材料切削性能较差的 273 mm 火箭弹燃烧室，则安排在粗加工之后较为有利。

1）加热方式的选择

由于 130 mm、107 mm 火箭弹生产定型时间较长，生产的厂家也相对较多，箱式电炉加热、管式煤气连续炉加热、井式热风电炉回火、电解盐槽联动线、中频感应联动线等工艺方法都曾采用过；而 273 mm 火箭弹燃烧室，则采用了通用电炉。从技术发展的角度看，对薄壁旋转体零件的调质处理采用中频感应联动线较为合理。据目前技术发展水平，设计一条可控硅变频数控的全自动生产线，再配备相应的自动检测设备，在今后大量生产中不但质量可以稳定，成本也将大幅度降低。

四种火箭弹燃烧室的热处理工艺曲线见图 9.1。

2）淬火剂的选择（即冷却条件的确定）

调质热处理除加热方式外，冷却剂的选用也很重要，它是决定淬火质量的关键。当工件温度冷却到临界温度区域（一般为 650 ℃～500 ℃）时要求急速冷却，以免奥氏体转变为非马氏体。但当温度冷却至马氏体转变温度区域（一般为 300 ℃～200 ℃）时又应缓慢冷却，以减小淬火应力和防止裂纹。130 mm 火箭弹燃烧室试制投产后，经常发现个别批次的零件淬火不完全，机械性能达不到图样规定，因此，采用水玻璃水溶液淬火剂，减缓了第二段冷却速度，一般在槽液正常时可以得到良好的效果。这种淬火剂也曾用于 90 mm 航空火箭弹，但使用过程中，水玻璃容易老化。虽然采取加入 NaOH 作为还原剂并按密度控制槽液浓度等措施，仍难以避免个别产品产生淬火裂纹，说明该淬火剂在淬火冷却时马氏体转变区的冷却速度不稳定。统计数字表明，凡 40Mn2 合金钢油淬达不到规定的机械性能时，均为钢材含锰量处于下限的批次。从理论上讲，锰元素提高，使图 9.1 中的曲线右移，增加钢材的淬透性。通过试验发现，如果 40Mn2 的含锰量上、下限分别提高 0.2%，则可满足油质淬火剂的要求。于是将 40Mn2 含锰量提

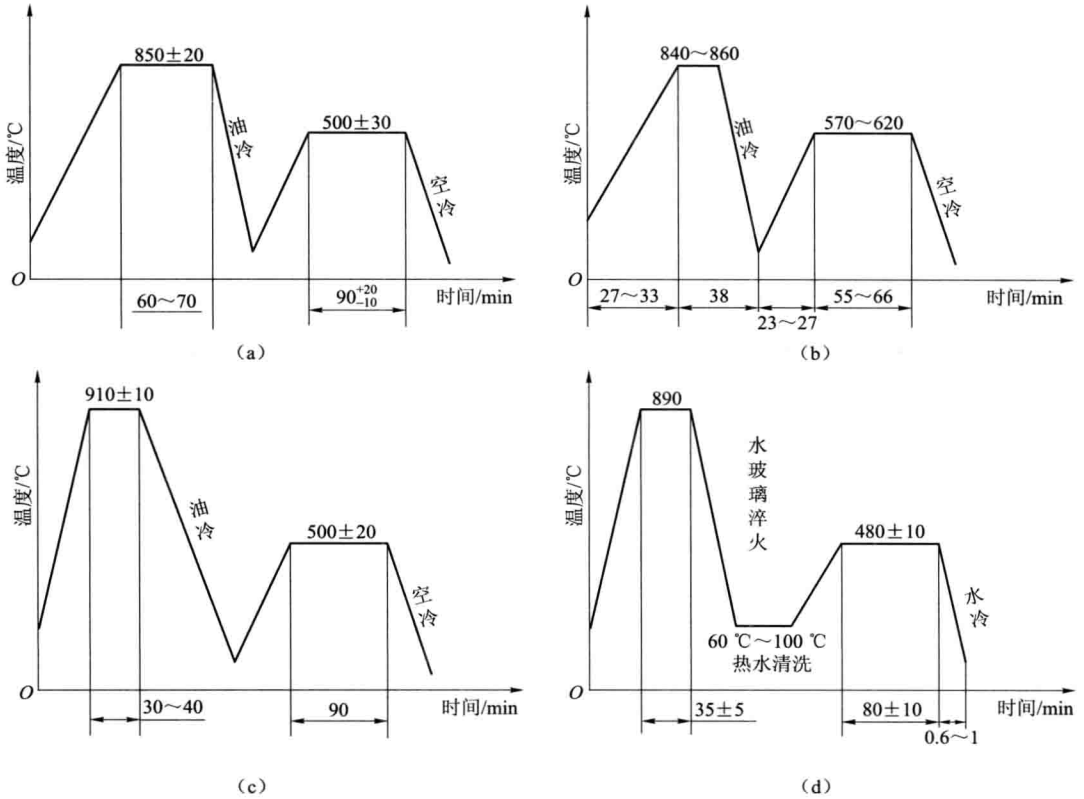


图 9.1　四种火箭弹燃烧室的热处理工艺曲线

(a) 130 mm 火箭弹燃烧室，淬火剂 20 号机油；(b) 107 mm 火箭弹燃烧室，淬火剂 20 号机油；(c) 273 mm 火箭弹燃烧室，淬火剂 20 号机油；(d) 90 mm 航空火箭弹燃烧室，淬火剂水玻璃，其配比为：35%～40%水玻璃（模数 2.9～3.1，波美度）＋3%～7%氢氧化钠（固体）＋水

高为 1.60%～2.00%（标准锰含量 1.40%～1.80%）的专用标准，采用 20 号机油淬火，使产品质量在相当时间内保持稳定。但强度的一致性问题一直未能彻底解决。壁厚为 9 mm 的工件，材料为 40Mn2，经淬火处理后，应该能完全淬透，但在生产中抽验工件金相组织，并非均匀的索氏体。经常发现网状或块状铁素体，表明淬火时没有获得均匀的马氏体，表现在机械性能上在同一个炉内的产品 R_p 可波动在 0.58～1.1 GPa 之间，这种情况甚至可能发生在同一管段上。同一个热处理炉的产品，有些产品机械加工中切削困难，有些产品则在水压试验中残余变形超过规定。为此，可采用中频感应加热，聚乙烯醇水溶液淬火的自动生产线。

3. 90 mm 航空火箭弹燃烧室

该工件原工艺为 30CrMnSiA 管材机械加工成型，由于原材料利用率很低，后改为旋压成型工艺。最初选用热轧正火态管材机械加工成粗坯，旋压成型后进行调质处理，虽能满足产品的要求，但调质变形破坏了旋压后的几何尺寸。为此，把调质处理提到旋

压工序前代替正火处理，调质后强度 R_m 在 1.04～1.06 GPa 之间，经旋压强化后使 $R_m \geqslant 1.2$ GPa，再经 200 ℃～300 ℃低温时效处理 R_m 可达到 1.25～1.31 GPa，R_e 仍可大于 14%，完全可以满足产品要求。具体工艺参数为：调质处理的淬火温度为 880 ℃～900 ℃，保温时间为（25±5）min，选用水玻璃为淬火剂；回火温度为 540 ℃～560 ℃，保温 60 min，水冷；旋压后时效处理（同时消除应力）温度为 250 ℃～300 ℃，保温 30～40 min。

9.2.2 喷管热处理

为了保证喷孔在机械加工后能有较低的粗糙度，喷管大多数进行调质处理，其一般工艺参数如下。

（1）107 mm 火箭弹喷管，材料为 D60，调质处理的工艺曲线见图 9.2。

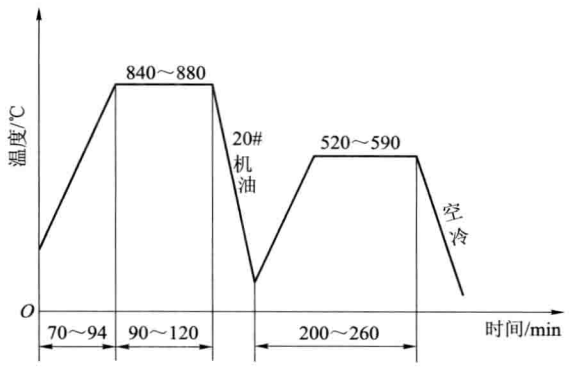


图 9.2 107 mm 火箭弹喷管调质工艺曲线

（2）130 mm 火箭弹喷管，材料为 45 钢，其调质处理工艺分两种：

① 锻造余热处理，具体工艺曲线见图 9.3。

② 正常加热处理，见图 9.4。

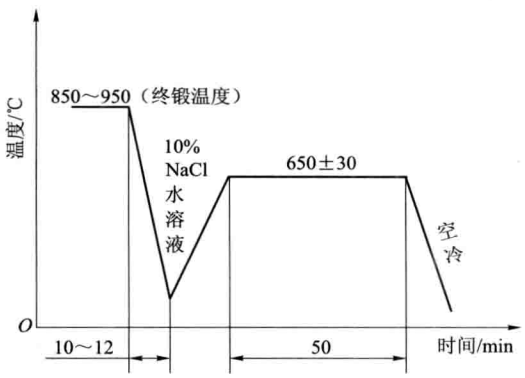


图 9.3 130 mm 火箭弹喷管余热法调质的工艺曲线

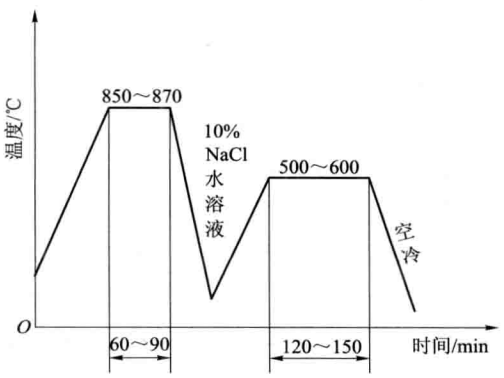


图 9.4 130 mm 火箭弹喷管正常调质的工艺曲线

9.2.3　其他零件的热处理

火箭弹的主要零件中除燃烧室和喷管需热处理外，其他还有战斗部本体弹尾弹簧、弹簧圈以及铝合金翼片等零件要进行热处理。

现将 122 mm 火箭弹尾管前段本体和尾管后段本体的热处理工艺进行简要介绍。

（1）工艺流程。尾管前、后段本体所用材料为 40Cr 无缝钢管，工艺流程为：

钢管下料 → 热收口 → 调质 → 机械加工

（2）热处理工艺参数。尾管前、后段本体热处理工艺参数见表 9-3。

表 9-3　尾管前、后段本体热处理工艺参数

热处理工序	工序内容	设　备	装炉件数	保温		冷却介质
				温度/℃	时间/min	
调质	淬火	箱式电炉 RJX-75-9 淬火槽	≤40	840±10	25	25%$NaNO_3$+20%KNO_3+20%$NaNO_2$+35%H_2O
	清洗	清洗槽				
	回火	井式回火炉 RJJ-75-6	≤80	620±20	75	空气
	测硬度	磨平面机（Z512 钻床改装） 硬度计 HB-3000 型				

9.3　铝合金的热处理

对于可热处理强化的铝合金（主要是硬铝、超硬铝和部分铸铝），热处理后的机械性能有很大提高，从而能代替钢材大幅度地减轻结构重量。

从提高机械性能角度来看，铝合金的热处理包括淬火和时效两个过程。

9.3.1　淬火

铝合金的淬火就是把它们加热到一定的温度，使其中的一些金属化合物（强化相）溶解到以铝为基的 α 固溶体中，然后以大于固溶体分解的速度进行冷却，使高温的组织在室温下固定下来，以得到过饱和的 α 固溶体。

1. 淬火温度

铝合金的 α 固溶体对强化相的溶解与温度有关，温度愈高，溶解得愈完全，热处理后合金的强化效果也愈好。但若温度过高，α 固溶体的晶粒将长大变粗，且温度达到一

定数值后会使合金中的低熔点共晶物熔化，产生“过烧”现象。所以淬火温度应低于过烧温度。表 9-4 是一些硬铝和超硬铝的淬火温度。

表 9-4 一些铝合金的淬火温度

合金牌号	淬火温度/℃	合金牌号	淬火温度/℃
LY1	495～505	LY14-LY16	530～540
LY11	500～510	LC4	465～480
LY12	495～503		

由表 9-4 知，硬铝的淬火温度范围很窄，且接近合金的熔化温度。因此，在淬火加热时要特别注意炉温和工件在炉内的实际温度，以防过烧或淬火不完全。而超硬铝 LC4 的淬火温度范围则较宽，故其热处理操作相对来说比较容易。

2. 加热方法和保温时间

由于铝合金的导热性和塑性都很好，允许用较大的速度升温，故加热和保温过程均应在满足淬火要求的前提下尽量缩短，以防晶粒粗大，且可缩短生产周期。

鉴于硬铝淬火加热时要求严格控制炉温，且炉内各区温度应均匀，故应在有循环空气的电炉或在盐浴炉中加热，后者不仅能快速而均匀地加热工件，且炉温易于控制和调整，同时也能较有效地防止工件表面氧化。

保温时间与合金成分、工件尺寸、被加热工件的状态（退火状态或加工硬化状态）以及加热方法有关。如壁厚大者，保温时间要长些；退火状态的铝合金较加工硬化状态的铝合金，其保温时间可短些等。表 9-5、表 9-6 和表 9-7 分别列举了铝合金板材、棒材和型材、管材的淬火加热保温时间，可供参考。

表 9-5 在盐浴槽中板材淬火加热保温时间

板材厚度/mm	淬火加热保温时间/min
0.3～0.8	12
1.0～1.2	18
1.5～2.0	20
2.2～2.5	25
3.0～3.5	30
4.0～5.0	35
6.0	50
>6.0	60

表 9-6　在循环空气电炉中棒材、型材淬火加热保温时间

棒材、型材的厚度、直径/mm	淬火加热保温时间 /min
3.0 以下	45
3.1～5.0	60
5.1～10.0	75
10.1～20.0	90
21.0～30.0	120
31～40	135
41～60	150
61～100	180

表 9-7　在循环空气炉中管材淬火加热保温时间

管壁厚度 /mm	淬火加热保温时间/min
<2.0	20～30
2.1～5.0	30～40
5.1～10.0	40～60
10～20	60～75
>20	90

3. 淬火的冷却速度

铝合金淬火所用的冷却剂一般是水。根据实验和理论分析，在保证被淬火工件不开裂和不产生严重变形的条件下，其淬火冷却速度应尽可能地大。若冷却速度不够，则既影响机械性能又降低铝合金的耐蚀性。

铝合金淬火冷却时应注意两点：

(1) 工件从出炉到浸入冷却水之间的时间间隔需尽可能短，以防工件温度下降过多，对淬火温度范围窄的合金尤其如此，否则将导致淬火不完全。这点和钢制件相比要严格得多。故一般规定此时间间隔对小件不超过 15～20 s；对大件或大批零件同时处理者不超过 30 s。

(2) 应严格控制冷却水的温度。温度愈低，水槽容量愈大，则零件的冷却速度愈大，一般规定水温不超过 30 ℃，淬火完毕后的水温不应超过 40 ℃。但水温过低往往导致形状复杂的零件在淬火时产生严重的变形，另外，对截面尺寸较大的工件，若水温过低，则将因其内外温差过大而形成较大的内应力，严重时会产生裂纹。所以，对某些工件可适当提高水的温度，但也不得超过 55 ℃。

9.3.2 时效

经淬火的铝合金，其机械强度并不显著增加，只比退火状态的稍高一点，只有经过时效处理后，材料强度才有显著提高。

铝合金的时效分自然时效和人工时效两种。

自然时效是把淬过火的工件在室温下放置一定的时间，工件即自行变硬，强度提高。如淬火后的 LY12 合金在室温下放置 4 昼夜，其强度极限就由淬火状态的 303.8 MPa 提高到 411.6 MPa。

在时效的开始阶段，强度尚未升高或升高得很少，此期间称为孕育期。不同合金孕育期的长短也不同。生产中往往利用孕育期强度低、塑性高的特点进行压力加工。例如 40 mm 火箭增程破甲弹中联结尾翼片和尾杆的 LY1 铆钉，若在自然时效后铆接，则因其变硬而使施工困难，因而铆接应在孕育期内进行；又如某些零件在淬火后需要整形，为使整形能顺利进行，也必须在淬火后 24 h 之内完成（如 40 mm 火箭增程破甲弹弹体）。

人工时效是指把经淬火的工件放在较高的温度下（100 ℃～200 ℃）保温几小时至几十小时，使其强度得到提高。如淬火后的 LD2 合金在 150 ℃下人工时效 12 h，其强度极限从淬火状态的 166.6 MPa提高到 323.4 MPa。

时效的速度与温度有密切的关系，不论是自然时效还是人工时效，降低温度都会延缓时效的过程。对人工时效而言，若时效温度过高且保温时间过长，则强度在提高后又会下降，即产生过时效现象。对于以人工时效为主的超硬铝合金制件（如一些火箭弹的燃烧室、喷管及其他重要受力零件），应特别注意防止过时效。

常用的超硬铝 LC4 合金，人工时效的加热温度为 130 ℃～150 ℃，在此温度下保温 24 h。

需要进行人工时效的铝合金，最好在淬火后立即时效，淬火后在室温放置一段时间而后再人工时效将会降低合金的强度。

9.4 典型零件在热处理过程中出现的质量问题及解决方法

热处理零件在热处理过程中出现质量问题的主要原因有三种：一是零件设计时材料选用不当；二是工艺过程安排不当；三是材料及热处理工艺本身的问题。

1. 零件材料选用不当

130 mm 火箭弹燃烧室性能要求：$R_p \geqslant 650$ MPa，$Z \geqslant 45\%$。在试制阶段选用 D60 钢，要达到所要求的机械性能必须采用比较强烈的淬火剂水或氯化钠水溶液。D60 是炮弹专用钢，为满足其破片要求，在普通 60 碳素结构钢化学成分中增加硫和磷的含量，以增加其脆性。由于硫、磷的增加，使材料中增加大量硫、磷化合物杂质，因而使淬火

裂纹的敏感性增强，因此在产品设计定型过程中大量产生裂纹废品，甚至在进行发动机静止试验时发生破裂。在工艺定型阶段将燃烧室材料 D60 钢改为 40Mn2。由于 40Mn2 含有害夹杂较多，增加了淬火裂纹的敏感性，因而造成产品的机械性能大幅度的波动。同一冶金炉号、同一热处理炉次的产品，用弱规范调质后其 $R_{0.2}$ 的波动范围可高达 500 MPa，不能满足产品性能的要求，用强规范淬火又容易产生裂纹。在多年的生产中给工艺造成很大困难。经常因强度不够或过高而返工造成的能源损失、工时损失、废品损失以及裂纹造成的损失是很大的。如果采用 35CrMnSi，增加了 1.10%～1.4%的铬，虽价格略高，但与用 40Mn2 相比较，还是比较合适的。

恰当的选材会使产品质量稳定、成本低、效益好。如 122 mm 火箭弹燃烧室，热冲盂冷拔伸成型，材料选用 14MnNi 就是一个选料恰当的例子。

2. 工艺过程安排不当

同样还是 130 mm 火箭弹燃烧室，原材料为 40Mn2 热轧管材，下料后进行调质处理。由于管材为热轧成型钢，管材内外壁局部脱碳及轧制疵病非常严重，管材壁厚差很大，在切管机下料时不可避免地产生很大的断裂毛边。这种表面脱碳不均、局部存在氧化皮而且带有毛边锐角的毛坯进行调质处理，给工艺带来很多难以克服的困难。如果把工艺过程改为下料→粗车内、外表面→倒角→调质处理，则机械性能稳定，且可避免口部裂纹。

3. 材料质量及热处理工艺不当

原材料化学成分的不稳定，易造成如下缺陷。

(1) 皮下气泡造成的废品。喷管用的 45 钢比较容易发现气泡。因为喷管需要模锻成型，如果有气泡，在预锻打饼时就会出现明显的表面裂纹，甚至延及内部，在调质后出现裂纹。

(2) 碳偏析产生的废品。喷管产生中心裂纹，金相检查发现：中心 ϕ25 mm 以内的组织为 80%珠光体＋20%铁素体，而 ϕ25 mm 以外的部位为正常 45 钢的组织，即 60%珠光体 ＋40% 铁素体。这说明材料碳偏析较严重。这种材料在下料时不易发现，锻造时即成废品；有些转入调质工序，在淬火冷却时产生中心裂纹。

(3) 非金属夹杂物引起的废品。有的 40Mn2 管调质后产生口部裂纹。经理化分析发现裂纹处有严重的硫化物及氧化物夹杂纵向集聚，淬火时应力集中，造成裂纹。

(4) 化学成分的不均匀导致材料淬硬性变化过大而造成的废品。130 mm 火箭弹燃烧室的材料为 40Mn2 。大量生产中，在相同的工艺条件下其 R_p 在 0.58～1.1 GPa 之间波动，其中 R_p 大于 1 GPa 的工件机加困难，R_p 小于 0.7 GPa 的工件不合格，只好根据硬度进行分选，对不合格的产品返工处理，但返工处理往往会造成废品。

(5) 热处理工艺本身造成的废品。在一般情况下热处理工艺不当造成的废品往往与钢材质量有密切关系。例如，钢材化学成分偏析严重时，即使工艺没有波动也会使产品质量（强度、塑性）不均匀，甚至不合格；非金属夹杂物的偏析量超过一定量会导致淬

火裂纹；粗晶粒钢在正常工艺条件下加热会产生粗晶及塑性降低等。工艺造成的废品中多数是由于操作者执行工艺规程不严格造成的。火箭弹零件的形状均为旋转体对称件，结构比较简单，只要设备运行正常，仪表记录准确，操作者能严格执行工艺文件，在大量生产中由于热处理工艺设计不当产生的废品还是比较少的。

第 10 章　火箭弹的表面处理

火箭弹的制造、运输、储存与使用环境是比较复杂的，其大部分零部件又是易被腐蚀的金属件，为了保证火箭弹的性能并安全地使用，必须进行防腐处理。

火箭弹的防腐处理包括在生产过程中的临时性防腐措施、对零部件按需要进行的表面处理、全弹包装和储存应采取的防腐措施。

10.1　表面腐蚀种类及防腐方法

火箭弹金属零部件及成品所处环境的复杂易造成腐蚀。腐蚀一般都始于金属表面，所以，应对表面腐蚀有所了解，进而采取防腐措施。

10.1.1　金属表面腐蚀的种类

按腐蚀机理分类，通常把金属腐蚀划分为两大类：化学腐蚀和电化学腐蚀。

化学腐蚀：是指在没有电流的情况下，金属与周围介质发生化学作用而引起的腐蚀。如火箭弹零件毛坯热冲压或零件热处理在加热过程中的高温氧化等。

电化学腐蚀：是指金属与电解质溶液接触时由电化学作用而引起的腐蚀，这是由于形成了“微电池”而引起的。如火箭弹零件表面，当空气湿度波动时，在其表面凝结成一层水液，其中溶有不少大气中的盐雾、二氧化硫或氨气等，形成电解质溶液。金属零件就是因这种溶液的存在而发生电化学腐蚀，是火箭弹零部件腐蚀的主要形式。

电化学腐蚀是金属与周围介质（如潮湿的空气、海水、土壤、电解质溶液等）发生电化学作用而引起的。它服从电化学动力学规律，任何一种按电化学机理进行的腐蚀反应至少包括一个阳极反应和一个阴极反应，并同流过金属内部的电子和介质中的离子流连在一起。

阳极反应是金属离子从金属转移到介质中和放出电子的过程，阴极反应是介质中氧化剂组分吸收来自阳极的电子的还原过程。如钢在酸性溶液中的腐蚀：

阳极反应　$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$

阴极反应　$2H + 2e \rightarrow H_2 \uparrow$

总反应　$Fe + 2H^{+} \rightarrow Fe^{2+} + H_2 \uparrow$

电化学腐蚀的特点在于腐蚀过程分为两个相对独立并且可同时进行的过程，由于在被腐蚀的金属表面上一般具有隔离的阳极区和阴极区，其结果必有电流产生。

火箭弹在制造、运输、储存及使用过程中产生的腐蚀都可以归结为化学或电化学作

用。其腐蚀主要是局部腐蚀。

局部腐蚀又有以下几种形式。

(1) 应力腐蚀。金属材料在拉伸应力作用下，处在腐蚀介质的环境下所发生的腐蚀即为应力腐蚀。应力腐蚀的结果往往出现裂纹、甚至断裂。

(2) 电偶腐蚀。凡是有不同电极电位的金属相互接触，并在一定的介质中所发生的电化学腐蚀即属电偶腐蚀。

(3) 缝隙腐蚀。金属与金属或金属与非金属材料接触时，即使是采用紧配合，仍然有可能存在间隙，当腐蚀液渗入缝隙中产生化学腐蚀，金属的腐蚀便会加快。

除上述局部腐蚀形式外，还有沟状腐蚀、水线腐蚀、刀口腐蚀等局部腐蚀形式。

了解这些腐蚀的机理及特征，就可以设计防腐方法，使火箭弹的性能得到保证及达到长期储存的要求。

10.1.2 防腐方法

火箭弹的零件较多，所以防腐较一般榴弹要求高，每个零件都要进行防腐处理。其原理是用耐蚀性较强的金属或非金属来覆盖耐蚀性较弱的金属，将主体金属与腐蚀介质隔离开，以达到防腐的目的。

(1) 非金属覆盖层。主要指各种涂料防护层，即通过一定的涂敷方法把油基漆和树脂基漆，涂在金属表面上，经固化形成涂层，保护金属免被腐蚀。如火箭弹生产中采用的铁红醇酸底漆、军黄醇酸面漆、军绿酚醛电泳漆及环氧电泳漆等，都属这类防护。

(2) 金属覆盖层。利用电解作用使耐蚀性较好的金属或合金沉积在金属制件表面，形成均匀、致密、结合力良好的金属层。

10.1.3 防腐方法选择的原则

(1) 根据零部件的材料及使用性能来选择防腐方法。

(2) 防腐层必须有较好的化学稳定性及抗大气中各种腐蚀介质浸蚀的能力。

(3) 防腐层必须与基体有良好的结合力、强度及硬度。一般情况下由于结合力不好、耐蚀性差、强度及硬度低，防腐层易产生机械划伤而降低防腐效果。

(4) 在满足产品零部件防腐要求的情况下，尽量选择比较经济的防腐方法。

10.2 防腐处理前零件表面的清理

经铸造、冲压、机械加工、热处理等工序生产的火箭弹零部件表面存在氧化物、油污、毛刺或其他污物。火箭弹零部件表面的洁净程度是能否获得良好防腐层的重要条件，它直接影响防腐层的结合力及防腐性。生产实践表明，防腐层脱落、起泡等，大多是由于表面清理不合格造成的，因此，表面处理前的表面清理必须引起足够的重视。

10.2.1　机械处理

机械处理指通过机械方法对金属制件进行表面清理的方法。包括：磨光、抛光、喷砂、喷丸、滚光等。火箭弹零部件的表面处理主要用于防腐，因此表面清理一般用喷砂、滚光等方法，很少用磨光、抛光等方法。

1. 喷砂

喷砂是指使制件表面受到喷射砂粒的冲击而进行清理、除锈或粗化的过程。

喷砂使用的砂子主要是石英砂，所用砂粒尺寸、压缩空气压力见表 10-1。

表 10-1　零件、砂粒与压缩空气压力的关系

零件特性	砂粒尺寸/mm	压缩空气压力/kPa
厚度>3 mm 的大型零件	2.5～3.5	250～500
厚度≤3 mm 的中等零件	1～2	150～250
小型薄壁零件、黄铜零件	0.5～1	100～150
厚度≤1 mm 的板材或铝件等	<0.5	50～100

零件喷砂后，其表面很快就会氧化生锈，所以需采取暂时的防护措施。较小的零件可浸在 50 g/L 碳酸钠溶液中浸泡储存数天，中大型零件可采用涂油的方法。

2. 抛丸

将金属制件和铁丸共装在抛丸清理滚筒内进行清理出光的过程，称为抛丸。

122 mm 火箭弹的中间挡药板、支架、后挡药板，130 mm 火箭弹的挡药板等铸钢件，均采用抛丸去除表面氧化物和锈迹，抛丸在专用抛丸机内进行。抛丸用的铁丸应干燥，不允许有泥土、油污，粒度为 1.5 ～2 mm。

3. 滚光

滚光在清理滚筒内进行，用于小型零件清除氧化皮、铁锈和毛刺等。如火箭弹的质量调节板、盖片、药包夹体等冷冲件，成型后毛刺较多，在表面处理前进行滚光清理，效果良好。

10.2.2　除油

零件表面的油污大多是生产过程中产生的，主要有皂化类油脂和非皂化类油脂两类，因此应根据油污的种类、特性及零件上存在的程度选择除油方法。

1. 有机溶剂除油

有机溶剂除油就是利用有机溶剂能溶解皂化类油脂和非皂化类油脂的特性，把油污去除。常用的有机溶剂有煤油、汽油、甲苯、丙酮等。选择有机溶剂必须考虑保健卫生、安全等问题，火箭弹生产中采用航空洗涤汽油较多，汽油毒性小，但易燃，所以必

须注意防火。

应用有机溶剂除油可采用浸渍、擦拭或刷洗方法。由于有机溶剂除油是靠溶剂本身对油脂的溶解能力，因而在溶剂挥发后，零件表面会残留一层油膜，所以应采用数次清刷或清擦，才能保证除净。

2. 金属清洗剂除油

金属清洗剂除油弥补了有机溶剂除油各自的不足，应用广，发展快。金属清洗剂由表面活性剂、助洗剂、缓蚀剂、碱性盐或酸组成，可在常温下使用，有的加入电化学除油槽中与导电盐配用，效果很好。广泛用于电镀、磷化、铝件阳极氧化前的除油。

3. 化学除油

化学除油是相对于电解除油而言，它借热碱溶液的皂化作用来除去皂化油，借乳化作用来除去非皂化油。

在热碱溶液中的除油过程是动、植物油脂的皂化及矿物油的乳化过程。动物油与碱溶液发生皂化反应，生成溶于水的肥皂和甘油。矿物油是非皂化油，不与碱起反应，只能靠乳化作用加以分散，使之脱离工件表面而达到除油的目的。

为了确保化学除油效果，在选择除油规范及溶液维护过程中，必须注意以下几点。

(1) 正确选择除油液成分。氢氧化钠浓度高，皂化反应容易进行，但太浓时反应产生的肥皂不易溶解而附着于工件表面，不易除去。对于易与碱作用的铝、锌、锡、铅及其合金，则不能选用浓碱除油。

(2) 适当控制除油温度，以确保安全除去皂化和非皂化类油污。提高温度可以促进碱性盐类的水解而产生碱，从而加速了皂化反应，同时也能使溶液循环加快，有利于乳化作用，增大皂化反应所生成的肥皂的溶解度。通常除油温度应高于 70 ℃。但对铝、锌等金属及其合金，温度高则会引起过腐蚀，因而，这些金属及其合金的除油温度一般都不高于 60 ℃。

(3) 油污严重的工件，应先用有机溶剂除油后再进行化学除油。

(4) 当除油效果不好时，应及时更换溶液。对槽液表面飘浮的油层，应及时清除，经处理后方可排放。

(5) 为了保证除油效果，在没有条件搅拌溶液的情况下，除油过程应经常上下移动工件。

4. 电化学除油

电化学除油是将工件放在碱性溶液中作为阴极或阳极进行电解的除油。其除油效率及质量都比化学除油好，常作为电镀前的最终除油处理。

电化学除油的实质就是电解水的过程。在阴极上析出氢气或在阳极析出的氧气，对金属表面溶液有强烈的搅动作用，从而促进油污脱离零件表面，同时金属件表面的溶液不断地得到更新，加速了皂化与乳化的过程。

工件处于阴极上的电解除油称为阴极除油，工件处于阳极上的电解除油称为阳极除油。

阴极除油基本不腐蚀工件，而且除油速度快。但阴极除油容易产生氢脆现象和溶液中的金属杂质在工件表面还原而产生黑色或海绵状物，影响镀层的结合力。

阳极除油没有氢脆现象，而且溶液中的金属杂质也不会在工件表面还原。所以工件表面相当清洁。但阳极除油的效率不如阴极除油高，而且对工件有腐蚀作用。

为了发挥阴阳极除油各自的长处，火箭弹零部件多采用先阴极除油后，再阳极除油的联合除油法。经此方法除油，零部件可以获得最佳除油效果。

在除油操作及溶液维护过程中，必须注意以下几点。

(1) 电化学除油时，一个电极是工件，另一个电极可选用不锈钢板或铁板。阴极除油不能用铁板作阳极，因为铁板阳极的溶解会污染电解液。

(2) 电极接触要好，接触不良会产生电火花，引起爆鸣。

(3) 表面活性剂不可使用高泡的，否则过多的泡沫会覆盖在液面或溢出槽外。当液面泡沫较厚时，应先切断电源，然后放进或取出零件。

(4) 提高电流密度，可以相应提高除油速度和改善深孔除油质量，但电流密度过高，不仅形成大量的碱雾，污染工房里的空气，还可能腐蚀零件。

(5) 提高温度可以降低溶液的电阻，从而节约电能。但温度过高不仅消耗了大量的热能，污染工房里的空气，恶化劳动条件，还可能造成零件的腐蚀。

10.2.3　酸洗

火箭弹零部件表面的氧化皮、锈蚀物是由热处理及长期周转和存放产生的。这层氧化皮及锈蚀产物如不彻底清除，将严重影响防腐层质量。

1. 钢铁零件酸洗

钢铁零件酸洗是在硫酸或盐酸溶液中进行的。钢铁零件表面上的氧化皮及锈蚀产物与酸反应生成可溶性盐类而被去除。

$$FeO + H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + H_2O$$

$$Fe_2O_3 + 3H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

$$Fe_3O_4 + 4H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + Fe_2(SO_4)_3 + 4H_2O$$

$$Fe + H_2SO_4 \rightarrow FeSO_4 + H_2\uparrow$$

$$FeO + 2HCl \rightarrow FeCl_2 + H_2O$$

$$Fe_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2FeCl_3 + 3H_2O$$

$$Fe_3O_4 + 8HCl \rightarrow FeCl_2 + 2FeCl_3 + 4H_2O$$

$$Fe + 2HCl \rightarrow FeCl_2 + H_2\uparrow$$

在氧化皮及锈蚀产物溶解过程中，铁与酸作用生成的氢气有助于把疏松的氧化皮从零件表面剥离下来，从而加速零件氧化皮及锈蚀的去除，但氢的析出又会造成零件的过腐蚀和渗氢。为了防止这一缺陷，可在酸洗液中加入缓蚀剂，一般用量 1～3 g/L。

酸洗中使用的缓蚀剂均为吸附膜型的。这类缓蚀剂是通过缓蚀剂的分子上极性基团

的物理吸附作用或化学吸附作用，在酸洗除去氧化皮和锈蚀产物的瞬间吸附在金属表面上。一方面改变了金属表面的电荷状态和界面性质，使金属表面能量状态趋于稳定，从而增加了腐蚀反应的活化性，使腐蚀速度减慢。另一方面被吸附的缓蚀剂上的非极性基团，尚能在金属表面形成一层疏水性保护膜，防止了酸液对金属的腐蚀。

为了确保酸洗效果，在选择酸洗配方、操作及酸洗液维护过程中，必须注意以下几点。

(1) 根据零件锈蚀程度选择酸洗配方。

(2) 酸的浓度与温度对腐蚀速度影响很大。硫酸的浓度达25%时，腐蚀速度最快，盐酸的浓度达36%时腐蚀速度最快。升高酸洗温度时，腐蚀速度也明显加快，通常盐酸酸洗在室温下进行，硫酸酸洗在加温下进行，但酸洗温度不宜过高，以不高于30 ℃为宜。

(3) 搅拌对酸洗速度和质量影响很大。搅拌不当，大量的铁盐及杂质会沉积在金属零件表面，使局部酸洗不匀，而影响酸洗速度及质量。

(4) 要控制酸洗时间，严格防止零件过腐蚀。

(5) 酸洗液中铁盐的含量直接影响酸洗效果，在酸洗初始阶段若酸的浓度很低，铁盐的存在会加速腐蚀。当铁盐增至100 g/L时，酸洗速度会明显下降，铁盐继续增加，酸洗速度下降缓慢。在硫酸中酸洗，$FeSO_4$ 含量超过270 g/L时，应更换酸洗液；在盐酸溶液中酸洗时，$FeSO_4$ 含量超过350 g/L时，应更换酸洗液。

2. 铜及其合金酸洗

铜及其合金零件，通常用硝酸、硫酸和盐酸的混合酸进行酸洗。混合酸酸洗铜时，与铜发生反应的主要是硝酸。混合酸酸洗铜合金时，其合金组分溶解速度会发生变化。因此应正确控制酸化，使铜和锌的溶解速度等于它们在黄铜中的含量比。否则，若盐酸含量不足，工件表面残留过多的锌，表面呈暗黄色；若盐酸含量过多或硝酸含量不足，则工件表面残留过多的铜，表面出现棕褐色的斑点。

为了确保酸洗效果，操作及酸洗液维护过程中必须注意以下几点。

(1) 根据锈蚀情况选择酸洗时间，严防过腐蚀。

(2) 酸洗温度应控制在30 ℃左右。新配的酸洗液，由于溶解时放热，温度较高必须冷却后使用。

(3) 新配的酸洗液一般先用废零件预先处理一下，这样会消耗掉含量过多的那一种酸，使比例更为恰当。

(4) 铜及铜合金零件应采用单独的酸洗溶液。

10.3 钢质零件的氧化和磷化处理

10.3.1 钢质零件的氧化处理

用化学、电化学或热处理等方法在黑色金属上制出一层人工氧化膜的过程，称为氧

化处理，也称发蓝。氧化膜是由磁性氧化铁（Fe_3O_4）所组成的。氧化膜厚度为 0.5～1.5 μm，其抗蚀性能较低，只适用于抗蚀性要求不高或在其他特殊情况下使用。

钢铁氧化方法有回火着色法、酸性发黑法和热碱发蓝法。火箭弹零部件采用的是热碱性氧化处理法。

1. 碱性氧化处理成膜机理

钢铁零件在氢氧化钠、亚硝酸钠或硝酸钠溶液中，生成亚铁酸钠（Na_2FeO_2）及铁酸钠（$Na_2Fe_2O_4$），二者进一步作用生成四氧化三铁，即氧化膜。

四氧化三铁在溶液中的溶解度较小，当浓度达到饱和后，就在金属零件表面生成较致密的氧化膜。在形成四氧化三铁的同时，铁酸钠容易发生水解，变成含水的氧化铁。

含有较小结晶水的氧化铁在较浓的碱溶液中溶解度更小，很容易在氧化溶液中或钢铁零件表面生成红色沉淀物。

2. 工艺流程

碱液去油→热水洗→冷水洗→酸洗→冷水洗→中和→冷水洗→热水洗→氧化处理→氧化液回收→热水洗→冷水洗→皂液封闭→清洗→热风吹干→浸油、揩去多余油→包装

3. 氧化膜的后处理

(1) 浸皂处理。为了提高氧化膜的抗蚀性，零件经水洗后，浸泡在温度为 90 ℃～100 ℃、浓度为 3%～5%的肥皂液中，时间为 1～2 min，进行填充处理。

(2) 浸油。可以用一般机油、变压器油或锭子油，在 105 ℃～120 ℃时浸渍 3～5 min 即可。如果是新油或油槽停用一段时间后，使用前先将油加热至 140 ℃左右，保持至没有泡沫出现，然后冷却至 120 ℃后再使用。当油的酸值达到 0.35 mg/L 或有腐蚀性时就必须更换。

4. 不合格氧化膜的退除

氧化膜如因质量不合格而需要重新氧化处理时，可将氧化过的合格零件浸在 5%的硫酸或盐酸溶液中退除。

5. 发蓝时常见的故障，可能原因及处理方法

发蓝时常见的故障，可能的原因及处理方法见表 10-2。

表 10-2　发蓝时常见的故障，可能的原因及处理方法

序号	故　障	可能的原因	处　理　方　法
1	零件在槽里维持很长时间，覆层颜色仍很浅，甚至不生氧化膜	1. 溶液铁含量高 2. 苛性钠低，沸腾温度低	1. 稀释溶液，除去沉淀 2. 按分析结果提高苛性钠浓度或蒸发水分，提高温度

续表

序号	故　障	可能的原因	处理方法
2	氧化物表面有一层红色挂灰	1. 温度过高 2. 溶液中氢氧化铁含量过多	1. 降低温度（补充水分） 2. 稀释溶液，过滤除去沉淀，也可加入甘油或黄血盐，捞去浮渣 3. 将零件取出放入铬酸中漂去红色附着物后重发蓝
3	零件上呈黄绿色挂霜	1. 溶液温度过高 2. 碱含量高 3. 氧化剂含量高	1. 降低温度，补充水，将溶液加热至沸腾再发蓝 2. 调整碱含量 3. 同序号1或重新调溶液
4	氧化膜色泽不均或发花	1. 氧化时间不足 2. 苛性钠含量低 3. 零件发蓝前除油不彻底或除油清洗不净	1. 延长氧化时间 2. 添加苛性钠，将溶液沸点提高 3. 加强前处理
5	零件局部未生成氧化膜或膜局部脱落	1. 零件互相紧密接触 2. 前处理除油不彻底	1. 氧化时经常翻动零件 2. 加强前处理
6	零件发蓝后在肥皂液处理时氧化膜出现白斑点腐蚀	肥皂液带腐蚀性	分析皂液对铁片的腐蚀性，不合格予以更换
7	零件在保管期间出现白色挂霜	氧化后零件清洗不彻底	加强发蓝后的清洗工作，用酚酞检验

10.3.2 钢质零件的磷化处理

火箭弹的许多零件都是经磷化后进行涂漆以提高制件的耐蚀性，膜层具有良好的润滑性。磷化再皂化后，常用作火箭弹零件冷挤、冷拔时的润滑层，可减小摩擦，避免或减少零件表面产生拉伤、裂纹，同时可延长模具的使用寿命。

钢质零件经磷化后机械性能基本保持不变。磷化处理过程中，伴随着铁的溶解，虽然生成磷化膜厚度达5～20 μm，膜层质量5～15 g/m^2，但零件尺寸改变较小。

磷化的优点在于可在火箭弹零件复杂的表面上形成电化学方法难以获得的保护膜。所需设备简单、操作方便、成本低、生产效率高，因此应用较广。

目前磷化膜按其主要组成分类，以阳离子元素为主，分为锌系、锰系、铁系三大

类。按磷化工艺的温度可分为高温、中温、常温磷化处理。

火箭弹零件的磷化选用锌系中温磷化，多年的生产实践证明该工艺磷化膜质量优良、溶液稳定、生产效率高。

1. 磷化液中各种成分的作用及影响磷化膜质量的因素

(1) 磷化液中各种成分的作用如下。

① Zn 可以加快磷化速度，使磷化膜致密，结晶闪烁有光。锌离子含量低时，磷化膜疏松发暗；锌离子含量过高，磷化膜结晶粗大，排列紊乱，白灰较多。

② P_2O_5 可以加快磷化速度，使磷化膜致密，晶粒闪烁发光。含量低，则磷化膜不致密，耐蚀性差，甚至不能形成磷化膜；过高时，膜层结晶排列紊乱，附着力差，白灰较多。

③ NO_3^-、NO_2^- 可加快磷化速度，提高膜层致密性。NO_2^- 可提高膜的耐蚀性，NO_3^- 过多会使亚铁离子聚积过多，NO_2^- 过多，膜层容易出现白点。

(2) 影响磷化膜质量的因素如下。

① 游离酸度、总酸度：游离酸度低时，磷化膜薄，甚至不能成膜；总酸度低时，磷化慢，且膜层厚而粗。游离酸度高时，反应慢，膜层晶粒粗而多孔，Fe^{2+} 容易升高，沉淀增多；总酸度太高，则膜层太厚。

② Fe^{2+}：在钢质零件的磷化过程，溶液中保持一定数量的 Fe^{2+}，可以显著提高磷化膜的厚度、机械强度和防护能力，且工作范围较宽。Fe^{2+} 过高时，磷化膜晶粒粗大，表面有白色浮灰，防护能力及耐温性均降低。

(3) 杂质。

① SO_4^{2-}：主要来源于前处理硫酸浸蚀清洗不净的残液及化学材料中的杂质。SO_4^{2-} 不大于 0.5 g/L 为宜。否则磷化速度慢，膜层孔隙多，容易锈蚀。过量的 SO_4^{2-} 可用 $Ba(NO_3)_2$ 沉淀除去，Ba 不可过量，否则结晶粗大，表面白灰多。

② Cl^-：主要来源于前处理盐酸浸蚀清洗不净的残液及化学材料中的杂质。Cl^- 不大于 0.2 g/L 为宜，它的影响与 SO_4^{2-} 相似。过高的 Cl^- 可用 $AgNO_3$ 沉淀除去。因 $AgNO_3$ 价格昂贵，处理成本高，因此尽量防止 Cl^- 对磷化液的污染。

③ Cu^{2+}：主要来源于化学材料的杂质和磷化组件上的铜部分的溶解，还应注意不能采用铜加热管，否则会造成大量 Cu^{2+} 污染磷化液。不论在浸蚀液中还是在磷化液中，均会导致工件表面发红，降低抗蚀能力。Cu^{2+} 可用经除油酸洗好的铁屑置换除去。

④ 温度：提高温度可加快磷化速度，提高磷化膜的附着力、硬度、耐蚀和耐热性。但温度太高，会导致 Fe^{2+} 迅速氧化、Fe^{3+} 生成 $FePO_4$ 沉淀，使磷化液不稳定。

⑤ 工件材质和表面状态：高、中碳合金钢容易磷化，磷化膜黑而厚实，但膜层结晶有变粗的倾向，低碳钢磷化膜颜色较浅，结晶致密，在磷化前进行适当的浸蚀，可显著提高磷化膜的质量。工件表面因上道工序不慎，局部带上油漆、油污、腊笔印痕等，应在磷化前除去，否则该部位不能形成磷化膜。

2. 常见疵病及其消除方法

磷化常见疵病及其消除方法见表 10-3。

表 10-3 磷化常见疵病及其消除方法

序号	疵病	原　　因	消除方法
1	磷化液结晶粗糙，多孔	1. 游离酸含量高 2. NO_3^- 不足 3. 产品表面有残酸 4. Fe^{2+} 含量过高 5. 产品表面过腐蚀	1. 分析调整 2. 补充 $Zn(NO_3)_2$ 3. 加强清洗中和 4. 加双氧水或通入压缩空气 5. 控制酸洗时间
2	膜层过薄，无明显结晶	1. 总酸度高 2. Fe^{2+} 含量低 3. 温度低	1. 加水稀释，分析调整 2. 用干净铁屑处理 3. 适当提高处理温度
3	磷化膜耐蚀性差和生锈	1. 磷化晶粒过粗或过细 2. 游离酸含量高 3. 磷酸盐含量不足 4. 产品表面有残酸和水 5. 转运箱中有水分	1. 调整游离酸度和总酸度 2. 分析调整 3. 补充 $Zn(H_2PO_4)_2$ 4. 加强清洗、干燥 5. 干燥处理
4	产品黏附白色沉淀物	1. 溶液中沉淀物过多 2. NO_3^- 不足 3. Zn^{2+}，Fe^{2+}，P_2O_5 含量高	1. 澄清过滤、不使磷化液沸腾 2. 补充 $Zn(NO_3)_2$ 3. 稀释、分析调整
5	磷化膜不均匀，发花	1. 油除不净、温度偏低 2. 产品表面有钝化状态	1. 加强除油，调节温度 2. 酸洗和停留时间不能太长
6	冷挤后产生磷化膜条状脱落	1. 皂化液有杂质 2. 皂化前产品表面有杂质和沉淀物	1. 清除杂质或更换皂化液 2. 清理产品表面，重新磷化
7	磷化膜发红，抗蚀能力下降	1. 酸洗液中有 Cu^{2+} 污染 2. 磷化液中有 Cu^{2+} 污染	1. 用干净铁屑处理或更换酸液 2. 用干净铁屑处理

3. 磷化膜皂化填充

122 mm 火箭弹的战斗部本体和燃烧室在毛坯冷挤压过程中的磷化，是为了增强冷挤的润滑性能，减轻冷挤中模具的磨损，提高冷挤质量，因此磷化后必须进行皂化填充处理。

122 mm 火箭弹战斗部本体、燃烧室、破片圆筒等成品磷化后需进行涂漆处理，为了提高漆层与基体的结合强度，磷化后一般不进行皂化填充处理，而在磷化后 24 h 内

转入涂漆工序涂漆。

4. 磷化膜的质量检验

磷化膜的质量指标和技术条件应参照原兵器工业部 1982 年发布的标准《炮弹、火箭弹、引信、火工品钢零件磷化技术条件 WJ 536—1982》。在实际工作中，主要对磷化层进行外观和耐蚀性检验。

(1) 外观检验。在光线充足的自然光或日光灯下进行 100%外观目测检验。

(2) 耐蚀性检验。

① 氯化钠溶液浸泡法：只限于精加工件，如冷挤压光亮拔伸件或机加件。

② 硫酸铜溶液点滴法：适用于涂油或涂漆前的零件。

10.4　电化学处理

电化学处理是应用电化学原理对制件进行表面防护的方法，常用的有电镀、铝及其合金的电化学氧化。

电镀是利用电解使金属或合金沉积在制件表面，形成均匀、致密、结合力良好的金属层的过程。火箭弹生产中常用的有镀锌、镀铬等。铝及其合金电化学氧化，是指在一定电解液中，以金属件为阳极，经电解在制件表面形成一层具有防护性、装饰性或其他的氧化膜的过程。

10.4.1　镀锌

1. 概述

锌是一种银白色的金属，常温下较脆。在加热到 100 ℃～105 ℃才有延展性，但当温度超过 200 ℃时变脆。它易溶于酸，也溶于碱，故称两性金属。

$$Zn+2HCl=ZnCl_2+H_2\uparrow$$

$$Zn+2NaOH+2H_2O=Na_2[Zn(OH)_4]+H_2\uparrow$$

锌的标准电极电位为－0.76 V，钢铁件上的镀锌层属于阳极镀层，当零部件受到腐蚀介质侵蚀时，钢铁与锌层形成原电池，锌层作为阳极首先腐蚀，使钢铁得到保护。即使锌层表面不完整，也能起到保护钢铁的作用，所以锌层既有机械保护作用，又有电化学保护作用，抗蚀性能相当优良。在火箭弹钢质零件的防护方面得到广泛应用。

镀锌液的种类很多，主要分酸性和碱性两大类。酸性应用最广的是氯化物光亮镀锌，碱性有氰化物镀锌、锌酸盐无氰镀锌。这几种镀锌液除具有良好的分散能力和深镀能力强、电流密度宽、生产效率高、镀层结晶细致、钝化色泽鲜艳外，另外它们还各有特点。氯化物酸性镀锌光亮性好、效率高，特别适用于镀铸铁件，它的缺点是对设备腐蚀较重、镀层脆性大、钝化膜变色重。氰化物镀锌，镀层质量优良、无脆性、对设备无腐蚀、钝化膜不变色，但氰化物毒性大，现在很少使用。锌酸盐无氰镀锌，毒性小、镀

层厚度 20 μm 以下、脆性小、对设备无腐蚀、钝化膜变色小。常用的镀锌有氯化物镀锌、锌酸盐镀锌等。火箭弹零部件镀锌采用的是锌酸盐镀锌。

2. 影响镀层质量的因素

(1) 锌碱比。所谓锌碱比是指锌酸盐镀锌液中 NaOH/ZnO 的含量比。实际生产中，锌碱比宜控制在 15～17（滚镀时为 11～13）。由于苛性钠与空气中的二氧化碳反应生成碳酸钠，镀液中锌含量又与阳极的状况有很大关系，因而应及时分析 NaOH 与 ZnO 的含量，将 NaOH 添加至规范要求。当锌含量低时，多加几块锌板，让其溶解。平时生产中为防止锌板钝化而使锌含量下降，一是要保证 NaOH 含量，二是要保证阳极面积必须大于阴极面积。锌含量高时，可取出锌板，放入 Cr18Ni9Ti 不锈钢板作阳极。

(2) 添加剂。为了得到具有实用价值的镀层，必须在锌酸盐镀液中加入具有提高阴极极化作用的添加剂。

锌酸盐溶液中加入 DE 等添加剂后，能吸附在工件表面上，形成锌离子放电的阻挡层，从而达到提高阴极极化的作用。

(3) 温度。镀液温度低时，电流密度范围小，电流效率低，沉积速度慢，而且容易导致镀层起泡。温度偏高时镀层粗糙，分散能力和覆盖能力下降，镀液温度一般控制在 15 ℃～25 ℃。

(4) 电流密度。锌酸盐镀液的电流密度范围较宽，挂镀时一般控制在 1～1.5 A/dm^2，滚镀控制在 1 A/dm^2 左右为宜。

(5) 阳极。阳极锌板规格应符合 GB 470—1983Zn-0 和 GB 470—1983Zn-1 标准，锌含量不低于 99.99%，面积与阴极面积配比适当，分布要合理，以确保电力线分布均匀。

3. 故障处理

锌酸盐镀锌常见故障及处理方法见表 10-4。

表 10-4 锌酸盐镀锌常见故障及处理方法

序号	故障	产生原因	处理方法
1	镀层起泡	1. 零件上有油	1. 加强前处理
		2. 镀液温度过低	2. 镀液加温
		3. 锌碱比失调	3. 分析锌碱含量，按工艺调整
		4. 电流过大	4. 降低电流
		5. 镀层过厚	5. 镀层控制在 20 μm 以下
		6. 中途断电	6. 断电后要浸酸活化后才能电镀
		7. 金属杂质过多	7. 用铝粉处理
		8. 添加剂含量过高	8. 用活性炭处理过滤

续表

序号	故障	产生原因	处理方法
2	沉积慢，覆盖能力差	1. 添加剂含量低 2. 电流密度低 3. 镀液温度过低 4. 碱含量偏低 5. 挂具设计不合理	1. 用霍尔槽试验后补加 2. 加大电流密度 3. 镀液加温 4. 分析后补加 5. 改进挂具、增加辅助阳极
3	镀层脆性大	1. 前处理不良 2. 镀液温度偏低 3. 金属杂质过多 4. 镀层渗氢过多	1. 加强前处理 2. 镀液加温 3. 用铝粉处理 4. 改进前处理，适当降低锌碱化
4	镀层粗糙发暗	1. 添加剂含量低 2. 锌高、碱低、比例失调 3. 镀液温度高 4. 电流密度大 5. 镀液中悬浮物多	1. 用霍尔槽试验后补加 2. 分析后进行调整 3. 降温到 25 ℃以下 4. 降低电流密度 5. 进行过滤处理
5	分散能力差	1. 添加剂含量低 2. 锌碱比例失调	1. 用霍尔槽试验后补加 2. 分析后进行调整
6	阳极钝化，锌含量低	1. 阳极面积过小 2. 碱过低 3. 阳极不纯，含 Si 杂质	1. 增大阳极面积 2. 分析后进行补充 3. 改用纯度高的阳极
7	镀层有条纹和气流	1. 电流效率较低 2. 析氢	1. 适当降低电流密度 2. 适当加一些表面活性剂

4. 镀锌后处理

1）除氢处理

金属制件在电镀过程中，除了镀锌以外还有氢离子在阴极上还原，一部分成为氢气放出，另一部分以氢的原子状态渗入镀层及基体金属的晶格中，产生内应力，使镀层和工件变脆。渗氢除电镀形成外，在酸洗、阴极电解去油过程中也会形成。这种由于浸蚀、除油或电镀等过程中金属或合金吸收氢原子而引起的脆性，叫氢脆。氢脆对金属制件的机械性能危害很大，会影响制件的使用寿命，也会造成损坏。因此在镀锌后，对于重要制件，如弹簧、弹簧圈等弹性零件和薄壁零件都必须进行除氢处理。加热处理是消

除氢脆的有效措施。除氢应在制件电镀后 4 h 内尽快实施。

加热处理除氢可在干燥箱内进行，由于火箭弹需除氢的零件不多，选用小烘箱即可。

加热处理条件：温度高，时间短；温度低，时间长。一般控制在温度为 180 ℃～200 ℃，时间在 2～4 h。DE 型镀锌既要考虑除氢的目的，又要使除氢后变色小。工艺为：除氢温度 160 ℃～180 ℃，保温时间 4 h。

除氢工序常见的疵病是除氢变色和锌层起泡。由于要求除氢的工件大部分是弹性零件，一般只允许返镀一次或者不允许返镀，因此，保证电镀除氢一次成功是该工序的关键。

除氢锌层起泡的原因主要在于镀前处理。镀前处理必须按工艺严格进行，必须经金属清洗剂去油→电化学去油→盐酸浸蚀，把工件表面的油、锈彻底除净，严防制件接触铜及其他污物。为了防止锌层起泡，操作中应注意以下几点：

(1) 采用工艺规定的金属清洗剂，对弹性零件清洗，效果较好，可代替 180 号航空汽油。

(2) 电化学除油，采用阳极去油，温度在 90 ℃～95 ℃，电流密度在 5 A/dm^2 以上，除油槽中严防 Cu^{2+} 等金属杂质污染，严重时要更换，或除铜后再进行 1～2 min 阳极去油。

(3) 酸浸蚀尽量采用浓的新盐酸，酸中绝不能有 Cu^{2+}，否则更换。

(4) 工件浸蚀后入镀槽时，在空气中停留时间不宜太长。

(5) 镀锌槽应定期进行净化处理，光亮剂应尽量少加，电镀工作应正常，中间不能断电。

2) 钝化处理

所谓钝化，就是把经过镀锌的工件浸入含有铬酸等组分的溶液中进行处理，使镀锌层表面形成稳定性高、组织致密的钝化膜，起到提高抗蚀性能和装饰的作用。

钝化的机理较为复杂。简单地说，锌层在钝化过程中，是一个固—液两相界面上氧化还原过程，即锌被氧化溶解，六价铬被还原。同时，锌层与溶液界面的 pH 值升高，但由于溶液内部的 pH 值较低，钝化膜较难形成，即使能形成钝化膜，也很快会被溶解掉，故锌层在钝化液中，主要以锌溶解为主，即锌层得到抛光。

在锌层离开钝化液后，在空气中短暂的停留时间内，锌层继续和滞留在其表面的铬酸、硝酸和硫酸等起反应，此时锌层与溶液间界面上的 pH 值升高，有利于钝化膜的形成，不利于膜的溶解，即形成了钝化膜。

铬酸盐转化膜种类较多，按铬酸盐转化膜的颜色可分为白色钝化、彩虹色钝化、草绿色钝化、黑色钝化等。如按其溶液成分可分为一盐一酸钝化、三酸钝化、五酸钝化等。按其溶液铬酸含量又可分为低铬钝化、中铬钝化和高铬钝化。火箭弹零件镀锌钝化应用较多的是三酸彩虹色钝化和五酸草绿色钝化。

(1) 三酸彩虹色钝化。影响彩虹色钝化膜质量的因素主要有以下几个方面。

铬酸：钝化液的主要成分是六价铬，通过还原剂锌的作用，可部分还原为三价铬。铬酸浓度高、抛光性好、成膜速度加快。铬酸浓度低时，彩色较淡。没有三价铬，钝化膜无法形成。新配制的钝化液必须用锌板溶解还原处理数小时，当 Cr^{3+} 达到一定量时，才能进行钝化处理。

硝酸：具有较强的化学抛光作用，过高时会加速膜的溶解，过低时钝化膜表面发雾。硝酸易挥发，平时补加量要多于 H_2SO_4。

硫酸：起增厚钝化膜的作用，过高时会使膜层疏松，甚至脱落；过低时，钝化膜色淡。

时间：高铬钝化液酸度较高时，工件在钝化液中表面形不成钝化膜，只起抛光作用。当工件在空气中停留时，表面 pH 值逐渐升高，凝胶状膜才逐渐形成，因此要求在溶液中钝化 5～15 s 后，必须在空气中停留 5～10 s，形成的膜才厚实、色泽鲜艳。

老化处理：转化膜的烘干称为老化处理，干燥使钝化膜变硬，光泽度有所提高，但为了防止膜层脱水而开裂，干燥温度不应超过 60 ℃，同时也要注意钝化后的热水漂洗。为了防止六价铬的溶解，其热水温度不宜高于 60 ℃，且漂洗时间应尽可能短。

(2) 五酸草绿色钝化。草绿色钝化膜是由铬酸盐钝化膜和磷化膜组成。铬酸盐钝化膜不能增厚膜层，呈黄绿色，起电化学保护作用；磷化膜能加厚膜层，呈灰绿色，起机械保护作用，所以草绿色钝化膜具有独特的性质，它的防护性能优于其他铬酸盐钝化膜。

获得光泽草绿色钝化膜要点主要包括以下几个方面。

① 获得光泽草绿色钝化膜的基础是镀锌层，要求镀锌层均匀、光亮，锌层厚度达 5 μm 以上。

② 零件钝化时要适当摇动，出槽前 10 s 停止摇动可得到光泽、颜色一致的膜层；如果不摇动，则零件钝化膜无光泽或呈灰绿色。能摇动的零件采用配方的中、下限为好，不能摇动的零件应采用配方的上限。

③ 由于钝化液中成分多，分析周期长，如未达到生产要求，可依据钝化膜的外观进行如下调整：

- 钝化膜呈灰色需加铬酸；
- 钝化膜呈无光草绿色需加 HNO_3，但不能多加，否则有微彩虹干涉色出现；
- 钝化膜呈浅绿色，稍带浅黄色需加磷酸；
- 钝化时间过长需加 H_2SO_4。

④ 零件经钝化后应适时进行清洗。停放时间过长钝化膜呈灰色且带微彩色，而水洗不充分易形成铬酸盐流痕。水洗后胶体膜层还很软，为防止相互碰撞而划伤，应立即用干净的压缩空气吹干、烘干。

⑤ DE 型镀锌层如钝化形不成草绿色而呈土黄色，原因不在于钝化液，可在镀锌液中加入少量 Na_2S，镀出的零件进行钝化后，便可得到满意的外观。

⑥ 钝化挂具的材料应镀锌，用铝丝也可以，但不能用铜丝或铁丝作钝化挂具，否则接触处无光泽钝化膜形成。

3）镀锌层的质量检验

镀锌层质量指标和技术条件应参照原兵器工业部标准 WJ 540—1982《炮弹、火箭弹、引信、火工品钢零件镀锌技术条件》执行。

根据技术条件，镀锌后进行钝化处理的零件，需进行如下检验：100%外观目视检验，镀层厚度按 WJ 545—1982 检验，结合力按 WJ 1360—1982 检验。

10.4.2 镀铬

1. 概述

1）性质及用途

铬是银白色的金属，按其标准电位属较活泼的金属，它的化学腐蚀性能与铁相似，但实际上铬近似于不活泼金属。这主要是由于铬在空气中很容易形成致密的钝化膜，由此而变得不活泼。大多数化学药品与铬不发生作用，又由于铬的浸润性很差，不亲合含水的介质和油，所以铬在大气中很稳定。钝化后的铬层表面电位变正，因此在钢铁表面上铬镀层，铬为阴极。由于铬的高硬度、耐磨性以及在大气中的钝化性能，铬层可以保护零件表面不受腐蚀。

2）镀铬液的种类

镀铬液分六价铬镀液及三价铬镀液两大类。由于火箭弹零部件对耐磨性及防腐性的特殊要求，采用的是六价铬镀液进行镀硬铬。

2. 镀硬铬

1）特点

镀硬铬层并不比普通镀铬层硬，而是由于普通镀铬层特别薄，在机械应力作用下，特别是压力作用下，其铬层的硬度不能发挥作用。这主要是因为铬层是镀在比铬软的金属上，当压力作用时，很容易被压陷。当铬层达到 10 μm 以上时，才能逐渐表现出铬的硬度。镀硬铬与普通镀铬的区别在于：

（1）镀层厚度要比普通镀铬厚几十至几百倍。

（2）电镀的时间长，电流密度大。在模具设计时需考虑导入电流的损失。

（3）采用仿形阳极或辅助阴极，改善镀层分布的均匀性。

（4）镀层需进行除氢处理。

2）工艺流程

碱水洗 → 碱液去油 → 热水洗 → 冷水洗 → 酸洗 → 冷水洗 → 电化学除油 → 热水洗 → 冷水洗 → 弱腐蚀 → 冷水洗 → 温水洗 → 镀铬 → 镀铬液回收 → 热水洗 → 烘干 → 检验

镀硬铬工艺配方中，低浓度的镀液，电流效率和镀层硬度较高，并且可以采用较高的电流密度，但深镀能力较差，因此适用于简单零件的镀硬铬。高浓度的镀液导电性好，镀液也稳定，深镀能力较好，但电流效率低，所以主要适用于复杂零件镀硬铬。中浓度镀液性能介于二者之间。

3）影响因素

（1）铬酸与硫酸的质量比。在镀铬溶液中，影响镀铬层质量的主要因素是铬酸与硫酸的质量比，必须保持在 50∶1～250∶1 范围内。生产实践表明，比值最好控制在 95∶1～ 100∶1 范围内，而硬铬经常采用的比值是 85∶1～95∶1，比值太大时，镀层的光泽变差，沉积速度降低。比值太小时，电流效率和深镀能力都下降，镀层裂纹也增大。

（2）三价铬。镀铬溶液中只有含一定量的三价铬，才能保证获得良好的镀层，当三价铬含量偏低时，镀液呈棕红色，镀层亮度不佳，分散能力差，而且镀后清洗性不好。当三价铬含量偏高时，镀液呈棕黑色，电阻增大，槽压升高，而且镀层光亮范围也狭窄，在镀铬过程中三价铬的含量控制在 6 g/L 以下，其极限含量一般不应超过 10 g/L。

（3）阴极电流密度。镀铬时的阴极电流密度范围相当宽，并且与温度有非常密切的关系。通常温度低，电流密度低，得到光亮镀层的范围窄，零件边缘易烧焦。温度高，电流密度也必须相应提高，同时得到光亮镀层的范围也较宽，而且随着电流密度的升高，阴极电流效率提高，镀液的分散能力也提高。

（4）温度。温度对镀层的外观色泽有非常明显的影响。通常槽液温度低，镀层外观呈暗灰色；温度过高时，镀层外观呈乳白色，并且随着槽液温度的升高，镀层的硬度和阴极的电流效率也降低。

（5）阳极。镀铬不采用可溶性的金属铬作为阳极，这主要是它在镀铬过程中极易溶解。阳极金属铬溶解的电流效率远远地大于阴极金属铬沉积的电流效率。这样会造成镀液中的铬的含量愈来愈高，致使无法正常镀铬。镀铬通常采用的阳极材料为纯铅、锑合金或铅锡合金。

4）镀后除氢处理

由于零件在电解除油、酸洗及电镀过程中氢离子会渗到零件基体内部，产生氢脆，所以零件在电镀之后，应尽快进行除氢处理，通常采用的方法是加热除氢，即将零件放在烘箱中。为使零件受热均匀，可将零件用砂子埋住，然后加热到 200 ℃左右，保温 2～4 h，即可除氢。

5）不合格镀层的退除

镀铬过程中因各种原因而使镀层出现疵病的，应将镀层退除重新再镀。对钢铁零件可用 50 g/L 无水碳酸钠水溶液，在室温下以电流密度 5 A/dm^2 进行处理。溶液中不可带入 Cl^- 及 SO_4^{2-}，否则腐蚀零件。如发现腐蚀现象，可采取加氢氧化钠的办法消除。

10.4.3 铝及铝合金的阳极氧化

1. 概述

铝及铝合金表面在空气中很容易生成极薄的氧化膜，这层 0.01～0.02 μm 的氧化膜在空气中有一定的抗蚀能力。由于这层氧化膜是非晶态的、疏松多孔、不均匀、不连续、抗蚀能力不强，且容易沾染污迹，因此铝及铝合金通常采用电化学法即阳极氧化法或化学法进行氧化处理。

化学氧化处理所获得的氧化膜比较薄，厚度 0.5～4 μm，质软不耐磨，抗蚀能力低于电化学氧化膜。所以，除有特殊用途外，很少单独使用。化学氧化膜有较好的吸附能力，可作为油漆的良好底层。化学氧化处理的优点在于所需的设备简单、操作方便、生产效率高、成本低、适用范围较广、不受零件大小和形状限制。经化学氧化后再涂漆，可有效地提高零件的耐蚀性。

电化学氧化处理所获得的氧化膜厚度一般在 5～20 μm，硬质阳极氧化膜厚度可达 20～60 μm。这种方法能有选择性地提高制品表面的空隙率、染色性、硬度、耐磨性、抗蚀性和绝缘性等理化、机械性能。因此，铝及其合金的阳极氧化技术在精密仪器、仪表、日用品、工艺品、机电产品和军工产品等多种制造业中得到广泛应用。目前所用的阳极氧化种类较多，其中包括硫酸氧化法、草酸氧化法、铬酸氧化法、瓷质氧化法和硬质氧化法 5 类。由于硫酸阳极氧化法获得的氧化膜较厚、无色透明、孔隙多、吸附性好、易于染色，其电解液成分简单、性能稳定、成本低、操作方便，火箭弹上的铝及铝合金零件大都采用硫酸阳极氧化。

2. 氧化膜的结构

阳极氧化膜是从金属内部生长起来的，这与一般电镀覆盖金属表面的过程相反。氧化膜分为两层，在薄膜内层是与金属直接相连的无水三氧化二铝，叫阻挡层，它硬度高、致密而薄，薄膜的外层是厚而较疏松的带水化氧化层 $Al_2O_3 \cdot H_2O$，厚度 1～25 μm，外膜层有许多毛细管状的孔隙。

由于零件在阳极上，因此氧化膜的形成包括两个过程，即膜生成过程与溶解过程。只有当生成过程大于溶解过程时，氧化膜才能生成并不断增加厚度。

成膜时，由于外层氧化膜疏松多孔，电解液可通过孔隙进入内层，在靠近金属表面的内层，氧化膜不断溶解而又生成新的氧化膜，如此不断作用变化，使氧化膜的总厚度增加。

3. 各种因素对氧化膜性能的影响

(1) 硫酸。氧化膜的形成包括溶解与生成两个过程，膜的生成速度取决于这两个过程的比率。电解液浓度的变化对膜在电解过程中的溶解产生很大影响，当硫酸浓度太高时，膜的化学溶解速度加快，所以膜层薄，不密实，防护性能下降，但氧化膜孔隙率大，便于着色。当硫酸浓度低时，膜生成速度快，密实孔隙小，吸附能力差，防护性

能高。

(2) 温度。温度对氧化膜质量影响较大，温度越高氧化膜溶解速度越快，膜层越薄，且疏松多孔，有粉末。温度过低，膜层密实，硬度高而脆，氧化时间长。

(3) 电流密度。提高电流密度可以加大膜的生长速度，但电流密度过高会使零件表面过热，局部溶液温度升高，加速氧化膜溶解。电流密度过低，氧化膜生成速度慢，时间延长。

(4) 时间。氧化时间与材料成分及后处理有关。试验表明，在 60 min 以内能得到一定厚度的氧化膜，以 30～40 min 质量最好，但染色的零件要延长到 65～75 min，对于阳极氧化可取下限，铝合金时间则需延长。

(5) 铝合金成分。铝合金的化学成分，不仅对膜层的抗蚀能力有影响，而且对膜层厚度，外观颜色影响较大。在相同情况下纯铝得到的氧化膜比合金的氧化膜厚、色泽好。硅铝合金较难氧化，膜层发暗。含铜量高的硬铝也难氧化，并且产生黑色。

(6) 杂质。

① Al^{3+}。适当的 Al^{3+} 对氧化膜形成有好处，但它含量不能过高，否则电阻太大。

② Cl^-、F^-、NO_3^-。这些杂质存在时，氧化膜的孔隙率增加，形成粗糙而疏松的表面，因而生产中一定注意用水的质量，防止这些有害阴离子带入氧化槽。

4. 氧化膜的封闭处理

火箭弹的铝及铝合金零件经阳极氧化封闭后主要用于防腐，因此这些零件氧化后一般是采用重铬酸钾封闭处理。

把氧化后的零件水洗干净后放入重铬酸钾溶液中，经过一段时间，重铬酸钾被吸收在氧化膜内。

5. 硫酸阳极氧化常见故障及处理方法（见表 10-5）

表 10-5　硫酸阳极氧化常见故障及处理方法

序号	故障现象	产生原因	处理方法
1	氧化膜疏松粉化易擦掉	1. 氧化槽温度高 2. 氧化时间长 3. 阳极电流密度大	1. 采用冷却设施降温 2. 缩短氧化时间 3. 调整阳极电流密度
2	氧化膜有泡沫状或网状花纹	1. 除油出光不良 2. 电解液有硅杂质	1. 加强预处理 2. 过滤电解液
3	局部无氧化膜，有黄斑	原材料上防锈油长时间风干固化难于除去	零件在氧化前在含 3%～5% HX-814 除油槽中常温浸泡 1～2 h，然后用干净棉纱擦除

续表

序号	故障现象	产生原因	处理方法
4	膜层发暗或无氧化膜	1. 零件与挂具没装紧，导电不良 2. 零件入槽后长时间没通电	1. 零件与挂具装紧，采用铝挂具，必须除净挂具上的氧化膜 2. 及时通电
5	经封闭后氧化膜发白，色淡	1. 封闭温度低 2. 硫酸含量高 3. 氧化膜太薄	1. 按工艺规范进行封闭 2. 分析调整 3. 延长氧化时间
6	膜层耐蚀性差	1. 氧化时间短 2. 电解液温度太高 3. 填充时间短	1. 延长氧化时间 2. 降低电解液温度 3. 延长填充时间
7	氧化膜有白色痕迹	1. 硫酸浓度过大 2. 阳极电流密度大 3. 氧化液中铝离子含量过高	1. 冲淡溶液 2. 降低阳极电流密度 3. 更换氧化液
8	氧化膜发脆开裂	1. 阳极电流密度大 2. 氧化液温度低于 10 ℃ 3. 氧化液温度高于 20 ℃	1. 降低阳极电流密度 2. 氧化液温度保证在 12 ℃～20 ℃
9	氧化膜有灰色粉末	1. 氧化前零件有腐蚀物 2. 氧化液温度过高	1. 改进氧化前处理 2. 降低液温

6. 阳极氧化膜的退除

如果零件的阳极氧化膜（包括本色膜、着色膜、封闭膜等）不符合质量要求，就可以在碱性或酸性溶液中进行退膜处理。

7. 阳极氧化膜的质量检验

铝及铝合金阳极氧化膜的质量检验技术条件参照兵器工业部标准 WJ 538—1982《炮弹、火箭弹、引信、火工品铝及铝合金零件阳极氧化技术条件》执行。

10.5 涂敷耐热涂层

火箭弹发动机根据使用要求，有的必须在燃烧室内表面涂敷一层耐热涂层，该涂层的材料为隔热涂料，它可以保证发动机在高温状态下正常工作。

10.5.1　耐热隔热涂料种类

1. 有机类耐热隔热涂料

(1) 有机硅树脂类。以有机硅聚合物为基料，用无机填料及添加剂制成的涂料属有机硅树脂类。纯有机硅树脂只能耐 200 ℃～250 ℃的温度，当加入少量填料后，耐热隔热温度可达 760 ℃左右。用耐热隔热优良的有机硅聚合物制得的耐热隔热涂料可耐热隔热 3 200 ℃高温。

(2) 其他树脂类涂料。用酚醛、聚芳基乙炔、聚酰亚胺等聚合物为基料所制成的耐热隔热涂料等。

2. 无机类耐热隔热涂料

使用无机类涂料涂敷时，当基体材料上存在有机物时，易产生燃烧气体引起缩孔现象，因而在无机类耐热隔热涂料涂覆前必须对基体材料进行仔细的除油处理，以除去残余的有机物，而且要进行酸洗与碱洗。

122 mm 火箭弹发动机本体前、后燃烧室用 14MnNi 低碳合金钢制成，为减轻发动机工作时高温燃气流对燃烧室材料机械性能的热影响和降低发动机的热损失，并起防腐作用，燃烧室内表面涂 0.2～0.5 mm 厚的 GT-401 隔热涂层。经过大量的发动机静止试验、飞行试验及长期的生产，证明 GT-401 隔热涂料的隔热性、耐烧蚀性和耐冲刷性能均可满足 122 mm 火箭弹的有关技术要求。

例如：122 mm 火箭弹用 GT-401 隔热涂料涂敷，GT-401 隔热涂料是采用有机硅树脂为基料，以涂氧化铬、云母粉、硅酸铝、碳化硅和磷酸锌做填料配制成。以酒精为稀释剂，用滚涂的方法涂敷在燃烧室内壁上。它具有耐高温、耐高速气流冲刷和隔热、防腐作用。GT-401 隔热涂料技术要求见表 10-6。

表 10-6　GT-401 隔热涂料技术要求

序号	项目名称	指　　标	检验方法
1	外观	呈绿色悬浮状液体，存放时允许分层	目测
2	黏度/（Pa·s）（20 ℃±1 ℃）	45～60	按技术标准检验
3	固体含量/%	70～80	按技术标准检验
4	细度/μm	15～30	化暂 20212～57（千分尺法）
5	硬化后涂层外观	表面平整、呈绿色，不允许有针孔，裂纹和气泡	目测
6	表面硬度	≥0.40	按技术标准检验
7	附着力/级	不低于三级	按技术标准检验

续表

序号	项目名称	指　　标	检验方法
8	耐冲击性/（N·cm）	500，涂层正面无裂纹和脱落	按技术标准检验
9	热稳定性	涂层无裂纹和脱落	按技术标准检验
10	高低温交变	经三个周期涂层无裂纹和脱落	按技术标准检验
11	氧—乙炔焰烧蚀	涂层正面无脱落，背面允许轻微变色	按技术标准检验

3. 涂敷工艺及影响涂敷质量的因素

（1）涂敷前零件的表面处理。

① 内表面喷砂。122 mm 火箭弹前、后燃烧室是经多次冷挤成型。在冷挤成型前要进行磷化、皂化处理。成型后，产品表面还残留部分磷化、皂化层，经热处理（时效处理，温度 320 ℃±10 ℃）后，会生成皂黑层（碳化层）。该皂黑层在酸碱溶液中清除不掉，只有用喷砂方法清除皂黑层及锈蚀。喷砂采用 3 mm 石英砂，压缩空气压力 0.4～0.6 MPa，喷砂时间为 3～5 min。

② 零件的磷化处理。因涂隔热涂料工序多，零件在工序间周转时间较长，为防止零件生锈，喷砂后的产品要进行磷化处理。磷化为锌酸盐中温磷化。

③ 磷化层干燥。磷化层较易吸附空气中的水分，影响隔热涂层质量，所以隔热涂料涂敷前，对磷化后的零件要在 230 ℃下进行 30 min 的干燥处理。

（2）涂料的准备。GT-401 涂料是由有机硅树脂及多种密度较大的无机填料组成。涂料在运输和储存过程中，产生严重的沉淀和结块现象，用人工方法不易搅拌均匀，所以采用球磨的方法进行机械搅拌。

涂料在使用前，将每桶涂料全部装入球磨罐，然后装入瓷球（涂料与瓷球的质量比为 5∶1）进行球磨，球磨时间 2～3 h，球磨后用无水乙醇调整至工作黏度，过滤后备用。

（3）涂敷。122 mm 火箭弹燃烧室表面，要求隔热涂层的厚度为 0.2～0.5 mm。采用滚涂方法和一次涂敷工艺。将调整好黏度的隔热涂料，按计算好的质量装入产品内腔，手工涂敷均匀后，放在滚干机上进行滚干。滚干时间为 2～4 h，滚干机的转速为：前半小时 180～200 r/min，然后加速到 250 ～300 r/min。滚干后的涂层应不流动，不黏手，在室温下自然干燥 24 h 以上。

（4）涂敷层的干燥固化。涂敷层的干燥固化，直接影响到涂敷层的质量，它是涂敷层隔热性能的关键工序。因涂层较厚及其他多种因素的影响，涂层在干燥固化过程中，往往容易产生气泡、针孔、裂纹等外观疵病，所以升温速度不能太快。为避免出现各种外观疵病，可在低温区保温一定时间。隔热涂层的固化温度为 160 ℃，在此温度下保温 5～6 h。

4. 涂敷层的检验

(1) 外观检验。固化后的涂层应均匀，表面不允许有杂质、气泡、裂纹、起皮、起皱、明显流痕和涂料堆积等疵病。有些不影响产品使用性能的外观疵病，允许进行修补。如，涂层表面的流痕、堆积、涂层厚度超过要求等，可以用砂布打磨或用其他方法修理。涂层厚度小于要求、轻微针孔，允许进行补涂。

(2) 厚度检验。标准规定，火箭弹隔热涂层厚度为 0.2～0.5 mm，局部允许到 0.6 mm。经外观检验合格的涂层，按标准规定的测量部位和测量点，对其进行厚度测量，测量的厚度不符合规定时，允许进行补涂和修理。

10.5.2　122 mm 火箭弹隔热涂层发生的质量问题及解决方法

GT-401 隔热涂料的质量问题，主要是涂层在干燥固化后产生的气泡、裂纹、针孔等外观疵病。涂层起泡是在试制中就已出现的问题，在以后的生产中又相继出现了裂纹、针孔等问题。生产中常有以上问题出现，而且是整批涂料或几批涂料连续出现。在出现裂纹时，一般不会再出现气泡和针孔，而且涂层干燥得较快。涂层在出现气泡或针孔时，一般也不会再出现裂纹问题，而且涂层干燥得很慢。

根据十几年 GT-401 涂料的使用实践和一些工艺试验，就上述质量问题产生的原因及解决方法作如下简要介绍。

1. 解决配方与工艺

根本的解决方法，是从涂料的配方和生产工艺着手解决。GT-401 隔热涂料，从试制到生产定型，试验结果证明，它的隔热性、耐烧蚀性和耐冲刷性，均能满足 122 mm 火箭弹的性能要求，但从大量生产开始，它的工艺性不好的问题，一直没有得到解决。生产实践证明，只从涂料的涂敷工艺上解决不了根本问题。应从涂料生产所用的原材料、生产工艺、涂料用溶剂（酒精）等几个方面来解决。

2. 解决吸水、吸潮问题

涂层中含有水分是涂层在干燥固化过程中产生气泡、针孔的主要原因之一。涂层中的水分主要来源于：

① 涂料生产中所用填料含有的水分。生产前应进行烘干处理，去除水分。

② 酒精的含水与吸水问题。GT-401 涂料所用溶剂为无水酒精，无水酒精（酒精含量 99.5%）也含有少量水分，而且酒精容易吸水。所以在涂料的生产和使用过程中，不可避免地要吸收部分水。将涂料溶剂改为高沸点不吸水的溶剂是解决涂料吸水的根本方法。

③ 磷化层含有一定量的水分，通过试验，涂敷前磷化层在 230 ℃温度下，烘干 30 min，对减少涂层起泡、针孔有一定效果。

3. 解决涂层均匀性问题

GT-401 隔热层涂层的厚度，标准规定为 0.20～0.50 mm，局部允许 0.60 mm，厚

度变化范围较大。同一产品，局部涂层太厚（在规定允许范围内），在同一条件下干燥固化，易产生气泡和针孔，所以将涂层厚度控制在 0.30 mm 左右，保持涂层厚度均匀，也是减少气泡和针孔的方法之一。

4. 干燥固化设备问题

由于 GT-401 涂层较厚，产生上述外观疵病的因素较多。工艺规定，涂敷后的产品进入干燥箱后，要求慢速升温、低温区保温、高温区固化，干燥固化时间需十几个小时。这并没有从根本上解决涂层的气泡、针孔、裂纹等问题。

根据上述情况，首先应解决 GT-401 隔热涂料的工艺性。其次将干燥固化的加热设备改为远红外加热设备也可提高涂敷质量。

10.6 涂油和涂漆

涂油和涂漆是火箭弹零部件在生产过程和长期储存中最基本的防腐处理方法。

10.6.1 涂油

涂油用于工序间防腐，也用于火箭弹某些零件镀锌、磷化及阳极氧化后的补充处理。

122 mm 火箭弹燃烧室、外表面圆柱部涂漆，定心部直接在基体表面涂防锈油，再包以聚乙烯塑料布。例如 1990 年对库存的 1984 年以来生产的 122 mm 火箭弹进行了开箱检查。产品存放时间最长的 6 年，1985 年以前生产的产品全部涂 BM-16 防锈油。涂油部位没有发现异常，表面状态良好。从该库产品检查结果分析，火箭弹定心部涂防锈油包装方法，可基本满足产品长期储存的要求。

火箭弹零部件的工序防腐及零部件长期封存用油，一般都是炮油或稀释炮油。例如 122 mm 火箭弹定心部封存用油为 BM-16 油溶型防锈油及 2 号溶剂稀释型防锈油。

产品涂油防腐应考虑以下两点：

(1) 防锈油的选择。首先应考虑防腐对象是黑色金属还是有色金属，有无电镀层；然后应考虑防腐时间是工序防腐还是长期封存。

(2) 涂油后的内外包装。这是一个很重要的问题，同样一种防锈油，如果不考虑涂油后的内外包装方法，防腐时间会差别很大。例如 BM-16 油溶型防锈油，用于产品工序防锈，涂油后产品直接装入木箱，在库房存放 1 个多月（夏季）发现产品大量生锈，分析其原因是木箱的木材中挥发出的木质酸对产品的腐蚀造成的。BM-16 防锈油对木质酸没有抗蚀能力。同样是 BM-16 防锈油，用于 122 mm 火箭弹定心部的封存包装，封存方法是：定心部涂油→包聚乙烯塑料布→用涤沦胶带封口→产品装入玻璃钢筒→再装入包装铁笼。产品在库房存放 6 年后，开箱检查，没有发现定心部有锈蚀现象。所以设计合理的产品内外包装是防腐处理的重要保障。

10.6.2　涂漆

涂漆是火箭弹防腐应用较多的一种方法。涂漆防腐是纯机械性的，用漆膜使介质与零件表面隔离开，因而对漆层的要求除了其本身应稳定外，还应满足下列条件：能形成连续无孔的膜、不透水、不透气、与金属表面有比较好的附着力、有一定的机械强度和硬度等。

1. 战斗部本体内表面涂漆

在火箭弹战斗部本体内表面均匀涂两次沥青清漆。沥青清漆耐水、防潮，能很好地防止钢铁受大气腐蚀和炸药对弹体内表面的腐蚀，具有较好的耐冲击韧性和弹性，因而能保证弹丸的安全性。

战斗部本体内表面涂漆，要求漆层有一定厚度，不允许漆层表面发红，不允许有金属和非金属杂质等。

2. 战斗部本体外表面涂漆

战斗部本体外表面不仅直接与周围大气接触，而且漆层本身有被磨损和磕碰的可能，因此要求漆层既要有良好的防腐性能，又要求与金属表面有较强的附着力，同时具有较高的机械强度、硬度和韧性。所以外表面先涂性能较好的底漆，然后再加涂面漆。

底漆主要起防腐作用，故应有较高的防腐能力，并与基体金属有较强的附着力。面漆一方面可保护底漆，同时其本身也起防腐和调节颜色的作用。底、面漆有不同的匹配要求，使两者之间有较好的结合力且彼此之间没有不良作用。

（1）底漆。C06-1 铁红醇酸底漆，该漆是用干性植物油改性醇酸树脂与氧化铁红、铅铬黄、体质颜料等研磨后，加入催干剂，并以 200 号溶剂汽油及二甲苯调配而成。该漆具有良好的附着力和防锈能力，它与醇酸磁漆等多种面漆有较好的结合力。在一般气候条件下，耐久性较好，但在湿热带海洋性气候和潮湿地区条件下，耐久性不强。

（2）面漆。C04-64 草黄醇酸半光磁漆。该漆是用中油度醇酸树脂与颜料及体质颜料调制后，加入催干剂，用有机溶剂调配而成。该漆具有柔和而不刺眼的光泽、漆膜坚韧、附着力强、户外耐久性也较好，但不宜用在湿热带。

3. 火箭部外表面涂漆

火箭部外表面涂漆分两种情况，一种是燃烧室先镀锌，然后在圆柱部涂一次面漆，如 130 mm 火箭弹燃烧室外表面的涂层。另一种是燃烧室不镀锌，经磷化处理后，在圆柱部涂底面漆。如 122 mm 火箭弹燃烧室圆柱部外表面涂层。

火箭部外表面用底面漆的选择，涂漆前的表面处理、干燥后的漆层要求等均与战斗部本体外表面涂漆相同。

10.7　提高防腐性能的主要途径

正确地选择防腐层，是使火箭弹金属零件不被腐蚀的主要途径。此外，还要从零件

材料的选用、结构的设计及产品的包装方法等多方面考虑，才能提高火箭弹的整体防腐能力，使之在长期储存后仍能正常使用。

1. 正确选择零件材料和涂镀层

各种金属材料的抗蚀能力不同，周围接触的腐蚀介质多种多样，材料呈现的抗蚀能力也不一致。火箭弹主要的腐蚀介质是大气和水分，因而在选择材料时就要考虑所选材料是否具有抵抗上述介质腐蚀的能力。对于本身抗蚀性能较差的材料，经过一定的防腐处理后，能否满足防腐性能要求也是正确选材应注意的问题。

火箭弹是由各种零件组成的。当一种零件遇到比它电极电位高的零件时，就容易被腐蚀。从防腐出发，产品的结构应尽可能避免电极电位低的金属与电极电位高的金属相接触。然而，在设计产品时很难做到这一点。因此要特别注意对电极电位较低零件防腐措施，即应选用合适的防护层，并使其牢固、不易被外来机械力刮掉。例如，当铝合金件与钢铁零件相接触时，对铝合金采用硬质阳极氧化，而对钢铁零件采用镀锌处理。这样一方面增加了铝件本身的防腐能力，同时由于铝与锌的电极电位较接近，可减轻对铝件的腐蚀。

金属镀层与非金属涂层也要考虑它们的合理配合。例如，130 mm 火箭弹燃烧室，表面镀锌，圆柱部涂醇酸半光磁漆，装箱后，由于漆层中有机溶剂和一些高分子物质的挥发，加速了定心部镀锌层和其他零件镀锌层的腐蚀。所以，镀锌层上不涂漆，直接装入不透气、不透水的密封包装筒，如玻璃钢筒、沥青纸筒等，或镀锌层上整体涂薄层防锈油，再装入聚乙烯密封塑料袋，防腐效果会更好。

2. 正确选择零部件的保护层

各种保护层都有其各自的防护特性，不同的保护层有其一定的应用范围和使用时间，根据不同的条件，同一产品可以采用不同的处理方法，各种方法也可配合使用。

火箭弹外表面的涂漆层，仍沿用 20 世纪五六十年代使用的铁红醇酸底漆、军黄色醇酸半光磁漆。上述两种漆有其一定的优点，如：具有较良好的附着力、在一般气候条件下的防锈能力和耐久性也较好、使用方便、价格低等。但也有明显的弱点，如：不耐潮湿，在湿热带海洋性气候和潮湿条件下耐久性不好。从 130 mm 火箭弹在湿热带海洋性气候和潮湿条件下的长期储存试验结果可以看出，上述两种漆在潮湿地区有防锈性、耐久性较差的弱点。

