

目 录



第一篇 弹药概论

第一章 概论	1
第一节 自动武器弹药的一般知识	1
第二节 对自动武器弹药的战术技术要求	6
一、威力要求	6
二、作用可靠性要求	8
三、勤务性要求	9
四、生产经济性要求	9
第三节 设计任务的提出	10
第二章 自动武器弹药的构造	11
第一节 枪弹弹头	11
一、普通弹