130 mm 火箭弹，长储试验 5 年后，有些产品的涂漆部位出现鼓泡和锈蚀。外包装铁笼，第一年检查已开始生锈，5 年后产品严重锈蚀。所以对火箭弹涂漆，应选择或研制新型涂料，改进涂敷工艺和包装方法，以便有效地减缓水汽及有害离子的渗透，防止膜下腐蚀，适应军品长期储存的要求。

3. 注意后处理

273 mm 火箭弹靶场试验时发现，旋转发动机的隔板破裂，经分析及大量工艺试验证明，隔板的破裂是由镀铬产生的。隔板在酸洗及镀铬过程中，产生的氢离子一部分变

为氢气而释放，而少部分则渗到隔板内，使隔板内应力加大从而导致隔板破裂。当时镀铬中虽有除氢工序，但由于执行工艺不严，加之除氢后无法检验，所以造成了这一质量事故。因无法检验除氢质量，所以必须加强工艺纪律并监督执行。

4. 合理选择包装材料及包装方法

包装材料和包装方法对火箭弹的储存年限有很大关系，只有好的防腐层而无合理的包装，同样不能有效地防止腐蚀。

目前火箭弹的包装方法，可分为密封包装和非密封包装两种。

(1) 非密封包装。即经过表面处理的火箭弹，直接装入木箱包装。此种包装方法操作简单，但因采用非密封木箱包装，火箭弹不可避免要受到大气及木材中挥发出的木质酸的腐蚀。

(2) 密封包装。火箭弹的密封包装，主要是将经过表面处理后的火箭弹装入密封的玻璃钢筒内，再将玻璃钢筒装入铁笼。经过对库存 6 年的玻璃钢筒包装产品进行开箱检查，检查结果：电镀层、涂漆层、涂油层没有发现腐蚀现象。上述产品库存时间还较短，而且是对一个库房的检查结果，库房条件也较好，该包装方法能否满足火箭弹在我国不同地区长期储存而不受腐蚀，还需进行长期环境试验的考验。

第 11 章　弹丸与火箭战斗部装药

用于战斗部装药以爆炸进行毁伤的含能物质通常称为炸药。炸药的爆炸是一种由引爆装置引爆，形成在局部引发、自行传播到全部炸药的爆炸，是一种快速进行的，有声、光、机械破坏效应的现象，具有高速、高压和高温反应特征和瞬间一次效应的特点。炸药的密度越高，发生爆炸的速度（爆速）越快，其毁伤的效应越大。所以，炸药的密度和爆速是衡量炸药能量大小的重要参数。

11.1　装填物的特性简介

11.1.1　炸药的类型和组成

炸药按组成可分为单组分和混合组分两类，也称为单质炸药和混合炸药。单质炸药多为含有碳、氢、氧、氮的单一有机化合物，混合炸药则有多种组分，但无论是单质炸药或混合炸药，大多由氧化剂（氧元素）及可燃剂（可燃元素）组成；按照应用领域可分为军用炸药和工业炸药；按照作用方式可将广义的炸药分为猛炸药、起爆药、火药及烟火剂四类，但通常称谓的炸药有时仅指猛炸药。本章也只限于论述猛炸药，猛炸药也称高级炸药、次发炸药或第二炸药，用于产生爆轰，且只有冲击波或起爆药产生的爆轰波才能将其引爆。

1. 单质炸药

单质炸药分子含有爆炸性基团，其中最重要的有三种：$—C—NO_2$、$—N—NO_2$ 及 $—O—NO_2$。它们分别构成三类最主要的单组分炸药：硝基化合物炸药、硝胺炸药及硝酸酯炸药。

（1）硝基化合物炸药。

目前用作炸药的硝基化合物主要是芳香族多硝基化合物，其典型代表是 TNT。硝基化合物炸药的能量和感度大多低于硝酸酯类和硝胺类炸药，安全性甚优，制造工艺成熟，大多原料来源广泛、价格较低，因而应用广泛。

（2）硝胺炸药。

硝胺炸药的感度和安全性介于硝基化合物炸药与硝酸酯炸药之间，能量较高，综合性能较好，且原料来源广泛，制造工艺日趋成熟，所以在军事上的应用与日俱增，不仅越来越多地代替 TNT 用于装填弹药以提高装药的威力和破甲作用，而且用于发射药和固体推进剂中以提高火药力和比冲。当前各国竞相研究的高能量密度化合物，也是硝胺

炸药，其典型产品有黑索今、奥克托今等。

（3）硝酸酯炸药。

硝酸酯炸药氧平衡较高，做功能力较大，但安全性较差，感度较高。重要的品种有太安、硝化甘油、乙二醇二硝酸酯、二乙二醇二硝酸酯、1，2，4-丁三醇三硝酸酯、纤维素硝酸酯（硝化棉）等。除太安用作猛炸药外，其余多用作枪炮发射药和固体推进剂组分（硝化甘油也用作工业炸药组分）。

（4）其他。

除了硝基化合物、硝胺、硝酸酯炸药以外，其他具有爆炸性的物质很多，其中的某些化合物可以作为民用炸药或高能炸药组分。许多无机硝酸盐及有机碱硝酸盐都具有爆炸性，混合炸药中广泛使用的硝酸铵就属于无机硝酸盐，铀、钾、钙、钡等硝酸盐也可用于混合炸药的组分。

2. 混合炸药

混合炸药是由两种以上物质组成的能发生爆炸的混合物，也称爆炸混合物，由单组分炸药和添加剂或氧化剂、可燃剂和添加剂按适当比例混制而成。常用的单组分炸药是硝基化合物、硝胺及硝酸酯三类，氧化剂是硝酸盐、氯酸盐、高氯酸盐、单质氧、富氧硝基化合物等，可燃剂是木粉、金属粉、碳、碳氢化合物等，添加剂有黏合剂、增塑剂、敏化剂、钝感剂、防潮剂、交联剂、乳化剂、发泡剂、表面活性剂、抗静电剂等。

军用混合炸药是指用于军事目的的混合炸药，主要用于装填各种武器弹药，少量用于核弹药。其特点是能量水平高，安定性和相容性好，感度适中，生产、运输、储存、使用安全，且炸药性能和其他物理机械性能良好。

军用混合炸药没有统一的分类方法，一般按物理状态可分为固体混合炸药、液体混合炸药、气体爆炸混合物等；按形状可分为塑性炸药、挠性炸药、弹性炸药及黏性炸药等；按性能特点可分为高爆速混合炸药、高威力混合炸药、高强度混合炸药、耐热混合炸药、特种混合炸药及不敏感混合炸药；按装药方法可分为压装型混合炸药、熔铸型混合炸药、浇铸固化型混合炸药及塑态挤注型混合炸药等。通常采用按混合炸药的组成特点进行分类，分述如下：

（1）以 TNT 为载体的混合炸药。这类炸药是以熔融状态进行铸装成型，其组成主要为两种或两种以上单质炸药的混合物，有时加入少量的添加剂。其中必须由一种单质炸药 TNT 作为载体，或与其他炸药形成低共熔物作为载体，便于熔铸。如梯黑炸药是由 TNT 和黑索今等硝胺炸药按比例混合而成的熔铸炸药。

（2）高聚物黏结炸药。这类混合炸药是以粉状高能炸药为主体，加入黏合剂、增塑剂、钝感剂或其他添加剂制成的。品种繁多的混合炸药，包括造型粉压装炸药、热固性炸药、塑性炸药、挠性炸药及低密度炸药等。

（3）浇铸固化炸药。这是将液态高聚物或可聚合的单体与单质炸药混合，再加入固化剂等其他添加剂固化成型的混合炸药。它克服了熔铸炸药脆性大、强度低，易产生缩

孔、结晶、裂纹及高温渗油等缺点，具有铸件强度高、与弹体结合力强、形状稳定、便于加工等优点。

(4) 含金属粉的混合炸药。这类混合炸药加入了高热值的金属粉（如铝粉、镁粉等），提高了混合炸药的爆热，又称高威力混合炸药。

(5) 燃料空气炸药。这类炸药是以固体或液体燃料与空气组成爆炸混合物，当燃料与空气混合至一定比例时才成为炸药。因燃料抛散后在目标上空形成云雾，无孔不入，所以引爆后杀伤破坏效应高。常用的燃料有环氧乙烷、环氧丙烷、硝基甲烷、硝酸丙酯、二硼烷、无水偏二甲肼及铝粉等。

(6) 液体炸药。它是液体或某些能溶于液体或悬浮于液体的物质所制成的混合炸药。液体炸药流动性好，密度均匀，可随容器任意改变形状，可渗入被爆炸物的内部或缝隙中。

为了改善混合炸药的性能，在混合炸药中加入一些添加剂，常用的添加剂有：

(1) 黏合剂。用于黏结各组分，使之均匀分散而不产生离析，改善炸药装药的物理力学性能，易于成型、加工，提高尺寸的稳定性。

(2) 增塑剂。用来降低黏合剂的玻璃化温度，增加黏合剂的可塑性。

(3) 钝感剂。用来降低混合炸药的感度，保证安全生产、运输、加工和使用要求。

此外，为了改善注装混合炸药的流动性，可以加入表面活性剂；为改善混合炸药中某些组分的安定性，可加入少量的安定剂；为防止混合炸药中高聚物的老化，可以加入防老化剂；对低密度炸药要加入发泡剂；对热固性炸药还要加入固化剂等。

混合炸药组成举例：

例 1 B 炸药（美国） 质量组分（%）

组成	(1)	(2)	(3)
黑索今	59.5	63	60
TNT	39.5	36	40
蜡	1.0	1.0	0

配用弹药：大口径炮弹、航弹、火箭战斗部装药。

例 2 PBX—9404 炸药（美国） 质量组分（%）

奥克托今	94	硝化纤维素	3
磷酸三-β-氯乙基酯	3	二苯胺	0.1

配用弹药：核弹战斗部装药。

例 3 PBXN—105 炸药（美国）质量组分（%）

黑索今	7.00	端羟基聚环氧乙烷	3.13
TNT	4.00	三羟甲基丙烷	0.34
高氯酸铵	49.80	甲苯二异氰酸酯	0.83
铝粉	25.80	苯基—β—萘胺	0.17

双二硝基丙基缩乙醛/甲醛　12.92　二月桂酸二丁基锡　0.01

配用弹药：MK—48 鱼雷。

例 4　中国塑—4 炸药配方　质量组分（%）

黑索今　91.5　癸二酸二辛酯　4.8

聚异丁烯　2.1　其他　1.6

配用弹药：破甲弹。

11.1.2　炸药爆炸特征

炸药是指在适当外部激发能量作用下，能发生爆炸并对周围介质做功的化合物（单组分炸药，通常称为单质炸药或单体炸药）或混合物（混合炸药）。炸药的爆炸是一种高能量的释放过程，且大多是放出大量热和气体的化学反应，其中绝大多数是氧化—还原反应。由于炸药爆炸时的放热化学反应进行得极快（从引发中心向外传播的线速度介于亚音速至超音速之间），反应可近似看作定容绝热过程。因而爆炸气态产物的温度和压力都很高（温度达 2 000～5 000 K，压力达 10～40 GPa）。当这种高温、高压气体骤然膨胀时，爆炸点周围介质中发生急剧的压力突跃，形成冲击波，对外界产生相当大的机械破坏作用。

反应的放热性、快速性和生成气态产物是炸药爆炸的三个重要因素。放热性提供能源；快速性使有限的能量迅速放出；而气体则是能量转换的工质。表 11-1 列举了炸药爆炸、火药燃烧及燃料燃烧的特征。

表 11-1　炸药爆炸、火药燃烧和燃料燃烧的特征

特　征	燃料燃烧	火药燃烧	炸药爆炸
典型物质	煤—空气	火药	炸药
线性反应速度/（$m \cdot s^{-1}$）（数量级）	10^{-6}	10^{-3}～10^{-2}	（2～9）$\times 10^3$
反应类型	氧化—还原	氧化—还原	氧化—还原（少数例外）
反应时间/s（数量级）	10^{-1}	10^{-3}	10^{-6}
反应速度控制因素	热传递	热传递	冲击波传递
能量输出/（$kJ \cdot kg^{-1}$）（数量级）	10^4	10^3	10^3
功率输出/（$W \cdot cm^{-3}$）（数量级）	10	10^3	10^9
最常用的引发反应的模式	热	热质点和气体	高温、高压的冲击波
反应所建立的压力/MPa	0.07～0.7	0.7～700	（10～30）$\times 10^3$

就炸药分子结构而言，它具有四个特点：高体积能量密度、自行活化、亚稳态、自供氧。

1. 高体积能量密度

尽管以单位质量计算，炸药爆炸所放出的能量仍然比普通燃料燃烧时放出的能量低

得多，例如，1 kg 汽油或无烟煤在空气中完全燃烧时的放热量，分别为 1 kgTNT 爆炸时放热量的 8～10 倍。即使以 1 kg 汽油或煤与氧的化学当量比混合物计，它们燃烧时的放热量也可达 TNT 爆热 2.2～2.4 倍。但如以单位体积物质所放出的能量计算，情况就大不相同了。例如，1 L 硝化甘油（丙三醇三硝酸酯）或 1 LTNT 的爆热分别相当于 1 L 汽油—氧混合物燃烧时放热量的 370～570 倍。大多数炸药的体积能量密度为汽油—氧混合物的 130～600 倍。常用炸药的密度 ρ 与其定容爆热 Q_v 的乘积 ρQ_v 来表示炸药的体积能量密度。几种军用炸药的 ρQ_v 值见表 11-2。

表 11-2 几种军用炸药的 ρQ_v 值

炸　　药	ρ/（g·cm^{-3}）	Q_v/（MJ·kg^{-1}）	ρQ_v/（MJ·m^{-3}）
TNT	1.65	4.18	6.9×10^3
太安	1.78	6.25	11.1×10^3
黑索今	1.79	6.32	11.3×10^3
奥克托今（β-型）	1.91	6.19	11.8×10^3
六硝基六氮杂异伍兹烷（ε-型）	2.04	6.30	12.9×10^3

2. 自行活化

炸药在外部激化能作用下发生爆炸后，在无外界提供任何条件和没有外来物质参与下，反应即能以极快速度进行，并直至反应完全。这是因为炸药本身含有爆炸反应所需的氧化组分和可燃组分，并且爆炸时放出的爆热比进行爆炸反应所需活化能高得多。

3. 亚稳态

炸药在热力学上是相对稳定（亚稳态）的物质，它们不是一触即爆的化学品，而只有在适当外部作用激发下，才能爆炸且释放其内部潜能。另外，大部分炸药的热分解速率甚低，甚至低于某些化肥和农药。现代战争要求炸药具有低易损性和高安全性，一些很不稳定的爆炸物是不能作为炸药使用的，它们只能称为爆炸物质，而不能归入炸药的行列。

4. 自供氧

常用单质炸药的分子内或混合炸药的组分内，不仅含有可燃组分，而且含有氧化组分，它们不需外界供氧，在分子内或组分间即可进行化学反应。所以即使与外界隔绝，炸药自身仍可发生氧化—还原反应产生燃烧或爆炸。

11.1.3 对炸药的基本要求

1. 能量水平

通常要求炸药具有满意的能量水平，即具有尽可能高的做功能力和猛度，然而，对于爆炸性质的要求也是随用途而异的。一般而言，用于破甲或碎甲弹的炸药要求有很高

的爆速；对空武器的炸药要求有较高的威力，同时炸药装药的临界直径要小（即发生特定爆轰的最小装药直径），以保证易于获得完全爆轰。

2. 安全性能

从安全角度考虑，要求炸药对机械、热、火焰、光、静电放电及各种辐射等的感度足够低，以保证生产、加工、运输及使用中的安全。但是，从使用可靠性考虑，则要求炸药具有足够的对冲击波和爆轰波的感度，以保证可靠、准确地被起爆。另外，对于各种炸药，因使用条件不同，还要求具有各种安全性能。例如，在深水中使用的炸药应当有良好的抗水性；在高温下使用的炸药应当有良好的理化稳定性（如不发生相变等）；在高真空条件下使用的炸药应当是挥发性很低的；在低温下使用的炸药应当具有良好的低温稳定性（不发生相变，不脆裂等），并在低温下具有良好的爆轰敏感性和传爆稳定性。

3. 物理、化学性能和力学性能

通常要求炸药具有良好的物理、化学安定性和相容性，以保证长期储存安全。

由于用途不同，对炸药在理化稳定性和爆炸性质方面的要求是不同的。为了战备上的需要，军用炸药的储存期较长，民用炸药的储存期可以较短。

炸药在使用时要与包装材料（如弹体或其他防护物）相接触，制造混合炸药还要与其他组分相接触，所以还应对炸药的相容性进行研究。例如，TNT 具有良好的热安定性和化学安定性，也不与重金属及其氧化物反应，但与某些高分子材料，特别是与含有甲醛的树脂和橡胶不相容，与这些高分子物质长期接触，TNT 会变质，同时使橡胶失去弹性。

对一些用于特定环境的炸药，还要求满足个别特殊要求，如抗水性、耐热性、抗冻性等。

4. 装药工艺

具有良好的加工和装药性能，能采取压装、铸装和螺旋装药等方法装入弹体，且成型后的药柱具有优良的力学性能。

5. 劳动保护及工业卫生

炸药生产是具有一定危险性的操作，安全问题是应当首先考虑的。除了应严格遵守国家所颁布的安全规范外，还应特别注意：保证反应平衡和及时导走反应热能，使反应温度维持在允许范围内。否则，有引起炸药分解、燃烧、甚至爆炸的危险。

在炸药设计、生产和使用过程中，环境保护意识始终贯穿全部过程。在炸药的生产设计过程中，不仅应考虑其原料来源广泛、生产工艺简单、价格低廉，更重要的是要求生产过程中少产生三废或者不产生三废。特别是单组分炸药的生产过程利用大量的硝酸、硫酸等，不可避免产生废气、废水。如何处理这些三废，减少排放，不仅是对现有生产工艺的要求，更是对任何一种新型炸药在设计时的基本要求之一。此外，在生产的全过程中，应始终强调操作人员和环境的工业卫生，配套各种防护措施，避免各种工伤

事故发生。

上述要求在一种炸药中是很难达到的。在设计和选择使用炸药时，往往是根据使用要求，在满足主要指标的前提下，达到综合性能指标的最佳匹配。对于军用炸药更多地应考虑能量水平，生产、使用安全可靠。

11.1.4 炸药的主要性能

表征炸药主要性能的指标有密度、标准生成焓、爆速、爆压、猛度、威力、安定性、相容性、感度、爆炸特性和爆炸作用等。

1. 密度

炸药的密度是指单位体积内所含的炸药质量。炸药的体积若为晶体本身的体积，则为晶体密度；若为具有一定形状的装药或药柱制成品的体积，则为装药密度；若为容器内装填炸药的体积，则为装填密度。

由于晶体的体积是不易压缩的，所以炸药的晶体密度就可看成是该炸药的最大理论密度。炸药的晶体密度越大，则炸药的装药密度越高，装药的能量密度也越大。炸药晶体密度是与炸药的分子结构和晶体结构密切相关的，掌握估算炸药晶体密度的方法和探讨炸药密度与结构之间的关系，有助于设计和合成出具有较高密度和良好爆炸性能的炸药。

炸药密度与炸药的许多爆炸性能，如爆速、爆热、爆压、猛度及比容等都有密切关系，是计算这些参数必须具有的数据之一。

(1) 炸药密度与其爆轰性能的关系。根据爆轰波流体力学理论，运用质量守恒、能量守恒和动量守恒等定律，结合 C-J 状态的条件，可导出爆速（D）、爆压（p）和爆热（Q）与炸药初始密度（ρ_0）之间的下述近似关系式（11.1.1）～式（11.1.3）。

$$D=\left[\gamma\times\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)^{\gamma}\times c\right]^{\frac{1}{2}}\times\rho_0^{\frac{\gamma-1}{2}} \tag{11.1.1}$$

$$p=\left[\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)^{\gamma}\times c\right]\times\rho_0^{\gamma} \tag{11.1.2}$$

$$Q=\left[\frac{1}{2}\times\left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right)^{\gamma}\times c\right]\times\rho_0^{\gamma-1} \tag{11.1.3}$$

上述式中的 c 为与炸药性质有关的常数，γ 为多方指数，它近似为 3，所以上述公式又可简化为如下形式。

$$D\propto\rho_0$$

$$p\propto\rho_0^3$$

$$Q\propto\rho_0^2$$

(2) 爆速与密度的关系。对碳氢氧氮系炸药，其爆速随密度线性增长（当密度在 0.5 g/cm^3 至晶体密度范围内时），并可用式（11.1.4）表示：

$$D_\rho=D_{\rho 1.0}+M'(\rho-\rho_{1.0}) \tag{11.1.4}$$

式中　D_ρ——炸药密度为 ρ 时的爆速，m/s；

$D_{\rho 1.0}$——炸药密度为 $\rho=1.0\ \mathrm{g/cm^3}$ 时的爆速，m/s；

M'——与炸药性质相关的系数，是炸药密度增加 1.0 $\mathrm{g/cm^3}$ 时爆速的增长量，$(\mathrm{m \cdot s^{-1}})/(\mathrm{g \cdot cm^{-3}})$。对大多数猛炸药来说，$M'$ 值一般处于 3 000～4 000 $(\mathrm{m \cdot s^{-1}})/(\mathrm{g \cdot cm^{-3}})$ 之间，即炸药密度每增加 0.1 $\mathrm{g/cm^3}$ 时，爆速可提高 300～400 m/s 。

炸药的晶体密度愈大，得到高爆速炸药的可能性也就愈大。

式（11.1.4）只适用于有机化合物类炸药。对无机化合物类炸药（如起爆药中的雷汞、迭氮化铅等），虽然也存在着密度增加，爆速也相应增加的趋势，但它们的 M' 值均较小。尽管它们的密度值很大，但爆速并不很高，仅为 5 000 m/s 左右。雷汞甚至还有“压死”现象。

表 11-3 列有黑索今的爆速与装药密度的关系值。

表 11-3　黑索今爆速与装药密度的关系

装药密度/ $(\mathrm{g \cdot cm^{-3}})$	1.00	1.20	1.59	1.63	1.80
爆速/ $(\mathrm{m \cdot s^{-1}})$	6 048	6 731	8 063	8 199	8 780

（3）爆压与密度的关系。关于爆压与装药密度的关系，人们提出过多种表达式，都认为爆压与炸药密度的平方相关联，其中较具代表性的有下述三式（式 11.1.5～式 11.1.7）。

$$p=\alpha\rho_0^2 \tag{11.1.5}$$

$$p=1.588\rho_0^2\varphi \tag{11.1.6}$$

$$p=K\left(\rho_0\sum N\right)^2+L \tag{11.1.7}$$

式中　α——与炸药性质有关的常数值；

φ——与炸药有关的特性值；

K、L——常数；

$\sum N$——氮当量之和。

由于爆压与密度的平方有关，故爆压随密度的增长而以指数关系迅速增长。这样，晶体密度大的炸药，就可能达到高的爆压。例如，当装药密度接近晶体密度时，奥克托今的爆压可达 39 GPa 左右，而 TNT 则只能达到 18～19 GPa。

（4）爆热与密度的关系。爆热并不是一个定值，它与装药密度和爆炸条件十分有关。装药密度增加时，爆热线性增长。从表 11-4 中黑索今爆热与密度的关系即可明显看出这种规律。

表 11-4 黑索今药柱在不同密度时测定的爆热值

密度/（g·cm^{-3}）	爆热实测值/（kJ·kg^{-1}）	
	液态水	气态水
0.5	5 401	4 982
0.65	5 527	—
0.70	5 568	—
1.00	5 736	—
1.15	5 862	5 443
1.70	6 238	—
1.73	6 238	5 862
1.74	6 280	—
1.78	6 322	5 862

因为炸药的爆热主要取决于炸药的组成、标准生成焓及其他分子结构因素，密度对爆热的影响是指对同一炸药而言的，不同种类炸药间并不存在密度高爆热就一定高的规律。

(5) 爆容与密度的关系。密度的变化也会改变爆轰产物的体积和组成。随着密度的增加，爆炸气体产物的总量减少，但 CO_2 在产物中的含量增加。这是由于密度增加时，爆轰波阵面上的压力增大，继而又影响爆轰产物之间的平衡。

2. 爆速

爆速是指爆轰波在炸药中稳定传播的速度，它不仅是衡量炸药性能的重要示性数，而且还可以用来计算其他爆轰参量。

3. 爆压

爆压是指炸药爆轰时爆轰波阵面的压力，也称 C-J（Chapman-Jouguet）压力，可根据爆轰流体动力学理论、C-J 条件及爆轰产物状态方程计算，较为复杂。工程中，常用经验公式计算。

4. 猛度

猛度是指爆轰产物粉碎或破坏与其接触（或接近）介质的能力，可用爆轰产物作用在与爆轰传播方向垂直的单位面积上的冲量表示。

5. 威力

威力是指炸药的爆炸产物对周围介质所作的功。

6. 安定性

安定性是指在一定条件下，炸药保持其物理、化学性能不发生超过允许变化范围的能力，它对炸药制造、储存和使用具有重要的实际意义，是评定炸药能否正常使用的重要性能之一。可分为物理安定性及化学安定性，前者指延缓炸药发生吸湿、渗油、老

化、机械强度降低和药柱变形等能力；后者指延缓炸药发生分解、水解、氧化和自动催化反应等能力，两者是互有关联的。粉状硝铵炸药的吸湿、结块，代那迈特炸药的收缩、渗油、老化和冻结，液氧炸药的挥发，乳化炸药的分层和析晶，都是物理安定性欠佳的实例。化学安定性主要取决于炸药的分子结构，但也受外界条件的影响，如硝化甘油中的残酸和水分可使其化学安定性大大下降，但某些具有负催化作用的杂质，则可减缓炸药的分解。

7. 相容性

相容性是指炸药与其他材料（包括炸药）混合或接触时，它们的物理、化学、爆炸性能的变化不发生超过允许范围变化的能力，也称配伍性。可分为物理相容性和化学相容性，前者是指体系物理性质的变化；后者是指体系化学性能的变化，但两者密切相关。弹药行业所指的相容性，一般是指化学相容性。相容性也可以分为组分相容性（内相容性）和接触相容性（外相容性）。内相容性是指混合炸药中各组分（包括所含微量杂质）间的相容性，是炸药本身能否长期正常储存的决定性因素。外相容性是指炸药制品与接触材料（如弹壁、包覆层、油漆等）的相容性，是弹药能否长期贮存的重要因素。如炸药与其他材料混合或接触时形成不相容体系，就会导致安定性下降，爆发点降低，机械感度增大，起爆感度变化，老化速度加快，包装物或接触物被腐蚀等一系列严重问题。所以在设计炸药配方及选择与炸药制品接触的材料时，必须进行相容性试验。

8. 感度

感度是指炸药在外界能量作用下发生爆炸的难易程度。这种外界能量被称为初始冲能或起爆能，通常以起爆能定量表示炸药的感度。感度是炸药能否实用的关键性能之一，是炸药安全性和作用可靠性的标度。感度具有选择性和相对性，前者指不同的炸药选择性地吸收某种起爆能，后者则指感度只是表示危险性的相对程度。对炸药感度的评价宜结合多种试验综合进行。根据起爆能的类型，炸药感度主要可分为热感度、撞击感度、摩擦感度、起爆感度、冲击波感度、静电火花感度、激光感度、枪击感度等。

尽管多种外界能量都能使炸药爆炸，但各种能量的作用机制和引爆炸药的机理则不尽相同。因为，炸药种类繁多，它们的物理化学性质，如聚集状态、表面状况、熔点、硬度、导热性和晶体外形等均可影响炸药的感度，而且测试方法和条件也与感度测定结果有关。

感度类别有：

（1）热感度。指炸药在热作用下发生燃烧或爆炸的难易程度。热感度可用爆发点和火焰感度表示。爆发点是炸药在一定试验条件及一定延滞期（从开始加热到发生爆炸的时间，一般定为 5 min 或 5 s）下发生燃烧或爆炸的温度。火焰感度则以炸药受到导火索或黑火药柱燃烧发生的火星或火焰作用时，试样 50%发火的距离、100%发火的最大距离或 100%不发火的最小距离表示。

（2）撞击感度。指在机械撞击作用下炸药发生燃烧或爆炸的难易程度，常用下述几

种方法表示：

① 爆炸百分数，即以一定质量落锤从一定高度撞击炸药时发生爆炸次数与试验次数之比。常用落锤质量为 10 kg，落高为 25 cm，一般试验 25～50 次。

② 发生 50%爆炸的落高（称为特性落高或临界落高），普遍采用升降法测定，或者由感度曲线上找出特性落高。

③ 上限或下限，前者是 100%爆炸的最小落高，后者是 100%不爆炸的最大落高。平行试验 10 次或 25 次，按一定间隔升降落锤以求得结果。

④ 6 次试验中发生一次爆炸的高度，按固定间隔升降落锤求得。

(3) 摩擦感度。指在摩擦作用下，炸药发生燃烧或爆炸的难易程度。我国常用摩擦摆测定。

(4) 起爆感度。指在起爆药、传爆药或其他猛炸药的直接作用下炸药发生爆轰的难易程度，也称爆轰感度。一般以最小起爆药量（极限药量）表示，它是指在一定试验条件下使猛炸药完全爆轰所需的最小起爆药量。此量愈小，猛炸药的起爆感度愈高。最小起爆药量还与试验条件（如炸药颗粒度和装药密度等）有关。起爆感度也可用临界引爆药量（被试炸药产生 50%爆轰所需的某种引爆药量）和能直接引爆药柱的雷管型号表示（如工业炸药一般以 8 号工业雷管是否能引爆来评定其起爆感度）。最小起爆药量也用来衡量起爆药的起爆能力，其值愈小，起爆药的起爆能力愈大。

(5) 冲击波感度。指炸药在冲击波作用下发生爆炸的难易程度。冲击波起爆是炸药起爆的主要形式，所以冲击波感度对评价炸药的引爆和安全性两者都具有十分重要的意义，它反映炸药是否具有良好的战地生存能力和准确、可靠的起爆性能。

(6) 静电火花感度。指在静电放电作用下，炸药发生燃烧或爆炸的难易程度。静电火花感度包括两方面，一是炸药是否容易产生静电和积累静电量，二是炸药对静电放电火花是否敏感。一般用 100%不爆炸所能承受的最大静电火花能量，50%爆炸所需静电火花能量或 100%爆炸所需最小静电火花能量表示。

(7) 激光感度。指在激光能量作用下炸药发生燃烧或爆炸的难易程度，常用 50%发火能量表示。此值与激光波长、激光输出方式及激光器其他工作参数有关。

(8) 枪击感度。指在枪弹等高速抛射体撞击下，炸药发生燃烧或爆炸的难易程度，又称抛射体撞击感度。落锤撞击炸药是低速撞击，抛射体撞击炸药是高速撞击，后者比前者更能准确评价炸药在使用过程中的安全性和起爆感度。

11.1.5 21 世纪炸药技术发展的趋势及预测

采用新原理、新技术、新设计思想、新结构、新材料来发展新型的常规武器，提高远程精确打击、高效毁伤、快速反应和快速机动的能力。产生如破坏性杀伤爆破，强大的侵彻力和非致命性、失能性的各种战场效果，是 21 世纪一些常规武器发展的方向。

根据武器弹药发展的需要，炸药发展的趋势是：炸药向高能、低敏感的方向发展，合成新的高能量密度化合物，并积极开展装药技术的研究，装药工艺技术主要向自动化、连续化、柔性化、提高安全程度和降低污染的方向发展。

1. 炸药的发展趋势

炸药科学与技术发展的总目标是提高能量、降低易损性、提高对战争环境的适应能力、优化工艺、降低生产成本、减少对环境的污染等。

(1) 单质炸药。TNT、黑索今、奥克托今仍然是 21 世纪战术武器应用的三大单质炸药，是未来武器装备的基础。据统计，以 TNT、RDX、HMX 为基的炸药品种占混合炸药品种的 95%，改性 B 炸药、黑索今和奥克托今的应用也日趋广泛，它们仍然是 21 世纪战术武器应用的主炸药。

(2) 燃料空气炸药。燃料空气炸药作为一种有效的爆炸能源而引起极大的关注，并得到迅速的发展。正在积极进行第三代燃料空气炸药武器的研制，其关键技术是燃料分散浓度的控制、云雾形状以及云雾内在质量的控制等技术，它直接影响燃料空气炸药武器的毁伤效能。

(3) 高能量密度材料。高能量密度材料的技术发展应是 21 世纪的主攻方向，因为高能量密度材料直接影响炸药技术的发展。如 20 世纪 80 年代末合成的六硝基六氮杂异伍尔兹烷（HNIW）能量比奥克托今高 6%～9%，作为组分加入混合炸药中可显著提高产品的能量密度，提高弹丸初速、火箭导弹射程和战斗部的威力。高能量密度材料的应用具有 4 个特点：提高武器的射程和杀伤威力；减少危险性，提高安全性；减少目标特性和提高弹药的可使用性和可靠性。

合成的高能量密度材料将主要集中于：多硝基脂肪族化合物；多硝基含氟化合物；多硝基芳香族化合物（主攻方向是合成低感度、高热安定性的耐热炸药）；多硝基杂环化合物和多硝基多环笼形化合物。

多硝基多环笼形化合物具有紧密封闭的立体笼形结构，张力能高、结晶密度大、安全性好，在高能量密度材料的合成研究中具有十分诱人的发展前景。

21 世纪人类在探索同质异能化合物 C_{60}、N_{60} 等高能量密度材料合成和应用方面将会有新的发展。

(4) 军用混合炸药。

① 大力发展硝胺混合炸药是 21 世纪炸药发展的主要方向。

为了提高武器的威力，必然要求提高炸药的能量。第二次世界大战以来，炸药装药不断更新换代，在需要高能的武器战斗部中逐渐用以黑索今为基的炸药代替 TNT 为基的炸药，而且越来越多地采用奥克托今为基的炸药。例如，20 世纪 80 年代以来，美国改陶、陶Ⅱ反坦克导弹和蝮蛇反坦克火箭筒等战斗部采用了 LX-14 塑料黏结炸药，含奥克托今 95%，爆速 8 837 m/s（密度 1.833 g/cm^3），爆压 37 GPa。挪威开始生产和销售奥克塔斯梯Ⅷ新炸药，含奥克托今高达 96%，爆速 8 630 m/s（密度 1.81 g/cm^3）。

但是，硝胺单组分炸药，尤其是奥克托今，成本高，为黑索今的 10 倍以上，因而限制了它的广泛应用。国外正在采取各种途径提高产量，降低成本，早日实现奥克托今的广泛应用。

② 积极研制不敏感炸药将是今后较长时期炸药发展的重要方向。

不敏感炸药主要用于机载、舰载、车载武器弹药的战斗部装药，要求它在高温和火焰中不易烤燃、不殉爆，且一旦发生意外点火时，只燃烧而不易转为爆轰；在破片冲击、枪弹冲击或其他机械冲击作用下，不易引起事故性的意外爆炸。炸药的高能量和低敏感度是一对矛盾，如何使矛盾得到统一，选择最佳性能匹配是研究的重点，也是今后较长时期的发展方向。

武器的发展，特别是战术核武器和机载及舰载常规武器的发展，不仅要求炸药具有较高的能量，而且还要求炸药相当钝感。因此，研制既高能又钝感的炸药是武器发展的需求，也是炸药领域崭新的革命性发展。发展不敏感炸药不仅可提高武器系统的安全可靠性和生存能力，而且对今后武器的发展产生深远的影响。以三氨基三硝基苯（TATB）为基的混合炸药是尖端武器和常规武器较好的不敏感炸药，美国已用于 B77、B43 航弹及其他型号的航弹、榴弹、反坦克炮弹、导弹、鱼雷等；法国也已部分装备于空—空导弹、舰—舰导弹；英国准备用于新设计的核战斗部和常规武器的导弹战斗部；美国海军计划在舰—舰武器上换装不敏感炸药。其他国家也都在研制与发展不敏感炸药。

③ 加速非理想炸药应用研究是炸药应用研究的重要趋势。

非理想炸药的研究是提高炸药能量利用率和安全性的重要途径，具有深远的理论意义和现实意义。由于非理想炸药的大部分能量不在 C-J 面上释放出来，所以按理想炸药爆轰理论设计的武器就不能充分发挥和利用这类炸药的能量。如果能提出适合非理想炸药的新理论，并设法控制和改变非理想炸药释放能量的速率，就可充分利用非理想炸药的能量，从而会大幅度提高武器的威力。特别是在现代武器必须使用钝感高能炸药的情况下，更加显示出发展非理想炸药的重要性。因此，发展非理想炸药是提高炸药能量和安全性的重要途径。

④ 加强装药技术研究，不断改进装药结构，是提高武器性能的有效途径。

从炸药装药的角度来看，武器的威力不仅与炸药的配方有关，而且与装药结构密切相关。如美国改陶反坦克导弹战斗部在装药中加了一块能改变爆轰波传播方向的隔板并采取了其他一些措施，使破甲威力从 600 mm 提高到 800 mm，比陶 I 提高了 33%。又如陶 II 战斗部的结构与改陶基本相同，但直径从 127 mm 改为 150 mm，破甲威力达 940 mm，比改陶提高 17.5%。

当前，国外正在研究与发展一些新的战斗部装药结构，例如串联空心装药、自锻破片装药、多锥空心装药、斜置空心装药等，预期未来将会得到广泛应用。武器的不断发展，给装药设计提出了新的要求。例如，美国新研制的一种多用主动装甲，当遭到弹丸

冲击时可做出主动反应使弹丸偏离装甲，主动而有效地抵抗反坦克弹药包括高速脱壳穿甲弹、空心装药破甲弹和碎甲弹的攻击。因此，研制出新的适于对付多用途装甲的装药结构是装药设计的新课题。

2. 炸药科技进步的展望

炸药的发展总是沿着不断提高能量和应用更加安全的方向发展。能量与安全要求之间的矛盾性质，支配着整个发展进程。现代武器对炸药的能量、安全性和可靠性又提出了极为苛刻的要求，促进了炸药及其应用高新技术的迅速发展，成为优先发展的军事技术领域之一。炸药及其应用技术对采矿、建筑、石油、地质勘探等行业的发展都有重大的影响，它在军事和民用领域具有广阔的发展前景。

由于炸药本身是一种具有爆炸危险性的高能量密度材料，因此，它的研究、开发和应用又具有不同于其他材料的特殊性。它是一种综合性很强的技术。归纳起来炸药技术的发展方向是：

(1) 以更高的能量和先进的高能量密度材料和技术作为武器弹药更新换代的技术基础。

(2) 利用高新技术更新改造传统的炸药工业。

(3) 加强炸药基础理论、计算机辅助设计及性能模拟演示验证等基础技术的研究。

21 世纪炸药重点发展的技术有：

(1) 高能量密度材料的合成与应用技术。

(2) 功能材料的合成与应用技术。

(3) 炸药新工艺及在线检测技术，特别要重点发展炸药新概念工艺。

(4) 炸药能量释放、利用及转换技术。

(5) 炸药性能演示验证及诊断技术。

(6) 炸药安全与环保技术。

11.2　弹药装药方法的分类

11.2.1　弹药装药的任务

弹药装药是生产各种弹药和战斗部必不可少的组成部分。弹药装药的质量优劣，对弹药的安全性和威力的大小，都有直接的影响。具体而言，弹药装药必须满足 7 项要求。

1. 保证弹药或战斗部对目标有较大的破坏作用

对于不同的目标，需要使用不同的弹药或战斗部，对装药的要求也是不相同的。例如，对付坦克用的破甲弹，实验证明，在一定范围内破甲深度与装药的爆压成正此，即装药爆炸后的爆压越大，破坏坦克装甲能力越强，而爆压大小决定于装药的爆速和装药

的密度。因此，破甲弹装药应是高装药密度的高爆速炸药。此外，破甲弹是利用聚能效应破甲的，聚能效应对装药结构的轴对称性要求严格，如果装药结构的轴对称性差，就会引起药形罩闭合变形不对称，使形成的金属射流偏离轴线，导致破甲深度降低。装药结构的对称性与药柱的局部密度、炸药成分的均匀性、药柱中的疵病（缩孔、气孔、裂纹等）有很大关系。所以，装药工艺应满足破甲弹装药的高密度和装药结构均匀对称性的要求。

又如杀伤弹，要求有尽量多的有效破片数和最大的杀伤半径。因此，炸药装药的密度和弹壁材料的强度与厚度要合理匹配，才能保证弹药要求的杀伤威力。

由上述例子可见，应根据各种弹药的战术技术要求选择炸药、确定合适的装药方法、制订装药工艺。

2. 保证弹药在发射时的安全

炮弹在发射时，弹体内的底部装药承受着很大的惯性应力，其应力大小可按（11.2.1）式估算。

$$\lambda_{max}=p_{max}\frac{\pi D^2}{4G}h\rho_0 \tag{11.2.1}$$

式中 λ_{max}——药柱底部所受的惯性应力，MPa；

p_{max}——最大膛压，MPa；

D——弹丸直径，m；

h——药柱高，m；

ρ_0——药柱密度，kg/m^3；

G——弹丸质量，kg。

式（11.2.1）是在药室为圆柱形、药柱不与弹壁黏合的情况下建立的。如果药柱与弹壁黏合，药室为圆锥形或桶形时，实验证明，药柱底部受的惯性应力要小。由式（11.2.1）看出，药柱所受的惯性应力与最大膛压、弹径平方、装药高度、装药密度成正比。当药柱底部承受的惯性应力超过了装药的临界应力，就有可能发生膛炸。

为了保证发射的安全性，在装药设计时，要考虑药柱底部的惯性应力不超过所选炸药的最大许用应力。在装药中，药柱不应有各种超过规定的疵病，如缩孔、气孔、粗结晶及裂纹等。因为这些疵病，会降低药柱本身的强度，使局部应力升高，可能导致膛炸。药柱与弹体结合要牢固，否则在发射时，会因弹壁与药柱产生剧烈摩擦而爆炸。弹底与药柱之间不应有间隙，否则，炮弹发射时药柱后座与弹底猛烈撞击，同时间隙中的气体受绝热压缩而产生高温，这些因素都可能引起装药的爆炸。药柱中，如混入了硬性杂质如碎玻璃、砂子及金属零件等，也会在发射时引起膛炸。

可见，发射时的安全性，是与装药工艺密切相关的。

对于火箭战斗部，虽然没有炮弹那么大的惯性力，但也有一些其他要求：如有些导弹战斗部的装药，要求能够耐受气动加热的高温；航弹装药，要求摘去引信后空投落地

时不爆炸；深水炸弹在搬运过程中可能碰撞，使弹壁变形挤压装药，但不得爆炸。这些要求均与装药设计、炸药选用、装药工艺有直接关系。

3. 保证弹药或战斗部在引信作用下完全爆轰

为了使装药在引信适时的作用下完全爆轰，而不瞎火或半爆，药柱应有足够的爆轰感度，传爆药柱应有足够的起爆能力，二者之间要装配正确。

药柱的爆轰感度，除了炸药本身性质外，还与弹药装药的成型方法有关。其他条件不变时，压装药柱的爆轰感度比注装的大，如压装的 TNT 能用 8 号雷管起爆，注装的 TNT 则不能。同一压装药柱，密度小的爆轰感度比密度大的要大。注装粗结晶药柱比细结晶药柱的爆轰感度要小。

传爆药柱与主装药柱之间有间隙时，传爆能力会减弱。如果间隙过大时，甚至会使主装药半爆或瞎火，两者之间如隔有较厚的金属壳或其他材料的垫片时，都有可能降低传爆药柱的起爆能力。

可见，保证弹药装药的适时完全爆轰，与传爆药柱所用的炸药、药柱尺寸、装药成型方法、装药工艺条件有关，与主装药的结构、密度、质量有关，与传爆药柱和主装药之间的正确装配也有关。

4. 保证弹药或战斗部在长期储存中不变质

弹药在长期储存期间，装药应具有足够的化学安定性和物理安定性，经过长期储存的弹药仍应保持设计要求的性能。

化学安定性是指炸药成分之间无化学反应，相容性好；炸药本身几乎不分解，炸药的爆炸性能不改变，爆轰感度不降低，机械感度和热感度不增大，炸药对弹壁无腐蚀。

物理安定性则指装药在长期储存时，原来的尺寸不变，装药结构完整、不渗油、不吸湿。保证炸药装药具有良好的化学和物理安定性，最重要的措施是选择或配制质地优良的炸药，其次是有合理的装药工艺。如装药时，不致对药室内的漆层或药型罩的镀层有损坏。又如对容易吸湿的硝胺炸药，其上加一层 TNT 防潮药塞等。此外，在装药生产中，应确保原材料符合标准，在加工过程中不得混入杂质，弹体金属内外表面要擦拭干净，涂覆各种防腐油漆，包装要严密。

5. 保证弹药或战斗部运输中的安全

在运输过程中，弹药或战斗部应能经受颠簸和振动。因此，要求弹药装药要有较低的机械感度和较好的药柱强度以及合理的装药装配工艺。

6. 保证弹药装药生产者的安全和良好的劳动条件

在装药加工生产中，主要加工的对象是炸药，如果稍有疏忽，就可能产生爆炸事故。因此，采用的装药方法应当能保证安全，对于最可能发生爆炸危险的工序（如压药、螺旋装药、药柱加工等）应隔离操作。要注意合理的布置工艺路线，防止通道阻塞，炸药及半成品的堆放应符合炸药生产的安全规范。还应采用合理的安全设施。

各种炸药都具有不同程度的毒性和挥发性，长期接触会引起职业病。因此装药生产

应尽量采用机械化、自动化。尽量使装药生产密闭化或远距离控制，使得装药生产者接触炸药粉尘的浓度和气体浓度均能符合国家卫生标准。

7. 保证装药生产达到经济合理的要求

弹药或战斗部在战争中的消耗量是巨大的，一发炮弹的成本相当可观。因此，装药生产应符合多快好省的方针。装药生产应是生产率高、生产周期短、更新换代快、生产成本低。装药单位存放半成品、原材料的库房都应符合安全布局，装药所用的原材料应立足于国内资源。

综上所述，弹丸与火箭战头部装药的生产应基本上满足以上7方面的要求。对于某一具体产品的设计、炸药的选择、装药工艺的制订等问题，要兼顾各方面情况来解决。例如，对导弹战斗部来说，解决威力指标常常是主要矛盾。而对于大量消耗的榴弹，则弹药装药生产的高效率和经济性就显得很突出。又如硝胺炸药，由于长期储存不安定，存在长期储存的问题。

11.2.2 弹药装药方法的分类及装药工艺过程

1. 弹药装药方法的分类

弹药装药方法较多，最古老的方法是压装法，这与炸药性质和发现的早晚有关。在弹药的发展史上，黑火药是发现最早、使用最广的弹药。在我国古代用黑火药制作的火攻武器中其成型用的是捣装法，这种捣装法就是现在通用的压装法。随着炸药种类的增多，装药成型方法也相继出现。弹药装药方法，常见的有以下几种：

(1) 捣装法。此法是最古老的操作，也是最简单的一种方法，一般用手工或简单工具将松散炸药装入药室后捣紧。

(2) 压装法。此法是利用液压机的压力对模具或弹体中的散粒体炸药施加一定压力而压紧的方法。压装法适用于装填中小口径、药室不鼓起的弹药，它对炸药的适应性最大，亦能获得高密度的装药。

(3) 注装法。此法是将熔化的炸药或悬浮炸药，注入药室中冷却凝固成型的方法。注装法可以装填任何口径、任何形状的药室，注装的设备简单。在战时，它对于迅速组织分散或小规模的装药生产很有意义。但它对所使用的炸药有一定的限制。

(4) 螺旋装药法。此法是用螺旋装药机，靠螺杆作用将散粒体炸药输入药室并压紧的方法。螺旋装药法与压装法本质上基本相同，其特点是能适应较大药室形状的变化，适于装填弧形药室的弹药，但只能使用摩擦感度和冲击感度小的炸药。

(5) 塑态装药法。此法是将塑态炸药在压力作用下装入弹体后固化为固体炸药的方法。

以上几种方法是最基本的几种炸药成型法，用得最多也最普遍。每种方法有它的优点，但也有一些不足之处。为了满足弹药发展的需要获得高威力优质药柱，往往采用复合装药的方法，即任意两种方法的结合或一种方法中再采取其他措施。如有的弹药，一

部分弹药装药用螺旋装药法，另一部分用注装法，或者有的用压装和注装的合用。如以下装药法：

（1）振动装药法。将较高黏度的熔态悬浮炸药，装入弹体内，用振动的方法使它密实，然后凝固成型。无论注装或压装均可应用，为了提高装药质量和装药密度经常要抽真空，所以又称真空振动装药。

（2）压力注装工艺。将熔态炸药倒入弹体或模具内加压，利用压力的升高，则凝固点升高的原理使炸药凝固，这种方法可获得固相含量高、药柱密度高的优质药柱。

（3）离心浇注和挤压浇注。这两种方法都可以提高黑索今的百分含量，利用离心力作用和压力的作用使炸药成型。

（4）压滤法。此方法是将梯黑混合炸药注入模具内后，施加压力（作用力很小），靠筛网和柱塞孔的“过滤作用”，将 TNT 液滤到上面，使药柱下面固相含量增加，从而提高高能炸药的百分比含量。

实际上，还有其他一些装药工艺同样可以提高弹药装药的密度，如静态压注工艺、颗粒级配工艺等。

最常用的装药法是注装、压装、螺旋装药三种主要方法。

按照炸药是否直接装入弹体，又可分为两种。一种是将炸药直接注入或压入弹体药室中；另一种是药柱成型后，用黏合剂或其他方式将药柱固定于药室中。后者只适用于药室简单的情形，其优点是药柱与弹体分装，宜于长期储存，制成的药柱能全部检验。

选择何种装药工艺方法，是根据弹药类别、炸药性质、药室形状等条件而确定的。

2. 弹药装药及装配的总工艺过程

弹药装药与装配的工艺过程是由一系列连续的工序组合而成。因弹药种类和炸药性质的不同以及采用的装药方法的不同，其总工艺过程也不完全相同，但基本上差别不大。一般分为 5 个部分：弹体准备；炸药准备；装药、药柱加工与装配；装药技术检验；总装配、防锈处理及修饰包装。

弹体准备的任务，是将弹体准备到适合于装填炸药的状态。主要的工作为：拆箱、去油、清理弹体外表面、检验弹体金属质量、弹体预热并输送到装药工序。

炸药准备的任务，是将炸药过筛、加热或混合。对注装法则是将炸药预先熔化、晶化处理等。

药柱加工的目的是：在装药后除去药室中多余的炸药，如刮平药面、钻传爆孔、清理螺纹等，使药柱达到满足产品图的要求。如果是压装的药柱必须再进行药柱加工时，需与弹体结合进行。一般用黏合剂，也有用塑料圈使药柱在弹体中紧固。带有口螺或带有底螺的中口径或大口径弹体，在分别装药完毕后，还要进行口螺或底螺与弹体的结合工作，保证连接处的密封性。

装药技术检验对于保证弹药的质量有特别的重要意义。在弹药的生产中，原材料及半成品在投入生产之前必须经过检验，在装药中和装药后都设置有检验工序，需满足产

品图和技术条件中的有关装药的各项指标要求。

总装配工作，包括弹体外表面除锈、涂漆、装配零件、检验、印标记、包装等。

在整个工艺过程中，从质量和安全方面要求来看，装药是关键；而装药前的弹体准备和炸药准备以及装药后的修饰完成则又是必不可少的辅助工序。

3. 对弹药装药生产的安全技术要求

在装药生产中，加工的主要对象是具有各种不同程度爆炸危险性的炸药及半成品，且炸药本身有不同的毒性，为实现安全生产和良好的劳动条件，要采取一系列技术组织措施，包括完善的安全技术管理组织、安全技术教育、安全技术守则。在技术上，还应采取以下措施。

(1) 装药车间和工房的基本建设应符合相应爆炸危险等级的安全规范。如一级危险工房应在建筑结构和建筑设计上有相应的安全措施；有爆炸危险的工房之间要有合理的安全距离；特别危险的装药及加工工序，应在单独的防爆小室内进行隔离操作；一般的辅助间如通风、配电、压空等应与装药生产工房隔开；运输炸药要有专门通道；门窗大小、高度、开启方向以及安全门窗的位置、地面材料、墙壁装饰等都应符合安全要求。

(2) 在设备安装上，电器设备要采用防爆型，所有设备要接地，且电阻不超过规定数值。工房还应有完善的避雷措施，照明安装都应符合安全要求。

(3) 要有完善的消防设施，如能自动控制的雨淋管等。

(4) 生产时，严禁炸药中混入杂质，特别是硬性杂质更要注意。撒落在地上的炸药应及时清除，不得再用。车间内绝对不能使用明火，避免黑色金属撞击，车间的通道应畅通无阻，工房内的炸药应按规定的存放量储存，人数不得超过定员规定。

(5) 必须使生产者有完善的保健措施。有害的粉尘或蒸汽浓度，应符合工业卫生标准规定，生产时应穿戴合适的工作服、工帽和口罩等，下班后用温水洗澡。

上述各项基本要求，均适用于各种装药车间及工房，这些规定是根据炸药爆炸发生的机理作为科学依据，并通过大量生产实践而提出的，因此在安全技术管理上应认真遵守。

11.3 弹药装药方法的选择原则及对装药的技术要求

11.3.1 弹药装药方法的选择原则

弹药的装药方法与弹药的装药质量密切相关，直接影响着弹药的毁伤性能。因而，合理地选择弹药的装药方法，需考虑以下 5 个方面的因素。

(1) 按产品性能和战技指标的要求，选择满足威力要求的炸药，使战斗部对目标有最大的毁伤效应。不同目标对战斗部装药的要求是不同的。实践经验表明，对爆破战斗部应选用爆热大和爆轰产物体积大的炸药。由于破甲弹在一定破甲深度范围内，破甲深

度与炸药装药的爆压成正比，所以聚能战斗部装药应具有较大的爆压、爆速和密度。为了提高杀伤战斗部的破片初速，增大破片打击目标的动能，应选择高威力的炸药，同时使炸药与壳体强度合理匹配，达到最大效能。

(2) 机械感度要低，爆轰感度要高。感度是炸药在外界能量作用下产生爆炸反应的难易程度。炸药对各种不同外界能量（如机械能，热能、爆轰波能、电能等）的作用具有不同的感度（如撞击冲击感度、摩擦感度、针刺感度、热感度、火焰感度、爆轰感度等）。选择炸药时，特别要注意撞击感度、摩擦感度和爆轰感度。因为前两种感度可确保战斗部在制造、运输、使用中的安全可靠性，而后一种感度可保证战斗部在目标处作用的可靠性。所以炸药的感度一定要选择适当。

(3) 根据所选炸药的基本性能和要求的装药密度、装药量、弹体形状等因素，选择适合的装药方法。弹药装药应具有一定的物理力学性能。炸药装药的物理力学性能对炸药的应用影响很大，例如注装成型和压装成型的工艺性、装药密度和密度的均匀性，在很大程度上取决于炸药本身的流变性质和装药方法的选择。装药结构尺寸在长期储存过程中的稳定性与炸药本身的蠕变性质有关，装药的可加工性亦与弹药装药的力学性质有关。

炸药应用对炸药的物理力学性能的要求，与通常对金属材料力学性质要求有很大区别，这是因为弹药装药在战斗部中是作为爆炸的能源而不是强度构件。战斗部对装药的力学性能要求最终是为了满足良好的爆炸性能、安全性能和储存性能。

(4) 储存性能良好。炸药在长期储存中或在环境条件变化（如压力、温度、湿度）的影响下，应具有保持性能不变的能力。所以一定要选用经过长期使用，确实证明物理、化学安定性好的炸药。另外还要求炸药与接触材料具有一定的相容性（指二者接触不起化学反应，或反应速度极慢），以便于长期储存。

(5) 装药工艺性能好。大型战斗部一般为注装，只有口径小的战斗部才采用压装、螺旋装药法等。对压装药，其可压缩性要好；而对注装药，其流动性应好。另外，应选毒性小、生产安全性好的炸药。

11.3.2　弹药装药的技术要求

1. 概述

为了达到对不同目标的最大的破坏作用，不同的弹药对装药的要求也不完全相同。一般而言，对弹药的技术要求有如下几个方面。

1) 保证对目标的破坏威力

(1) 对反坦克用的破甲弹和碎甲弹，要求炸药装药有尽可能高的爆压。对破甲弹而言，同时要求装药结构的均匀性和较大的装药密度。对碎甲弹而言，要求装药有一定的塑性和低感度，使弹丸或战斗部在碰靶和变形过程中不早炸，应达到一定接触面积和变形最有利的堆积形状时才由引信起爆。通过在装甲钢板中形成的压缩应力波及反射拉伸

波之间的相互作用，在钢板背面剥离掉数块具有一定功能的飞碟片，起杀伤和破坏作用。

（2）对爆破弹药和水中弹药，要求弹药装药应具有最大的做功能力，选用爆热高、爆容大的炸药。

（3）对海军和对空武器弹药及穿甲弹等，不但要求有大的做功能力，为了达到纵火目的，还要求破片的温度越高越好，一般选用含爆热高的炸药和热值大的金属粉作为弹药装药。

（4）对于杀伤榴弹，要求装药量、装药密度、炸药猛度等应与弹丸金属材料的强度和厚度相匹配，能够产生较多的有效破片数，具有较大的杀伤半径。

2）保证弹药在使用时不膛炸、不早炸

弹丸在高膛压发射作用下（或碰靶时），弹药装药受到很大的惯性力作用。在装药内部各截面上产生大小不等的应力，装药在这种应力作用下应确保发射的安全性和作用的可靠性。

3）保证弹药在引信作用下完全爆轰

为了保证弹药装药适时完全爆轰，要求弹药装药有良好的爆轰感度，传爆药柱应有足够的起爆力，并保证装配位置的正确性。

4）保证弹药运输安全，长期储存不变质

按战技指标的要求，弹药一般要储存 10～20 年。我国地跨寒带和亚热带，气候条件复杂。弹药在北方使用和储存时，要求耐－40 ℃以下的低温，在南方则需耐＋40 ℃～＋55 ℃ 的高温。因而弹药的使用温度范围为－40 ℃～＋55 ℃。在复杂的气候条件下，弹药装药应具有稳定的物理、化学性质，经长期储存后，仍能正常使用。水中武器还要求耐海水的侵蚀。

5）弹药装药的易维护性和经济性

随着科学技术的发展，对弹药装药的要求也在不断提高。为了保证使用的安全性，要求弹药易于维护，便于勤务处理，在保证产品战技性能的前提下，同时要兼顾产品的经济性。

2. 122 mm 火箭弹战斗部装药的技术要求

1）对战斗部空体、炸药和环境的要求

装药前战斗部空体应 100%检验，并应符合下列要求：

（1）内表面无锈，内、外表面漆层质量符合要求。

（2）药室不准有油污和杂质。

（3）螺纹不允许有锈、毛刺以及轮廓的歪斜等。

（4）装药前战斗部空体、检验装药质量的开合弹、药面成型冲及螺纹保护套都应按规定预热，温度为 40 ℃～60 ℃。

装药用的炸药不得有油污、变质及肉眼可见的杂质。梯黑铝混合装药在成分合格、

无杂质的情况下，经破碎后可重复使用。

装药工房的温度应不低于 22 ℃。

2）对装药质量的要求

（1）按产品图和技术条件的要求配制混合炸药，混合均匀后取样进行成分分析。装药前混合炸药的温度控制在 100 ℃～115 ℃范围内。

（2）药柱结构质量用开合弹检验。在相同条件下混合的炸药，并以相同的装药条件进行装药的产品，每 30～50 发分为一个装药组，其中有一发开合弹。

（3）梯黑铝混合装药的任意部位实测密度不小于 1.64 g/cm^3。

（4）开合弹测密度及配比成分，在药柱的上、下两部位取样。检验时允许有：

① 分布在整个装药剖面上不同位置且其直径和高度不超过 6 mm 的疵孔，数量不超过 3 个；直径和高度不超过 10 mm 的疵孔，数量不超过 2 个。

② 分布在整个装药剖面上的裂纹，总数不超过 2 条，总长不超过 100 mm，宽度不超过 2 mm，但横向只允许有一条裂纹，且长度不超过 30 mm。裂纹与疵孔连通时，疵孔直径不大于 6 mm。

③ 先装入传爆药柱（用成型冲固定），后装炸药。以开合弹检验，允许传爆药柱的钝感剂渗出与混合炸药的交界面相混，但不允许传爆药柱歪斜。

④ 两装药端面允许有分散的、直径 2 mm 以下的麻点，数量不计；深度不超过 5 mm 的崩落，其总面积不超过所在端面面积的 10%；直径和深度不超过 5 mm 的气孔，数量不超过 5 个。允许装药端面与弹壁局部分离，但不超过 1/2 圆周；不允许药柱松动和转动；允许有表面细裂纹及因清理药面产生的刀痕和药面成型冲痕迹。

⑤ 炸药底端面应平整，不允许刮成斜面。如果破片圆筒底端面上有炸药层时，应将其炸药刮掉，允许炸药端面出现倒角，倒角深度不大于 5 mm。

11.4　弹药装药质量的检验与验收

根据产品图和装药技术要求，对装药后的弹体进行必要的药柱加工和检验。其工艺流程如图 11.1 所示：

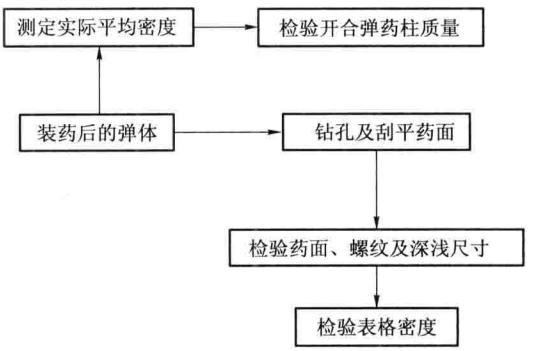


图 11.1　工艺流程

1. 测定实际平均密度

装药弹体按 0.5%～3%做实际平均密度检验，实际平均密度应符合产品图规定的平均密度要求。如 152 mm 加农炮用榴弹螺装 TNT，实际平均密度要求不应低于 1.47 g/cm^3。如果低于要求，所代表的该组弹应处

理或者报废。实际平均密度测定的代表弹应与正常工艺相同。实际密度的检验方法是：首先测定出药室容积的大小。先称空弹体质量，然后将弹体药室内注入 15 ℃～20 ℃清洁水，水平面至弹口部端面的距离应与实际装药要求相一致，然后将弹体外表面及口部螺纹上的水擦净，称量装水后的弹体重，称量精度为 0.01 g。则药室容积按下式计算：

$$V=(G_w-G_0)/\rho_w$$

式中 V——药室容积，cm^3；

G_w——装水后弹重，g；

G_0——空弹体质量，g；

ρ_w——水的密度，g/cm^3。

测出药室容积后，将水倒出，将弹体内外擦干净，做出标记，一般按 1%加入正常的装药生产中（以装药机台为单位），装药后经药柱加工检验合格后，可测出该弹的装药质量：

$$W=G_e-G_0$$

式中 W——装填炸药质量，g；

G_e——装药后弹重，g。

则实际平均密度 $$\bar{\rho}=\frac{W}{V}\approx\frac{G_e-G_0}{G_w-G_0}(g/cm^3)$$

实际平均密度按四舍五入法取小数点后两位即可。近似取水的密度为 1 g/cm^3。

2. 锯开合弹与检验开合弹药柱质量

装开合弹的目的是检验装药药柱的局部密度，也是检验药柱结构质量的一种方法。采用开合弹装药时，在弹体药室表面涂一层均匀的炮油或凡士林油，装配好后，按与正常弹体装药相同的工艺条件进行装药。装药后在室温的条件下缓慢冷却，冷却时间根据产品的种类而定。并详细记录开合弹所代表的装药机台、装药弹组号、数量及操作者。待冷却时间符合工艺要求后，将开合弹打开取出药柱，用手锯或电锯（应在防爆小室内操作）沿药柱中心锯开。首先检验药柱的结构质量，合格后将锯取局部密度试样，进行测试。

① 装药结构质量用开合弹药柱进行检验。开合弹检验数量为 0.5%～3 %，当开合弹装药结构不合格时，所代表的产品应报废。当工作班终了而未完成一组产品装药时，不足半组者并入前一组，超过半组者应单独编组并装一发开合弹。

② 沿开合弹药柱中心线剖开，检验其结构质量。不同的弹种对装药质量有不同的要求，包括对疵孔、气孔、缩孔以及尺寸和数量的要求，对装药密度及局部密度的取样方法等都规定有具体的技术要求。

一般情况下允许有细裂纹，而不允许有铁屑、玻璃碎块、砂石等杂质混入药中。

以 152 mm 加农炮用榴弹为例，介绍一下它的局部密度取样尺寸及密度值。局部密度取样尺寸如图 11.2 所示。

局部密度值：口部不大于 1.60 g/cm³，上部不小于 1.45 g/cm³，中部、下部密度不小于 1.47 g/cm³，底部不小于 1.45 g/cm³。

在锯开合弹药柱时，无论使用电锯或手锯都必须可靠接地，以消除锯药柱时产生的静电。使用电锯时应将电锯设备安装在防爆小室内，进行隔离操作。

3. 钻孔及刮平药面使药柱表面尺寸符合产品图的要求

操作时将装药后的弹体卡在旋转的机床上，用手铣刀进行钻孔。钻孔后刮平药面，并且用铜钩清理药面根部及螺纹，用吹风工具去除口部浮药，将螺纹清擦干净。也有将装药弹体放在专用钻孔机床上，在防爆小室内进行自动钻孔。

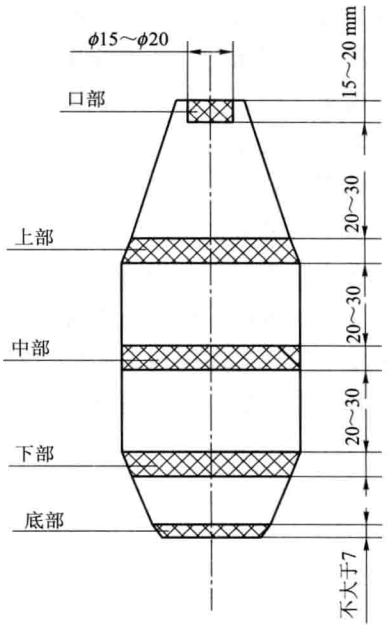


图 11.2　局部密度取样尺寸

然后再进行药面修正及其他处理，最后在药面及药室弹壁均匀地涂以 40%的虫胶漆。钻孔时要求严格控制钻孔的尺寸，必须符合产品图的要求。钻孔的钻头最好设计成板式，如图 11.3 所示。最好采用黄铜材料，也可以采用钢材，但刀口周围要焊铜，这样既保证安全，又可以减少药面崩落。

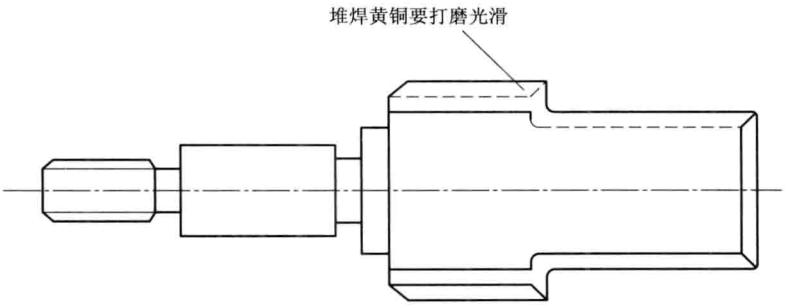


图 11.3　钻孔刀具

对药柱端面和引信室、传爆管室的药面上允许有：直径不超过 1 mm 的小麻点；深度不超过 5 mm 的崩落和疵孔（气孔、缩孔），其总面积不得超过药面和引信室、传爆管室面积的 10%；不致引起炸药脱落的裂纹；装药与弹壁的局部分离等。

4. 检验表格密度

(1) 编制表格密度表。

在合格待装的空弹体中，任意抽取 100 发，用水分别测出它们的装药容积，然后挑出容积最大的 50 发，求出平均最大药室容积，以此容积乘以不同的理论密度值，得出

相应密度的装药量，以理论密度值与相应的装药质量值编成表格，即为表格密度表。表格密度表的使用期，在连续生产的情况下，每个季度编一次。表格密度计算精确到小数点后面第二位，小数点后面第三位进行数字修正，四舍五入。

对平均密度有上、下限要求的装药弹体，编制表格密度时，应取 100 个空体的平均药室容积进行编表。

(2) 检验表格密度。

在实际生产中，用天平称量装药后的弹体质量，减去原空弹体质量，便得出装填炸药的质量。根据炸药质量查对表格密度表，即可查出密度值，该密度即为表格密度。表格密度应符合产品图规定的平均密度要求。对于不合格者应剔除，然后进行熔药，空弹体经处理合格后，可再进行装药。

第 12 章　弹丸与火箭战斗部装药的常用方法

12.1　注　装　法

炸药的注装过程与金属的铸造类似，是将固体炸药加热熔化，经过一定处理后注入弹体或模具中，冷却凝固成具有一定性能的药柱，这就是炸药的注装。

12.1.1　概述

1. 注装适用范围

注装法在炸药成型历史中并不是最早的，因为炸药成型是与炸药性质密切相关的。注装法的应用是在第二次世界大战时，当时炸药主要是苦味酸和 TNT，它们可以熔化且熔点不太高，适合于注装，几乎所有的炮弹和战斗部都能用注装法装填。直到现在注装法在世界各国仍然普遍采用，之所以如此，与注装法的优点是分不开的。注装不受弹体（或模具）药室形状的限制，特别是对弧形大、形状较复杂的注件不受口径大小的限制，更适用于装药量大的一些弹种，如鱼雷、水雷、深水炸弹、航弹、火箭弹、口径大于 155 mm 的榴弹、工兵用地雷以及一些后膛用的破甲弹（如 100 滑破甲弹等）等的装药。

可用不同炸药按不同比例组成的悬浮液炸药进行注装，使炸药应用种类增加。注装成型可获得结构均匀、装填密度较大的药柱，从而保证弹药的威力。此种方法所采用的设备也比较简单，尤其在战时，可在简单设备下进行生产，满足战时大量弹药的需要。

注装法也存在着不足和缺点：生产的弹药质量不易控制，受人为因素影响较大，护理不当易出现废品；一旦有疵病，弹药发射时安全性受到影响；炸药熔化、结晶凝固的周期较长；炸药加热熔化时，炸药气体对人体健康影响较大等。因而生产应密闭化、管道化和自动化。

对于不同的弹种，注装工艺基本上是相同的，整个生产流程大致包括以下几个步骤，如图 12.1 所示。

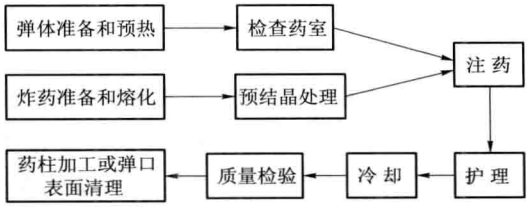


图 12.1　注装药生产流程

2. 注装法对猛炸药的要求

使用该方法对炸药的要求为：

(1) 足够大的威力，即单位质量的炸药含有足够的能量，且这种能量能以极大的速度释放出来。威力大才能适用于需要，弹药的毁伤效应才理想。

(2) 炸药熔点不宜过高，一般应控制在 110 ℃～130 ℃之间，以便适用于注装的特点。

(3) 炸药在温度高于熔点 20 ℃～30 ℃时，保持 1～2 h 不分解。

(4) 要求炸药蒸气、粉尘无毒或毒性很小。

能满足上述要求的炸药，有单质炸药 TNT、苦味酸等；有二元或三元组成的低共熔物，如 TNT 与特屈儿、TNT 与二硝基甲苯、TNT 与二硝基萘；有组成的悬浮液混合物，如 TNT 与黑索今、TNT 与铝粉、TNT 与硝酸铵等。由于苦味酸在长期储存时不安定，一般情况下各国都不采用，主要用 TNT 及其混合物。

注装法对炸药的特殊要求使许多炸药的应用受到限制。例如对熔点较高且接近于熔点要分解的一些炸药，只能以固相颗粒加入到熔化的 TNT 中，作为注装混合炸药来使用。

注装法根据炸药液态的性质不同可分成几种类型：纯液态炸药的注装、悬浮液炸药的注装以及块装(药块加入到液态炸药中的注装)。

根据注装压力条件不同，又可分为：常压下的普通注装、真空振动注装、压力下的注装等。

对于大型的弹药或战斗部，如水雷、鱼雷、大型火箭战斗部及航弹，大都采用块装法。口径大于 152 mm 的弹丸、工兵地雷等也采用注装法。

不论何种类型的注装过程，均伴随有三种变化：

(1) 物态变化——熔态炸药在弹体内的结晶和凝固。

(2) 热量变化——熔态炸药凝固时，要放出结晶潜热和冷却热(由于炸药是热的不良导体，放热时间长)。

(3) 体积变化——熔态炸药凝固和冷却时，体积要收缩。

熔态炸药注入弹体后，随着温度下降由液相结晶为固相时，如果未控制好，会出现粗结晶。在弹体中的凝固次序不当将产生缩孔。熔态的炸药如存留于其中的气体过多，炸药凝固后则形成气孔。刚凝固完的炸药，当药柱中温度不均、冷却速度太快时，可能会出现裂纹。

粗结晶、缩孔、气孔和裂纹均为注装药柱中的常见疵病。

粗结晶的药柱结构疏松，密度和强度都较低，当炮弹发射时，在惯性力的作用下可能使药柱破裂摩擦而造成膛炸。粗结晶药柱的爆轰感度低，容易引起药柱起爆不完全。

药柱中的缩孔、气孔和裂纹都会使药柱强度降低，产生应力集中现象，在炮弹发射时导致膛炸。注装工艺的主要任务就是要获得无疵病的优质药柱。因此，只有认识与掌握

注装过程的基本规律，并结合科研与试制才能制订出最佳的工艺条件和操作方法，设计出合理的设备与工具。

12.1.2　熔态物质结晶的一般规律

熔态炸药的结晶过程和一般物质的结晶过程一样。

熔态物质由液相变为固相的结晶过程，根据实验研究，目前公认的结晶理论认为：纯液体凝固时，首先析出结晶核心，即液相内形成微小的晶种聚合成为晶核，然后晶种在晶核各方面排列起来长为晶体。生长后的晶体互相接触，当结晶间不再留有液体时凝固完成。

晶核的来源有两种：一种是由熔态物质本身析出，即液体内组成晶格状的原子团超过某一限度时就成为结晶核心，又称为自发晶核；另一种是由存在于熔态物质中的难熔物质质点所形成，有时也可以是容器的器壁，此种为外在核心，又称为非自发晶核。

以下对稳定晶核形成的条件、影响晶核生成的因素、晶体生长以及晶核与晶体生成速度对结晶结构的关系等问题，作一些基本的阐述。

1. 晶核的形成及其影响因素

(1) 自发晶核的形成。一般纯物质液体的结晶冷却实验曲线，如图 12.2 所示：熔态物质逐渐冷却时，在凝固点 T_0 时仍为液体，到 T_0 以下至 T_1 时，在 B 点处才开始出现微小的晶粒；随着结晶过程逐渐进行不断放出结晶潜热，使液体温度又回升至 T_0，到 C 点温度不再变化，直到全部液体完全结晶凝固，然后温度沿 DE 线下降。凝固点 T_0 与温度 T_1 之差为过冷度。

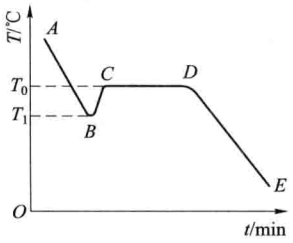


图 12.2　熔态炸药温度 T 随时间 t 的冷却曲线

从理论分析来看，熔态物质结晶时，温度必须降到凝固点 T_0 以下，当液态自由焓高于固态自由焓结晶时，才可能从液体中析出。

实践与理论均说明，纯液态的结晶需要一定程度的过冷。

熔态物质在结晶过程中系统内有两种能的效应在发生变化，一种是液相转变为固相时放出能量，称相变能效应；另一种是在液相内形成新相晶核需要能量，称为界面能效应。其总能量的变化 ΔG 为两种能效应之和，其表达式为：

$$\Delta G = -V\Delta g_v + S\sigma \tag{12.1.1}$$

式中　ΔG——物系自由焓的总变化；

V——新(固)相的总体积；

S——新(固)相的总面积；

Δg_v——单位体积中，固液两相自由焓之差；

σ——单位相界表面上，固液二相的表面张力。

假设生成的新相微晶粒为球形，其半径为 r，球的数目为 n，则式(12.1.1)可写为：

$$\Delta G=-\frac{4}{3}\pi r^3\cdot n\Delta g_v+4\pi r^2 n\sigma \tag{12.1.2}$$

式中 ΔG——物系自由焓的总变化；

r——晶核半径。

将式(12.1.2)中 ΔG 与 r 关系作图，如图 12.3 所示。

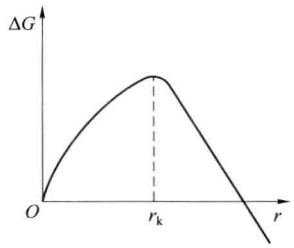


图 12.3 物系自由焓随晶核半径的变化

从图 12.3 可见，开始时，物系自由焓随晶核半径增大而增大，即 $\frac{d\Delta G}{dr}>0$；当晶核半径 r 增至临界晶核半径 r_k 时，自由焓变化达到最大，$\frac{d\Delta G}{dr}=0$；晶核半径 r 再继续增大时，物系自由焓的总变化减小，$\frac{d\Delta G}{dr}<0$。

以物系自由焓总变化作为过程方向的判据，显然当晶核半径小于 r_k 时，系统的自由焓总变化为正，结晶过程是不稳定的，即生成的微小晶粒只会熔解或消失。晶核半径大于 r_k 时，系统的自由焓总变化为负，结晶过程稳定。系统的自由焓总变化为零时的 r_k 值称为临界晶核半径。该值的意义表明：结晶过程中晶核半径等于或大于临界晶核半径时，结晶才能自动进行。

系统自由焓的总变化对晶核半径的一次微分为零，即

$$\frac{d\Delta G}{dr}=-4\pi n\Delta g_v r_k^2+8\pi n\sigma r_k=0 \tag{12.1.3}$$

$$r_k=\frac{2\sigma}{\Delta g_v} \tag{12.1.4}$$

单位体积中，固液两相自由焓之差 Δg_v 随过冷程度增加而增大，而相界表面张力 σ 无变化。可见过冷程度大时，临界晶核半径减小，此时稳定的晶核易于生成。换句话说，过冷程度增加对结晶过程有利。

从图 12.4 中可看出不同过冷度条件下的临界晶核半径。图中 ΔT_1、ΔT_2、ΔT_3 为过冷度，$\Delta T_3>\Delta T_2>\Delta T_1$；$r_{k1}$、$r_{k2}$、$r_{k3}$ 为临界晶核半径。

如果过冷度太大，温度低，液体的黏度增加，分子运动受到阻碍。分子运动得越慢，晶核生成的概率就越小。如果液体的黏度极大，以致妨碍各分子形成结晶所必需的定向，将会形成无定形物质。

图 12.5 为单位体质、单位时间内晶核生成数 n 与过冷度 ΔT 的关系。它说明只有合适的过冷度才有利于晶核数的生成。

除液体过冷度对晶核形成的能力有影响外，还与物质的分子结构有关。对称性差的分子形成晶核比较困难。因为形成晶核时，一方面需要分子间的互相接近；另一方面当分子接近时，分子的定向应该和物质晶格的排列相一致。因此复杂的物质虽然有很大的过

冷度，但仍然失去其结晶的能力，例如玻璃就是其中的一种。若物质的分子结构对称，如金属的原子或离子接近圆球状，它只需要很小的过冷度，就比较容易生成晶核。

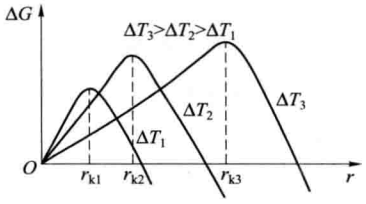


图 12.4　不同过冷度时的 $\Delta G-r$ 的关系图

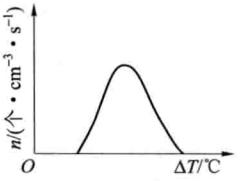


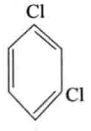
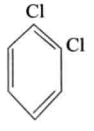
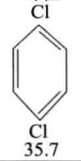
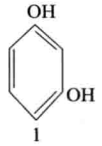
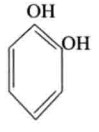
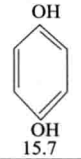
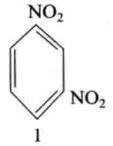
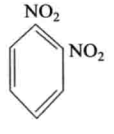
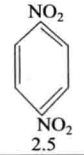
图 12.5　晶核生成数随过冷度的变化

表 12-1 为芳香族有机化合物液体中对称结构的分子与非对称结构分子结晶速度的比较。从表 12-1 看出，对称性好的对位化合物的结晶速度最大。

(2) 非自发晶核(外来晶核)。非自发晶核是相对于自发晶核而言的。所谓自发晶核是晶核在整个系统中，任意地均匀分布，这种情况多为自发晶核的形成过程，所以也称自发形核，只有在非常纯的液体中才能存在。如果熔态物质中有外来的固相颗粒或其他杂质或是容器壁时，则对晶核的形成起着基底作用，结晶往往首先在此类杂质上进行。

为了证明杂质的影响，曾有人通过实验来验证：用离心分离法除去液态中的固态杂质后，结果使该液体在同一过冷度下失去了结晶能力。又如，将液体先进行一定程度的过冷，使晶核长大后再过滤，过滤后的液体存放在封口瓶中，即使振动或冷却到很低的温度，也不能使它结晶。如果打开封口，则又恢复了结晶能力，是因为瓶中进入了灰尘等杂质。这些实验都证明外来杂质对结晶的作用。

表 12-1　芳香族有机物间位、邻位、对位的结晶相对速度

	间位	邻位	对位
二氯苯	 1	 3.1	 35.7
苯二酚	 1	 4.2	 15.7
二硝基苯	 1	 —	 2.5

外来杂质之所以能促进生核，是因为新相晶核在杂质或器壁表面上形成时，晶核表面的一部分与现有界面接触，另一部分则与液体接触，此时形成临界晶核所需的能量比自发结晶时形成临界晶核所需的能量小。当与外来杂质相接触的固体新相的表面能（即表面张力）小于新相与液相间的表面能时，新相晶核才容易在现有界面上形成。

实验证明，作为外来晶核的物质可以是结晶物质本身的颗粒，也可以是与结晶物质本身结晶构造相近的物质，或者是和结晶物质能生成固体溶液的物质，或者是能与结晶物质生成规律的共晶物质的物质，还可以是表面具有能吸附结晶物质分子的物质。固体表面的毛细缝隙往往有很大的影响，因为毛细作用能显著地降低表面与新相之间的表面张力，并且还能够将微晶体保留其中形成晶核。

（3）影响晶核生成的其他因素。搅拌、机械振动、摩擦、气泡（压力脉冲）、超声波、电场、磁场等都能促使晶核产生。因为这些措施都是供给能量，有利于大于临界半径的晶核产生，而且能破碎粗大晶枝使之成为更细小的晶核，从而增加了晶核数量。

熔态物质预热温度对晶核形成也有影响。熔态物质的预热温度越高，即过热度大时，生成的晶核数将会减少，过热时间长，则难以形成晶核。这是因为固体物质熔化后再进行结晶时，如果加热的温度较低或加热的时间较短，此时在熔态物质中往往还保留了一部分有规律排列的固体结晶微粒。因此再冷却结晶时很容易形成晶核。反之，温度过高，时间过长，则不能保留或很少保留那一部分有规律排列的固体晶粒。另外熔态物质过热度大时还可能引起杂质表面状况的变化，使它的“活性”消失以致不易吸附结晶的液体成为结晶的基础。

2. 晶体的生长

晶核形成后的第二阶段就是晶体的生长，结晶生长的速度通常以线速度表示，即晶体在熔态物质与结晶的相界面相垂直的方向生长的速度，单位以 mm/min 或 mm/s 来表示。

实验证明，晶体生长的线速度 v 与过冷度 ΔT 之间的关系，如图 12.6 所示。曲线趋势说明，在熔点时，结晶生长的线速度为零，以后随着过冷程度的增加而加大，过冷度达到一定值后线速度增至最大，而后又随过冷程度的增加而减小。曲线上出现线速度不变的平坦区域，是因为随着结晶生长速度增大，放出的结晶潜热来不及传导出去，使界面上建立起温度平衡，此时只有使热量从系统中散去方可使过程朝结晶方向进行。炸药的导热率不大，从相界面向外散热的速度小，结晶过程受到阻碍，因此过冷度增加，晶体生长速度不再增加。如果过冷度继续增大，液体黏度增加，给分子扩散排列成二度空间核心造成了困难，故晶体生长速度降低。

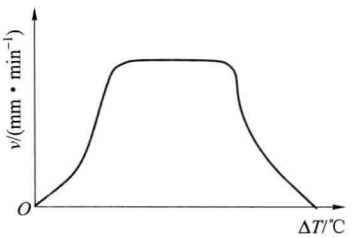


图 12.6 晶体生长线速度 v 与过冷度 ΔT 的关系

实践中发现，结晶的形状与冷却速度有关。冷却速度大时，液体物质的原子或分子还

来不及形成规则排列的晶核就冷却下来了，因此实际结晶温度降低，过冷度增大。

当结晶时的冷却速度非常小时，晶核长大得很慢，每个晶核可以保持其规则外形而逐渐长大，如图 12.7(a)所示。但实际情况中冷却速度都比较大，晶核长大得较快，因此晶体只能在成长初期维持规则外形，而后便以树枝状方式长大，而且冷却速度愈大，树枝状发展愈严重，如图 12.7(b)、12.7(c)所示。在冷却速度较大的情况下，如图 12.7(c)，开始时晶体呈规则形状，以后由于在尖角处散热条件好结晶放出的潜热能很快散去，尖角处有较多的利于晶体长大的缺陷存在，使尖角处迅速长大而形成了所谓“一次晶轴”。在一次晶轴长大变粗的同时又在一次晶轴上形成与之垂直的“二次晶轴”，随后又长出三次晶轴、四次晶轴……通过这种方式晶体形成复杂而有规则的树枝状骨架。在各个晶核成长的树枝骨架相碰后，才停止长大。但骨架周围仍充满着熔态物质在间隙内继续结晶，直到成为饱满的晶粒。

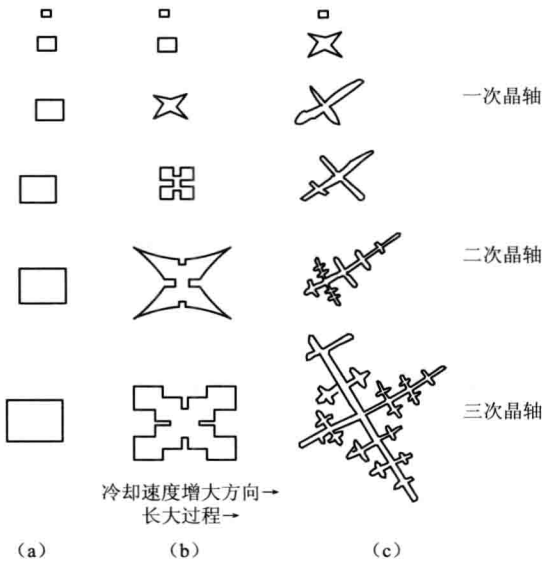


图 12.7　晶核长大速度与时间对结晶形状的影响

(a)缓慢冷却；(b)快速冷却；(c)急剧冷却

3. 过冷度、晶核生成速度以及晶体生长线速度之间的关系对晶体结构的影响

通常以单位体积、单位时间内晶核生成数 n 和晶体生长线速度 v 与过冷度 ΔT 的关系来研究结晶的特征。n 和 v 与 ΔT 的关系归纳起来有三种情况。

(1) 如图 12.8 所示。晶核生成速度比晶体生长线速度先达到极大值。如果缓慢冷却使 ΔT 达到相当于 n 的极大值时的温度 T_1 时，此时熔态物质中形成了大量的晶核。随着过冷度的增大，结晶生长的线速度逐渐增大，因而可形成致密的细结晶结构的晶体。如果开始就剧烈冷却，达到较大的过冷度 T_2，此时由于晶核生成数少，而晶体生长速度很

快，得到的是粗结晶结构的晶体。

（2）如图 12.9 所示。晶核生成速度与晶体生长线速度几乎在同一过冷度下达到极大值。缓慢冷却到 T_1 或迅速冷却到 T_3 时，得到的是粗结晶。只有快速冷却到 T_2 时，由于生成大量晶核，并迅速成长为晶体，才可以得到细结晶结构的晶体。

（3）如图 12.10 所示。与第一种情形相反，晶体生长线速度的极大值比晶核生成速度的极大值出现得早。显然，缓慢冷却到 T_1 时得到的是粗结晶，快速冷却到 T_2 时，因有相当数量的晶核生成，晶体生长缓慢，可得到细结晶结构的晶体。如果冷却速度太大，急速冷却到 T_3 时，结晶困难，冷却时只能稠化，最后成为无定形的固体，即以玻璃态存在。

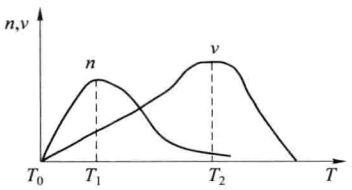


图 12.8 过冷度 ΔT 与 n,v 的关系曲线（Ⅰ）

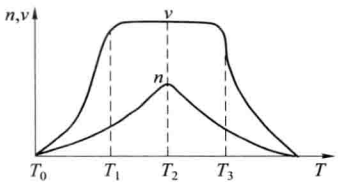


图 12.9 过冷度 ΔT 与 n,v 的关系曲线（Ⅱ）

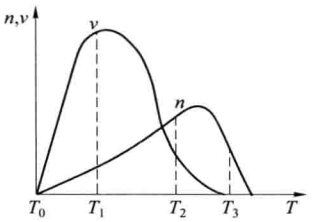


图 12.10 过冷度 ΔT 与 n,v 的关系曲线（Ⅲ）

一般而言，对于晶核自发形成时，晶核生成数与温度关系曲线的极大值比晶体成长速度的极大值出现得早。而在非自发成核时，则不一定如此。

由晶核成长为晶粒，晶核数越多，生长线速度越小，获得的晶粒越细。晶粒数（Z）与晶核形成速度 n、结晶生长线速度 v 之间一般存在下列关系：

$$Z=K\sqrt{\frac{n}{v}} \tag{12.1.5}$$

式中 K——比例常数。

可见晶粒要细化，就要增大 n/v 值，需要控制合适的过冷度。不同物质的过冷度与晶核生成速度、晶体生长速度的关系曲线各不相同。

在一般情况下，对于自发形成的晶核结晶多属于第一种情形。

根据汤姆对芳香族硝基炸药的研究，过冷度与晶核生成速度和晶体生长线速度的关系曲线，属于第二种情形。但其他一些研究者，根据自己对炸药结晶的观察，得出了与汤姆观点不同的结果，即熔态炸药在冷却中晶体生长线速度的极大值，要比晶核生成速度的极大值出现得早（属于第三种情形），他们以此来解释炸药在静止状态缓慢冷却时产生粗结晶的原因。

12.1.3 熔态炸药在弹体中的结晶与凝固

当熔态炸药刚注入弹体中时，由于弹壁的迅速冷却作用，过冷度较大，同时又由于与

粗糙药室表面接触的影响，在熔态炸药中立即产生了大量的晶核，因此靠近弹壁处的是等轴的细小结晶，晶体结构致密。但是熔态炸药结晶时放出的热量加热了弹体，提高了弹体的温度，降低了第二层熔态炸药的冷却速度，过冷度比第一层减小，晶核生成速度降低，形成的结晶比较粗大。晶体沿着与传热方向相反的方向，向药室中间移动长大，成为一层柱状结晶。随着结晶的继续进行，结晶潜热不断放出，而固体炸药层越来越厚，炸药的导热性又小，所以弹体中心部位的熔态炸药过冷度更小，晶核生成速度减小，晶体生长线速度也比较缓慢。由于结晶凝固时间长，原有的晶核常因重力作用下沉，故药柱中心部位仍然产生粗大结晶。

由此可知，熔态炸药在弹体内或模具中，自然的凝固次序是由外及里一层一层地凝固，即所谓平行层凝固。

总之，熔态炸药注入弹体中，靠自发结晶不能获得致密细晶粒结构的药柱。如果用降低弹温和环境温度来加大过冷度，会使药室内部炸药成为细结晶，但增大了炸药中心与边部的温度差，势必增大药柱的热应力而易产生裂纹。因此，单纯通过增加过冷度的办法获得细结晶药柱，是与防止药柱裂纹产生的措施相矛盾的。实际上采取熔态炸药的预结晶处理、加入共熔物等措施来防止粗结晶。

1. 熔态炸药的预结晶处理

(1) 外加晶核。在熔态炸药注入弹体之前，先加入一些固态炸药颗粒作为晶核，同时进行搅拌，促使晶核生成。当熔态炸药已有大量晶核后，再注入弹体中。

(2) 搅拌。将熔化的过热炸药，加以人工或机械的搅拌，加速炸药的冷却，并对炸药施以机械作用，促使大量的晶核生成。搅拌还可使较大的晶体破碎。

把用以上两种方法进行预结晶处理后的熔态炸药注入弹体中，均能得到细结晶结构的药柱。

2. 加入共熔物

当熔化的 TNT 中存在着杂质时，能显著地降低晶体生长的线速度。表 12-2 表明了杂质对 α-TNT 结晶生长线速度的影响。

表 12-2　杂质对 α-TNT 结晶生长线速度的降低量

杂质名称	含量/%	结晶生长线速度降低量/%
β-三硝基甲苯	0.5	16
	1.5	37.5
γ-三硝基甲苯或 2,4 二硝基甲苯或间位二硝基苯	0.5	8～10
	1.5	25～26
三硝基苯或三硝基二甲苯	0.5	6
	1.5	10～16

实践证明，加入共熔物于熔化的 TNT 中，能获得细结晶结构的药柱，是由于活泼性的杂质吸附在晶体生长最旺盛部分的表面，阻碍了晶体的快速生长，从而能获得细晶粒的结晶组织。

12.1.4 熔态炸药在凝固时缩孔的产生及防止

1. 缩孔的产生

如前所述，熔态炸药在弹体中结晶凝固时首先是从弹壁处开始，放出的热量要通过弹体壁面及口部表面传出。因此，自然的凝固次序是由表及里一层一层地进行，其中心部位的熔态炸药最后凝固。当液态变成固态时体积收缩而由尚未凝固的液体来补充，但最后凝固的中心部位，因无液体补充而形成集中缩孔(或称宏观缩孔)。图 12.11 为弹体内熔态炸药自然凝固的情形。

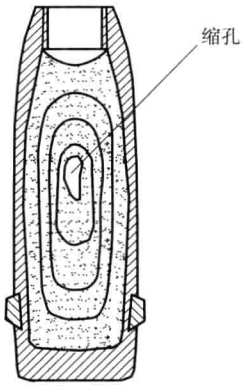


图 12.11 弹体一次注装凝固的情形

缩孔与气孔明显不同，其特征是：缩孔的内壁或多或少可看到有发育的枝晶。

如果结晶时冷却速度大，晶体长成树枝状的骨架，其骨架间的熔态物质结晶凝固时，由于骨架阻碍了液体的流动，得不到新的液体的补缩，就产生了分散的缩孔(称微观缩孔)。

集中缩孔与分散缩孔的存在可使药柱强度降低，是炮弹发射时容易引起膛炸的原因之一，因此在技术上应采取措施来防止。生产中用预结晶处理的熔态炸药注装，出现分散缩孔的可能性较小。所以下面专门讨论集中缩孔的问题。

注装的任务是要使集中缩孔的体积最小，还要使其位置和形状较为合理。

(1) 缩孔的体积。缩孔的相对体积 v_p，可用如下公式来表示

$$v_p=\varepsilon_{v1}+\varepsilon_{v2}+\varepsilon_{v3}-\varepsilon_{v4} \tag{12.1.6}$$

或写成

$$v_p=(\varepsilon_{v1}+\varepsilon_{v2})-(\varepsilon_{v4}-\varepsilon_{v3}) \tag{12.1.7}$$

$$v_p=\beta_1(T_1-T_0)+\varepsilon_{v2}-\frac{1}{2}\beta_3(T_0-T_c) \tag{12.1.8}$$

式中 v_p——缩孔的绝对体积与已完全凝固注件的体积之比；

ε_{v1}——熔态物质由浇注温度 T_1 冷却到凝固点 T_0 时的体积收缩相对变化；

ε_{v2}——由液态凝固成固态时的体积收缩相对变化；

ε_{v3}——完全凝固后的注件内部体积由凝固点 T_0 冷却到环境温度 T_c 的相对体积变化；

ε_{v4}——整个注件从 T_0 冷却到 T_c 时的整体体积收缩；

β_1——熔态物质的体积收缩系数；

β_3——固态物质的体积收缩系数；

T_1——熔态物质的浇注温度；

T_0——熔态物质的凝固点；

T_c——凝固成固态时，冷却到的环境温度。

从式(12.1.7)可以看出，缩孔的相对体积等于熔态物质收缩和凝固时的收缩之和($\varepsilon_{v1}+\varepsilon_{v2}$)，减去注件整体收缩和注件中固态物质收缩之差($\varepsilon_{v4}-\varepsilon_{v3}$)。但($\varepsilon_{v4}-\varepsilon_{v3}$)的固态收缩之差的总量与($\varepsilon_{v1}+\varepsilon_{v2}$)收缩的总和相比是很小的，故液态时的收缩($\varepsilon_{v1}$)与相变时的收缩($\varepsilon_{v2}$)是决定缩孔体积大小的主要因素。因此，从式(12.1.8)可以清楚地看出，缩孔大小与熔态物质的收缩系数 β_l、浇注温度 T_1、凝固时的相变收缩等主要因素有关。对于已经确知的 TNT 炸药而言，注入熔态炸药的温度越高，缩孔体积越大。因此，在保证液体炸药充满药室的前提下应尽量采用低温浇注。在实际注装生产中，熔态炸药的浇注温度比熔点高出 2 ℃左右，此时决定缩孔体积大小的主要是相变的收缩因素。缩孔的体积百分数按下式表示为：

$$A=\left(1-\frac{\rho_l}{\rho_s}\right)\times 100\% \tag{12.1.9}$$

式中　A——缩孔体积百分数(以熔态炸药体积为 100 计)；

ρ_l——熔态炸药的密度；

ρ_s——熔态炸药结晶后的固体密度。

例如，TNT 二次晶(晶核数占 11.2%)凝固时，密度从 1.48 g/cm^3 变到 1.59 g/cm^3 时，其缩孔体积为 6.9%。

(2) 缩孔的位置与形状。缩孔在注件中的位置与形状和注件的形状有关。图 12.12 为三种不同注件的缩孔位置与形状。上大下小的注件中生成的缩孔如图 12.12(c)所示，缩孔较好地集中于上部，离注入口的高度最短；相反，对于下大上小的注件生成的缩孔如图 12.12(b)所示，缩孔的位置最深。这是因为当收缩量相同时，注件越厚，缩孔宽度越大；注件越高，缩孔就越深。即长而狭窄的注件产生深而狭窄的缩孔；宽大的注件则产生比较集中的和宽大的缩孔。

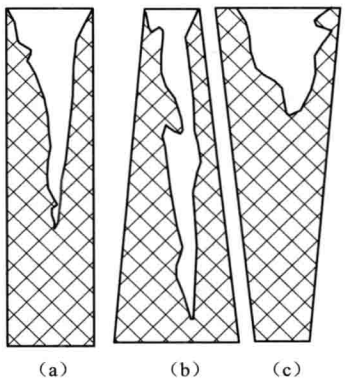


图 12.12　三种不同形状注件的缩孔情形

(a)圆柱形；(b)锥形；(c)倒锥形

2. 缩孔的防止

根据对缩孔的形成与影响因素的分析可知，在一般情况下，将熔态炸药一次注满于弹体药室中必然在药室内部产生缩孔。为了防止装药中缩孔的产生，首先要改变熔态炸药在弹体中由表及里的凝固次序，使弹体中的熔态炸药自下而上地凝固。这样使得每一层先凝固的炸药体积收缩，由上面未凝固的液态炸药来补充。其次要在浇注口加冒口漏斗，使药室中最后凝固部分的体积收缩由冒口漏斗中的熔态炸药进行补缩，

而冒口漏斗中的炸药最后凝固，所产生的缩孔在冒口中。

熔态炸药凝固速度的快慢，由其中所含的固相量的多少来确定。固相含量多，则凝固速度快；反之，则慢。对于熔态的 TNT 炸药而言，晶核含量为 2.83%时称为开始晶，占 5.65%时称为一次晶，占 11.2%时称为二次晶。因为凝固时放出的结晶潜热多，因此，开始晶的凝固速度最慢。二次晶凝固速度快是因为放出的热量少。

装药中为了防止产生缩孔，通常采取以下措施：

(1) 分次注装。将预结晶的熔态炸药分若干次注入弹体中。每一次注入后，冷却一定时间再注第二次以保证熔态炸药自下而上的凝固次序。对于中口径弹体，TNT 注装可分为 3～4 次，大口径弹体则为 8 次之多。

(2) 先注入晶次高的炸药，再注入晶次低的炸药。

(3) 在弹口部装上冒口漏斗，漏斗内装晶次低的熔态炸药作为补充弹体内最后凝固部分的收缩量，将缩孔引至冒口中。图 12.13 为带有冒口漏斗分次注装的弹丸。

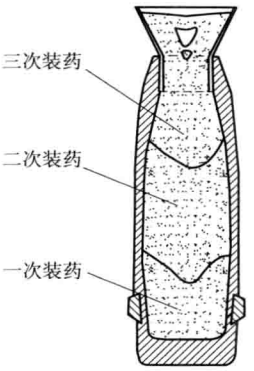


图 12.13 弹丸装药的分次注装

为了保证冒口能引出缩孔，冒口漏斗内必须具有足够的补缩熔态炸药量和液柱高度。实验表明：冒口漏斗的容积为药室容积的一半，高度为弹体药室高的 1/3 比较合适；此外，冒口漏斗还需要良好的保温，使补缩炸药尽可能长时间保持熔融状态。

12.1.5 熔态炸药在凝固时气孔的产生及防止

熔态炸药中存留的气体生成气泡时，凝固后在药柱中形成气孔。气孔的特征与缩孔不同，其内壁表面比较光滑、体积较小、分布也比较分散。气孔一般位于注件的上部。

如果气孔尺寸与个数超过技术条件的规定会降低注件的机械强度，也是引起炮弹发射时产生膛炸的原因之一。

气体混入熔态炸药中可能的几种途径有：

(1) 来自炸药。炸药在熔化之前，气体以吸附或溶解的方式混入其中，或在熔化时由于搅拌而带入。

(2) 来自弹体。在浇注熔态炸药之前，弹体药室可能受到水分或油的污染。

(3) 来自不恰当的操作。如炸药注入时过急过猛，引起飞溅将空气卷入，或者注入速度过快，药室内的空气来不及排出。因此注药不能过快，特别是对于有较大水平面的注件，倾斜放置浇注比较有利。对于注药口较小的弹体注药时，炸药充满药室的速度不宜超过气体的排出速度。

为了消除气孔，必须了解气泡生成的物理原因及气泡排出的条件。

气泡的生成和结晶过程的初始阶段相类似，必须首先形成气泡核，而且气泡核应具有

最小的临界半径。当气泡核半径 r 极小、熔态炸药的表面张力 σ 极大时，生成气泡核的阻力 $2\sigma/r$ 极大，气泡核自发生成的可能性很小。气泡通常在现成的相界面上易于形成，如杂质的表面、器壁的表面及注件的表面等处。

气泡生成不仅与气泡核产生有关，而且与气体从熔态炸药析出的总压力有关。析出气体的总压力大于外界压力总和时气泡才能形成。用数学表达式可写为：

$$p > p_a + h\rho_l + \frac{2\sigma}{r} \tag{12.1.10}$$

式中　p——析出气体的总压力；

p_a——大气压力；

h——熔态炸药的液柱高度；

ρ_l——熔态炸药的密度；

σ——熔态炸药的表面张力；

r——气泡的半径。

由式(12.1.10)可见，析出气体的总压力要克服作用于液体表面的大气压力、液柱的静压力以及因液体表面张力对气泡形成时产生的阻力。二者压力差越大，气体析出得越强烈。因此真空浇注可消除气孔，压力浇注也可消除气孔。

气泡上浮的速度与气泡大小，熔态炸药的黏度、密度有关，调节熔态炸药的温度，就能减小它的表面张力和提高炸药的流动性，有利于气泡上浮。

根据对气孔产生原因的分析，在注药生产中一般采取以下几种措施来防止气孔的产生：

(1) 防止炸药在熔化时和注装时混入气体。如进行固态炸药的真空处理；熔化炸药时搅拌不宜过猛；注入炸药时避免飞溅以及浇注速度不应过快等。

(2) 从熔态炸药中驱除已吸收的气体。如采用真空振动注药；对注入弹体中的熔态炸药进行适当搅拌，促使气泡逸出；注药时溶态炸药温度不宜过低；凝固不宜太快以及冒口排气的合理设计等都有利于气体的排除。

(3) 阻止气体从熔态炸药中分离出来。可在压力下进行注装，使气泡难以生成。

12.1.6　注装药柱的热应力——药柱裂纹的产生及防止

1. 药柱中热应力的引起

在弹体(或模具)中的熔态炸药完全凝固后，由于中心至边缘的温度不一致，会发生不同程度的收缩而产生内应力，这是由于温度不均匀引起的，因此又称热应力。

内应力是内在的，它的作用与任何附加的外力无关。

实际上药柱中产生的内应力有两种，除了热应力外，还存在由药柱收缩、机械阻碍而引起的收缩应力。由于炸药是热的不良导体，一般注装药柱中的内应力主要是热应力的作用。只有在特殊注件情况下才有收缩应力的作用。

产生的内应力因条件不同而具有不同的数值，当它的数值超过药柱的强度极限时就会使药柱产生裂缝。如前所述，药柱裂缝是引起弹丸发射时膛炸的原因之一，也是精密装药的弹药所不允许的。分析内应力的产生及其影响因素是防止裂缝、获得优质药柱的重要前提。

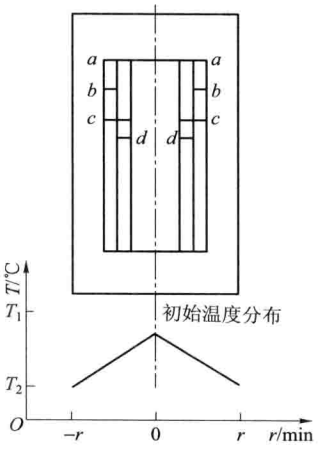


图 12.14 药柱热应力示意图

药柱中的热应力可通过圆柱形注装凝固完毕的药柱温度分布来分析：如图 12.14 所示，从中心到边部有一温度差，由于药柱中心热阻力大，温度最高；边部热阻力小、冷却得快，温度最低。取相邻的两层炸药圆筒来看，圆筒高度一样，由于内层温度高于外层温度，冷却至室温时，如果两圆筒不受约束地自由收缩，外层由 a 收缩到 b 的位置，内层由 a 收缩到 d。但实际上，两层圆筒连接在一起，即使被破坏，冷却后仍然保持在同一高度，此高度必在某一平衡位置 c 处。为此，外层收缩要比自由收缩更多一些，于是产生了轴向压应力；而内层收缩比自由收缩得小一些，则产生了轴向拉应力。炸药属于脆性材料，抗拉强度低，如果拉应力超过了药柱的抗拉强度，就会产生裂纹。轴向的拉应力引起横向裂纹，径向拉应力引起环状裂纹，切向拉应力引起径向裂纹。

注装药柱不仅在注装冷却时产生热应力，在药柱凝固后，或装入弹体后受环境的冷热交替变化而在药柱内部引起温度不均匀时，也会产生热应力。有些弹药做高低温试验的目的之一就是检查热应力对药柱的破坏情况。其他装药方法如热塑态装药、热压法、螺旋装药法的过程中均有热应力存在，因此热应力的影响是一个相当重要的问题。

2. 热应力的计算

应用弹性理论和热传导理论来计算弹性热应力时，对于简单的形状和简单的边界条件是可以解出分析解的，分析解的得出建立在以下的三条假设条件之上：

(1) 假定药柱是理想弹性体，符合广义虎克定律。实际上，注装和压装药柱属于脆性物质，抗拉强度比抗压强度约小 7 倍，不是完全弹性体，但在常温和低温情况下可近似地认为与本假设相符。

(2) 假定药柱的物理机械性质是均匀的、各向同性的。实际情况是，注装药柱边部结晶较细，密度较大；中心部分结晶较粗，密度较低。梯黑炸药注装时还可能有沉降现象，块装法注装药柱中药块与药液凝固部分的密度和强度也不同。但如果在装药工艺上进行良好的控制，也可近似地看成与本假设相符合。

(3) 假定药柱的物理机械性能不随温度、时间以及载荷的大小而变。严格地讲，温度升高时，药柱的弹性模量降低、抗拉强度降低、导温系数降低、线膨胀系数增大、药柱的泊松比随载荷的增加而增大。但对于工程计算来说，应用本假设是允许的。

尽管上述假设与实际情况有差异，但在一般情况下可以近似地符合实际。因热应力

而产生裂纹的问题是非常复杂的，在上述假设条件下，仅考虑主要影响因素而得到比较简单的计算公式作为研究热裂问题的基础。

下面介绍在几种简单情况下，应用热传导理论和弹性理论（在三个假设条件下）的分析解。

（1）对于圆柱形药柱，长径比较大的情况可以作为一维问题处理。药柱各部分温度是均匀一致的，其温度为 T_0，将此药柱投入到搅动的冷水中，冷水温度为 T_s，计算药柱的热应力。

当药柱投入冷水的瞬间，由于表面突然降为冷水温度，药柱表面比药柱中心收缩得多而产生的拉应力最大，中心处压应力最大。以后随着浸入冷水中时间的增加，药柱内部温度逐渐降低，热应力值亦逐渐下降，最后整个药柱均降到水温 T_s，热应力也就降为零。需要了解的是最大热应力发生的时间和位置。根据分析和计算，药柱投入冷水的瞬间（时间 $t=0$），边部处的径向热应力为：

$$R_r=0 \tag{12.1.11}$$

药柱的切向热应力 R_θ 和轴向热应力 R_z 相等，公式为：

$$R_\theta=R_z=\frac{E\alpha}{1-v}(T_0-T_s)\beta_9 \tag{12.1.12}$$

式中　E——药柱伸长和压缩时的弹性模量；

α——药柱的线膨胀系数；

β_9——9 阶贝赛尔值，$\beta_9=0.958$；

v——泊松比；

T_0，T_s——分别为药柱的初始温度和冷水的温度。

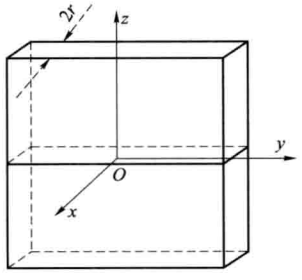


图 12.15　炸药板坐标示意图

按式（12.1.12）计算出的拉应力若超过药柱的抗拉强度，边部就会产生裂纹。

（2）薄的炸药平板，如图 12.15 所示。温度为 T_0，投入搅动的冷水中，水温为 T_s，炸药板瞬时达到水温 T_s 且保持不变，求产生的热应力。

炸药板厚不超过端面尺寸的 1/5，属于无限大板的第一类边界条件。采用直角坐标系，取板厚 $2r$ 为 x 方向，炸药板投入冷水的瞬间（$t=0$），导出的板表面处最大拉应力公式为：

$$R_y=R_z=\frac{E\alpha}{1-v}(T_0-T_s)\beta_{10} \tag{12.1.13}$$

式中　β_{10}——10 阶贝赛尔值，$\beta_{10}=0.741$。

按式（12.1.13）计算出的热应力，若超过炸药板的抗拉强度时，就会产生裂纹。

（3）对于圆柱形药柱，长径比较大的情况仍作为一维问题处理。药柱的初温为 T_0，

将此药柱放在静止的或流速不大的、温度为 T_s 的冷空气中，求药柱产生的热应力。

在此情况下，药柱表面并不能瞬时达到冷空气的温度，而是与冷空气按热交换规律进行传热，这种边界条件称为第三类边界条件，它更接近于经常见到的实际情况。传热过程用对流传热来表示，药柱内部传到表面的热量应与药柱表面传到空气中的热量相等。此问题的分析解比前述情况(1)、(2)要复杂一些，产生的最大热应力仍发生在药柱的边界和中心处，边界产生最大拉应力。导出的径向拉应力公式为：

$$R_r=0 \tag{12.1.14}$$

切向和轴向拉应力公式为：

$$R_\theta=R_z=K\frac{E\alpha}{1-\upsilon}(T_0-T_s) \tag{12.1.15}$$

式(12.1.14)与式(12.1.15)的形式基本相同，问题是要确定 K 值。计算中，K 值取决于最大热应力的时间 t_m 和比欧准数 B_i 两个因素。

产生最大热应力的时间 t_m，通常也就是药柱中心与边部的温差达到最大值的时刻，如图 12.16 所示。产生最大热应力的时间不能直接确定，要用不同时间代入公式计算热应力，得出最大应力的相应时刻 t_m。

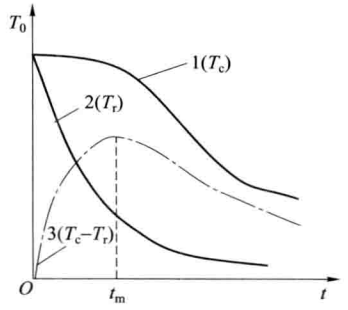


图 12.16 药柱温度—时间($T-t$)曲线

T_c—药柱中心温度；T_r—药柱边部温度；
T_0—药柱初始温度；t_m—产生最大热应力的时间。
曲线 1—药柱中心温度随时间的变化曲线；
曲线 2—药柱边部温度随时间的变化曲线；
曲线 3—药柱中心与边部温差随时间的变化曲线。

比欧准数 B_i 是一量纲为 1 数群，其表达式为：

$$B_i=\frac{\alpha_a r_R}{\lambda} \tag{12.1.16}$$

式中 λ——药柱的导热系数；

α_a——空气对药柱表面的给热系数；

r_R——药柱的半径。

为方便计算最大热应力，表 12-3 给出不同具体情况下的 K 值。

表 12-3 最大温差时不同 B_i 值所对应的 K 值

B_i	0.226	0.471	0.655	1.070
K	0.053	0.090	0.123	0.167

从 K 值看，药柱放在冷空气中产生的热应力比放在同样温度，并搅动的冷水中产生的热应力要小得多。如 B_i 为 0.471 时，K 值为 0.09，对比情况(1)的式(12.1.12)中的系数 0.958，热应力小了 10 倍。

同样，炸药薄板放在静止或流速不大的冷空气中时，表面产生最大拉伸应力，产生最大热应力的时间与产生最大温差(T_0-T_R)的时间相一致。最大热应力与 B_i 值有关，计算公式仍与式(12.1.15)相同，但 K 值要专门计算确定。

(4) 对于圆柱形药柱，在长径比较大的情况下求注装时产生的热应力。

当药柱中心凝固时，中心温度为 T_1，相当于炸药的凝固温度，此时药柱表面（$r=r_R$ 处）的温度为 T_2，药柱中的温度分布呈线性分布，如图 12.14，此时药柱中没有热应力。当中心温度下降时，产生热应力，当中心温度下降到边部温度 T_2 时，热应力达到最大值。假设药柱为理想弹性体，符合前述三条假设，则最大切向热应力 R_θ 由下式计算：

$$R_\theta=\frac{E\alpha}{1-v}(T_2-T_1)\frac{2r-r_R}{3r_R} \tag{12.1.17}$$

最大热应力发生在中心和表面两处：

$$\text{药柱中心处}, r=0 \quad R_\theta=\frac{-E\alpha}{1-v}(T_2-T_1)\frac{1}{3} \tag{12.1.18}$$

$$\text{药柱表面处}, r=r_R \quad R_\theta=\frac{E\alpha}{1-v}(T_2-T_1)\frac{1}{3} \tag{12.1.19}$$

中心和边部应力大小相同，但中心为拉应力，产生裂纹的可能性最大。

以上四种情况的最大热应力公式可归纳成一个公式来描述：

$$R=K\frac{E\alpha}{1-v}\Delta T \tag{12.1.20}$$

式中，K 值按不同情况由表 12-4 选取。温差 ΔT 的取法：对于药柱药板受环境温度所产生的热应力，取药柱或药板的温度 T_0 和周围环境温度 T_s 之差；对于注装凝固后冷却过程中的热应力，取中心凝固时刻的边部温度 T_2 和炸药凝固温度 T_1 之差。弹性模量 E、线膨胀系数 α、泊松比 v 为炸药装药的物理常数。

表 12-4　热应力计算式中的 K^* 值表

条件 / 药型	置于搅动的冷水中	置于静止或流速不大的冷空气中					注装后冷却过程
		$B_i=0.236$	$B_i=0.403$	$B_i=0.471$	$B_i=0.655$	$B_i=1.07$	
药板	0.741	0.070	0.108	0.120			
药柱	0.958	0.053		0.090	0.123	0.167	0.333
* 原 K 值计算时，其中 R、E 的单位均取 kg/cm^2。							

不产生热裂纹的条件应为装药的抗拉强度 R_m 大于它的热拉伸应力 R，即

$$R_m>R=K\frac{E\alpha}{1-v}\Delta T \tag{12.1.21}$$

或

$$\frac{E\alpha}{(1-v)R_m}K\Delta T<1 \tag{12.1.22}$$

式(12.1.22)概括了热裂纹形成与否的主要影响因素。式中 $\frac{E\alpha}{(1-v)R_m}$ 完全由药柱本质所决定，与装药形状无关，可以作为药柱抵抗热裂纹能力的标识量，此值越小，越不易产生热裂纹。如在生产和储存中，药柱遇低温容易产生裂纹，是因为在低温条件下，药柱的

弹性模量 E 增大，抗拉强度 R_m 降低，所以药柱又硬又脆。又如纯的注装 TNT 药柱比较容易产生裂纹，当加入高分子硝化棉时，由于提高了药柱的抗拉强度，可以消除或减少裂纹。同样在压装的混合炸药中，加入了柔软、易变形的高分子物如聚异丁烯，使药柱具有较好的塑性；降低弹性模量，增大抗拉强度，也能有效地避免低温时裂纹的产生。

式中，$K\Delta T$ 项与传热条件和药柱的形状尺寸有关。从式(12.1.20)可知，温差 ΔT 愈大，热应力愈大，又从表 12-4 可看出，圆药柱的 K 值比平板的大，所以热应力大。药柱放在静止或流速不大的空气中时，比欧准数 $B_i=\frac{\alpha_a}{\lambda}r_R$ 的值愈大，K 值就愈大，故产生的热应力也愈大。当冷空气流速大、传热快时，给热系数 α_a 增加，B_i 值增大。如果冷空气流速极大，药柱表面的温度立刻降为冷空气温度时，相当于药柱放在搅动冷水中的情况，K 值升高到极大值，此时是产生最大热应力的边界条件。因此药柱应尽量避免直接吹冷风，在冬季药柱运到室外，要有保温措施，否则易产生裂纹。

对于同一种炸药组成的药柱，在传热条件相同时，热应力随药柱半径 r_R（或炸药板厚的一半）增加而增大。从公式看，因比欧准数 B_i 增大引起 K 值的增大，而且在一定范围内半径 r_R 增加一倍，热应力也增大一倍，所以大型药柱只能承受较小的温差，温度变化要更加缓慢。

3. 药柱中的收缩应力

炸药在凝固冷却时，由于机械阻碍注件的收缩而造成收缩应力。显然，这种阻碍只有当它在注件中引起弹性变形时才能形成应力。当机械阻碍消失后，应力便完全消失，故又称一时性内应力。

药柱冷却时，产生的收缩应力一般是由于弹体或模具，或冒口漏斗和药柱中的芯杆因抵抗药柱的收缩而引起。中间芯子收缩率小于药柱自由收缩率时，注件中的应力 R_y 用公式表达为：

$$R_y=E(\varepsilon-\varepsilon_K) \tag{12.1.23}$$

式中 E——炸药的弹性模量；

ε——炸药圆筒的自由收缩率；

ε_K——芯子的收缩率。

从式(12.1.23)看出，两者材料的收缩率相差大时，产生的收缩应力也大。实际上，炸药的收缩率比弹体模具或冒口漏斗的收缩率大若干倍。如果不采取措施，药柱则会因收缩应力而产生裂纹。为了防止裂纹的产生，通常采取以下措施：

(1) 采用收缩率大的芯子材料。

(2) 采用空心的芯子。

(3) 及早撤去阻碍炸药收缩的芯子(如工具或模具等)。

12.1.7 悬浮炸药的流变特性及其浇注

对于黑索今、奥克托今、太安等高爆速炸药，由于它们的熔点高，在加热时未达到熔点

之前就发生了明显的分解或爆炸，为安全起见，在弹药装药工艺中不能单独使其熔化注装。通常采用含固相颗粒悬浮于液态 TNT 中形成悬浮液再进行浇注。另外这类高能量炸药的感度都较高，不能用于螺旋装药和压装成型。又因为它们的可压性差，不易成型，只有将它们以固体粒子分散于液体 TNT 中。目前最常用的 TNT 中黑索今的含量一般为 40%～60%(按质量计)，国外的某些产品可以使黑索今含量达 80%。黑索今含量不同则与 TNT 熔液形成混合物的黏稠程度也不同。TNT 温度在 85 ℃时，能溶解黑索今 4% 左右，其余的黑索今颗粒悬浮于其中。这种悬浮液炸药的注装与 TNT 的注装基本一样，产生疵病的种类为粗结晶、缩孔、气孔、裂纹是相同的，引起的原因也相同。但悬浮液炸药又有自己的特征，其动力不稳定性和流变性正是与注装药柱质量直接有关的因素。

梯黑混合炸药是一种极为重要的军用炸药，特别是西方一些国家对 B 炸药的应用尤为突出，B 炸药的生产量约占以黑索今、奥克托今为基的高能炸药总量的 90% 以上。西方国家装备使用的中大口径弹，大多配用注装 B 炸药。新研制的弹种，如底凹榴弹、底部排气榴弹、远程全膛榴弹仍装 B 炸药。由此可见这类炸药在军用中的地位。直到如今，对 B 炸药的装药工艺、机理以及提高装填质量的措施等仍是研究的重点。因而梯黑炸药的应用极为广泛，是一种很典型的炸药，了解这种炸药的性质及装药工艺的规律和本质对提高装药质量是必要的。

12.1.8　梯黑悬浮炸药的性质与提高注装质量的关系

以梯黑为代表的悬浮炸药的注装，应当解决两个问题：

(1) 提高现有的药柱质量。例如大型战斗部要求的防止黑索金颗粒下沉所引起的局部感度升高等问题。

(2) 进一步研究高威力炸药的注装工艺，实际上是解决由于高爆速炸药的黑索今含量增多所带来的流动性问题以及疵孔的消除等。显然解决上述方面的问题与悬浮液的性质紧密相关。

1. 防止黑索今颗粒沉降的措施

(1) 加入稠化剂，使悬浮液稳定。稠化剂可使黑索今颗粒周围形成单分子溶剂化膜，防止粒子聚结下沉。

(2) 悬浮炸药中黑索今的含量与其颗粒尺寸相适应。如对浓度不大的梯黑炸药，宜用颗粒较细的黑索今，以提高悬浮炸药的黏度，减轻沉降，但此种措施又应以注装流动性为前提。例如，当黑索今颗粒为 30 μm 时，虽没有沉降现象，但因黏度太高，使梯黑炸药(TNT/RDX:50/50)不能进行注装，这样就没有实际意义了。

(3) 采用压力注装。由压力升高，熔态炸药凝固点升高的原理，根据悬浮炸药中 TNT 的含量及注装初温来确定加压凝固时所需的压力。由于加压可以使悬浮炸药凝固时间显著缩短，且装药各部位几乎同时凝固，因而有利于消除沉降现象。

2. 高含量黑索今注装的问题

高含量黑索今的梯黑悬浮炸药注装的关键，应尽量采取各种措施来改善它的流动性。

即一切有利于减少内摩擦、降低黏度的措施。根据梯黑悬浮炸药的流变性质可见：

(1) 要求黑索今颗粒呈球形或接近于等轴形、表面光滑、没有双晶。直径宜在 150～250 μm 之间。

(2) 注装温度在 85 ℃以上，一般为 85 ℃～95 ℃。

(3) 宜用颗粒分布宽的黑索今。如果按级配的双组分粒径比为 1/10～1/7，在保证细颗粒的最大粒径小于粗颗粒间的平均空隙条件下，填充颗粒与主颗粒质量比接近 1∶3 时，装药密度最大。国外某导弹战斗部，采用级配的黑索今，粗粒 200～500 μm，细粒 20～80 μm，以 3∶1 搭配，能得到黑索今含量达 73%的注装梯黑药柱。国外已定型的炸药，其主体炸药几乎都采用粒度级配的方式。实验研究也证实了按双组分的级配方法制得梯黑注装药柱，其中黑索今含量能高达 80.7%。

(4) 加入润滑性能好的表面活性剂。

(5) 注装过程中外加机械振动能使高含量的固相颗粒因振动而获得加速度或惯性力，提高了悬浮液的流动性。

以上是从流变性质方面采取的措施，利用黑索今颗粒的沉降，也可获得高固相含量。如用双组分级配的黑索今颗粒，置于 95 ℃左右的熔态 TNT 中，用铜网加压，让其充分沉降，去除多余的 TNT，药柱凝固后，切去上部分，下部即为高含量黑索今的注装药柱。某国外导弹的战斗部用此法注装，黑索今含量达到 73%以上。

还有离心法注装，是借用离心装置产生的离心力，使固液相分层，凝固后，进行药柱加工切除，亦能得到高固相含量的梯黑注装药柱。

对于这类高固相含量的梯黑黏稠悬浮液，其中气泡不易排除，有效办法是对悬浮炸药采用真空振动处理。用加压注装的办法，将气泡体积收缩到极小，亦可消除气孔，提高装药密度。

12.1.9 块注法装药

所谓块注法，是将熔态 TNT 炸药或梯黑类型的悬浮炸药浇注成药板，再加工成一定尺寸的药块，然后按装药工艺规程将药块加入到液态的炸药中。航弹、水雷、鱼雷、大口径火箭战斗部等大型弹药几乎都采用块注法装药。

块注法和注装法有明显的区别。注装过程中的炸药凝固潜热及冷却热，只能通过弹壁和装药口部传出，凝固过程是由表及里逐层进行，因而易产生集中缩孔和粗结晶，由于炸药是热的不良导体，还要考虑中心与边部温差不易过大，故凝固时间很长。

在块注过程中，由于加入部分药块，吸收了液态炸药的一部分热量，使弹壁传走的热量减小，凝固时间可显著缩短，各处凝固几乎同时进行，打破了由表及里的逐层顺序，没有集中缩孔和粗结晶。但是块装中部分熔态炸药凝固的收缩量不能像注装那样得到补缩，在药柱中形成了分散的小缩孔或疏松组织。且固态药块和熔态炸药的温差较大，产生局部的热应力，使二者之间结合不牢，实际上相当于注装中的“硬皮”疵病。因此块装药柱强

度低、结构不均匀、装药密度较低。表 12-5 列出了块装密度与普通注装密度的区别。

表 12-5　块装与普通注装的密度比较　g/cm³

装药方法 / 密度 / 炸药	块装法	普通注装法
TNT	1.53～1.55	1.58～1.60
梯/黑(40/60)	1.64～1.67	1.67～1.70

由于块装法生产周期短、操作简单、药柱质量受自然及人为的影响小，因此广泛应用于发射应力小的大型弹药装药，但由于强度低且不均匀，不能用于装填炮弹。

12.1.10　注装生产中常见的药柱疵病及预防措施

注药生产中出现的疵病主要是裂纹、气孔、粗结晶、空隙和缩孔。这些疵病会影响产品质量和安全使用。

1. 裂纹

注药后经过拔冲发现药面有细裂纹，是由于拔冲以后药柱温度与室温温差太大，并有冷空气吹入的原因造成的。当控制室温不低于 20 ℃时，拔冲后应立即用棉被盖住保温 1 h，拔冲时不要采用剧烈振动等措施以尽可能减少药面裂纹。

注药弹体送入装配工房检查时，发现有的裂纹是搬运过程中经过剧烈撞击或弹体拿出箱后冷空气吹入所造成的。因此在弹药的搬运过程中要轻拿轻放，严禁撞击。

2. 气孔

熔态混合炸药在搅拌时，如果搅拌过急，注药速度太快，会卷入气体。当药液凝固时，气体不能逸出而形成气孔。

生产中发现有直径 10 mm 的大气孔，是因为黑索今颗粒度太小，混合药液太黏稠，气体不易逸出所造成的。药柱内因发现大面积直径小于 1 mm 的密集小气孔而报废许多产品，原因是有的 TNT 加入黑索今后，炸药颗粒间气体冒出而形成一层气沫，气沫搅进药液里注入弹体形成密集气孔。若在搅拌锅中把气沫撤走就消除了密集气孔。

3. 粗结晶

粗结晶一般易在引信室底部出现，轻者颜色发红，严重者呈针状或树枝状结构形状。原因是护理不当或成型冲温度过高而造成的。

4. 空隙

炸药的膨胀系数比弹壁金属的膨胀系数大得多。因此，当炸药完全冷却后，由于炸药收缩量大以致在药柱底部产生空隙，空隙不容易完全避免。此空隙影响破甲威力，也能够引起膛炸。弹体预热有助于消除这种疵病。

5. 缩孔

生产中产生大缩孔情况很少。但是当冒口药补充不充足时，或者成型冲温度过低，冷却时自然通风开得过大，会使冒口药口部冷却太快而堵塞补充炸药通道，而在引信室底部中心处产生很细的线型缩孔。消除的办法是用铜刀在引信室底部中心处扎 5 mm 深的孔，可发现线型缩孔，然后用药液修补以消除缩孔的疵病。

12.2 压 装 法

12.2.1 概述

用压装法装药，就是把颗粒状的松散炸药倒入模具或弹体，在压机上通过冲头加压成为一定形状和一定强度的药柱。图 12.17 为压制传爆药柱的示意图。

压装法是很古老的装药方法，迄今为止，压装法仍然是一种广泛应用的装药方法，因为它有两个突出的优点：

(1) 压装法使用的炸药很广，且生产周期短。

压装法与注装法不同，它不必使炸药熔化，只要炸药具有一定的钝感条件、一定的可压性都可以应用于压装，因此采用的炸药较广。尤其对一些熔点高于 130 ℃以上，具有高威力、高爆速的炸药，如黑索今、太安和奥克托今等，普通注装时其含量最多不能超过 60%，否则浇注十分困难，所以这些高威力炸药的应用受到了限制。可是经过钝感处理后就可用于压装，含量可达 95%以上。

(2) 压装药柱的爆轰感度比注装药柱的爆轰感度大。

压装药柱比注装药柱具有较高的爆轰感度，这是由于两种方法药柱成型机理不同所致，压装法压制的药柱是在外力作用下将松散颗粒状炸药压制成型，其内部和外表面有很多微小空隙，爆轰波作用时很容易产生热点而发展成为爆轰。所有传爆药柱都采用压装法装药，小口径弹药也用压装法装药，为的是使弹药能适时、可靠地发挥作用。

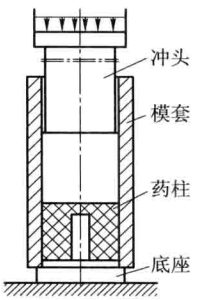


图 12.17 压制传爆药柱示意图

但是压装法也有一定的局限性，如形状复杂、药室有突起部分的弹体就不能用压装法；大口径弹药的药柱太大，考虑到压药时的危险性较大也不宜采用压装法，必要时可以分块压装然后再进行拼接。

用压装法装填的弹药品种很多，从很小的雷管、火帽、延期药饼到中小口径榴弹、穿甲弹、聚能破甲弹以及各种弹药的传爆药柱等。从压装法的应用可看出，它是一种不可缺少的重要的装药方法。

12.2.2　松装炸药的压紧与变形

压装法使用的炸药为松装炸药。

松装炸药又称为散粒体，它既不同于实体又不同于胶体。从粒度来说它是介于实体和胶体之间的一种物质。为了正确理解压装法的实质和压装药柱的结构特点，需要对松装炸药的物理性质及压紧过程有一定了解。

1. 松装炸药的两个主要性质

(1) 松装炸药中的各个颗粒具有相当的独立性。在胶体中，组成胶体的颗粒之间是互相独立存在的，它们可以自由运动而不牵连相邻的颗粒。在实体中则相反，组成它的粒子在空间按照一定的规律排列，个别粒子的运动一定要牵连到相邻的粒子。但在松装炸药这类散粒体中，颗粒间虽接触但联系微弱，各颗粒都具有相当的独立性，颗粒的运动或变形对邻近颗粒的影响不大。没有经过加压的散粒体，其接触面通常只是整个颗粒表面面积中的小部分，当散粒体受压时仅在颗粒接触的极小部分处传递应力。

(2) 炸药的松装密度。松装密度又称为假密度或自由装填密度。在大气压及不振动条件下，单位体积散粒体的质量称为松装密度。

松装密度是散粒体的重要标志之一，因为散粒体的颗粒尺寸、各种尺寸颗粒数量的比例、颗粒形状、表面状况等因素均对松装密度的大小有影响。

表 12-6 是不同颗粒尺寸的 TNT 的松装密度值。一般颗粒大的松装密度大，因为颗粒直径增加 10 倍时其重量增加 1 000 倍，大颗粒组成的散粒体的单个孔隙体积较大，孔隙数较少，而小颗粒组成的散粒体单个孔隙体积较小，孔隙数较多。两种因素的作用结果使小颗粒组成的孔隙数多，孔隙总体积大，所以松装密度小。将大小不同的颗粒混合搭配可以明显地增加松装密度，因为小颗粒会填充到大颗粒组成的孔隙中。

表 12-6　不同颗粒尺寸的 TNT 的松装密度

筛号(英制)	+20	−20+40	−40+60	−60+90	−80+100	−100+120	−120
松装密度/($g \cdot cm^{-3}$)	0.810	0.853	0.776	0.680	0.627	0.567	0.458
说明：−20+40 表示颗粒通过 20 号筛、留在 40 号筛上，其余类推。							

散粒体中颗粒的形状也对松装密度有影响。形状为树枝状、针状、片状颗粒的散粒体的松装密度就比等轴形状(球形、长方形)颗粒组成的散粒体的松装密度要小，因为前者形状的颗粒之间彼此容易相互搭接。

颗粒表面粗糙度也影响松装密度，愈不光滑其松装密度就愈小。

炸药的松装密度与压药的工艺以及药柱质量有很大的关系。松装密度大，表示散粒体颗粒内摩擦小、流散性好，用同样的压力可得到密度较高、质量较均匀的药柱。

炸药的松装密度还是设计模具、装药容器等的必要数据。

2. 松装炸药的压紧和变形

当加压于松装炸药时，从宏观来看：开始阶段松装炸药的压紧变形是靠颗粒的相互滑动、彼此间的空隙体积不断减小来实现的；随着压力的增加，继续依靠颗粒滑动来压紧会愈加困难，因此，在压力较高的阶段主要依靠颗粒的变形来压紧。

压装药柱的形成过程，即压力和密度随时间的变化情形如图 12.18 所示。

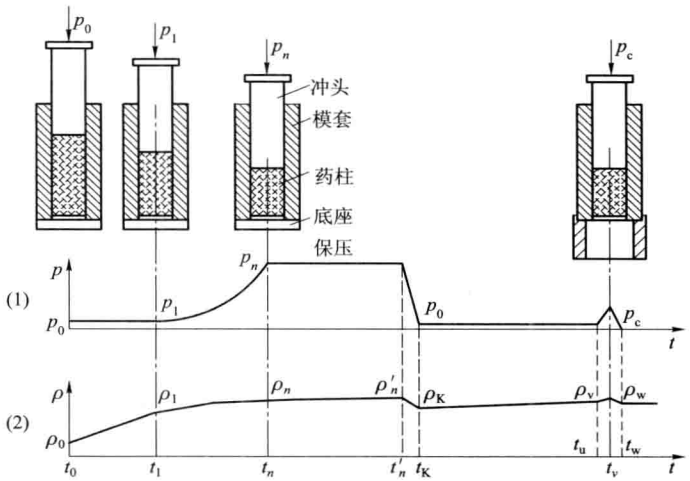


图 12.18 松装炸药的压紧过程

(1)压力 P 随时间 t 的变化关系；(2)密度 ρ 随时间 t 的变化关系

图 12.18 表明，将松装炸药倒入模套、放上冲头，在不考虑炸药自重的时候，作用在炸药上的轴向压力就是冲头的质量 p_0，此时对应的密度为 ρ_0。将整个模套放在压机上加压，设压机对于冲头作用的开始时刻为 t_0。在 t_0 到 t_1 时，作用在冲头上的轴向压力由 p_0 逐渐增加到 p_1，此时冲头逐渐伸入模套，炸药的密度由 ρ_0 增到 ρ_1。到 t_n 时刻，冲头上的轴向压力增至 p_n，冲头进一步伸入模套中，密度继续增加到 ρ_n，到 t'_n时刻为增至最高压力后的保压阶段(实际生产中仅几秒)，这段时间压力虽保持不变，但密度还继续在缓慢增加至 ρ'_n。

压药完毕，即由 t'_n至 t_K 阶段时，压力由 p_n 降至原来的 p_0。由于卸载的原因，药柱因弹性膨胀变形，密度会稍微有些下降，由 ρ'_n降至 ρ_K。

药柱退模，由 t_K 到 t_v，此时将底座去掉换上退模套。t_v 到 t_w 时刻为退模加压阶段，轴向压力由 p_0 增至 p_c(p_c 为最大退模力)，密度由 ρ_K 会略微增加到 ρ_v。t_v 到 t_w 时刻为退模卸载阶段，药柱的轴向压力由 p_c 下降到零，密度由 ρ_v 稍降至 ρ_w。

从理论上看，从保压完了的 t'_n时刻至药柱最后退出模具的 t_w 时刻，药柱的轴向压力由压药的最高压力 p_n 降至初始压力 p_0，又因退模加载升至 p_c，最后药柱退出模具时降为零。轴向压力几经变化引起药柱的弹性变形从而引起药柱密度的变化。原则上讲，保压结束时，药柱密度 ρ'_n达到最大值，退模加载时的药柱密度 ρ_v 次之，保压后卸去压药时的最

大压力并降至 p_0 时的密度 ρ_K 为第三，药柱退出模套后压力降为零时的密度 ρ_w 为最小。如果不作精确分析，上述 4 种情况下密度可近似为相同。

散粒体炸药的压紧和变形，主要是由于孔隙的减小而产生的，一般松装状态的炸药加压至数千大气压时，孔隙缩小约 10 倍，密度增加约 1 倍。

当散粒体炸药受压变形时，从微观角度来看其中颗粒的变化情形：有些颗粒互相接近，形成新的接触面，使总接触面增加；有的颗粒位移伴随着接触面的位移；有的颗粒翻转。

散粒体炸药中的颗粒之间的接触面并非位于一个平面上，而是与应力的方向成各种角度，接触面是曲折断续的，与实体的受力横截面不同，如图 12.19 所示。散粒体仅在颗粒间间断的截面上传递作用力。总的接触面以 $H'—H'$ 表示。散粒体在受到较高压力阶段时主要依靠颗粒的变形来压紧，颗粒首先产生的是弹性变形。在接触面上，单位面积上所受的压力超过临界应力时颗粒开始发生塑性变形。此外，有的颗粒还存在脆性变形。所以总结起来看，散粒体炸药受压时各个颗粒的变形不仅性质上不同，变形的大小和方向也不同。

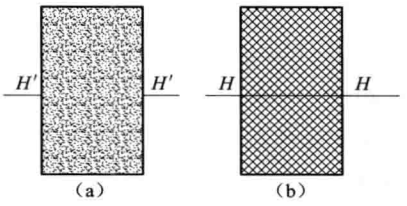


图 12.19　散粒体与实体的承受压力截面

(a)散粒体；(b)实体

实际应用研究中，是从宏观统计的角度来研究由无数颗粒组成的散粒体系统的平均运动和变形，或研究此系统总的物理的或机械的特性及规律；从微观的角度来了解散粒体受压时各颗粒的可能行为，更有助于对压件结构性质的深入了解，有助于对压件性能的改进。

3. 松装炸药压紧后的强度

散粒体的松装炸药压制药柱后与原来的松散炸药相比，密度大约增加一倍，强度由零增加到一定值(如药柱的抗压强度大约为几十兆帕)。

对于同一种炸药而言，强度与密度的关系常常是一致的。药柱的密度越大，说明压得越密实，因此强度也就越大。

压件之所以具有一定强度，是因为散粒体的松装炸药受压时，随着压应力的增加，使颗粒滑动位移、弹塑性变形、脆性变形，减小了它们彼此之间的间隙。与此同时，增加了彼此之间的接触面，增加了颗粒之间的机械啮合力。由于接触面的增大，有相当一部分分子，接近到足以产生分子引力的距离，这种引力是很大的(例如，玻璃的光学平面合上后，要用 4.5 MPa 的力才能将它们分开)。

机械的啮合力和分子引力是构成散粒体压件强度的根本因素。由于它们都是在颗粒接触面上发生，故一切增加颗粒接触面使之压紧的措施都有利于压件强度的提高。如炸药配方中加入高分子物质作黏合剂以增加分子间的作用力；加入增塑剂提高炸药的塑性等。在压药工艺中增加炸药的成型压力，适当提高炸药的成型温度，采取保压措施等均有利于药柱密度和强度的提高。

12.2.3 压力、温度与压药密度的关系

近来一些学者通过大量的研究，提出了描述炸药成型压力与密度关系的指数方程。

$$\rho=1-a_1 e^{-b_1 p}-a_2 e^{-b_2 p} \tag{12.2.1}$$

式中 ρ——药柱密度；

a_1, b_1, a_2, b_2——与炸药的物理力学性质有关的系数；

p——成型压力。

利用JHL-2、RT-1、TNT、8701和A-IX-2等5种散粒体炸药的压制实验验证了方程的正确性。

在实际应用中，通常在确定的温度下做出一些常用炸药的压药密度随压力变化的曲线，或在压力不变的条件下做出密度随温度的变化曲线。根据这两种实验曲线可得到任一药柱密度所需的压药压力及药温数据。

对于不同炸药，压力与密度关系曲线是不相同的，温度与密度关系曲线也不相同。如果同一种炸药在相同的工艺条件下压制相同形式和同等质量的药柱，其平均密度基本上是一致的。以下分别介绍几种单质炸药、混合炸药的压力—密度、温度—密度的实验数据和曲线。

1. 压力与密度的关系

表12-7、表12-8为常用炸药的压力—密度数据。

表12-7 二种常用混合炸药的压力—密度数据

压药压力/MPa	药柱密度/(g·cm^{-3})	
	A-Ⅸ-1	8701
0	0.883 9	0.830 2
29	1.547 1	1.529 2
49	1.596 4	1.594 4
69	1.625 4	1.634 7
88	1.642 8	1.658 9
108	1.655 0	1.675 0
127	1.665 9	1.687 1
147	1.672 4	1.698 1
167	1.674 7	1.707 1
196	1.681 0	1.715 1
226	1.683 2	1.723 0
255	1.685 4	1.727 7
284	1.685 8	1.728 8
314	1.687 5	1.730 0

表 12-8　常用单质炸药的压力—密度数据

压药压力/MPa	药柱密度/(g·cm^{-3})	
	TNT	特屈儿
0	0.67	0.590
25	1.362	—
49	1.466	1.430
74	1.506	—
78	—	—
98	1.531	1.530
123	1.555	—
147	1.567	1.590
172	1.579	—
196	1.587	1.630
226	1.594	—
245	1.599	1.650
270	1.601	—
294	—	1.670
392	1.607	1.700
490	1.609	1.710
588	—	1.710
686	—	1.710

将上述 4 种炸药绘出压力—密度曲线，如图 12.20 所示。

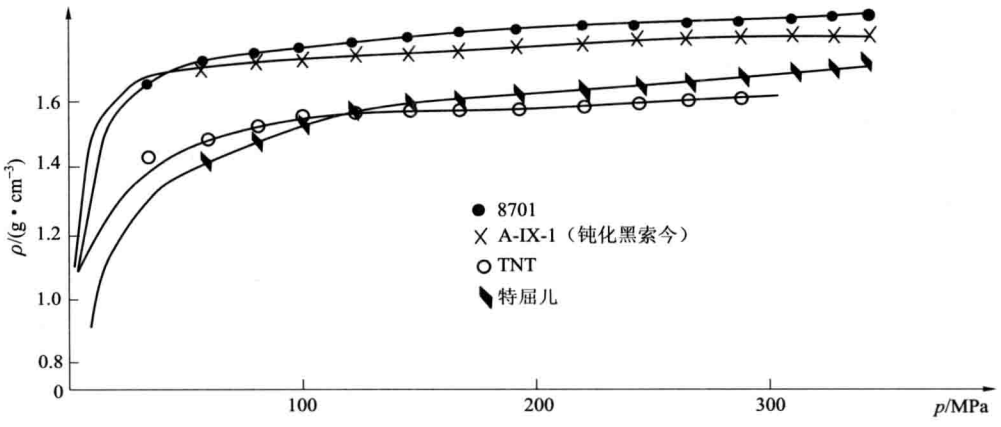


图 12.20　几种常用炸药的压力—密度曲线

图 12.20 显示了 4 种不同炸药的压力—密度曲线，其共同点是药柱密度随压力增大而增大。在较低压力阶段，药柱密度随压力增加而上升较快，说明散粒体炸药的压紧与变形主要是靠颗粒滑动，减小彼此间的空隙来实现；在压力较高阶段，主要靠颗粒弹塑性变形来压紧，因此密度的增大愈加缓慢。但每一种炸药又有各自的压制特性，其不同点在于：

(1) 每条压力—密度曲线有不同的起点，这是由于每种炸药有不同的松装密度。

(2) 在相同的压药压力下，每条曲线对应的密度值不同，有不同的斜率和曲率。随着压力的增加，各条曲线趋向各自的最大压药密度。

(3) 各条曲线的最小曲率半径也不相同。最小曲率半径越小，表示越容易趋向最大密度，也就是达到最大密度所需的压力越小。通常，这种趋向最大密度的难易程度称为炸药的“可压性”。在较小压力下容易达到最大密度的炸药，它的可压性就好。通过压力—密度曲线可以比较各种炸药的可压性。

(4) 对于每一种炸药，在确定的压药温度条件下，按不同的密度要求可以选择合适的压药压力。

由各条曲线可知，压药压力大于 200 MPa 时密度增加很小，所以压药压力超过此值在生产中已没有多大实际意义，况且压力过大对压机吨位和模具强度、刚度要求更高，而且生产中易发生危险，故通常压药压力一般控制在 160 MPa 左右。

研究压装用的混合炸药配方时必须考虑炸药可压性的要求。如 8321 炸药加入了 4 号炸药作增塑剂，在压药力为 147 MPa 时能使药柱密度达到理论密度的 95.4%，此时的压装密度为松装密度的 2.1 倍。8701 混合炸药用二硝基甲苯作增塑剂，在 196 MPa 压力下达到理论密度的 97%。

混合炸药的理论密度 ρ_T 按下式计算：

$$\rho_T = x_1\rho_1 + x_2\rho_2 + \cdots + x_n\rho_n \tag{12.2.2}$$

式中 $x_1, x_2, \cdots, x_n$——为混合炸药中各组分所占的质量份数；

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$——为混合炸药中各组分的密度。

2. 压药温度与密度的关系

在常温下，单纯地增加压力固然可使压药密度增加，但仍有一限度。如果适当提高压药温度可以更有效地增加密度。

表 12-9 是压药压力为 35.3 MPa 时用 TNT 压成直径和高度均为 22 mm 药柱时的密度和温度的关系。

表 12-9 炸药温度与密度的对应值

炸药温度/℃	药柱密度/($g \cdot cm^{-3}$)
15～20	1.502
40～45	1.520
60～65	1.530
70～75	1.545

表 12-10 为 H1F(黑索今/1 号炸药/氟橡胶)混合炸药在 78 MPa 和 147 MPa 压力下压制直径为 10 mm,药量为 2.1 g 药柱时密度随药温变化的数据。将表 12-10 的数据作图,如图 12.21 所示。

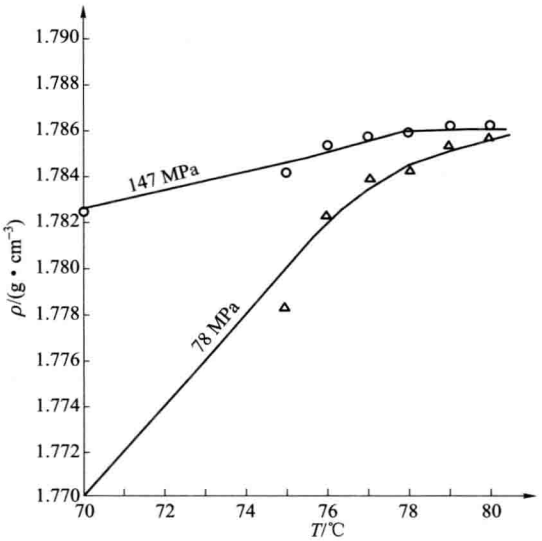


图 12.21　H1F 的温度—密度曲线

表 12-10　H1F 炸药的温度—密度数据

炸药温度/℃		70	75	76	77	78	79	80
密度/($g \cdot cm^{-3}$)	78 MPa	1.770 2	1.778 6	1.782 7	1.784 5	1.785 0	1.781 0	1.786 8
	147 MPa	1.782 5	1.784 8	1.785 7	1.786 4	1.786 6	1.787 1	1.787 3

H1F 混合炸药的理论密度为 1.812 g/cm^3。当温度为 77 ℃、压力为 147 MPa 时,药柱密度为 1.794 g/cm^3,它是理论密度的 99%。

提高压药时的温度之所以能使药柱密度增加是由于炸药加热降低了炸药本身的机械强度,易使炸药塑性变形,还由于温度增加使炸药颗粒表面低熔点液态混合物增多,它们起着润滑作用,有利于压缩。

此外,提高药温还有利于药柱密度的均匀,能得到更好的药柱强度,药柱也不易产生裂缝。

12.2.4　药柱的局部密度

1. 药柱中轴向密度与径向密度的分布

上节所讨论的药柱密度是指药柱在较小尺寸下的平均密度,如果将药柱的高度和直

径都加大，药柱的密度沿高度、径向都有明显的变化。

现在看一个单向压药时的药柱，密度沿药柱高度变化的情形如图 12.22 所示。药柱端与冲头相邻间隙为零，另一端面与底座相邻。从图中看出，靠近冲头端面处药柱的密度大，远离冲头的另一端面处密度小。表 12-11 是 TNT 炸药以 98 MPa 的压力压成直径为 23.5 mm 的长药柱时所得出的密度数据。从表中数据可看出，在不保压时，药柱的上下密度差为 0.032 g/cm³。

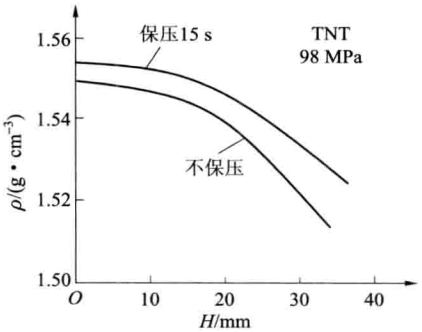


图 12.22 药柱轴向密度沿药柱高度的变化

表 12-11 密度沿轴向的分布

离冲头距离/mm		5	15	25	35
密度/(g·cm⁻³)	保压 15 s	1.555	1.552	1.543	—
	不保压	1.551	1.548	1.548	1.519

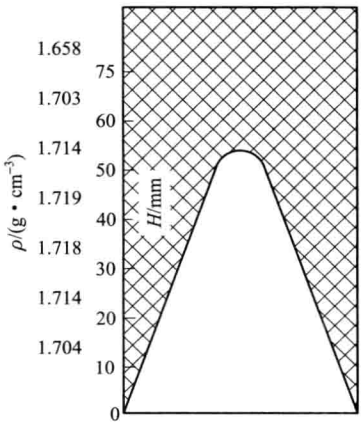


图 12.23 聚能装药轴向密度 ρ 随药柱高度 H 的分布

聚能装药药柱沿轴向位置测得的局部密度如图 12.23 所示。药形罩一端与冲头相邻，靠罩端密度较高，与副药柱相接的另一端密度较低。锥底部分密度也较低是由于该处太窄，炸药颗粒不易流入其中的缘故。

如果用双向压药（上下冲头都运动）时，靠近冲头两端密度高，中心低。从 85 mm 高射榴弹中的 TNT 药柱看，其直径为 47 mm，双向压药密度沿高度分布数据列于表 12-12。

关于密度沿径向的分布，单向压制药柱不仅沿上下加压方向密度不均匀，就是在同一横断面上径向密度也不均匀。靠近冲头一端的密度是边缘部分密度大于中间部分密度；在药柱另一端处密度则相反，中心处的密度大于边缘部分的密度，如图 12.24 所示。但径向密度差比轴向密度差要小得多（约小一个数量级）。

表 12-12 TNT 双向压药药柱的密度分布

距上冲头距离/mm	0～15	15～30	42～53	65～80	80～95
密度/(g·cm⁻³)	1.56	1.55	1.53	1.55	1.57

上述实例证明，压装药柱的密度是不均匀的。随着药柱尺寸的增大不均匀性更显著，这对精密装药和爆轰性能要求高的装药来说是必须考虑的问题。造成密度分布不均匀的根本原因是由于散粒体压紧时各局部的压力不相同。所以认识和解决密度分布的问题，主要是分析压药时的压力分布情况。

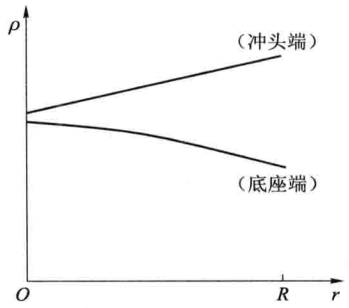


图 12.24　药柱密度 ρ 沿径向 r 的分布图

2. 压药时压应力沿轴向的分布

假设：

(1) 对散粒体的松装炸药的压紧与变形运动，可近似地视为连续介质。

(2) 各向应力(轴向、径向、切向)与径向位置无关；每个横截面上的压应力处处相等。由图 12.25 作近似推演，可得出轴向压应力与相关因素之间的关系。

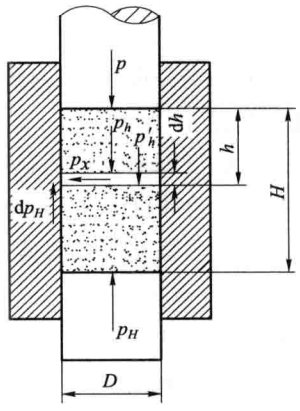


图 12.25　压药时炸药的受力模型

模具内离冲头端面 h 处的炸药受压时，微元 dh 高度的环形侧面上对模壁的径向压力为：

$$dp_x = p_x \cdot \pi D dh \tag{12.2.3}$$

而

$$p_x = \eta p_h \tag{12.2.4}$$

式中　η——侧压力系数，$\eta = \frac{\mu}{1-\mu}$，μ 为泊松比。

将式(12.2.4)代入式(12.2.3)得：

$$dp_x = \eta p_h \cdot \pi D dh \tag{12.2.5}$$

该处炸药与模壁之间的摩擦力 F 为：

$$F = f dp_x \tag{12.2.6}$$

式中　f——炸药与模壁的摩擦系数。

摩擦力与模壁平行，方向与轴向压力相反。其大小相当于轴向压力 p_h 经过 dh 一段后的压力降 dp_h，因此可写为：

$$dp_h = -f dp_x \tag{12.2.7}$$

或

$$dp_h = -f\eta p_h \cdot \pi D dh \tag{12.2.8}$$

又

$$dp_h = \frac{\pi}{4} D^2 dp_h \tag{12.2.9}$$

将式(12.2.9)代入到式(12.2.8)中整理后得：

$$\frac{dp_h}{p_h} = -\frac{4f\eta}{D} dh \tag{12.2.10}$$

由冲头端面到 h 处这一段炸药的轴向压力降，用积分表示为：

$$\int_p^{p_h} \frac{dp_h}{p_h} = -\frac{4f\eta}{D}\int_0^h dh$$

得
$$\ln\frac{p_h}{p}=-\frac{4f\eta}{D}(h-0)$$
或
$$p_h=p\cdot e^{-\frac{4f\eta}{D}h} \tag{12.2.11}$$

式(12.2.11)表明了压药时轴向压应力沿装药高度的分布规律。该方程基本概括了影响轴向压力下降的各种因素。式(12.2.11)说明了以下几点：

(1) 靠近冲头处的压药压力最大，离冲头越远压力越小。所以单向压药的药柱，靠近底座的药柱结构比冲头处的药柱结构疏松。

(2) 药柱的长径比 h/D 过大，密度不均匀性增加。

(3) 炸药与模壁的摩擦系数 f 越大，压力分布越大，药柱密度不均匀性亦增大。

在实际压装生产中，为了得到密度均匀和平均密度大的药柱，通常采取以下措施以获得良好的效果。

(1) 采用双向压药工艺(两端冲头同时向中心压药)。

(2) 采用分段压药，每段药柱的长径比 h/D 不大于 2，然后将各段药柱按照规定的要求进行黏结。

(3) 降低模套内壁的粗糙度，压药时注意清洁模具并涂润滑剂(如石蜡等)。

(4) 改善散粒体炸药的流散性，炸药颗粒不宜过细；提高炸药的可塑性(从配方中解决)。

(5) 适当提高压药温度。

3. 对径向密度的分析

径向应力沿径向的分布，可按应力平衡方程及一维应变的条件写出微分方程，通过给定的平衡条件和边界条件，求得微分方程的近似解；也可以找出径向应力在某一高度截面上沿径向的分布，但这种表达式包括了一些特殊的假设条件，并不理想且推导复杂，在此不作详细的讨论。

如果只简单分析径向密度变化的原因，可认为在压药过程中，同一截面上的炸药颗粒在加压方向上的移动是不一致的。冲头受力向下运动时，横截面上的炸药颗粒随冲头一起向下运动。在中心处颗粒向下运动所受的阻力小，边部的颗粒与模壁发生摩擦向下运动时受的阻力较大。因此药柱靠近冲头附近这一段边部密度大于中心处的密度。但靠近底座附近一段的情形却相反，这是因为压力在传递过程中，与侧壁摩擦力的消耗，随着距离的增加压力逐渐降低，受到较小压力的作用，所以边部密度小。中心部分炸药颗粒向下运动仅受到底座的阻碍，与边部相比，炸药承受着较大的压力作用，因而中心处的密度大于边部的密度。

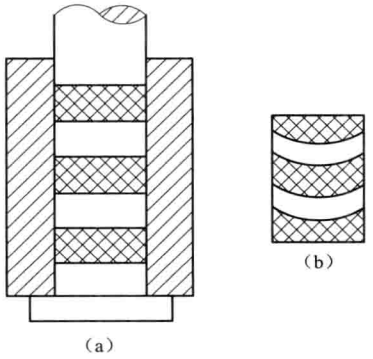


图 12.26 压件纵剖面图

(a)加压前；(b)加压后

有人曾将染有不同颜色的 TNT 仔细地一层一层装入模具中，加压压成药柱后沿纵面剖开，情形如图 12.26 所示。

从图 12.26 看出，各层的分界线向下凹了，实验结果证实了上述的分析。从数值来看，药柱的径向密度差比轴向密度差小得多，影响不大，除了特殊的精密装药要求外，一般情况下可以不考虑。

12.2.5　压药时的保压问题与药柱“长大”现象

生产和实验证明：在压制药柱过程中，当压力达到规定的数值时，若保压一段时间则药柱密度会因加载时间增加而增大。表 12-11 给出了用内径为 23.5 mm 的模具以 98 MPa 的压力压制 TNT 药柱时，保压与不保压情况下的药柱密度，保压后的密度比不保压的要大。实质上这是一种蠕滑现象。在塑性力学中，把固体在不变应力作用下发生缓慢变形的现象称为蠕滑（或称蠕变、徐滑）。蠕滑现象到目前为止还没有较完整的理论，但有一种弹塑性—黏性模型可供参考。

讨论药柱在保压下的蠕滑现象时，可将它看成是由两种类型的物质构成的，即一种是较硬的（弹塑性）固体物质作骨架，另一种是填充其间的流体状物质（半液态、液态或气态）所组成，因此蠕滑不仅与应变 ε 有关，而且与应变率 $\left(\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t}\text{或}\dot{\varepsilon}\right)$ 也有关。对于这种弹塑性—黏性物质的炸药来说，其弹塑性变形过程总是伴随着固体颗粒之间毛细缝隙小的半流体、流体或气体的流动。这种毛细缝隙中的黏性流动十分缓慢，因此从整体变形来看，就出现了所谓不变应力作用下的蠕滑现象。因而在压制药柱时有一段保压时间可使药柱密度增大。

曾经对一种可压性较差的 H1F（黑索今/1 号炸药/氟橡胶）炸药作过蠕滑实验，即求得药柱上界面位移 ΔZ 随保压时间 Δt 的变化曲线。实验时药温 27.6 ℃，压药压力 196 MPa，药柱高 15.7 cm，直径 80 mm，实验数据如表 12-13 所示。表中 Δt 为保压时间，开始时取 Δt 为 0，ΔZ 为模具中药柱上界面轴向位移绝对值，当 Δt 为 0 时，ΔZ 为 0，将表中的数据绘制成曲线，如图 12.27 所示。曲线表明，保压时间增到一定程度后，药柱的轴向位移不再增加。将实验的数据进行处理，可得到 ΔZ 与 Δt 的半经验公式：

表 12-13　不同保压时间与药柱轴向位移的关系

Δt/min	0	1	3	5	8	11	14	16
ΔZ/mm	0	0.023	0.121	0.143	0.178	0.181	0.195	0.198
Δt/min	19	30	39	49	59	65	69	
ΔZ/mm	0.207	0.229	0.232	0.240	0.246	0.251	0.251	

$$\Delta Z = 0.274\,\frac{\Delta t}{5.7+\Delta t} \tag{12.2.12}$$

式中的系数 0.274 与 5.7 由实验值确定。

药柱的蠕滑现象不仅在压药过程中的保压阶段可以观察到，而且在退模之后或储存

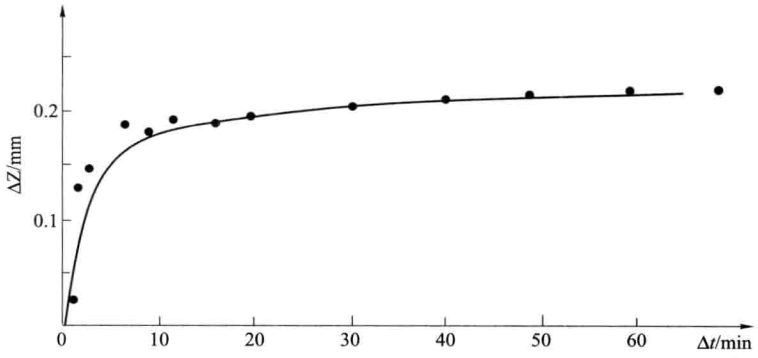


图 12.27 药柱轴向位移 ΔZ 与保压时间 Δt 的关系

期间也会出现蠕滑现象(生产中称为药柱长大现象)。常温时蠕滑应变率较小,温度高时则增大。如 HBJ 混合炸药药柱在 55 ℃发生明显的蠕滑,如图 12.28 所示。AA 段的蠕滑应变率为 1.5×10^{-6}/min。实验还证明,TNT 药柱超过 30 ℃就发生明显的蠕滑现象。如果在炸药成分中含有低熔点(50 ℃～80 ℃)的物质或常温下成塑态的物质,在 40 ℃～55 ℃高温实验中,即易观察到蠕滑现象。生产实践也大量证明:药柱长大的速度与存放环境温度有关,低温时长大很少,温度升高时长大速度增快。例如曾观察 TNT 压装药柱在弹体中长大的情形:在冬季冷空气中储存数月,药柱并不长大;可是到夏季时,药柱长大很快以致成为不合格的废品。蠕滑的应变 ε 与应变率 $\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\text{或}\dot{\varepsilon}\right)$ 说明药柱在长期储存中保持形状尺寸的能力,其值愈大,表示蠕滑愈严重,药柱几何尺寸的稳定性愈差。

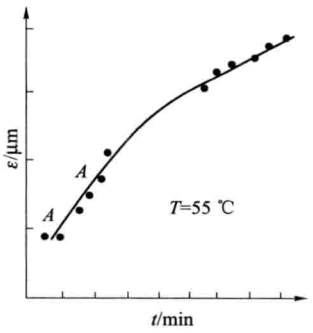


图 12.28 HBJ 炸药药柱空载下的蠕滑

12.2.6 压装工艺的安全技术

在压药时,炸药承受着数千大气压的静压力,而且冲头与模壁、炸药与模具彼此间存在着强烈的摩擦,夹在模具滑动部分间隙中的炸药受到很大的挤压力。在正常情况下,压药过程中短时间的局部应力升高产生的塑性变形功和界面附近的摩擦功不会使炸药爆炸,所以压爆事故是可以避免的。但几乎所有的炸药都曾发生过压爆事故,或是半爆或是全爆。机械感度(摩擦感度、冲击感度)和热感度高的炸药发生压爆事故的可能性更大。压爆事故的发生是由于机械作用所引起,属于机械起爆的问题,故可以用机械起爆的热点理论来研究和解释爆炸事故发生的原因。

热点理论指出:在机械作用下产生的热量来不及均匀分散到全部炸药上,而是集中在极小区域内(如棱角处),这种局部温度很高的极小区域称为热点。当热点的温度高达 300 ℃～600 ℃、区域范围达到 10^{-3}～10^{-5} cm、维持时间达到 10^{-7} s 时,爆炸反应首先在

个别热点处开始，然后扩展到整个炸药。

从宏观上看，热点形成的难易，除取决于炸药本身性质外，主要取决于作用在炸药局部区域的应力率或应变率（即应力随时间的变化率或应变随时间的变化率），应力率或应变率越大，热点越易形成，爆炸也就越容易发生。

压爆事故的发生，一般由以下因素而引起：

（1）炸药中混入了坚硬的杂质，如砂子、小石子、玻璃碴或金属屑等。压制过程中，此类坚硬的带有棱角的小颗粒如果不位于模套边部，由于与炸药相对位移较小、摩擦作用小，危险性也较小。当它们处于模套边界时，与模壁摩擦较强烈，局部压应力很大，在棱边尖角处能量容易集中，产生高温热点而导致爆炸。这些坚硬小颗粒还可能将冲头卡住，一旦被增长的压力冲垮时，不仅在卡壳处发生剧烈的摩擦，同时还造成猛烈的冲击，因此可能发生爆炸。

（2）模具的设计和制造对压药安全有很大的影响，主要是冲头与模套之间发生剧烈的塑性应变和摩擦（即所谓模具互啃）。根据统计，32 次爆炸事故中由于模具产生互啃现象而爆炸的就有 8 次，因此必须注意。模具互啃的原因可能有：冲头互换性不好而产生紧配合；模套淬火时内壁的硬度通常低于外壁，检验硬度均在模套外表面进行，因此内壁实际偏软，压药时冲头容易啃入模壁；模具长期使用，产生了划痕与毛刺；模具在压机上未放正或者压机偏心加压，使冲头易嵌入模壁。上述种种原因都容易造成模套与冲头的剧烈摩擦和塑性应变，从而导致炸药的爆炸。

（3）由于操作不当而使炸药过压可能引起爆炸。如：药量称量错误或者倒入双份药于模套中或者错用了长冲头，在压群模时使一个模具单独受压，如 85 高榴弹群模模具一次压 8 个药柱，若单个模具承受 1.1～2.2 GPa 的压力，就会发生爆炸。

（4）压药的加载速度太快也往往是爆炸事故增多的原因之一。因为加压速度过快时应力率变大，能量容易集中，热点较易形成，故爆炸的可能性大。勃立其曼曾做过很多实验证明了多种炸药如 TNT、特屈儿、苦味酸、硝基胍、黑索今和太安等，缓慢加压至 4.9 GPa 未发生爆炸；又对 TNT 继续加压实验，每增加 785 MPa 的压力，停几分钟后再增加 785 MPa 压力，等几分钟再升压，这样一直加到 7.5 GPa 的压力，并未爆炸，甚至压力增到 10 GPa 也不爆炸。但在生产中，不可能如此缓慢加压，而如果连续加压就炸了，可见加载速度的影响不可忽略。

（5）压装炸药的预热温度过高，也容易形成热点导致爆炸。炸药的机械感度随炸药的温度升高而增大。

（6）模具的清洁问题对引起爆炸事故也有影响。因为在药柱加压端，由于冲头和模套间有间隙，每次压药后在该处的模套壁上留有一层残药，在模套工作部分的拐角处、在部件的接缝处等残留炸药的部位，容易产生挤压和摩擦形成热点而引起爆炸。因此设计模具时一定要考虑周到，操作时要注意清洁工作。

（7）操作过程中模具的碰撞也可能引起爆炸事故。因为使用的压药模具均为淬火的

高硬度黑色金属，如果不注意，容易发生碰撞，很有可能与药粉或残药摩擦或冲击加载产生热点而引起爆炸。

从上述产生爆炸事故的原因分析可知压装药柱应特别注意的几个问题：

(1) 压药必须采用隔离操作。在压药室内进行工作时严禁有人入内，严禁将防爆门打开。只有将门关闭压机才能通电操作，这样可以保证万一发生爆炸事故产生的危害范围最小。

(2) 模具的设计与加工要合理。关键是冲头和模套的配合问题。

(3) 压药时，应当严禁超过规定的压力或严禁装入超过规定的药量。对于群模压药，为了避免单个模具过压，应从技术上设计专门装置，例如通过显示每个模具所受的压力，可以显示任一套模具的过载情况；又如每一个模具上都装有安全装置，当压力超过一定值时能自动卸压保证安全。

(4) 压药是危险操作，除了在技术上提供必要的安全措施外，还应尽量杜绝人为因素所引起的爆炸事故。例如，压药前应认真检查炸药中是否有杂质、模具是否有毛刺划痕、压机活塞移动是否平稳，压药的工作环境应有条理、清洁整齐，要及时清除撒在模具上、压机台上、工作台上的炸药，放入废药箱中。

从发展的观点来看，压药应尽量采用自动化操作以减少人为因素的影响。

整个压药工房属于爆炸危险工房性质，除压机应安置在符合安全规范的钢筋混凝土防爆小室内，房屋建筑、照明、采暖、电力设施等也均应按安全规范的规定执行。

12.3 螺旋装药法

12.3.1 概述

螺旋装药法就是在螺旋杆的转动下，靠螺旋的输送和挤压作用，把松散的炸药压实成具有一定强度和密度要求的药柱于弹体中的方法。图 12.29 是一种立式螺旋装药的示意图。其作用过程是：螺杆伸入弹体，螺杆头部距离弹底部约几毫米，螺杆转动时将炸药从漏斗中输入到弹体中。当药室已被炸药充满时炸药还继续往下输送，由于螺杆下端部炸药的堆积在不断增加，此时螺杆头部就产生了挤压作用，炸药密度在逐渐增加。当压力超过阻力 p(也称反压力)时，螺杆开始后退，空出来的容积被继续输送进来的炸药所充满，并被压紧。这样的过程一直继续到螺杆退出药室，一发弹也就装药完毕。弹体中装填的炸药具有一定的密度，弹体中药柱密度的大小取决于反压力的大小。

由此可见，由于螺杆的转动，一面送药一面压药，同时螺杆又逐渐后退，这三个过程几乎是同时进行的。它与压装法相比，同样是把散粒状的炸药用机械方法压紧成药柱。但不同的是，它把相当于压装法中的几个过程(称量好的炸药装入模具、放上冲头、压药和取出冲头等操作)连续化了。因此螺旋装药显著的优点是生产能力大、机械化程度高。由于螺杆挤压

炸药时对侧面的炸药也有一定的压紧作用，所以能应用于药室弧形不大的弹体。它的缺点是：螺杆转动时与炸药产生强烈的摩擦，因此不能应用于摩擦感度大的炸药。钝感的混合炸药因钝感膜容易被破坏，含有金属粉的炸药也容易损坏螺杆，故均不能应用螺旋装药。螺旋装药药柱结构与压装药柱结构不同，螺旋装药的药柱径向密度差大，药柱还有局部熔化现象，造成明显的分层，所以螺旋装药的药柱密度有较大的不均匀性。上述缺点使其应用受到一定的限制。

尽管如此，螺旋装药法从第一次世界大战期间问世以来，由于它能解决普通注装所不能解决的高固相含量硝胺炸药装药的问题，以及它能解决压装法不能解决的弧形药室装药问题，且生产效率高，宜于组织大量的流水线生产，所以至今仍然得到广泛的应用。

螺旋装药法主要用于装填 ϕ82 mm～ϕ160 mm 迫击炮弹、ϕ76.2 mm～ϕ152 mm 榴弹、100 kg 以下的航弹，应用的炸药有 TNT、梯萘及硝胺等散粒状的炸药。

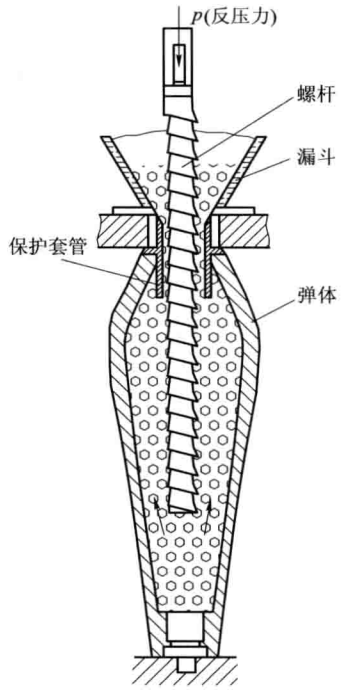


图 12.29　立式螺旋装药示意图

螺旋装药的药柱质量是生产中的关键问题之一，影响质量的诸因素为炸药本身的性质、螺杆、弹体形状、压药时的温度（药温、弹温及室温）和反压力等，以下分别进行论述。由于螺旋装药主要靠螺杆转动来完成，所以应当首先了解螺杆的作用原理。

12.3.2　螺杆的作用原理

1. 螺杆的构造

图 12.30 所示为一种典型螺杆，左边是螺杆的直观视图，中间及右边是螺杆的工作图。螺杆有以下一些主要特征尺寸：

D/d 称为相对直径，它表示螺杆输送炸药的能力。比值愈大，则一转中送入的炸药量就愈多，炸药装填就愈快。D 值越大，药柱的密度就越均匀。D 值的大小取决于弹口的直径，而螺杆颈部直径 d 值则取决于螺杆的深度。当螺杆相对直径一定时，送药速度随螺距的增大而增大，同时炸药的物理特性也影响送药量。

螺杆分输送段（或称送药段）和压药段两部分，在输送段与压药段之间还存在过渡段。

不同的螺杆适应不同弹种的需要。只有理解了螺杆对炸药的作用后才能正确地选择和设计螺杆。

2. 螺杆旋转时炸药的受力分析

(1) 炸药在输送段的受力。炸药在输送段的受力情形如图 12.31 所示。

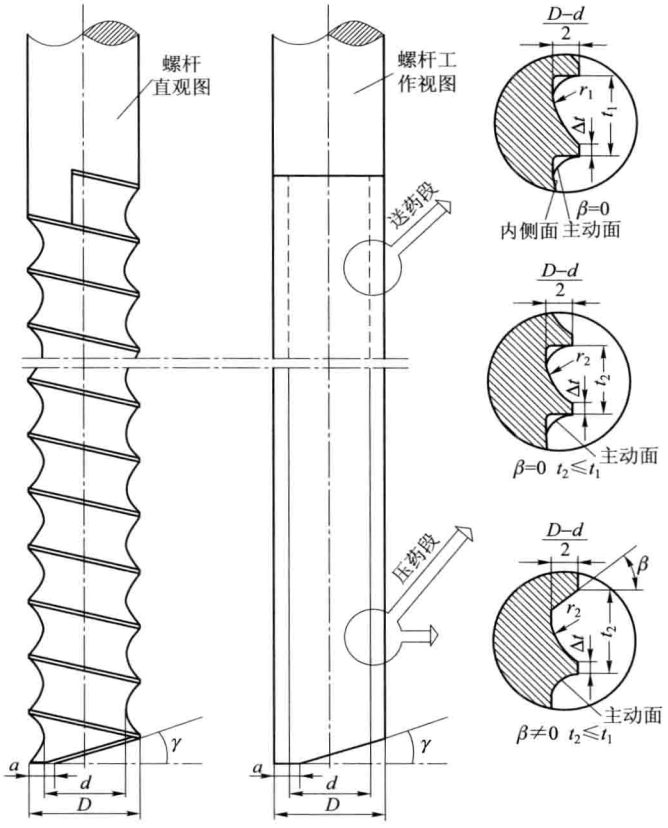


图 12.30 螺杆构造图

D——螺杆外径；d——螺杆内径；t_1，t_2——螺距；Δt——螺牙尖宽（齿厚）；a——剩余平面宽度；β——螺面角（螺面母线与螺杆横截面的夹角）；γ——端面角（螺杆端面与螺杆横截面的夹角）；r_1，r_2——齿形半径

图中，N——螺面施于炸药的压力，方向垂直于螺旋面；F_1——炸药与螺面之间的摩擦力，方向是炸药相对于螺面运动的相反方向，沿螺面的切线作用；F_2——炸药与螺颈之间的摩擦力，因为螺颈与螺面是一整体，所以 F_2 的方向与 F_1 的方向一致；F_3——炸药和炸药壁之间的摩擦力，方向与炸药运动方向相反；P——炸药本身的重力；C——离心力，由于炸药转动而产生，但炸药转动速度很小，故此力很小。

输送段螺杆仅起输送炸药的作用，所输送的炸药是一团散粒体。输送段炸药的受力情况如图 12.31 所示。在输送段时炸药并未被压紧，因为，第一，在输送段中每个螺距内体积是一定的；第二，螺杆外面形成炸药壁后继续输送的炸药既没有漏掉又没有另外补充，即炸药质量不变，所以密度是一个常数，说明炸药没有被压紧。

当炸药被输送到螺杆前端时被先送入的炸药所阻挡，炸药堆积得越来越多，容积也越来越小，而后面的炸药又源源不断地继续送来，当压力超过阻力（反压力）时，迫使螺杆后退，此时药柱被压紧。炸药在最后一扣螺距的螺面上被压成楔形药块。

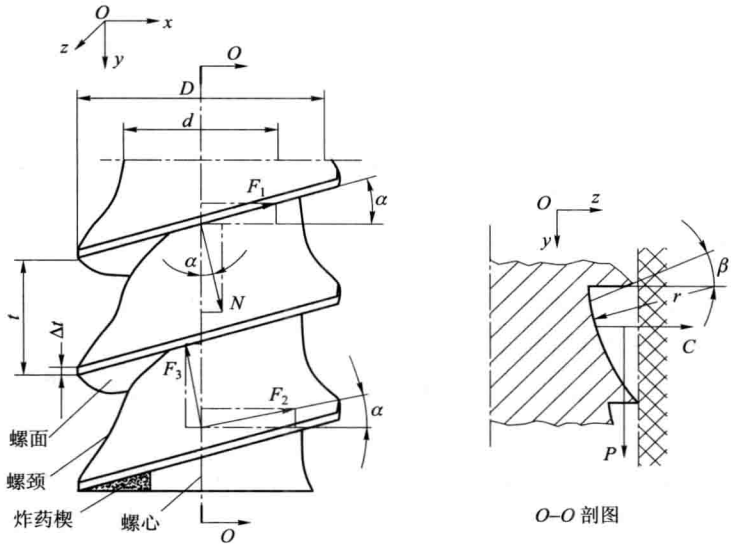


图 12.31　炸药在输送段的受力图解

(2) 楔形药块的受力分析。苏联的布杜金曾对炸药压成的楔形作过较详细的研究。现在来看螺杆最前端处一小段楔形药块所受的各种作用力，如图 12.32。

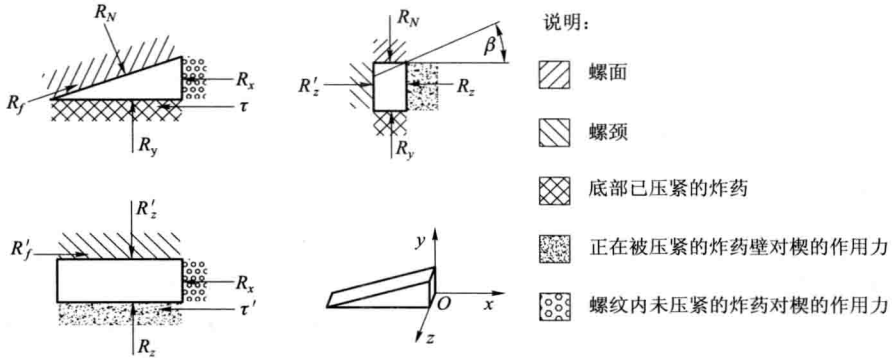


图 12.32　楔形药块的受力图解

图 12.32 中，R_N 是螺面作用于炸药上的压力，方向垂直于螺面；R_y 是螺杆底部已压紧的炸药对螺面楔形炸药的反作用力，方向沿轴向向上，根据布杜金的研究，R_y 可用下式表示：

$$R_y=\frac{a\rho-b}{c-\rho} \tag{12.3.1}$$

式中　ρ——炸药密度；

a，b——与炸药温度有关的系数，温度是指 R_y 作用处的局部温度。对于 TNT，a，b 的数值如表 12-14 所示；

c——炸药的极限密度，对 TNT 而言，$c=1.67\ g/cm^3$。

表 12-14 a，b 系数随温度的变化

温度/℃	20	50	60	68
a	150	135	120	103
b	127	115	102	88

图 12.32 中，R'_z是螺颈对楔的作用力；R_z 是正被压紧的炸药壁对楔的作用力；R_x 是螺纹内待压紧的炸药对楔的作用力。

由于螺面压力 R_N 作用的结果，使 R_x，R_y，R_z，R'_z同时产生，将炸药压紧。R_z 亦可由 R_y 的公式求得，只是式中的密度 ρ 应改用侧壁的密度。

图 12.32 中，R_f 是螺面与被压炸药楔之间的摩擦力，方向平行于螺面，R'_f为螺颈与被压炸药楔之间的摩擦力，方向同 x 方向；在输送段中，摩擦力不计入，因为炸药不再作轴向移动；τ 为楔与底部已压好炸药之间的剪应力（底面）；τ' 为楔与侧面炸药壁之间的剪应力（侧面）。

$$\tau=K\cdot R_y+12.94 \tag{12.3.2}$$

式中 K——系数，随温度而变，表 12-15 为不同温度时的 K 值。

表 12-15 与温度对应的 K 值

温度/℃	10	30	50
K	0.082	0.101	0.148

τ 与 R_y 的关系如图 12.33 所示。

通过对楔形药块的受力分析可知，螺旋压药过程与压装法压药过程很相似，只不过它是用了特殊的模具而已，其模壁由转动着的螺颈 R'_z和已压紧及待压紧的炸药组成 R_z 与 R_x，底座是已压紧的炸药 R_y。冲头是一个与炸药发生相对移动的斜面 R_N，将高度为 $t-\Delta t$ 的炸药送到螺杆前端经螺杆旋转一周而压紧。

需指出的是，炸药经过螺杆输送到前端并不是在最后一扣螺纹时突然由自由装填状态转为压紧状态。当开始压药时，最后一扣螺面压楔，炸药必然沿着螺纹与输药的相反方向挤（即沿 R_x 的方向），一直挤到那一面也具有一定的密度足以产生反作用力 R_x 时，楔才能被螺面压紧。因此，在螺杆最前端处炸药所受的压力最大，密度最大，R_x 也最大。越远离前端，炸药所受的压力越小，密度越低，R_x 也就越小。也就是输送下来的炸药在过渡段和压药段逐渐被压紧，到最后一扣把楔形药压得最紧。

直接位于螺面下方炸药的压紧取决于 R_y 的作用力，螺面以外部分的炸药压紧取决于 R_z。

螺旋装药在压力较小的情况下，可压出一定密度的药柱，其原因是：压力在最后一扣

螺纹上并不是均匀分布的，而药柱的密度是由螺纹末端处的最大压力来决定。根据苏联萨依切夫的研究，在螺旋装药中，当平均压力 $\overline{R}_y$ 为 54.9 MPa、最大压力为 78.5 MPa 时，螺杆与炸药激烈摩擦，位于螺杆前端炸药的温度很高，大大地超过了压装法的压药温度，所以炸药的可压性显得更好，这也是螺旋装药可用较低的压力获得较高装药密度的原因之一。

图 12.34 为一螺旋装药弹的横截面各点受压情形。

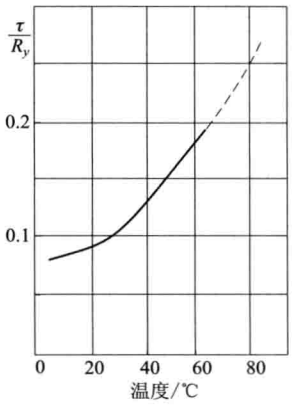


图 12.33　τ/R_y 随温度的变化曲线

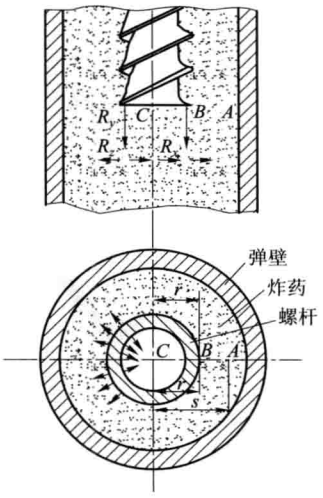


图 12.34　药柱截面各代表点的密度

从图上看，在螺面以外的某一点 A 处所受的压力比螺杆外径 B 处所受的压力 R_z 小。这是因为与螺杆相距较远，且受力的侧面积随距离 s 的增加成正比地增大，在总力不变时单位面积上炸药所受的压力降低，愈靠弹壁降低愈大。在螺杆心的下方区域，由于离开螺面的距离小，侧面积愈靠中心愈小，故压力降低不大。

12.3.3　螺旋装药药柱的形成

1. 药柱的形成过程

螺杆将炸药输送到药室底部，并被压紧。继续输送的炸药，在最后一扣形成药楔。尚在螺杆最后第二扣的炸药形成和螺纹槽一样的药条，如图 12.35(a)所示，厚度为 $t-\Delta t$，宽为 $R-r$。螺杆旋转一周，该药条被压成楔，如图 12.35(b)所示。当螺杆前面的炸药压紧到足以克服反压力时螺杆被迫后退，药楔进一步被挤压，它不仅填满螺面下面螺杆所让出的空间，也填满螺杆心下面让出的空间，同时还将螺杆周围的炸药进一步压紧，因此成为半径比 R 大的扇形体，如图 12.35(c)所示。厚度 t' 为螺杆每旋转一周的后退距离。图 12.35 是表示在某一瞬间，炸药药柱形成的过程。炸药在输送段时呈散粒体，进入过渡段时，被逐渐压紧，到压药段时成为楔形药块，最后被螺面挤压成半径为

R'，厚度为 t' 的扇形螺旋盘。螺杆重复这种过程，一直到螺杆完全退出药室为止，一发弹装药完毕。

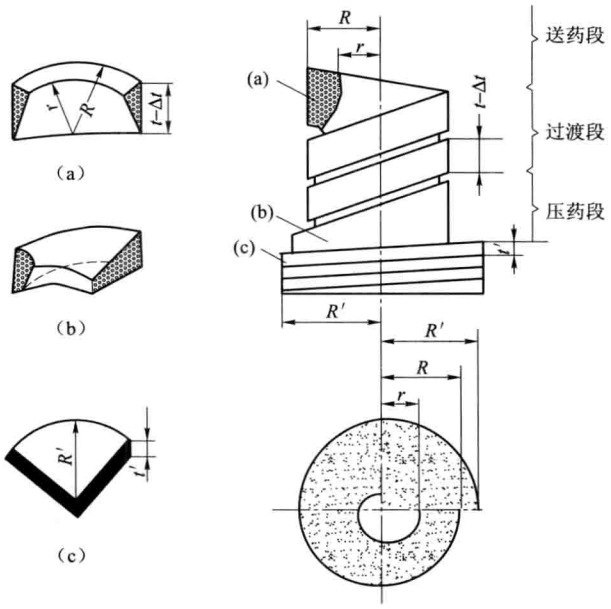


图 12.35 药柱形成图

(a) 松装炸药；(b) 炸药楔；(c) 已压紧的炸药(扇形螺旋盘)

2. 药柱的结构

螺旋装药形成的药柱，其扇形螺旋盘组成的部分由螺杆输送的漏斗药压紧，周围由预装药压紧而成。药柱中心部及螺杆外径处，药柱有明显的熔化现象。

在装药过程中，炸药与螺杆、炸药与炸药之间发生着激烈的摩擦。尤其是炸药与螺杆的摩擦使螺杆达到较高的温度。根据萨依切夫观察研究，螺杆最后一扣的温度显著地高于 TNT 的熔点，但是直接位于螺面下方的炸药并不熔化，这是因为 TNT 和其他一般物质一样，当由固相转变为液相时体积膨胀，增大压力时熔点升高，所以不熔化。而螺杆实心部分下面的炸药以及螺杆以外的圆周部分的炸药反而容易熔化。在压力较低处的炸药，由于熔化或接近熔化状态而大大增加了炸药的可塑性，因此该处药柱的密度并不一定比直接位于螺面下方的药柱密度低。

3. 减小径向密度差的途径

螺旋装药药柱有明显的径向密度差，为了减小密度差，提高药柱的平均密度，可从提高炸药的压力、温度、塑性等方面来采取如下措施。

(1) 增加反压力，即增加 R_y。在生产中，广泛应用了可调节的反压力装置来增加反压力。例如，装到弹体最大的弧形部分时，加大反压力可以改善药柱径向密度差。但过分的增加反压力会引起“卡壳”现象(螺杆输药中断)，而且压力增到一定值后密度的

增加已不显著。

(2) 增加螺杆半径,使螺面直接压药的部分增大,但受装药弹体口径的限制。

(3) 上升角不能太大,否则也易引起"卡壳"。但在同步工作条件下,用螺距较大的螺杆(上升角也大),制得的药柱密度较均匀。

(4) 增大 β 角,以增大螺面径向压药的分力,有利于提高装药的径向密度。

(5) 增加炸药的可塑性。可通过提高炸药的预热温度和油性含量来实现,采用适合于螺旋装药的塑性炸药也有利于增加侧压力系数以提高装药的径向密度。

12.3.4　对生产中易发生的质量问题的分析

1."卡壳"现象

所谓"卡壳"现象是指在装药过程中,螺杆仍然转动但弹体不再作相对的轴向移动,此时螺杆失去了输送炸药和压紧炸药的能力,指示反压力的压力表上的指针降到零点,螺旋装药中断的现象。

生产中,"卡壳"的现象经常出现,有目的地排除"卡壳"现象对安全生产、提高效率有积极的意义。

发生"卡壳"的具体原因很多,在此对"卡壳"仅作理论分析,旨在对实际生产中的"卡壳"问题加深理解。

从本质上看,产生"卡壳"的根本原因是在螺杆的任意一扣螺纹内,由于某种因素使该处的炸药跟随螺杆转动起来,而上部不随螺杆转动的炸药仍然往下输送,于是该处发生了炸药的聚积,越聚越多。如果继续下去,则从该处起整段螺杆塞满了炸药,送药过程被破坏,因而发生了"卡壳"现象。

在送药段,炸药是散粒体状态,若它本身的流散性不好或其中粉末过多;或一方面因炸药颗粒之间内摩擦大,另一方面炸药粉末易黏附于螺杆壁面,都会增加螺杆与炸药间的摩擦。在此情况下,炸药会随螺杆转动而引起"卡壳"。如果将炸药先进行过筛,除去细粉末则有利于解决"卡壳"问题。但在一般情况下,由于送药段并不对炸药进行压紧,故不易产生"卡壳"现象。"卡壳"主要发生在压药段。

压药段的"卡壳"原因:对楔形药块受力分析表明,如果楔块底面与侧面的剪应力超过了该处炸药的极限剪应力,则楔块随螺杆转动而产生"卡壳"。反之,底面及侧面的剪应力小于该处炸药的极限剪应力时,楔块不随螺杆转动,则装药能够正常进行。"卡壳"发生的主要原因为:

(1) 反压力过大。反压力加大时,螺面施于炸药的总力 R_N 增加。由于已形成的炸药壁和底面压得紧而光滑,第二层炸药压上去时,结合不牢,因此炸药的极限剪切应力降低。另外,当 R_N 增加时,炸药与螺面之间的总摩擦力 R_f 是否增加还要从两方面来看:一方面,R_f 大小由 R_N 与摩擦系数 f 的乘积来决定,当 R_N 增加时,可能使 R_f 增大;另一方面摩擦系数 f 随温度和压力而变化。TNT 与钢之间的摩擦系数是随法向压力的增加和温

度的升高而减小。温度与压力的增加有利于 TNT 油性物质的渗出，从而起到了润滑作用。根据研究，不同温度时，摩擦系数 f 与装药密度 ρ 的关系如下：

20 ℃时，$f=1.205-0.77\rho$

50 ℃时，$f=1.100-0.77\rho$

由于 f 的变化，当 R_N 增加时，并不能看出 R_f 的增减。但 R_f 的影响是较小的，R_N 的影响是主要的，反压力增加，易“卡壳”。在生产中也证实了反压力高常常是“卡壳”的主要原因。

(2) 当炸药温度较低时，可塑性差，脆性增加，极限剪应力降低。为了得到与较高温度下相同装药密度的药柱，所需的反压力也大，因而 R_N 也要增加；同时，药温低时，摩擦系数 f 也增大。这些因素作用的结果，产生了“卡壳”现象。实际生产亦证实当药温低或室温太低时就有“卡壳”现象发生。

(3) 炸药过热熔化。当反压力过大，药温过高，螺杆长时间停留在某处旋转并与炸药摩擦，容易产生炸药熔化现象。炸药熔化总是在螺杆端部发生，熔化的炸药被螺杆挤压向上翻，遇到温度较低的炸药和螺杆时，重新凝团，沾在螺杆上，堵住螺纹而产生“卡壳”。

(4) 螺杆尺寸的影响。螺杆上升角 α 超过某一规定值时也容易发生“卡壳”。当螺杆强度不够，螺杆加工精度或安装精度不高，同心性差时，压药时可能产生挠动，带动楔块，导致与底面及侧面炸药连接不牢，大大降低了药柱的极限剪应力，因此也可能产生“卡壳”；螺杆粗糙度高时，增加了炸药与螺杆之间的摩擦力，亦会导致“卡壳”。

(5) 炸药输送过程中断。例如，装药机漏斗中没有炸药、漏斗中不搅拌或搅拌过度，使炸药输送量减少。这样，一方面使螺杆较长时间停留在某处摩擦而产生大量热；另一方面由于炸药不输送或少输送，反压力降低，TNT 熔点降低，极易产生熔化现象而发生“卡壳”。

实际生产中发生“卡壳”的原因很多，要根据具体情况作多方面的分析才能避免“卡壳”的产生。

2. 螺旋装药中产生的几种主要疵病

螺旋装药药柱出现的疵病，是由螺旋装药工艺方法所决定的。由于药柱是由散粒体炸药螺旋挤压成型的，与压装法药柱成型的本质相同，因此有密度不合格、药柱长大及药柱与弹壁结合不牢(由于边部密度低引起)等疵病，装药时由于螺杆旋转过程中与炸药不断摩擦使局部炸药熔化生成缩孔，还由于药柱中温度的不均匀产生的热应力，导致了药柱裂缝的生成。产生这些疵病的本质原因，注装法和压装法中已进行过讨论，而在螺旋装药法中还有它的特殊性。例如药柱的裂缝问题，在螺旋装药成型药柱中，由于中心与边部温度分布不均，装药后冷却太快、热应力增大从而产生裂缝，这种现象总是在反压力过低或过高时出现，因为这两种情况都会导致螺杆直接压紧的中心药与间接压紧的边部药之间

的界面结合不牢。又如局部熔化与缩孔问题，螺旋装药时，在某处反压力过大，炸药与螺杆摩擦激烈；或者是炸药未能源源不断送入药室，螺杆产生停顿，不再继续退出药室，而与某一部分炸药长时间摩擦，都可能导致炸药的局部熔化和冷凝时形成缩孔。当反压力降低时，也可能产生缩孔，如螺旋装药在主弹口部时，螺杆马达电开关关闭，而螺杆由于惯性继续转动送药，此部分炸药常常是呈熔化状态，这是因为炸药与螺杆接触摩擦的时间过长所致。对于药柱长大的疵病问题，类同于压装法中的分析，一般是通过提高药温（保证弹温和室温不致过低）、增加炸药塑性以及考虑蠕滑现象应留有合理的尺寸公差来解决。药柱密度不合格与药温、反压力大小有直接关系。

根据对螺旋装药法生产特点的分析，为获得合格率高的药柱通常采取如下措施：

（1）正确地设计螺杆，提出合理的加工要求。

（2）正确调整反压装置。

（3）根据炸药原材料的性能，如 TNT 油性，制订药温、弹温、室温的最佳工艺条件。

12.3.5　螺旋装药的安全技术

由于螺旋装药生产的特点，螺杆与炸药之间存在着强烈摩擦，局部炸药的温度可达到很高。尽管所选用炸药的机械撞击感度、摩擦感度、热感度均较低，但爆炸事故还可能因下列原因而引起，因此必须严格注意。

（1）炸药中混入坚硬的杂质，如玻璃碴、小石子、砂子及金属零件等。因此在装药前，炸药要过筛检查。此外，一切接触炸药设备上的所有零件要紧固，防止松动脱落掉入炸药内。

（2）一旦发生“卡壳”，要立即停车，并且缓慢将螺杆退出药室，仔细清理螺杆表面沾着的炸药，查明“卡壳”原因，然后才能重新操作。如果“卡壳”发生时不停车，就会由于螺杆与某处炸药长时间接触摩擦，导致局部温度升高而发生爆炸。

（3）螺杆或漏斗中的搅拌器要安装正确，否则会与邻近部位的口螺、弹体或漏斗发生撞击与摩擦，甚至产生火花而导致爆炸。为此，操作前要仔细检查装药机的转动部分，开空车时应没有不正常的杂音。按照现有的安全规范，螺旋装药机是安装在三面是钢筋混凝土墙的小室中，每室只放一台。小室的另一面外墙及屋顶都是由轻质的建筑材料建成，一旦发生爆炸，作为泄爆方向，以减轻小室中其他方面的破坏。沿泄爆方向距小室约 3 米处，有一较薄的钢筋混凝土阻挡墙，目的是减小爆炸的破坏范围。装药小室的门为厚钢板制成的装甲门，有足够的防护能力。

比较完善的立式和卧式螺旋装药机，机械化、自动化程度较高，装甲防护门上装有保险电钮，当门打开时装药机电源切断而不能开动。装药机上还装有发生卡壳时的自动停车装置。这些措施进一步提高了生产的安全性。

12.4 塑态装药法

12.4.1 概述

塑态装药法是使炸药处于塑性状态，在压力作用下将炸药装入弹体，然后炸药再变成固体的装药方法。

塑态装药最大的特点是装药具有塑性，在外力作用下，易发生不可逆变的变形，且容易相互联结成团。它的密实性好，易于得到高密度装药。由于其抗水性良好，还可以在潮湿地带和水下使用，并可按需制成不同形状或装入任何不规则的弹体中。由于塑性炸药的能量、稠度和黏性都可以通过配方组分进行调整，在－42 ℃～＋60 ℃范围内均具有黏性，因而得到了广泛的应用。

塑态装药分为热塑态装药和冷塑态装药两种。

1. 冷塑态装药

由于混合炸药中高分子物（塑料、橡胶等）的单体或预聚体在聚合之前具有一定的流动性和塑性，在常温下将炸药以塑态形式装入弹体中使其聚合凝固的方法称为冷塑态装药法。这种方法可以避免由于温度和相变而引起的体积变化（收缩）。由于采用的黏合剂为非爆炸性物质，所使用的炸药能量较低，但装药质量好，强度高。

2. 热塑态装药

将两种以上的炸药配成遇热软化（呈塑态）、常温下又变为固态的混合炸药，在热塑状态下用专用的压伸机（螺旋式或活塞式）装入弹体药室内，并趁热用成型工具将多余的炸药挤出去，同时形成引信室及口部药面形状的方法称为热塑态装药法。

苏联在 20 世纪 50 年代初就曾研究用螺旋法进行塑态装药。所用的炸药为阿马托（TNT80/硝酸铵 20）。将炸药在夹套加热器中加热到 75 ℃～99 ℃，在压力为 1.96～2.25 MPa 时，装填 100 kg 爆破航弹。用阿马托（50/50）装填 230 mm 破混凝土弹，装药密度在 1.40 g/cm^3 以上。

如果炸药中混有空气，装药时未能排出，而装药后炸药在尚未凝固时药柱从药室中长出，将产生巨大的横向裂纹，炸药与弹壁接触处有很多气泡。由于空气影响装药质量，可改为低压下塑态装药，将炸药在真空度为 400 mm 汞柱下加热并不断搅拌。单纯用 TNT 装药时，能使 10%～30%的 TNT 熔化。当用阿马托 80/20 装药时，加热温度为 85 ℃～88 ℃。曾用 TNT 或阿马托 80/20 装填 107 mm 杀伤爆破弹和 122 mm 破混凝土弹。TNT 的装药密度可达 1.42～1.60 g/cm^3。阿马托 80/20 装药密度可达 1.35～1.48 g/cm^3，其装药结构与注装法近似。

12.4.2 热塑态装药所用的炸药（热塑态炸药）

热塑装药所用的炸药必须具有两种组分：既有低熔点物质又有高熔点物质才能具

有可塑性。前者常用的如 TNT 及其二元、三元低共熔物；后者常用的如黑索今。在有的配方中还加入钝感剂如硬脂酸、石墨等，还有增加爆热的物质如金属粉等。总之热塑炸药是含有两种以上组分的混合炸药，其配方选择除应满足战术技术要求外，还必须符合工艺性的要求。

热塑态炸药应具有可塑性(半流动性)，在外力的作用下能够流动。常用的热塑态炸药组成如表 12-16 所示。

表 12-16　常用热塑态炸药组成

炸药名称	配　　方	备　注
黑-17	钝化黑索今(A-IX-I)　17% TNT　15% 二硝基萘　30% 硝基胍　38%	迫弹用热塑态炸药
黑-27	钝化黑索今(A-IX-I)　27% TNT　20% 二硝基萘　28% 硬脂酸　2% 石墨　23% 其中钝化黑索今(A-IX-I)的组成为 黑索今　95% 钝感剂　5% 钝感剂的组成为： 地蜡　60% 硬脂酸　38.8% 苏丹红　1.2%	迫弹用热塑态炸药
热塑梯黑(RS111)炸药	钝化黑索今(A-IX-I)　82% TNT　18%	榴弹和水下弹药用热塑态炸药
热塑梯黑铝(RS211)	钝化黑索今　64% TNT　19% 粗铝粉　17%	

续表

炸药名称	配　　方	备　注
苏联热塑炸药(MT)	钝化黑索今(A-IX-Ⅲ)　64% K-3 炸药　19% 粗铝粉　17% 其中钝化黑索今(A-IX-Ⅲ)组成为 黑索今　90% 钝感剂　10% K-3 炸药为片状梯萘共熔物,组成为 TNT　84% 二硝基萘　16%	
苏联热塑炸药(MC)	钝化黑索今(A-IX-Ⅲ)　64% TNT　19% 粗铝粉　17%	

黑-17 与黑-27 炸药用于装 60 mm 迫弹,其破片性能均与梯萘 80/20 相当。

RS111 炸药黑索今含量较高,比梯黑 50/50 的能量大,装药结构均匀,装药密度可达 1.62 g/cm^3,爆速为 7 821 m/s。缺点是药柱收缩率大,不适合装大型产品。

RS211 炸药装药的特点是装药密度大、威力大、药柱收缩量比 RS111 小、强度高,密度可达 1.65～1.73 g/cm^3,黑索今含量比钝化梯黑铝高,可代替钝化梯黑铝炸药,曾大量用来生产海 100/56 爆破弹和海 130 mm 弹。采用真空振动热塑装药法可装鱼雷、水雷。

MT 及 MC 炸药中钝化黑索今中的非爆炸物质钝感剂含量较多,药柱收缩量大,降低了炸药的威力。其中所含 K-3 炸药是梯萘的共熔物,熔点较低,为 73 ℃,在夏季储存时容易软化,同时 K-3 炸药的威力较低。苏联曾用 MT 及 MC 炸药大量装填水雷、鱼雷和导弹战斗部等。

12.4.3 热塑态装药工艺

以 RS211 炸药为例,采用热塑态装药法可装填各种口径的钢质榴弹、迫弹和半穿甲弹、混凝土破坏弹以及火箭弹和航弹;采用螺旋装药法可装填各种榴弹、迫弹及火箭弹等;采用真空振动装药法可装填水中弹药和航弹。

热塑态装药工艺流程如图 12.36 所示。

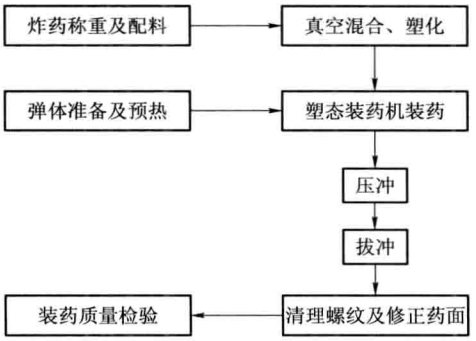


图 12.36　热塑态装药工艺流程

下面分别介绍各主要工序。

1. 炸药混合、塑化和弹体预热

用蒸汽将绕对角线旋转的塑化器加热至 85 ℃～110 ℃，如图 12.37 所示。

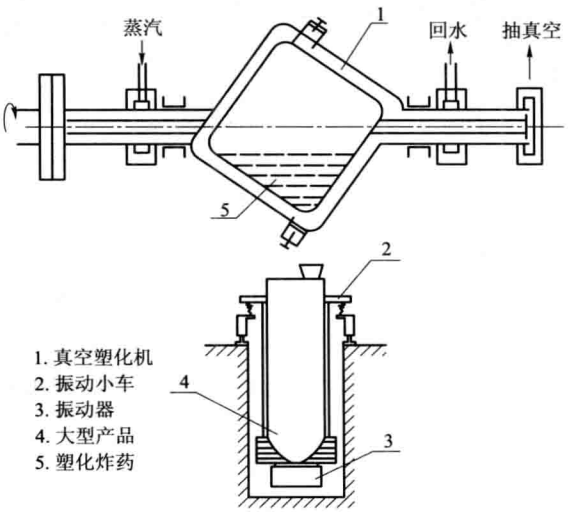


图 12.37　真空振动装药系统

装料：将配制好的炸药装入斜角夹套筒内然后将盖盖紧。

抽空：在斜角夹套筒不加热、不旋转、处于静止状态时抽空，此时温度不超过 70 ℃。

冷混：当真空度达到 500 mm 汞柱以上时开动混药筒，转速为 10～15 r/min，进行冷混。

塑化：混药筒夹层通入蒸汽加热，药温为 95 ℃～98 ℃，TNT 受热熔化，将各组分混合均匀。塑化时间为 30 min。

弹体预热：弹体预热的温度控制在 55 ℃～70 ℃，室温控制在 18 ℃以上。弹体温度和炸药温度对装药密度和装药质量有很大影响，弹温和药温过高会出现粗结晶使装药密

度降低。

2. 装药

将混塑好的炸药送入装药机漏斗中，进行装药。装药机如图 12.38 所示。

工艺条件：

装药机温度在 85 ℃～95 ℃；

装药管温度不低于 70 ℃；

弹体温度在 55 ℃～70 ℃；

装药机螺杆转速 200 r/min。

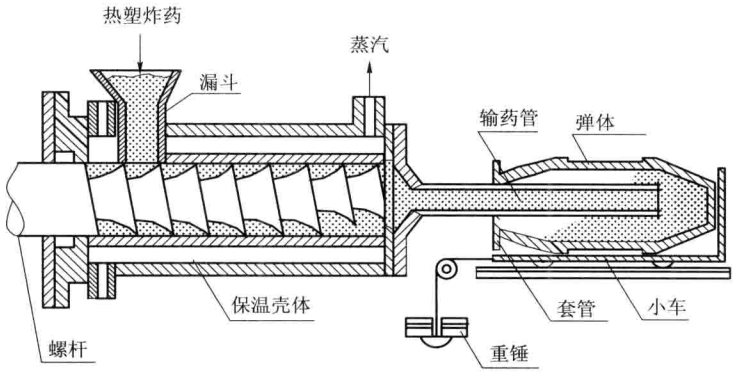


图 12.38 热塑态装药示意图

由于螺杆的旋转，炸药不断地通过输药管送入弹体内。输药管最初伸入弹体离底部 10～23 mm。由于炸药不断送入并被压紧，螺杆通过炸药对弹体产生一推力，当此推力超过一定的抗力(0.1～0.2 MPa)后弹体向后移动。随着弹体不断后退，炸药就在一定的压力下装满弹体。抗力的大小可通过重锤、气缸或弹簧来控制。抗力小时装药密度低，抗力过大则不安全。

3. 压冲

把带有中心孔的成型冲(如图 12.39 所示)快速压入装药后的弹体口部，并将成型冲固定，使塑态炸药在压力下冷却凝固密实成型，并由成型冲的中心孔中挤出多余的塑态炸药。因成型冲在压入弹体口部时与弹壁发生摩擦，为安全起见，在弹口部装药之前先装上铜制保护套。成型冲中心孔直径不宜过大，直径过大会影响装药密度。某海军榴弹用的成型冲排药小孔直径为 2.5 mm，装药平均密度可达 1.63 g/cm^3。当孔径过大时，装药密度会明显降低。

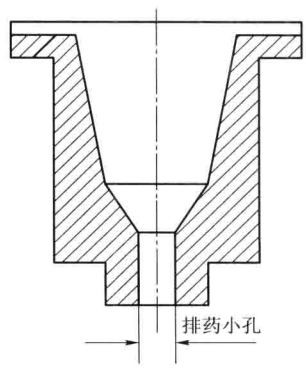


图 12.39 成型冲

大型弹药的热塑态装药采取真空振动等措施。其工

艺方法如下：将鱼雷、水雷或航弹的弹体装卡在振动机上。将混塑好的炸药装入弹体，同时开动振动机边装药边振动直至炸药装满为止，与此同时也可加入少量药块。炸药装满后继续振动2～3 min，然后将成型冲压入装药口，并用螺销固定。冷却 10 h 以上，室温不低于 25 ℃，装药前的弹体温度为 20 ℃～25 ℃，振动机频率 20～22 Hz，振动机振幅 1～2 mm。装 RS211 炸药平均密度不低于 1.65 g/cm^3。

12.4.4　热塑态装药的药柱质量和可能出现的疵病

在热塑态装药中，低熔点的炸药也有相变，但因含量较少并且呈分散状态所以不会产生大的缩孔。生产实践也证明热塑态装药药柱内部缩孔、气孔很少。此外，在装药过程中炸药呈塑性流动，炸药各部分所受的压力很均匀。因此药柱的密度分布均匀，药柱中心与周围的密度之差不大于 0.02 g/cm^3。某迫弹塑态装药整体密度差不大于 0.05 g/cm^3，药面平整，无疏松、裂纹等疵病。如果工艺条件控制不当，热塑态装药也可能出现以下几种疵病：

(1) 气孔。由于塑化混合时未排出气体，药柱中出现气孔。

(2) 疙瘩、硬皮和炸药颗粒团。由于混药不均匀，塑态炸药的表面层在空气中冷却结成硬皮，在混合塑化时，若未将这些硬皮熔开，装入弹体后就可能出现以上疵病，影响药柱强度。

(3) 裂缝与裂纹。混药不均匀、装药时退车不匀速、温差较大都可能出现纵向或横向裂纹。

(4) 弹底缝隙及径向收缩。由于相变和温度应变的存在，会造成药柱的轴向和径向收缩，从而引起弹底缝隙和药柱松动或表面疏松。一般来说，径向尺寸小，收缩不明显，不会产生离壳现象。尤其对小口径弹药，升高弹体温度、加大压冲时的压力可以减小弹底缝隙等疵病，也可用头螺或底螺将药柱顶紧。

(5) 密度偏低。密度过低可能是由于药温、弹温过高，或者成型冲的排药小孔直径过大，装药时退车阻力过小等原因造成的。

(6) 表面疵病。若炸药温度过高、工房温度和成型冲温度过低，会产生表面缩孔和气孔。这种疵病可通过将产品放在恒温箱中加热，使表面炸药重新塑化而消除。弹温和药温过高也容易产生表面粗结晶。

12.4.5　热塑态装药法的主要优点及存在的问题

1. 热塑态装药法的优点

(1) 热塑态装药的主要优点是，可以使用高能量的单质炸药作为固相组分，含量较高，可达 60%以上，这就为各种炸药广泛用于弹药装药和提高弹药的威力开辟了新的途径。

(2) 设备简单、造价低。热塑态装药所用的螺旋压伸机比油压机和螺旋装药机都简

单，因为它不需要高压系统。混塑炸药的设备也不复杂。

(3) 生产效率高。热塑态装药的效率比注装和螺装高，注装的生产周期最长，因为炸药浇注以后必须缓慢冷却凝固，否则容易产生疵病。

(4) 作业面积小。注装法生产周期长，产品必须在工房内等待凝固，制品量大时作业面积就大。螺装时因为必须要有钻引信孔、刮平药面、炸药预热等工序，故作业面积也较大。

(5) 工作环境较好。注装时炸药蒸汽多，块装和螺装时则炸药粉尘太大，尤其是在钻引信孔和刮平药面操作时。因此相对来说热塑态装药的工作环境较好。

(6) 与压装、螺装相比热塑态装药对不同形状弹体的装药适应性强。

(7) 药柱质量好，密度均匀，疵病少。

2. 热塑态装药存在的问题

热塑态装药虽然有很多优点，但也存在一些问题。主要是：废品不好处理，药柱有收缩(径向不明显)。各种炸药的收缩值不一样，如果收缩量大，在弹底出现底隙，在高膛压情况下发射不安全。

冷塑装药可以避免收缩，也能避免炸药蒸汽，可进一步改善劳动条件，因此是研究的方向。

热塑态装药所采用的炸药必须含有威力较低的低熔点炸药。热塑态装药时，低熔点炸药处于熔化状态，冷却时不能像注装法那样有熔态炸药的补充，因而形成许多分散的微观缩孔，使得装药密度不够高。例如，RS111 炸药热塑装药密度为 1.62 g/cm^3，仅达到理论密度的 91%，而压装密度一般可达到理论密度的 95%以上。因此，热塑态装药得到的药柱其爆炸性能不如压装法药柱高。

12.4.6 热塑态装药的安全生产问题

热塑态装药是比较安全的。混塑炸药是在滚筒中进行的，滚筒转动带动炸药上下翻滚靠炸药自重落下，它没有机械搅拌那样强烈的摩擦，因此静电很小。

装药时压伸螺杆转速低，只有 200 r/min，而且螺杆和压伸机内壳全是用铜制作的。螺杆与机体内壁有足够的间隙而不使螺杆旋转时摩擦内壁。螺杆旋转机构还可以安装安全装置，当超过装药力量时，螺杆会自动停转。装药时压力很低，螺杆推动炸药的力量仅为 0.1～0.2 MPa，超过此压力，炸药又会顺着螺扣返回，不致产生高压。成型工序压力也不大，摩擦力很小，压入速度慢。

12.5 振动装药法

振动装药工艺的研究起源于水中兵器的需要，国内外早已开始采用。

提高装药威力和发射安全是近年来各国研究的重点。解决的途径是提高混合炸药中

高能炸药的百分含量和提高装药密度。固相含量的提高以及黏度的增加均可使可浇注性变差，以致无法浇注。因为黏度大，药柱会出现诸如气孔、缩孔等疵病，尤其对于大型弹药（如航弹、水雷、鱼雷等）用普通注装不可避免的会产生各种疵病。水中兵器如水雷、鱼雷装填 A-IX-2 炸药，其中所含铝粉按炸药性能来讲颗粒越细越好，但颗粒细了会使混合炸药的黏度增加；梯黑炸药中，若增加 RDX 的含量，同样使药液黏度增加。黏度增加使流动性变差会给装药质量带来欠缺而不适于注装。应用振动装药再加上真空处理可以解决上述问题，提高了药柱的质量。与注装相比，其劳动条件优越、生产周期较短，因此是一个很有发展前途的装药方法。

12.5.1　真空振动装药机理

振动装药（包括电磁振动、超声波振动、搅拌以及旋转等）之所以能获得优质药柱，其关键是降低了混合药液内的摩擦力，能在使晶粒细化的同时使柱状晶体缩小；注件的化学成分和结构组织均匀；抗热裂倾向增强。

熔态混合炸药 TNT/RDX、TNT/RDX/Al 粉等，其中 TNT 为液相，RDX 和 Al 粉为固相。当固相含量高时，混合物颗粒间被液相薄膜包围，可流动量 TNT 减少，所以黏度很大，也即内聚力和摩擦力很大，不能很好地充满药室，气泡也很多。振动可使混合物中固体颗粒获得加速度和惯性力，由于颗粒的质量不同，获得相等加速度的惯性力也不同。此惯性力的差值如果超过了颗粒间的内聚力和摩擦力，则黏性薄膜被破坏，颗粒在惯性力和重力的作用下发生位移，并力图向平衡位置移动而重新排列。因而颗粒互相靠近而挤出中间的液体和气泡，从而可获得较大的流动性，也有利于充满药室和有利于补缩孔。

振动还可使气泡逸出，在振动条件下小气泡互相碰撞变成大气泡，使浮力加大容易逸出。悬浮炸药受到振动后，靠近振动器的颗粒首先受力。它们一方面自己振动，一方面迫使距振动器较远的那些颗粒也振动。由于摩擦力的影响使远距离处颗粒的振幅愈来愈小，颗粒的振动又把振动力传给较远处的颗粒，这样在其内部就有应力波在交替传播，所以悬浮炸药在某处有时受拉有时受压。当局部炸药受张力作用时可看成是形成短时间的低压区，给气体分子集聚及气泡上升创造了良好的条件。或者说由于在振动作用下，振动能量可以克服颗粒间的摩擦阻力及黏附力而使流动性增加，使得气泡易于上浮而最后逸出液面。如果再采用真空处理，则气泡更容易逸出。

振动还能使晶粒细化。振动在金属铸造工业中得到了广泛的应用，有机化学工业中也用的很多。有学者用赛璐珞进行过这方面的实验，可明显看出固相增加得很快，被振碎的固体质点沿着波传播的方向运动。关于振动能使晶粒细化的理论有以下几种：

（1）振动使枝晶破碎。这主要是由于振动力的作用造成了液体的运动而发生相对位移。因为混合物液体存在着黏性，所以液体各部分的运动速度存在着差异，枝晶在长大过

程被运动着液体所冲击(或者说剪断),这种"黏性剪切"特别在液体和正在长大的枝晶之间更为严重。这样,枝晶前沿或尖端因剪切而机械破碎,枝晶成长被破坏。破碎了的枝晶在液体中成为新的结晶中心而使晶核数量增加。

(2) 振动使枝晶熔断。振动所产生的扰动可以使长大过程中的枝晶周围的液体前进或后退,这样将造成局部的热温起伏而使局部温度升高,促使某些枝晶的熔断,特别是在溶质偏析系数大而产生有脖颈枝晶的状态下更易被熔断,熔断的枝晶有利于晶核数目的增加。即使枝晶没有被熔断,其枝晶强度也会降低,从而在液体运动冲击下也易被剪断。

(3) 振动增加游离激冷晶的数目。振动作用破坏了液体的薄膜,使液体炸药与注型壁的湿润度增加。因而使液体与注型能很好地接触,使注型对液体的激冷作用增强,而产生较多的晶体。这些激冷晶体在振动作用所引起的液体扰动下发生游离,而形成大量的无定型晶体分布于液体中,明显地使晶核总数增多。

(4) 振动提高了液相线平均温度,从而增加了过冷度,使自发晶增多。尤其是超声波振动对液体具有产生空穴的作用,基于这种原因,超声波振动对液体有良好的除气作用,因为空穴对熔解在液体中的气体来说是真空。另一方面,当空穴崩溃时,周围液体必然进去填充,此时液体流动的动量将足以产生很高的压力。这种压力的增加会使液态炸药的熔点温度升高。TNT 由液相凝固为固体时,体积总是减少的。因此,当压力升高时,其熔点温度随压力的增加而升高,从而局部提高了液相 TNT 的过冷度,势必造成自发晶核数量的增加,有利于结晶细化。总之,振动装药对晶核的形成、晶核的细化是有利的。

以上是振动装药的机理,也是提出真空振动装药的理论基础。

振动对结晶过程有很大影响,振动能使凝固速度加快。由图 12.40 中的数据可见,TNT/RDX 混合炸药的完全凝固时间,加振动比不加振动提前 7 min。之所以结晶速度加快是因为振动使晶核数量增加,使晶核生长速度加快,加快了热传递的过程。对振动条件下 TNT 炸药的凝固过程可以认为,当炸药液体注入弹体时,由于弹壁冷却的原因,使弹壁内表面立即生成凝固层(这层的凝固过程与振动无关)。由于在结晶过程中所放出的结晶潜热是经弹壁传走的,所以在熔态炸药的中心到边缘有一温度差。当边部炸药温度降到结晶温度时,中心药温仍较高,振动使弹体内熔态炸药发生相对运动,使中心和边部的药温差减小。另外在结晶过程中,固—液界面处的半凝固层中的树枝晶体,若是自然缓慢冷却,则树枝晶体发展成为柱状晶体;如果加有振动,则会使树枝晶体破碎并分布到整个没凝固的液相中去,从而增加了晶核数。以上两个因素都使得熔态炸药的中部和边部产生大量晶核。由于晶核数的增加,加快了

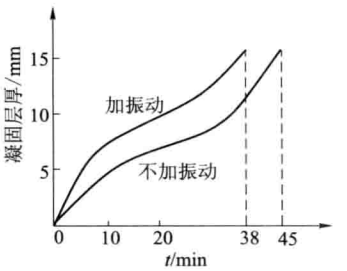


图 12.40 振动对 TNT/RDX 混合炸药凝固速度的影响

凝固速度。

振动使液体黏度降低，气泡上升速度增加，这样就使大量气泡在炸药凝固之前逸出药面，使装药中气体大大减少。

气体量的减少同样使黏度下降，提高了药柱的质量和密度。如果真空度在 620 mmHg 下，抽空 15～20 min，则 TNT 药柱密度可达 1.62～1.65 g/cm^3。

综上所述，振动可使混合炸药的内摩擦力大大减小，增加了流动性，更易于充满药室，振动也使得晶核数增加，有利于获得细结晶药柱。真空振动还可消除气泡。因此，真空振动装药可获得结构均匀、密度高、强度高、结晶细、无气泡的优质药柱。

12.5.2　振动装药工艺条件

振动作用的效果决定于振幅 A 与频率 n 平方的乘积。An^2 的量纲与加速度的量纲一样，称为振动加速度。振幅和频率的大小与炸药颗粒大小、黏度、配比等一系列因素有关。对于某一种弹药来说，振动装药的工艺条件合理才能保证质量和安全。经研究发现，振动加速度与黏度有关系，当振动加速度达到一定值时，药液黏度下降趋势加大，此时振动获得最大效果，其关系如图 12.41 所示。

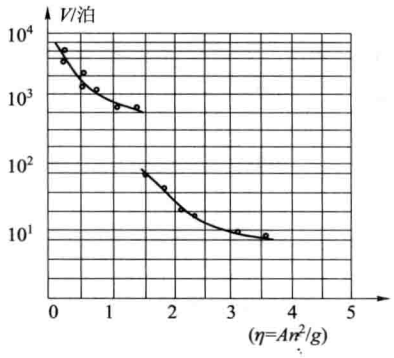


图 12.41　振动加速度与黏度的关系

关于怎样选择合理的工艺条件有许多专门研究，其方法是：

(1) 根据混合物颗粒大小选择最优频率。

(2) 根据频率选择临界振幅，而在此振幅与频率配合作用下，能对该混合物起到足够的振实效果。

(3) 混合物在容器中振动时，器壁是混合物的振动源，振动经过其中混合物的传递才能到达各个部分。随着振动源距离的增加，振动衰减较快。所以，为了保证各处混合物获得临界振幅以上的振幅，必须考虑振动在混合物中的衰减。也就是说，为了保证离器壁最远点达到临界振幅，振动台的振幅应适当地加大。

用非定向偏心旋转式振动机做过一系列实验。实验结果表明：在不同振动的条件下，颗粒直径不同对密度影响很大。不同固相颗粒混合物的振实效果主要取决于频率，而振幅仅起次要作用。小颗粒时，频率要高些；大颗粒时，频率要低些。实验证实，频率与密度的关系中有一极大值，即固相颗粒的最优频率，最优频率是随固相颗粒的变小而增大的。之所以出现最优值是当频率超过某一值时，混合物在容器中的翻滚很激烈，破坏了颗粒的最优排列，密度会下降，如图 12.42(a)所示。不同颗粒振幅对密度影响如图 12.42(b)所示。对大颗粒来说，振幅大了，密度上升；而对小颗粒来说，振幅太大反而降低了密度。所以对一般 TNT/RDX 混合物，其振幅为 2 mm，频率为 43 Hz

时较好。

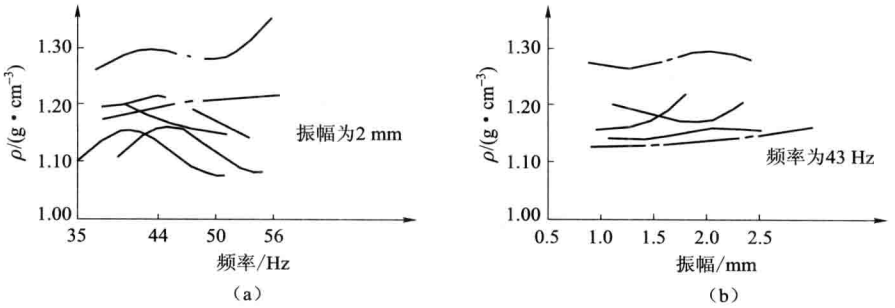


图 12.42 频率、振幅与 ρ 关系

(a)频率与 ρ 的关系;(b)振幅与 ρ 的关系

在一定振动条件下,不同固相含量混合物的密度情况也不一样,同样有一最佳配比。当超过某一配比时,其密度下降,见图 12.43。其条件是振幅为 2 mm,频率为 44 Hz。固相比例增加,药柱密度也随之增加,大于某一比例时,由于混合物太稠,振动效果低,所以密度降低。图 12.43 中为固相含量为 80%的实验情况。

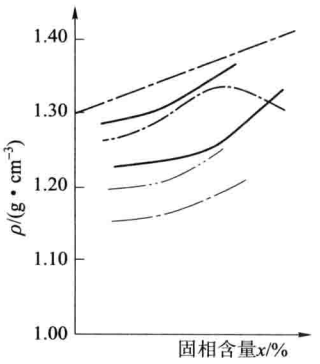


图 12.43 密度与配比的关系

12.5.3 实验结果

若振动与真空处理相结合,其药柱质量提高更为明显。表 12-17 是在此条件下获得的数据。

表 12-17 真空振动实验数据

TNT/RDX	处理方法		药柱密度/(g·cm⁻³)		实验现象
	注药方法	频率/Hz	平均值	上下差值	
50/50	普通注装	—	1.672	0.020	37 Hz 以上药飞溅的激烈
	振动注装	25	1.672	0.016	
		37	1.672	0.020	
		49	1.664	0.021	
1/2	普通注装	—	1.658	0.007	气泡严重
	振动注装	37	1.680	0.003	微小气泡较多
	真空振动注装	25	1.727	0.005	微小气泡减少,药柱密实且呈细结晶结构
		37	1.726	0.008	
		49	1.731	0.013	

由表 12-17 可以看出：

(1) 振动频率与混合物的黏度及颗粒配比有关。固相含量比例高的炸药(TNT/RDX 为 1/2)，振动频率高时效果好；固相含量比例低的炸药(TNT/RDX 为 50/50)，振动频率低时效果好。因为 RDX 比例高可使混合炸药的黏度增大，必须用大的振动力才能克服颗粒间的黏附力和摩擦阻力；而 RDX 比例小时，流动性较好，大的频率会使药液飞溅，破坏了振动效果，所以只有合适的振动频率才能得到较好的药柱结构。

(2) 振动频率增加，药柱上下的密度差增加。因为频率增加后使加速度加大，而 RDX 发生沉降。

(3) 当 RDX 含量高时(RDX 含量 > 70%)，真空振动效果更为明显。

振幅实验结果如表 12-18 所示：

表 12-18　振幅实验结果

TNT/RDX 的比例	振幅/mm	药柱平均密度/($g \cdot cm^{-3}$)
50/50	0.6	1.678
	2.25	1.679
	3	1.678
	5	1.672
1/2	0.8	1.739
	1.5	1.740
	2.25	1.729
	3	1.721

从实验结果可知：对于振动频率存在一个有效的振幅区间，即存在一个临界(最小)振幅和一个极限(最大)振幅。小于临界振幅起不到振动效果，而大于极限振幅又会破坏振动的效果。

当 RDX 含量低时(如 TNT/RDX 为 50/50)，随着振动时间的增长，装药密度增加较缓慢，而且不易生成粗结晶。另外，熔态炸药逐渐冷却变稠，振动的作用也逐渐变小。

当 RDX 含量高时(如 RDX>70%)，开始抽真空时，密度升高很快，效果尤为明显，如图 12.44 所示，3 min 后变缓，以后不再起作用。所以振幅、频率和黏稠度三者有一个合理的匹配关系。

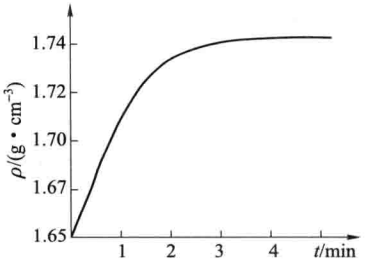


图 12.44　真空振动时间与药柱密度关系

通过机理分析和实验证明振动装药的作用效果是：

(1) 可以使炸药更好地充满药室,起到使药柱密实的作用。

(2) 减小液相黏度,使液相中气泡易于排除。

(3) 振动使晶核生成速度大,并使长大的树枝晶振碎,有利于晶核数的提高,也有利于获得细结晶的优质药柱。

(3) 振动相当于搅拌,加快了凝固速度。

(4) 振动结合抽真空更有利于气泡的逸出。真空振动对高猛炸药含量高、黏度大的液相炸药来说是有利的。振动装药易于机械化。

12.6 弹药装药工艺方法的改进与展望

弹药装药常见的质量问题是:产品的机械性能差,如尺寸的稳定性差、韧性不好、脆化;在外力作用下易产生裂纹,抗压、抗弯、抗冲击强度低。此类装药氧平衡不理想,所以爆热、猛度和威力较低。有些装药耐热性较差,温度高易渗油,热膨胀系数较大,由此可造成产品内部出现疏松结构、空隙、裂纹、气孔、缩孔等。尤其当固相高能炸药含量超过60%时,由于悬浮系统黏度增加,流动性差,不但易产生疵病,也不能保证装药质量。因此,为了提高装药的质量、提高弹药威力、保证装药的发射安全性,可采取下面所述的工艺途径。

12.6.1 选择固相颗粒级配以提高固相含量

提高熔铸炸药的固相含量,会导致系统的黏度增加从而无法铸药。选择固相颗粒级配,能降低熔融系统的黏度,提高熔融炸药中固相含量,即要使固体颗粒排列的紧密,表面积尽量小。这样可尽量减少固体颗粒表面吸附层中熔态 TNT 所占体积及固体颗粒间可流动的 TNT 体积。因此,除采用表面尽量光滑、形状尽量接近圆形的固相颗粒外,还要使颗粒大小适当搭配,使小颗粒能填充到大颗粒间的空隙中去、排列更紧密,从而提高固相炸药的含量。

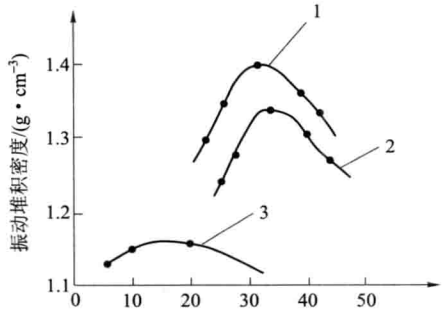


图 12.45 双组分 RDX 振动堆积密度

1—2000/230;2—2000/395;3—550/60

改变 RDX 颗粒的尺寸比例,可以得到较高的堆积密度,如图 12.45 所示。可以看出,每一种粒径比均有一粒径质量分数,用这两种颗粒级配可以得到最大堆积密度。2 000/230 的级配堆积密度最大可达 1.37 g/cm^3。550/60 的颗粒级配,虽然粒径比大,但由于小颗粒(60 μm)本身的堆积密度很小(0.595 g/cm^3),流散性差,不易填充到大颗粒的间隙中去,所以堆积密度增加并不多。

利用颗粒级配原理,采用 RDX 级配为

(200～500)μm/(20～80)μm = 3∶1 的梯黑熔注炸药装填破甲战斗部，其 RDX 含量可提高到 73%，装药密度可达 1.796 g/cm³。大量实验证明，采用颗粒级配方法，RDX 含量可高达 80.7%，而普通粒度的 RDX，用真空振动装药，RDX 含量只达 67%。由于 RDX 含量的增加，炸药装药的爆速可提高 3.1%，爆压可提高 7.2%。

生产中，选用两种固相颗粒级配时，必须保证小颗粒的最大粒径应小于大颗粒间的平均空隙直径。否则，小颗粒挤到大颗粒空隙中去将造成原体积增加，反而使密度下降。国外已定型的 RDX 炸药的两种颗粒级配，大颗粒一般占 3/4，小颗粒占 1/4；大颗粒尺寸为 180 μm，小颗粒尺寸为 25 μm，粒径比为 180/25 =7.2。

12.6.2　添加性能优良的添加剂

梯黑炸药在装药工艺控制不严格时，易产生缩孔、底隙、气泡、裂纹等疵病，这些疵病在弹丸发射时易产生早炸；在长期储存时，由于温度交变，可产生裂纹和渗油；在火烤时，易发生剧烈爆炸和殉爆。因此，国内外许多学者在梯黑炸药中加入添加剂以改善装药性能。如加入比表面为(10～50)m²/g、松装密度为(0.03～0.07)g/cm³ 的磷酸钙 1.5%～2.0%，可改善炸药威力、热安定性、感度并抑制渗油。加入纤维状物质，如硝化棉、醋酸纤维素等可提高药柱机械强度，也可防止渗油；加入硝化棉及热塑性高聚物，可增加药柱塑性，降低弹性模量，防止产生裂纹；加入增塑剂(流动点低于－10 ℃)，可在较大温度范围内防止药柱产生裂纹和渗油，也可改善其力学性能。

12.6.3　采用压力注装工艺

普通注装工艺易使装药产生各种疵病。国内外学者研究了压力注装工艺，该工艺方法是对熔融炸药加压，利用熔态物质压力增加熔点升高的规律，使熔态炸药达到凝固。由于熔态炸药各部位所受压力相似，所以对其施加适当压力后，会在整个体积内同时凝固，从而避免了普通注装工艺靠热传导冷却使熔态炸药凝固而产生的疵病。

采用压力注装所得到的药柱平均密度高、结构均匀性好。由于改变凝固机理，不仅缩短装药凝固时间，还可消除缩孔、粗结晶和疏松；由于压力的作用，消除了较大气泡和气孔；由于整个熔融炸药系统同时结晶，从而结晶细而均匀、药柱致密、空隙率小。压力注装可一次压注成型，不需护理，工艺简单。

12.6.4　其他注装新工艺

国外对注装的研究和报道很多，特别是以黑索今和 TNT 为主体的注装混合炸药应用更为广泛。为提高战斗部的威力，在注装装药上，西方各国采用了很多新工艺。

(1) 离心装药。在离心力的作用下，加速黑索今的沉降速度，从而提高其固相含量和装填密度。

(2) 热探针法。也称热模型法或中心熔化法。把药浆注到离冒口漏斗顶部一定距离

处，当药浆沿弹体由外向里凝固时，中心部位就会形成纵向缩孔。这时，用通蒸汽且加热的热探针从漏斗插至弹体内。热探针周围的炸药受热重新熔化，药浆从漏斗补充到纵向缩孔内。

（3）制型装填法。将熔融药浆倒入药室，注入高度视弹径而定。用定心机把固体圆形药柱沿药浆中心插至弹底，十几秒后，药浆凝固，圆形药柱便能直立在药室中心。此时，抽出定心机，再向药室的其余部分浇灌药浆。与注装法相近，其结构均匀、密度大、无缩孔。

（4）保温速冷却。把装药弹体的下半部置于冷水中，弹体上半部置于形状与其适应的热油槽中。这样，弹体下部的药浆很快冷却凝固，上半部的药浆在热油槽的作用下不凝固，并不断向下部的缩孔补充药浆。

第 13 章　火箭发动机装药

火药用于枪炮发射弹丸装药时又称为发射药。发射药装在药筒或弹壳内，如图 13.1 所示。当发射时，发射药在膛内经底火点燃瞬间进行燃烧，迅速地将发射药的化学能转变成热能，同时在膛内产生大量的高温高压气体。这种高温高压燃气，在膛内进行膨胀做功，推动弹丸高速射出，达到发射弹丸的目的。发射药在枪、炮膛内燃烧时，所达到的最大压力称为最大膛压(简称膛压)。弹丸在离开枪、炮出口处的速度称为初速。显然，人们希望发射药装药燃烧后产生的膛压低，弹丸所获得的初速高，对环境温度(－40 ℃～＋50 ℃)的依赖性小。膛压和初速是衡量枪、炮发射药内弹道性能的两个重要参数，也是承制单位交验装药产品的重要指标。

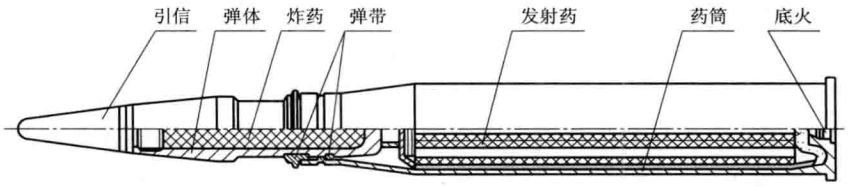


图 13.1　炮弹示意图

火药用于火箭弹、导弹发动机装药时又称为固体推进剂。固体推进剂按设计的药型装在固体火箭或导弹发动机燃烧室内，如图 13.2 所示。发射时，固体推进剂经点火装置点燃后按规律进行燃烧，将推进剂的化学能转化为热能、同时释放出大量的高温气体。固体推进剂是在半密闭状态的固体火箭发动机燃烧室内进行燃烧，形成一定压力的高温燃气，经由发动机尾部的喷管高速喷出膨胀做功，从而产生推力作用于弹体上，使火箭弹、导弹获得一定的飞行速度。固体推进剂燃气喷出的速度愈大，排气量愈多，发动机获得的推力也愈大。固体推进剂通常用单位质量的推进剂在火箭发动机中所产生的冲量——比冲来衡量固体推进剂能量的大小，也可用密度比冲来衡量。

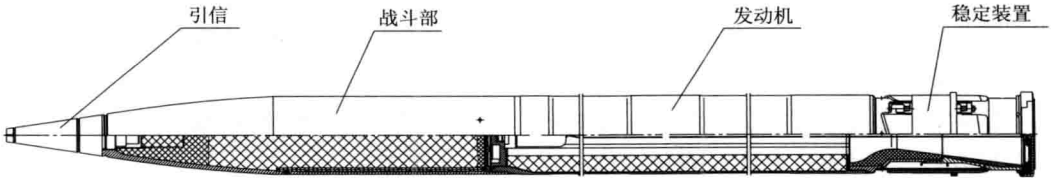


图 13.2　火箭弹示意图

13.1 发射药/推进剂的特性简介

13.1.1 发射药的类型和组成

1. 发射药的种类

发射药按物态，可分为固体发射药和液体发射药。固体发射药是一种自身含有氧化和可燃成分，并具有一定形状的固体，受到外界的激发冲量时，能迅速有规律地燃烧，同时放出大量的热和气体，推动弹丸做功的含能物质。主要用于枪炮发射弹丸。近一二十年来，也有人研究液体发射药，使用时在燃烧室中燃烧。这和固体发射药的使用是两个完全不同的系统。本书所指的发射药只限于固体发射药。

发射药根据其形态、结构、加工方法和基本燃烧性质可分为均质发射药和异质发射药。

1）均质发射药

以硝化纤维素（硝化棉）为主体成分的称为均质发射药。硝化纤维素和溶剂作用形成单相的结构均匀体，经过塑化、密实和成型等物理及机械加工过程而成为一种固体发射药。如果含能成分中仅有硝化棉高分子材料，称为单基发射药；如果还含有其他含能溶剂，则称为双基发射药。通常含能溶剂为硝化甘油。为了降低发射药对武器的烧蚀性，也有用硝化二乙二醇或硝基叔丁三醇三硝酸酯来取代或部分取代硝化甘油。同时也为了改善双基发射药的力学性能，也有用硝化三乙二醇或硝化二乙二醇和硝化甘油按一定比例组成混合硝酸酯溶剂，也有同时采用以上三者作混合溶剂的。这样制成的发射药，通常称为混合硝酸酯发射药。

双基发射药又因制造过程中是否加挥发性溶剂而分为两个类型。如用高氮量硝化棉作原料，仅靠硝化甘油还不能使其完全塑化还需加挥发性溶剂（如丙酮）来完成双基药的制造，这种方法所制得的发射药称为柯达型双基发射药；若用低氮量硝化棉，则不需附加挥发性溶剂，这种方法制成的双基发射药称为巴利斯太型双基发射药。

2）异质发射药

异质发射药是在可燃物或均质发射药的基础上加入一定的固体氧化剂混合而成的发射药。在双基发射药的基础上加入一定量的固体炸药而制成的发射药称为三基发射药。为了降低发射药对炮膛的烧蚀性并减少火焰和烟雾而加入硝基胍，这类三基发射药多用挥发性溶剂发射药生产工艺来制造。为了提高发射药的能量，在双基发射药的基础上加入了黑索今，通常称为硝胺发射药。有时为了改善发射药的某种特性，在双基发射药的基础上加入固体混合物，组成三基发射药。

2. 发射药的组成

1）发射药主要性能参数

(1) 火药力。1 kg 发射药在绝热定容的条件下进行燃烧，其燃烧后的产物，自由膨胀到 1 个大气压时所做的功，单位为 J/kg。

(2) 爆热。1 kg 发射药在隔绝空气氧的条件下进行绝热定容燃烧，并使燃烧产物冷却到规定温度时(水为液态)，所放出的热量，单位为 J/kg。

(3) 定容火焰温度。发射药定容绝热燃烧后，燃烧产物所达到的最高温度。

(4) 定压火焰温度。发射药定压绝热燃烧后，燃烧产物所达到的最高温度。

(5) 比容。1 kg 发射药燃烧后，气体生成物在标准状态下(水为液态)所占的体积，单位为 L/kg。

(6) 余容。1 kg 发射药气体的分子体积在气态方程中的容积修正，单位为 cm^3/kg，其物理意义是 1 kg 发射药气体分子本身不可压缩的体积。

(7) 比热比。又称绝热指数，为燃气平均定压比热与定容比热之比。

(8) 燃速温度敏感系数。在一定压力条件下和某一温度范围内，发射药初始温度变化 1 ℃时，燃烧速度的相对变化量。

(9) 化学安定性。发射药在储存条件下，保持其化学性能不发生变化的能力。

2) 单基发射药

单基发射药是以硝化纤维素为主要组分，含量一般在 85%(按质量比)以上，其余为附加成分和化学安定剂。制造工艺均采用醇醚溶剂溶塑硝化纤维素挤压成各种形状尺寸。主要用于各种口径的加农炮和榴弹炮发射装药，用于轻武器时采用粒状药。

例 1　美国 M1 单基发射药质量组分(%)

硝化纤维素(w(N)=13.15%)	85.00	二苯胺	1.00～1.20
二硝基甲苯	10.00	乙醇	0.75
酞酸二丁酯	5.00	水分(残余)	0.50
火药力	911.05 kJ/kg		
定容火焰温度	2 417 K		

例 2　美国 M10 单基发射药质量组分(%)

硝化纤维素(w(N)=13.15%)	98.00	石墨(外加)	0.10
硫酸钾	1.00	乙醇(残余)	1.50
二苯胺	1.00	水分(残余)	0.50
火药力	1 012.6 kJ/kg		
定容火焰温度	3 000 K		

例 3　中国 12/7 单基发射药质量组分(%)

硝化纤维素(w(N)=12.8%～13.0%)	98.00	外挥	1.00～1.80
二苯胺	1.00～2.00	总挥	≤4.80
内挥	≥1.00		
火药力	994.8 kJ/kg		

定容火焰温度　　2 822 K

3）双基发射药

主要由硝化纤维素、硝化甘油和附加组分组成。由于主要组分是硝化甘油和增塑硝化纤维素两种含能硝酸酯化合物，因此，这种发射药称为双基发射药。利用两种以上多元醇硝酸酯增塑硝化纤维素叫混合硝酸酯发射药，属双基发射药。其制造工艺有溶剂法和无溶剂法挤压成型，最早利用丙酮作溶剂生产的双基发射药叫柯达型发射药，无溶剂法生产的双基药被称作巴利斯太型双基药，主要使用在各种口径的加农炮、无后座力炮。双基球形药则用于迫击炮和轻武器发射装药。

例 1　美国 M2 双基发射药质量组分（%）

硝化纤维素（w(N)＝13.25%）	77.45	乙基中定剂	0.60
硝化甘油	19.50	石墨	0.30
硝酸钡	1.40	乙醇（残余）	2.30
硝酸钾	0.75	水分（残余）	0.70
火药力	1 075.33 kJ/kg		
定容火焰温度	3 319 K		

例 2　美国 M8 双基发射药质量组分（%）

硝化纤维素（w(N)＝13.25%）	52.15	酞酸二乙酯	3.00
硝化甘油	43.00	乙基中定剂	0.60
硝酸钾	1.25	乙醇（残余）	0.40
火药力	1 141.05 kJ/kg		
定容火焰温度	3 695 K		

例 3　中国双芳-2 双基发射药质量组分（%）

硝化纤维素（w(N)＝11.75～12.09%）	56	中定剂	3
硝化甘油	25	凡士林	1
二硝基甲苯	9	水分	≤0.70
酞酸二丁酯	6		
火药力	941.68 kJ/kg		
定容火焰温度	2 424 K		

4）三基发射药

是指在双基发射药的基本组分中，加入硝基胍及类似的固体炸药的发射药，采用溶剂法挤压成型工艺生产，主要用于大口径榴弹炮和加农炮装药。

例 1　美国 M30 三基发射药质量组分（%）

硝化纤维素（w(N)＝12.60%）	28.00	石墨	0.10（外加）
硝化甘油	22.50	冰晶石	0.30
硝基胍	47.70	乙醇（残余）	0.30

乙基中定剂	1.50
火药力	1 087.28 kJ/kg
定容火焰温度	3 040 K

例 2　中国三胍-11 三基发射药质量组分(%)

硝化纤维素(w(N)=12.60%)	28.00	中定剂	1.50
硝化甘油	22.50	其他	0.30
硝基胍	47.70		
火药力	1 087.28 kJ/kg		
定容火焰温度	3 040 K		

20 世纪 70 年代中期，国外开始研制硝胺发射药，由硝化纤维素、硝化甘油和硝胺类炸药(如黑索今或奥克托今)等组分组成，是一种高能发射药。为了提高武器弹药战场生存能力，有效地减少高速破片和火焰引起的弹药燃烧、爆炸事故，发展了低易损性发射药，主要由 70%～85%的黑索今或奥克托今、15%～30%的黏合剂和其他附加物组成。低易损性发射药已受到国内外的高度重视，具有良好的发展和应用前景。

5) 液体发射药

液体发射药的研究已取得了较大的进展，与固体发射药相比，液体发射药能量高、烧蚀性小、成本低，可取消药筒，便于火炮操作自动化，可使弹丸初速达到 2 000 m/s 以上。已研制的液体发射药有硝基羟铵、过氧化氢、肼等，液体发射药的发展依赖于使用液体发射药的关键技术的突破，预测液体发射药火炮和电热炮将成为新概念火炮发展的重点。

6) 发射药装药

通常是指保证武器在具有一定弹道性能的条件下，满足一次发射所需要的发射药及其他装药元件，按设计的结构的组成分为装药元件与装药方式。

(1) 装药元件。构成发射药装药的元件包括发射药、点火药、护膛剂(或护膛衬纸)、消焰剂、紧塞具和密封盖等。

(2) 装药方式。按照弹药的装填方式和装药结构的特点，发射装药可以分为定装式装药和分装式装药。定装式装药是把发射药装在药筒内与弹丸连成一个整体一次装填的装药。根据所能达到的弹道效果，定装式装药可分为定装式全装药(满足弹丸获得规定最大初速的发射装药)和定装式减装药(使弹丸小于最大初速的发射装药)。分装式装药是装药和弹丸不连成整体，两次装填的装药，分为药筒分装式装药和药包分装式装药。分装式装药一般都是可变装药，包括全变装药和减变装药两组，在射击前根据战术需要在阵地上从装药中取出定量的附加药包以改变其装药量。

正在使用和研制中的新型装药结构有密实装药、随行装药和模块装药。尤其是大口径火炮，如 155 mm 榴弹炮，由布包装药改成可燃容器模块装药，又叫刚性组合装药，以提高射速和便于自动装填。模块装药为满足从最小到最大射程范围的需要，由多个模块组成，可为全等式模块装药(各装填模块相等)和不等式模块装药两种。

3. 固体推进剂的类型及组成

按组分可分为双基推进剂、复合推进剂和复合改性双基推进剂。推进剂装填在火箭发动机中通过燃烧形成高温高压气体由喷管喷出膨胀做功，推动火箭弹、导弹把有效载荷战斗部等运送至目的地。不同的火箭弹、导弹对推进剂的性能指标要求不同。

固体推进剂的主要性能参数：

① 比冲：在火箭发动机工作条件下，1 kg 固体推进剂所产生的冲量。

② 密度比冲：固体推进剂密度和比冲的乘积，是衡量固体推进剂能量指标的主要参数。

③ 特征速度：喷管喉部面积和燃烧室压力的乘积与喷管中燃气每秒质量流量之比。

④ 燃烧速度：固体推进剂单位时间内沿燃烧表面法线方向固相消失的距离。

⑤ 燃烧压力指数：表征燃烧速度对压力变化的敏感程度。

⑥ 抗拉强度：试样在拉力试验过程中所能承受的最大拉力。

⑦ 应变：物体在形变或流动过程中所显示的尺寸变化率。

⑧ 延伸率：试样在拉力试验过程中断裂前，瞬间长度增加的百分数。

⑨ 弹性模量：在材料的比例限度内应力与相应应变之比。

此外，还有表征储存性能、危险性能等的参数。

1）双基推进剂

双基推进剂以硝化纤维素和硝化甘油为基本成分，辅以增塑剂、燃速催化剂、弹道改良剂、安定剂等组分组成。制造工艺有挤压成型和浇铸成型两种，挤压成型制造的固体推进剂最大尺寸受到限制，一般在 ϕ400 mm 以下，药型比较简单，适于自由装填式装药。浇铸成型可制造与发动机壳体黏结的发动机装药，可生产药型比较复杂的大型发动机装药，也可生产自由装填式装药。双基推进剂质量均匀，性能稳定，重现性好，燃烧压力指数能早现平台效应，具有良好的低特征信号。其缺点是能量低、低温力学性能差。双基推进剂适应中近程火箭发动机装药，尤其在燃气发生器和复合增程大口径炮弹发动机装药中将发挥重要的作用。典型的双基推进剂配方如下。

例 1 美国 JPN(N-2)压伸双基推进剂质量组分(%)

硝化纤维素(w(N)=13.25%)	51.40	硫酸钾	1.25
硝化甘油	42.90	蜡	0.02
酞酸二乙酯	3.23	炭黑	0.20
一号中定剂	1.00		
比冲	2 156～2 254 N·s/kg		
密度	1.61～1.62 g/cm^3		

例 2 美国 AHH 浇铸平台双基推进剂质量组分(%)

硝化纤维素	53.90	水杨酸铅	1.20
硝化甘油	31.60	2-乙基己酸铅	2.00

甘油三醋酸酯	8.80	其他	1.60
2-硝基二苯胺 0.90			
比冲(计算值)	2 205 N·s/kg		
密度	1.602 g/cm^3		

例 3　中国双铅-1 推进剂质量组分(%)

硝化纤维素	56.00	凡士林	1.20
硝化甘油	26.70	碳酸钙	0.90
二硝基甲苯	11.30	氧化铅	0.90
二号中定剂	3.00		
比冲	1 952.16 N·s/kg		
密度	1.57 g/cm^3		

2) 复合推进剂

复合推进剂由高分子黏合剂、固体氧化剂、金属燃料粉和其他附加组分组成。氧化剂通常采用高氯酸铵,金属燃料为铝粉。黏合剂种类繁多,从最早沥青、聚硫橡胶到聚氨酯、聚丁二烯类推进剂。

(1) 聚硫橡胶推进剂利用液态聚硫橡胶加入氧化剂制成聚硫橡胶推进剂,并在中小型火箭弹中应用。其缺点是能量低、易老化、低温延伸率差,它的应用已降至次要地位。

例 1　美国 TRX-135 聚硫复合推进剂质量组分(%)

LP-33 聚硫橡胶	16.93	苄硫醇	0～10
LP-3 聚硫橡胶	1.88	TP-90B	2.09
高氯酸铵	74.00	硫/氧化镁等	3.10
Fe_2O_3	2.00		
比冲(理论值)	2 224.60 N·s/kg		
密度	1.74 g/cm^3		

例 2　中国 815A 聚硫复合推进剂质量组分(%)

乙基聚硫橡胶	19.00	环氧树脂	1.00
酞酸二丁酯	2.00	弹道改良剂	2.00
高氯酸铵	65.00	其他	3.00
铝粉	8.00		
比冲(理论值)	2 399.04 N·s/kg		
(实测值)	2 107 N·s/kg		
密度	1.76 g/cm^3		

(2) 聚氯乙烯推进剂。聚氯乙烯加入固体氧化剂、金属粉和增塑剂混合,既可挤压成型,又可浇铸成型,成本低、易加工。其缺点是低温力学性能差、较脆,适宜于采用自由填装的中小型火箭发动机装药。

例 美国 Arcite 373D 聚氯乙烯复合推进剂质量组分(%)

聚氯乙烯	8.26	癸二酸二辛酯	10.79
高氯酸铵	58.90	钡盐或镉皂	0.34
铝粉	21.10	脱湿剂	0.25
比冲(理论值)	2 528.46 N·s/kg		
密度	1.74 g/cm^3		

(3) 聚氨酯推进剂。聚氨酯推进剂的能量较高、固化收缩率小,在较宽的使用范围内,力学性能好。其缺点是对水敏感,因异氰酸酯基团遇水易反应生成二氧化碳,在推进剂内部会产生气孔,影响装药的力学性能和燃烧性能。

例 美国聚氨酯推进剂质量组分(%)

聚氨酯	24.60	铝粉	15.00
高氯酸铵	60.00	氧化铜	0.40
比冲	2 263.8 0 N·s/kg		
密度	1.66 g/cm^3		

(4) 聚丁二烯推进剂。聚丁二烯类黏合剂自发展以来已研制了四大类推进剂。

① 聚丁二烯丙烯酸推进剂。由于黏合剂分子链中羟基官能团沿主链无规则分布使得推进剂的力学性能和重现性差,已被淘汰。

② 聚丁二烯—丙烯酸—丙烯腈推进剂。由于黏合剂分子中引进丙烯腈基团,提高了推进剂的力学性能和热稳定性。

③ 端羟基聚丁二烯(CTPB)。比聚氨酯推进剂具有更高的能量和更好的力学性能,但是存在着固化速度慢、副反应多、易引起老化和后固化的缺点,影响使用寿命。

④ 端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂。是目前综合性能最好的一种推进剂,广泛用于各种战略战术导弹、火箭发动机装药。

例 1 美国 UTP-19360D 端羟基聚丁二烯复合推进剂质量组分(%)

端羟基聚丁二烯	13	铝粉	18
高氯酸铵	68		
比冲(理论值)	2 588.2 N·s/kg		
密度	1.77 g/cm^3		

例 2 中国 863 丁羟复合推进剂质量组分(%)

端羟基聚丁二烯	13	癸二酸二辛酯	2
高氯酸铵	69	催化剂	1
铝粉	15		
比冲(理论值)	2 646 N·s/kg		
(实测值)	2 342.2 N·s/kg		
密度	1.74 g/cm^3		

3）复合改性双基(CMDB)推进剂

最早的复合改性双基推进剂是以双基黏合剂(硝化纤维素＋硝化甘油)固体氧化剂及金属粉为基础组成，进而发展出了交联改性双基(XLDB)以及硝酸酯增塑聚醚推进剂(NEPE 推进剂)。

CMDB 推进剂能量高、密度大、原料价格便宜、生产有基础。缺点是力学性能较差、使用温度范围较窄、危险等级高。XLDB 推进剂用交联剂对推进剂中的硝化纤维素中剩余的羟基基团进行交联反应，从而改善了推进剂的力学性能。

例 1　美国 CY-1 改性双基推进剂质量组分(%)

硝化纤维素	22	2-硝基二苯胺	2
甘油三醋酸酯	32	高氯酸铵	20
硝化甘油和铝粉	21	其他	3
比冲	2 459.8 N·s/kg		
密度	1.77 g/cm^3		

例 2　美国 VTQ 交联改性双基推进剂质量组分(%)

硝化纤维素＋硝化甘油＋交联剂＋稳定剂＋固化催化剂	23.00
高氯酸铵	4.00
铝粉	19.00
奥克托今	54.00
比冲(理论值)	2 597 ～2 646 N·s/kg
密度	1.79 g/cm^3

硝酸酯增塑聚醚推进剂以聚乙二醇或环氧乙烷－四氢肤喃共聚醚为黏合剂，以硝化甘油和 1,2,4-丁三醇三硝酸酯等混合硝酸酯为增塑剂，以奥克托今、高氯酸和铝粉等固体添加剂为基础组成。它发挥了双基推进剂和复合推进剂各自的优点，组成一种能量高、力学性能及工艺性能良好的固体推进剂，代表着当前固体推进剂的发展方向。

由于弹药的需求不同，要求发展低特征信号推进剂、高燃速推进剂和缓燃推进剂。根据弹道性能、工艺可行性和结构完整性的要求，设计制造各种形状尺寸的装药(如管状、星孔、车轮型等)。为了控制推进剂的燃烧面积以及对发动机壳体的隔热作用，发展了绝热包覆技术，涉及了高聚物和填料的选择、表界面、增塑黏结及阻挡层等技术。

13.1.2　身管武器对发射药及其装药的技术要求

1. 发射药与身管武器的关系

发射药是身管武器的一个组成部分，是武器进行抛射的能源，而武器又是发射药正常发挥作用的环境和条件，它们是通过武器的总体设计而组成为互相联系的整体。武器射击时，首先是发射药燃烧，再通过燃烧产物的膨胀推动弹丸，使弹丸获得一定的速度。全过程的完成即为发射药化学能转变为弹丸动能的能量转化过程。发射药和身管武器之间

互相促进和互相制约的关系，在它们的发展中充分地显示出来。早期具有燃爆和远距离抛掷功能的黑火药的发明，促进了身管武器的诞生并最终取代了冷兵器；至19世纪，硝化棉发射药的出现，不仅能消除射击时的烟雾，还能明显地提高身管武器的射程；双基无烟药和现代发射药的发展，又进一步增大了身管武器的威力和提高了武器的综合性能。另一方面，高强度、耐烧蚀金属等武器材料及其结构的发明，又促进了高能发射药的发展。发射药在身管武器中的地位和它们之间的依存关系，表现在下面几个方面：

(1) 身管武器的发射效能(初速或射程)主要取决于发射药的能量及其利用率。

(2) 身管武器的寿命、内膛结构的破坏与发射药燃气的热作用、化学作用和冲刷作用有直接关系。

(3) 发射药的质量、装药结构、点传火性能直接影响身管武器的射击精度，发射药的高密度装药对弹道的稳定性影响更大。

(4) 发射药的性质(如燃气的化学性质、发射药的力学性质)明显地影响武器的战斗环境和武器的使用效果。武器射击过程中的各种有害现象(如烟、焰、噪声、冲击波、膛胀、膛炸)都与发射药性质有关。

(5) 发射药及其装药能够影响武器的机动性和勤务处理，整体的、刚性的装药能简化武器的操作程序，增加武器的使用寿命。

2. 身管武器对发射药及其装药的基本要求

远射程、高初速、高射速等各类火炮与迫击炮，对发射药及其装药的要求不完全一致。但它们对发射药及其装药有共同的最基本的要求：

(1) 发射药应有足够的能量，在火炮药室限定的条件下，满足装药能量密度和炮口动能的需要。

(2) 发射药应有良好的燃烧性能，特别是稳定燃烧的性能。射击时，装药能按照设计的程序有规律地释放气体和能量。

(3) 发射药要有较好的力学性能，在运输、储存和射击过程中，特别是在低温射击过程中，发射药应具有足够的强度，能承受外界的机械冲击和装药高压燃气的冲击以及药粒彼此间的挤压或碰撞。

(4) 发射药的烧蚀性应尽量小，在满足弹道性能的前提下，要保证火炮有较高的寿命。

(5) 射击时，燃烧的装药应避免形成炮口焰和炮尾焰，由膛口流出的气体应少烟和低毒。

(6) 在储存期内，装药不变质，不发生事故，应满足储存期安定性和安全性的要求。

(7) 选用的发射药，应易于生产，原料丰富，成本低廉。

基本要求是身管武器对发射装药的共性要求，大口径远射程火炮、高膛压高初速火炮、高射速火炮、无后坐火炮以及迫击炮，依据它们在战术中的作用和所承担的任务，对发射药及其装药的上述基本要求又有侧重。在基本要求的基础上，还需分别满足一些特殊

要求，有利于发射药潜力的发挥，同时有利于突出武器的特征及其威力。

3. 各类身管武器对发射药的特殊要求

(1) 加农炮和榴弹炮。加农炮和榴弹炮被用来破坏和压制对方的火力点和杀伤有生力量，一般属于中、大口径火炮。大口径远射程火炮体积庞大，质量在数吨以上，价值较高，其机动性和火力突击性多依靠于牵引车辆。因此，火炮的总体设计首先是突出火炮的使用寿命，即每一个身管，必须达到足够的射击弹数，此弹数至少能满足若干次战役的需要才能报废。这不单是经济上的要求，也是勤务操作和保持火炮战斗力的要求。发射威力所受到的影响，可以通过火炮结构的改变、部分地增加火炮的质量和采用运载工具等方法予以补偿。要优先考虑射击精度以及自身的安全性。要避免炮口(尾)焰和烟等有害的射击现象，使火炮能够准确地命中目标并保存自己。因此，加农炮和榴弹炮的发射装药注重于：

① 控制发射药的燃温，使发射药具有低的烧蚀性能。依据该原则，目前榴弹炮和加农炮多采用单基发射药和 M30 或 M31 系列的硝基胍发射药；

② 精选发射药，控制并减少装药的燃尽系数，使燃烧的装药在接近炮口前尽早地燃完，降低火炮射击的中间偏差：

③ 减少发射药中的难燃组分，采用消焰剂等装药原件，减少火炮的焰和烟。

(2) 高初速火炮。反坦克武器对发射装药的根本要求是赋予弹丸以高初速和高动能，达到摧毁装甲的目标。作为高初速火炮，也只能在获得高初速、高动能的前提下对系统进行优化。进一步优化的内容包括：提高火炮的使用压力以充分利用火药的能量；减轻火炮的质量、提高火力系统的机动性能；减少火炮的焰和烟以提高系统的生存能力等。因此，高初速火炮对发射装药的要求集中于：

① 用能量高的发射药和高密度的装药，以获得发射装药的高能量密度，既保证了系统对装药潜能的需要，同时又减少了药室的容积，从而减轻了火炮系统的质量。

② 发射药及其装药应具有良好的力学性能，特别是在高压和高应变速率的环境下，仍能保持燃烧的规律性。

③ 减少发射装药中的难燃组分，采用消焰剂等装药元件，减轻焰、烟及它们对射击条件的影响。

④ 使用低易损性发射装药，防止武器系统的自我毁伤。

(3) 高射速火炮。目前使用高射速技术的火炮，主要是中、小口径的火炮。高射速火炮适合于对付运动目标。近期发展的高射炮、航炮和舰炮，多具有高射速的功能。该类火炮射速高，且连续射击，其射击的持续时间较长，明显地加重了炮管烧蚀与磨损。因此对发射药的要求为：

① 使用具有高渐增性、低烧蚀性能的发射药。

② 炮口少焰、少烟的发射装药。

(4) 迫击炮和无后座炮。迫击炮是伴随步兵作战的压制兵器，用于对付近距离暴露

的和隐蔽的有生力量和技术兵器。为了赋予迫击炮以弹道弯曲、重量轻、操作方便、机动性好的特征，采用了滑膛炮、短炮管、炮口装填、后坐座板的火炮结构，并选取低膛压弹道。

为保证在短行程、低膛压环境下发射药的有效利用，对发射装药的特殊要求是：

① 使用高燃速、易点燃的薄弧厚发射药。已装备于迫击炮的美国 M8 和 M9、苏联的 H6、我国的双迫等发射药都是高燃速、易点燃的薄弧厚发射药，以利于发射药在恶劣条件下被迅速点燃，并迅速建立发射药稳定燃烧条件，保持在较低压下燃烧。

② 采用局部高密度装填的低密度装药结构。

③ 迫击炮装药采用基本药管和附加药包(片)的装药结构。

各类火炮，在考虑装药基本要求及其侧重点的同时，还要结合环境等因素，合理处理和利用发射装药的约束条件，这有利于进一步发挥发射药的潜力和突出武器的特征及其威力。如舰炮由舰运载，炮身可用冷却系统、可以调节对药室容积和炮重的限制条件。充分利用这些条件，选择合适的高能、冷燃甚至低易损的发射装药，以满足发射药效能、寿命、炮口烟、焰等特性的侧重要求。舰炮用发射药不宜用含挥发性较大的含能增塑剂，如硝化甘油。因为舰艇弹药库环境温度较高，这些增塑剂易在通风系统中凝结，造成安全隐患。通常非定装式大口径舰炮不采用双基发射药。

13.1.3 发射药的现状和发展

1. 现装备的发射药

从目前国内外的生产和装备情况看，各种口径的火炮武器仍主要使用单、双、三基发射药。单基发射药以硝化纤维素为主要组分，占 75% 以上，其火药力通常为 925～1 050 kJ/kg，火焰温度 2 400 K～3 040 K，例如美国现装备的单基发射药有 M1、M6、M10、NACO 发射药。近几十年来，特别是在大口径火炮中，除部分仍使用单基发射药外，在很多高性能火炮中，尤其在远射程的大口径榴弹炮、高膛压坦克炮中，采用了双基发射药或三基发射药。双基发射药以硝化纤维素和硝化甘油为主要组分组成。美国的 M2、M5、M8、M9 和 M26 发射药，均为双基发射药。双基发射药能量较高，通常火药力在 1 060～1 150 kJ/kg 之间，火焰温度为 3 100 K～3 800 K。双基发射药的火焰温度高，对炮管的烧蚀较严重。为降低发射药的烧蚀性，在双基发射药的基础上加入硝基胍，组成了三基发射药。西方国家，除俄罗斯外都装备有三基发射药，如美国的 M15、M17、M30、M31 等系列三基发射药，它的火药力在 980～1 088 kJ/kg 之间，火焰温度在 2 500 K～3 040 K 之间。由于烧蚀性较小，因此，三基发射药越来越广泛地使用在各种高性能武器中，例如用于 105 mm、155 mm、M203 火炮的发射装药。

2. 新研制的高能发射药

为适合高膛压火炮，尤其是大口径坦克炮的发展，进一步提高弹丸的初速，以便取代力学性能较差的硝基胍三基发射药，20 世纪 70 年代各国都开展了高能发射药的研究，并取得了一定的成功。

(1) 德国研制的 JA-2 混合硝酸酯发射药。JA-2 发射药用作豹-Ⅱ坦克 120 mm 滑膛炮尾翼脱壳穿甲弹和多用途弹发射药，后者主要用来调节能量指标和提高发射药的力学性能，火药力高达 1 140 kJ/kg，火焰温度为 3 412K(M30 硝基胍三基发射药相应的值为 1 087 kJ/kg、3 040 K)。美国已引进了该发射药用于 120mm 坦克炮。

我国研制的相类似的混合硝酸酯发射药配方和 JA-2 不同的是采用硝化二乙二醇作为发射药增塑剂。硝化二乙二醇的能量较高，但蒸汽压较高，挥发性较大，所以发射药的温度系数较大。美国研制的混合硝酸酯发射药，有的配方采用丁三醇三硝酸酯、三羟甲基乙烷三硝酸酯等，有的配方不用硝化甘油。

(2) 英国坦克炮用的 F527/428 高能硝胺发射药。该发射药的主要组分为硝化纤维素、硝化甘油、黑索今和硝基胍。其中黑索今和硝基胍的质量分数各为 20%，火药力 1 218 kJ/kg，等容火焰温度为 3 688 K。已应用于 L11 式 120 mm 坦克炮的尾翼脱壳穿甲弹中，在膛压为 618 MPa 下，初速为 1 370 m/s。该发射药被命名为 AX/SB4-20 发射药。

我国研制的相类似的高能硝胺发射药配方，其中硝基胍含量占 15.0%，能量与 AX/SB4-20 相当。美国研制的高能硝胺发射药，硝基胍含量占 5%～7%，能量比以上两种都略低。

配方中加入硝基胍的目的旨在解决硝胺发射药的燃烧不稳定问题。若硝基胍和黑索今的比例为 1∶3，就可以解决 RDX 基硝胺发射药的燃烧不稳定问题。

(3) 含混合硝酸酯型硝胺发射药。硝化甘油生产较危险，挥发性较大。美国用三羟甲基乙烷三硝酸酯(TMETN)作为高能增塑剂，并加入一定量三乙二醇二硝酸酯(TEGN)和二乙二醇二硝酸酯(DEGN)，使其增塑效果更好，可使任何级别的硝化纤维素均能与 TMETN 塑化良好。利用它的这一特点或优势和黑索今的优良热化学性能结合在一起，组成不含硝化甘油的混合硝酸酯型硝胺发射药，火药力为 1 185.2 kJ/kg，火焰温度为 3 286 K，显然要比 JA-2 能量性能优越。

(4) 迭氮硝胺发射药。RDX 基硝胺发射药的燃烧问题是：压力指数大，燃速—压力曲线转折。其主要原因是由于异质材料的不同时性燃烧造成的。选择液体迭氮硝胺 1，5-二迭氮基-3-硝基-3-氮杂戊烷(DIANP)和硝化纤维素、硝化甘油制成的 DA 发射药，火药力 1 128 kJ/kg，火焰温度 2 980 K。力学性能好、燃速高、燃速压力指数为 0.90，燃烧性能稳定。其缺点是本身密度较低(1.34 g/cm^3)，能量较低，影响密度火药力的提高。目前生产成本还较高，是制约推广应用的重要因素。

3. 不敏感性(LOVA)发射药

鉴于近 20 年来，世界上曾发生过弹药保养和运输、舰船操作、武器使用等有关的爆炸事故，使人们认识到弹药易损性问题的重要性。从而出现了不敏感性，又称低易损性弹药(LOVA)的概念。弹药易损性是弹药中的火炸药由意外事故而发生反应的敏感程度和所产生爆炸作用的剧烈程度的综合。低易损性弹药即是对发生意外反应的敏感度低，且一

旦发生反应后，所产生爆炸作用的剧烈程度也低的弹药。低易损性发射药的配方研究重点是研究惰性黏合剂取代常用的含能黏合剂硝化纤维素，用耐热炸药取代常用的硝化甘油炸药。后者倾向于采用 2 μm 和 10 μm (6.5∶1)级配的黑索今(RDX)，采用大小颗粒级配的目的是有利于燃烧的稳定性。黏合剂的研究是核心，又是关键所在。

4. 液体发射药

由于液体发射药比固体发射药具有潜在的优势，相同火焰温度下，能量高、流动性好的特点使得压力—时间曲线更加丰满，从而可获得优良的能量和压力利用率。自 20 世纪 40 年代以来，特别是近十几年来，由于液体药在炮膛内的燃烧控制方面的进步，实现了膛内弹道性能的稳定，研制成功了再生注药和以硝酸羟胺(HAN)为基的单元液体药，从而使液体发射药技术出现了大幅度的突破。美国已在 9 mm、25 mm、30 mm、105 mm、120 mm、155 mm 等口径武器上试验，得到较满意的结果，成功地研制了 XM46 液体发射药。

13.1.4 发射药的燃烧机理

近代燃烧理论认为，火药燃烧过程是多阶段进行的，是一个连续的物理化学变化过程。在实际情况下这些阶段不能截然分开，但为了说明火药燃烧过程的实质，以各阶段的特点为依据，可按火药燃烧过程将燃烧变化范围划分为 5 个区域。为此，假设将一个半无限长的药条置于半无限静态介质中，所形成的 5 个区域，如图 13.3 所示。但应指出这些区域的大小和多少还与火药的性质、压力、温度等各种条件有关。

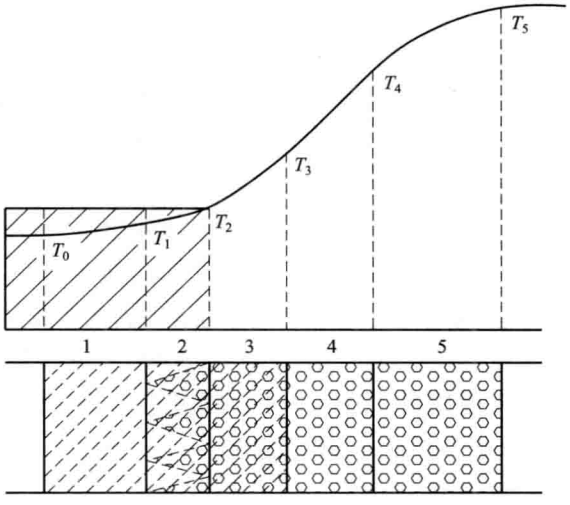


图 13.3 火药燃烧过程图解

1—凝聚相加热区；2—凝聚相反应区；3—气相加热反应区；4—暗区；5—火焰区

第 1 区是凝聚相加热区。点火药燃烧后放出的热量或者由于火药燃烧本身放出的热量，通过传热，很快加热了火药表面层并向火药的内层传递，使得接近表面层的一薄层火

药温度升高，形成温度梯度。这一层火药称为火药加热层。其温度分布是由内向外从火药初温 T_0 逐渐增至 T_1（200 ℃～230 ℃）。在这一区，火药软化但还没有发生化学变化，因此这一区域温度升高仅仅是由于传热，完全属于物理变化过程。

第 2 区是凝聚相反应区。当火药温度增至 T_1 后，火药产生了熔化、蒸发、升华等物理变化。同时火药中的活性成分开始热分解，分解产物发生化学变化。如硝化棉的分解：

$$[C_6H_7O_2(ONO_2)_3]_x \rightarrow xC_6H_7O_2(ONO_2)_3 - q_1$$

$$C_6H_7O_2(ONO_2)_3 \rightarrow 2H_2O + 3NO_2 + C_6H_3O_3 - q_2$$

硝化甘油的分解：

$$R-CH_2-ONO_2 \rightarrow NO_2 + RCH_2O - q_3$$

$$(RCH_2O)_x \rightarrow x_1RCH_2O + x_2R + x_2CH_2O - q_4$$

NO_2 和硝化棉及分解的中间产物还能进一步发生反应：

$$NO_2 + \text{硝化棉} \rightarrow NO + H_2O + NO_2 + C_6H_8O_9 + q_5$$

$$NO_2 + CH_2O \rightarrow 2NO + H_2O + CO_2 + q_6$$

…

式中　$-q$——表示吸热反应；

　　$+q$——表示放热反应。

由上述反应式可以看出，这一区域既有吸热反应又有放热反应，但后者超过前者，从总的热量平衡来讲为正值。温度从 T_1 升到 T_2（约 300 ℃）。

在这一阶段，火药表面为蜂窝状结构。蜂窝状的固态物质就是尚未分解的固体火药，在凹处充满着火药分解后生成的液体和气体物质，化学反应就是在凹处表面或凹孔内进行的。

第 3 区是气相加热反应区。在这个区内，固相反应区的分解产物，其中包括尚未达到完全分解的固体、液体、气体等，都逸出火药本体，形成混合相区，它们之间继续相互作用。在此区，除了固相反应区的一些反应继续进行之外，还可以有下列反应：

$$NO_2 + (HCO)_x \rightarrow NO + CO + H_2O + H_2 + q_7$$

$$NO_2 + CO \rightarrow NO + CO_2 + q_8$$

$$NO_2 + R \rightarrow NO + RO + q_9$$

$$NO + CO \rightarrow N_2 + CO_2 + q_{10}$$

正常情况下，胶体火药在此区放出的热量为 300～400 kcal/kg，温度 T_3 为 700 ℃～1 000 ℃，此时药体几乎完全汽化了。在火药的燃烧过程中，这个区域有很重要的意义，由于在低压下火焰区距燃烧面太远不易供应热能，所以维持火药燃烧过程的热源主要依靠这一区域放出的热量。在低压下，往往到此阶段，反应就停止了。

第 4 区是暗区。在这一区中，中间产物继续反应，主要的化学反应是 NO 还原为 N_2 和完全燃烧物质被氧化。反应如下：

$$NO + CO \rightarrow N_2 + CO_2 + q_{11}$$

$$NO+H_2 \rightarrow N_2+H_2O+q_{12}$$

$$NO+(CHO)_x \rightarrow N_2+CO+H_2O-q_{13}$$

这一区域温度在 1 500 ℃左右。这个温度还不够高，所以火药气体不发光，形成暗区。暗区的长短随火药燃烧条件变化。在低初温下，燃烧气体散热较大，暗区的化学反应很难进行，这一区域无限增长，而使燃烧过程中断或停止。而在高温下，暗区会被压缩，气体浓度增大，温度增高，对周围介质的热损失也会减小，因而化学反应速度加快。

第 5 区是火焰区。这一区直接与暗区相联，火焰区的出现与气体的温度升高有关，一般火药气体加热至 1 800 ℃时即可开始发光。而无烟火药，按其成分不同火药气体的温度最高可达 2 200 ℃～3 300 ℃。

这一区是第 4 区的继续。化学反应激烈，火药的能量 50%是在这一区域内释放出来的。其主要反应如下：

$$2NO+CO+H_2 \rightarrow N_2+CO+H_2O+q_{14}$$

此化学反应完成后，全部燃烧反应即告结束，生成最后生成物，温度升至最高温度 T_5。

在实际火药燃烧过程中，这 5 个区域并不存在严格的分界，而是一个连续的过程。在不同的燃烧条件下，有时只有其中的几个区，这决定于火药组分、温度、密度以及外界压力等条件。

发射药在膛内燃烧是一个复杂的随机过程。除了身管内膛和弹丸结构因素外，还受其他装药元件的直接影响。随着高性能武器的发展，不仅选用高性能发射药，而且还引入新型的装药元件和结构。因此研究膛内燃烧问题显得十分迫切。由于问题的复杂性，目前只能停留在一定的装药结构及元件的基础上，采用比较的方法，研究膛内的某些燃烧特征，以评估它的使用安全性。其基本方法是测出膛底和坡膛的 $P—t$ 曲线，进行分析和处理。

13.1.5 发射药的主要性能

1. 发射药的能量设计

1）发射药的能量与身管武器弹道性能的关系

炮弹的最大射程与弹丸的初速、射角、质量及弹道系数等有关，即：

$$X_m=F(V_0,\theta_0,m,C)$$

式中，X_m、V_0、θ_0、m、C 分别为炮弹的最大射程、弹丸初速、射角、质量和弹道系数。当火炮射角、弹丸质量和弹道系数一定时，提高弹丸初速就可以增大炮弹的射程。同样在现代战争中随着坦克防护装甲增厚、增强和飞行器飞行速度的不断提高，高射炮弹和反坦克炮弹也都迫切要求增大初速。由火炮内弹道可知，弹丸初速与火炮的效率、发射药的火药力及其装药量、弹丸质量有关：

$$V_0=\sqrt{\left(1-\frac{T_g}{T_v}\right)\frac{2f_v m_p}{\varphi\theta m}} \tag{13.1.1}$$

式中　T_g——炮口截面上发射药燃气的温度，K；

T_v——发射药定容火焰温度，K；

f_v——发射药定容火药力，kJ/kg；

m_p——发射药质量，kg；

φ——火炮的次要功系数；

θ——与发射药燃气比热容有关的系数($\theta=k-1$)，其中 k 为燃气比热比；

m——弹丸的质量，kg。

f_v 是发射药的定容火药力，是 1 kg 发射药燃烧后的气体生成物在一个大气压下，当温度升高到 T_v(K)时膨胀所做的功。所以 f_v 表示每千克发射药做功的能力：

$$f_v=RT_v$$

式中，R 是气体常数，其物理意义为：1 kg 发射药气体在一个大气压下，温度升高 1 K，对外膨胀所做的功。

火药力是发射药的主要能量示性数之一，是内弹道学中用来衡量发射药具有做功能力大小的特征量。所以发射药的能量和火炮的弹道性能密切相关。

2) 发射药的能量示性数与发射药配方的关系

(1) 组成发射药元素的确定。发射药是一种能自行传播燃烧，自身含有氧化剂和可燃剂或兼具两者的物质。同时，任何发射药能量性能都受其他性能(如烧蚀、烟、焰等性能)的制约。由此决定了发射药组分的元素基本上是 C、H、O、N 系统。加入少量镁、钡、钾、钙和钠等盐类，可减少发射药烟雾。

(2) 发射药的能量示性数。发射药通常以燃烧的形式快速地生成高温高压的燃气，将内部的潜能转化为可对外做功的能量。在身管武器中发射药在燃烧时将化学潜能转换为燃气热能，经燃烧和膨胀两个复杂的过程，转化为弹丸运动的动能，其做功能力的大小可表征为发射药的能量。因此，一般选取比容(W)和爆热(Q_V)值来评定。火药力是比容和爆热的函数，但并非是单值函数。

① 比容。1 kg 发射药燃烧后生成的气体产物在标准状态下所占有的体积(水为气态)称为发射药的比容。以 W 表示，单位为 L/kg。在标准状态下有：

$$W=n\times 22.4\ \text{L/kg} \tag{13.1.2}$$

由(13.1.2)式可知，发射药的比容和 1 kg 发射药燃烧后气体产物的量 n 有关。发射药燃烧产物的平均分子量越小，其 n 值越大，比容越大，发射药的做功能力也越大。分子中氢元素多的化合物，其燃气的平均分子量小，所以发射药配方设计时应选择氢含量多或 H、C 比值大的化合物作为发射药的可燃物。

② 定容火焰温度。温度为 298 K 的发射药在真空或惰性气体中，定容绝热燃烧以后，气态燃烧产物达到的最高温度，为发射药的定容火焰温度，简称火焰温度，即：

$$T_v=Q_v/n\overline{C}_{v,m}+298(\text{K}) \tag{13.1.3}$$

式中　Q_v——1 kg 发射药的定容爆热，kJ/kg；

$\overline{C}_{v,m}$——温度在 298 K～T_v(K)之间，发射药气态燃烧产物的平均定容摩尔热容。

由式(13.1.3)可知，发射药的火焰温度是爆热 Q_v、n、$\overline{C}_{v,m}$的函数，比容 W 更能反映发射药的能量性质。

③ 定容爆热。1 kg 温度为 298 K 的发射药在惰性气体中定容绝热燃烧，燃气产物温度升至 T_v 以后，冷却至 298 K 时所放出的热量。假设在冷却过程中，没有发生其他的化学、物理的变化，以 Q_v 表示定容爆热，则

$$Q_v = \int_{298}^{T_v} n\,\overline{C}_{v,m}\mathrm{d}T = n\,\overline{C}_{v,m}(T_v - 298) \tag{13.1.4}$$

实际上，燃气冷却至 298 K 时必然会有气态水冷凝为液态水，并放出热量。所以实测的爆热值比理论计算值要大。为了使用方便，将实测的发射药爆热规定水为液态时的发射药爆热，记为 $Q_v(1)$。

(3) 发射药能量的检测和评估方法。发射药能量性能的评估包括理论计算和实验检测两个方面。理论计算方法各国不尽相同，由于所使用的基础数据和程序设计方法差异，所得计算值也有所不同。

目前具有实验检测方法的能量示性数有：爆热、比容、火药力和余容。但英、美等西方国家不测火药力和余容，仅在各种规定容积的密闭爆发器中测定相对火药力，比较能量的相对大小和产品的能量性能。我国和苏联、东欧国家则在统一规定的密闭爆发器中做两个装填密度实验，基于阿贝尔—诺贝方程确定火药力和余容。目前，仅采用爆热量来检验产品的能量性能。

2. 发射药燃烧性能的预估

1) 发射药燃烧的特征参数

发射药燃烧的特征参数主要是指发射药燃烧时的燃烧速度以及当温度和压力变化时燃速变化的规律。

(1) 燃烧速度。我国早在古代就发明了火药。但是在火药发明以后的一个相当长的时期内，它并没有在武器上得到应用，原因是它不具有规律燃烧的性质。直到 1880 年，维也里将黑药粉压实，使其密度大于 1.8 g/cm^3，它能够规律地燃烧了，这一发现为火药在武器上的应用奠定了基础。维也里通过大量研究，整理出发射药的燃速 u 经验公式为：

$$u = u_1 p^n \tag{13.1.5}$$

当 $p>98$ MPa，$n=1$，于是

$$u = u_1 p \tag{13.1.6}$$

这就是发射药常用的燃烧速度公式。式中，u_1 为燃速系数；n 为燃速压力指数。

(2) 燃速压力指数。燃速压力指数反映压力对发射药燃速影响的灵敏程度。对于一定的发射药和初温，u_1 为常数，将式(13.1.5)取对数，可得：

$$\ln u = n\ln p + \ln u_1$$

微分后得

$$n=\frac{\mathrm{d}\ln u}{\mathrm{d}\ln p} \tag{13.1.7}$$

n 称为燃速压力指数。它表示发射药在一定温度下(T_0 不变),燃速对压力的相对变化速率。为了保持火炮弹道性能的稳定,一般希望当压力变化时对发射药燃速的影响要小。这样当膛内因某种原因产生压力波动时,燃速不至于变化太大,以至于造成压力更大的波动。硝胺发射药的燃速压力指数较高,甚至大于1,所以配方研制时,将燃速压力指数控制在小于或等于 1 是一个关键问题。

2) 影响发射药燃速的因素

研究发射药燃烧的目的是解决发射药稳定、规律(平行)地燃烧,同时又能满足不同武器对不同燃速的要求。影响发射药燃速的因素很多。主要有以下几方面。

(1) 发射药结构对燃速的影响。发射药应具有均匀而致密的结构,它是保证其燃烧遵从几何燃烧定律的基本条件之一。由于工艺条件的不同,发射药的致密性是不一样的,密度大的发射药,燃速小;相反,密度小的发射药,燃速就大。例如,1.32 g/cm^3 密度的某种单基药的燃速系数 u_1 为 1.575 mm/(s·MPa),而密度 1.549 g/cm^3 的单基药,其燃速系数只有 0.124 mm/(s·MPa),可见影响之大。

结构不够致密的发射药,例如吸收药,不经过压滤,直接压伸成型,内部空隙率大,不但燃速高,装药的弹道温度系数也小。然而,通常情况下,要求发射药具有致密的结构,以保证弹道性能的稳定。否则会造成力学性能急剧下降,致使发生弹道反常,甚至膛炸等现象。

(2) 发射药组分对燃速的影响。火药燃烧时,在燃烧面附近,存在不同的物理化学变化区,即通常所说的凝聚相加热区、凝聚相反应区、气相加热反应区称为混合区、暗区、火焰区与燃烧产物区。前 5 个燃烧区可以看作是一种波,即燃烧波,燃烧波的传播速度就是火药的线性燃速。

① 主要组分的影响。发射药的燃速主要决定于发射药凝聚相反应放出的热量与气相反应的热反馈,而这两部分热量又与发射药的主成分有关。发射药组分中氧化基团的摩尔分数越高,与可燃基团的比值越接近化学当量比,则燃烧放热愈多,起始分解温度也愈低,燃速就愈高。如在单基药中增大硝化棉的含量和含氮量;在双基发射药中增加硝化甘油的含量;在改性双基发射药中增加氧化剂的含量,都可以提高发射药的燃速。

② 三基发射药中氧化剂粒度的影响。三基发射药、硝胺发射药是在双基发射药的基础上加入硝基胍、黑索今而制得的。硝基胍的粒度、晶形和黑索今的粒度对发射药的燃速都有一定影响。硝基胍和黑索今的粒度小,发射药的燃速低;粒度大,燃速高。所不同的是,硝基胍的加入,使硝基胍发射药(三基发射药)的燃速比对应的双基药燃速要小,这是因为硝基胍的能量比双基药基体的能量要低。针状硝基胍比粒状硝基胍组成的硝基胍发射药的燃速要高,这是因为针尖应力集中造成微裂痕所致。而硝胺发射药,由于黑索今的加入,使低压下的燃速低于双基发射药,而高压下的燃速高于双基发射药。这是因为黑索

今发射药的燃速压力指数较高所致。黑索今的粒度小，硝胺发射药的燃速就小，这是因为黑索今充分和双基基体接触，接触面大，黑索今是熔融后分解，熔融和分解吸热多，故燃速下降。若黑索今的颗粒大，由于它的热分解迟后于双基组分，它的颗粒将被抛出燃烧表面，在气相中完成燃烧，提高了气相区的温度，反馈给燃面的热量增多，因而使燃速提高。同时在固相表面扩大了燃烧表面，也使燃速提高。

③ 三基发射药中多氮化合物的影响。对于提高发射药的能量，增加发射药的比容，降低燃气平均分子量，提高发射药的火药力也是一条重要途径。比较有效的办法是添加多氮元素化合物。

这类化合物所组成的发射药在低压下燃速就很高。但是这类化合物密度较低，所制成的发射药密度也低，影响装填密度。火药力提高了，密度降低了，密度火药力并不很高，因为两者对弹道性能的影响是相同的，所以对提高弹丸初速是有限的。

④ 附加成分对燃速的影响。发射药中为某种需要而加入一些附加成分。如二氧化钛、冰晶石、硝酸钾等。这类材料对提高发射药的燃速有一定影响，通常用量较小，效果不明显。如果加入聚氨酯硬泡粉末或分子筛之类的材料，由于改变了发射药内部结构，增加了空隙率，则有利于燃速的提高。

(3) 压力对发射药燃速的影响。发射药都是在一定的压力下燃烧的。式(13.1.5)表明燃速与压力指数有关。不同的发射药，其压力指数是不同的。

通常压力指数 $n=0.5\sim1.0$，它的大小反映了发射药燃速对压力变化的敏感程度。n 值越大，发射药对压力变化就越敏感；n 值小，则反之。硝基胍发射药的燃速压力指数比双基药小，硝基胍的燃烧受压力的影响较小，其 n 值为 0.15，所以由它组成的发射药，压力指数也较小。这是因为硝基胍受热后先熔融再进行热分解，熔融层保护了燃气向药粒内部渗透，起到了缓冲的作用。而含黑索今的硝胺发射药，其表观压力指数可大于 1。在不同的压力范围内，压力指数是不同的，在某一个压力区，表观压力指数可达 1.2 以上，甚至更高。

(4) 初温对发射药燃速的影响。发射药的初温随不同的地区、季节、时间而变化。未燃发射药的初温会影响其燃速，通常而言，初温高、燃速高。发射药燃面的温度越低，初温对燃速的影响越大。高能发射药的燃速温度系数常大于低能发射药，所以发射药设计中要特别注意考虑新组分的物理化学性能，综合考虑其对燃面温度的影响。

13.1.6 发射药的发展趋势

身管武器，特别是大口径榴弹火炮和坦克炮是地面武器的主力，是 21 世纪陆军优先发展的武器，其发展目标应具有战略灵活性，精确打击能力，高杀伤威力，远射程和快速发射的能力。

(1) 21 世纪初的 20～30 年，预测发射药的主要组分仍是碳、氢、氧、氮系材料。由于身管武器要求发射药能量高、烧蚀低，要在膛内瞬间燃烧完全，不允许有固体残渣留入膛

内，为了提高能量，降低烧蚀，应发展高能量密度材料和迭氮类化合物。

(2) 不敏感发射药的研究开始受到了人们的重视，这种药又称低易损性弹药(LOVA)发射药。坦克、军舰内弹药舱要受到交战双方穿甲弹、爆破榴弹的威胁。据统计，战场上 60%的坦克损坏是因装甲穿透后弹药舱发生爆炸造成的。因此对新研制的含能材料提出了具体的要求：对高速金属破片或空心装药射流穿透导致的引燃只有较低的易损性，一旦引燃，在低压力条件下燃速较低，从而能使发射药在药筒被击穿的情况下熄火。

(3) 刚性模块组合装药将是未来大口径榴弹炮的发射装药。刚性组合装药的研制是为了 21 世纪先进加榴炮系统弹药用的发射装药，其主要优点是便于实现装药、装填和发射的自动化，从而满足未来先进野战火炮系统的高射速、远射程、具有最小的发射特征信号和对炮管的烧蚀性小等要求，它将是 21 世纪发展的主要装药。

(4) 反坦克火炮将进一步提高动能，预计可达到两倍于目前 120 mm 自行火炮的动能，可能采用新型高能、低烧蚀发射装药，其点、传火技术是该装药结构研究的关键技术之一，有可能采用非传统的激光点火装置和分装式弹药的连接系统。

(5) 火炮超高速新型发射技术将有重大进展，提高初速增加武器系统的杀伤威力和综合作战效能，满足“精确打击、高效毁伤”的作战效果始终是火炮发射追求的目标。

炮弹初速低于 2 km/s 的火炮发射技术，通常称为常规发射技术，初速为 2～2.5 km/s 的称为高初速发射技术，初速大于 2.5 km/s 则称为超高初速发射技术。21 世纪战术炮的初速有望达到 2 km/s 以上数量级。为了达到高初速可能采用密实技术，使装填密度由小于 1 g/cm^3 提高到 1.35 g/cm^3 以上，装药量与弹丸质量比值增加到 40%以上，可望在最大膛压不变的情况下提高炮口动能 20%。还将广泛采用低温感技术、钝感与阻燃或变燃速技术。

发展随行装药技术。随行装药关键技术之一是需要获得高达 1～500 m/s 的超高燃速发射药，超高燃速发射药研制的关键是探索新型速燃材料。

(6) 发展新概念火炮弹药技术。目前正在论证和研究的新概念火炮的发射技术有液体发射药发射技术、电热化学能发射技术、冲压发射技术和电磁发射技术。21 世纪有望实现液体发射药发射技术，尤其是实现电热化学能发射技术。电热化学能炮是靠强电能激发等离子管产生高温、高速的等离子体点燃固、液体发射药，燃烧产生大量的高温气体膨胀做功，发射弹丸。最明显的优点是火药力可提高到 1.6～2.0 MJ/kg，初速可达 2.0～3.0 km/s，

电热化学能炮火焰温度不超过 3 000 K，其炮口动能比常规火炮高 10%～15%，可用做车、舰、机载武器以及未来防空反导、反装甲和远程压制武器，陆、海、空军都可使用。

13.1.7　固体推进剂的发展趋势

精确打击的战略导弹、战术导弹是今后武器发展的重点，战略导弹寻求最佳推进剂性

能——提高比冲和密度比冲仍将是今后研究工作的重点，同时还将致力于提高发动机质量比及弹头小型化。

从发展的历程分析，固体推进剂的发展规律可归纳为：

(1) 提高能量始终是固体推进剂追求的最重要的目标，衡量推进剂性能的指标也逐步从单一能量指标转向综合性能指标。

(2) 黏合剂是贯穿整个发展历程的又一主线。黏合剂成为推进剂更新换代的重要标志，如黏合剂经历了由 NC/NG 含能黏合剂、惰性黏合剂(聚氨酯、端羟基聚丁二烯)，到现在的含能黏合剂(混合硝酸酯增塑的聚醚、GAP、BAMO)的发展过程。黏合剂的发展也促进了推进剂力学性能、工艺性能、老化性能等的不断改进。

(3) 新的原材料的研制和引入是促使推进剂发展的主要技术途径。

固体推进剂技术发展过程逐步打破了“炸药与火药”“双基与复合”的传统界限，形成了相互交融、推动发展的成功经验。进而设想打破“液体与固体”的界限，探索非液非固推进剂有可能成为推进剂进一步发展、提高性能的重要技术方向。

新型含能材料的开发研究应满足热稳定性良好、感度低推进剂与其他组分相容(特别是与黏合剂固体能长期共存)、毒性低、经济性合理等要求。具体而言，新型推进剂的研制应满足以下几方面的要求：

(1) 发动机装药用推进剂。寻求最佳推进剂性能比冲和密度比冲仍将是今后研究工作的重点，与之同步的还将致力于提高发动机质量比(采用比强度高的复合材料壳体、喷管材料和绝热层)以及战斗部小型化，能量的提高可使设计和应用更加灵活。在全弹尺寸不变的前提下，其射程更远，突防能力更强，可打击的目标更多，实现战略导弹及其他弹药的小型化以便机动和运输，同时降低了成本并可相应增加弹药数量。

战略导弹发动机装药及其他弹药用推进剂在 21 世纪仍然是向高能方向发展，从固体推进剂能量特性的热力学和含能材料的最新进展这两方面进行理论预测，以实际达到的可能性来分析高能推进剂发展趋势：预计理论比冲会提高 2%～5%，密度比冲提高 3%～8%，而主要技术途径集中在含能黏合剂和含能氧化剂的应用。

(2) 不敏感弹药是坦克、军舰、机载武器需求的重点弹药，美国要求在 1998 年前各类导弹必须符合不敏感弹药要求。

在射程需求方面，空—地、空—舰、舰—舰弹药对远距离目标探测和鉴别能力的提高以及为避开敌方的防御，需要射程有明显的增长。从原理上分析，采用吸气式推进系统可以解决这一矛盾，其方案有：采用涡轮喷气发动机、冲压发动机和涡轮冲压复合发动机。

超速发动机装药能使弹药速度达到更好的穿甲要求。超高燃速推进剂的发展是超速发动机装药的重要技术基础。

在上述需求条件下，发动机装药通常采用三类推进剂：双基(挤压成型或浇注成型)推进剂、惰性黏合剂复合推进剂和含能黏合剂复合改性双基推进剂。前两类推进剂有比较长的发展历史，21 世纪还将继续使用一个相当长的时期，它仍应向扩大燃速范围和降低

成本、提高质量和改进生产工艺方向发展。第三类推进剂研究的重点是高能、低特征信号和低易损性。低特征信号推进剂是 21 世纪发动机装药发展的主要方向，其关键技术是高能、低感和低特征信号推进剂技术，这类推进剂比冲将达到 2 255～2 451 N·s/kg。

在推进剂品种方面将开展改性双基低特征信号推进剂(XLDB、EMCDB)的研究。迭氮聚醚类推进剂将会成为发展重点，该类推进剂可发展成为高能、低感、低特征信号推进剂。低特征信号硝胺推进剂，把降低压力指数和控制不含铝的燃烧稳定性作为技术难点，通过有效催化剂的选择和特殊的加入方法来降低压力指数，对于无铝推进剂寻求高效而又不影响排气、排烟特性的燃烧稳定剂。在降低或消除烟、焰方面，把电子捕获技术及二次焰的抑制技术作为实现低特征信号的重要措施。

(3) 含能材料的发展。为了提高推进剂能量、降低特征信号、减小推进剂的敏感程度，必须研究适应推进剂发展的含能材料。开展含能黏合剂、含能增塑剂、高能氧化剂及高能量密度材料的合成和应用研究，探索 C_{60}、N_{60} 的合成及应用。

(4) 阻燃和绝热技术。推进剂燃烧时的燃面变化与粘贴在推进剂上的有机材料的作用有关，这类材料称为阻燃层(包覆层)，它的作用是限制起始燃面。这样，通过药柱结构型和推进剂燃烧规律的匹配，就可以得到任何瞬间所需的推力。

决定阻燃效果的关键是阻燃层和推进剂间的黏结性能，这一特性是实现发动机可靠性要求所必需的，因为阻燃层和推进剂之间任何形式的脱黏几乎必定会导致燃烧室压力无控的上升，或引起发动机的破裂或爆炸。燃烧室中另外两种惰性材料是衬层和隔热层。衬层是保证推进剂和发动机壳体内壁的优良黏结；隔热层用于对暴露在炽热燃气的壳体表面进行热防护。阻燃层、衬层、隔热层所用的材料统称绝热材料。

研究的绝热材料须满足的技术要求如下：

① 在发动机整个工作温度范围内具有足够的黏结强度。

② 在生产、储存和发动机工作期间，在各种环境温度下，材料机械强度必须能和制造及储存期的药柱变形相适应，还应和发动机因热应力和机械应力引起的变形相适应。

③ 低导热率、低密度、高比热容、足够的导电能力和优良的透气性。

④ 低烧蚀率，以便最大限度地降低发动机消极质量。同时，燃烧产生的碳层必须保持可燃性，分解气体必须具有低分子量，材料热分解不能产生烟雾和闪光。

⑤ 低吸湿性，优良的抗老化性，与推进剂和点火药组分之间相容性好。

解决上述要求的技术之间有矛盾，在它们之中达成优良匹配的过程是研究中所涉及的最困难的过程。阻燃和绝热技术发展趋势是重点考虑低特征信号推进剂燃气中不燃的低密度惰性阻燃复合材料。在 21 世纪，不饱和树脂、硅橡胶、三元乙丙橡胶仍然是提供发动机装药可选择的绝热材料。

(5) 炮弹增程用推进剂。炮射导弹是一个和战术导弹推进有关的技术领域。在 21 世纪，推进剂及富燃料推进剂在炮射导弹中使用将与日俱增。除使用降低炮弹底部阻力以提高射程外，研究重点还集中在吸气式推进的炮弹上，主要问题是如何使发射的弹丸(通

常是自旋稳定的)能像冲压火箭复合发动机那样工作。采用这一技术可使 155 mm 炮弹射程提高到 50 km,而尾翼稳定弹丸的预计射程可达 70 km。目前还正在研究用于反坦克武器的吸气式推进的管状炮弹以及复合增程技术。

炮弹增程用固体推进剂必须能够在长度极其有限的燃烧室内有效地燃烧,排出燃气。药柱的设计必须考虑能适应与火炮环境有关的问题,如极高的膛压、高的轴向与径向初始加速度、快速的压力降(在炮弹出炮口的瞬间),并确保其性能的一致性。

13.2 推进剂装填方式的分类与选择原则

目前,火箭弹大多采用固体火箭发动机。发动机的结构,基本上都由装药、燃烧室、喷管和点火装置四部分组成。一般来说,发动机设计是根据火箭弹总体设计后提出的有关性能指标和参量进行的。如总冲量、推力和推力方案、发动机质量、发动机外径以及允许长度等。发动机的设计内容主要是对发动机的四个组成部分进行设计。其中推进剂装填方式的选择直接关系到火箭弹的性能。

13.2.1 发动机装药设计

1. 推进剂的选择原则

推进剂品种选择是全弹设计中一项相当重要的环节,它关系到总体性能和总体结构的问题,也关系到经济性的问题。一般经过综合分析之后,按如下原则选择推进剂。

(1) 发热量和比冲要高,密度要大,以便发动机装药量在规定总冲条件下质量轻、体积小。

(2) 野战火箭弹要求选用高燃速推进剂,这样可以增大出炮口速度,缩短主动段,对提高射击密集度有利。

(3) 推进剂应具有好的内弹道特性。尽量选用燃速压力指数低、燃速温度系数小的推进剂,具有平台效应的推进剂更好,以便使发动机在较宽的使用温度范围内有着大致相近的内弹道性能,压力波动小。

(4) 推进剂应具有良好的燃烧性能:

① 推进剂的侵蚀燃烧效应低,则装填系数可以增大,从而设计出性能较好的发动机。

② 推进剂应具有较低的临界压力,以保证低温正常燃烧。双基药的临界压力一般较高,改性双基药及复合药的临界压力一般较低。

③ 推进剂应具有良好的燃烧稳定性。

(5) 推进剂应具有良好的力学特性。力学特性包括延伸性、抗拉强度、抗压强度和弹性模量等。

对于铸装式发动机来说,如果抗拉强度不低,则力学特性中主要考虑延伸率。对于自由装填式发动机,如果延伸率不低,则力学特性中主要考虑抗压强度。火药的延伸率在低

温下最低，而机械强度则在高温下最低。双基药和改性双基药的低温延伸率是低的，但在高温下具有高的机械强度。复合药在低温下通常具有相当高的延伸率，但高温下的机械强度却较低。

(6) 化学安定性好，长期储存不变质，不产生裂纹，不吸潮。

(7) 无毒无臭，无腐蚀性，勤务处理方便。

(8) 抗老化性能好，相容性好。

(9) 生产工艺性和经济性好，原材料来源广泛，价格便宜。

2. 火药(发射药/推进剂)的选择

我国常用火药的基本特点：

(1) 双基火药。

① 机械强度较高；

② 火焰温度低；

③ 长期储存有良好的安定性；

④ 对潮湿环境不敏感；

⑤ 能大量生产。

(2) 复合火药。

① 能量特性比较高，实际比冲目前达到 2 256～2 453 N·s/kg，密度在 1.75 g/cm^3 左右；

② 可直接浇注在燃烧室壳体内；

③ 燃速可在较宽的范围内调节；

④ 火焰温度比双基火药高，但比改性双基火药低；

⑤ 压力指数和温度系数都较低，使发动机在不同使用温度下性能变化小；

⑥ 临界压力低，使燃烧室压力低，壁厚可减薄；

⑦ 火药在低温下仍有相当好的力学特性。

(3) 改性双基火药。

① 能量较高；

② 燃速较高，可以调节；

③ 低温力学特性较差。

早期定型的野战火箭弹、航箭，大都选用了双基火药，该种火药虽然能量较低，但其价格也较低，可大量生产，在我国有长期生产的工业基础。燃速低，火焰温度低，对喷管的烧蚀较轻。其比冲随压力增加变化较小，在满足规定总冲的条件下，可以选择较低的工作压力。这样可减小发动机壁厚，从而减少发动机质量，设计出高质量比的发动机。改性双基药一般在较高的工作压力下才能发挥出高能量，低压下燃烧不完全，能量损失较多。复合药的最大优点是可直接浇注在燃烧室壳体内，使发动机有很高的装填系数，药柱对燃烧室有绝热作用，能够制造出大直径的药柱；能量高，临界压力低。但其燃烧成分中常含有对

炮管有腐蚀作用的气体，另外其燃烧产物中还含有金属铝的熔融体，它会沉积在炮管内壁，使炮管内表面粗糙。这使得炮兵在发射完一发后，必须对炮管进行清擦，才能再次发射。近年来通过降低复合药配方中过氯酸铵及铝粉的含量，可以大大减轻对炮管的腐蚀。

我国目前使用较多的双基火药为双铅-2、双石-2 和双芳镁-1 火药。其性能见表 13-1。

表 13-1 常用双基火药性能表

火药名称	20°比冲值 /(N·s·kg^{-1})	热量 /(kJ·kg^{-1})	密度 /(g·cm^{-3})	燃速公式 $u=u_1 \cdot p^n$	燃速/(mm·s^{-1}) 6.87 MPa	燃速温度系数 /(%·℃$^{-1}$) −40 ℃～+50 ℃
双铅-2	1 950.200	3 548	1.610	$0.513p^{0.66}$	8.460	0.313
双石-2	1 967.900	3 630	1.589	$1.008p^{0.485}$	7.910	0.250
双芳镁-1	1 942.400	3 702	1.570	$0.808p^{0.517}$	7.270	0.171

双石-2 火药的能量稍大，燃速温度系数及压力指数略低，由此引起的发动机工作压力波动小。双铅-2 火药的机械强度比较高，压药密度大，该火药使用性能良好，生产工艺稳定安全。从发展的观点看，双铅-2 火药可以成为各种战术火箭的优选火药及测试标准药。我国使用的这两种火药的实践表明，双石-2 的能量稍高，但临界压力高，低温性能差。在相同的面喉比条件下，双石-2 火药比双铅-2 火药容易在低温下出现断续燃烧。

火药选择的基本原则之一是应尽量选用比冲高的火药。这样在装药体积一定时，总冲量就较大，火箭弹射程就更远。130 mm 远程火箭弹、PHL122-Ⅰ型火箭弹通过改用能量较高的火药实现火箭弹增程的目的。我国早期火箭弹装药多选用一般的双基火药，随着火药技术的不断发展，高比冲、高燃速火药的研制成功，使火箭弹的性能有了明显的提高。20 世纪 80 年代以后，在所研制和改进设计的产品中，纷纷选择改性双基火药和复合高能火药，使火箭弹设计技术进入了一个新的阶段。

130 mm 远程火箭弹预研阶段，同时采用了两种火药进行试验，改性双基火药选用的是双基火药 171-25，复合火药选用的是 8 610 无烟火药。复合火药有很高的密度，平均为 1.75 g/cm^3，这是其优点之一，但还存在两个问题：第一，其内含有一定量的过氯酸铵，燃烧产生的气体中含有腐蚀作用的气体氯化氢，且有浓雾，致使该火药的使用受到限制；第二，涡轮式火箭弹由于高速旋转产生离心加速度，使火箭弹装药受到离心力的作用，火药中含铝粉量的多少可直接影响火药对燃烧室的烧蚀。例如，复合火药含 17%的铝粉比含 5%的铝粉对燃烧室的烧蚀要严重得多。这主要由于涡轮式火箭弹转速很高，装药所受离心力很大，含铝粉火药形成的铝熔体加速了对燃烧室的传热，使室壁过热。燃烧室壁的过热将使燃烧强度急剧下降，在二次压力峰处容易使燃烧室破坏。经过反复试验和论证，130 mm 远程火箭弹选定改性双基火药 171-25。

3. 药型设计

(1) 药型选择的原则。

① 具有符合推力方案要求的燃烧面变化规律。燃烧面变化规律反映了推力和压力的变化规律。增面性药型得到渐增的推力和压力曲线，减面性药型得到渐减的推力和压力曲线，恒面性药型则得到等推力和等压力曲线。在等压力曲线的情况下，燃烧室壳体承受的最大压力最低，故可减轻发动机的结构质量。

② 具有较高的装填系数，以保证发动机具有较高的质量比冲。

③ 具有足够的燃烧面积，以保证获得所要求的推力。

④ 燃烧时间要足够短，主动段终点速度要足够大，以保证良好的射击密集度，同时，也要防止发动机工作过载。

⑤ 有利于点火系统的安排和作用。

⑥ 在燃烧结束时，应该无剩药或剩药量最少。

⑦ 药柱强度高。端燃、外燃、内燃药柱皆有较好的强度。特别是前两种药柱具有高强度特性。内燃药柱强度较差，特别是内孔形状复杂的药柱还有应力集中现象，使药柱的强度更差。在采用内燃药柱时，为改善药柱强度，应适当选择内孔形状和尺寸。

⑧ 药柱的工艺性好。显然，如果药型简单，不仅使模具加工容易，而且也使药柱成型容易，因而也易于保证质量。

(2) 药型设计应注意的问题。

① 为了提高火药装填系数，发动机可由多根装药改为单根装药，设计成星孔，有较大的起始燃烧面。单根星孔装药虽然提高了装填系数，但余药较多，使其主动段速度损失较大。另外，由于余药量的一致性差，对火箭弹的射击密集度带来不利影响。

② 火药装药在燃烧室内填充的程度也往往影响点火性能。即当燃烧室的容积大小受到一定限制时，火药装药应留有一定的空间，使点火火焰流动通畅，保证燃烧表面瞬时吸收足够的热量，达到瞬时全面点燃。点火空间过大会造成瞎火或迟发火，延长点火时间；过小，易造成点火压力过高，或使装药破碎，燃烧面骤增引起发动机爆炸。

③ 涡轮式火箭弹高速旋转时，火药装药的强度明显下降。可采用包覆层或提高包覆层强度，以提高火药装药的强度。

④ 火药装药在燃烧即将结束时，除贴壁浇铸的装药外，发动机均有余药排出。在设计发动机时，应尽量减少余药，以减少发动机能量损失。

⑤ 涡轮式火箭弹内弹道曲线上出现第二压力峰，此峰值一般比第一压力峰值高。两者之比控制在 1.4 范围内，发动机即能够正常工作，而且燃烧室强度设计比较经济合理。

(3) 装药结构形式。

根据战技指标对发动机性能的要求，在火箭弹装药设计中大多采用单根或多根管状药柱，单根星孔装药形式也较为普遍。两类装药的特点比较见表 13-2 所示。

表 13-2 不同装药形式的特点比较

单根或多根管状药柱	优点	a. 具有一定的恒面性； b. 形状简单，因而药模也简单，制造容易； c. 由于形状简单，无应力集中现象，同时药柱内部的应力状态为三向受压，因而，药柱本身具有较高的强度； d. 剩药较少。在燃烧结束前有少量由挡药板空隙排出的药片
	缺点	a. 燃烧室壁与燃气直接接触，需要绝热涂层保护，工作时间不宜过长； b. 药柱需要支撑装置，而支撑装置受燃气流作用，其工作状态十分恶劣
单根星孔装药	优点	a. 可以利用改变星孔的几何参量而获得符合要求的燃烧表面积； b. 高温燃气不直接与燃烧室壁接触，药柱本身起着绝热作用，减小燃烧室壁受热，工作时间可以较长； c. 火药可以直接浇注在燃烧室内，解决了大尺寸药柱的成型和药柱支撑问题，同时药柱对壳体的刚度有增强作用
	缺点	a. 药形复杂，使药模制造困难，同时这种复杂的内孔在星尖处有很大的应力集中现象，使药柱强度低，易出现裂纹； b. 燃烧结束后剩药较多，造成能量损失，同时也使发动机推力、压力曲线有较长的拖尾现象

13.2.2 火药装填方式的设计

1. 概述

1884 年法国化学家维也里用乙醇乙醚混合溶剂对硝化纤维素溶塑使之成为密实的药料，并通过模具压制成具有一定形状的药粒，成为世界上最早的单基药。4 年之后，即 1888 年瑞典化学家诺贝尔用 40%的硝化甘油和 60%的硝化纤维素混合并利用加热的滚筒压延机对药料进行碾压，在压力和温度的作用下，药料被驱水和塑化，制成了世界上最早的双基药。

维也里制造单基药的工艺方法被称为溶剂法工艺。蓬松的硝化纤维素燃速很快，不能直接用作火药，当用乙醇、乙醚混合溶剂（或其他对硝化纤维素有溶解能力的溶剂）溶塑后，蓬松的硝化纤维素就成为质量比较均匀、致密的药料，然后借助模具压制成需要的形状。由于大量的挥发性溶剂存在于火药中，不但影响火药的能量和正常燃烧，而且火药不能“硬化”。因此，还要经过一系列的驱溶步骤，将挥发性溶剂驱除并回收。溶剂法工艺的主要过程，就是药料的塑化、压伸成型、切药、驱除溶剂，再加上最后的产品混同、包装和验收，组成了溶剂法工艺的全部流程。溶剂法工艺不仅用于单基药的制造，双基药中若硝化纤维素的含氮量较高，硝化甘油对其溶塑能力很弱时，也需采用溶剂法工艺，国外亦称柯达工艺。多基药中固体填料（如硝基胍、黑索今）含量过高时（一般高于 40%时），也需采

用溶剂法工艺，甚至国外一些改性双基推进剂也有采用溶剂法工艺制造的。

溶剂法工艺的优点是应用范围广，工艺过程安全性好，可以压制多种形状不同的药型。其缺点是工序较多，生产周期较长。由于溶剂驱除不利于制造大尺寸的药柱（溶剂法工艺压伸成型药柱的燃烧层厚度最大 12 mm 左右），并易污染环境，使它的应用受到一定限制。

诺贝尔制造双基药的工艺方法被称为无溶剂法工艺。这是相对溶剂法工艺而言，即在工艺过程中不再加入醇、醚之类的挥发性溶剂。当双基药中硝化纤维素含氮量适当，易被硝化甘油等含能增塑剂溶塑时，或三基药中固体填料（如硝基胍）含量较低时，可采用无溶剂法工艺。无溶剂法工艺的药料塑化成型不是靠加入挥发性溶剂，而是靠压延机的温度和压力将药料的水分驱除，并将药料塑化，再在适当的温度和压力下通过模具压制成所需的药型。无溶剂法工艺没有溶剂驱除步骤，压伸后的药条，随着温度的降低而“硬化”。但是无溶剂法工艺多了一个吸收药制造步骤。将硝化纤维素分散，悬浮在水介质中，通过一定的分散方法使双基药各组分均匀而且计量准确地混合在一起，并牢固结合。这一过程称之为吸收，得到的药料称为吸收药。吸收、塑化成型是无溶剂法工艺的主要步骤，再加上最后的整形、包覆、混同、包装、验收，组成了无溶剂法工艺的全部流程。

无溶剂法工艺的优点是没有漫长的溶剂驱除过程，因而工艺周期较短，可以生产大尺寸药柱（无溶剂法工艺生产的药柱直径最大 300 mm 左右）。其缺点是生产安全性不如溶剂法工艺。

溶剂法和无溶剂法两种工艺的共同点，就是火药的成型均利用塑化后药料的流变特性，通过模具挤出成型，火药的形状主要靠挤出模具决定。因此，溶剂法和无溶剂法两种工艺又统称为挤出法工艺。

由于挤出法工艺生产的药柱尺寸受限，满足不了武器发展的需求，1944 年美国发明的充隙法双基浇铸工艺解决了大尺寸和复杂药型药柱的生产途径问题，是双基药制造工艺的突破性进展。浇铸工艺的成型方法不是靠药料从模具挤出来完成，而是将具有流动性的料浆“浇铸”填充在模具或发动机中，然后通过“固化”过程赋予火药一定的药型和力学性能。双基浇铸工艺可以生产直径 762 mm 的药柱，而且使得在配方中大量加入高能固体组分成为可能，因此，浇铸工艺为改性双基推进剂的发展打下了基础。随着复合固体推进剂品种的增多，药柱质量的不断增大，复合固体推进剂的浇铸法制造工艺也不断完善，并向连续化、自动化方向发展。由于交联改性双基推进剂的出现，配浆浇铸工艺应运而生，它在某些方面与复合推进剂的浇铸工艺相似。其最大优点是使火药配方调节具有更大的灵活多变性，因此能赋予推进剂更好的性能。

除了挤出法和浇铸法两类成型工艺外，还有一种球形药制造工艺。球形药不仅广泛用于各类轻武器，而且球形药制备也是浇铸法工艺的中间步骤之一。对于充隙法浇铸工艺，所有的固相组分都要预先“造粒”，制备球形药是重要的“造粒”方法之一。对于配浆法浇铸工艺，为了配制成具有适当流动特性的可浇铸的淤浆，预先制备颗粒精细并部分塑化

的球形药，成为配浆浇铸工艺的关键。

球形药工艺又分为内溶法与外溶法两种。内溶法是将硝化纤维素或吸收药悬浮于大量水介质中，在搅拌下加入溶剂（多为乙酸乙酯）将物料溶解并在强力搅拌下粉碎成滴状，在表面张力作用下形成球状，然后加热蒸掉溶剂，制成球形药。外溶法是将物料用溶剂（乙酸乙酯）溶成胶团，用挤压机挤出并切成圆柱状，放入水介质中，加入附加溶剂，在强力搅拌和加热下成为球状，然后驱除溶剂制成球形药。

综上所述，火药的制造工艺分类可用图 13.4 所示。发动机装药方式基本上可以分为两大类，即自由装填式和贴壁浇铸式。自由装填式是将预制好的药柱按规定的要求装入发动机中，并固定可靠的方式。贴壁浇铸式是将具有流动性的料浆“浇铸”填充在发动机中，然后通过“固化”过程赋予火药一定的药型和力学性能的方式。有时为了满足产品的某种性能要求，在浇铸过程中通过双螺杆挤压以提高发动机装药的密度和质量。

- 火药制造工艺
  - 挤出法制造工艺
    - 无溶剂法挤出工艺
    - 溶剂法挤出工艺
  - 浇铸法制造工艺
    - 充隙浇铸工艺
    - 配浆浇铸工艺
    - 复合推进剂浇铸工艺
  - 球形药制造工艺
    - 内溶法
    - 外溶法

图 13.4 火药制造工艺

2. 火药挤出法制造工艺

1）无溶剂法挤出工艺

火药的无溶剂法挤出工艺是指在硝化纤维素中加入硝化甘油或硝化二乙二醇，或者其他硝酸酯或多种硝酸酯混合，不加入挥发性溶剂，通过挤出机赋予火药一定形状的工艺。由于这种工艺不需要冗长的溶剂驱除工序，因而生产周期短，并可生产药型弧厚较大的火药，常用于制造火箭推进剂和高膛压火炮用药，近来也为某些枪用发射药所选用。由于该工艺生产的产品弹道重现性好、可靠性高、生产成本低，因而被广泛应用。

这类产品的制造工艺主要由两部分组成。第一部分是将各种原料在水中制成浆状混合物，称为吸收药制造。第二部分是吸收药驱除水分、塑化和挤出成型，称为火药成型。

2）溶剂法挤出工艺

（1）溶剂法挤出工艺流程。近代火药制造史是从溶剂法制造单基药开始的。现在的溶剂法工艺技术水平也不断提高，但其基本工艺原理与工艺步骤和维也里的发明并无大的差异。以单基发射药为例，虽然单基发射药（包括枪药、炮药等）品类繁多，但是其工艺流程都从硝化纤维素驱水开始，由塑化成型单元、溶剂驱除单元、混同包装单元等组成。此外，从经济、环保、安全和劳动保护诸因素考虑，还设置了溶剂回收系统。不同品号单基药具体的工艺步骤略有区别，但都包含上述几个阶段。

(2) 硝化纤维素驱水。出于安全的考虑，由于硝化纤维素在储运过程中约含有 30% 的水分，这些水分会阻碍溶剂对硝化纤维素的膨润溶胀和溶解，在塑化前必需驱除。早期曾用烘干法驱除硝化纤维素中的水分，烘干后硝化纤维素的水分降到 4% 以下。由于干燥的硝化纤维素对摩擦、冲击和静电等非常敏感，使得烘干操作十分危险。烘干后的硝化纤维素粉尘很难彻底消除，长期附着在工房墙壁和加工设备上，易发生分解，引起烘干室硝化纤维素爆炸。

目前广泛采用的是酒精置换法，酒精置换驱水的主要优点是：酒精与水可以任意比例混合，混合时放出热量小；酒精对不同品号军用硝化纤维素均不溶解，膨润也很小，使硝化纤维素在驱水过程中保持原来的物理结构，驱水效果好；酒精不改变硝化纤维素的性质，与硝化纤维素不起化学作用；酒精本身还是醇醚混合溶剂的组成部分，驱水后的硝化纤维素即可转入下一塑化工序(俗称胶化)。酒精还能溶解一部分低氮量的硝化纤维素和不安定的杂质(约 1.5%)，从而改善硝化纤维素的安定性并提高硝化纤维素的含氮量(0.02%～0.04%)。

3. 固体推进剂浇铸法制造工艺

1) 浇铸法制造工艺的特点

除无溶剂法挤出工艺外，浇铸法也是当今世界上广泛使用的固体推进剂制造工艺。该工艺可分为三种，一是适合于复合推进剂制造的浇铸工艺；二是适合于高能推进剂(如 NEPE、XCDB、CMDB)用的配浆(淤浆)浇铸工艺；三是适合于双基、改性双基、XLDB 推进剂的造粒浇铸工艺，也称为充隙浇铸工艺，本书中简称粒铸工艺。

浇铸工艺的特点是：

(1) 可制备大尺寸、形状复杂的药柱。一般无溶剂压伸工艺生产的药柱直径不超过 300 mm，而浇铸工艺在药柱尺寸上是不受限制的；压伸工艺只能生产各种管状及星孔等横截面尺寸不变化的药柱，而浇铸工艺却可生产各种复杂的药型。另外浇铸工艺可以生产壳体黏结式装药，这是压伸工艺难于实现的。目前随着火箭发动机性能的提高，装药形式也不断改进，使压伸工艺越来越难以适应高性能火箭发动机对装药的要求。

目前，浇铸工艺制造的用于航天飞机助推器的复合推进剂药柱最大直径已达 3 m 左右，美国采用粒铸工艺已生产出直径为 735 mm 的“诚实约翰”主发动机装药和直径为 762 mm 的“黄铜骑士”助推器等自由装填装药。

(2) 浇铸工艺的配方适应性广，配方组分的变化范围大。浇铸工艺能够方便地加入各种配方组分，例如某些高能敏感的组分在压伸工艺中不易加入，而浇铸工艺由于加工条件比较缓和，就能方便地加到浇铸推进剂的配方中，使浇铸推进剂获得了高的能量。浇铸工艺还用于生产多种性能的推进剂，如适于壳体黏结的“软”药，适于自由装填的“硬”药，不同能量水平的推进剂以及不同燃烧特性的推进剂等。

(3) 固体推进剂浇铸药浆是一种以高氯酸铵、硝胺或铝粉为分散相，以黏合剂/增塑剂等液体组分为连续相的高固体含量悬浮液。迄今对这种高浓度悬浮液的流变特性尚未

找到令人满意的普适数学模型。目前公认的是，推进剂药浆是一种复杂的非牛顿流动行为流体。双基、复合改性双基推进剂药浆黏度较低，而复合推进剂药浆黏度较高，两者的流变性虽有差异，但可以相互借鉴，互为补充。

2）双基、复合改性双基推进剂的浇铸法制造工艺

（1）基本工序和工艺流程。双基和复合改性双基推进剂浇铸工艺分为粒铸工艺和配浆浇铸工艺。这两种工艺的差别较大，但从本质上来看，都包括造粒、混合、浇铸及固化等几个过程。

① 造粒。由于硝化纤维素是疏松的纤维状材料，当它直接与硝化甘油或其他液态增塑剂混合时，因溶解的速度很快，接触部分立即形成黏度很大的溶胶，这层黏稠的溶胶将阻止溶剂对内部硝化纤维素的溶解，故溶解是不均匀的，使物料无法加工。为了使硝化纤维素能够与硝化甘油及其他液态增塑剂均匀混合，就要控制其溶解速度。采用的办法就是将疏松的纤维状硝化纤维素制成致密的颗粒，这些颗粒与增塑剂接触后能够缓慢而均匀地溶解，使得在加工期间混合物有合适的黏度，这样容易得到均匀塑化的推进剂。

造粒可通过两种差别很大的工艺方法来实现。一是机械造粒工艺，是用类似生产单、双基枪药的方法制备得到直径和长度都为 1 mm 左右的小圆柱，通常称为浇铸药粒。另一种方法是制成球形药。通常是在水介质中用醋酸乙酯溶解硝化纤维素，并借助强烈搅拌，在水介质中使物料分散成细小的“液滴”，在表面张力作用下“液滴”呈球形，脱除溶剂后而成为球形药，球形药的粒度根据用途不同可以有很大差别，从几微米到几百微米不等。

这两种造粒工艺各有优缺点，但都广泛应用在双基和复合改性双基推进剂的生产之中。

纯硝化纤维素颗粒难于被增塑剂塑化溶解，影响推进剂成品的质量，因此无论浇铸药粒还是球形药多数含有一定量的溶剂，即要求造粒后的硝化纤维素是预塑化了的。另外，无论是浇铸药粒还是球形药都含有多种组分。对于粒铸工艺来说，由于工艺的需要，配方中所有固相组分都只能加在浇铸药粒之中。对于配浆浇铸工艺来说，为了获得良好的制成品性能，也常常将硝化纤维素以外的若干组分加在球形药之中。

② 混合和浇铸。无论采用何种工艺，都需要将推进剂各组分均匀混合及浇铸于发动机中，这是推进剂制造中的核心部分。其中包括混合溶剂配制，即把配方中所有液相组分及可溶于液相的组分混溶在一起，除去水分及挥发物，称为混合溶剂。

对于粒铸工艺，混合与浇铸是同时进行的，它是将混合溶剂充满于发动机内的药粒的空隙之中。对于配浆浇铸工艺，混合与浇铸是两个过程。混合是在配浆过程中完成的，它是将球形药及其他固体组分与混合溶剂在配浆机中混成均匀的浆状物，然后再将浆状物浇铸到发动机壳体中。

③ 固化成型。固化过程是赋予推进剂一定药型尺寸和力学性能的工艺过程。浇铸于发动机中的推进剂组分（固液混合物），在加热的条件下，硝化纤维素被增塑剂膨润、溶解，形成具有一定形状和一定物理机械性能的推进剂药柱。对于含有交联剂的改性双基

推进剂，其固化过程还包含化学交联反应。

④ 脱模、整形、探伤。脱模、整形、探伤是固化成型后的所谓“后处理”过程中的主要内容。

对于壳体黏结式发动机，脱模的主要任务是拔掉模芯。对于自由装填式药柱，不仅要拔掉模芯，而且要把推进剂药柱从模具中脱出来。脱模后的推进剂无论是壳体黏结式还是自由装填式都要用手工或机械的方法进行整形，使装药（药柱）的尺寸满足图纸的要求。

对于固体推进剂装药（药柱）来讲，一般要全部经过探伤检查，合格者才能包装出厂。两种工艺的流程如图 13.5 和图 13.6 所示。

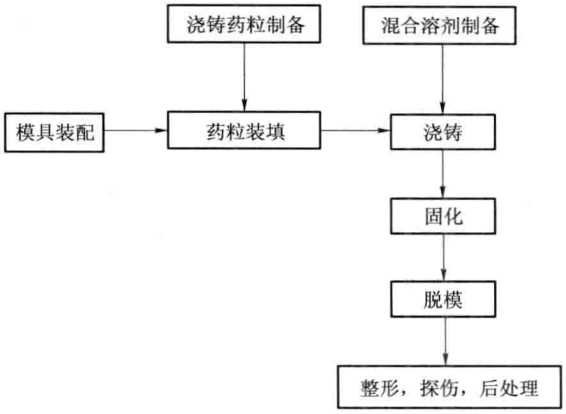


图 13.5　粒铸工艺流程

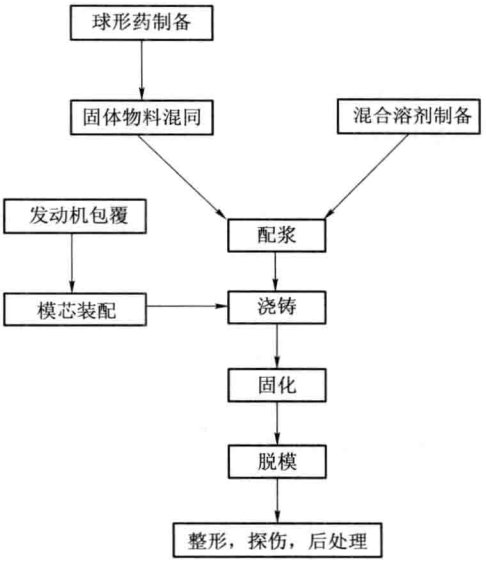


图 13.6　配浆浇铸工艺流程

（2）粒铸工艺。

① 浇铸药粒制备。粒铸工艺与双基药压伸工艺相比是较简单的，但是它所用的浇铸药粒的制备却是相当复杂的。浇铸药粒可以用溶剂法单基枪药的生产设备和相似的工艺来生产，也可利用球形药做浇铸药粒。我国单基枪药的生产有丰富的经验和充足的生产能力，它给粒铸工艺创造了良好的基础，这种制备浇铸药粒的生产工艺也称为机械造粒工艺。球形药的生产工艺周期较短，并且比较安全。但是，球形药的预塑化程度及组分分布的均匀性不如用机械造粒工艺制备的浇铸药粒好，这将影响推进剂成品的质量。因此粒铸工艺多使用机械造粒工艺制出的浇铸药粒。

• 浇铸药粒的类型。

根据不同配方，所用的浇铸药粒通常有三种类型。

其一，单基浇铸药粒。这种浇铸药粒中主要含硝化纤维素及少量的安定剂和附加组分，通常也含有少量的增塑剂。因而在一般装填条件下浇铸药粒与浇铸溶剂的体积比为

2∶1左右，所得产物中硝化纤维素含60%左右。这种浇铸药粒用于生产高模量的自由装填式浇铸推进剂。

其二，双基浇铸药粒。除硝化纤维素外，还加入较多的硝化甘油或其他增塑剂。用这种药粒制得的推进剂塑化质量较好且能量较高，可以制得模量较低、延伸率较高的壳体黏结式装药的浇铸双基推进剂。

其三，复合改性浇铸药粒。将大量晶体氧化剂和金属燃料加入到双基浇铸药粒中，用于制造复合改性双基推进剂。这种推进剂的特点是能量很高，同时硝化甘油和增塑剂的含量大于硝化纤维素的含量，适于壳体黏结式装药。

• 浇铸药粒的制造工艺。

机械造粒工艺可根据浇铸药粒组分的不同，分别采用类似的溶剂法制造单基、双基和三基枪炮药的设备和工艺。其工艺流程包括：混合（捏合）、压伸、切药、驱溶、光泽、混同等工序。需强调指出的是，浇铸药粒制造中常需混入各种弹道改良剂（燃烧催化剂、弹道稳定剂）、固体含能添加剂（如RDX）和固体金属粉末等，这是一般粒状枪炮药制备中所没有的，因此在混合（捏合）工序中溶剂的选择（种类、溶剂量及溶剂比等）及工艺条件要相应地加以调整。

有时，为了机械造粒工艺中对硝化甘油等高能、高感度材料处理的方便以及改善性能的需要，采用半溶剂法工艺路线，增加了吸收工序和驱水工序。在吸收工序把少量增塑剂、弹道改良剂、硝胺炸药和硝化纤维素等加入到有水的吸收锅内，其中弹道改良剂有的还需预先在水介质中进行研磨处理。吸收工序后的药浆，经驱水后再进行碾片进一步脱水，烘干后作为溶剂法制备工艺的物料。

② 浇铸溶剂（液）配制。溶剂配制的目的是，将推进剂组分中的各种液相组分及在常温下是固态但可溶于液相的组分都混合在一起，配制成混合溶剂。混合溶剂配制有利于各组分的均匀混合，降低了液相的机械感度，同时由于将一些固态组分溶于液相中增加了液相的比例。

③ 浇铸药粒装填。药粒装填即是把浇铸药粒装入发动机中，它是粒铸工艺的关键工艺过程。良好的装填技术应该获得最大和再现性好的装填密度。实际上，小的装填密度不可能有好的再现性和均匀性。所谓再现性是指各发动机内的装填密度是相同的；所谓均匀性是指发动机内各局部都有相同的装填密度。装填密度对推进剂成品的组分影响显著。因为装填密度决定了药粒与溶剂之比，因而也就决定了推进剂的组分。根据粗略的计算，对于普通浇铸双基推进剂来说，装填密度波动±1%时，就会引起硝化纤维素、硝化甘油等主要组分含量波动约±0.5%，也有可能造成组分的超差，因此要求严格控制装填密度。在装填很好的药模内，浇铸药粒可占药模容积的68%。若将药粒简单地倾倒于药模中时，只能达到57%。

常用的装填方法是筛装法。这种方法就是药粒由圆筒形的加料漏斗经过一个具有等间隔的较大孔径的分配板，均匀分配到一个装有孔径约为药粒直径两倍的筛网分散板上，

然后依次将药粒均匀地分散到药模内(药模内堆积的药粒称为药粒床)。对于自由装填式药柱,这是一种适宜的通用方法。但是对于只有球形端头、药型复杂的壳体黏结式发动机,由于发动机开口小,上述筛装法技术已不适用,需采取更先进的空气分散药粒装填技术。这种方法是将药粒用空气加速,药粒随着气流以相当高的速度流过管子,然后以适当的角度分散吹入发动机内。实验表明,这种方法可获得相当于或超过筛装法的装填密度。

药粒装填时常使用振动器,以增加装填密度。振动的频率和振幅选择应相互协调。振幅偏小时药粒振不起来,过大时药粒产生跳跃,反而降低了装填密度。

各种装填技术的选择要根据药粒的类型和发动机装药的几何形状而定。实际上,对于一定的配方和一定的发动机,要经过多次实验才能确定装填技术条件和稳定的装填密度,并需几次反复实验才能调控好浇铸药粒和混合溶剂的组分与装填密度的关系。这一过程需要很长的时间,所以粒铸工艺对于配方调整来说是很不方便的。

为了除去空气和挥发物,装填好的药粒要抽真空,具体条件视药粒数量而定。

④ 浇铸。药粒装填到发动机里以后,发动机上部应该用压具压紧,否则,在铸药的过程中,混合液料由底部向上升,可将药粒浮起而使装填紧密的药粒变得松散,致使液固比增加,固化的药柱疏密不匀,甚至在药柱内部出现气孔等,燃烧性能不稳定。用压具压紧的药粒铸出的药柱质量好,特别是燃烧性能稳定。

浇铸的目的是用混合溶剂充满药粒的间隙。混合溶剂可以从顶部或底部流入药粒之中。图 13.7 给出了在真空下从底部浇铸的典型装置。这里,溶剂干燥器中的溶剂在大气压力下被压入药粒间,故也叫真空抽注。

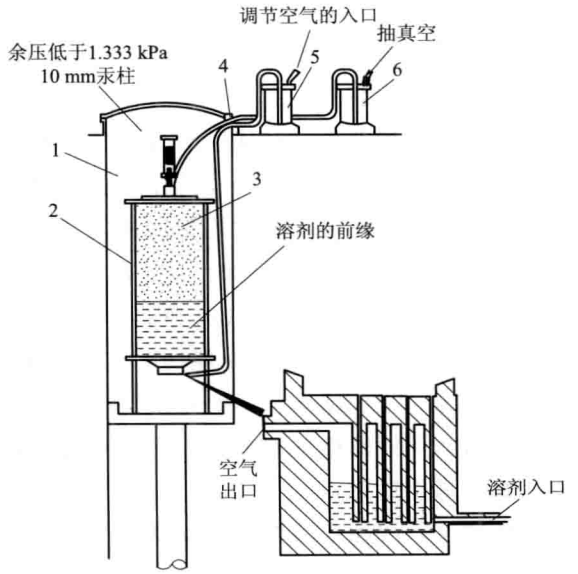


图 13.7　真空浇铸系统图

1—真空罐;2—发动机;3—浇铸药粒床;4—罐的接头;5—浇铸容积干燥器;6—收集器

实践证明，顶部注溶剂的方法不如从底部注溶剂的方法。从顶部注溶剂时，装药表面被液体覆盖，难以排除药粒之间的空气及药粒内残存的挥发性溶剂和水分，固化后的药柱易有小孔。利用压差从发动机底部注溶剂，可克服以上弊病，制出质量优良的药柱。特别对于铸造大型药、异型药，最好采用底部注入溶剂的方法。

在真空下浇铸可使产品完全无气孔，但有时采用常压浇铸，使溶剂在压力下流入浇铸药粒间也可以成功地制备无气孔的产品。浇铸过程就是迫使溶剂流过和充满药粒床间隙的过程。在给定时间内，溶剂充满药粒床的高度即表示浇铸速度的大小，它是浇铸过程控制的主要参数。适宜的浇铸速度一般是通过实验来确定的。首先选择一个适当的压力差，观察浇铸溶剂是否以适当的速度充满发动机。速度太快使药粒床扰动，而且溶剂易形成短路，使一部分药粒中的溶剂不足。速度太慢不仅影响效率，而且溶剂黏度的增加使后期浇铸困难。一旦确定了压力差，对于一定系统来讲，浇铸的工艺条件也就确定了。

(3) 配浆浇铸工艺。

配浆浇铸工艺也称淤浆法浇铸工艺，这种工艺的研究要晚于粒铸工艺。近年来，由于复合改性双基推进剂的发展，出现了各种能量高、性能优良的交联改性双基推进剂(XLDB)及 NEPE 推进剂。这些推进剂中需要加入交联剂或加入高分子预聚体，使硝化纤维素交联。这样一来，粒铸工艺已不适用，因而配浆浇铸工艺就成了复合改性双基推进剂的主要生产工艺。

配浆浇铸工艺在某些方面与复合推进剂的浇铸工艺是相近的，因此它们的生产工艺可以互相借鉴。

① 固体物料混同。固体物料混同是将推进剂配方中数种或全部固体组分混合在一起的操作，它是配浆之前的准备工作之一。

复合改性双基推进剂中的固相组分通常有球形药、铝粉、高氯酸铵、黑索今、奥克托今及各种催化剂等。将上述组分预先混在一起，可以简化配浆的操作过程，还有利于各组分的均匀分散，尤其是对于加入量很少，又要求分散均匀的催化剂来说更是必要的，在混同之前，对各种固体物料要求是充分干燥的。对于保存良好的铝粉，黑索今、奥克托今等，由于它们的吸湿性很小，水分常低于 0.1%，一般不必干燥即可使用。保存良好的用表面活性剂处理的高氯酸铵的水分也很低，可不经干燥处理，但气流粉碎的细高氯酸铵却必须保存在烘箱中(或干燥室中)备用。对于球形药，由于其吸湿性较大，必须烘干，水分在 0.5%以下才能使用。应该指出，不同的推进剂配方对于物料的水分的要求是不一样的。浇铸一般双基推进剂对水分不那么敏感，可适当放宽要求。但是对于含有异氰酸酯或异氰酸酯端基的高分子预聚体的交联改性双基推进剂及复合双基推进剂，对水分的要求是严格的。因为水分与异氰酸酯基的反应放出二氧化碳，影响推进剂的质量。故要求把水分控制在 0.2%以下，有时甚至要达到 0.05%以下。

由于空气中水蒸气的存在，严格的水分要求是不容易做到的，尤其是在空气湿度大的

季节常给生产带来困难，需要细心地防止湿空气的影响。对于特别敏感的配方，要考虑在有空调的房间内进行必要的操作。

固体物料混同可用筛混法，使干燥的细颗粒物料通过振动筛达到均匀混合的目的。通常二三次即可。筛孔大小应使最大颗粒顺利通过。混同装置要密闭，防止粉尘飞扬。由于固体物料是由多种粒度、不同密度的颗粒组成，因此不可能混合得非常均匀，对于配浆工艺来说，也没有必要提出高的要求，因为在配浆机中组分可以得到进一步的均匀混合。

固体物料混同是危险的操作，因为干燥物料的筛混会积聚很高的静电电压，而被混同的物料对静电放电又是很敏感的。为了防止静电，首要的是防止静电积聚，即混同设备要良好接地（接地电阻小于 4 Ω），要有导电地面。工房中要有雨淋系统，混同过程要隔离操作。静电积聚与材料的性质关系很大，单基球形药、黑索今、奥克托今静电很大，但混同含炭黑的球形药或混同含铝粉的固体物料时静电较小。

② 淤浆配制。淤浆配制的目的是将推进剂配方中的固体物料与混合溶剂均匀混合，配制成具有一定流动性的药浆（淤浆）供浇铸工序使用。淤浆配制的主要设备为配浆机，它是一个机械搅拌立式混合设备。对该设备的要求是安全、高搅拌效率、无死角，并有调温的夹套，还要求它能适用于较宽黏度范围的药浆配制。目前国内外均有不同容量（5～3 000 L）的立式混合设备。对于 CMDB 推进剂来说，药浆黏度比复合推进剂低，单浆的框式搅拌器也是可用的。混合设备出料阀门应采用气动的、阀芯为橡胶的安全阀门，以防药浆与阀门任何机械金属件接触。

配浆通常在真空下进行，以保证不混入空气并可除去一些水分和低沸点物。配浆锅夹套通水，以调节配浆温度。配好淤浆之后，将配浆锅送到浇铸岗位。应该指出，由于配浆过程中物料的混合是在较低的剪切力下进行，它一方面使高感度或怕碎的物料更便于加入推进剂中，给新的高能原材料的应用创造了有利条件；但是另一方面也使微量的催化剂组分不易高度均匀分散，因为低剪切力不能打开聚集成团的催化剂，这给复合改性双基推进剂燃烧性能的改善带来困难。

③ 淤浆浇铸。将药浆注入装配好的发动机（或模具）中的操作称浇铸。它是推进剂的成型过程之一。复合改性双基推进剂的浇铸与复合推进剂的浇铸是相似的，可以在大致相同的设备中完成。

• 浇铸过程和浇铸设备。

为防止空气混入，获得无气孔的推进剂装药，复合改性双基推进剂通常采用真空顶部浇铸。配浆锅内药浆靠大气压力通过软管注入发动机中。根据发动机的情况可以使用花板或者仅由一根或几根软管将药浆注入发动机内，浇铸管口应该是扁长形，使空气容易逸出。实践表明，混在药浆中的少量空气泡在浇铸过程中是容易除去的。浇铸的开始和停止用气动管夹控制。调节浇铸罐与配浆锅之间的压差可以调节浇铸速度。浇铸罐内的真空度（余压）小于 20 mmHg（2.666 kPa）即可。过高的真空度会使药浆产生沸腾，在药浆

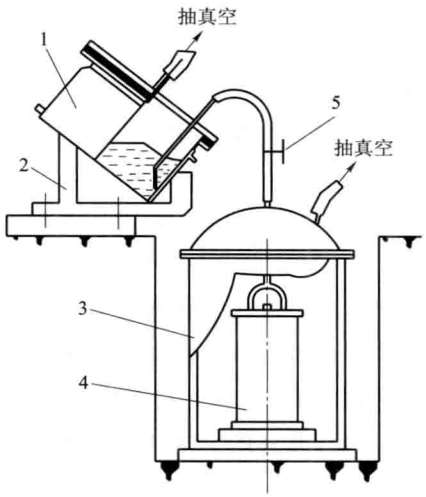


图 13.8 小型浇铸系统示意图

1—配浆锅；2—支架；3—浇铸罐；4—发动机；5—管夹

顶部产生泡沫，这是药浆中的微量水分的沸腾和其他微量气体逸出形成的。对于完全铸满的壳体黏结式发动机，要留有必要的沸腾高度。

浇铸设备包括浇铸罐和真空系统，一个小型的浇铸系统如图 13.8 所示。

• 药浆的流动性。

浇铸药浆必须具有一定的流动性，以便于浇铸。复合改性双基推进剂的药浆黏度较低，常有较好的流动性。但是不能认为复合改性双基推进剂药浆的流动性一定好，在改善性能和保持良好流动性之间仍然存在着矛盾，需要综合协调。

固液比对流动性的影响：所谓固液比是指推进剂药浆中固相组分与液相组分的质量比。固液比越大，说明药浆中固相组分越多，药浆的流动性可能较差。不同的配方其固相和液相组分的组成不同，因此为保持浇铸所必需的流动性，其固液比也不同。复合改性双基推进剂药浆的固液比在 60∶40～70∶30 之间变化。

调整固液比是改善药浆流动性的最常用、最方便的方法。

药浆是固体颗粒在一定黏度的液相中的悬浮体系。这种体系若能流动，液相必须能充满固体颗粒的间隙，并在颗粒周围包有必要的液膜。若体系中的液相足够多，固体颗粒周围有大量液相，则体系的黏度接近液相的黏度，流动性一定很好。随着固体颗粒含量的增加，粒子与粒子间的距离逐渐缩短，达到某种程度后，粒子与粒子之间就会出现干扰（摩擦），使得药浆的黏度变大。

如果颗粒的含量进一步增加，粒子之间的相互作用就更为突出，即粒子之间是靠得如此之近，中间仅隔一层极薄的液膜，这种液膜将它们黏在一起，因而黏度急剧增加。

（4）固化成型。

浇铸后的固液混合物（药浆）在加热的条件下凝固成固体推进剂药柱的过程称为固化。无论粒铸工艺还是配浆法浇铸工艺，其固化机理、固化工艺条件和设备是基本相同的，故放在一起加以介绍。

① 塑溶固化原理。

上述几种复合改性双基推进剂的黏合剂主要是由硝化纤维素和硝化甘油构成，另外还含有一种或数种增塑剂。其固化过程就是硝化纤维素被硝化甘油及增塑剂溶塑，形成高分子浓溶液的过程。

众所周知，硝化纤维素是刚性线型高分子，其外观是疏松的纤维状固体材料，这种材

料是不能直接与硝化甘油混合制成推进剂的。为此需要把硝化纤维素制成具有致密表面的并在一定程度上是预塑化的球形药或浇铸药粒，使其可以与硝化甘油混合，并有可控制的溶解速度，从而获得了使推进剂组分均匀混合及浇铸成一定形状所需的时间，在这一段时间里完成了粒铸或配浆浇铸的加工过程。

在固化过程中，硝化纤维素与硝化甘油的塑溶过程是靠分子的热运动——扩散完成的。因为硝化纤维素是分子量很大的高分子，其扩散速度是很小的，因此塑溶过程只能是低分子溶剂向聚集态的硝化纤维素大分子之间扩散，使硝化纤维素的分子间距离变大、体积增大，发生所谓溶胀现象。如果在有足够量的溶剂的条件下，上述过程可一直继续下去，直到硝化纤维素分子间有了大量溶剂分子，大分子间力不断减弱，溶剂化的硝化纤维素分子转移到液相中去，即发生硝化纤维素的完全溶解，形成高分子溶液。但是在推进剂加工时，溶剂的数量是很不够的，溶解过程只能进行到一定程度，即硝化纤维素大分子只能达到一定的溶胀程度，形成高分子浓溶液。这种浓溶液黏度很大，体系不再具有流动特性，即由固液混合物变成固体推进剂。因此复合改性双基推进剂的固化过程是塑溶固化过程。固化后的硝化纤维素溶胀体具有很好的形状稳定性，其模量随着硝化纤维素与溶剂比例的增加而增加，外观上看，既可以是柔软的弹性体也可以是坚硬的塑料。

塑溶过程是改性双基推进剂典型的固化过程。在塑溶固化过程中不存在副反应对固化质量的损害，故可以保证固化质量。

② 影响塑溶过程的因素。

• 固化温度和固化时间。

由上可知，分子扩散是塑溶固化的唯一推动力，由于硝化纤维素分子间作用力很大，且硝化纤维素外表的溶胀物对溶剂的进一步渗透阻力很大，故这种塑溶过程必然是很慢的。为了加快固化过程，常采用加热固化的方法。但是固化温度的提高是有限度的，要不致于引起硝酸酯的明显分解。另外对于壳体黏结式发动机来讲，高的固化温度会造成热应力的提高。一般固化温度在 50 ℃～75 ℃之间，对于大尺寸壳体黏结发动机的固化，为了尽量减少热应力，可以选择更低的固化温度。

从理论上讲，固化终点应该意味着溶剂在硝化纤维素大分子间已呈均匀分布。但是这需要用很长的时间，实际上是不可能的。一般规定推进剂药柱的物理机械性能已达到较好的水平，不再发生明显的变化时即为固化终点。过长的固化时间不仅在时间上是浪费，还会因硝酸酯的热分解而损害推进剂的性能。图 13.9 为推进剂性能随固化时间的变化情况。其中化学安定性是以 120 ℃压力法安定度的拐点时间计算的。

固化时间因固化温度和硝化甘油混合溶剂中的增塑剂品种的不同而有很大差别。对于低温固化的推进剂，其固化时间可达 1～2 周；对于高温固化的推进剂可在 2～3 天内完成固化。在推进剂配方中加入少量低温固化剂——硝化纤维素的良溶剂，可以明显缩短低温固化时间。例如使用少量乙撑氰醇使推进剂在环境温度下用 2～6 天完成固化，不加乙撑氰醇的推进剂的室温固化时间大约用 30 天。除乙撑氰醇外，己二腈、庚二腈等二腈

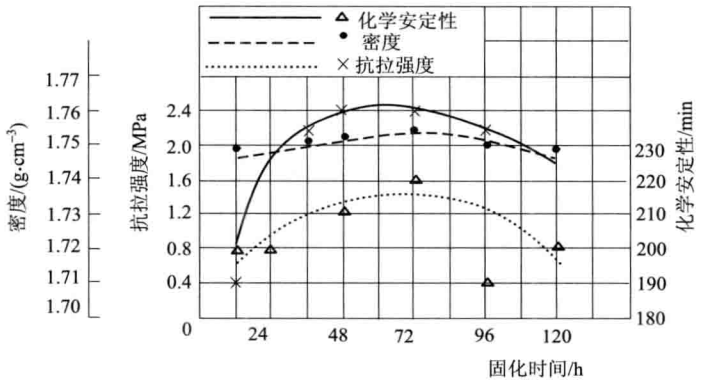


图 13.9 固化时间对推进剂性能的影响

类物质和硝基氨基甲酸酯及其他对硝化纤维素有良好溶解性能的难挥发性溶剂也可以缩短低温固化的时间。

实际上，固化的推进剂内部，药粒（球形药）的边缘与中心的溶剂浓度并没有达到完全的均匀。实验数据表明，使用浇铸药粒的系统中，药粒界面处液体浓度比药粒中心处大。用 C^{14} 示踪的增塑剂检测表明，增塑剂与硝化纤维素之比在空隙处较药粒中心处高约10%。由于增塑剂的分布不均匀，固化后的推进剂还有一个相当缓慢的后固化过程。

• 硝化棉与混合溶液的溶度参数应尽量相近。

决定硝化棉与混合溶液的互溶性的主要因素是硝化棉氮量，一般采用低氮量硝化棉或爆胶棉。用 TA、DNT 等与 NG 组成混合溶剂能调节溶度参数更接近于 NC，从而有利于固化。含有适量硝化甘油的双基药粒比单基药粒更易固化。

• 有交联反应的固化。

改善力学性能普遍采用的方法是在推进剂配方中加入交联剂，使硝化纤维素交联起来，形成网状结构。由于加入交联剂在固化过程中除塑溶固化外，又加入了交联反应固化的因素，即从单纯的溶解过程变成了既包括溶解又包括化学反应的复杂过程。

目前发展很快的交联改性双基推进剂、NEPE 推进剂及复合双基推进剂（CMCDB 或 EMCDB）都是采用异氰酸酯基与羟基反应的办法。因为异氰酸酯基与羟基的反应容易进行，并且只生成氨基甲酸酯，无副产物，所以这是一种较理想的交联方式。二异氰酸酯的量一般在 1%左右，在加热固化时与硝化纤维素进行交联反应。以产生轻度交联为宜，过度交联不仅没有好处反而降低了推进剂的低温延伸率。若使用高分子预聚体，则用量比较高，可达 5%～10%。在这种情况下，预聚体既是交联剂又是黏合剂的高分子主体，同时以液态加入的预聚体代替部分硝化纤维素，对改善药浆的流动性和降低药浆的感度也是非常有利的。

（5）粒铸与配浆浇铸工艺的对比。

① 粒铸工艺的优点。

• 大批量的浇铸药粒的混同可以保证推进剂产品性能的高度再现性，并且可以用药粒混同的办法准确调整配方的组分和燃速，这是粒铸工艺的最大优点。混同之后产品的燃速变化低于 1%，火箭与火箭间的其他性能变化小于 0.25%。

• 可利用单基药现有的工艺和设备生产浇铸药粒。

• 一般说来，粒铸工艺所得到的制品的燃烧性能和力学性能优于配浆浇铸工艺的制品。这是因为机械造粒工艺可以使催化剂得到均匀的分散，使硝化纤维素更好地塑化的缘故。

由于以上原因，再加上粒铸工艺发展较早，已有条件大量生产，早期的改性双基推进剂大部分是用粒铸工艺生产的，配浆浇铸工艺屈居第二位。但是近十余年来，配浆浇铸工艺的发展是迅速的，其应用的广泛程度似乎已经超过了粒铸工艺。

② 配浆浇铸工艺的优点。

• 配浆浇铸工艺组分灵活多变是其最明显的特点，因这一特点带来以下两方面的好处。

其一，配方研制周期短。配浆工艺可以在配浆过程中方便地改变配方组分及其含量，因此配方研究周期短。例如美国赫克利斯公司的巴卡斯工厂在 3 个月内鉴定了 50 多个推进剂配方。测试数据包括每个配方的物理性能、感度和安全性，还包括 18.1 kg 装药的发动机的内弹道性能。这样大量的工作如用粒铸工艺来做要用很长的时间。因为在粒铸工艺中，配方的改变要从浇铸药粒的制备开始，周期很长，反复几次调整配方就需数月乃至一年的时间，因此配浆工艺最适于配方的筛选过程。

为了改善配方的综合性能，常将许多组分加入球形药中，这样一来，配方组分的变化也就涉及球形药的改变，研制周期也长了，但由于成球工艺过程比机械造粒工艺过程简单快速，故这个优点仍然是明显的。

其二，配方性能调节范围广。由于在配浆过程中可以方便地加入各种组分，因此便于吸取双基推进剂和复合推进剂之长。将双基推进剂和复合推进剂中用之有效的组分或其他适宜的组分，加入到改性双基推进剂中，因此使推进剂性能的调节范围较广。如前已述及，可加入敏感的高能组分，获得高的能量。又如，近年来人们将液体高分子预聚体作为黏合剂组分加入到复合改性双基推进剂中，以改善推进剂的力学性能，形成了新型的改性双基推进剂——交联改性双基推进剂(XLDB)和复合双基推进剂(CMCDB 或 EMCDB)。这两种推进剂有很好的物理力学性能。同时液体高分子预聚物代替一部分固体的球形药有利于在配方中加入更多的高能固体组分，如奥克托今、铝粉等，使交联改性双基推进剂有很高的能量。复合双基推进剂可以成为高能量的无烟推进剂。由于只有配浆浇铸工艺才适于加入预聚体和交联剂，因此配浆浇铸工艺比粒铸工艺更具发展前途。

• 配浆浇铸工艺取消了工艺冗长的机械造粒，因此工艺较简单、安全且容易实现连续化。

• 一般认为配浆浇铸工艺生产的推进剂的燃烧性能稍差于粒铸工艺，但是仍可满足

使用要求。对于燃速的重现性问题，粒铸工艺靠大批量药粒的混同得到了保证，而配浆浇铸工艺所得产品的燃速对组分的物理状态的轻微变化不那么敏感，而主要决定于各组分的含量，因此也有较好的燃速的重现性。

3）复合推进剂的浇铸法制造工艺

（1）概述。复合固体推进剂是以液体高分子预聚物为黏合剂，与氧化剂、添加剂、性能调节剂、固化剂及其他组分经混合均匀后浇铸到模具或发动机中固化成型，预聚物和固化剂进行化学反应而形成网状结构，使其具有一定模量弹性体的过程，也称之为固化反应成型工艺。这类推进剂包括聚硫橡胶推进剂、聚氨酯推进剂、端羧基聚丁二烯推进剂、端羟基聚丁二烯推进剂，用聚叠氮缩水甘油醚（GAP）或 3，3-双（叠氮甲基）环氧丁烷（BAMO）与四氢呋喃（THF）共聚作黏合剂的低特征信号推进剂等。

固化反应成型工艺主要是使推进剂内各组分混合均匀，成为流动的可浇铸的药浆，将药浆浇入模具或发动机内。浇入的方法有真空浇涛法、底部压入法，现以端羟基聚丁二烯推进剂真空浇铸固化反应为例简介其成型工艺。浇铸流程如图 13.10 所示。

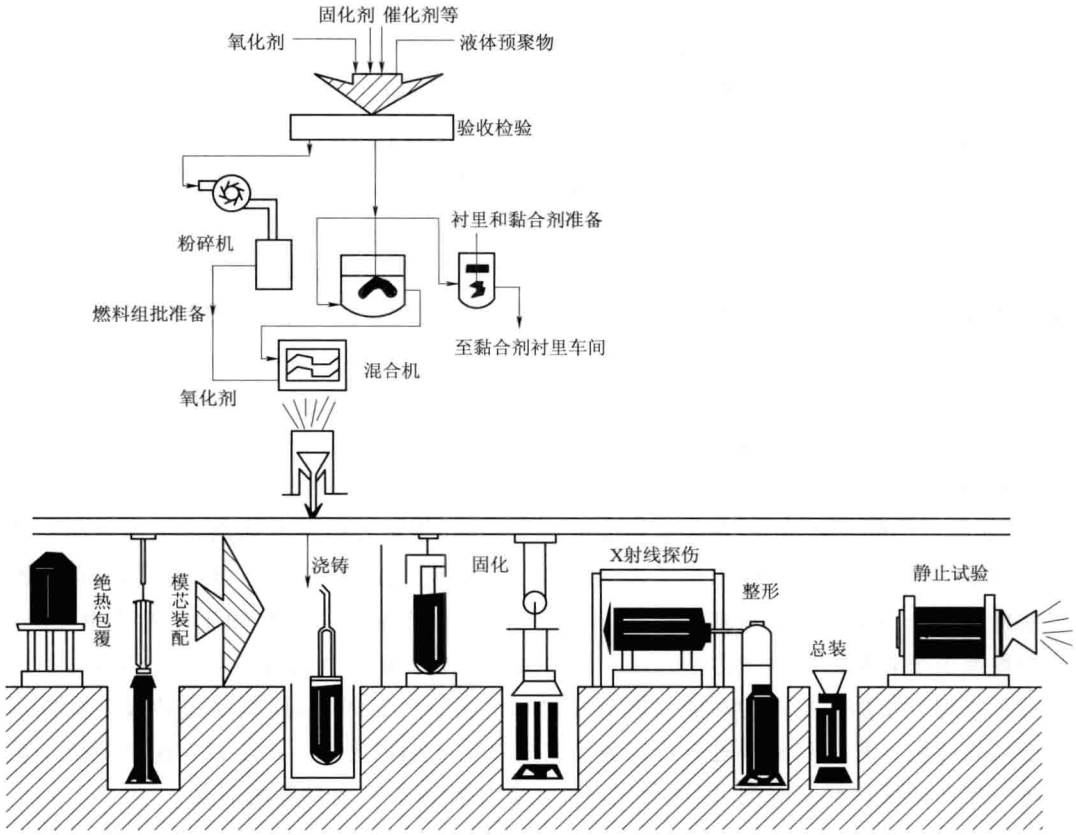


图 13.10 固体火箭发动机装药工艺过程

(2)壳体、模芯准备。复合推进剂在发动机装药时，在战术武器上可以是壳体黏结也可以是自由装填。自由装填用的模具，若复合推进剂制成有一定刚度的硬药柱，则模具内表面进行脱模处理；若复合推进剂较软，不能单独支撑，则在药柱外表面需设置具有一定刚度支撑架，以代替绝热层，如用玻璃钢、PVC 等。这部分材料与药柱黏结，从模具中脱出，可成自由装填药柱。

壳体黏结的发动机内表面在装药前必须进行处理，以增加与绝热层或衬层间的黏结性，保证装药的完整性。

① 发动机壳体准备。发动机内表面处理的作用，主要是除去妨碍胶接的表面污物及疏松层，提高表面能及增加黏结表面积，处理方法如下所述。

• 表面清洁度。因发动机壳体在加工制造或储存中其表面带有油污、锈蚀或金属氧化物，常用溶剂擦洗或溶剂脱脂法处理，在脱脂器内利用溶剂蒸气喷淋、冲洗发动机壳体表面以除去油污，常用的溶剂有丙酮、醋酸乙酯、三氯乙烯等。

• 粗糙度影响。增加表面粗糙度能提高黏结强度，但粗糙度不能超过一定界限。如太粗糙，凹处会残留空气，胶黏剂不能很好浸润，黏结强度也会下降。改变表面粗糙度一般进行喷砂处理，喷砂分干喷砂和湿喷砂。湿喷砂在液体介质中加入防锈液，喷砂后能防止内表面生锈；对人体影响及环境污染，湿喷砂比干喷砂要小。在喷砂过程中的质量与磨料品种(如石英砂，金刚砂，硅酸锆等)粒度大小、表面硬度以及喷枪出口时的压力有关。

• 表面结构的影响。除表面的清洁度、粗糙度之外，表面结构也有很大影响。一些壳体经喷砂后可进行磷化处理，以防止锈蚀。另外在壳体内表面涂敷一层磷化底漆以增强黏结性能。

• 报废装药壳体的清理。在工艺过程中，若装药质量不符合指标要求或装药发动机已超过了储存使用期，为了使装药发动机中壳体能继续使用，可去除装药部分。用机械切割去除装药，切割刀具与壳体碰撞易使装药点燃着火，有一定的危险性。利用高压水切割冲刷掉装药部分较为安全，装药发动机作旋转运动，高压水枪在发动机腔内作直线运动进行螺旋切割，高压水的压力在 16～30 MPa。

推进剂去除后，因绝热层或衬层与壳体间黏结牢固，这部分可用溶剂浸泡后去除，这种处理对壳体强度不会有影响。

② 模芯准备。因弹道性能的要求，对装药发动机的装药初燃面有一定的形状要求，初燃面的形状由模芯形状实现。因模芯在装药固化后要脱出，在脱出过程中，不能损伤装药表面，所以在模芯表面需进行处理，在表面涂敷或喷涂一层脱模剂。

• 涂敷法：涂敷所用脱模剂有高熔点地蜡、硅油、常温固化聚四氟乙烯脱模剂等，用这些材料涂敷一般只能使用一次。另外若由于涂敷不匀或在工艺过程中局部脱落，会影响到装药表面完整。

• 喷涂法：模芯经喷砂等处理后，在表面喷涂一层聚四氟乙烯薄膜，这层薄膜烧结在模芯上。喷涂后的模芯在立式炉中加热至 360 ℃～380 ℃后，再放入水中冷却，喷涂一

次，进行一次加热冷却过程，喷涂底漆和面漆，一般二层底漆一层面漆即可。

③ 绝热、包覆。为保护火箭发动机材料防止烧蚀和高压燃气流的冲刷，为了推进剂与发动机壳体间更好黏结，一般在发动机壳体内表面与推进剂之间要粘贴绝热层、自由脱黏层及喷涂包覆层。根据装药要求，有的火箭发动机只需包覆层即可。如果绝热层有一定的弹性并与推进剂能很好黏结，中间可不用包覆层。若包覆层与推进剂都选用 TDI 作固化剂时，包覆层在半固化时浇药后再固化相互间黏结性较好。包覆层固化深度高或在表面吸潮会影响的黏结性能。包覆层用 TDI 固化，推进剂用 IPDI 固化时，则包覆层固化深度应高些，不然会在界面间形成一软层影响黏结性能。包覆一般有离心法、喷涂法以及倒挂式法。包覆层能均匀地黏在壳体内表面，经一定温度达半固化后进行浇药，包覆层与推进剂之间进行交联反应，两界面间能更好黏结。

(3) 混合工艺。混合就是把推进剂所有组分按一定的顺序加入到混合机内，进行捏合、搅拌，使固液界面润湿，固体颗粒被良好包覆，各组分分散均匀一致，形成工艺性良好的高黏度悬浮体，即推进剂药浆。药浆浇铸到发动机内，其药浆表面能很快流平。

(4) 浇铸工艺。浇铸是把经混合后的药浆浇铸到发动机壳体内，固化后成符合设计要求的发动机装药。模芯可先装配后再浇药，也可浇完药浆后再插模芯。混合过程中，对药浆有的已进行真空除气，有的未进行除气。在浇铸过程中药浆浇入发动机壳体时还需充分除气，以保证装药的质量。主要浇铸工艺方法有以下几种。

① 真空浇铸。在真空条件下，把推进剂药浆经花板分割成许多细药条滴入到真空罐内的发动机壳体或模具中。真空浇铸除通用的喷淋式外，还有插管等方式。

• 浇铸工装。浇铸漏斗可由混合后的混合锅下部放料阀通过连接管接浇铸阀，也可用专用浇铸漏斗。药浆在浇铸过程中都需保温。在漏斗外都有通循环水的夹套。花板有圆孔(直径 3～5 mm)、月牙孔或扁孔(宽 5～7 mm，长 20～30 mm)。根据工艺特点也可选用其他的形状和尺寸。较小发动机直径在 200 mm 以内，药形单一，可用一缸多发。即浇铸缸内可装多发发动机壳体的浇铸架，浇铸架可转动，浇完一发后，转动浇铸架，浇铸继续进行。浇铸药浆质量，可通过标志杆或质量传感器来确定。浇完后，通过定位与插芯装置，使模芯正确对位，模芯顶部加压，缓慢地将模芯插入到已浇铸药浆的发动机壳体内。

• 真空度。在浇铸过程中真空度既是药浆浇铸的主要驱动力，也是排除药浆中空气的主要手段。保证药柱无气孔、致密、结构强度和弹道的稳定性，有利于药柱质量的重现性。在浇铸过程中：药浆浇铸动力＝真空度＋药浆压头。要增加浇铸动力，可增加药浆压头。因药浆量一定，故增加药浆压头时，需在药浆上增加压力。

不同地点、不同时间的大气压有所变化，因此不用真空度来控制工艺条件，通常用余压来控制，即：余压＝大气压－真空度。在浇铸过程中，余压控制在 1.36 kPa 以下为宜。

• 浇铸速度。浇铸速度对浇铸的药柱质量影响很大，从生产周期和药浆适用期考虑，浇铸速度快是有利的。但药浆的除气与真空度、暴露面和暴露时间有关，并涉及药浆的黏度、花板孔的形状与大小、药条落程长短等因素。为了保证除气完全，浇铸速度又不

宜太快，原则是，浇入的药浆能流平，不至于因新旧药浆流不平而在药浆之间夹气孔，影响装药质量。

• 浇铸温度。药浆的温度对药浆的黏度与固化速度影响很大。温度低时药浆黏度大，药浆中的气泡不易脱出，影响装药质量，也影响浇铸速度；而药浆温度太高则药浆黏度增长快，适用期缩短。对 HTPB 推进剂而言，使用固化剂不同，药浆的温度也应不同。如用 TDI 做固化剂，药浆温度控制在 40 ℃～45 ℃；若用 IPDI 做固化剂，药浆温度控制在 60 ℃～65 ℃为宜。在浇铸过程中除控制药浆温度外，还需对模芯与发动机壳体保温，避免由于药浆与其温差较大，影响到药浆流动及与其界面的黏结。

• 浇铸过程中几个问题：

其一，在浇铸前应对浇铸罐先抽真空，达到真空度后连续抽 15 min，真空度达到稳定后方可浇铸。在浇铸过程中，余压必需小于规定值。在药浆浇完后继续抽真空 15 min，以驱除装药顶部的气泡。浇铸结束，一定要缓慢放气，因为在真空浇铸过程中，药浆有一定的沸腾高度，若放气太快会使顶部物料疏松或有气孔。

其二，花板的孔径不宜选择太小、太薄，花板与发动机壳体顶部间距不宜太长，否则，若药浆成细条或成薄片滴入时，易在过程中翻转，引起所谓搭药现象而影响装药质量。

其三，在浇铸前发动机壳体与模芯都需保温，避免与药浆温差较大时，表面浸润不好而影响装药质量。

② 底部压铸。将已除气的药浆装在压力罐内，其上部连接增压（通氮气或压缩空气），底部出口处连接导管将药浆压入发动机壳体内，药位逐渐上升，直至充满壳体为止。加压也可通过螺杆方式进行挤压，发动机上端同时抽真空，这种方式对黏度较高的药浆也适宜。

③ 单室双推力装药技术。在战术发动机中，同一发动机单室双推力比单推力的工作效率要高。双推力工作时，有的靠药型对燃面的变化调节；有的用装填不同燃速的推进剂来达到，为了增加两级的推力比，同时采用不同药型与两种不同燃速的推进剂。双推力有两种装药形式：

• 药柱轴向前后分段装药。药柱轴向分段装药，前段装低燃速推进剂，后段装高燃速推进剂，两段衔接结成整体。装药时两段的装药量及药长尺寸通过自动计量装置或液面标志杆精确控制。两种装药界面黏结要牢固，相互渗透层要小。在浇铸第一种推进剂满足要求后，让药浆表面流平后，再浇第二种推进剂。先浇入的药浆不应挂模芯与黏壁，防止与后浇药浆混淆，影响后浇药浆性能。

• 药柱径向内外分层装药。根据装药要求，内外层分别装填不同燃速的推进剂。一次浇铸成型的装药工艺是采用隔离筒技术。先将一定尺寸的隔离筒安置在发动机壳体内，再将两种不同的推进剂药浆先后浇入隔离筒的外部和内部空间。装满药浆的燃烧室被固定在拉拔装置上，采用拉拔技术从药浆中拔出隔离筒，然后进行常规固化、脱模和整形，一次完成双燃速推进剂装药。为了确保两种推进剂界面形状和尺寸一致性，通过控制

内层挡药板运动速度和隔离筒拉拔速度。在隔离筒拔出时，两种推进剂界面迅速建立力平衡，从而保证界面的形状和尺寸一致性。

以上两种装药也可分两次浇铸成型，即第 1 种推进剂浇铸待半固化后，拔出模芯，再浇入第 2 种推进剂。为了使两种推进剂界面更好黏结，第 1 层药表面一定要清洁，防止其他物料污染。两次成型时，第 1 种推进剂需经两次固化。

(5) 固化工艺。高分子聚合物与固化剂在一定温度下进行化学交联反应，称之为固化过程。固化的工艺条件取决于所用固化剂品种和用量及固化温度和固化时间。

① 固化温度。推进剂在混合过程中加入固化剂后，实际已在进行化学交联反应。在浇铸过程中药浆黏度逐渐增大，使药浆逐渐失去流动性。在固化初期，因推进剂固化是放热反应，生成的热量在推进剂内不易散发，所以推进剂内温度比固化系统温度要高。随着反应的接近完成，推进剂内温度逐步下降。反应速度与固化温度有关，通常固化温度每增加 10 ℃，固化反应速度增加 1 倍。因此固化温度高，所需的固化时间短，固化温度低，所需固化时间长。从固化反应速度和固化生产周期考虑，温度高些有利，但温度太高会使药柱受到较大热应力，容易造成脱黏和裂纹。

• 固化温度对黏结的影响。推进剂的热膨胀系数约为发动机壳体膨胀系数的 10 倍，钢的热线胀系数为 1.1×10^{-5}/℃，而 HTPB 推进剂热线胀系数为 1.1×10^{-4}/℃。因此当推进剂在较高的温度下固化后冷却至室温时，推进剂药柱的收缩要比壳体的收缩大。对于壳体黏结装药，药柱将受到很大的热应力，在装药端部易发生脱黏现象。为了减少这种现象发生，通常采用降低固化温度或常温固化，固化过程中控制升、降温速度一般为 (2 ℃～3 ℃)/h；另一方面在端部采用应力释放罩或自由脱黏层。

• 固化温度对重现性的影响。由于推进剂的导热系数较小，HTPB 推进剂的导热系数为 0.5～0.56 W/(m·K)，绝热层的导热系数为 0.4～0.6 W/(m·K)，包覆层的导热系数为 0.26～0.36 W/(m·K)，因此固化反应热很难散发出去，从而使药温升高，影响随后的固化反应历程，最终将影响固化后推进剂药柱的力学性能。所以若固化温度不严格，温度波动较大时，固化反应历程将不同，将造成各批产品物理性能的差异，导致产品重现性差。

在选择固化温度时，要视发动机对推进剂力学性能的要求、燃烧室药柱厚度的情况以及选用固化剂品种而定。若用甲苯二异氰酯(TDI)作固化剂，固化温度可选择在 40 ℃～45 ℃；用异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)作固化剂时，固化温度可选择在 60 ℃～65 ℃；若较大发动机装药，固化温度应低些。

因固化温度对推进剂性能影响很大，所以要保证药柱在固化过程中，上下温度应一致，避免因温度差异而影响药柱性能的一致性。

② 固化时间。固化时间指在一定温度条件下，推进剂药浆达到最适宜的物理性能所需要的固化时间。通常推进剂的性能由抗拉强度和延伸率来决定，如图 13.11 所示。

采用常压固化，当推进剂采用 TDI 作固化剂时，固化温度取(50±2)℃时，固化时

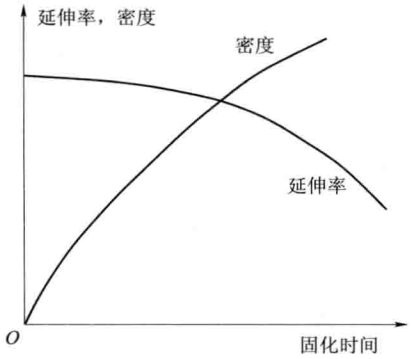


图 13.11　固化时间对推进剂力学性能的影响

间需6～8 天；若温度取(70±2)℃时，固化时间只需 3～4 天。当推进剂采用 IPDI 作固化剂时，固化温度为(60±2)℃时，固化时间需 6～8 天。一般药柱直径较小时，固化温度可选高些，以便缩短固化时间。

③ 固化工艺的改进。固化工艺一般在常压下，通过热风和热水循环以达到均匀的固化温度，提高固化温度的精度，使固化过程更能一致，产品性能稳定重现。

• 加压固化。为消除或减小推进剂药柱在制造时所产生的热应力，常采用加压固化。壳体黏结装药产生热应力的主要原因有：

其一，推进剂固化温度与装药发动机使用温度不同。

其二，推进剂和发动机壳体的热膨胀系数相差很大。

其三，推进剂、包覆层、绝热层直接与刚性壳体黏结，使药柱的形变受到约束。

消除药柱中的热应力，主要是要消除药柱外表面产生变形的限制。因此对药柱因热负荷产生的内部能量(形变的能量)，可以给一相等的外力加以抵消。

加压固化就是在固化时将推进剂药浆加压，这样发动机壳体就产生了弹性膨胀变形。在推进剂固化后，温度渐渐下降，所加的压力也慢慢释放。此时，推进剂由于降低温度而收缩，发动机由于释放压力而收缩，因此所加的压力就正好抵消了药柱的热应力。

根据压力平衡，可得：

$$U_T + U_P = 0$$

式中　U_T——冷却时发动机壳体半径方向的热变形；

U_P——加压时发动机壳体在半径方向的变形。

加压方法有：

其一，借助胶膜对药浆加压。

其二，用氮气直接向药浆加压。

通过加压固化，推进剂密度比常压固化时要高些，力学性能要好些。

• 常温固化。为了减小固化后药柱产生的热应力，还可以采用常温固化。因在常温下推进剂固化反应速度较低，为提高固化反应速度，通常加固化催化剂，常用的固化催化剂有乙酰丙酮铁[$Fe(AA)_3$]、三苯基铋、三乙氧基苯基铋等。

(6) 脱模与整形。

① 脱模。对与发动机燃烧室紧密黏结的固化成型的药柱来讲，只需脱去模态，显露出药柱的燃烧面，即完成脱模。对非壳体浇铸药柱来讲，脱模是将固化成型的药粒借外力脱去模芯和模具。经脱模后，便得到一定形状和尺寸的完整药柱。

为了减小模芯从药柱中脱出时的阻力，在模芯表面均烧结了一层聚四氟乙烯薄膜和涂敷硅油等脱膜剂，即使这样药柱与模芯间的黏结力还是很大。为了安全，较大模芯在脱模前应先把模芯顶松动后再脱模。整个脱模装置应由具有良好导电性能材料组成，使在脱模过程中因摩擦产生的静电能很快的传导，避免发生安全事故。

② 整形。指对发动机装药中内型面的几何形状、尺寸按设计要求进行修整或对药柱端面修整到规定要求的过程，在此过程中可调整装药质量公差，提高精度。整形有手工与机械两种方式进行，应用有色金属作整形工具。

(7) 端面包覆。因发动机弹道性能的要求，对装药的端面需进行包覆。端面包覆一方面可限制推进剂端面燃烧，另一方面也可起到部分密封作用。通过端面包覆还可调整头、尾空间的尺寸要求。经固化后的发动机装药在药柱表面基本没有活性基因，端面包覆主要靠亲合吸附力。为了增大黏结力，除药柱表面清理干净外，还应在药柱表面涂黏合剂。端面包覆有黏片和端面料浆浇铸，黏片根据形状要求做好预制片，在装药表面与预制片一面涂黏合剂，用工装让其紧贴固定。端面料浆浇铸时，因发动机装药已进行过固化，所以在端面包覆时不宜在高温下存放时间过长，因此端面料浆应是在较低温度、较短时间内固化。在端面包覆时，还应防止气泡及端面包覆与发动机壳体内壁形成凹月面，而影响装配。

4. 火药的其他成型工艺

火药成型工艺有多种，除螺旋挤出工艺以外，还有传统的球形药制造工艺、柱塞式挤出工艺、片状药压延工艺，近年来又发展了几种新工艺，双螺杆挤出是近年来发展的新工艺。

1) 球形药制造工艺

(1) 概述。球形药是 20 世纪 30 年代开始工业化生产并大量应用的一种火药。与传统的挤出法制造工艺相比，球形药制造大大简化了生产工艺，缩短了生产周期，改善了火药生产的安全状况。最早的球形药是单基球形药，首先用于轻武器。单基球形药的使用，提高了轻武器的装药量，改善了轻武器的性能。随后出现的双基球形药，性能比单基球形药又有很大提高。双基球形药具有较低的吸湿性和较低的温度系数，而能量比单基球形药大幅度提高。因此双基球形药更能大幅度提高轻武器的性能，例如用于 7.62 mm 枪弹时，初速提高了近 30%。除此之外，双基球形药还广泛应用于各种迫击炮装药中。

近年来，随着对球形药工艺技术的深入研究，在原制球工艺基础上，又发展了球扁药制造技术、压延整形技术、挤出法制造圆片药技术等。由上述不同配方、不同工艺、不同形状的小粒发射药，组成了一个新的火药“家族”。小粒发射药不但在轻武器、迫击炮武器以及民用枪械方面得到广泛应用，而且造粒也是双基浇铸工艺的必要中间步骤，受到广泛的重视。

(2) 球形药制造的工艺原理。制造球形药的方法有内溶法(也称分布法)和外溶法(也称胶液法)，两者的主要区别在于溶解硝化纤维素(制单基球形药)或吸收药(制双基球

形药)的方式不同。

① 内溶法工艺。内溶法工艺是将硝化纤维素(或吸收药)悬浮在水介质中,加入溶剂(如乙酸乙酯),在搅拌和加热的条件下物料被溶解成具有一定黏度的高分子溶液,随之被搅拌粉碎成细小的液滴。液滴与水不相溶,在液滴表面张力的作用下,其表面积有尽量缩小的趋势。同样体积的物体,球形的表面积最小,所以液滴成为球形。当介质阻力、球表面张力、液滴黏度、搅拌速度等诸因素控制适当时,球在介质中运动时受力平衡或受力较小,可以保持形状不变。但是大量的球体悬浮于水介质中,仍是个热力学不稳定体系,它们会自动聚结,有自发变成大颗粒的趋势,以使总表面积减小,体系能量降低。因此需要在介质中加入保护胶(如骨胶、明胶等),这样在液滴表面形成一层保护膜,在液滴相互碰撞时不致黏在一起。在搅拌的作用下,系统形成一个"油—水"型乳浊液。

脱水也是内溶法工艺的重要步骤。由于水在乙酸乙酯中有一定的溶解度,液滴中随着乙酸乙酯带入一定量的水分。这些水分影响球形药在驱溶过程中的正常收缩,造成药质疏松,影响弹道性能。为了提高球形药的密度,预驱溶之后,在水中加入可溶性盐类(如硫酸钠)。由于介质中盐产生的渗透压作用,使球中水分通过保护膜层不断渗透到水介质中。球内部的水分则在浓度梯度推动下,通过内扩散向表层运动。通过控制渗出水分的多少,可得到不同密度的药粒。

球形药的驱溶在水中进行,也称做蒸溶。首先在脱水之前预蒸,通过升温,将溶剂驱除总量的 25%。其余溶剂在脱水之后蒸溶驱除。开始以低于溶剂沸点的温度驱溶,此时球中溶剂在浓度差推动下向水中扩散,从水面蒸出。然后以较高温度驱溶(等于或高于溶剂沸点,但低于水的沸点),溶剂蒸气直接从球表面蒸出,穿过水介质排出。驱溶的同时,球粒逐渐硬化定型。

② 外溶法工艺。外溶法工艺是将预先烘干的硝化棉溶于溶剂中,制成硝化棉浓溶液,在压力作用下通过小孔进入被溶剂饱和并含有保护胶的水中。先被低速搅拌成小粒,再在高速搅拌和表面张力作用下逐渐成为球状。其他步骤和内溶法相同。

外溶法工艺制造双基小粒药,不必预先烘干吸收药。因为乙酸乙酯溶解吸收药后,排水很容易。溶解是在带有两个框式搅拌器的容器(一般称做胶化机)内进行,在搅拌作用下溶剂与吸收药料混合并溶解,排出的水分从胶化机的排水孔导出。胶化好的药料通过螺旋挤出机的模挤出药条,并被紧贴在模具出药面上的旋转刀片切割成一定长度(一般长度等于药条直径)。为防止药粒黏接,在成型过程中不断向切下的药粒喷射明胶硫酸钠水溶液,药粒随之流入蒸溶锅内。在蒸溶锅内,为使柱形药粒成为球状,往蒸溶锅内加一部分溶剂(称做强化剂)。在强力搅拌和强化剂作用下,柱形药粒逐渐成为球形。其余步骤和内溶法相同。

③ 制造各种形状小粒药的工艺原理:

• 球扁药工艺。正常的球形药驱溶过程是在脱水之前预蒸,预蒸驱溶量约为火药中溶剂的 25%。这样在脱水时药粒表面还未形成硬壳,径向可以均匀收缩,而保持球

形。如果在预蒸阶段，蒸出的溶剂量达到火药中溶剂量的75%，球表面形成硬壳，脱水时，随着药粒中水分向外渗出，药粒要收缩，而药粒表面积因结壳不能缩小，从而迫使球体在短径方向进行收缩而成为球扁药。球扁药的燃烧过程接近于恒面燃烧，其弹道性能优于减面燃烧的球形药。

• 压延整形技术。球形药的缺点是减面燃烧而且药形尺寸分散较大，对弹道性能不利。球扁药虽然接近恒面燃烧，但其药形尺寸也有较大的分散。为了使药形尺寸更加规整，减小其分散程度，采用压延整形技术是一种既简单又有效的途径。当球形药（一般是外溶法制得的球药和球扁药）完成驱溶、光泽、烘干等工序加工后，通过双辊压延机加工整形。球形药通过压延机后，被压扁成圆盘状，火药燃烧层厚度由压延机的辊间距加以控制。球扁药通过压延机后，也受到不同程度的进一步压扁，使燃烧层厚度更加集中，减小了分散程度。其最终效果是将球形或球扁药变成了圆片状，改善了火药的弹道性能。目前，球药压延整形更适用于双基球形药，在保持一定的药温和辊筒表面温度的情况下，双基球形药的可塑性更好些。另外需保证合适的压缩比，若压缩比过大或药温、辊筒表面温度过低，球药压扁后易产生微裂纹，增大火药燃速，对弹道性能不利。

• 挤压小粒药技术。工艺过程类似外溶法，但切药不是将药条切成柱状，而是直接切成所需厚度的圆片药，以下工艺过程与球形药相同。圆片药在缓慢蒸溶过程中，不会收缩成球形，仍保持原来的圆片形状。这种工艺还可以通过模具压成各种形状的药条，例如可以生产中间带孔的圆片药。也可以通过矩形孔（扁孔）模，矩形孔的宽度即为火药燃烧层厚度（考虑到收缩后），通过切药控制药粒长度。当前某些大口径迫炮装药用小粒药，因药粒尺寸较大，更适合于使用挤压小粒药工艺。

④ 球形药制造工艺流程及工艺条件。

以单基药内溶法为例，其工艺流程如下：

成球 → 水洗 → 筛选 → 降内挥 → 钝感 → 预烘 → 光泽 → 烘干 → 混同 → 包装

2）柱塞式挤出工艺

传统的柱塞式挤出工艺流程如下：

吸收药 → 压延 → 精压 → 制卷 → 挤出 → 切断 → 药粒

吸收药经卧式压延机压延，再经立式压延机精压成厚度均匀的薄片，卷成卷，装入水压机或油压机的料缸中，在一定的压力下，通过模具挤出成管状药，再经切断即可得到药粒，一般用于枪炮发射药。

3）片状药压延工艺

无后坐力炮或迫击炮常使用薄片的带状或方片状药，这种药是经卧式压延机或立式压延机压成所需厚度的薄片，经切药机切成所需的尺寸。

4）Bofors 工艺

瑞典 Bofors 公司推出一种新工艺，见图 13.12。这种工艺的前半段仍采用制球工艺，

然后通过两次单螺杆挤出，压制成型。

这种工艺避免了能耗高、着火率高的压延工序。

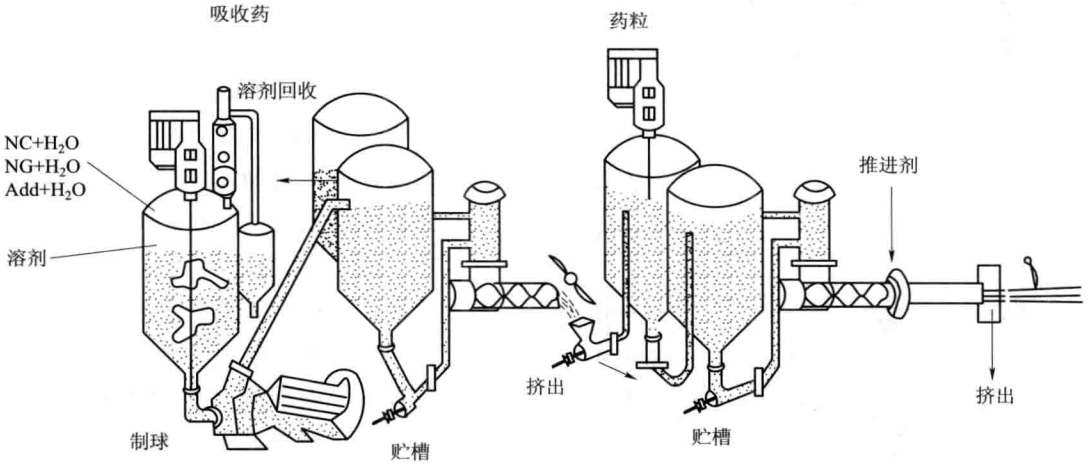


图 13.12　Bofors 工艺流程示意图

5）螺旋挤压模铸工艺

近来，国内发展了一种将螺旋挤出工艺与浇铸工艺结合在一起的新型工艺，称为螺旋挤压模铸工艺，见图 13.13。

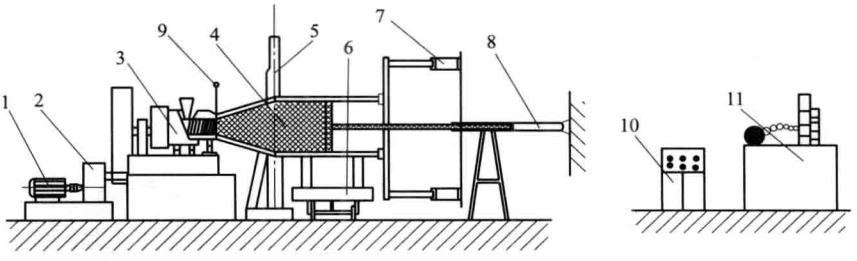


图 13.13　螺旋挤压模铸工艺原理图

1—电动机；2—减速器；3—螺压机；4—模具；5—切断系统；6—运模小车；
7—合模系统；8—成型油缸；9—压力传感器；10—控制柜；11—液压站

螺旋挤压模铸工艺的工作原理是：塑化后的药粒通过螺旋挤出机塑化，进入模具腔中，逐渐充满。模具成型段有一被液压油缸驱动的活塞，当药料在模腔中所形成的总的推力大于油缸赋予活塞的总的轴向力时，活塞开始后退，药料逐渐充满模具的成型段，形成药柱。将成型段与模具分离，冷却后推出成型段，即可得到药柱毛坯。与此同时，将另一个成型段与模具连接，再进行第二根药柱的成型。

这种工艺具有螺旋挤出工艺的生产周期短、可靠性高、生产能力大的优点，又可制造大型药柱。

6）复合固体推进剂的挤压工艺

复合固体推进剂已广泛应用于小型战术导弹和火箭中，特别是随着低易损性推进剂的发展，要求生产直径小、数量多的药柱。而挤压工艺具有生产速度快、设备周转率高、工装简单的优点，促进了复合推进剂挤压工艺的发展。

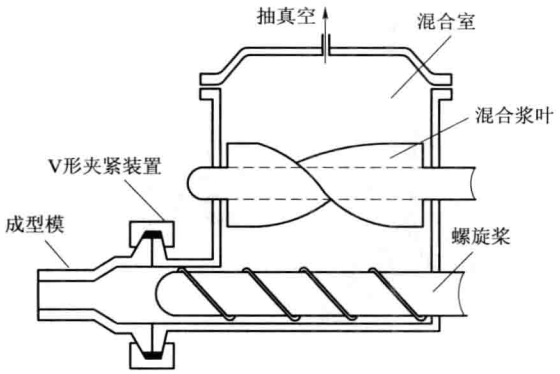


图 13.14 间断式混合挤压机

有两种挤压设备：

（1）间断式混合挤压机。间断式混合挤压机如图 13.14 所示。该设备的结构是：上面有两个混合桨叶，在其下面位于两个桨叶之间平行的安装有一个螺旋挤压器。

混合挤压机可以混合高能量密度的可压伸的复合推进剂，其混合时间比普通卧式混合机节省一半，同样也适用于高固体含量的推进剂配方。该方法除了能降低成本，缩短加工时间外，还有以下的优点。

① 增大了黏合剂应用范围，可以采用黏度高的黏合剂，如黏度高达 1 100 Pa·s 的 HTPB 黏合剂。

② 可以取消增塑剂。该设备可以使用含量高的固体组分，在黏稠的黏合剂内混合均匀，不需加工艺助剂，这样就消除了增塑剂迁移问题，也可以在不降低延伸率的情况下提高推进剂强度。

③ 间断式混合挤压机可以适用于混合固体含量高达 94%的复合推进剂配方，其密度高达 1.922 g/cm^3；

④ 由于加强了催化剂的分散，燃速可获得较大提高。

⑤ 与浇铸工艺相比，可降低成本，节省时间。

（2）连续混合机。连续混合机如图 13.15 所示。

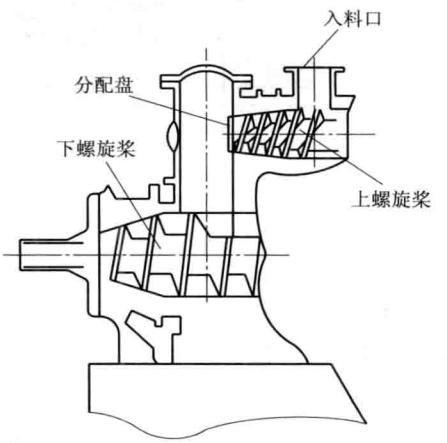


图 13.15 连续混合机

其中有两个螺旋桨，一个分配盘，两个螺旋桨之间是除气设备，推进剂药团用传送带通过漏斗加入上螺旋桨，通过上部螺旋桨至除气室，然后落在下螺旋桨上，使除气后的推进剂进一步密实，从出口处压入发动机内，其示意图如图 13.16 所示。

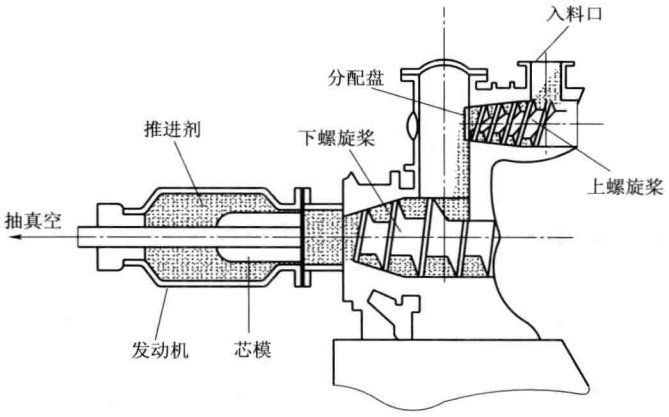


图 13.16　浇铸示意图

7）黏结法制造大型固体推进剂

无溶剂双基推进剂习惯地被挤压成型用于小口径火箭，然而较大的推进剂药柱在尚难以挤压制备时，可以采用黏结法工艺。

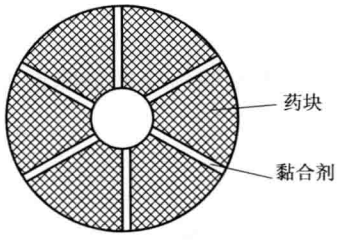


图 13.17　药块黏结断面示意图

黏结法工艺又分两种：

（1）药块黏结。用小的挤压机挤出合适形状的断片，把这些断片与一层弹性黏合剂胶黏在一起以吸收由于温度变化而产生的热应变而制成的一种药柱。截面如图 13.17 所示。

该工艺着重解决药块的偏心挤压和黏合剂与药块的相容性，此外，要求黏合面平整以及消除热应力以使弹道性能优良，黏合剂成分与药块成分间的药柱储存过程中不应有大的迁移，要靠配方和工艺来解决。

被黏结的药块可以是一种推进剂，也可以不止一种，这要根据使用要求的燃烧规律和推力方案来决定。

可见，对于单室双推力或多推力方案的发动机装药，采用这种工艺也是非常适宜的。该工艺有如下优点：

① 挤压出的双基推进剂能够应用在药柱尺寸超过目前工艺方法的火箭中；

② 目前的 X 射线技术可以应用在断片检验中。

（2）药片卷辊黏结。为了制作大尺寸的药柱，将双基无溶剂火药压成规整的药片，在其内表面涂以黏合剂，然后用专门的卷机卷成药柱。

有关黏结的要点与药块黏结法基本相同。

8）双层推进剂

在主推进剂中填充入燃速比主推进剂大，或温度系数小或压力指数小，二者至少具备一个条件的辅助推进剂。

辅助推进剂往往采用双基平台推进剂。主推进剂常为高比冲的复合推进剂或改性双基推进剂。

图 13.18 表示端面型燃烧火箭推进剂的一个实施状态的纵断面图形。

在中心药柱周围也可环绕多根辅助推进剂药柱。

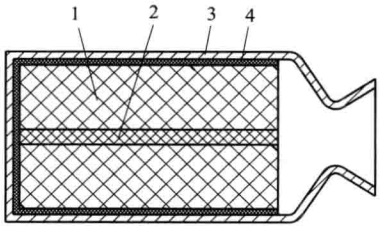


图 13.18 双层推进剂示意图

1—主推进剂;2—辅助推进剂;3—火箭燃烧室;4—包覆层

在这种设计中,火箭发动机的燃烧特性依赖于辅助推进剂的燃烧特性。设辅助推进剂的燃速为 γ_0,主推进剂的燃速为 γ,那么,当 $\gamma_0>\gamma$ 时,稳定状态下主推进剂就形成了以辅助推进剂为顶点的圆锥状的燃烧面,并且一直维持此形状进行燃烧。火箭发动机的燃烧压力依赖辅助推进剂的燃烧速度。

该推进剂可用以下的方法制得。

首先,将按既定燃烧特性配成的辅助推进剂,按照常规的制造方法,制成规定的形状。然后将此辅助推进剂固定在铸型的中心轴上,并将按既定配比组成的主推进剂药浆铸入铸型内,最后用常规的方法使其硬化,制成火箭推进剂。

通过本工艺,可对推进剂的温度系数、压力指数进行有效的改良。

双燃速固体推进剂药柱可以有很多结构方式。通常,用双燃速的药柱能消除推力拖尾,消除星孔燃烧的残药现象,使火药能量得以充分利用。

此外,还有多组元药柱。图 13.19 表示了部分这样的药柱外形。

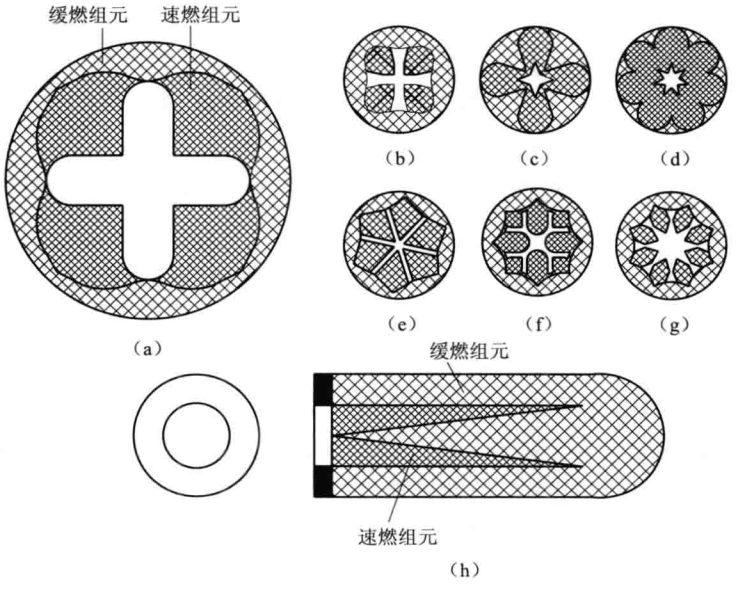


图 13.19 双燃速推进剂及多组元药柱

(a)~(g)双燃速推进剂;(h)多组元药柱

9）双层发射药

为了提高发射药的能量利用率，可按照发射药装药设计的要求，制成双层发射药，其外层为低燃速的，内层为高燃速的，以提高燃烧的渐增性。

工艺途径类似于电缆护套料包电缆或推进剂的挤压包覆工艺的办法，利用十字头，在连续挤压的情况下，一种发射药成分即包裹在另一种发射药的外面。

10）超声挤压

美国匹克汀尼兵工厂发表了超声挤压工艺，据称用 180 W 的超声波，可使 N5 火药的压伸速率从 15%提高到 36%，使 XM55 火药从 110%提高到 315%。单位压力下的挤压速率随超声功率的增加而增加，超声能不会引起火药的过度加热。装置见图 13.20。

5. 火药柔性制造技术

柔性制造(Flexible Manufacturing)技术，在各个国家、各个行业越来越受到重视，在 1992 年财政年度，美国国防部制定的“关键技术计划”中提出 6 大类 22 项关键技术中，就有 15 项属于军民两用技术，其中又把柔性制造排在制造类的第一位。

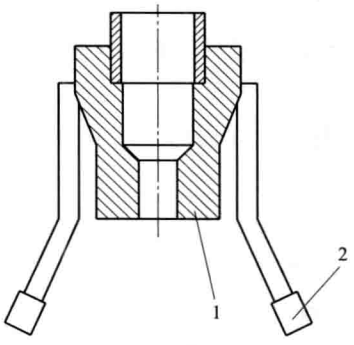


图 13.20　双基发射药超声挤压示意图

1—药模；2—换能器

1）柔性制造技术的特点

由于社会对产品多样化需求日益增长，导致产品品种多样，更新换代速度加快，中小批量生产明显增加，据统计已达 75%。生产这类产品，若仍然采用传统的刚性自动化设备或者单件生产的普通设备，显然无法满足高柔性、高效率的要求，生产费用要增加几十倍或上百倍。于是，人们要寻求一种新的能满足多品种、中小批量生产要求的新技术，这就是柔性制造技术。

柔性一般表现为生产设备能迅速转换产品种类、品种的能力，具有迅速而有效地吸收新技术的能力，对需求和要求能快速做出反应的能力。从广义上讲，柔性生产线除了具备多功能特点外，还应是连续化、自动化的生产线。它采用先进的计算机监控系统，实现全线生产过程的控制和管理自动化。

例如：在机械行业中，一台由计算机控制的车床，一次装卡即可完成车、铣、钻等多道工序。改变计算机程序，即可加工完全不同的零件。这样的几台机床连在一起，由中央计算机控制，并配以自动传输系统，即可完成中小批量、多品种的加工。

2）柔性制造技术在火药生产中的应用研究情况

(1) 火药生产具有工艺特殊、设备专用、易燃易爆、作业危险性大以及设备管线锈蚀、腐蚀严重等特点，使得现有生产线专用性很强，这样的生产线只能适应单品种、大批量的生产模式。在目前国际形势变化多端的情况下，更需要发展火药柔性制造技术，实现多品种轮番生产的生产模式。

(2) 国外火药柔性制造技术发展情况。美国陆军军械研究发展与工程中心于20世纪90年代初投资开展了发射药柔性制造设备的方案设计,在设计方案中,双螺杆挤出机是该套柔性制造设备的核心。此套设备能生产各种溶剂法、无溶剂法炮用发射药、复合推进剂,还能生产某些混合炸药和烟火剂等。1993年10月除完成了控制系统方案软件并通过了评审外,还完成了每一道工序的设备功能标准。这些柔性制造设备可以安全、高效地生产火药,并采用环境可接受的方法进行三废处理。该柔性制造设备已于1994年年底完成。

1994年9月,法国和美国开始联合实施一项发射药柔性制造计划,计划3年完成。该计划的目标是研制既适合于挤压,又适合于浇铸的各种发射药、混合炸药和固体推进剂生产线。其核心设备是法国火炸药公司研制的ϕ85 mm双螺杆挤出机和德国W&P公司的ZSK-40型同向旋转全捏合双螺杆混合/挤出机。

(3) 我国从20世纪90年代开始发射药柔性制造技术的研究工作。现已突破了包括双螺杆技术在内的化工单元关键技术,并在此基础上建设具有中国特色的火药柔性生产线。

3) 火药柔性制造的核心技术——双螺杆挤出工艺

单螺杆挤出工艺用于火药生产已历时半个世纪,用这种工艺生产的火药质量可靠性高、重现性好,实现了连续化生产,在火药生产史上跨进了一大步,是生产单一类型火药的较好的手段。但随着火药的发展,单螺杆挤出工艺也逐渐暴露出一些问题,主要表现在:

① 适用范围窄。对于表观黏度过高或过低的火药均不能适用。火药的表观黏度过高时,制品塑化不好;表观黏度过低时,容易产生"打滑",严重时药料与螺杆一起旋转,不能向前输送,长时间的与机体的摩擦会导致事故的发生。

② 不能适用于高填料的火药配方。为了提高火药的能量,常常加入较多的固体炸药,如黑索今含量可增加到70%以上,这类火药也容易"打滑"。

③ 温升高。药料在成型过程中受到摩擦挤压,温度升高。单螺杆挤出过程中,药料温升常在20 ℃~30 ℃,甚至更高,温升过高也会引发事故。

双螺杆挤出工艺是在单螺杆挤出工艺基础上发展起来的。不但生产工序减少,能耗降低。更为重要的是:双螺杆挤出工艺适用范围广、柔性强,类似糨糊状或黏度较大的物料均能适用。在火药生产过程中成型工序是关键工序,因此,双螺杆技术是火药柔性化生产的核心技术。

(1) 双螺杆挤出机结构及分类。

结构:双螺杆挤出机的结构,如图13.21所示,它由机筒、螺杆、加热器、机头连接器(包括筛板即多孔板)、传动装置,(包括电动机、减速箱和止推轴承)、加料装置(包括料斗、加料器和加料器传动装置)组成。

机筒内包容着两根螺杆。两根螺杆的驱动是由专用的分配箱的两根输出轴驱动。分配箱内通过齿轮传动由一个输入轴变为两个输出轴,电动机与输入轴连接,电动机转速可

调，机筒可以是整体式、组合式或圆筒部分水平方向上分离为两半部由液压压紧在一起（蛤蚌式）。

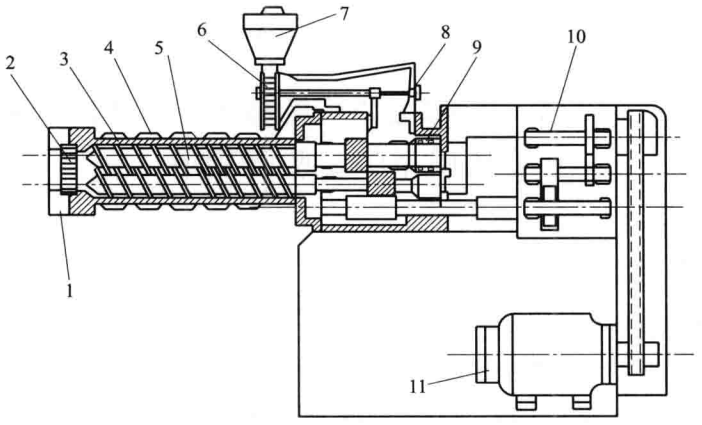


图 13.21　双螺杆挤出机结构简图

1—机头连接器；2—多孔板；3—机筒；4—加热器；5—螺杆；6—加料器；7—料斗；8—加料器传动机构；9—止推轴承；10—减速箱；11—电动机

（2）国外双螺杆挤压火药工艺状况。

① 德国代拿迈特—诺贝尔炸药公司生产线。

该生产线全部采用双螺杆挤出机，其流程如下：

原材料准备 → 双螺杆啮合 → 双螺杆造粒 → 混同和干燥 → 双螺杆成型 → 药柱

据报道这条生产线可压制 ϕ150 mm 实心药柱和 ϕ300 mm 带孔的药柱。

② 德国 WNC 公司生产线。

它是由剪切压延机与双螺杆挤出机联合，其流程如下：

驱水 → 剪切压延机塑化 → 双螺杆成型 → 药粒

吸收药经驱水至含 30%的水分，然后在压延机上塑化挤压至水分达到 1%以下，再进入双螺杆挤出机成型。若生产三基药，可在双螺杆挤出机下游直接加入硝基胍，经螺杆的混炼塑化，并且挤压成型。这条线可用来制造单、双、三基药。

③ 法国火炸药公司双螺杆火药生产线。

法国火炸药公司用单螺杆和双螺杆挤出机联合组成生产线。并指出：仅使用一台双螺杆挤出机来制造推进剂，其压力指数和温度系数要比原有的间断工艺稍大，在增加了一台单螺杆挤出机后燃烧性能得到改善。

④ 美国双螺杆挤出生产线。

美国直至 20 世纪 70 年代初，火药厂仍采用间断法制造发射药，设备也未更新。为了改造工艺，雷德福工厂建成一条单、双、三基药生产线，月产 1 100 t，采用德国 W&P 公司

制造的双螺杆挤压机。使用该线还压制推进剂和炸药。

⑤ 巴西、瑞士、意大利及埃及双螺杆挤压火药生产线。

巴西建成一条单基药双螺杆生产线，瑞士、意大利也建立了生产线，他们所用的设备也都是 W&P 公司制造的 ZSK 型组合式同向旋转双螺杆挤出机。

13.3 发动机装药的技术要求与装药质量的检验与验收

13.3.1 发动机装药的技术要求

内弹道性能验算证明：装药设计满足战术技术性能要求之后，还要对药柱进行结构完整性分析。为了满足药柱结构完整性的要求，往往要对原装药设计做某些必要的修改。

对于自由装填式的发动机而言，药柱强度问题通常是不大的。一方面是由于在这种情况下药柱所承受的载荷主要是发射时的加速度载荷和燃气压力，而这些载荷所产生的应力通常是不大的；另一方面是由于自由装填式发动机常采用有较高抗压强度的双基推进剂。然而，若推进剂的弹性模量过小，在高温下工作的药柱会产生较大的变形，使通气面积减小，对于高装填系数的发动机来讲，会出现过高的初始压力峰。若推进剂的力学性能太差，甚至点火压力的冲击也会使药柱破碎，特别是在低温情况下工作，情况更为严重。一般地讲，采用双基推进剂的自由装填式发动机的药柱强度是足够的，通常不需要再做结构完整性分析。

对于铸装式发动机，尤其是药柱内孔形状复杂时，通常都有较严重的药柱强度问题。例如，药柱在固化冷却、长期储存、运输、勤务处理和点火发射期间经受各种载荷的作用，可能引起药柱内表面出现裂纹，药柱和壳体黏结面脱黏和药柱严重下沉等。因此，对于这类发动机的药柱必须进行结构完整性分析。

通过药柱结构完整性分析和修改装药设计，一般情况下，应保证药柱在可能经受的各种载荷作用下达到如下要求：

(1) 药柱内表面不出现裂纹，以免引起燃烧面积增大，破坏预定的推力、压力曲线，甚至引起燃烧室爆炸。

(2) 药柱和壳体黏结面不发生脱黏，以免引起燃烧面积增大，或壳体被烧穿。

(3) 药柱无过大下沉，以免药柱堵塞喷管；药柱无过大的径向变形，以免引起通气面积过小，出现严重的初始压力峰。

(4) 药柱不发生自燃等。

对于不同的产品有不同的技术要求，下面以 122 mm 火箭弹的装药技术条件为例，说明对发动机装药的一些技术要求。

1. 原材料及燃烧室

(1) 一个检查批一般用同一批原材料制造。当进厂原材料批量较小时可以混批，但

混批后的性能必须满足指标要求。在一个检查批投料期间，如果必须更换某些原材料批号时，最多只能换两种，并应重新进行小样测试。

(2) 原材料进厂应有合格证或质量证明书，并由检验部门取样复验。原材料个别性能超差时，在确保产品质量的原则下，由单位总工程师批准后方可使用。

2. 包覆层

(1) 侧面和端面包覆层按规定的配方制造。

(2) 包覆层性能应满足表 13-3 的要求。

表 13-3　包覆层性能指标

序号	项　目	指　标　要　求	
		侧面包覆层	端面包覆层
1	抗拉强度/MPa	≥0.78	≥0.78
2	延伸率/%	≥150	≥50
3	与药柱的黏结性能	断在药上	

(3) 燃烧室、包覆层和药柱各界面之间不准有脱黏面。

(4) 侧面包覆层应平整、均匀，按 0.7～1 mm 的厚度确定加料量。

(5) 包覆层不准有漏包、穿透性气孔和外来杂质。

(6) 端面包覆层表面与燃烧室端面的平行度不大于 0.8 mm。

3. 药柱

(1) 药柱按 8610 推进剂配方制造，其性能应满足表 13-4 要求。

表 13-4　推进剂性能指标

序号	项　目	指标要求	备　注
1	定容爆热/(kJ·kg^{-1})	5 293±42	+20 ℃
2	线性燃速/(mm·s^{-1})	9.5±0.40	+20 ℃，6.0 MPa
3	压力指数	≤ 0.45	+20 ℃
4	密度/(g·cm^{-3})	≥ 1.69	+20 ℃
5	抗拉强度/MPa	≥ 0.78	+20 ℃
6	最大强度延伸率/%	≥ 30	+20 ℃
7	抗拉强度/MPa	≥ 0.59	+50 ℃
8	最大强度延伸率/%	≥ 25	−40 ℃

(2) 药柱整形和端面包覆后，燃烧室头尾空间长度应符合产品图的要求。

(3) 药柱重量 $228^{+0.16}_{-0.08}$ kg。

(4) 药柱燃拱厚度偏差不大于 0.8 mm。

(5) 药柱不准有裂纹。

(6) 药柱表面不准有深度大于 0.5 mm、宽度大于 1 mm、累计长度超过药柱全长的划痕。

(7) 药柱表面不准有直径大于 2 mm、深度大于 1 mm 的气孔或凹坑，不大于上述要求的气孔或凹坑不得多于 10 个。

(8) 药柱内部不准有疏松结构或直径大于 4 mm 的气孔，直径不大于 4 mm 的气孔不得多于 5 个。

(9) 药柱不准污染，不准有外来杂质，但允许药柱表面局部有条形端包料浆流痕，其总长度不大于 100 mm。

4. 内弹道性能

内弹道性能应满足表 13-5 要求。

表 13-5 内弹道性能指标

序号	项目	指标要求	备注
1	燃烧时间/s	≥ 1.5	+50 ℃
2	燃烧时间/s	≤ 2.0	+15 ℃
3	比冲/(N·s·kg^{-1})	2 334～2 373	+15 ℃
4	最大压力/MPa	≤ 14.0	+50 ℃
5	一组 P_m(算术平均值)/MPa	≥ 11.0	+15 ℃
6	一组中单发 P_m 对 P_m 跳动量/%	≤ ±5	+15 ℃
7	工作可靠性	燃烧稳定，压力、推力曲线正常	−40 ℃，+15 ℃，+50 ℃

13.3.2 发动机装药的质量检验与验收

1. 火药产品的质量检验和包装

由于火药品种繁多，它们的包装方式以及在产品交验过程中的质量检验内容和程序也不完全相同。本节以炮用发射药和火箭推进剂为代表产品，对产品包装和质量检验问题做一简要介绍，详细情况可参阅有关标准和技术条件。

1) 炮用发射药的包装

(1) 炮用发射药的组批。总批发射药可由一个小批或采用同一工艺生产的几个小批经混同组成。一般情况下，每批炮用发射药的批量为 30～50 t，或按合同规定的要求数量。组成总批的各小批发射药，其理化性能及药型尺寸必须符合技术条件的要求。若小批的个别组分(安定剂除外)、爆热及药型尺寸与技术条件要求稍有超差时，在确保总批发

射药质量合格的原则下，征得订购方代表同意后，方可混入总批。

(2) 炮用发射药的包装。长期储存发射药的包装物为密封金属箱，外套木箱，它们分别符合 WJ24、WJ25 或 WJ100 标准规定。使用前需检查金属箱的密封性，采用注入压缩空气的方法，当箱内压力达到 9.33 kPa(70 mm 汞柱)时停止通气。待箱内压力稳定后，汞柱应保持 1 min 不下降(当装药量不小于 80 kg 时，应保持 3 min 不下降)。

对包装质量的其他要求还有：出于安全考虑，金属箱与木箱之间不准有药粒；每箱发射药的实际净重允许与木箱外所标净重相差±200 g，但抽验时，所抽各箱平均净重不得少于箱标净重；每个装有发射药的金属箱内均需有装箱单(约 120 mm×100 mm)，其上标明火药的用途标志、产品标志、净重、包装日期、有关人员的签章等；包装好的发射药金属箱均由承制方检验部门铅封(经订购方代表抽验的金属箱由订购方代表铅封)。在发射药包装木箱上应喷涂标志，包括用途标志、产品标志、发射药的净重、全重等。

2) 炮用发射药的质量检验

(1) 订购方对发射药产品验收的一般程序及抽样。

当承制方完成了总批发射药生产和包装，并提交订购方代表抽样检验时，承制方检验部门向订购方代表提交一份交验单，其上注明产品标志、批号、数量、日期、承制方检验部门对该批发射药制造工艺及质量情况的说明，并有承制方检验部门代表的签章。

订购方代表对总批发射药进行质量检验的项目包括：包装质量检验、外观杂质检验、理化性能检验、弹道性能检验。一般情况下，首先抽样进行包装质量检验，样本以箱为单位，从交验批中随机抽取；药粒外观杂质和弹道试验样品的抽取可以从交验批中随机抽取，也可以从包装质量检验的样本中随机抽取。药粒外观杂质检验样品从样本的各箱中随机抽取约 2 kg 进行检查，而弹道试验样品抽取的箱数应与一组射击的发数相同，同时从各箱中各取一定数量的火药混合均匀，作为弹道混合样，用于确定装药量时使用。此外，弹道混合样中还要随机抽取约 1 kg 样品，作为理化分析的样品送理化室进行理化性能检测。

关于抽样方案，早期常使用百分比抽样方案，近年来已陆续改用统计抽样方案，在国军标 GJB 179 中做了详细规定。其中检查水平、抽样次数、可接收质量水平、缺陷分类和名称等，在各个产品规范或验收技术条件中做了具体明确的规定。

当每批发射药的各项检验内容全部合格后，承制方检验部门将该批发射药的产品验收记录簿和产品验收合作证提交订购方代表审查，作最后验收。验收记录簿和合格证的主要内容包括：产品标志、用途标志、产品数量、箱数、包装日期、包装标志、制造与验收依据；抽样检验结果、理化弹道试验结果；生产过程中的重要记事及承制方检验部门对该批产品的结论；承制方有关负责人的签章；验收记录簿中还应列出原材料标准、半成品质量数据和主要工艺数据。

当订购方认为产品质量完全符合要求时，订购方代表在产品验收记录簿和产品验收合作证上签署检验验收结论，并由订购方负责人签章后，整个产品的验收工作即全部

完成。

(2) 炮用发射药的质量检验内容。

① 包装质量检验。

包装质量检验包括包装物自身、包装质量、密封性、净重和喷涂标志等。在包装质量缺陷分类中，一般规定如下。

致命缺陷：木箱与金属箱之间有药粒存在。

A 类严重缺陷：密封性不合格；木箱标志和装箱单有导致装药失误的错误；漏铅封、漏密封圈；木箱内侧有钉外露等。

B 类严重缺陷：金属箱内脱漆或氧化；木箱缺件及影响储运的损坏。

轻缺陷：净重不符合要求；标志或装箱单不清晰(有不致导致装药失误的错误)；金属箱外轻微脱漆(总面积不大于 3.2 cm^2)；木箱外侧有钉外露等。

② 火药外观、杂质检验。

(a) 药粒表面严重粗糙、扁药、裂纹、毛刺、缺口、表面有油污染等。一般规定上述药粒总量不得超过 4%。

(b) 药粒偏孔、小孔(小于正常孔径的一半)、孔数不全、斜切药粒(斜切面与垂直轴向截面的夹角大于 30°)。一般规定上述药粒总量不得超过 10%。

(c) 火药中的杂质如金属屑、玻璃碴、砂粒、橡皮、线头、扫帚棍等，一般规定上述杂质不得超 0.003%。

(d) 混入异品种药粒，一般规定不得超过 0.05%。

③ 理化性能检验。

理化性能检验包括化学安定性、组分(含附加物)、挥发分、密度、爆热以及药型尺寸等。具体的技术指标在产品规范或验收技术条件中有明确规定。

对于一般粒状(7 孔)炮用发射药的几何尺寸，如弧厚、孔径、外径、长度等，规定了它们之间的合理关系。一般情况下，7 孔药粒长度 L 与外径 D 的比值 L/D(长径比)为 2.10～2.50；外径 D 与孔径 d 的比值 D/d 为 5～15。

④ 炮用发射药弹道性能的检验。

炮用发射药弹道性能的检验包括平均初速、初速中间误差(或标准偏差)、最大膛压平均值、最大膛压最大值。发射药出厂弹道性能检验的主要任务，是提供装药厂一个公称装药量，这是装药厂进行装药生产的依据。因此，实测平均初速要修正至图定初速，并换算出与之相应的装药量(公称装药量)和膛压。

3) 火箭推进剂的后处理、质量检验与包装

火箭推进剂药柱与发射药不同，由于它燃烧时间较长，长达几秒到数十秒钟，因此药柱弧厚较大，每根制品的重量有的达到数百千克，压制成毛坯后还要进行一系列的处理。

(1) 火箭推进剂的后处理及检验。药柱毛坯后处理工艺流程如图 13.22 所示。

后处理工序由以下几部分组成：

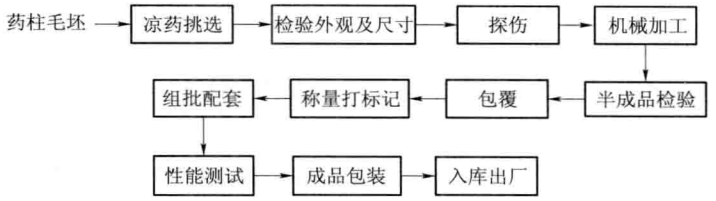


图 13.22　火箭推进剂的后处理、质量检验与包装

① 凉药挑选。压制成的毛坯药柱要在规定的温度下凉置，自然冷却，冷却时间的长短随弧厚不同而不同，一般凉置 24～96 h。凉置过程需保持平直，并经常翻动，以保证药柱的直线度和椭圆度。凉药后进行外观检验和尺寸检验。

② 外观及尺寸检验。药柱外观检验一般包括：成型质量、杂质、伤痕等项；有些疵病不允许存在，如气孔、疏松结构等；有些疵病允许有一定的比例，如表面划痕、油道等，可根据产品本身的需要以及燃烧表面积的大小，确定具体指标。药柱的外形尺寸，需用特制的样板进行检验，检验项目一般有外径、内径、弧厚、长度等项。星形内孔药柱的星角尺寸，一般由模针形状保证，不作专项检验。

③ 探伤。现有无溶剂法螺旋挤出成型工艺制造的药柱，一般情况下致密度较高，重现性较好，药柱内部不会有气孔，可以不进行探伤检查，对于尺寸较大或有特殊要求的产品需经无损检测法探伤。探伤的方法有多种：超声波、X 射线、激光等。其原理都是利用各种波或射线穿透药柱，在药柱的另一侧接收信号，如遇到气孔，光或波在孔处发生衰减，接收的信号发生变化。根据预先标定的结果，判断出气孔的大小和位置。也可以采用反射法，测定反射回的信号。将计算机用于探伤领域，可利用计算机来处理信息，大大地提高了信息处理的速度，使得探伤工作更加准确快捷。

④ 机械加工。随着武器对火药性能要求的提高，有时需要对药柱进行机械加工。药柱的端面可用专用车床加工，以保证端面垂直度的要求。对于有特殊要求的产品，药柱的某些部位还需用铣床铣制平面或槽，有时也需要钻孔。

在机械加工过程中也容易发生着火，因此要严格控制刀具进给量和加工速度，在加工过程中一定要加水冷却，并及时清理药粉。

⑤ 其他工序。经上述工序的药柱要进行毛坯交验，经验收合格后再转入包覆等其他后加工工序。为了使火药按预定的燃烧规律燃烧，对于有些产品还需进行包覆处理，使药柱的端面或侧面，全部或部分包覆一层阻燃层。

⑥ 组批配套。在一批装药中，各套装药里有一定数量的组批药柱，另外配备少量的可变批药柱。配套时允许个别指标超差的药柱参加配套。

(2) 火箭推进剂性能的检测。火箭推进剂的检验程序与发射药相近，检测项目除理化性能检测外还需检测：

① 燃烧性能的测定。传统的燃烧性能测试方法采用靶线法。在测试样品中穿入靶

线，当第一根靶线被烧断后开始计时，至第二靶线烧断时计时终止，用两靶之间的距离和两靶之间燃烧时间可算出燃速。

上述装置是装在同一燃烧室内，燃烧室可用惰性气体充压，也可调节温度。这样可测定某一压力、某一温度下的燃速，通过线性回归处理，就可得到燃速公式。

② 弹道性能测试。火箭推进剂装药还要进行内弹道性能测试，即测定火箭发动机内的压力—时间曲线和推力—时间曲线，通过曲线计算出压力、推力与燃烧时间。

(3) 火箭推进剂的包装。小型火箭推进剂的包装与发射药一样，装入铁皮箱，外加木箱。较大的推进剂药柱，则先装入塑料袋，而后装入木箱，箱底要保持平直，并塞入纸屑，以避免运输过程中撞击。

2. 发动机装药的质量检验与验收

1) 无损检测

固体火箭发动机是各种运载火箭的动力装置，必须有高度的可靠性，因此对装药结构的完整性提出了十分严格的要求。固体火箭发动机从制造到使用经历了各种工艺加工、储存、运输、环境的温度交变、点火的冲击和飞行时加速度等考验。在这些过程中，发动机各部件的质量可能发生变化，如产生某些缺陷、绝热层和包覆层的脱黏、药柱内部产生裂纹等。这些变化会影响发动机的内弹道性能，严重时会导致发动机烧穿，甚至发生爆炸。所以发动机在装药后需进行全面检测，在经受各种环境条件考核后，还需按产品图和技术条件的要求进行检测，以保证火箭发动机工作的可靠性。

要保证火箭发动机工作的可靠性，首先要确定装药发动机的缺陷检测标准，该标准以不影响发动机工作时的内弹道性能为依据进行预估。对装药发动机无损检测的方法很多，通常进行的有：

(1) 目视检查。进行外观检查，如壳体绝热层、包覆层、推进剂端面相互间黏结情况，药柱在脱模过程中模芯对内表面损伤情况，在储存过程中由星尖引发的裂纹，检查时可借助放大镜及窥膛仪等。

(2) 界面黏结检查。壳体、绝热层、包覆层、推进剂之间的黏结质量，尤其是推进剂与包覆层界面端部脱黏，对发动机工作影响更为严重。若脱黏界面间有空隙，通过 X 射线照相可检查；若是零黏结(即界面间紧贴，但无黏结力)，则 X 射线照相不易检查，可通过双探头超声探测仪检查。其中一个探头发射，一个探头接收，通过波差进行判断。

(3) 药柱内部缺陷的检测。指的是检查药柱内部的气孔、夹杂物、密度和组分的不均匀等缺陷。这些缺陷是由推进剂的原材料以及混合、浇铸工艺等方面的问题造成。在储存过程中因老化、应力等影响，使药柱星孔内产生裂纹，界面间脱黏。其缺陷的大小或多少，依据在静止点火试验过程中，不影响内弹道性能指标，作为对产品的判断标准。一般产品对气孔可允许有一定的量，但对其他缺陷是不允许存在的。

通常用 X 射线法检测内部缺陷，根据产品的情况(材料及厚薄)，选择探伤条件(电压、电流、焦距、曝光时间)，通过条件的选择，以求达到最佳灵敏度。

$$灵敏度=\Delta X/X\cdot 100\%$$

式中　ΔX——射线方向能显示的最小缺陷的大小；

X——试件在 X 射线方向的厚度。

在射线法检测时可用照相法或用实时显像系统。

2）装药发动机的包装及存放

发动机壳体在清理后的所有工艺存放过程中，在其两端应有工艺堵盖保护，防止环境湿度对表面的影响。在整机装配后，对头部点火系统及尾部喷管堵盖需进行气密性检查，防止环境中空气进入发动机内而影响储存性能。武器的使用是在各种不同条件下进行的，在使用前必须进行各种环境条件的例行试验，如高低温、温度循环、高温高湿、运输、振动、冲击、跌落、盐雾等，根据设计要求选择试验项目。但在未使用前，在库房存放时，应控制温度、湿度，在较低的温度、湿度下储存产品对延长储存寿命是有益的。

第 14 章　火箭弹的装配与验收

火箭弹由引信、战斗部、火箭发动机、稳定装置构成，各部件又由许多零部件及火工品装配而成。火箭弹的装配应按产品图和技术条件的规定进行。

火箭弹装配是保证火箭弹战术技术要求和使用性能的重要环节。火箭弹的装配一般分为部件装配和总装配两段进行，装配过程需根据产品的复杂程度和生产单位的具体情况而定。装配通常是在具有一定的专用设备和安全防护措施的生产线上进行的，以提高劳动生产率，确保产品质量和人身安全为宗旨。

在火箭弹的装配过程中，各零部件之间一般为非活动性连接，并多是可拆卸的。

装配合格后的火箭弹，按规定进行包装。产品的包装应能满足产品的长期储存、运输与勤务处理的要求。

14.1　火箭弹装配的主要技术要求及主要内容

为保证火箭弹的战术技术要求和使用性能，装配须严格按产品图和技术条件的规定进行。

14.1.1　火箭弹装配的主要技术要求

1. 基本要求

(1) 火箭弹的装配和验收等事项应按产品图和技术条件的规定进行。

(2) 装配所用原材料和零部件需有工厂合格证并抽验合格后方能用于装配。

(3) 装配和检验过程中必须轻拿轻放。

(4) 装配时可修复的缺陷应修整，如无法修整而又影响性能时应调换相应零部件，重新装配。

(5) 零部件表面不允许有锈迹。燃烧室定心部如有轻微锈迹，在保证几何形状尺寸和性能的前提下，允许用机械方法除锈，然后按工艺方法补涂防腐层。

(6) 零部件表面的防腐层应均匀，不允许有漏涂、漏镀处；涂、镀层不允许有起泡、剥落、严重流痕和发白现象。装配时防腐层受损处应补涂规定的防腐漆。

(7) 送交装配的零部件的数量应与批量相同，但垫圈、螺钉、密封圈等类型零件允许增加大约 3% 的备用件用于装配。但工序中仍按等量配给，如有损坏，可按同等数量换取。

(8) 装配过程中检验和验收所用的量具和仪器应按工厂规定，定期校正。订货方代

表单独使用一套量具。

2. 全部零件结合的正确性

装配时首先应确定各零部件在轴向、径向的相互位置、形状、尺寸、配合等，逐件进行组装。正确无遗漏，这是保证火箭弹性能的主要因素，因此必须做到：

(1) 各零部件结合的组装顺序、安装方位必须正确，严格按规定的尺寸和形状位置进行装配，并用量具检测。

(2) 全弹轮廓尺寸应符合规定，尤其是径向最大尺寸。虽然零件加工时得以控制，但在装配过程中各零部件结合时引起的变形，有时超过规定，会影响到产品的发射，必须加以控制，并用合膛检验装置检查。

(3) 全弹的不同轴度应符合要求。由于零部件的质量和装配中的失误等，造成螺纹轴线与弹轴不重合而彼此平行或倾斜等，均会引起全弹不同轴度的超差，导致射击密集度的降低。因此，对全弹的不同轴度必须加以控制。

3. 全部零件结合的可靠性

各零部件的正确结合必须可靠，以保证在运输和火箭飞行过程中，不致松动或脱落。对于易引起松脱隐患的部位，必须采取措施。如螺纹连接，不但要旋紧到位，而且要有足够的旋紧力。也可在结合部位增加紧固螺钉，以防止意外的发生。对于铆接与焊接部位，要求铆紧焊牢。

4. 点火系统安全可靠

对点火系统，要求电路畅通，连接和绝缘正确可靠，严防断路和短路。线路的连接部分要准确牢固，不允许夹有污物，不得松脱。导电性能良好，电参数符合规定。线路的绝缘部分要安全可靠，导线不允许有破损漏电现象。

实践证明，点火系统的正确性和可靠性直接影响火箭弹的安全性和使用性能。

5. 具有良好的密封性和长储性

良好的密封性可以保证火箭弹中的炸药、发射药、点火药、引信等在长期储存中不变质，并保持应有的使用特性。通常是采用密封塞、密封垫、密封圈、密封胶以及螺纹连接时所用的密封物(油脂)等与周围空气隔绝来实现的。一般通过密封试验进行检查。

良好的长储性是为了确保火箭弹在规定的储存期内不因锈蚀而影响性能。因此，组成火箭弹的零部件在装配前与装配中以及装配后，要采用电镀、电泳涂漆、涂油等表面处理方法实现和保证火箭弹防腐能力，以满足规定的长储性能。在装配和运转过程中，应采取防护措施，防止因零部件相互碰撞而碰伤防护层。

6. 全弹质量须满足产品图要求

火箭弹总装以后，其质量必须符合产品图规定的要求，以减少因质量跳动而对弹道主动段末参量产生影响，从而影响火箭弹的密集度。

火箭弹的质量公差，若通过提高零件加工精度来减小往往不易实现，应在生产过程中，通过采用不同的装配方法予以保证。只采用完全互换法进行装配，产品可能超重或超

轻。通过采用完全互换法与分组装配法、直接选配法、直接分组装配法、修配法等单独或结合运用能有效地控制全弹质量的跳动，从而保证火箭弹的密集度在规定的战技指标范围内。

14.1.2 火箭弹装配的主要内容

火箭弹装配一般分为部件装配和全弹总装两个阶段。

部件装配是指战斗部、发动机、稳定装置等部件的装配(包括其构成的组合装配)。全弹总装就是把各大部件结合在一起的装配。

为了生产安全，通常在部件装配时，不装填火工品，而在全弹总装过程中陆续装入。引信和火箭弹是在同一包装中分开包装的，只是在射击前才进行引信的装定，并装到火箭弹上。

无论是部件装配，还是全弹总装，虽然其结构各不相同，装配过程和方法也各有所差异，但综合起来，大致有以下几个步骤。

1. 清洗(擦)

对于投入装配的零部件，必须先将油污、水分、杂质除掉。其方法一般为用技术条件规定的方法进行清洗。如果这些零件上的油污、水分及杂质清除不净，则不允许用于装配，以避免降低零件的抗腐蚀能力。装配前的清洗(擦)也为装配前的检验和装配过程中的补漆做准备。

2. 装配前检验

根据技术条件的规定，对投入装配的全部零部件进行检验。其检验内容主要按产品图和技术条件规定的内容进行检验。外观检查就是检查投入零部件(包括火工品)的质量证明、外观形状、表面处理质量、配合面的疵病及清洗情况等。尺寸检查即对主要尺寸、配合部位的尺寸等用量具检查。对于螺纹连接，要做螺纹检验以及必要的其他检查。其目的是保证装配用的零部件完全符合质量要求，以防止不合格的零部件装入产品，发生各种质量事故。

3. 装配

经检验合格的零部件，即可进行装配。根据产品图和技术条件的要求，按先后顺序、产品的复杂程度以及具体结构和实际情况，在配备有专用装备并符合安全要求的生产线上进行装配。装配生产线一般具有一定程度的机械化与自动化水平，零部件的结合、涂漆、合膛检验等均有专门的设备。装配过程中的螺纹结合，多采用机械装置，以提高产品质量和减轻劳动强度。产品的传送多采用半自动化的传送装置，有效地提高了劳动生产率。

火箭弹各零部件间的连接，一般是固定性连接，并多为可拆卸的，如螺纹连接、销轴连接、卡榫式连接等。要求具有正确的相互位置及连接的可靠性，往往还要求有一定程度的密封性。为此相互连接的螺纹部位在结合前要涂一层具有防腐性能的密封油脂等，起密

封和防腐作用。对于固定不可拆卸的连接，要求具有正确的相互位置和足够的连接强度，其连接的方法一般采用铆接、焊接、收口、滚压卷边等。

为方便生产和满足质量公差的要求，在装配中，各零部件之间采用完全互换法与分组装配法。但考虑到距离散布，火箭弹本身要控制全弹的质量。为此，采用选配法，多为直接装配法和分组装配法相结合的办法，使弹重控制在公差范围内，以方便生产和使用。

4. 装配中与装配后的检验

根据产品图和技术条件，检验装配中与装配后的尺寸、表面状况、弹重及连接质量等。具体项目有：

(1) 外观与尺寸检验。主要检查火箭弹的表面状况是否良好，零部件的装配是否正确，弹径、弹长、零部件相互位置，与发射装置配合的相关尺寸以及位置等，确保火箭弹装配的正确性。

(2) 同轴度检验。火箭弹是由许多零部件组合而成的，多以螺纹连接结合到一起。由于零件的加工质量或装配的失误，会造成螺纹轴线与弹轴的不重合，产生与弹轴不同轴的问题。若连接的同轴度得不到控制，将直接影响火箭弹的质量偏心与几何偏心，影响火箭弹的空气动力特性，导致射击密集度下降。因此，应在专用检测设备上对火箭弹的同轴度进行检查，使其控制在规定的范围内。

(3) 密封性检查。按产品图和技术条件的规定，有的产品及其部件有密封性的要求，因此须在专用检测设备上进行密封性检查。

(4) 导电性与绝缘性检验。火箭弹一般采用电点火发射。其点火机构的导电性和绝缘性直接影响到火箭弹的可靠发射和安全。因此要用仪表进行导电性和绝缘性的检测。这种检验具有一定的危险性，因而必须在具有防火防爆的专用操作间内进行，并有专门的检测装置。

(5) 连接可靠性检验。对零部件的连接正确性和可靠性进行检查，以保证火箭弹的使用性能。

(6) 合膛检验。为保证火箭弹的正常发射，在全弹总装之后，在装有检验管的合膛器上进行合膛检验。火箭弹要自由通过合膛器。

(7) 全弹称重。在电子秤上进行全弹质量检查，使其质量控制在公差范围内。

5. 防腐处理

在部件装配和总装过程中，都要穿插进行不同的防腐处理，如涂漆、补漆、电喷镀、涂油等，以保证和增强产品的防腐能力。根据具体情况(产品形状、生产数量、现场设备等)对防腐过程可施行手工或机械操作。

6. 包装、交验、储存

将装配好的火箭弹装入包装筒或木箱中，依次按规定组成生产批次，向订货方代表提交验收。合格后妥善储存在库房中，准备发往指定地点。

14.2 部件装配

火箭弹装配生产中，通常在总装之前进行部件装配。部件中的发射药、火工品及点火装置，一般在总装时装入。

火箭弹是由许多零部件组成的。这些零部件是经各种加工方法制造而成，并经检验符合要求的。在火箭弹中，每个零部件都有它独特的作用，缺一不可。否则，将会产生各种各样的问题。因此，火箭弹的装配是保证产品战术技术要求和使用性能实现的最终环节。

14.2.1 战斗部的装配

战斗部的炸药装填方法，请参阅炮弹有关弹种的炸药装药法。

战斗部零件较少，装配也较简单。但有些战斗部结构不同，装配方法也有所差异。如钢珠火箭弹在战斗部内装入钢珠衬套；带有燃烧性质的火箭弹在战斗部内装入燃烧件；火箭子母弹在战斗部内装入子弹；火箭布雷弹在战斗部内装入地雷等。子母弹和布雷弹还有一些必要的附件，装配也比较复杂。同时还有一个质量匹配问题，需认真对待。

如 122 mm 火箭布雷弹战斗部，主要由风帽、雷舱、地雷、调整圈、推板等构成。战斗部质量要求为(33.2±0.3)kg。若满足其质量的要求，首先要控制质量的主要构成——地雷的质量。地雷采用直接配套方法(即完全互换法)组合、配重，质量控制在(25±0.3)kg 范围内。然后对地雷与雷舱采用直接分组装配法，即各取 10 发(套)以上，实际称重，并按质量顺序排列，装配时按重配轻与轻配重的方法，对应组合。

130 mm 火箭弹，为防止发射时燃烧室的高温高压燃气对战斗部装药的影响，在战斗部底部压入一石棉垫。这种隔热垫是在战斗部装填炸药之前，在压力机上进行装配的。其装配过程为：

(1) 清洗弹底底部凹槽，并按指定要求涂漆，然后放在压力机支座内；

(2) 将石棉垫和盖片涂漆，并先后放入弹底的凹槽内；

(3) 开动压力机，使压力机的冲头将盖片压平、压紧；

(4) 检验盖片紧固情况。

组成战斗部本体的零件在装配完成以后，内腔涂漆，而后再进行炸药及其火工品的装配。

14.2.2 火箭部的装配

火箭部的装配由于其结构不同，装配的方法及顺序也各不相同。

以 122 mm 火箭弹为例，装配流程中是按稳定装置装配、弹尾装配及火箭部本体装配顺序组装完成的。

1. 稳定装置的装配

稳定装置是保证火箭弹飞行稳定的部件。主要由尾翼架、翼片、弹簧、同步环以及翼轴等零件组成。

(1) 翼片的装配。用小螺钉拧入翼片支耳上部的螺纹孔内，涂以 FN-303 胶黏剂，并在与螺纹配合的翼片端面处铆三点，或用铆钉铆接在翼片上。

装配时，应保证翼片螺钉(铆钉)的中心线与翼轴孔的中心线平行。

(2) 尾翼架上装翼片。由翼轴将翼片、弹簧装入到尾翼架上，4 片翼片装配后，在其作用范围内转动与轴向移动应灵活，翼片展开后，其根部即进入尾翼架支持块槽内 5 mm 以上。

(3) 装同步环。将同步环装入尾翼架内，使翼片的小螺钉(或铆钉)进入等分的 4 个同步环槽内，并超过螺钉(铆钉)圆柱部 2/3。从而保证翼片在张开时，由于同步环的作用而达到同步展开。

2. 弹尾装配

弹尾除稳定装置外，还有喷管，尾管前、后段，后挡药板，固定圈以及导电盖等零件。装配时，螺纹部分均涂船用脂-3，镀层损伤处均新涂 C01-5 过氯乙烯清漆。

(1) 在喷管上装尾管后段；

(2) 装有喷管的尾管后段上装稳定装置；

(3) 套装固定圈：在专用夹具上，合拢翼片后套装固定圈；

(4) 尾管前段与尾管后段结合：螺纹结合时应拧紧到位，并保证装配尺寸。依次配钻驻螺钉孔，安装驻螺钉并拧紧到位；

(5) 装后挡药板至尾管前端上：后挡药板用驻螺钉固定，驻螺钉不得高出尾管前段螺纹的内径；

(6) 将导电盖拧到喷管上：将螺钉、垫圈和弹簧垫圈分别拧到喷管和导电盖上，将导电盖用手拧紧到位；

(7) 弹尾组装后检验：

① 喷管喷孔的中心线与尾管前段螺纹的同轴度。

② 翼片合拢状态下的弹尾应能顺利通过内径为 $\phi 121.5^{+0.26}_{+0}$ mm 的检验管。

③ 翼片展开时，应同步、可靠，张开后的 4 个翼片同步进入支持块槽内 5 mm 以上。

3. 火箭部本体装配

火箭部本体主要由前燃烧室、后燃烧室、弹尾以及中间支架等零部件组装而成。为了保证全弹的质量公差要求，在火箭部本体装配时，须对三个主要部件进行质量选配，以控制在较小的质量公差范围内。

(1) 称重：分别取前燃烧室、后燃烧室及弹尾各 10 件以上为 1 组，称取实际质量。

(2) 配重：前燃烧室与后燃烧室按最轻与最重的选配原则配重。而后取质量最轻的燃烧室与质量最重的弹尾配重，以此类推。

(3) 后燃烧室与弹尾装配:将弹尾拧到后燃烧室上,保证拧紧到位。拧紧导电盖,钻定向钮螺纹孔。

(4) 装前燃烧室:后燃烧室上装入中间支架,旋入驻螺钉,并拧紧到位。之后与前燃烧室结合到位,安装定向钮。

(5) 火箭部本体装配后检验:

① 前燃烧室与后燃烧室、后燃烧室与弹尾配合端面间的缝隙应符合规定的要求。

② 从弹底看,导电盖的导电体末端应处在距定向钮左侧 20～40 mm 的位置上。

③ 定向钮高度、垂直度应符合要求。

④ 火箭部本体应顺利通过内径为 ϕ122.3 mm 的检验管。

14.3 总体装配中部件的配套原则及总装

装配火箭弹时通常取合格的战斗部、装药燃烧室和弹尾各至少 15 件,或按产品图和技术条件规定的数量进行配套。

14.3.1 非全备弹的配套方法

对于简单产品一般采用一次配套的方法进行配套;而对于复杂产品或精度要求较高的产品常采用两次或多次配套的方法进行配套。

1. 配套原则

以 122 mm 火箭弹采用的两次配套法为例进行说明。战斗部质量六者配质量小的弹尾,两者配套后,重新排定质量序号。第一次配套后,组合件质量大者配质量大的燃烧室装药。其中,质量序号 1 为最小质量,依次递增,燃烧室装药质量一般由装药厂提供。

2. 配套方法

第一次配套:

战斗部质量序号:	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
弹尾质量序号:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

第二次配套:

(战斗部质量+弹尾质量)

质量序号:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
燃烧室装药质量序号:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

3. 非配套件的装配

火箭弹的其他零件如堵盖、点火具、垫圈、螺钉等将随机抽取装配。

14.3.2　全弹总装

火箭弹各部件装配好后，即可按规定的配套方法进行全弹总装。

火箭弹总装过程与部件装配时基本相似，也要经过装配前清擦、检验、装配、装配后检验等一系列过程。

现以 122 mm 火箭弹为例，说明全弹的总装过程。

1. 发射药、点火具、战斗部、发动机本体的准备

(1) 发射药的准备。发射药用细白布清擦，两药柱表面应干净，不允许有油污和灰尘，然后进行检验。

首先进行外观检验。有下列情况时，不准投入装配：

① 装药外表面有油、漆及其他污垢。

② 装药内外表面有裂纹。

③ 装药内孔堵塞。

④ 发射药装药变质。

⑤ 药柱弯曲影响装配。

⑥ 前后发射药套号不一致。

⑦ 端面包覆层不完整及支持块崩落。

然后进行尺寸检验，即前、后药柱的外径及长度的检验。

将检验合格的发射药进行称重，做好记录，并按质量顺序给予编号。缓冲垫分别用胶粘贴到前后发射药柱上。

(2) 点火具(点火药盒)的准备。具有合格质量证明的点火具也要经过检验。外观检验时，有下列情况者不许投入生产：

① 盖体与底部上有穿孔。

② 影响气密性的机械损伤。

③ 黏结处有脱胶现象。

④ 导线外皮剥落、断裂。

⑤ 接线片焊接不牢。

导电检验是在专用设备上用仪器检验点火具的电阻值应符合规定的要求。

将合格的点火具与支架和中间挡药板进行装配，支架黏结缓冲垫。装配好后，全部进行外观检验，不允许发生如下情况：

① 点火具导线未从支架中心孔引出。

② 导线缠绞。

③ 点火具在支架中窜动。

④ 螺纹结合部未拧紧到位。

(3) 战斗部的准备。首先清擦战斗部，其外表面及螺纹部应干净，不许有炸药和污

物。然后进行外观检验：

① 外表面不许有油污、脏物，不许有锈迹，涂层不允许有剥落、发白、严重划痕等现象。

② 螺纹应清洁，不允许有破裂、锈迹、药粉及其他脏物，不许磕碰。

③ 螺纹不允许有局部崩落。

④ 隔热盖不许有裂纹、破损等现象。

用量具检验隔热盖距战斗部底部的距离及螺纹。

将检验合格的战斗部进行称重，做好记录，并按质量顺序编号。

(4) 发动机本体的准备。转入总装生产线的发动机本体，用汽油、酒精、毛巾等清擦。按前后顺序依次分解前后燃烧室、点火具支架、导电盖等，并放置在指定地点或容器内，顺序排列，各发动机的组成不许混淆。对各零部件进行清擦，清擦后的零部件及螺纹应干净，不许有油污、锈迹。而后进行外观检验：检验零件是否齐全；各零部件表面涂渡层应均匀，不许有漏涂、漏镀处，不许有剥落、龟裂等现象。内表面涂层不许有划伤、剥落，不许有铁屑等异物。不合格的零件要更换，更换导电盖时，要注意其导电体与定向钮的相对位置。

2. 确定配套方案

按产品图和技术条件的要求选定配套方案进行装配。

3. 火箭部装配

一般指发动机空体装入发射药装药和火工品等的装配。

(1) 装发射药装药。按选配方案配套表编号的顺序，装前、后发射药装药。即按图纸规定，将前、后发射药装药分别装入前后燃烧室中。

(2) 装点火具和导电盖。点火具支架固定在后燃烧室上，点火具导线穿入后发射药装药孔中并引出。两接线片垫上垫圈和弹簧圈后，分别拧紧在喷管座和导电盖上。为防止导线的缠绞，在拧导电盖之前，先将导电盖向左转 5～6 圈，再拧紧导电盖。

(3) 导电性检验。首先检验装配质量；各零部件编号与配套表的一致性；点火具的固定情况；中间挡药板与后燃烧室的结合质量；导电盖与喷管座上的螺钉固定情况；零件是否齐全等。

然后以导电片和后定心部为两触点，用仪表在导电检验装置上进行导电性试验，其电阻值应在规定范围内。因此项检验具有一定的危险性，故应在防火防爆的房间内进行。

此项检验也可在全弹装配完毕后进行。

(4) 火箭部装配。后燃烧室外螺纹均匀涂船用脂-3，将装有发射药装药的前后燃烧室在结合机上拧紧到位。

(5) 固定定向钮。定向钮拧紧到位，不得松动、歪扭，然后在燃烧室与定向钮交界处，沿弹轴方向前后点铆两点，铆固定向钮。

(6) 检验。

① 前后燃烧室结合后的螺纹配合端面，不允许有圆周缝隙，其局部间隙不大于规定值。

② 定向钮检验。导电片对定向钮位置在 110° 范围内；定向钮的最大高度为 8 mm；定向钮不许松动、歪扭；定向钮点铆牢固，不许有漏点铆者。

4. 全弹装配

(1) 按照配套方案确定的配套表编号装配战斗部与发动机。首先在前燃烧室前螺纹处涂船用脂-3，在全弹结合机上进行全弹结合，拧紧到位，擦净挤出油脂，并清擦全弹。

(2) 装配质量检验。

① 检验装配的火箭弹与配套的一致性。

② 装配缝隙检查：即螺纹圆柱配合端面不允许有圆周缝隙，局部缝隙不大于规定值。

(3) 钻驻螺钉孔，并安装驻螺钉。依战斗部和前燃烧室定心部上驻螺钉孔位置钻驻螺钉光孔，清除铁屑，检查深度。在驻螺钉上涂船用脂-3，并拧紧到位，不许松动，不许高出弹体表面。

(4) 装配后检验。

① 称重。用电子秤进行全弹称重，质量应符合规定，并准确无误。

② 同轴度检验。装配好的火箭弹，在专用检验装置上，进行同轴度检验，其值应在规定的范围内。

③ 合膛检验。在装有检验管的合膛器上，进行合膛检验，应能顺利通过。

④ 导电性检验。如发动机装配时已进行过此项检验，此时可不做检查。如未做此项检验，可按导电性检验方法做此项检验。

(5) 防潮。弹口拧上防潮塞后，将全弹清擦干净。

(6) 全弹印标记。全弹上的各种标记，应清晰、正确、牢固地印在指定部位。

(7) 装箱前的全弹检验。主要进行全弹外观检验，诸如防腐层质量，标记是否清晰、正确、附着是否牢固，外部零件的装配质量，等等。

合格产品，转入包装。

14.4　包装、编批与交验

火箭弹包装是为了防潮、防腐、防震、防冲击，便于运输和储存而赋予火箭弹的外部保护层。

火箭弹包装应坚固，能保护产品，满足储存、搬运及勤务处理的要求。

加工、制造、装配与包装合格的火箭弹，要向使用方代表提交验收。验收合格的产品，即可入库，并办理合格手续，准备随时发往指定地点。

14.4.1 包装

目前，火箭弹的包装方法，分为非密封包装和密封包装两大类。

1. 非密封包装

装配好的火箭弹，直接采用木箱包装。

木箱应干燥，箱内不得有油污、杂物。材质缺陷要经修补；箱体表面及银件要有漆层保护。火箭弹与木箱接触部位，垫上 1～2 层蜡纸，火箭弹在箱内固定、卡紧，标记朝上。引信放入箱中固定位置，并用纸垫塞紧。包装箱要涂刷与火箭弹一致的标记，要求字迹完整、正确、清晰、牢固。

木箱包装要求用上好木材，其木材使用量是相当可观的。虽然包装操作简单，但它是非密封包装，火箭弹仍要受到周围介质的腐蚀。

2. 密封包装

火箭弹的密封包装是把装配好的火箭弹装入密封塑料袋或密封塑料筒中，达到与周围介质隔绝而保护产品的目的。目前多采用玻璃钢密封筒作为内包装和采用框架式铁笼结构作为外包装。

玻璃钢密封包装筒是由聚氯乙烯、聚乙烯、酚醛树脂、尼龙等材料热压而成。其制造方法简单，材料来源丰富，成本低廉，节约木材，并且具有结构简单、强度高、透湿度低、不易腐蚀与霉烂的特点。它的密封性良好，且可有效地使用气相缓蚀剂增加其防腐能力。

外包装铁笼，主要是由角钢和钢板焊接而成的框架结构，构造简单，制造也较方便。

玻璃钢筒和铁笼的内、外包装，本身结构坚固，能有效地保护产品，且便于运输与储存，因此可有效地代替非密封的木箱包装。

各种包装都是基于金属零件本身具有一定防腐层，但产品的定心部是一个薄弱环节。因一般火箭弹的发射都是以定心部为导电的一极，为了导电性良好，定心部一般涂以防锈油或虫胶漆防腐，在发射前要除去这一防护层。为便于清除，目前，采用可剥性塑料进行防护，比较理想。可剥性塑料是指在产品表面上附着一层透明的塑料膜。这层膜不粘手、坚韧，可防止机械损伤。在存储过程中，它渐渐渗出油来，存在于膜与金属之间，保护金属不被腐蚀，发射时很容易剥离下来，对于火箭弹定心部的密封防护是比较合适的。

14.4.2 编批

火箭弹在加工制造、装配、包装之后，在质量检验部门按合同与产品图、技术条件等技术文件，经质量监督和 100%检验合格的基础上，组成一定数量的批次，即为一个检查批。同一检查批允许有以下组批情况：

按同一产品图生产、同一装药厂装药、同一年度制造的战斗部允许不超过两批。

按同一产品图生产、同一机加厂生产、同一年度制造的弹尾允许不超过两批。

按同一产品图生产、同一制造厂、同一年度制造的点火具允许不超过两批。

按同一产品图生产、同一装药厂、同一年度制造的燃烧室装药允许不超过两批。

按同一产品图生产、同一制造厂、同一年度制造的引信允许不超过两批。

但在通常情况下，已用于装配的战斗部、燃烧室装药、弹尾和引信的批量，在尚未用完之前不准启用新的批次进行装配。

14.4.3　交验

编批后，制造单位应将质量证明文件和必要的原始记录，向使用方代表提交验收。

验收代表在质量监控和审查质量证明文件准确性的基础上，按规定随机抽取要求数量的试验品与抽验样品，分别按程序、规范和技术文件进行试验与检查。

试验通常指靶场射击试验。一般进行密集度、射击强度、装药安定性和爆炸完全性等试验。这些试验，都在专门靶场，执行靶场的工艺规程。

验收代表对检查批要抽查，即抽一定数量的检查样品，进行检验，做出合格与不合格的结论。对合格批，验收代表签署验收合格证。对不合格批，退回工厂返检或返修后，再重新交验。

交验合格的产品，在出厂前应存放在温度为－20 ℃～＋30 ℃，相对湿度小于 80％的库房内。库房应能防火、防爆，产品堆放高度不得超过规定的高度，并应堆放整齐，按批管理。

14.5　装配中常见的质量问题

火箭弹装配是一个比较复杂的工艺过程。它具有一次性使用和散布较大的特点。尽管在生产过程中经过严格的控制，质量可得到基本保证，但往往由于种种原因，在制造过程中，仍会发生一些意外的质量问题。常见的质量问题有结合不到位、同轴度超差、弹重超过规定、电气系统失灵、表面质量差等，有些影响是致命的，必须采取有效措施防止和补救，以杜绝事故的发生。

14.5.1　结合不到位

火箭弹装配中，很多零件采用螺纹连接互相结合。如弹头与引信、战斗部与发动机、燃烧室与喷管等，都是用螺纹连接的。产品图和技术条件对螺纹连接的结合质量都有明确的规定。诸如要拧紧到位，不得松动，不允许有圆周缝隙，其局部缝隙不大于规定值等。

1. 超差情况

结合质量一般用外观与塞尺检查。也有的用拧紧或晃动的方法进行检查。

(1) 有圆周缝隙。

(2) 局部缝隙大于规定值。

(3) 松动或晃动，如 107 火箭弹的弹头与连接底的结合有时松动，130 火箭弹的导电

盖与喷管结合后晃动等。

上述缺陷，引起火箭弹飞行不稳，甚至脱落失去作用。

2. 产生原因

(1) 装配不正确，未拧紧到位，或者螺纹变形，或有杂物使螺纹拧不到底。

(2) 零件(或部件)加工质量低，诸如螺纹清根不净、螺纹未加工到底、螺纹支撑端面与螺纹轴线不垂直而用螺纹量具检查又不易发现等。

(3) 强度或刚度不足，螺纹尺寸不符合规定，或在生产与周转过程中螺纹部位磕碰等。

3. 防止和纠正措施

(1) 提高装配质量，尽量用机械操作代替手工操作，增加拧紧力，确保产品质量。

(2) 清除结合部位污物、杂质、毛刺等。

(3) 提高零件的加工质量，保证尺寸合格，形状与位置(垂直度与同轴度等)符合公差要求。

(4) 对于结合不到位的零件，进行检查，有问题时进行专门修理。或采用直接选配法进行选配，直至合格为止。

(5) 做到文明生产，轻拿轻放，不得磕碰。若有轻微磕碰时，要进行修复，然后再进行装配。

14.5.2 同轴度超差

组成火箭弹的战斗部、燃烧室和弹尾部之间，大多采用螺纹连接。由于螺纹加工精度使螺纹与零件本身几何轴线之间存在着不同轴，加之装配质量等原因，往往造成三个部分的轴线不同心，而成平行、交叉或交错三种状态。交叉或交错对细长比大的火箭弹影响更为严重。虽然零件本身同轴度差，在装配时可能互相有所抵消而使同轴度偏差变小，但也有可能使同轴度偏差叠加变得更大。火箭弹的同轴度直接影响到火箭弹的质量偏心与几何偏心以及空气动力特性等，结果导致射击密集度的变化。同轴度关系到火箭弹的使用性能，因此，必须严加控制。

1. 超差情况

在检测装置上测量，同轴度的数值超过规定。

2. 产生原因

(1) 零件螺纹加工精度低。螺纹轴线与产品轴线不重合而成平行状态；螺纹轴线与螺纹圆柱配合端面不垂直而引起交叉、交错，或零件的几何尺寸误差积累，再加上装配不当而使不同轴度加大。

(2) 装配时，结合面局部夹有铁屑或其他污物；螺纹配合部分磕碰而使螺纹轴线与产品轴线偏离。

(3) 火箭弹的燃烧室为薄壁件，本身存在着刚度不足的问题。由此引起产品变形而

使轴线弯曲，使得全弹的同轴度误差加大。

(4) 操作不当，用力过猛，或受力方向不正等而使同轴度误差加大。

3. 防止和纠正措施

(1) 提高零件的加工精度，特别注意螺纹轴线与产品轴线尽量保持一致，逐件进行检测，严加控制。

(2) 对超差件进行专门修理，使之达到要求。或采用直接选配法进行选配，使同轴度达到要求。

(3) 加强零件清擦，去除污物、杂质、毛刺等。

(4) 尤其是薄壁件加工时，要有专用夹具，控制切削量、防止变形，并注意零件应力的消除。装配时，用力均匀，避免轴向受力，以保持轴线的直线度。

(5) 文明生产，精心操作。

14.5.3　不能合膛

火箭弹装配以后，通过合膛器检验时，有时不能进入合膛器，即该火箭弹不能进入火箭炮发射管。

产生这一问题的主要原因是：

(1) 零件质量低劣，如定心部尺寸超差，或螺纹轴线与产品轴线不同轴，尤其是细长比较大的产品，结合后形状与位置不合格。

(2) 火箭弹的燃烧室多为薄壁件，本身容易变形，影响到全弹不能进入合膛器。

(3) 装配时驻螺钉拧得过紧，致使定心部变形，不能进入合膛器。

解决这一问题的措施有：

(1) 提高零件加工质量。

(2) 零件加工时，充分消除内应力，防止变形。

(3) 装配时，驻螺钉拧紧力要适当，不能过大，拧入后不得高于定心部。

(4) 坚持文明生产，对产品轻拿轻放，防止变形。

(5) 调换不能进入合膛器的主要零件，进行选配，直到能顺利通过合膛器为止。

14.5.4　火箭弹弹重超差

弹重超差问题是火箭弹生产中常遇到的质量问题之一。组成火箭弹的诸多零件都是经由各种加工制造而成，都具有一定的制造公差，如尺寸公差、几何公差等，而反映到零件的质量上，形成了零件质量公差。零件的制造公差较容易控制，而其质量公差却不容易控制，有时与制造公差有矛盾，即制造公差合格，而质量公差却不合格(超轻或超重)。如装配控制不当，将引起全弹质量超差。质量超差，对射击的纵向密集度有影响，因此应严格控制。

弹重超差往往是由于组成全弹的零部件质量超差引起。即使零部件的质量合格，而

在装配过程中任意组装，也会使弹重超差。

采取的措施，除严格控制其组成零部件的质量公差外，通常采用不同的装配方法予以保证。用分组装配法及直接选配法，一般可解决质量超差问题。修配法在有质量可修的条件下，也是一种可取的方法。另外也可用规定的配重环、配重垫等进行调整。

14.5.5 密封性不合格

有密封要求的部位，如有漏气或漏水现象，则起不到密封作用。装在火箭弹内的炸药、发射药、点火药、时间引信等得不到很好的保护，常与周围介质作用而变质。

密封不合格的原因，可能是零件有缺陷；螺纹连接处所涂的密封物没涂匀或漏涂；专用的密封垫、密封圈、密封塞等破损；或有加工误差，致使密封性不合格。

解决的措施，可针对性地进行。即更换有缺陷的零件，螺纹连接处所涂的密封物要涂均匀，选用合格的密封垫、密封圈、密封塞等，装配正确。

14.5.6 电点火系统发生断路、短路或不绝缘

电点火系统的可靠性直接关系到火箭弹的安全性能和使用性能。在装配过程中，往往发生断路、短路或不绝缘问题，致使火箭弹发射不出去，或有发生爆炸的危险。

1. 电路系统常发生的质量问题

(1) 断路。

(2) 短路。

(3) 不绝缘(电阻值过小)，或电阻值过大。

(4) 电阻不稳定。

2. 产生原因

(1) 导线(电路)被拧断、折断或连接有误。

(2) 连接处未接好，比如铆接时没铆牢，焊接时没焊好，螺钉接线没有固定牢等。

(3) 导线的绝缘外皮破损，且与其他导电部位接触，形成短路。

(4) 绝缘件质量不好，其中含有金属杂质或有破损等。

(5) 导线连接处有杂质、污物。

(6) 导线虽未断，但总线中有断股，使电阻加大或不稳。

(7) 与电点火系统的相关件，螺纹连接处有松动，影响到电阻值的稳定。

(8) 电点火系统的元器件质量不符合要求。

(9) 检测装置与仪器的质量也关系到被测电路的质量。

3. 预防与解决措施

(1) 确保电气元件、绝缘件和导线的质量，合格者方可投入使用。在周转与使用过程中，严防扎伤及破损。

(2) 连接与接触处要清擦干净，并确保螺钉、垫圈等表面防腐层质量。

(3) 导线连接处，要拧紧、铆牢、焊好、固定可靠。

(4) 装配中采取某些预防措施。如首先向螺纹拧紧相反方向旋转数圈(螺纹圈数)，再拧紧。或在装配时分步骤进行，以防止拧紧后导线处于直线自由状态而被拧断。

(5) 坚持文明生产，防止导线外绝缘皮被划破而与外部金属接触短路，防止导线被砸断而断路。

(6) 确保组成全弹的零件连接固定可靠，不得松动或晃动。

(7) 正确接好电路。

(8) 切断导线或导线端部去皮时，严防芯线断股，确保导线的完整。

(9) 所用检测装配仪器、仪表要按期校对和检查，保证处于良好状态。

(10) 对不合格或有疑问的线路，先进行检查，找出原因后有针对性地处理，更换不合格的元器件或重新连接，以确保线路的绝缘与畅通。

14.5.7　零件表面锌层破损

火箭弹金属零件电镀层种类很多，但应用最多的是表面镀锌。由于锌层的特点，在电镀后的储存、搬运、生产线上传送、装配等过程，极易发生锌层碰伤、变质、局部腐蚀、损伤甚至脱落，使锌层防腐能力减弱甚至丧失，影响产品的储存。

1. 产生原因

产生原因主要是零件周围环境不好(不合标准)；搬运与生产过程中摩擦与碰撞，致使锌层变质腐蚀、损伤与脱落。当然，也与锌层本身的质量有关。

2. 防止措施

(1) 存放零件的库房，必须干燥通风，相对湿度在 70%以下，不能有酸、碱、硫化物及其挥发物存在，并在锌层上涂上一层中性防腐油等，以防锌层的变质与腐蚀。

(2) 在搬运与生产过程中，减少摩擦，严防磕碰。

① 储存与周转过程中，与镀锌表面相接触的物件，需采用木制品、橡胶制品、尼龙制品、胶木制品等。若需用金属制品时，需选用比较软的铝、铜制作。如必须用钢制作时，其制品表面要打磨光滑，不许有尖棱尖角。

② 装配时，为了减少摩擦，必须使相互滑动改为相对滚动。

③ 在搬运和生产过程中，提倡文明生产，产品轻拿轻放，必要时在产品上配装保护套、隔离棒，以防磕碰。

3. 补救措施

在实际生产中，尤其是大批量的生产过程中，尽管采取了许多防范措施，仍不可避免使有些零件的锌层受到不同程度的损坏。因此，必须采取一些方便生产、比较经济的补救措施。

目前应用的补救办法有：

(1) 锌层钝化膜再生法。此法应用于镀锌层基本存在，仅是钝化膜或锌层表面局部损

伤的情形。对于锌层轻微变质的可用抛光法去除变质层，但大部分锌层还存在，使用钝化膜再生法。

此法的工艺内容主要有：

① 钝化膜脱落处及局部抛光处清擦。先用汽油清擦，再用酒精清擦，然后再用自来水清擦。清擦的面积开始要大于破损处，按清擦顺序逐步缩小。

② 钝化膜再生。操作方法如下：在室温下，将钝化液滴在经清擦的局部无钝化膜表面上，停留 30～60 s，然后用脱脂棉将钝化液吸干。对于无法停留钝化液的圆弧面、斜面等，可用脱脂棉蘸上钝化液，覆盖在损伤表面，停留同样长的时间。

③ 烘干或吹干。

(2) 刷镀。刷镀又称涂镀，是一种在零件表面上局部进行快速电沉积金属的新技术，是表面处理技术领域里的新方法之一，广泛应用于搬运与装配过程中。锌层局部损伤，露出基本金属时使用刷镀不解体补救，具有质量好、效率高、可在现场机动作业、简单、方便等优点。刷镀时，零件与直流电源的负极相接，镀笔与正极相接，零件与镀笔做相对移动或相对转动。其间加入镀液，在电流作用下，锌离子在零件表面还原沉积，形成镀层。

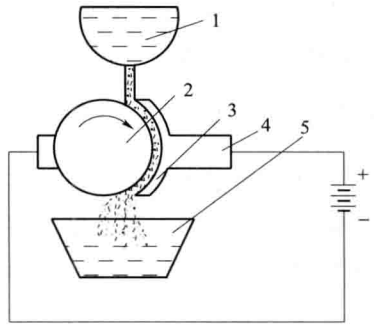


图 14.1 刷镀工作原理示意图

1—镀液；2—工件；3—包套；4—镀笔；5—集液盒

刷镀工作原理见图 14.1。

刷镀技术有专门资料介绍，按照刷镀工艺，结合零件镀层的损坏情况，制定修补的具体方法。

(3) 着色。着色是在特定溶液中，通过化学浸渍或电解处理，在金属表面(包括镀层)形成一层带有某种颜色，且具有较好抗腐蚀性的基体金属化合物。

此法应用于镀层局部损坏的修补。着色法的膜层抗蚀能力尚需进行探讨。在对外表颜色要求不严、抗蚀能力要求不高的情况下，可用着色法修补镀层。具体方法可参照钝化膜再生法，结合实际情况制定出修补的具体方法。

14.5.8 漆层脱落

漆层脱落的主要原因是机械损伤与底漆和面漆之间的结合强度低。

(1) 底漆和面漆不配套、结合力差。底漆采用弱稀释剂(溶剂)，面漆采用强稀释剂(溶剂)，两层漆不配套。

(2) 底漆未干透，或有局部脱落，造成面漆对底漆的渗透。

(3) 工作场所相对湿度大，使面漆的稀释剂(溶剂)不能较快地挥发，增强了面漆对底漆的渗透作用，加长了渗透的时间。

(4) 底漆打底质量不好，留有孔洞，或涂底漆前，除油、污、锈不净，而降低了底漆与基体金属的附着力。只要面漆稍有渗透，便有膨胀、鼓起，更经不住磕碰和机械摩擦而造成多处大面积的漆层脱落。

(5) 面漆较稀，其中所含的强溶剂或强稀释剂相对较多，增强了对底漆的渗透能力。

防止和减轻漆层脱落的办法和措施：

(1) 若涂油脂漆、醇酸漆等油基类漆做底漆，面漆采用强溶剂、强稀释剂的快干类硝基漆时，底漆必须在 60 ℃～70 ℃烘箱中烘干 24 h 以上，使漆膜干透。

(2) 在底层漆膜因磕碰、机械摩擦而脱落的地方，涂上浓度为 10%左右的虫胶漆。有风吹时，需 2～3 min，无风吹时需 3～5 min，再涂面漆。

(3) 增大面漆的黏度。

(4) 面漆涂完后，用冷风吹，以加速溶剂的挥发。

(5) 文明生产，轻拿轻放，防止漆膜的磕碰与机械摩擦，预防漆膜的脱落。

(6) 充分发挥两层漆的优点，相互取长补短，符合配套要求。即底漆和面漆之间有较强的结合力，而且底漆和面漆之间互相无不良作用。

(7) 改人工刷涂面漆为机械喷漆。因喷漆的漆层薄，干燥快，缩短了面漆对底漆的渗透时间，减弱了渗透的能力。

装配中，除上述质量问题外，还有很多质量问题，诸如错装零部件、漏装零件、位置不对、方向错误等。虽然这些问题不常发生，但一旦发生，就会产生严重的不堪设想的后果。所以装配过程中，必须严肃认真、精心操作，确保产品使用达到万无一失。

第 15 章　检验与验收

15.1　概　　述

已加工的零件和产品是否符合产品图样和技术条件的要求，须经检验来确定。凡是检查、测量零件和产品的尺寸、形状和相互位置精度是否符合产品图样和技术条件的要求所用的检验工具和装置，通称为量具和量仪。

生产过程中，对零件的检验一般有两种方式：一种是消极检验（或称被动检验），一种是积极检验（或称主动检验）。

消极检验是指在加工完成之后检验成品，或在某工序完成后检验工件，从而剔除废品，但不能预防废品的产生，这是目前生产中的基本检验方式。积极检验是指在加工过程中检验工件，并根据测量结果主动控制机床的工作，例如改变送进量、自动停车、自动补偿等。这种检验方式目前仅在自动化程度较高的机床或自动线中对精密零件加工时采用，它是检验工作的发展方向，是自动检验中的一种先进方式。但这种积极检验方式由于所用设备复杂，在使用上受到了一定的限制。尤其是这种积极检验一般只能检验直线尺寸精度，对于相互位置精度还得采用消极检验来控制。此外，需选配的零件也无法用积极检验来进行分选，所以积极检验并不能完全代替消极检验。

在消极检验工作中，对零件的检验方法主要有两种：一种是用有刻度的通用量具测量，如游标卡尺、千分尺等，直接测出工件的实际尺寸；另一种是用无刻度的极限量具检验，它只能测出零件的尺寸、形状和位置是否在规定的误差范围之内，而不能确定零件的实际尺寸值。在大批量生产中，为了提高检验效率，一般均采用极限量具来检验零件的加工精度。

炮弹与火箭弹零件在加工、弹体装药、全弹装配等各生产过程中，都要经过多次检验。除生产工人自检外，还配合有检验员进行工序检验（即道检），半成品检验（即复检），以及成品零部件检验（即成检），最后要进行产品抽样验收和靶场试验。检验的内容虽然较多，但大致可归结为两个方面：外观尺寸及理化性能检验和靶场试验验收。

15.2　外观尺寸及理化性能检验

下面以碎甲弹为例，简要介绍炮弹在制造过程中的外观尺寸与理化性能的检验内容。

1. 各零件制造过程中质量检验项目

(1) 零件尺寸、外观检验。

(2) 弹体热处理中机械性能抽样检验。

(3) 弹体机械加工中硬度、水压及磁力探伤检验。

(4) 零件表面防腐处理中的质量检验。

2. 弹体装药装配过程中质量检验项目

(1) 对装药装配各零件的检验，目的是剔出质量不符合规定和有严重疵病的零件。检验的内容主要是外观，它包括：

① 弹体内外漆层质量、锈蚀情况和其他各种疵病。

② 引信、曳光管、底螺及连接螺等零件的外观质量。

③ 炸药中的杂质及异常变色等各项外观检验。

(2) 弹体压药质量的 X 射线检验及密度抽验。

(3) 弹丸质量检验。

(4) 装配正确性检验。

3. 全弹装配过程中的质量检验

(1) 对装配各元件的检验。

① 发射药中的杂质、异种品号、形状及其他外观疵病的检验；

② 药筒、电底火的外观及底火电阻检验；

③ 药包袋缝制质量及发射装药药量的检验。

(2) 装配正确性检验。包括：底火与药筒装配正确性，弹丸与药筒结合牢固性及拔弹力检验。

(3) 全弹外观及标志检验。

(4) 包装检验。包括：包装筒、包装铁笼外观及标志。包装筒密封性及每批抽一定数量包装好的炮弹进行跌落试验等项目检验。

15.3　靶场试验

靶场试验是弹药研制、生产及交验的重要环节，是在比照实际使用的条件下，对弹药综合性能的最终检验。对炮弹和火箭弹而言，按其试验场合可分为静止试验与射击试验两大类。按其试验内容可分为研制试验、鉴定试验、生产交验性试验以及射表编制试验。其中鉴定试验，射表编制试验一般在国家靶场或专用靶场进行。

由于炮弹与火箭弹的工作原理不同，其靶场试验项目也有所区别。以下分别说明。

15.3.1　炮弹的靶场试验

不同类型的炮弹对付的目标不同，战术技术指标的要求也不同，靶场试验项目也不完全相同。现以 105 mm 坦克炮碎甲弹为例，简要介绍碎甲弹靶场试验项目和一般要求。

1. 试验样品的抽取

碎甲弹同其他弹种一样，在生产过程中，除要进行上述各项检验外，每批还要抽取一

定数量的产品进行靶场试验。

碎甲弹生产中的靶场验收试验一般主要有：立靶密集度、碎甲性能、装药安定性和爆炸完全性四项。其中装药安定性试验、爆炸完全性试验合并进行。各项试验的样品均在呈交验收方代表验收的产品（已装配包装好的炮弹）中抽取，一般情况下所抽取的试样不指定验收项目，试验时可随机抽取进行各项试验。有时为严格考核，验收方代表可在生产过程中选取靶场试验的试样，如选用压药密度偏低的弹丸进行碎甲试验，选用质量偏上、下限的弹丸进行立靶密集度试验等。

2. 主要试验项目

1）立靶密集度试验

立靶密集度试验用炮弹 8 发，试验前炮弹在 21 ℃条件下连续保温 24 h。试验用炮管的寿命应在第一期（炮膛磨损距膛线起始部位 25.4 mm 处，炮管的阳线直径不大于 ϕ105.5 mm），用全装药、实弹、真引信，对距炮口 1 000 m 处立靶（常采用布质天幕靶）射击。射击结束后测量靶上各弹着点的高低和方向坐标。计算高低和方向散布极差之和，使之满足产品图样规定的指标要求。

2）碎甲性能试验

碎甲试验用炮弹 2 发，对炮弹保温及射击用火炮的要求同立靶密集度试验。试验时对距炮口 120 m 处厚度为 120 mm 的均质钢板进行射击。射击时，靶板按 30°（或 60°）和 0°法线角轮换放置射击，射击中一般不进行测速。要求在规定的两种角度下必须全部碎甲，即弹丸着靶作用后，靶板背面应有碟形破片从靶板上脱落或飞出。

弹丸着靶后，如碟形破片未脱落下来，则认为有缺陷。若 2 发炮弹均出现这样的缺陷，则该批炮弹拒收。如有 1 发不符合要求，允许补试 1 发。

脱落的碟形破片一般为圆柱形或椭圆形（大着角易形成圆形破片，小着角易形成椭圆形破片），直径约 20 cm，质量大都在 5 kg 以上。

碎甲试验时，试验前应对火炮及瞄准系统进行检验校正，射击时保证瞄准准确，在靶板上画上明显的瞄准标记。对于用过的靶板，弹丸的着靶位置一般要保证 2 发间距在一倍口径以上，以免弹丸着靶位置相互重叠而影响碎甲真实性。若出现 2 发弹丸着靶位置重叠，则该发炮弹可剔出无效，须进行补试。

3）装药安定性试验和爆炸完全性试验

装药安定性试验和爆炸完全性试验用炮弹 10 发，试验时用炮管的寿命应在第二期，即炮膛磨损距膛线起始部位 25.4 mm 处的阳线直径应不大于 ϕ107 mm。

试验前炮弹在 52 ℃条件下连续保温 12 h，射击目标是距炮口 1 500 m 处的坚硬物质（混凝土堆或正面有水泥墙围护的土堆）。

要求炮弹在膛内和外弹道飞行中安定，击中目标后起爆完全。

15.3.2　火箭弹的靶场试验

1. 主要试验项目

1）静止试验

静止试验主要用于产品研制过程，一般由研究部门的技术人员或靶场测试人员在静止试验室（场）内进行，用以鉴定发动机的工作性能和战斗部的威力。在生产中主要用来检验发射药和火工品的弹道性能、发动机隔热涂料的质量及特种工艺的加工质量等，并且分析产品质量问题。

静止试验的项目主要包括：压力—时间、推力—时间、转速—时间等曲线的测定；发动机推力偏心、点火性能试验；发动机隔热涂料性能试验；战斗部破甲性能；杀伤、爆破、燃烧等威力性能试验以及特种火箭弹的特种功效试验；产品选用材料性能试验和发射药环境燃烧性能试验等。

2）射击试验

产品研制过程中，设计定型阶段以及产品交验都需要进行射击试验。一般由靶场人员会同产品设计人员在靶场进行。

射击试验的项目一般包括：

（1）火箭弹发射时的安全性与作用可靠性试验。其中包括火箭弹各部件飞行强度与发动机作用可靠性试验；战斗部装药的射击安全性试验和点火系统、开舱（布雷弹）系统的点火、开舱可靠性试验等。

（2）外弹道试验。其中包括主动段弹道诸元的测定及飞行稳定性试验；地面射程及密集度试验；航箭机载空对地射击的外弹道试验和反坦克火箭弹立靶密集度试验；特种火箭弹的子弹（子母弹）、雷体（布雷弹）的外弹道性能试验等。

（3）战斗部对目标作用可靠性试验。其中包括战斗部爆炸完全性试验；战斗部碰击强度及引信作用可靠性试验；战斗部的装药安定性试验以及特种火箭弹对目标作用可靠性试验等。

（4）威力试验。其中包括杀伤威力试验；爆破威力试验；杀伤、爆破、燃烧威力试验；破甲威力试验；特种火箭弹的扫雷、布雷、子弹的杀爆威力试验等。

以上射击试验中，运用最广泛的是地面密集度（或立靶密集度）试验；弹体强度试验；装药安定性与爆炸完全性试验。一般火箭弹以生产中弹的交验批作为验收射击试验批，允许上述试验合并进行。在试验条件与试验数量满足密集度试验要求的情况下，也可以密集度（立靶密集度）试验为主，把其他射击试验项目合并进行。

2. 122 毫米杀爆燃火箭弹静爆试验

1）试验目的

考核 122 毫米杀爆燃火箭弹战斗部静爆后的有效纵火半径及动物的杀伤、烧伤效果。

2）静爆试验场地准备

杀爆燃静爆试验参照常规兵器定型试验法中扇形靶试验法的形式进行。根据被试品战术技术指标中杀伤半径、纵火半径，并参考有关技术资料和技安规定选择平坦、开阔场地布靶。静爆试验靶场布置采用放射型扇形布靶，布置示意图见图 15.1。单靶布置采用靶高 3 米的铁架靶，靶宽按扇形弧长实际尺寸为准。靶架用角钢焊制，横向用铁丝分格，上挂不同易燃物(棉纱、草帘、芦苇等)。单靶布置见图 15.2。

为考核杀爆燃火箭弹对有生力量的杀伤、燃烧的效果，分别在距爆点 10 m、20 m、30 m、40 m、50 m 和 60 m 处拴放一定数量的动物靶标，如图 15.1 所示。为统计静爆时纵火火种的数量，在静爆地面上铺 3 m×55 m 的塑料布如图 15.1 所示。

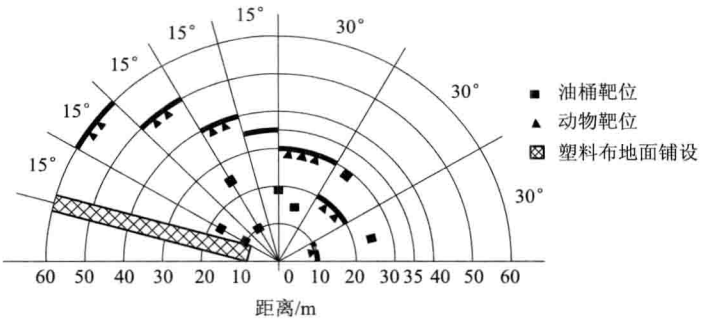


图 15.1 122 毫米杀爆燃火箭弹静爆试验靶场布置示意图

爆点布置时，把战斗部置于木桩顶端，使战斗部爆炸中心处于靶面中心部位，如图 15.3 所示。引爆方式采用电雷管起爆器起爆。战斗部静爆前进行常温 24 h 保温处理。综合静爆试验选在白天进行，为单独考核杀爆燃火箭弹燃烧效果，试验项目可单独在夜间进行。

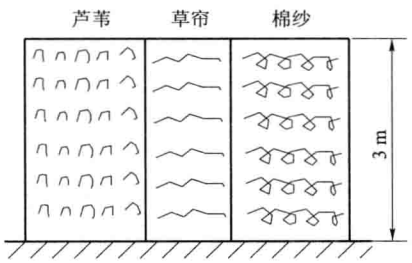


图 15.2 单靶布置图

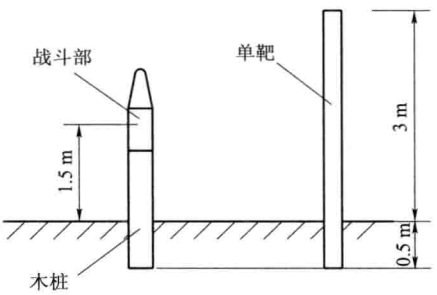


图 15.3 炸点布置图

气象条件的测量按常规准备，并准备摄像和拍照设施。

3) 试验结果统计、收集

鉴于这种静爆试验为效果型静止试验，所以试验结果的收集、整理应采用摄像、拍照和数量统计的方法合并进行。对静爆试验的布靶形式，起爆瞬间状态，动物杀伤、烧伤情况，单

靶、油桶燃烧状况均应采用摄像和拍照记录，按点燃、引燃和未燃三种燃烧类型，分别统计不同靶距的单靶上不同易燃物的燃烧情况。对生物试验的分类统计可按相应的试验法记录动物伤害数据，对燃烧件在静爆时生成的火种数进行收集。火种数收集方法为：按不同扇形区间、点数（即爆炸时燃烧颗粒落在塑料布上烧下的孔洞数量），记录孔洞烧蚀状况，并按距炸点不同间距统计相应火种生成数量。将试验中收集到的数据统计整理后，连同有关气象数据等填入试验报告。

3. 火箭弹发动机隔热涂料静止试验

1）试验目的

考核涂敷在 122 mm 火箭弹发动机内的 GT—401 隔热涂层在其工作状态下的隔热性能，以此作为涂料出厂（或进厂）的验收依据。

2）静止试验的准备

（1）静止试验发动机的装配与准备。火箭发动机装配按 122 mm 火箭弹装配与验收技术条件的要求进行。装配好的被试发动机需进行导电回路的通路电阻检查，符合要求后，需对被试发动机进行保温处理，恒温时间不得少于 24 h。试验前在前室前端旋入带铜柱测压器的测压堵头，并用一根导线将发动机点火回路短路（外接点用胶粘牢即可）。

（2）静止试验台与试验仪器准备。按静止试验操作程序和维护要求对试验台进行全面检查，并调整好两个中心架之间的距离、高度，保证发动机放在中心架上。发动机轴线与推力油缸轴线相一致，发动机要垂直于试验台，不得倾斜。而后把试验台所有螺钉旋紧到位，测压器的准备按“铜柱测压法”进行。

按试验规程准备好起爆器、表面温度计、秒表、发火导线、石棉手套等试验用器具和工具。

3）静止试验与填写试验报告

静止试验时，将被试发动机放入试验台中心架上，把两个中心架的上架放下，并保证发动机前端与推力油缸相接触，不得有间隙。准备好后，拆去短路导线，接入发火线，用起爆器点火试验。

火箭发动机工作结束 8 秒内，开始用表面温度计在试验台上，按图 15.4 所示部位测量最高温度值，并记录各点的实测最高外壁温度和达到该温度的时间。同时对测压钢柱进行测量，求出发动机的推力。

每批涂料用两发火箭发动机进行试验，各实测点外表面壁温均不应高于 350 ℃。

试验结束后，根据试验结果填写试验报告。

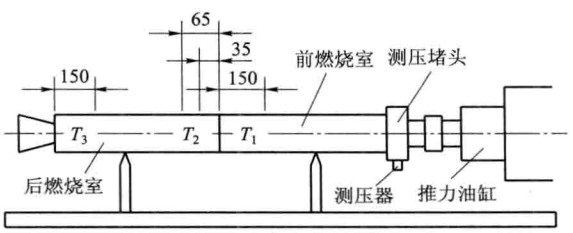


图 15.4　试验装置图与测温部分

火箭发动机隔热涂层试验，实际上是对发动机表面温度的测试。在试验

中可以将热电偶用电容式焊机焊于发动机壁面，而后涂敷耐火水泥加以保护，用测温仪进行表面温度测量。

4. 射程及地面密集度试验

火箭弹射程及地面密集度试验的主要目的是，测定火箭弹在射击标准条件下的最大、最小单组试验射程和落点相对中间误差，以评定产品的射程和密集度是否满足战术技术指标。

1）试验准备

按照靶场试验工艺规程进行火箭弹、火箭炮、落弹区、动态测试和气象测量等试验准备。

2）射击试验

按照靶场试验工艺规程的射击技术要求进行射击试验。

为确保安全，便于观察和测量，正式射击试验前应先进行 1～2 发目标弹的射击。产品交验试验一天连续进行多组试验时，同批两组的间隔应大于 2 h。对于科研摸底、产品定型和工厂鉴定试验，组与组之间间隔应大于 4 h。当射击过程中发生火箭弹装配件脱落、火箭弹早炸、火箭发动机爆炸以及火箭炮发生明显位移或其他影响试验结果的故障时，应停止试验。

3）落点坐标测量

落点坐标的测量，目前常用的方法为用测绳直接测量法和方向盘交会测量法两种。由于方向盘交会测量法具有测量精度高、劳动强度小、测量方便迅速等优点而被大多数靶场所采用。

方向盘交会测量有以下三种方法：

(1) 单台方向盘测量法。

测量时使用一台方向盘(见图 15.5)。为简化计算程序，该方向盘定点于靶道线(或靶道的平行线)的已知点 $D_0(z_s, x_s)$ 处。测量时，在落点 C 处显示一根两米长的标杆，标杆中点与落点 C 的中心重合，并保证使标杆垂直于方向盘与落点 C 的测量线。用方向盘测量标杆两端间夹角 α，以及标杆 A 端至方向盘设置点连线与靶道方向间的夹角 β。运用三角函数关系计算落点 C 的坐标。

$$x_i = x_s + \frac{\cos\beta}{\tan\frac{\alpha}{2}}$$

$$z_i = \frac{\sin\beta}{\tan\frac{\alpha}{2}} - z_s \qquad (15.3.1)$$

式中 α——方向盘设置点与标杆两端间夹角；

β——方向盘设置点至标杆 A 端连线与靶道方向间的夹角；

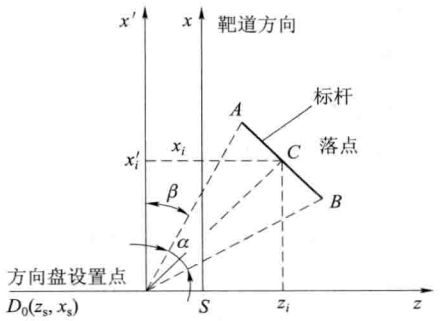


图 15.5 单台方向盘测量示意图

x_s，z_s——方向盘设置点相对炮位的纵、横向坐标。

该测量法使用仪器少，计算简便，但操作误差大，计算结果精度较差。

(2) 两台方向盘测量法。

测量时，两台方向盘设置在远离靶道线且平行于靶道线 A、B 两点处，两方向盘相距不小于 1 000 m，并保证观测角在 30°～150°范围内，以减小误差（见图 15.6）。落点坐标计算公式如下：

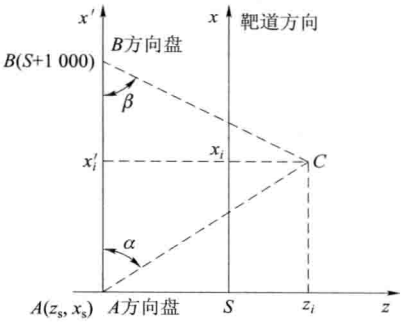


图 15.6　两台方向盘测量示意图

$$x_i = x_s + \frac{1\ 000\tan\beta}{\tan\alpha + \tan\beta}$$

$$z_i = \frac{1\ 000\tan\alpha \cdot \tan\beta}{\tan\alpha + \tan\beta} - z_s \qquad (15.3.2)$$

式中　α——A 方向盘至落点连线与靶道方向间的夹角，顺时针方向为正；

β——B 方向盘至落点连线与靶道方向间的夹角，逆时针方向为正；

x_s，z_s——A 方向盘相对炮位的坐标。

两台方向盘测量法可在射击过程中利用烟雾捕捉落点坐标，以排出射序，并且具有精度高、操作简单、避免了人为误差因素等特点，是使用最广泛的一种测量方法。

(3) 3 台方向盘测量法。

3 台方向盘测量法原理与两台方向盘测量法相同，只是在原两台方向盘的对面又增加了 1 台方向盘，以形成 3 组两台方向盘观测的测量系统。这种测量法可利用形成的 3 组落点坐标数据更精确地确定落点坐标实际值（求 3 组数据的算术平均值），使测量数据的精度更高。由于在 3 个方向设置方向盘进行测量，对地形较复杂的落弹区尤为适用，可以消除因地形造成的测量盲区。

4) 试验结果整理及数据处理

(1) 单组试验射程计算公式为：

$$x_{sn} = \sqrt{(\overline{x} + x_{op})^2 + (\overline{z} - z_{op})^2}$$

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad \overline{z} = \frac{\sum_{i=1}^{n} z_i}{n} \qquad (15.3.3)$$

式中　x_{op}，z_{op}——炮位相对主靶道零点坐标；

x_i，z_i——炸点相对主靶道零点坐标；

n——一组射击试验发数。

(2) 多组平均试验射程计算公式为：

$$\overline{x}_0 = \frac{n_1 x_{01} + n_2 x_{02} + \cdots + n_m x_{0m}}{n_1 + n_2 + \cdots + n_m} \qquad (15.3.4)$$

式中　x_{01}，x_{02}，…，x_{0m}——各组试验射程；

n_1，n_2，…，n_m——各组试验发数。

(3) 标准化射程。

需要换算标准化射程时，只考虑药温非标准条件下和气象条件非标准时的修正量以及地形条件修正量。

(4) 单组中间误差值的计算。

用标准差计算法计算距离中间误差 E_x 与方向中间误差 E_z 时：

$$E_x = 0.674\,5\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}$$

$$E_z = 0.674\,5\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(z_i-\overline{z})^2} \tag{15.3.5}$$

当落点射序已知，需要用连续差计算法计算时，计算公式为：

$$E_x = 0.476\,9\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_{i+1}-x_i)^2}$$

$$E_z = 0.476\,9\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(z_{i+1}-z_i)^2} \tag{15.3.6}$$

式中 x_i, z_i ——在以主靶道为轴的直角坐标系内，落点相对炮口的纵、横坐标；

$\overline{x}, \overline{z}$ ——一组落点纵、横坐标平均值；

n——一组射击计算发数。

如果射向与靶道线存在夹角（见图 15.7），且 $\alpha > 3°$时，则应将落点坐标先投影到射向以及与射向相垂直的方向上后，再按上述公式计算。

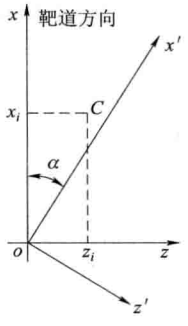


图 15.7 射向与靶道线存在夹角 α

坐标转换公式如下：

$$x'_i = x_i\cos\alpha - z_i\sin\alpha$$

$$z'_i = z_i\cos\alpha + x_i\sin\alpha \tag{15.3.7}$$

式中 α ——射向与靶道线夹角，顺时针为正。

当怀疑试验中有规律性因素影响弹着点散布时，在已知落点射序的条件下，应进行倾向性检查，以判定哪种方法计算中间误差值更为合理。检查方法如下：

对同组试验结果计算统计量：

$$g_0 = \frac{E_1^2}{E_2^2} \tag{15.3.8}$$

式中 E_1 ——用连续差法计算的中间误差；

E_2 ——用标准差法计算的中间误差。

根据该组实验发数 n 及显著水平（一般取 $\alpha = 0.99$），查倾向性检验限值 g_n（见表 15-1），可得一个 g_n 值。若 $g_0 > g_n$，则判定没有显著倾向性影响，应取标准差法计算值为正式结果；若 $g_0 < g_n$，则判定有倾向性影响，应取连续差法计算值为正式结果。

表 15-1　倾向性检验限值 g_n 表

g_n \ α / n	0.99	0.95	g_n \ α / n	0.99	0.95
4	0.312 8	0.390 2	14	0.446 6	0.590 8
5	0.269 0	0.410 2	15	0.461 1	0.602 7
6	0.280 8	0.445 2	16	0.474 6	0.613 6
7	0.307 0	0.468 0	17	0.487 2	0.623 7
8	0.331 4	0.491 2	18	0.498 9	0.633 0
9	0.354 4	0.512 2	19	0.510 0	0.641 7
10	0.375 9	0.531 1	20	0.520 3	0.649 8
11	0.395 7	0.548 3	21	0.530 0	0.657 4
12	0.414 0	0.563 8	22	0.539 2	0.664 5
13	0.430 9	0.577 9	23	0.547 9	0.671 2

(5) 多组中间误差值的计算公式为：

$$\overline{E}_x = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(n_j-1)E_{xj}^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(n_j-1)}} \qquad \overline{E}_z = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(n_j-1)E_{zj}^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(n_j-1)}} \tag{15.3.9}$$

式中　j——组序；

n_j——第 j 组试验发数；

m——试验组数。

(6) 射击密集度计算公式为：

$$r_x = \frac{E_x}{\overline{X}} \qquad r_z = \frac{E_z}{\overline{X}} \tag{15.3.10}$$

式中　$\overline{X}$——单组试验平均射程。

习惯上 r_x 与 r_z 以分子为单位 1 的形式表示。

用交会测量法测出各发弹落点的一组角度值后，计算各发弹落点坐标以及计算试验批的相对中间误差是一项较繁琐的工作，并且很容易出现计算误差。利用计算机编程计算可以有效地提高工作效率。

5. 立靶精度试验

立靶精度试验，主要考核反坦克火箭弹或航空火箭弹对立体“点目标”射击时的命中率和射击密集度，是否满足战术技术指标要求。

1）试验准备

（1）靶板准备和靶距确定。靶板一般用胶合板、布、席子等制成，要求靶面垂直于射击方向，并拴拉牢固。靶板尺寸应根据被试产品的射程及散布特性来确定。靶面宽与高至少等于8倍被试品相应的散布中间误差。靶面选用浅颜色，靶面中心应有供瞄准用的黑色“十”字线。靶距应根据被试品的战术技术指标确定，一般取稍大于被试火箭弹主动段弧长，靶距测量精度应不大于1/5 000。为便于观察，需在靶道线一侧分别设炮位和靶位观察掩体。

（2）火炮、气象测量准备。反坦克火箭弹立靶精度试验的火炮准备、气象测量准备可按地面密集度试验的要求和相应立靶精度试验法中的要求进行。火炮一般选用初速损失不大于2%的一级炮管。气象测量只需在距炮位不超过50 m处，逐发测出距地面2 m处的风速和风向，并计算出与射向平行和垂直的风速分量。当风速超过指标规定值时，可控制风速跳动量在±1 m/s范围内。

（3）试验用弹准备。立靶精度试验用弹采用填砂弹。配摘火引信或假引信，重心位置应符合产品图的要求，并按技术条件进行保温。其他参照地面密集度试验进行。

（4）动态测量系统准备。对增程式反坦克火箭弹在立靶精度射击同时应进行炮口速度的测定，以确定初速的平均值 v_0 及其概率误差 r_w 是否符合产品图和技术条件要求。立靶精度试验在不影响精度试验测试的情况下，允许与其他试验项目合并进行。包括测速在内的动态测量系统的准备，按常规方式准备。靶位测量应准备好粘补弹孔用具和测量工具。

2）射击试验

射前应用校靶镜（或通过炮尾击针孔与炮口十字线的方法）瞄准靶心，记下炮口高低角。一般要求射线与立靶法线夹角为零度。正式射击前一般先进行试射，以修正射角、射向，使弹着点在靶板的适当位置（以不发生脱靶和便于测量为原则）。试射时的射角中应含弹道下降量的修正值。此值可由下面公式估算：

$$\theta = \frac{h}{s}; h = \frac{1}{2}gt^2 \tag{15.3.11}$$

式中 s——靶距，km；

h——炮口到靶面火箭弹弹道下降量，m；

θ——射角，rad；

g——重力加速度，m/s^2；

t——火箭弹由炮口至靶面的时间，s。由弹道资料估计。

射击过程中应注意观察弹的飞行状态、声音、火炮变位、着靶穿孔形状以及其他异常情况。若发生近弹、脱靶应停止试验，查明原因再恢复试验。若发现零部件脱落、火炮较大位移等现象时，应停止试验。一组试验内应保持在同一诸元，时间不得超过30 min。

3）测试与测量

一组试验射击完成后应测量每发弹孔距靶心的坐标，一般采用直接测量法，测量精度要求精确到 0.01 m。测量前，靶位观察员应记录中靶情况，注意观察射孔形状和异常情况，区分射序。当脱靶时记下脱靶方位，测量落点坐标，回收弹体残骸以备检查。射孔测量后要及时补孔。

立靶精度的试验也可以采用光电、声电靶测试。如 50 W 型声学精度靶，不用靶板，射击后立即能确定枪或炮的立靶精度，并可用计算机显示、打印所有数据和图形。具有快速、安全、可靠和准确的特点。

4）数据处理及结果评定

立靶精度试验的数据处理，主要进行平均弹着点的坐标和高、低方位的中间误差的计算。当 E_x，E_z 满足产品图或技术条件的要求时即为合格。

有圆概率验收指标的被试产品，允许以圆概率指标评定结果。若有一发弹脱靶，经查明属于非弹体原因时，允许在计算结果时予以剔除。

6. 火箭弹弹体强度试验

弹体强度试验一般同地面密集度试验合并进行。其试验目的是考核火箭弹零部件的飞行强度和作用可靠性。

对射击后难以无损回收的火箭弹，主要应结合其他试验项目进行弹道飞行状况观察。根据火箭弹在弹道上有无爆炸、零部件有无脱落、发动机工作是否正常、飞行是否稳定以及有无近弹来判定火箭弹强度和作用可靠性是否满足指标要求。研制阶段产品强度的考核应进行高、低、常温射击试验，试验时应进行必要的弹道特性监测。必要时可用遥测方法测出火箭弹在飞行中过载、转速、发动机工作压力及温度随时间的变化曲线，同时还应测出弹体某部位的实际应力曲线，以此作为判断弹体飞行强度设计是否合理的重要依据。

对于便于回收的火箭弹，要通过射前、射后的测量、计算，按照产品图、技术条件的要求做出是否合格的结论。必要时应对残骸拍照，回收的弹体残骸应保存一段时间以备查用。

当发生近弹、离群弹或弹道不稳定现象时，应尽可能回收弹体及弹道上的脱落物，并详细记录落点坐标及弹体残骸散布情况，为寻找原因提供第一手资料。

7. 战斗部装药安定性与爆炸完全性试验

战斗部装药安定性试验的目的是，考核杀伤或杀伤爆破火箭弹撞击目标时，在引信作用前，战斗部装药是否因内部产生的应力过大而引起早炸。

战斗部爆炸完全性试验的目的是，考核战斗部装药作用的可靠性，以确定战斗部撞击目标时不炸或爆炸不完全的原因。

该两项试验一般与地面密集度试验合并进行。观察人员在落弹区安全和便于观察的掩体内观察，射击完成后应逐发查看爆坑及附近地面，以便做出准确的判断。

观察人员根据战斗部装药是否在引信作用前发生爆炸，来判定战斗部装药安定性是否合格；根据爆炸火光、烟云和爆炸声音等，进行判断是否发生爆炸不完全现象，以此判定战斗部爆炸完全性是否合格。若爆炸后的弹坑尺寸较小，弹坑内或周围有大块战斗部破片及残余药块或药粉，则应判定战斗部爆炸不完全。对判定为爆炸不完全的战斗部应进行详细分析。若弹坑内或周围有大块战斗部破片，且有的破片断面处没有爆炸完全时形成的金属特有的剪切面，断面呈摔碎瓦片状，这一般是战斗部碰击强度不足，在爆炸前撞裂所致，不应判定为装药爆炸不完全。若战斗部出现不爆炸的情况，要分析弹体残骸才能判定。通常情况下若引信已作用，口部螺纹部分已被炸碎了，则属于炸药装药造成，否则属于引信瞎火所致。

8. 火箭子母弹射击验收试验

火箭子母弹射击验收试验的目的是考核该产品的弹体强度、射击试验密集度、母弹引信开舱率、子弹引信作用率以及子弹散布范围是否满足产品图样和战术技术指标的要求。

1）试验准备

试验的准备工作参照 122 mm 火箭子母弹射击验收技术条件、火箭弹地面密集度试验的试验准备程序进行。

射击试验的密集度试验允许与弹体强度试验、母弹引信试验合并进行。试验中允许用带有摘火引信的模拟子弹，或用装有发烟子弹的战斗部。试验用火箭弹应在 8 ℃～25 ℃范围内的某一温度下进行保温，保温时间大于 18 小时，每组试验用弹为 10 发。

根据需要在射击试验前可对被试火箭弹进行弹重、弹长、转动惯量、质量偏心和质心位置等项目的静态测量。在射击试验中，可采用弹道雷达进行火箭弹初速、主动段弹道参数及开舱高度的测试。若不采用弹道雷达测试，允许用方向盘或其他方式测试母弹开舱高度。

被试火箭弹在安装母弹引信后、装入定向管前，应用引信装定检测仪对母弹引信的作用时间进行装定。最大射程试验时，将引信作用时间装定到 106 s 以上。如射程角有变化时，装定时间按射表进行。

2）射击试验与观察测量

在落弹区和气象准备就绪后，经过气象修正、间接瞄准赋予射击诸元后，进行多管装填、单发瞄准、单发射击试验。每组验收试验时间为：若试验 10 发时允许持续 30 min；若试验 20 发时允许持续 50 min。试验中出现不发火时，应查明原因，排除故障，并对母弹电子时间引信重新装定后继续试验。每组试验允许有 1 发弹是由点火具或火箭弹（除点火具外）的原因引起的留膛。

射击试验中，炮位观察人员应注意观察发动机工作状态及主动段的飞行姿态，记录射向、射角的射后变位情况。

弹着区观察人员，应逐发观察、记录弹体在落弹区的飞行状态、开舱情况、开舱高

度、母弹落点和射序、子弹散布范围。如果试验采用发烟战斗部时，子弹着地引信作用后可有持续 1 min 的发烟效果，便于观察子弹引信的作用可靠性。射击结束后，根据弹着点坐标图或方向盘观察数据，寻找全部弹着点。

弹着区测量人员应使用方向盘逐发测量、记录弹体的开舱高度、母弹落点坐标。射击结束后，用所测数据寻找全部落弹点。用方向盘测量火箭弹开舱高度，不仅精度差而且也比较困难，并要求操作者有非常娴熟的技术。为提高测试率可适当增加方向盘的数量。研制阶段的试验，可采用火光成像弹道跟踪系统来测定母弹开舱的精确高度。该系统在落弹区、主靶道两侧架设四台测试装置，采用炮位发射信号同步跟踪，在开舱前 2～3 s 时开启摄像系统，利用开舱引信作用时发出的火光拍摄开舱瞬间的照片，记录开舱高度和时间。

试验结束后，在落弹区需测量每发子弹的落点坐标和每发母弹的子弹散布范围。测量散布范围的具体方法为：以射向为 x 轴，垂直射向为 z 轴，分别测出每发母弹中子弹散布最远和最近、最左和最右的 4 发子弹的距离，子弹的落点坐标以 x_{ij} 和 z_{ij} 表示。其中，i 表示母弹序号，j 表示某一母弹的子弹序号。弹着点和子弹散布测量误差为±1 m。

3）试验结果的处理计算

母弹落点坐标以 x_i, z_j 表示，母弹开舱高度以 h_j 表示，均以方向盘的测量数据为准。若同时使用雷达弹道跟踪测量时，应以雷达测量数据为准。

火箭子母弹不考核母弹的地面密集度指标，而考核火箭子母弹的射击试验密集度。这两种密集度之间的区别是：前者是母弹的落点密集度，后者是母弹的子弹散布中心的密集度。相应地也不考核母弹的平均射程，而考核子弹的平均试验射程。因此在计算这两项指标时，以子弹的落点坐标为基础，先计算出各母弹的子弹散布中心坐标 $\overline{x}_i$ 和 $\overline{z}_i$。计算公式为：

$$\overline{x}_i = \frac{\sum_{j=i}^{n_i} x_j}{n_i} \qquad \overline{z}_i = \frac{\sum_{j=i}^{n_i} z_j}{n_i} \tag{15.3.12}$$

式中　x_j, z_j ——第 i 发母弹第 j 发子弹的 x 轴和 z 轴的坐标；

n_i ——第 i 发母弹的子弹发数。

计算出 $\overline{x}_i$ 和 $\overline{z}_i$ 后，将它们假定为各母弹的坐标值，再按地面密集度的计算公式，求得平均试验射程和试验密集度。倾向性检查和反常弹的剔除也可完全套用地面密集度的方法进行。试验密集度的有效计算发数不允许少于 9 发。

4）试验结果的判定

试验时如未出现弹体零部件折断、脱落、破坏、飞行中爆炸和近弹等现象，则判定弹体强度合格。单发母弹的子弹散布范围若满足产品图定指标，可判定该项目合格。当子弹散布范围不符合图定要求时，允许加倍复试，用 20 发弹编组试验。判定标准为：20 发内只允许有一发子弹散布范围超标，其余 19 发均需满足产品图和技术条件的要

求。若超出图定指标，则判定此项目不合格。试验射程和试验密集度若满足产品图的要求，则判定为合格。母弹开舱高度和母弹落点坐标、子弹落点坐标、子弹引信作用率不作为验收考核指标，母弹引信开舱率应大于 90%。试验密集度指标允许用圆概率表示，折算指标为：

$$\frac{\sqrt{E_x \times E_z}}{\overline{X}} \leqslant \frac{1}{106} \quad \left(原指标为\frac{E_x}{\overline{X}} \leqslant \frac{1}{150}, \frac{E_z}{\overline{X}} \leqslant \frac{1}{75}\right) \tag{15.3.13}$$

9. 航空火箭弹的机载对地射击外弹道试验

航空火箭弹设计定型试验，一般分地面射击试验和空中射击试验两部分。地面射击试验与一般野战火箭弹的射击试验基本相同。通过地面考核，确认空中射击试验安全时方可进行机载试验。机载空对地外弹道试验的目的，主要是测试在某一特定飞行条件（高度、速度、俯冲角）下的射程、密集度（连射）及其弹道诸元。

1）试验准备

（1）试验用弹准备。机载试验用弹，必须经地面试验确认机载试验无危险后，才能机载进入射击场用于试验。试验前按通用试验条件和相应试验大纲的技术要求，进行静态检查和测试，并将检查、测试结果记录在地勤记录表中。根据试验要求确定用弹量，并将弹药分组编号。连射密集度试验时，一组发数等于机载全部发射器总管数。每进入一个飞行条件，射击 3 组，进入飞行条件数应不少于两个。

（2）测试仪器准备。机载试验使用仪器主要是电影经纬仪、确定零点的仪器设备（用无线电将火箭弹发射信号输送到地面）、测量飞行时间的计时仪、红外断路器、坐标测量仪、长焦距摄影机以及通信和气象保障设施。测试仪器的准备按各自仪器的操作守则和机载射击试验技术条件的要求进行。各地面仪器在试验前必须调试完毕，排除影响视野内的不应有的遮蔽物或红外源。需要适时测量的气象诸元，应在保证飞机安全的前提下，尽量在接近射击时间时放探空气球，间隔和次数根据飞行持续时间确定。

（3）机场和射击场准备。地勤检查要按有关试验要求和技术规定执行，主要对发射器和发射器与飞机的连接进行检查。试验用弹装入发射器后应逐发检查发火电路的情况，飞机起飞前应按“地勤记录表”的要求逐项核准，填写原始记录。

对射击试验场地的选择、靶标铺设、航路及进入点选择、空中与地面通信的建立、测试仪器的同步协调和组织指挥方案的制订等，应根据相应的专业操作规程和空勤处理要求进行。为保证能对靶标区的准确交会观测（三点交会），应沿进入方向建立数条测量基线，且要满足测量精度的要求。射击场在飞机起飞半小时前必须清场完毕，所有现场测试仪器（含通信设施）必须处于良好待命状态。

2）试验实施要点

飞机载弹起飞后应立即发出信号，到达航线规定上空时，及时向地面指挥报告，地面指挥应及时通知各点。正式射击前应进行几次试航或空进。若用电影经纬仪测量火箭弹弹道诸元时，应试射几发火箭弹，让经纬仪操作手作充分的适应性调试。需设专门的

弹道观察员，并应科学安排射击的靶标，以保证测试人员和仪器的安全、保证仪器测量精度和各弹着点的区分。每次射击后，应及时到射击现场研究分析射击情况，并详细填写“空-地机载射击试验现场记录”。飞机返回机场后，应及时检查发射器、悬挂梁及有关部位是否有损坏和异常现象，将检查结果填入空-地勤记录表。

3）试验结果的整理与分析

通过对电影经纬仪数据的处理（若落点测量采用地面交会法测量时，地面与空中测量应换算到统一坐标系中），给出发射点坐标值（X、Y、Z）及平均弹着点的坐标值（x_1，y_1，z_1），可以计算发射点到弹着点的散布中心的距离。计算公式为：

$$l_0 = \sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2} \tag{15.3.14}$$

弹着点的中间误差按野战火箭弹地面密集度计算公式进行计算。在计算炸点散布时，要考虑航路角 ψ（射击瞬间前后一段航迹在地面的投影线与地面测量纵坐标 X 轴的夹角，它可由电影经纬仪测量结果得出）对其散布特征量的影响。当 $\psi \geqslant 3°$时，应对坐标系转换后再进行密集度的计算。

通过对长焦距摄影机所拍摄的胶片、电影经纬仪所测速度值的变化以及弹道观察员观察的数据、弹着点坐标及落角变化等数据的综合汇总，可分析出航弹在空中的飞行稳定性情况。

若试验结果满足战术技术指标要求，则判定为合格。

第 16 章　现代制造技术

16.1　特种加工方法

16.1.1　电火花加工

1. 电火花加工的原理

电火花加工，是利用脉冲放电对导电材料的腐蚀作用去除材料，以满足一定形状和尺寸要求的一种加工方法，其原理见图 16.1。在工具电极和工件之间充满液体介质的很小间隙上（一般为 0.01～0.02 mm），施加脉冲电压，间隙中就产生很强的脉冲电压，使两极间的液体介质按脉冲电压的频率不断被电离击穿，产生脉冲放电。由于放电的时间极短（一般为 10^{-8}～10^{-6} s），且发生在放电区的小点上，所以能量高度集中，使放电区的温度高达 10 000 ℃～12 000 ℃，于是工件上的这一小部分金属材料被迅速熔化和气化。由于熔化和气化的速度很高，故带有爆炸性质。在爆炸力的作用下，将熔化了的金属迅速抛出，被液体介质冷却、凝固并从间隙中冲走。每次放电后，在工件表面上形成一个小圆坑，放电过程多次重复进行。随着工具电极不断进给，材料逐渐被蚀除，工具电极的轮廓形状即可精确地复印在工件上，达到加工的目的。

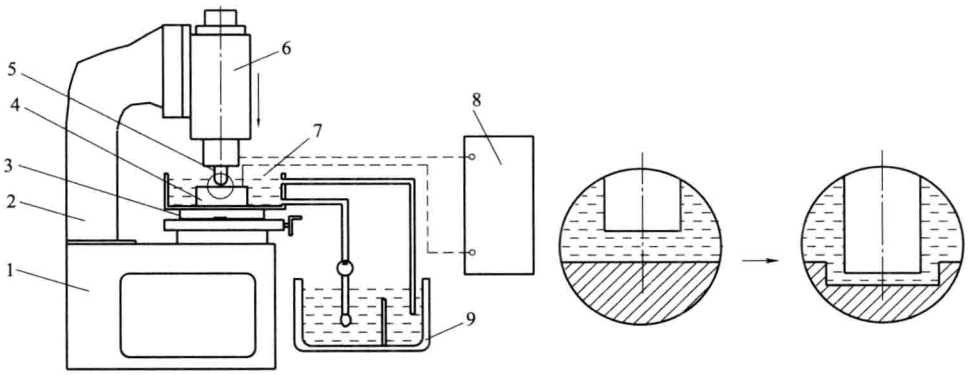


图 16.1　电火花加工原理示意图

1—床身；2—立柱；3—工作台；4—工件电极；5—工具电极

6—进给机构及间隙调节器；7—工作液；8—脉冲电源；9—工作液箱

电火花加工必须采用脉冲电源，以便在每次脉冲间隔内让电极冷却，工作液恢复绝缘状态，使下一次放电能在两极间另一凸点处进行。

在电火花加工过程中，不仅工件电极被蚀除，工具电极也同样遭到蚀除。但两极的蚀除量不一样。因此，在加工过程中要根据具体条件合理选择极性，将工件接在蚀除量大的一极，工具接在蚀除量小的一极。在一般情况下，当直流脉冲电源为高频时，工件接正极；电源为低频时，工件接负极；当用钢材作工具电极时，工件一般接负极。

电火花加工在专用的电火花加工机床上进行。常用的工作液有煤油、去离子水、乳化液等。

2. 电火花加工的特点

(1) 可以加工任何硬、脆、韧、软、高熔点的导电材料。此外，在一定条件下，还可以加工半导体材料及非导电材料。

(2) 加工时无切削力，有利于小孔、薄壁、空槽以及各种复杂截面的型孔、曲线孔、型腔等零件的加工，也适合于精密细微加工。

(3) 当脉冲宽度不大时，对整个工件而言，几乎不受热的影响。因此可以减小热影响层，提高加工后的表面质量，也适用于加工热敏感很强的材料。

(4) 脉冲参数可以任意调节，可以在同一台机床上连续进行粗、半精、精加工。精加工时精度为 0.005 mm，表面粗糙度 Ra 为 0.8 μm；精微加工时精度可达 0.002～0.001 mm，表面粗糙度 Ra 为 0.05～0.1 μm。

(5) 直接使用电能加工，便于实现自动化。

3. 电火花加工的应用

(1) 穿孔加工。可以进行型孔（圆孔、方孔、条边孔、异形孔）、曲线孔（弯孔、螺纹孔）、小孔、微孔等的加工，如落料模、复合模、级进模、喷丝孔等。

(2) 型腔加工。可以进行锻模、压铸模、挤压模、胶木模以及整体式叶轮、叶片等曲面零件的加工。

(3) 线电极切割（简称线切割）。可以进行切断、切割各类复杂型孔，如冲裁模、样板、各种形状复杂的板状细小零件、窄缝和工具等加工。

16.1.2　电解加工

1. 电解加工的原理

电解加工，是利用金属在电解液中产生阳极溶解的电化学原理，对工件进行成型加工的一种方法。电解加工的原理，如图 16.2 所示。工件接直流电源正极，工具接负极，两极之间保持狭小间隙（0.1～0.8 mm），具有一定压力（0.5～2.5 MPa）的电解液从两极间隙中高速（5～60 m/s）流过。当工具阴极向工件不断进给时，在相对于阴极的工件表面上，金属材料按阴极型面的形状不断溶解，电解产物被高速电解液带走，于是工具的形状就相应地“复印”在工件上，从而达到成型加工的目的。

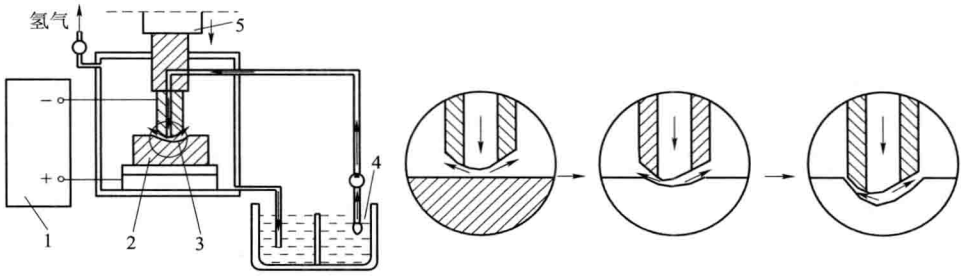


图 16.2 电解加工原理示意图

1—直流电源；2—工件；3—工具电极；4—电解液；5—进给机构

2. 电解加工的特点和应用

电解加工具有以下特点：

(1) 采用低的工作电压（6～24 V），大电流（500～20 000 A）。

(2) 能以简单的进给运动一次加工出形状复杂的型面或型腔（如锻模、叶片等）。

(3) 可加工高硬度、高强度和高韧性等难切削的金属材料（如淬火钢、高温合金、钛合金等）。

(4) 生产效率较高，为电火花加工的 5～10 倍以上，在某些情况下比切削加工的生产效率还高。

(5) 加工中无机械切削力或切削热，因此适于易变形或薄壁零件的加工。

(6) 加工精度不太高，平均精度为±0.1 mm。

(7) 附属设备较多、造价昂贵、占地面积大，电解液腐蚀机床，且容易污染环境。

电解加工主要用于加工型孔、型腔、复杂型面、深小孔、套料、膛线等方面。

16.1.3 激光加工

1. 激光加工的原理

激光是一种亮度高、方向性好、单色好的相干光。由于激光发散角小和单色性好，在理论上可聚焦到尺寸与光的波长相近的小斑点上。加上亮度高，其焦点处的功率密度可达 10^7～10^{11} W/cm^2，温度可高至 10^4 ℃左右。在此高温下，任何坚硬的材料都将瞬时急剧熔化和蒸发，并产生强烈的冲击波使熔化物质被爆炸式地喷射去除。激光加工是利用这种原理进行打孔、切割的。

图 16.3 是固体激光器加工原理示意图。当激光工作物质受到光泵（即激励脉冲氙灯）的激发后，吸收特定波长的光，在一定条件下可形成工作物质中亚稳态粒子数大于低能级粒子数的状态，这种现象称为粒子数反转。此时一旦有少量激发粒子产生受激辐射跃迁，就会产生光放大，并通过谐振腔中的全反射镜和部分反射镜的反馈作用产生振荡，由谐振腔一端输出激光。通过透镜将激光束聚焦到工件的加工表面上，即可对工件进行加工。常用的固体激光工作物质有红宝石、钕玻璃和掺钕钇铝石榴石等。

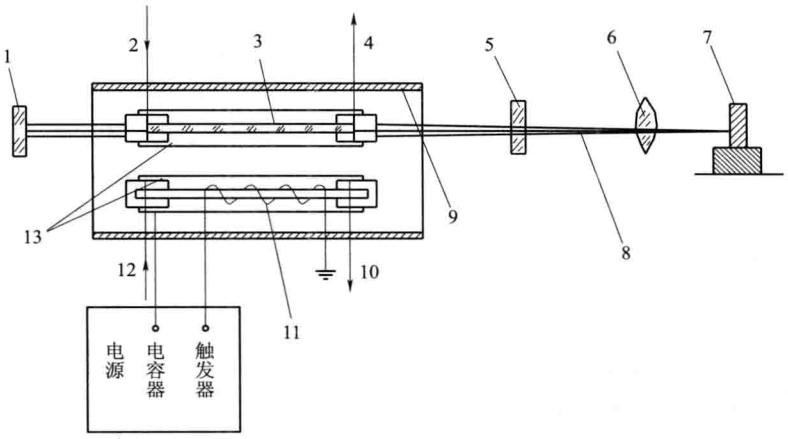


图 16.3　固体激光器加工原理示意图

1—全反射镜；2，4，10，12—冷却水；3—工作物质；5—部分反射镜；
6—透镜；7—工件；8—激光束；9—聚光器；11—光泵；13—玻璃管

2. 激光加工的特点和应用

(1) 几乎对所有的金属材料和非金属材料都可以用激光来打孔。特别是对坚硬材料可进行微小孔加工（如 ϕ0.01～ϕ1 mm），孔的深径比可达 50～100。也可加工异形孔。

采用激光可对许多材料进行高效的切割加工。切割速度一般超过机械切割。对金属材料的切割厚度可达 10 mm 以上，对非金属材料的切割厚度可达几十毫米。切缝宽度一般为 0.1～0.5 mm。

(2) 打孔速度极高，打一个孔只需 0.001 s，易于实现自动化生产和流水作业，同时热变形很小。

(3) 可通过空气、惰性气体或光学透明介质进行加工。

激光加工可用于金刚石拉丝模，钟表宝石轴承，陶瓷、玻璃等非金属材料，硬质合金、不锈钢等金属材料的小孔加工和多种金属材料的切割或成型切割加工。

16.1.4　激光焊接

激光焊接与激光打孔的原理略有不同，焊接时不需要那么高的能量密度使工件材料气化蚀除，而只要将工件的加工区烧熔使其黏合在一起。因此激光焊接所需要的能量密度较低，通常可用减少激光输出功率来实现。如果加工区域不需要限制在微米级的小范围内，也可通过调节焦点位置来减小工件被加工点的能量密度。

脉冲输出的红宝石激光器和钕玻璃激光器适合于点焊，而连续输出的二氧化碳激光器和 YAG 激光器适合于缝焊。此外，氩离子激光器用于集成电路的引线焊接效果也相当好。因为它的波长是 488 nm 的蓝色可见光，便于观察调节。

激光焊接有如下优点：

（1）激光照射时间短，焊接过程极为迅速。它不仅有利于提高生产率，而且被焊接材料不易氧化，热影响区极小，适合于对热敏感很强的晶体管元件焊接。

（2）激光焊接既没有焊渣，也不需去除工件上的氧化膜，甚至可以透过玻璃进行焊接，适用于微型精密仪表中的焊接。

（3）激光不仅能焊接同种材料，而且还可以焊接不同的材料，甚至还可以焊接金属与非金属材料。例如用陶瓷作基体的集成电路，由于陶瓷熔点很高，又不宜施加压力，采用其他焊接方法很困难，而用激光焊接是比较方便的。当然，不是所有的异种材料都能很好地进行激光焊接，而是有难有易。就金属材料而言，其焊接特性见图 16.4。

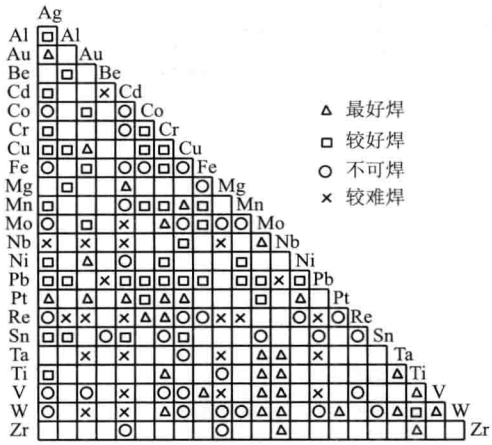


图 16.4 金属材料焊接性

激光这一新兴的加工技术，有效地利用自身的优点，改变着过去的生产方式，使生产效率大幅提高。

16.1.5 激光热处理

激光热处理的过程是将激光束扫射零件表面，其红外光能量被零件表面吸收而迅速形成极高的温度，使金属产生相变甚至熔融。随着激光束离开零件表面，零件表面的热量迅速向内部传递而形成极高的冷却速度。作为表面相变硬化，只需加热到金属的临界点以上，而激光合金化则要求表面有熔融状态层。所以激光热处理实际上只是一种表面处理技术，它与火焰淬火、感应淬火等成熟工艺相比具有以下优点。

（1）加热快。半秒钟内可以将工件表面从室温加热到临界点以上，因而热影响区小，工件变形小，热处理后不需要修磨，只需要精磨。

（2）由于激光束传递方便，便于控制，因此可以对形状复杂的零件或局部进行处理。如盲孔底部、深孔内壁、小槽等。

（3）加热点小，散热快，形成自淬火，不需要冷却介质。不仅节约能源，而且工作环境清洁。

但是激光热处理也有其缺点，例如硬化层较浅，一般小于 1 mm；它还只是一种表面处理方法；在目前的情况下，设备投资和维护费用较高。因此采用激光热处理必须选准待处理的零件。

根据激光的功率密度和作用时间的不同，目前已研究的激光热处理技术有：表面相变硬化、表面合金化、表面非晶态化、激光“上亮”和表面冲击硬化等。

16.1.6　超声波加工

1. 超声波加工的原理

超声波加工是利用超声频振动（16～30 kHz）的工具冲击磨料对工件进行加工的一种方法，其加工原理见图 16.5。加工时，工具以一定的静压力 P 压在工件上，加工区域送入磨粒悬浮液。超声波发生器产生超声频电振荡，通过超声换能器将其转变为超声频机械振动。借助于振幅扩大棒把振动位移放大，驱动工具振动。材料的碎除主要靠工具端部的振动，直接锤击处在被加工材料表面上的磨料，通过磨料的作用把加工区域的材料粉碎成很细的微粒，从材料上碎除下来。由于磨料悬浮液的循环流动，磨料不断更新，并带走被粉碎下来的材料微粒，工具逐渐伸入到材料中，工具形状便复现在工件上。

工具材料常用不淬火的 45 钢，磨料常用碳化硼或碳化硅、氧化铝、金刚砂粉等。

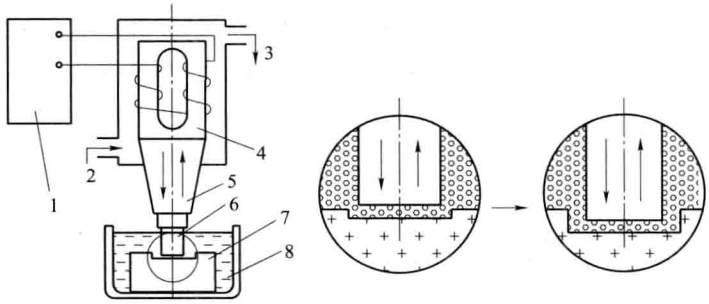


图 16.5　超声波加工示意图

1—超声波发生器；2，3—冷却水；4—振幅扩大棒；5—换能器；6—工具；7—工件；8—磨料悬浮液

2. 超声波加工的特点和应用

超声波加工适宜加工各种硬脆材料，尤其是电火花加工和电解加工无法加工的不导电材料和半导体材料，如玻璃、陶瓷、半导体、宝石、金刚石等；对硬质的金属材料，如淬硬钢、硬质合金等虽可进行加工，但效率低。

超声波能获得较好的加工质量，一般尺寸精度可达 0.01～0.05 mm，表面粗糙度 Ra 为 0.1～0.4 μm。它适宜加工各种型孔、型腔，也可以进行套料、切割和雕刻等。

在加工难切削材料时，常将超声频振动与其他加工方法配合进行复合加工，如超声车削、超声磨削、超声电解加工、超声线切割等，对提高生产率，减小表面粗糙度都有较好的效果。

16.1.7　其他特种加工

1. 电子束加工

电子束加工原理见图 16.6。电子枪射出高速运动的电子束，经电磁透镜聚焦后轰

击工件表面。在轰击处形成局部高温，使材料瞬时熔化、气化，喷射去除。电磁透镜实质上只是一个通直流电流的多匝线圈，其作用与光学玻璃透镜相似。当线圈通过电流后形成磁场，利用磁场力作用使电子束聚焦。偏转器也是一个多匝线圈，当通不同的交变电流时，产生不同的磁场，可迫使电子束按照加工的需要作相应的偏转。

利用电子束可加工特硬、难熔的金属与非金属材料，穿孔的孔径可小至几微米。由于加工是在真空中进行，所以可防止被加工零件受到污染和氧化。但由于需要高真空和高电压的条件，且需要防止 X 射线逸出，设备较复杂，因此多用于微细加工和焊接等方面。

2. 离子束加工

离子束加工被认为是最有前途的超精密加工和微细加工方法。这种加工方法是利用氩（Ar）离子或其他带有 10 keV 数量级动能的惰性气体离子，在电场中加速后，高速轰击工件表面而进行加工。图 16.7 为离子束加工示意图。惰性气体由入口注入电离室，灼热的灯丝发射电子，电子在阳极的吸引和电磁线圈的偏转作用下，高速向下螺旋运动。惰性气体在高速电子撞击下被电离为离子。阳极与阴极各有数百个直径为 0.3 mm 的小孔，上下位置对齐，形成数百条较准直的离子束，均匀分布在直径为 50 mm 的圆上。调整加速电压，可以得到不同速度的离子束，实施不同的加工。

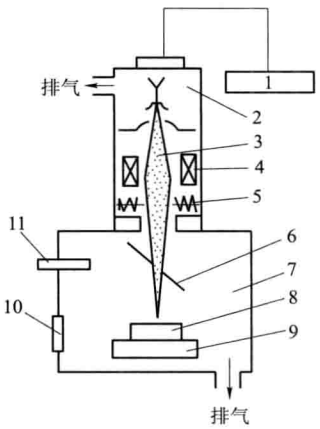


图 16.6 电子束加工原理示意图

1—加速高压源；2—电子枪；3—电子束；4—电磁透镜；5—偏转器；6—反射镜；7—加工室；8—工件；9—工作台及驱动系统；10—窗口；11—观察系统

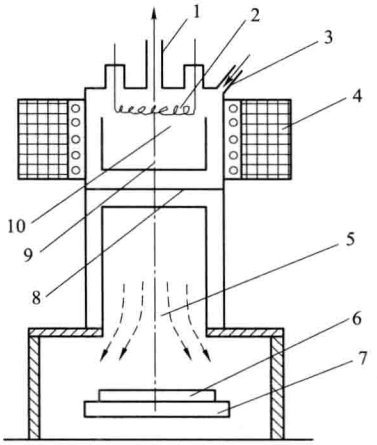


图 16.7 离子束加工示意图

1—真空抽气口；2—灯丝；3—惰性气体注入口；4—电磁线圈；5—离子束流；6—工件；7，8—阴极；9—阳极；10—电离室

根据用途不同，离子束加工可以分为离子束溅射去除加工、离子束溅射镀膜加工及离子束溅射注入加工。

离子束加工是一种很有价值的超精密加工方法，它不会像电子束加工那样产生热并引起加工表面的变形。可以达到 0.01 μm 的机械分辨率。目前，离子束加工尚处于不

断发展中，在高能离子发生器，离子束的均匀性、稳定性和微细度等方面都有待于进一步研究。

16.2　CAD/CAM 集成

16.2.1　什么是 CAD/CAM 集成

1. 典型的产品设计与制造过程

为了搞清 CAD/CAM 集成的内容，让我们先来看一个产品在常规设计与制造环境中，从设计开始一直到产品最后出厂的每个环节，图 16.8 表示了这个过程。

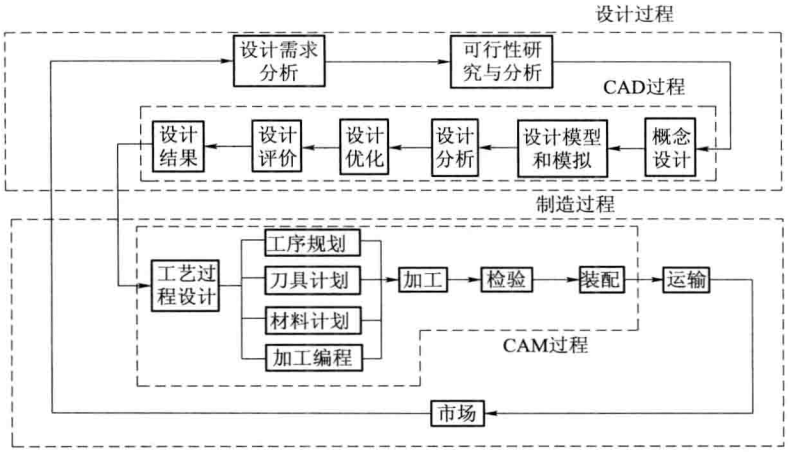


图 16.8　典型的产品设计与制造过程

从图 16.8 可知，整个过程可分为设计与制造两大部分。设计过程中，除了需求分析及可行性研究与分析这两个环节很难用计算机实现外，其余从概念设计到设计结果都可用计算机实现，从而构成了 CAD 过程。制造过程是指从工艺过程设计开始，经产品装配直到进入市场为止。在这个过程中，工艺过程设计是基础，因为它决定了工序规划、刀具计划、材料计划，以及采用数控机床时的加工编程等，然后进行加工、检验及装配。从工艺过程设计到装配的一系列环节同样也可以用计算机实现，由此构成了广义的 CAM 过程。在 CAM 过程中主要包括两类软件，一类叫计算机辅助工艺规程设计（Computer-Aided Process Planning，CAPP），另一类叫数控编程（NC Programming，NCP）。此外还有用于检验的软件，以及用于装配的机器人编程及仿真软件等。

上述两个过程的计算机化，促进了设计与制造自动化的程度。自动化程度的进一步提高，则有赖于这两个过程的进一步集成，并由此奠定了现代计算机集成制造系统

(Computer Integrated Manufacturing System，CIMS）的基础。

2. CAD/CAM 集成的概念

(1) CAD/CAM 集成的内容。通常所说的 CAD/CAM 集成，就信息而言，实际上是指设计与制造过程中三个主要环节的软件集成，即 CAD，CAPP 和 NCP。

(2) CAD/CAM 集成的概念。从信息角度看，所谓集成是指在 CAD，CAPP，NCP 各模块间信息的提取、交换、共享和处理的集成，即信息流的整体集成。实现这种集成需具备两个基本要素。

① CAD 系统能提供完备的、统一的、符合某种标准的产品信息模型，使 CAPP 及 NCP 环节能从该模型中获取所需信息，并最终将 CAD 设计模型转换成制造模型。

② CAD/CAM 各模块间应能通畅地进行数据的传递与交换，交换方式可以是专用的数据接口，或符合某种规范的格式文件或数据库。

16.2.2 CAD/CAPP 集成

1. CAPP 的功能与作用

在单件小批量生产中，常常需要制订零件的加工工艺规程，以便把设计成的零件图变成一系列制造操作指令，目的是将一个毛坯变成真正的零件。为此，工艺师首先要了解该零件的形状、尺寸、公差、表面粗糙度及材料等，然后决定工艺路线、工序，选择加工机床，确定毛坯、夹具、走刀路线、切削速度、进给量、所用刀具等。还要计算工时定额、加工费用，最后形成一系列工艺文件，如工艺卡、成本估算卡等。因此工艺规程设计可看作是联系设计与加工之间的桥梁。采用 CAPP 无疑可以缩短工艺规程设计的时间，从而缩短了生产准备时间，加快了零件的生产周期。

CAPP 系统一般具有以下功能：输入设计信息，选择工艺路线，决定工序、机床、刀具，决定切削用量，估算工时与成本，输出工艺文件等。由于零件及加工环境的千差万别，很难用一种固定的方法来对付各种加工情况，因此也很难用一种通用的 CAPP 软件来满足各不相同的制造对象，所以 CAPP 软件的实用化有一定难度。下面简要介绍 CAPP 中常用的两种方法，即派生法与生成法。

2. 派生式 CAPP

派生法（Variant Approach，亦称样件法）是建立在成组技术基础上，首先把尺寸、形状、工艺相近似的零件组成一个零件族，对每个零件族设计一个主样件，主样件的形状应能覆盖族中零件的所有特征，因而也最为复杂。然后对每个零件族的主样件制订一个最优的工艺规程，并以文件形式存放在计算机中。当要制订某一零件的工艺规程时，输入此零件编码及有关几何和工艺参数，经分类识别找到此零件所属的族，调出该族的主样件工艺文件，进行交互编辑修改，形成新的工艺规程，或输出工艺卡供制造部门使用，或将信息存储起来供 NCP 使用。图 16.9 表示了这种派生式系统的工作过程。

3. 生成式 CAPP

生成法（Generative Approach）是一种自动进行工艺设计的方法，一般不需要人

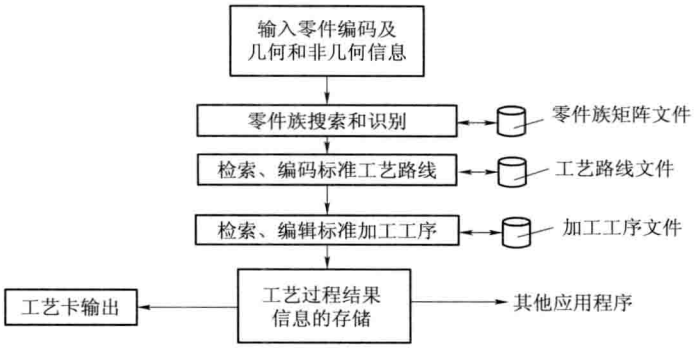


图 16.9　派生式 CAPP 系统

的干预，只要用户输入零件的几何信息及有关的工艺加工信息，计算机通过搜索及逻辑决策，就能自动制订出工艺规程。它不需要派生法中的主样件工艺文件，能对随机而来的零件制订出新的工艺规程。

生成式系统中决定加工工序时采用两种规划方法。一种是正向规划，即从毛坯开始，去除要加工的形体，达到最终的零件状态；另一种是反向规划，即从最终零件状态开始，达到毛坯状态，例如这时的钻孔应看成是填孔。这两种方法会对系统结构产生很大影响。正向规划中每一步所得的结果是下一步工作的条件，因此有时开始的条件选择不当，就会影响往后的工作。而反向规划因为是把零件最终状态作为初始条件，这个条件一般是准确的，不至于影响以后的工作。

生成式 CAPP 系统主要依靠逻辑决策进行工艺设计。常见的三种逻辑决策方式有决策树、决策表以及专家系统技术，此外还需要一个数据库，库中存放各种加工方法、加工能力、机床、刀具、切削用量等有关数据。当向系统输入零件信息后，首先分析组成零件的各种几何特征，然后从数据库中找出与这些特征相对应的加工方法、加工顺序及加工参数等，通过逻辑决策模仿工艺师的决策过程，自动生成这个零件的工艺路线及工序，并输出工艺文件。图 16.10 表示了生成式 CAPP 系统的工作原理。

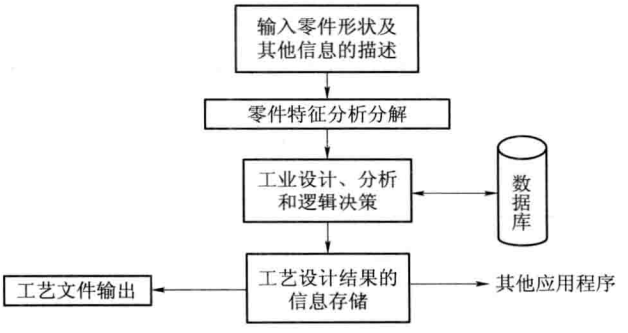


图 16.10　生成式 CAPP 系统

4. CAD/CAPP 集成的方法

CAD 与 CAPP 集成的关键问题，是现有 CAD 系统输出的零件信息从几何角度来看是一些点、线、面的信息，有的有拓扑关系，有的没有，显然这些几何信息必须重新组织成 CAPP 系统感兴趣的、具有加工意义的加工特征及加工表面。此外 CAPP 还需要材料、表面粗糙度、尺寸公差、几何公差等非几何信息，但目前大多数 CAD 系统不能给出这些信息，时常在 CAPP 系统中用交互方式补充输入。以上原因造成了 CAD/CAPP 集成较差的局面。

对 CAD/CAPP 集成，概括起来有以下一些解决办法。

(1) 开发新一代特征造型系统。由于这种系统建立了完整的产品信息模型，因此不仅能输出高层次的几何特征信息，而且能输出所有非几何方面的信息，从而在根本上解决了 CAD/CAPP 集成的问题。但目前这样的系统还不成熟，相信不远的将来，当新系统实际使用时，CAD/CAPP 定将实现高水平的集成。

(2) 以现有实体造型系统为基础，采用不同方式实现集成。

① 在几何模型上人工定义特征。采用交互方式，由操作者拾取相应图素形成特征，并生成对应的拓扑关系，同时加入相应的工艺信息。该法形成的特征完全取决于工艺师的经验，指导规则较少，所以不同工艺师可能得出不同的结果。因此对操作者要求较高，既要对工艺比较内行，还要能够熟练操作图形系统。由于这种方式易于实现，所以应用较广，但 CAD/CAPP 集成度较低。

② 由计算机自动识别特征。这种方式是将实体造型后所得的零件几何模型与已定义好的规则及特征结构进行比较，抽取几何及拓扑信息，决定特征类别及特征间的关系，与此同时，加入非几何信息。目前这种方式还只能对简单零件进行特征识别，对复杂零件还需继续进行研究。

③ 在原有实体造型系统支持下的特征建模。图 16.11 是这种方式中的一种办法。用户利用原系统的功能，建立自己的特征库并形成特征工艺信息。造型结束后，将零件几何与拓扑信息与特征工艺信息进行信息匹配，形成 CAPP 所需的零件信息模型。这种方式本质上属于二次开发，节省了软件投资与开发周期，但也受原系统的限制，如特征库的建立、工艺信息的输入、几何与拓扑信息的获取等均受制于原系统是否开放。目前这种方式有许多不同的实现办法，对 CAD/CAPP 集成起了推动作用。

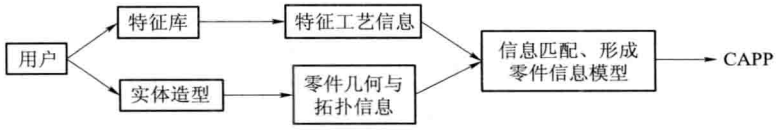


图 16.11 原有系统支持下的特征建模

16.2.3　CAD/NCP 集成

1. 数控编程

在数控机床上加工零件时，需要将零件的图形尺寸、加工路线与工艺参数等内容转化成加工代码，再根据代码格式制成代码载体，如穿孔带、磁带等，输入机床控制器中，从而自动控制机床的加工。这种从零件图到制成代码载体的过程称为数控编程。数控编程分为手工编程与自动编程两种。

(1) 手工编程。所谓手工编程就是由人根据零件图样，先进行工艺分析，在分析的基础上确定加工路线、切削用量等工艺参数；然后根据零件图样和加工路线进行数值计算；在分析和计算的基础上编写程序。

(2) 自动编程。采用手工编程，即使是一个简单零件，也必须进行一系列数值计算，还要查阅许多表格或资料以确定工艺参数，工作枯燥重复，容易出错。所谓自动编程就是用计算机来完成上面的工作。由于数控编程在历史上与 CAD 技术是两个独立发展的技术，因此在很长一段时期内采用了一种类似于高级语言那样的数控编程语言，来实现自动编程。后来才有采用计算机辅助图形设计的自动编程方法。再往后才提出从 CAD 系统取出所设计的零件直接进行自动编程的方法，即 CAD/NCP 集成的编程方式。目前这三种自动编程方式都在使用。

① 采用数控编程语言的自动编程。最著名的是 APT 语言（Automatically Programmed Tools），它用类似于英语的语句来编写程序。APT 有四类语句：第一类用来定义零件形状；第二类用来控制刀具运动；第三类用来控制机床功能，并将信息传给后处理程序，转换成加工代码；第四类是一些专门的控制指令，例如循环、转移及报表输出等。APT 程序的翻译过程，如图 16.12 所示。图中的处理器将 APT 程序经编译变成计算机可执行的指令，再经计算单元的数值运算，生成刀位数据（CL DATA）文件，该文件是对刀具加工轨迹的描述。但它是一个中性文件，与机床上具体的控制器类型无关，所以需进一步经后处理器处理成特定机床控制器可以接受的代码，以操纵机床进行真正的加工。

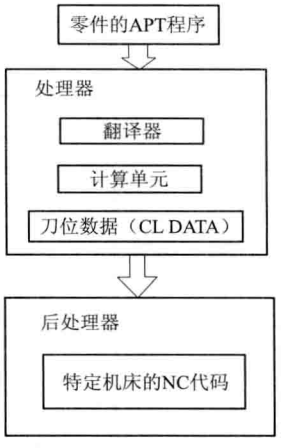


图 16.12　APT 程序的翻译

② 计算机辅助图形设计的自动编程。这种方式不需要 APT 那样的语言来编程，而是采用 CAD 方法，将设计好的零件图形显示在屏幕上，由编程人员指定要加工的表面，并回答软件提出的一些问题。诸如对刀点、走刀方式、切削用量参数等，然后由系统进行自动编程，形成刀位数据文件或 APT 程序。再经后处理，变成机床所需的 NC 代码。一般过程如下所述。

• 几何形状定义。采用交互图形技术在屏幕上设计零件，将所得的零件几何形状显示在屏幕上，由编程人员用标记的方法指定要加工的几何要素或表面。

• 刀具加工轨迹的形成。先定义刀具的初始位置（对刀点），然后选择某种走刀路线，系统就能自动确定刀具的加工轨迹，并在屏幕上动态显示。若有错误，可随时修改，最后得到刀位数据文件或 APT 程序。

• 生成 NC 代码。上述刀位文件或 APT 程序经后处理器生成数控机床控制器所需的代码。

现在有不少 CAD/CAM 系统，其中的 CAD 与 NCP 模块可独立运行。NCP 模块与 CAD 模块处在分离状态，不可能接受来自 CAD 的任何信息。因此往往自己具备一套图形设计与编辑的功能，靠自身的这种功能来定义零件的几何形状。但往往没有自动进行工艺分析的能力，需借助于人机交互输入工艺信息。

③ 从 CAD 获取信息的自动编程。NCP 所需的零件形状信息直接从 CAD 那里得到，这无疑朝着集成方向前进了一大步。但这样的集成系统在大部分情况下依然缺乏工艺分析能力，不得不靠编程人员输入所需的工艺信息。因此这种缺乏 CAPP 功能的自动编程仍然不能做到真正的自动，只有 CAD/CAPP/NCP 集成在一起才能实现真正的自动编程。

2. CAD/NCP 集成的状况

图 16.13 表示了三种不同集成度的 CAD/NCP 系统，集成度自右至左不断提高。最右边的系统集成度最低，CAD 信息通过接口模型 1 送入 NCP-1，自动生成不同的 NC 子程序，接着 NC 前置处理程序对上述子程序进行编辑，产生一个完整的 NC 程序，再经后置处理成为机床的控制信息。这类系统结构简单，技术上容易实现，目前在国内已得到较多的应用。

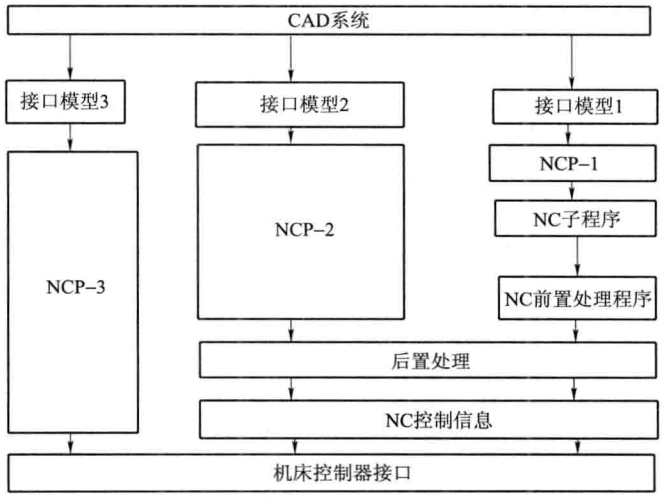


图 16.13 不同集成度的 CAD/NCP 系统

图 16.13 中最左边的系统集成度最高，CAD 信息通过接口模型 3 送入 NCP-3，直接生成 NC 控制信息，且符合 ISO/DIN 6983—1982。该系统有以下主要功能。

① 选择 CAD 几何元素，确定加工表面；

② 处理技术要求；

③ 确定加工顺序；

④ 确定加工参数；

⑤ 生成 NC 代码；

⑥ 显示加工轨迹。

这个系统具备了 CAPP 的功能，是一个事实上的 CAD/CAPP/NCP 集成系统。

图 16.13 中的中间系统集成度居中，经 NCP-2 编制成的刀位数据文件，经后置处理得到 NC 控制信息。

16.2.4　CAPP/NCP 集成

目前 CAPP/NCP 的集成还处于研究之中。CAPP/NCP 之间的集成有两种方式，一种是在 NCP 软件中包含了 CAPP 的功能；另一种是在 CAPP 与 NCP 间设置接口，尤其当 NCP 是一个外购的商用软件，而 CAPP 是一个自行开发的软件时，采用接口方式是目前最为普遍的做法，当然成功与否将取决于外购的 NCP 系统的开放程度。下面举例说明怎样将一个自主开发的 CAPP 系统与一个外购的 NCP 系统集成起来，如图 16.14 所示。

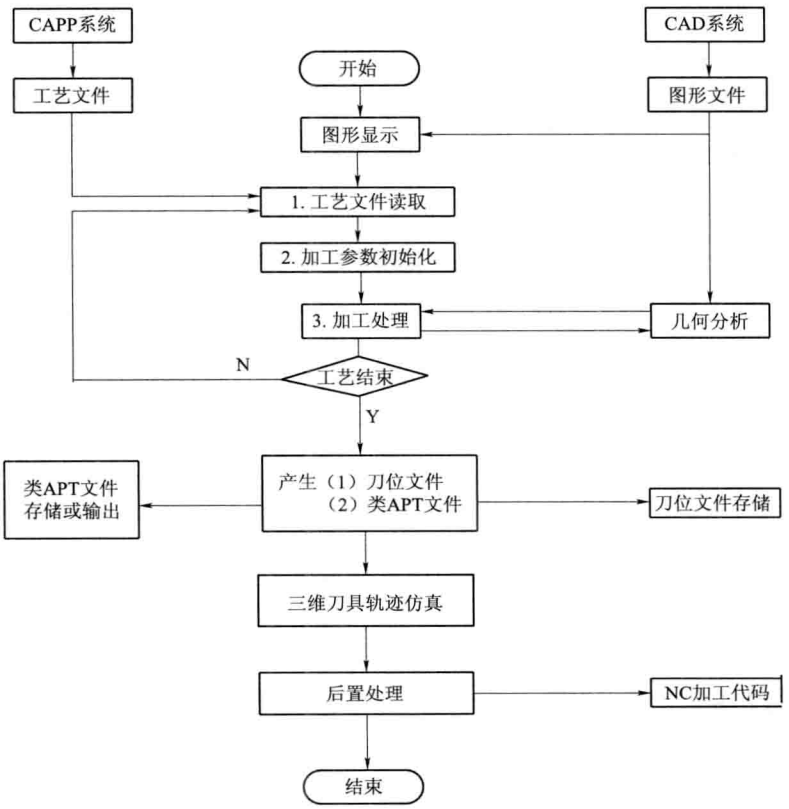


图 16.14　CAPP/NCP 集成的一个例子

在图 16.14 中，中间是美国 CIMLINK 公司的自动编程软件 CIMCAM，它与 CAD 模块在零件几何信息方面有较好的集成，但运行所需的全部工艺信息及参数都依赖于用户的输入。尽管有很好的交互界面，用户不需编程，只要跟着界面提示一步一步往下操作，但因输入参数太多，交互次数太多，降低了自动编程的效率。为此利用这个系统的开放性，植入三个二次开发模块（图中标有 1、2、3），使经过二次开发后的 CIMCAM 与 CAPP 系统连接，将原来的交互输入操作基本上改为自动进行，使编程效率大为提高。

工艺文件读取模块、读入 CAPP 产生的工艺文件，包括加工工序及工艺参数等。然后对工艺文件进行分析。根据不同加工内容，进入不同分支去处理，如铣削、钻削等。

加工参数初始化模块对上述分支设定初始化参数，包括转速、进给量、对刀点等。这些初始参数原本已存在于工艺文件中，通过提取即可获得。

加工处理模块是自动编程的核心，刀具加工轨迹就在这里形成，根据不同分支的加工性质有不同的处理方法。该模块是 CIMCAM 本身具有的。几何分析模块分析零件图形，得到一些特殊参数，送给加工处理模块，以便确定加工范围。同时还可计算一些辅助参数，用以完成刀具的自动移位、自动寻位等。

其他模块都是原来就有的，分别用来产生刀位文件及类似于 APT 语言的历史文件，进行刀具加工轨迹的三维仿真，进行后置处理，最终产生 NC 加工代码。

16.2.5 CAD/CAPP/NCP 集成的关键技术

由 16.2.2 节及 16.2.4 节的叙述可以看出，当前集成中的薄弱环节：一是 CAD/CAPP 还没有实现高水平的集成；二是 CAPP/NCP 还缺乏集成。换句话说，处在承上启下、中间位置上的 CAPP 还没能与它的头、尾在信息流上有机地连接起来，图 16.15 表示了 CAPP 应该具有的信息连接方式。

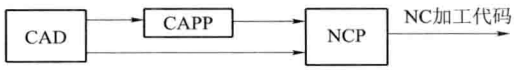


图 16.15 CAD/CAPP/NCP 集成系统的信息流

目前，计算机集成制造系统（CIMS）正越来越受到人们的重视。因此必须在这一背景下来考虑集成的需求，也就是说必须考虑 CIMS 环境下的 CAD/CAM 集成。

1. 新一代基于特征的建模技术

采用参数化特征造型作为新一代建立产品信息模型的工具，最重要的一点是，因为这种系统是以 STEP 标准所定义的产品信息模型为蓝本，建立了包括形状特征在内的不仅能满足 CAPP 及 NCP 的需要，而且还能满足产品整个生命周期内各环节需要的完整的信息模型。这样不仅使 CAD/CAPP/NCP 集成有了保障，而且还可与生产管理等系

统实现更大范围内的集成。

还要指出的是，新的造型系统使形状特征成为拼合的对象，因此在产品信息模型中，除了点、线、面信息外，同时还保留了高层的特征信息，这样使 CAPP 及 NCP 中对加工要素及表面的识别大大简化了。

图 16.16 给出了一个零件的信息模型构成情况。

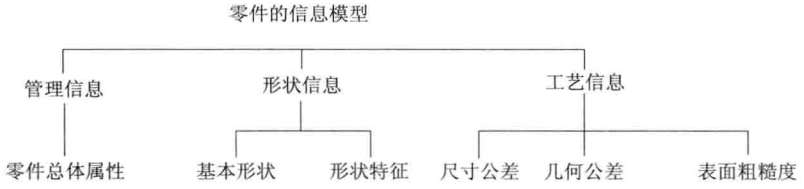


图 16.16　零件的信息模型

2. 数据交换技术

由于历史上各种 CAD、NCP 软件在最初开发过程中的孤岛现象，导致了它们在计算机内数据表示格式不统一，使不同系统间、不同模块间的数据交换难于进行，影响了软件的集成及其在使用中效益的发挥，不利于提高 CAD/CAM 系统的生产率，因此提出了建立某种共同遵守的数据交换规范的问题。STEP 就是这样的规范。

国际标准化组织 ISO 于 1988 年公布了产品模型数据交换标准 STEP1.0（草案）(STandard for the Exchange Product model data)。它的主要目的是要解决统一的产品模型定义问题，及解决数据交换的问题。

STEP 有三个主要的特点：第一是它支持广泛的应用领域，但对某个具体领域，如机械、电子等的规定须制订该领域的应用协议，即制订各自统一的规范逻辑子集；第二它能完整表示产品数据，提供多种数据交换方式，如 STEP 文件（ASCII 码）、内存工作格式文件、数据库交换方式等；第三是它的中性机制，它独立于任何具体的系统，因此采用 STEP 有可能实现如图 16.17 所示的理想的数据交换方式。

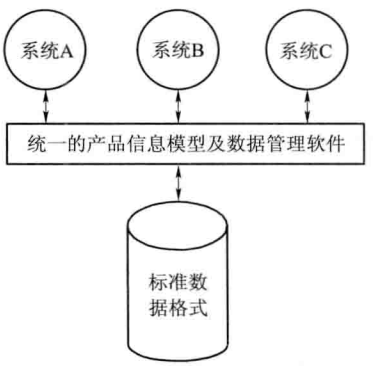


图 16.17　理想的数据交换方式

STEP 标准分四级实施，即文件交换、工作格式交换、数据库交换及知识库交换，以便提供多种数据交换的手段。

目前我国对 STEP 标准的研究与实施，作为一项高科技跟踪课题已经取得了重大进展。许多部门与单位都已采用了 STEP 的数据交换方式，STEP 正在成为数据交换的主流标准。

3. 工程数据管理技术

(1) 数据集成的管理环境。实现集成的重要条件之一就是，必须形成一个数据集中管理的环境。为此要求各子系统将它们的数据分为专用和共享（公用）两部分，形成如图 16.18 那样的结构。由于各子系统共享公用数据，消除了分属各子系统时的数据冗余，从而确保了这部分数据的一致性、安全性与保密性。

在 CAD/CAM 子系统单个工作站节点上的数据管理系统的结构，见图 16.19。该管理环境的上层是统一的用户界面，在该节点上运行 CAD/CAM 的某个功能模块。与运行有关的各文件或数据，或者由文件管理系统处理，或者由局部 DBMS 及分布式 DBMS 处理。用户可以通过网络在分布式 DBMS 下对其他节点进行数据的访问、存储与管理。

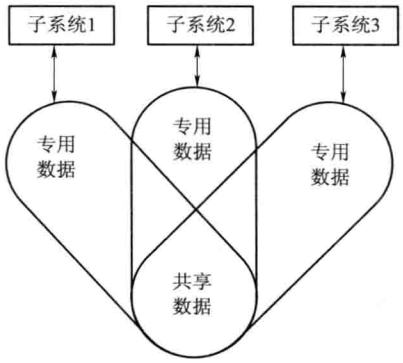


图 16.18 数据管理的一种结构

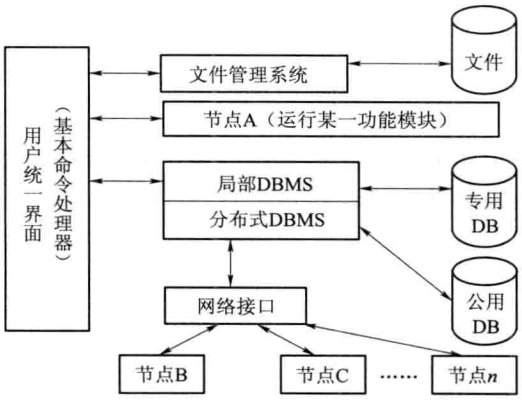


图 16.19 单个结点上数据管理系统的结构

(2) CAD/CAM 中的数据。这些数据分两大类。第一类称共享数据。它们是在方案设计、工程分析、工艺设计，直到 NC 代码生成的过程中生成，属动态数据。例如设计原始条件、方案设计各参数、产品设计的详细结果及图形信息、CAPP 获得的各种结果等。第二类称专用数据，仅供某一功能模块使用。例如各种标准类数据，材料数据，切削用量，刀、夹、量具等数据，属静态数据。以上两类数据分别构成了 CAD/CAM 子系统的动态库（共享库）及静态库。

(3) CAD/CAM 系统数据管理环境的开发。为了迅速形成良好的数据管理环境，一般尽量利用已有的成熟技术，例如购进一个分布式数据库管理系统（如 ORACLE），并在现有的操作系统基础上进行以下开发。

① 进行 CAD/CAM 静态、动态数据库的逻辑设计。为此，应遵照软件工程规范中数据分析规范的方法，分析 CAD、CAPP、NCP 各阶段的数据，确定基本数据资料，进而确定各有关实体类数据及其属性，以及它们间的联系，由此整理出各种二维线性表及其关系作为建库内容。

② 进行用户界面开发。例如，利用现有数据库管理系统的资源，开发一个共享数

据库的交互式操作界面。在区别用户优先级的基础上，为不同级别的用户提供简单易学的查询、修改和删除等操作，也可为超级用户提供方便的数据库界面。再如，可以为静态数据库（如标准件数据库）开发交互式及在高级语言中进行子程序调用这样两种用户界面，以便用户方便地实现各种数据的操作。

③ 进行工程文档管理软件的开发。利用操作系统及 DBMS 所提供的资源，实现用户的分级管理，即区分超级、高级或普通用户。还要实现对文档的审批管理，文件只有经认可的人员审批后方能允许入库。此外还要为用户提供一套简单易学的文档操作手段，例如许可权的授予、查询、删除、邮件通信等。

④ 研究与开发按并行工程（Concurrent Engineering）要求的，可供一组人员进行产品设计、工艺设计、加工编程、工程分析等作业的数据管理控制机制。

16.2.6　CAD/CAM 集成的体系结构

CAD/CAM 系统大致可分为三种类型。

（1）传统型。如现在市场上出售的 I-DEAS、CADAM、CATIA、UG、CADDS 等。它们大都是 20 世纪 70 年代中后期，在系统结构上以某种应用为背景发展起来的。例如，开始时主要为解决工程绘图，或是曲面设计，或是有限元分析等，后来逐渐扩大到其他方面，再加以集成。由于当时硬软件环境、设计思想、设计方法以及对 CIMS 认识的局限性，已难以适应当今产品设计自动化的要求，但这些系统仍在大量应用，而且它们的实际应用功能相当强大。

（2）改进型。如 CIMPLEX、Pro/Engineer 等。这类系统提高了某些功能的自动化程度，如参数化特征造型、系统数据与文件管理、NC 自动编程等。但仍缺乏数据交换、共享的特点，难以做到 CIMS 下的信息集成。

（3）数据驱动型。这是正在发展的新一代 CAD/CAM 系统，或者说产品设计自动化系统。其基本出发点着眼于解决产品生命周期内统一的数据模型，从而解决产品数据的交换与共享。这类系统采用 STEP 标准的产品模型，具有统一的信息结构及系统功能，是 STEP 技术与并行工程的结合。由于按统一的数据模型来完成各种功能应用，有人称它为数据驱动工程（Data-driven Engineering）。

作为对新一代 CAD/CAM 系统的设想，图 16.20 描述了这类系统的一种体系结构，当然还可有其他的方案。

整个系统分三个层次来实现。最下面一层为产品数据管理层，它以 STEP 的产品模型定义为基础，提供三种数据交换方式，即数据库、工作格式、（STEP）文件交换。这三种方式的数据存取分别用数据库管理系统、工作格式管理模块及系统转换器来实现。系统运行时，通过数据管理界面按某一选定的数据交换方式进行产品数据的交换。

系统的中间一层为基本功能层。这些功能在应用上具有广泛性，即每一功能都可能被许多不同的应用系统所使用。在这里列举了四个方面的功能模块，它们是几何造型、

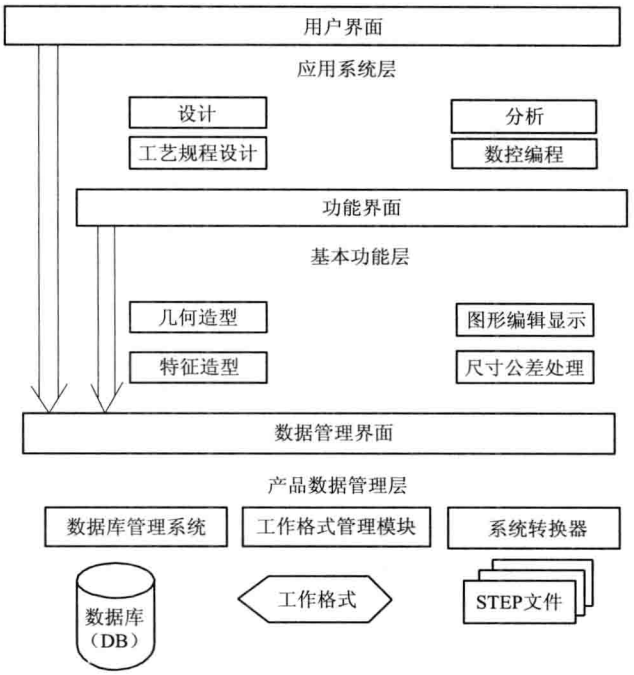


图 16.20 CAD/CAM 集成系统结构

特征造型、图形编辑显示、尺寸公差处理。实际上这一层为 CAD/CAM 应用系统提供了一个开发环境，应用系统可以通过功能界面来调用这些功能。

系统最上面一层为应用系统层，包括设计、分析、工艺规程设计和数控编程等。它们可以完成从设计、分析到加工的任务。这些功能通过用户界面提供给用户。

由于底层采用了统一的数据管理办法，当产品模型改变时，数据的管理方式不变，所以对系统程序影响不大。由于系统采用分层结构，并且每一层都有一个标准界面，这样某一层次进行功能扩充时，对其他层的影响很小。另外由于各层隔离，使得某层次的系统开发人员不必了解其他层的内部细节，只要了解层次界面提供的功能使用即可。

16.3 成组技术

16.3.1 成组技术的基本概念

在多品种、中小批量生产中，除了在生产中贯彻产品的统一化、标准化来扩大产量外，成组技术的发展为多品种、中小批量生产创造了大批量生产的条件。

大量的统计分析表明，任何一种机器产品中的组成零件都可分为三类，即：专用件、相似件和标准件。图 16.21 是各类零件在产品中所占的百分比。由图中可以看出，

相似件的出现率高达 65%～70%，而且即使是专用件，在同类系列化产品中，其在工艺上也有许多相似性。因此，只要充分利用这一特点，就可将那些看似孤立的零件按相似原理划分为具有共性的一体，在加工中以群体为基础集中对待，从而使多品种、中小批量的生产转化为近似大批量的生产。

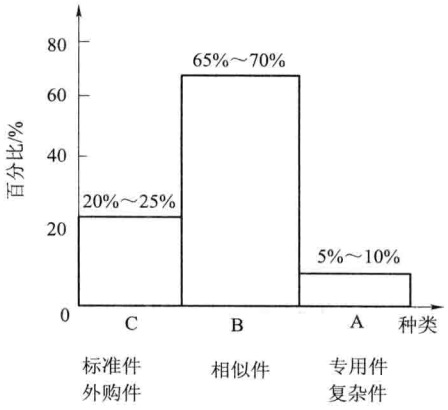


图 16.21　组成机械产品的三类零件

所谓成组技术，就是用科学的方法，在多品种生产中将相似零件组织在一起（成组）进行生产。以相似产品零件的“叠加批量”取代原来的单一品种批量，采用近似大批量生产中的高效工艺、设备及生产组织形式来进行生产，从而提高其生产率和经济效益。

16.3.2　零件的分类和编码

1. 零件分类和编码的基本原理

把与生产活动有关的事物（如零件、材料、工艺、产品等），按照一定的规则进行分类成组，是实施成组技术的核心和基础，而分类的理论基础则是相似性原理。相似性可以从两个方面理解，即作用相似和结构特征相似。由于作用相似所含的信息量较少，且不够明确具体，而结构特征相似则比较直观、明确，并可根据零件图的信息直接确定，所含的信息量也较大，所以在成组技术中通常是以后者作为零件分类成组的依据。结构特征相似又可以分为结构相似、材料相似和工艺相似，如图 16.22 所示。

由于机械零件的传统表达方法是零件图纸，这对零件进行分类、实施成组技术带来了诸多不便。因此要实施成组技术就必须首先建立相应的零件分类编码系统，即用字符（数字、字母、符号）来标识和描述零件的结构特征，使这些信息代码化，据此对零件进行分类成组，然后按照成组的方式组织生产。

代表零件特征的每个字符称为特征码，所有特征码的有规律组合，就是零件的编码。由于每一个字符代表的是零件的一个特征，而不是一个具体的参数。因此，每种零件的编码不一定是唯一的，即相似的零件可以拥有相同或相近的编码。利用零件的编码就可以较方便地划分出结构特征相似的零件组来。

为了对编码的含义有统一的认识，就必须对其所代表的意义做出规定和说明，这就是编码规则，或称为编码系统。据统计，目前世界上已有 77 种编码系统，其中应用较广的是德国研制的 Opitz 编码系统。这套系统对世界各国的分类编码系统产生了极大的影响。

2. Opitz 编码系统简介

Opitz 分类编码系统由 9 位十进制数字代码组成，前五位为主码，用于描述零件的

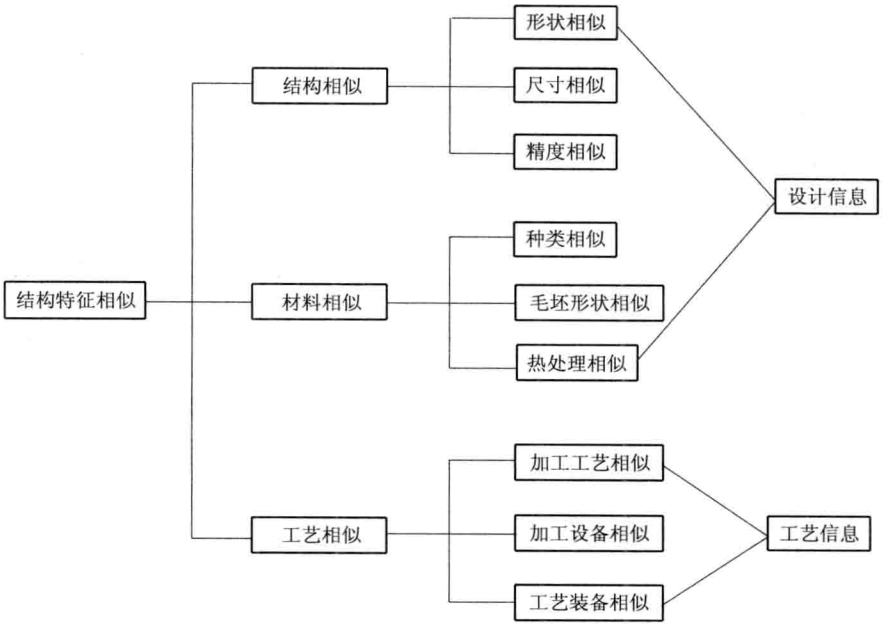


图 16.22 结构特征相似框图

结构形状，又称为形状码；后四位为辅码，用于描述零件的尺寸、材料、毛坯形状及加工精度。每一码位有十个特征码（0～9），分别表示十种零件特征。图 16.23 为 Opitz 编码系统的基本结构示意图。

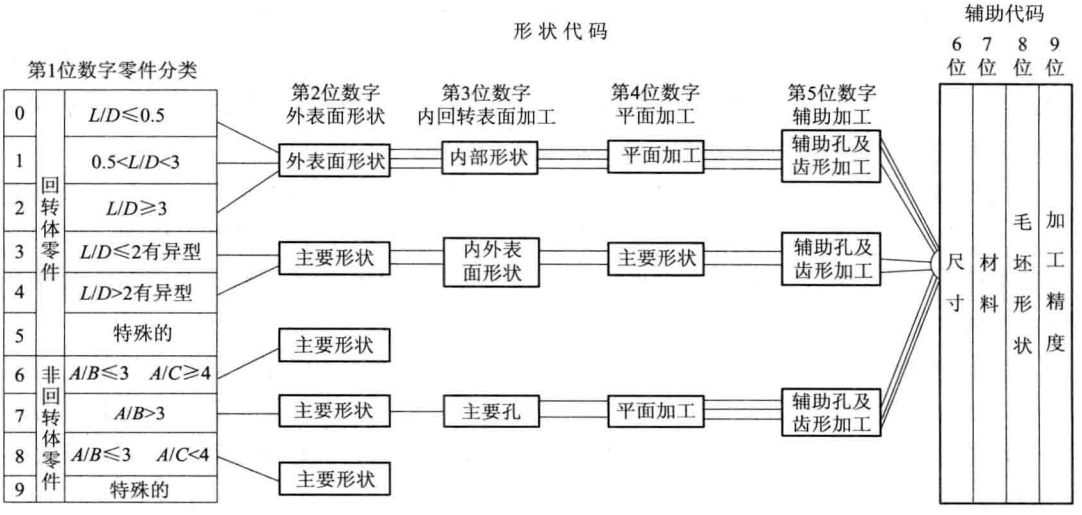


图 16.23 Opitz 编码系统基本结构图

各码位所描述的特征内容如下。

第 1 位码表示零件的类型。10 个特征码（0～9）分别代表十种基本零件类型，特征码 0～5 代表 6 种回转体零件，如套筒、齿轮、轴等；特征码 6～9 代表四种非回转体零件，如盖板、箱体等。其中 D 为回转件的最大直径，L 为其轴向长度，A、B、C 分别为非回转体的长度、宽度和厚度，因此，$A>B>C$。

第 2 位表示零件外表面的主要形状及其要素。

第 3 位表示一般回转体的内表面形状及其要素、其他几类零件的回转加工、内外形状要素、主要孔等特征。

第 4 位和第 5 位分别表示平面加工和辅助孔、齿形及成型面加工。

第 6 位表示零件的尺寸。

第 7 位表示零件材料的种类、强度及热处理等状况。

第 8 位表示零件加工前的原始状况。

第 9 位表示零件上有高精度要求的表面所在的码位。

关于 Opitz 系统代码的详细内容，可查阅有关专业资料。

16.3.3　成组生产的组织形式

根据目前成组加工的实际应用情况，其生产组织形式主要有成组加工单机、成组加工单元和成组加工流水线。这三种形式是介于机群式和流水线之间的设备布置形式。机群式适用于传统的单件小批量生产，流水线则适用于传统的大批量生产。

1. 成组加工单机

成组加工单机是成组技术的最初形式，是在机群式布置基础上发展起来的。它由一个工作位置构成，在一个工作地点或一台机床上完成一个相似零件组的加工，如在六角车床上加工回转体零件等。一个零件若要经过数道工序，则可按加工工序的相似性，将零件加工中相似的工序集中到一台机床上进行，其余工序则分散到其他单机上完成。

用这种方式来进行零件加工，零件组中的每个零件（或某一工序）必须具有以下两个特点：第一，零件必须具有相同的装夹方式；第二，零件在空间位置和尺寸方面必须具有相同或相似的加工表面，但并不要求零件的形状相同，而是只考虑加工表面位置和尺寸的相似性。

2. 成组加工单元

成组加工单元是成组技术在加工中应用的最典型形式，是指一组或几组在工艺上相似的零件的全部工艺过程由相应的一组机床来完成，该组机床集中布置，形成一个在管理上自成一体的加工单元。如图 16.24 所示就是一个成组加工单元的平面布置图，这一单元由四台机床组成，可完成三种零件的全部工序加工。

成组加工单元不是一个工作位置，也不是由一种类型的机床来完成一组零件的加

工，而是几种类型的机床组成的一个独立的加工单元。它与流水线有相似之处，但不要求工序间保持一定的节拍，因此零件不必按批转移，具有相当的灵活性，已成为中小批量生产中实现自动化的有效手段。

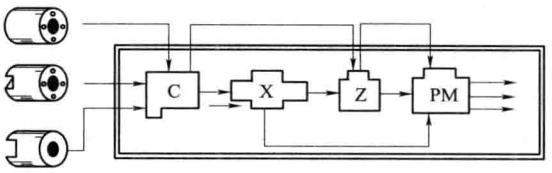


图 16.24 成组加工单元的平面布置图

3. 成组加工流水线

成组加工流水线是在成组加工单元的基础上，将各工作地（设备）按照零件组的加工顺序固定布置。与传统的生产流水线相比，在成组加工流水线上流动的不是一种零件，而是一组相似零件。这组零件应有相同的加工顺序，以保证流水线作业的工作节拍，但允许某种零件越过某些加工工序。因此，成组加工流水线的适应性较强，能加工多种零件。目前的曲轴加工流水线就是一种典型的成组加工流水线。

计算机技术和数控技术的飞速发展，为多品种、中小批量生产的自动化提供了强有力的工具。而成组技术则是多品种、中小批量生产自动化的基础。在成组加工单元的基础上，采用数控设备，通过计算机管理，用计算机编制工艺、安排生产计划就可以形成一个柔性的单元制造系统。若在此基础上，再用计算机控制加工过程和物流，就可以成为自动化的柔性制造单元（FMC）和柔性制造系统（FMS）。

16.4 柔性制造系统（FMS）

16.4.1 柔性制造系统的基本概念

柔性制造系统（Flexible Manufacturing System，FMS）是 20 世纪 60 年代末诞生的新技术。促成 FMS 技术产生和发展的原因是：适应现代产品频繁更新换代的要求，满足人们对产品的不同需求，降低成本，缩短制造周期。传统的多品种、中小批量生产方式，如采用普通机床、数控机床等进行加工，虽然具有较好的生产柔性（适应性），但生产率低，成本高；而传统的少品种大批量生产方式，如采用专用设备的流水线进行加工，虽然能提高生产率和降低生产成本，但却缺乏柔性。FMS 正是综合了上述两种生产方式的优点，兼顾了生产率和柔性，是适用于多品种、中小批量生产的自动化制造系统。

FMS 是近年兴起的新的制造技术，至今并无确切的定义。通常所说的 FMS 是指以数控机床、加工中心及辅助设备为基础，将柔性的自动化运输、存储系统有机地结合起来，由计算机对系统的软、硬件资源实施集中管理和控制，而形成的一个物流和信息流密切结合的、没有固定的加工顺序和工作节拍的、主要适用于多品种、中小批量生产的高效自动化制造系统。

16.4.2　FMS 应具备的功能

生产率和柔性是相互制约的，一般来说，要提高生产率就要降低柔性，反之亦然。而 FMS 则是从系统的整体角度出发，将系统中的物流和信息流有机地结合起来，同时均衡系统的自动化程度和柔性，这就要求 FMS 应具备如下功能。

(1) 自动加工功能。在成组技术的基础上，FMS 应能根据不同的生产需要，在不停机的情况下，自动地变更各加工设备上的工作程序，自动更换刀具，自动装卸工件，自动地调整冷却切削液的供给状态及自动处理切屑等，这是制造系统实现自动化的基础。

(2) 自动搬运和储料功能。为实现柔性加工，FMS 应能按照不同的加工顺序，以不同的运输路线，按不同的生产节拍对不同的产品零件进行同时加工。同时，为提高物料运送的准确性和及时性，系统中还应具有自动化储料仓库、中间仓库、零件仓库、夹具仓库、刀具库等。自动搬运和储料功能是系统提高设备利用率，实现柔性加工的重要条件。

(3) 自动监控和诊断功能。FMS 应能通过各种传感测量的反馈控制技术，及时地监控和诊断加工过程，并作出相应的处理。这是保证系统正常工作的基础。

(4) 信息处理功能。这是将以上三者综合起来的综合软件功能。应包括生产计划和管理程序的制订，自动加工和送料、储料及故障处理程序的制订，生产信息的论证及系统数据库的建立等。

16.4.3　FMS 的基本组成

FMS 主要由加工系统（数控加工设备，一般是加工中心）、物流系统（工件和刀具运输及存储）以及信息流系统（计算机控制系统）组成。如图 16.25 所示。

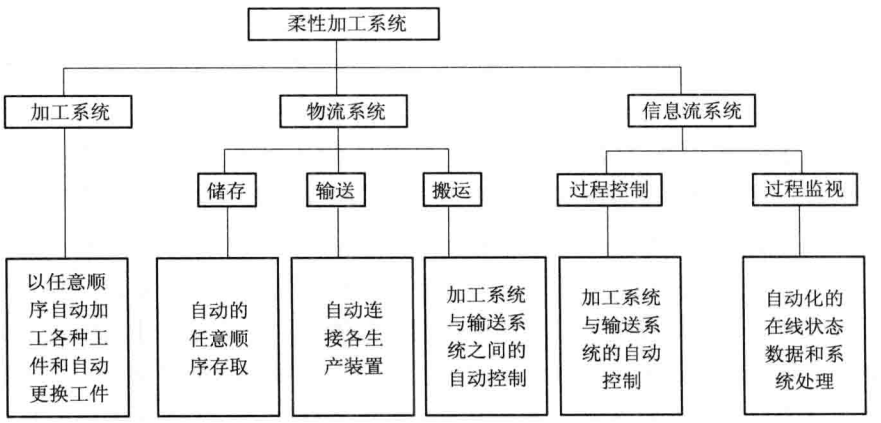


图 16.25　柔性制造系统的组成

1. 加工系统

加工系统通常由数控机床加工中心或车削中心组成。待加工的工件类别将决定FMS所采用的设备形式。

加工中心（Machining Center，MC），是由机械设备和数控系统组成的适用于复杂零件加工的高效自动化机床，也是一种本身带有刀库和自动换刀装置（ATC）的多工序数控机床。能在一次装夹中完成铣、镗、钻、扩、铰、攻螺纹等多种工序的加工，并且有多种换刀或选刀功能。从而使生产效率和自动化程度大大提高。可用于加工各种箱体类、板类复杂零件。各种高精度加工中心可代替精密坐标镗床，也可用它作为基础组成柔性制造单元和柔性制造系统。

车削中心（Turn Center，TC），由数控车床、配刀库和换刀机械手（自动换刀装置）构成。因此数控车床所具有的功能，车削中心都具备，还具有广泛的加工工艺性能，可加工圆柱、圆锥和各种螺纹，具有直线插补、圆弧插补及各种补偿功能。

2. 物流系统

它由储存、输送、装卸三个子系统组成，用以实现工件及工夹具的自动供给和装卸，以及完成工序间的自动传送、调运和存储工作。该系统包括各种传送带、自动导引小车、工业机器人及专用起吊运送机等。FMS物料系统主要完成两种不同的工作：

① 工件的输送。工件输送包括两部分：一是零件毛坯、原材料、工具和配套件等由外界搬运进系统，以及将加工好的成品和换下的工具从系统中撤走；二是零件、工具和配套件等在系统内部的搬运。在一般情况下，前者需要人工干预（工件送入系统和在夹具上装夹工件都是人工操作），而后者可以在计算机的统一管理和控制下自动完成。工件输送系统所用的运输工具为运输小车、辊式运送带、传输带和搬运机器人等。

② 工件的存储。工件的存储包括物品在仓库中的保管和生产过程中在制品的临时性停放。这就要求在FMS的物料系统中设置适当的中央料库和托盘库，以及各种形式的缓冲存储区，以保证系统的柔性。

3. 信息流系统

信息流系统实施对整个FMS的控制与监督。这实际上是由中央管理计算机与各设备的控制装置组成的分级控制网络，它们组成了信息流。

该系统用于处理FMS的各种信息，输出控制CNC机床、物料搬运系统等自动操作所需的信息。计算机控制系统通过主控计算机或分级式计算机系统，来实现制造自动化系统的主要控制功能。根据FMS的规模大小，系统的复杂程度将有所不同。通常大多采用3级分布式计算机控制系统。第1级为设备层控制系统，主要是对机床和工件装卸机器人的控制，包括对各种加工作业的控制和监测；第2级是工作站层控制系统，它包括对整个系统运转的管理、零件流动的控制、零件程序的分配以及第一级生产数据的收集；第3级为单元级控制系统，主要编制日程进度计划，把生产所需的信息，如加工零件的种类和数量、每批生产的期限、刀夹具种类和数量等送到第二级系统。FMS中

的单元级控制系统，即单元控制器是 FMS 控制系统的核心，也是实现 FMS 柔性的主要组成部分。

FMS 的系统软件用以确保 FMS 有效地适应多品种、中小批量生产过程的管理、控制及优化工作。一般包括设计规划软件、生产过程分析软件、生产计划调度软件与系统管理及监控软件。

FMS 还有刀具监控和管理系统、切屑排除系统以及零件的自动清洗和自动测量设备。

16.4.4　FMS 的分类

按规模大小，FMS 可分为以下 4 类：

(1) 柔性制造单元（Flexible Manufacturing Cell，FMC）。它由 1～2 台加工中心、工业机器人、数控机床及物料运送存储设备构成，具有适应加工多品种产品的灵活性。FMC 可看成是一个规模最小的 FMS，是 FMS 向廉价化及小型化方向发展的一种产物，其特点是实现单机柔性化及自动化，FMC 已进入普及应用阶段。

(2) 柔性制造系统（Flexible Manufacturing System，FMS）。通常包括 4 台或更多全自动数控机床（加工中心和车削中心等），由集中的控制系统及物料搬运系统连接起来，可在不停机的情况下实现多品种、中小批量的加工及管理。

(3) 柔性制造线（Flexible Manufacturing Line，FML）。它是处于单一或少品种、大批量非柔性自动线与中小批量、多品种 FMS 之间的生产线。其加工设备可以是通用的加工中心、CNC 机床，也可采用专用机床或 CNC 专用机床，对物料搬运系统柔性的要求低于 FMS，但生产率更高。它以离散型生产中的柔性制造系统和连续性生产过程中的分散型控制系统（DCS）为代表，其特点是实现生产线柔性化及自动化，其技术已日臻成熟，目前已进入实用化阶段。

(4) 柔性制造工厂（Flexible Manufacturing Factory，FMF）。FMF 是将多条 FMS 连接起来，配以自动化立体仓库，用计算机系统进行联系，采用从订货、设计、加工、装配、检验、运送至发货的完整 FMS。它也包括了 CAD/CAM，并使计算机集成制造系统（CIMS）投入实际使用，实现生产系统柔性化和自动化，进而实现全厂范围的生产管理、产品加工及物料储运过程的自动化。

16.4.5　FMS 的相关技术

计算机辅助设计技术。未来 CAD 技术发展将会引入专家系统，使之具有智能化，可处理各种复杂的问题。CAD 在设计、质量、效率和成本方面皆显示出其优越性。

机电一体化技术。机电一体化（Mechatronics）技术的含义是：在现代微电子技术的基础上，将机械和电子技术有机地结合在一起，相互协调配合，以便在技术上获得“总体大于各部分之和”的效能，使设计出的产品更为“灵巧轻便”。

模糊控制技术。模糊数学在工业中的实际应用始于20世纪70年代初。进入20世纪80年代时曾掀起一股研究热潮，目前模糊控制技术正处于稳定发展的阶段。模糊数学的实际应用是模糊控制器。高性能模糊控制器具有自学习功能，可在控制过程中不断获取新的信息并自动地对控制量作调整，使系统性能大为改善，其中尤其以基于人工神经网络的自学习方法引起人们极大的关注。

人工智能、专家系统及智能传感器技术。对未来智能化FMS具有重要意义的一个正在急速发展的领域，是智能传感器技术。该项技术是伴随计算机应用技术和人工智能而产生的，它使传感器具有内在的决策功能。

人工神经网络技术。人工神经网络（ANN）是模拟智能生物的神经网络对信息进行并行处理的一种方法，因而人工神经网络也就是一种人工智能工具。在自动控制领域，神经网络与专家系统和模糊控制系统一道，已成为现代自动化系统中的重要组成部分。

虚拟现实及计算机仿真技术。虚拟现实（VR）技术，是利用计算机并借助相应的传感装置（如头盔和数据手套）及传感媒体（各种信息传输通道及其接口），使操作人员在远离现场的工作环境中仍具有身临其境的感觉的技术。借助虚拟现实技术能使操作人员“如实”地操纵各种设备或进行“现场”培训。计算机仿真技术亦具有与此相类似的功能。随着高新技术的发展，FMS已渗透、扩散至制造业的各个领域，将对生产方式产生深远的影响。

当今世界动态多变的市场，要求计算机集成制造（CIM）具有高度柔性。制造系统的柔性是衡量制造系统对变化中的市场、技术及生产条件适应性的重要尺度。制造柔性是由企业的长期战略考虑而产生的生产与经营决策，故制造柔性既是一个技术问题，也涉及企业自身的具体情况和条件。目前，高效益企业的一个显著特征是，在设计和开发适用的软件时，将人的因素充分考虑进去，以驱动现代的计算机集成制造系统（CIMS）。

16.5 快速成型技术（RPT）

16.5.1 快速成型（Rapid Prototyping，RP）技术的产生

科学技术之间的交叉融合产生了科学技术新的聚集，例如智能技术、传感技术、信息技术与结构科学的交叉正在产生智能结构科学。激光技术、材料技术与计算机辅助设计和制造技术的集成形成了快速成型技术。

RPT将激光技术、新材料技术、CAD/CAM集成起来，解决了激光对新材料的作用、CAD模型（STL文件）的切片处理以及满足“离散/堆积”成型工艺要求的数控技术、精密机械和光电子技术在内的一系列“接口”问题，从而形成一项先进制造技术。

面向市场的集成技术工程化要求是多品种、小批量和对市场的快速响应，因此要求系统具有快速开发新产品的能力。而传统的产品开发方法费用高、周期长，企业必须采用新的产品开发手段，才能在激烈的市场竞争中立于不败之地。在这种历史背景下，RPT 也就应运而生。

快速成型技术于 20 世纪 80 年代后期兴起，起源于美国，很快发展到日本、西欧和中国，是制造技术领域的一次重大突破，属于局部制造理论范围内的研究成果。

16.5.2　快速成型技术的原理

现代成型理论是研究将材料有序地组织成具有确定外形和一定功能的三维实体的科学。它是站在成型方法论的高度对成型的基本理论、原理和方法进行研究，其研究内容主要包括以下几个方面。

(1) 物质的提取与材料的转移。从广义上讲，从自然形态的物质到成型实体所用的材料均属此范围。

(2) 序的设计与建立。所谓序，即指组织材料达到三维实体最终结构的顺序和约束。成型顺序、成型件几何设计以及 NC 代码的生成等均属此范畴。

(3) 性能保证。即保证成型件具有预先规定的机械性能、电学性能和表面质量等。过程控制、在线检测和下线后的后处理工艺及检验等均属此范畴。

它不是具体地研究单一的工艺过程，而是建立在所有成型工艺上的一个基本理论。

1. 成型方式分类

根据现代成型学的观点，从物质的组织方式上，可把成型方式分为以下 4 类。

(1) 去除成型 (Dislodge Forming)。去除成型是运用分离的方法，把一部分材料(裕量材料) 有序地从基体上分离出去而成型的方法。传统的车、铣、刨、磨等加工方法均属于去除成型。现代的电火花加工、激光切割、打孔等也是去除成型。去除成型最先实现了数字化控制，是目前主要的成型方式。

(2) 堆积成型 (Stacking Forming)。堆积成型是运用合并与连接的方法，把材料(气、液、固相) 有序地合并堆积起来的成型方法。RP 即属于堆积成型。堆积成型是在计算机控制下完成的，其最大特点是不受成型零件复杂程度的限制。从广义上讲，焊接也属堆积成型范畴。

(3) 受迫成型 (Forced Forming)。受迫成型是利用材料的可成型性 (如塑性等)，在特定外围约束 (边界约束或外力约束) 下成型的方法。传统的锻压、铸造和粉末冶金等均属于受迫成型。目前受迫成型还未完全实现计算机控制，多用于毛坯成型、特种材料成型等。

(4) 生长成型 (Growth Forming)。生长成型是利用材料的活性进行成型的方法，自然界中生物个体发育均属于生长成型，“克隆”技术是产生在人为系统中的生长成型方式。随着活性材料、仿生学、生物化学、生命科学的发展，这种成型方式将会得到很大发展。

随着科学技术的发展和制造工艺的不断完善，未来零件成型将沿两个方向发展：一方面是各种成型方式与工艺的不断完善，如去除成型也可以解决复杂形状零件制造难题，而堆积成型也可以制造高精度、高性能零件，甚至是批量生产零件；另一方面是多种成型方式，多种成型工艺不断交叉、融合，如堆积过程中将引入切削加工以提高精度和性能。

2. 快速成型技术的工艺过程及优点

笼统地讲，RP 属于堆积成型；严格地讲，RP 应该属于离散/堆积成型。通过离散获得堆积的路径、限制和方式，通过堆积材料叠加起来形成三维实体。RPT 将 CAD、CAM、CNC、精密伺服驱动、光电子和新材料等先进技术集于一体，依据由 CAD 构造的产品三维模型，对其进行分层切片，得到各层截面的轮廓。按照这些轮廓，激光束选择性地切割一层层的纸（或固化一层层的液态树脂，或烧结一层层的粉末材料），或喷射源选择性地喷射一层层的黏合剂或热熔材料等，形成各截面并逐步叠加成三维产品。它将一个复杂的三维加工简化成一系列二维加工的组合，与传统的去除成型形成鲜明的对照，两者的区别如图 16.26 所示。

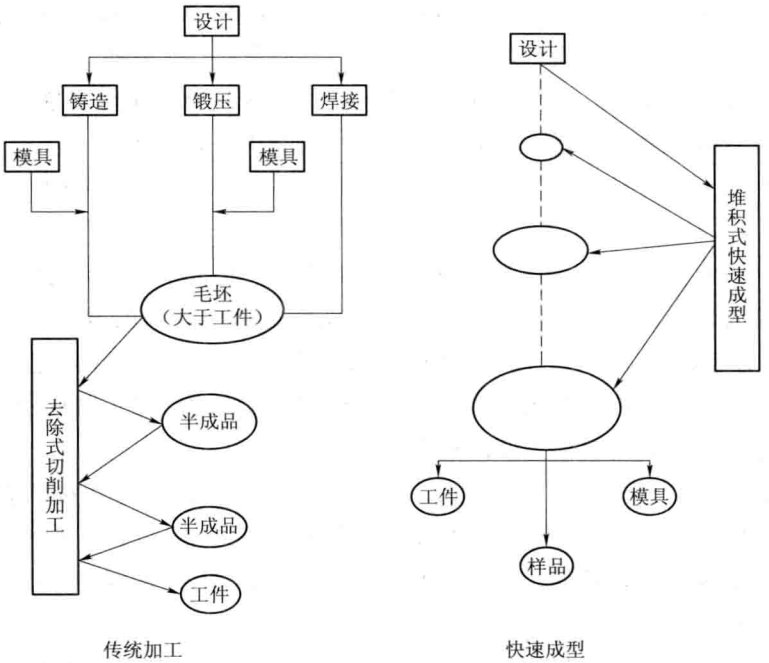


图 16.26 传统加工与快速成型的区别

（1）RP 的工艺过程。

① 三维模型构造。由于 RP 系统只接受计算机构造的产品三维模型（立体图），然后才能进行切片处理，因此首先应在 PC 机或工作站上用 CAD 软件（如 Pro/ENGINEER，I-DEAS，Solidworks 等），根据产品要求设计三维模型；或将已有产品的二维三视图转换成三维模型；或在仿制产品时，用扫描机对已有的产品实体进行扫

描，得到三维模型，即反求工程的三维重构。

② 三维模型的近似处理。由于产品上往往有一些不规则的自由曲面，加工前必须对其进行近似处理。最常用的方法是用一系列小三角形平面来逼近自由曲面。每个小三角形用 3 个顶点坐标和一个法向量来描述。三角形的大小是可以选择的，从而得到不同的曲面近似程度。经过上述近似处理的三维模型文件称为 STL 格式文件，它由一系列相连的空间三角形组成。典型的 CAD 软件都有转换和输出 STL 格式文件的接口，但有时输出的三角形会有少量错误，需要进行局部的修改。

③ 三维模型的切片处理。由于 RP 工艺是按一层层截面轮廓来进行加工，因此加工前必须从三维模型上沿成型高度方向，每隔一定的间距进行切片处理，以便提取截面的轮廓。间隔的大小按精度和生产率要求选定。间隔越小，精度越高，但成型时间越长。间隔的范围为 0.05～0.5 mm，常用 0.1 mm，能得到相当光滑的成型曲面。切片间隔选定后，成型时每层叠加的材料厚度应与其相适应。各种成型系统都带有切片处理软件，能自动提取模型的截面轮廓。

④ 截面加工。根据切片处理的截面轮廓，在计算机控制下，RP 系统中的成型头（如激光扫描头或喷头）在 $x-y$ 平面内自动按截面轮廓进行扫描，切割纸（或固化液态树脂，烧结粉末材料，喷射黏合剂和热熔材料），得到一层层截面。

⑤ 截面叠加。每层截面成型之后，下一层材料被送至已成型的层面上，然后进行后一层截面的成型，并与前一层面相黏结，从而将一层层的截面逐步叠合在一起，最终形成三维产品。

⑥ 后处理。从成型机中取出成型件，进行打磨、涂挂，或者放进高温炉中烧结，进一步提高其强度（如 3D 打印工艺）。对于选择性激光烧结（SLS）工艺，成型件放入高温炉中烧结是为了使黏合剂挥发掉，以便进行渗金属（如渗铜）处理。

RP 工艺流程如图 16.27 所示。

(2) RPT 的优点。

① RPT 采用离散/堆积成型的原理，自动完成从电子模型（CAD 模型）到物理模型（原型和零件）的转换。它将一个十分复杂的三维制造过程简化为二维过程的叠合，所以可针对任意复杂形状的零件进行加工。

② RPT 具有高度的柔性，无需任何专用工具、模具即可完成复杂的制造过程，快速制造工具、模具、原型或零件。

③ RPT 实现了机械工程学科多年来追求的两大先进目标，即材料提取（气、液、固相）过程与制造过程一体化，和设计（CAD）与制造（CAM）一体化。

④ 通过对一个 CAD 模型的修改或重组，就可获得一个新零件的设计和加工信息。数小时可制造一个零件，具有突出的快速制造的优点。

⑤ 与反求工程（Reverse Engineering，RE）相结合，成为快速开发新产品的有力工具。

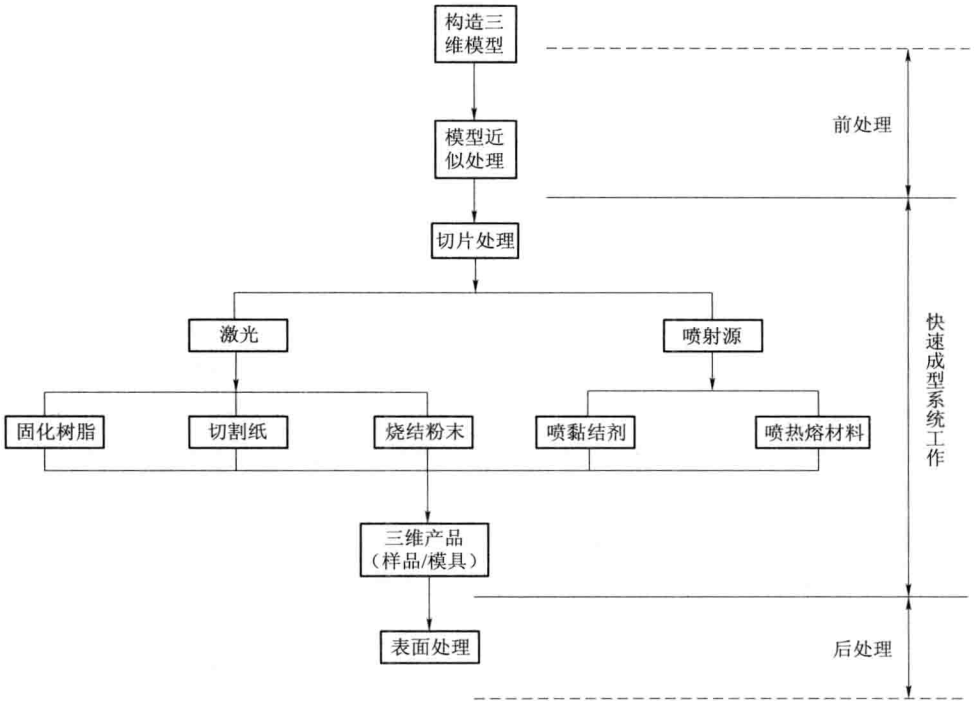


图 16.27 快速成型的工艺流程

16.5.3 快速成型的主要工艺方法

1. 立体印刷（Stereo Lithography Apparatus，SLA）

SLA 工艺方法也称液态光敏树脂选择性固化。这是一种最早出现的 RPT，它的原理如图 16.28 所示。液槽中盛满液态光敏树脂，它在紫外激光束的照射下快速固化。成型开始时，可升降工作台使其处于液面下。聚焦后的紫外激光束在计算机的控制下按截面轮廓进行扫描，使扫描区域的液态树脂固化，形成该层面的固化层。然后工作台下降一层的高度，其上覆盖另一层液态树脂，再进行第二层的扫描固化，与此同时新固化的一层牢固地黏结在前一层上，如此重复直到整个产品完成。

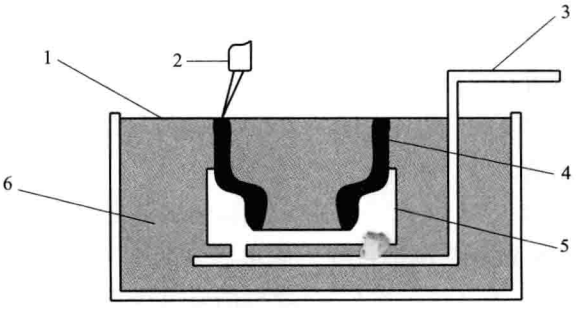


图 16.28 立体印刷原理图

1—液面；2—激光二维扫描头；3—升降台；4—零件；5—零件支撑结构；6—液态光敏树脂

SLA 有两大类，一种是从下向

上打印的，另一种是从上往下打印的。使用的材料主要有透明光敏树脂和乳白光敏树脂等，制件精度可达 0.1～0.2 mm。SLA 的特点是：成型过程自动化程度高；尺寸精度高；有优良的表面质量；CAD 数字模型直观；降低错误修复的成本；可加工结构外形复杂或使用传统手段难以成型的原型和模具。

这种方法适合成型小型零件，能直接得到塑料产品，由于紫外激光波长短（例如 He-Cd 激光器，$\lambda=325$ nm），可以得到很小的聚焦光斑，从而得到较高的尺寸精度。缺点是：

① 需要设计支撑结构，才能确保在成型过程中制件的每一个结构部分都能可靠定位。

② 成型中有物相变化，翘曲变形较大，也可以通过支撑结构加以改善。

③ 原材料有污染，且使皮肤过敏。

2. 分层实体制造（Laminated Object Manufacturing，LOM）

分层实体制造也称薄形材料选择性切割。它根据三维模型每一个截面的轮廓线，在计算机的控制下，用 CO_2 激光束对薄形材料（如底面涂胶的纸）进行切割，逐步得到各层截面，并黏结在一起，形成三维产品，见图 16.29。

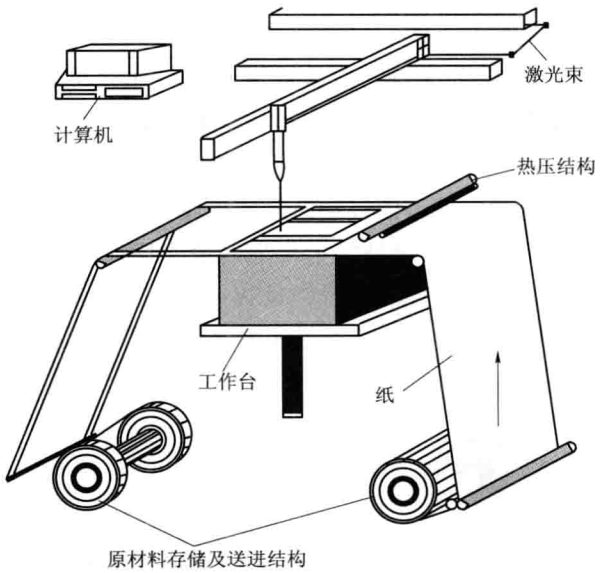


图 16.29　分层实体制造原理图

扫描器件有的采用直线单元，适合于大件的加工。

这种方法适合成型大、中型零件，翘曲变形小，成型时间较短，但尺寸精度不高，材料浪费大，且清除废料困难。

3. 选择性激光烧结（Selected Laser Sintering，SLS）

粉末材料选择性激光烧结的原理见图 16.30。SLS 使用 CO_2 激光器烧结粉末材料（如蜡粉、PS 粉、ABS 粉、尼龙粉、覆膜陶瓷粉和金属粉等），成型时先在工作台上铺上一层粉末材料，厚度为 100～200 μm，激光束在计算机的控制下，按照零件截面轮廓的信息，对制件实心部分的粉末进行烧结。一层完成后，工作台下降一个层厚，再进行后一层的铺粉烧结。如此循环，最终形成三维产品。

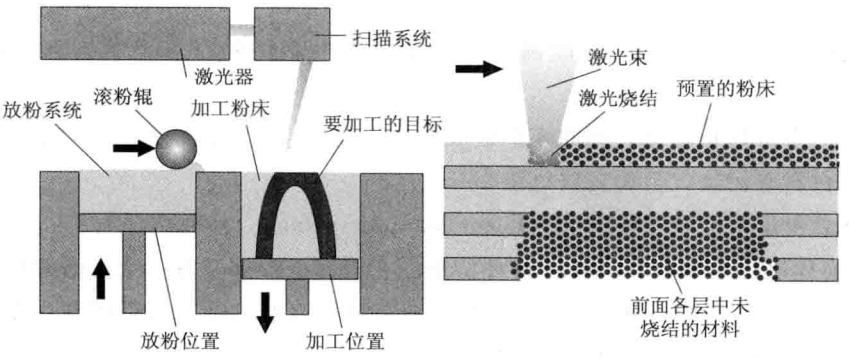


图 16.30 选择性激光烧结（SLS）原理图

制件的密度取决于激光峰值功率，而不是激光持续时间，SLS 加工设备通常使用脉冲激光。SLS 加工机先预热粉床内的散装粉末材料，使它更容易被激光提高温度。SLS 用的不是液态的光敏树脂，而是粉末。激光的能量让粉末产生高温，和相邻的粉末发生烧结连接在一起。

这种方法适合成型中小型零件，能直接制造蜡模或塑料、陶瓷和金属产品。制件的翘曲变形比 SLA 工艺小，但仍需对容易发生变形的地方设计支撑结构。这种工艺要对实心部分进行填充式扫描烧结，因此成型时间较长。可烧结覆膜陶瓷粉和覆膜金属粉，得到成型件后，将制件置于加热炉中，烧掉其中的黏合剂，并在孔隙中渗入填充物（如铜）。它的最大优点在于适用材料很广，几乎所有的粉末都可以使用，所以其应用范围也最广。

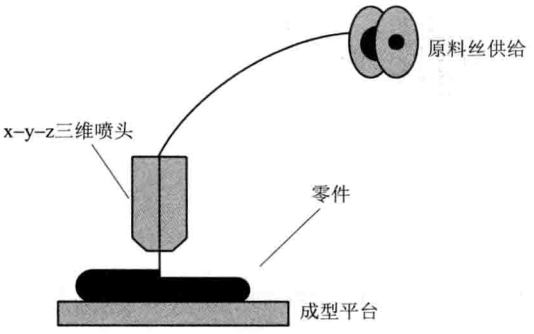


图 16.31 熔化沉积成型原理图

4. 熔化沉积成型（Fused Deposition Modeling，FDM）

熔化沉积成型也称丝状材料选择性熔覆，其原理如图 16.31 所示。三维喷头在计算机控制下，根据截面轮廓的信息，做三维运动。丝材（如塑料丝）由供丝机构送至喷头，并在喷头中加热、熔化，然后被选择性地涂覆在工作台上，快速冷却后形成一层截面。一层完成后，工作台下降

一层厚，再进行后一层的涂覆，如此循环，形成整个三维产品。

FDM 工艺的关键是保持半流动成型材料刚好在熔点之上（通常控制在比熔点高 1 ℃左右）。FDM 喷头受 CAD 分层数据控制使半流动状态的熔丝材料（丝材直径一般在 1.5 mm 以上）从喷头中挤压出来，凝固形成轮廓形状的薄层。每层厚度范围在 0.025～0.762 mm，一层叠一层至形成整个零件模型。

FDM 工艺使用的原材料主要有热塑性材料，如 ABS、PC、PLA 等，以丝状供料。制件精度可达 0.025～0.762 mm。FDM 工艺特点为：系统构造原理和操作简单；维护成本低；系统运行安全，可以直接用于石蜡铸造；可以成型任意复杂程度的小型塑料零件；制件的翘曲变形小，但需要设计支撑结构（这种支撑去除简单，无需化学清洗）。由于是填充式扫描，因此成型时间较长，为了克服这一缺点，可采用多个热喷头同时进行涂覆，提高成型效率。

5. DLP 激光成型技术

DLP 激光成型技术和 SLA 立体平版印刷技术较相似，不过它是使用高分辨率的数字激光处理器（DLP）投影仪来固化液态光聚合物，逐层地进行光固化。由于每层固化时通过幻灯片似的片状固化，因此速度比同类型的 SLA 立体平版印刷技术速度更快。该技术成型精度高，在材料属性、细节和表面质量方面可媲美注塑成型的耐用塑料部件。

数字激光处理器投影仪以 DMD（Digital Micromirror Device）数字微镜作为成像器件。单片 DMD 由很多微镜组成，每个微镜对应一个像素点，DLP 投影仪的物理分辨率是由微镜的数目决定的。DLP 投影仪技术是一种全数字反射式投影技术。其优点首先是数字优势：数字技术的采用使图像灰度等级提高，图像噪声消失，画面质量稳定，数字图像非常精确；其次是反射优势：反射式 DMD 器件的应用使成像器件的总光效率大大提高，对比度亮度均匀性都非常出色。DLP 投影机清晰度高，画面均匀，色彩锐利。

6. 固基光敏液相法（Solid Ground Curing，SGC）

固基光敏液相法的工艺原理，如图 16.32 所示，每层的成型过程由 5 步来完成：添料、掩膜紫外光曝光、清除未固化的多余液体料、向空隙处填充蜡料和磨平。掩膜的制造采用了离子成像技术，因此同一底片可以重复使用。由于过程复杂，SGC 成型机是所有成型机中最庞大的一种。

SGC 工艺每层的曝光时间和原料量是恒定的，因此应尽量排满零件。由于多余的原料不能重复使用，若一次只加工一个零件会很浪费。由于蜡的添加，可省去设计支撑结构。逐层曝光比逐点曝光要快得多，但由于多步骤的影响，在加工速度上提高不是很明显，只有在加工大零件时才体现出优越性。

7. 三维打印技术

三维打印（Three Dimensional Printing，3D-P 或 3D 打印）也称粉末材料选择性黏结，属于快速成型技术的一种。它是一种以数字模型文件为基础，运用粉末状金属或塑料等可黏合材料，通过逐层堆叠累积的方式来构造物体的技术。它也称为增材制造

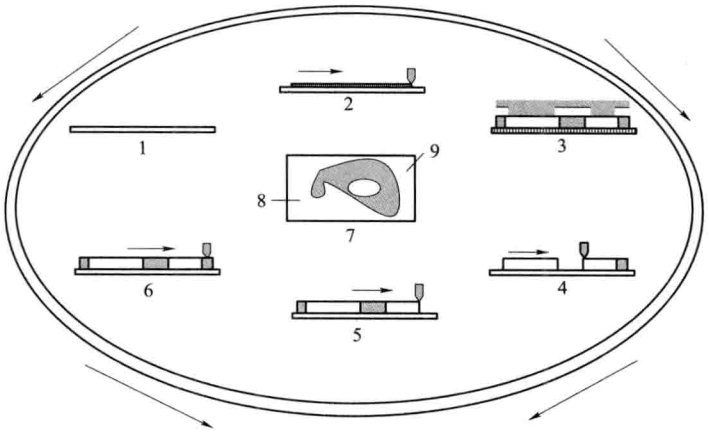


图 16.32 固基光敏液相法（SGC）原理图

1—加工面；2—均匀施加光敏液材料；3—掩膜紫外光曝光；
4—清除未固化原料；5—填蜡；6—磨平；7—成型件；8—蜡；9—零件

(additive manufacturing)。它的基本原理是，把一个通过设计或者扫描等方式做好的3D模型，按照某一坐标轴切成无限多个剖面，然后一层一层的打印出来并按原来的位置堆积到一起，形成一个实体的立体模型。即在计算机的控制下，按照截面轮廓的信息，在铺好的一层粉末材料上，有选择性地喷射黏合剂，使部分粉末黏结，形成截面层。一层完成后，工作台下降一个层厚，铺粉、喷黏合剂，再进行下一层的黏结，如此循环形成三维产品（见图 16.33）。黏结得到的制件要置于加热炉中，作进一步的固化或烧结，以提高黏结强度。

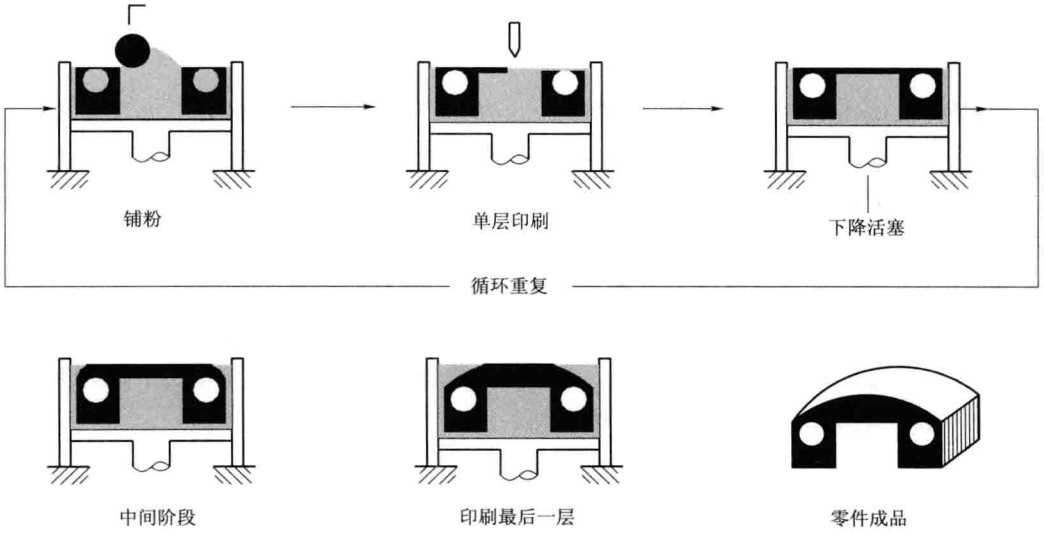


图 16.33 3D-P 原理图

增材制造是指通过顺序分层叠加的过程创建对象的技术，以区别于传统的减材制造方法。增材制造的对象可应用于产品生命周期中的所有环节，从预生产（即快速原型）到规模生产（即快速制造），以及模具的应用和后期的定制化。

传统的减材制造方法虽然在加工过程中加入了铆接，板材或片材的锻制、锻焊等过程，但它不包括数字信息模型的定义，通常加工（即产生精确的形面）是通过高精度铣削和磨削来实现的。

三维打印与平面打印非常相似，该技术的原料也是粉末状的。典型的三维打印机有两个箱体。如图 16.34 所示，左边为储粉缸，右边为成型缸。打印时，左边会上升一层（一般为 0.1 mm），右边会下降一层，滚粉辊把粉末从储粉缸带到成型缸，铺上厚度为 0.1 mm 的粉末。打印机头根据电脑数据把液体打印到粉末上（平面打印机的 Y 轴是纸在动，而 3D-P 的 Y 轴是打印头在动），液体要么是黏合剂要么是水（用于激活粉末中粉状黏合剂）。

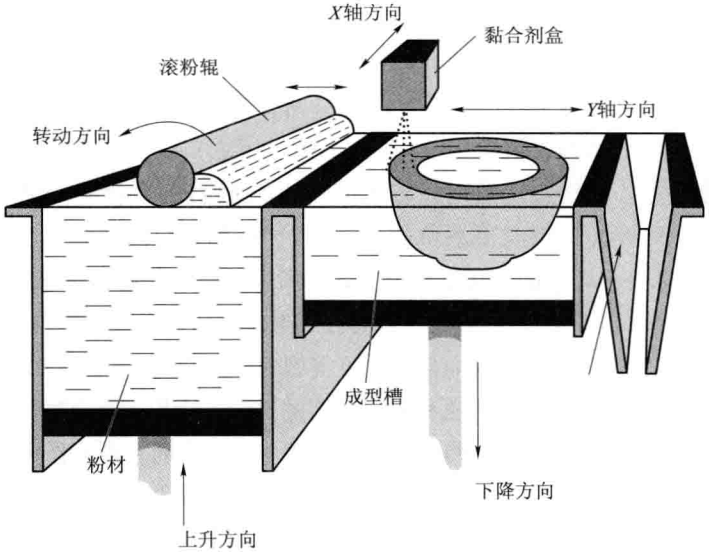


图 16.34　三维打印机工作原理

(1) 三维打印过程。三维打印的基本过程包括：三维设计、打印和完成三个环节。

① 三维设计。3D 打印的设计过程是通过计算机辅助设计（CAD）或计算机建模软件建模，将建成的三维模型“分区”形成逐层的截面，从而指导打印机逐层打印。设计软件和打印机之间协作的标准文件格式是 STL（STereo Lithography，即“立体平版印刷”）文件格式。一个 STL 文件使用三角面来大致模拟物体的表面。三角面越小，其生成的表面分辨率越高。PLY（Polygon File Format，即“多边形文件格式”）是一种通过扫描来产生的三维文件格式，其生成的 VRML（虚拟现实建模语言）或者 WRL 文件（虚拟现实文本格式文件）被用作全彩打印的输入文件，也可通过扫描件获取 CAD 数

据（见图 16.35）。

图 16.35 由扫描件获取 CAD 数据

② 打印。打印机通过读取文件中的横截面信息，用液体状、粉状或片状的材料将这些截面逐层地打印出来，再将各层截面以各种方式黏合起来从而制造出一个实体。这种技术的特点在于其几乎可以造出任何形状的物品。

打印机打出的层截面的厚度（即 Z 方向）以及平面方向（即 $X-Y$ 方向）的分辨率是以 dpi（像素每英寸）或者微米来计算的。一般的层厚度为 100 μm，也有的打印机可以打印出 16 μm 薄的一层。而平面方向则可以打印出跟激光打印机相近的分辨率。打印出来的“墨水滴”的直径通常为 50～100 μm。用传统方法制造出一个模型通常需要数小时到数天，而采用 3D 打印技术则可以将时间缩短为数个小时，当然与打印机的性能以及模型的尺寸和复杂程度有关。

传统的制造技术，如注塑法可以以较低的成本大量制造聚合物产品，而 3D 打印技术则可以以更快、更有弹性以及更廉价的办法生产数量相对较少的产品。

③ 完成。目前 3D 打印机的分辨率对大多数应用来说已经足够（在弯曲的表面可能会比较粗糙，像图像上的锯齿一样）。若要获得更高分辨率的物品，可以先用当前的 3D 打印机打印出稍大一点的物体，再稍微经过表面修整即可得到表面光滑的“高分辨率”物品。

有些技术可以同时使用多种材料进行打印，有的打印还会用到支撑物。例如在打印出一些有倒挂状的物体时就需要用到一些易于除去的东西（如可溶的东西）作为支撑物。

（2）三维打印技术的应用。在国防领域，三维打印机能够成功打印出航空发动机的重要零部件。在我国的大型客机 C919 的研制过程中，采用激光三维立体成型技术解决了飞机大型钛合金结构件制造的技术难题。西北工业大学凝固技术国家重点实验室把快速原型制造的增材成型原理和同步送粉激光熔覆相结合，开发出一种快速成型高性能致密金属零件的新技术，用于直接制造可以承载高强度的力学载荷的金属结构件。

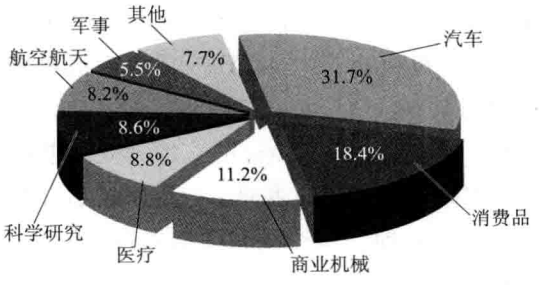


图 16.36 三维打印在各行业中应用的比率

目前，虽然三维打印已涵盖汽车、航天航空、日常消费品、医疗、教育、建筑设计等领域（见图 16.36），但由于打印材料的局限性，产品多停留在模型

制作层面。也就是说，目前三维打印技术的优势主要是缩短设计阶段的时间，使得设计者的模型实现起来比较便利。如在传统的制造业流程中，设计图纸需要再拆分为各个元素后，去开模，然后再组装，其弊端是花费的周期比较长。而当设计师对模型做出调整后，相同的步骤又得重复一遍，循环往复。有了三维打印，设计师的图纸可以快速变成实体的东西，然后开模，进行规模化大生产。从这个意义上讲，三维打印技术更在于设计环节的时间成本的节约。

16.5.4　RPT 的发展方向

RPT 是当今世界上发展最迅速的先进制造技术之一，在短短二十几年的时间里，从只有一家公司的一台设备（1988 年第一台商业化成型机问世）发展到数百家机构从事成型设备、工艺和相关材料的研究开发，成批的加工中心面向社会承揽来图加工服务，更多的企业利用 RPT 直接为生产和新产品开发服务。美国在这一领域一直处于领先地位，而欧洲、日本和中国在 RPT 上也取得了长足的进步。

目前，快速成型技术已广泛应用于汽车、航空、医疗、建筑设计等领域，快速成型技术从模具设计到满足用户的个人定制需要方面都发挥了重要作用。

由于 RPT 属于一种新的制造技术，因此在设备、工艺和材料各方面都存在很大的发展空间。进一步完善和改进各种 RPT 工艺，提高加工效率和质量，降低设备制造成本和运行成本，研究开发更多适用材料，降低材料成本，这是 RPT 到了产业化阶段必须要面对的问题。尤其是在像我国这样的发展中国家，提高 RPT 设备的性能、降低成本、保证较高的性价比是推广和普及 RPT 的关键问题。

直接使用金属材料和陶瓷成型产品结构件，这是全世界 RPT 的发展方向，国外已经从事这方面的研究并取得重大成果。一般可以通过两种途径：一是使用高功率 CO_2 激光直接烧结金属粉，逐层堆积成致密度高的结构件；二是使用中低功率 CO_2 激光烧结覆膜金属粉成型，然后通过高温烧结和渗金属处理获得致密度高的结构件。

加强 RPT 的应用研究，最大限度地拓宽其应用领域，这是发展本项先进制造技术最值得注意的问题。在这一方面我国更应重视将 RPT 与反求工程相结合设计开发新产品，因为它符合发展中国家的国情。

16.6　制造技术的发展

随着现代科技的飞速发展，作为一切工业基础的机械制造技术，正与当代最新科技成果不断地交叉融合，已经改变了它的传统面貌，制造技术的内涵也在不断地扩展，形成了现代制造技术的最新概念。

1. 并行工程技术（Concurrent Engineering Technology）

并行工程（CE）是一种系统的方法，以集成和并行的方式设计产品及其相关过程。

并行工程技术的宗旨是改善设计与制造间的信息交流，将产品的设计与制造及其相关过程进行系统的综合，以期在产品设计的同时就将整个产品生命周期中的生产、质量、维修、成本、开发时间和用户需求等各个环节考虑进去，从而大大缩短产品的生产周期。这项技术的关键在于：将计算机辅助设计（CAD）、制造（CAM）、检测（CAT）和管理等有机地结合起来，并打破以往设计、试验、生产的串行环节，引进动态并行机制，即将产品生产中的各种因素进行有机综合、并行处理，将产品的设计、生产计划、加工、检验和市场分析等同步进行。为实施并行工程，现已将 CIMS 扩展到供应商处。并行工程技术的实施将可能取代目前流行的 CAD/CAM 一体化制造系统。

2. 智能制造技术

在制造技术中融入人工智能技术，可以效仿人类在做出决断、处理自然语言、视像等领域的行为，从而取代延伸制造环境中的部分脑力劳动，使系统能自动监控其运行状态，在受外界或内部激励时能自动调整参数，以期达到最佳状态，具有自组织能力。

在未来工厂中实施并行工程，可以使用的人工智能方法包括以知识为基础的系统、模糊逻辑和神经网络。每种方法都有其解决问题的独到之处，而某些问题的解决则可能需要几种方法合并使用。以知识为基础的系统常称为专家系统，把专家的知识变成符号或规则收集起来，提供给系统，使系统能对情况变化做出相应的反应，这对已熟知的、需精确计算的非动态问题最为有效。但并非所有问题都可用固定的规则来解决，有时必须采用模糊逻辑来代替固定的、精确的表达方式。与以知识为基础的系统的不同之处在于：在进行优化控制的过程中，模糊逻辑系统可以对某些情况进行模糊判断。由于其输出可以是平滑的，因此模糊逻辑技术对控制不断变化的系统非常合适。神经网络系统是以模仿人类神经和思维活动的数学模型为基础的非线性处理系统，即使在不知道运动的确定的函数表达的情况下，仍可以依靠以前的经验，通过学习和自组织与自适应，动态地实现或修正系统对环境的反应。因此特别适用于复杂空间曲面的加工控制。

智能制造技术的研究，一般可分为三个层次，即单元加工过程的智能化、工作站控制的智能化和在 CIMS 基础上的智能化。

3. 毫微技术与微型机械

毫微技术是超精密加工的前沿技术，它是一种操纵原子、分子或原子团、分子团，使其形成所需要的物质或元器件的技术。目前，能实现原子级毫微加工的技术有多种，如离子束加工、电子扫描隧道技术、酸蚀法等。所谓酸蚀法就是采用传统的照相平版印刷技术，将元件的图形印制在聚酰亚胺上，再利用化学蚀刻的方法加工出凹腔，然后用电镀技术将铜、镍、金、银等材料填入凹腔中，最后再经过一次蚀刻，除去聚酰亚胺模型，使完整的元件显露出来。

毫微技术的发展促进了微型机械的出现。微型机械是机械技术与电子技术在毫微米水平上相融合的产物。20 世纪 80 年代末，美国加州大学伯克利分校已经开发出了微型电动机，其转子直径仅为 60 μm，而人的头发的直径为 70～100 μm。微型电机的问世，

使人们可将微米级的微型减速器、阀类的执行器组成的微型机器人装入汽车的燃油系统中，以清理油管路和喷油嘴。微型传感器用于机械领域，可以实现控制生产、传递信息、诊断故障等。因此，有人将毫微技术与微型机械称为“21 世纪的核心技术”。

4. 极限条件下的成型加工技术

人类活动的空间正从陆地向空间和海洋方向扩展。在真空、失重及水下高压等极限条件下的成型加工已成为可能。太空焊接、水下切割与焊接技术已开始应用。

可以设想对电子元件的超精密加工的理想场所不是在地球上，而是在超净无尘的太空中。因此，超净无尘的各类应用技术将获得发展。

5. 利用太阳能加工

太阳能的利用与开发，已为世人所瞩目。太阳能和光伏技术能够实现对太阳辐射的聚焦，可以得到直径为 10 cm 的光束。在目标区域的中心，光通量密度可达 250 W/cm^2。在太阳辐射的焦点处放置一个次级集结器，可使光通量增加 10～20 倍。因此，太阳能有可能成为高功率辐射加工的能源，而且在空间和月球表面等极限情况下进行加工时，太阳能加工将更具优点，因为那里集结辐射的效率将更高。

此外，虚拟制造（Virtual Reality Manufacturing，VM 或 VRM）和敏捷制造（Agile Manufacturing，AM）等新概念和新技术也出现在未来的制造技术领域。

先进的制造技术都是在一定历史条件下产生和发展起来的。各种先进制造技术往往都是多种学科（计算机信息技术、机械工程和系统制造、材料科学和光电子学科等）的集成，具有明显的系统科学性和学科综合性的特征。上述新技术的出现和设想，给制造技术的发展展示了无比灿烂的前景。现代生产追求的目标是最小投入，最大产出，在花色、品种和质量上让用户满意，以最快的速度设计和制造出来，即体现优质、高效、低消耗的原则。因此，合理运用现有生产条件、结合当代高新技术的最新成果组织生产，是制造技术发展的基础与关键。

参考文献

[1] 赵小冬，潘一凡．机械制造基础［M］．南京：东南大学出版社，2000.

[2] 费从荣．机械制造工程实践［M］．北京：中国铁道出版社，2000.

[3] 李华．机械制造技术［M］．北京：机械工业出版社，1997.

[4] 王先逵．机械制造工艺学［M］．北京：机械工业出版社，2002.

[5] 王启平．机械制造工艺学［M］．北京：哈尔滨工业大学出版社，1997.

[6] 查宏振，刘载杰，陈惠武，路景芝．炮弹与火箭弹制造工艺学［M］．北京：国防工业出版社，1982.

[7] 童秉枢，李学志，吴志军，张春凤．机械CAD技术基础［M］．北京：清华大学出版社，2000.

[8] 王颂康，朱鹤松．高新技术弹药［M］．北京：兵器工业出版社，1997.

[9] 刘安定．火箭弹设计与制造实践［M］．北京：北京理工大学出版社，1999.

[10] 蒋浩征，周兰庭，蔡汉文．火箭战斗部设计原理［M］．北京：国防工业出版社，1982.

[11] 朱林泉，白培康，朱江淼．快速成型与快速制造技术［M］．北京：国防工业出版社，2003.

[12] 刘德润．弹药装药工艺学［M］．北京：北京工业学院，1988.

[13] 陈熙蓉，许丽云，陈书言，刘忠华．炸药性能与装药工艺［M］．北京：国防工业出版社，1988.

[14] 王元有，等．固体火箭发动机设计［M］．北京：国防工业出版社，1984.

[15] 任务正，王泽山．火炸药理论与实践．北京：中国北方化学工业总公司，2001.

[16] 张辽远．现代加工技术［M］．北京：机械工业出版社，2002.

[17] 郝建民．机械工程材料［M］．西安：西北工业大学出版社，2003.

[18] 左铁镛，等．新型材料［M］．北京：化学工业出版社，2002.

[19] 罗伟华．破甲弹碎甲弹设计与制造实践［M］．北京：兵器工业出版社，1994.

[20] 田丽燕，徐更光，王延增．散粒体炸药压装成型过程分析［J］．火炸药学报，2002（2）.

[21] GB/T 228—2002 金属材料　室温拉伸试验方法．

[22] H C Chang, et al. A Dynamic Programming Based Process Planning Selection Strategy Considering Utilisation of Machines［J］. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 19, Number 2, 2003.

[23] H C W Lau, et al. Development of a computer-integrated system to support CAD to CAPP［M］. Springer-Verlag London Ltd, 2003.

索　　引

0～9

A～Z

α～τ

A

B

C

D

F

G

H

J

M

N

P

Q

R

S

W

X

Y

Z

责任编辑：杨志坚　张慧峰
封面设计：水晶方装帧设计

Projectiles and Rockets Producing Technology

Projectiles and Rockets Producing Technology

现代兵器火力系统丛书

- ◇火炮发射装药设计原理与技术
- ◇非定常气体动力学
- ◇引信机构学
- ◇火炮概论
- ◇弹药学
- ◇火炮设计理论
- ◇弹药制造工艺学
- ◇火炮与自动武器动力学
- ◇弹箭外弹道学
- ◇炸药学
- ◇火炸药安全技术
- ◇枪炮内弹道学
- ◇火箭弹设计理论

ISBN 978-7-5640-8768-5
9 787564 087685 >
定价：132.00元

[General Information]
书名=弹药制造工艺学
作者=
页数=558
SS号=13534498
DX号=
出版日期=
出版社=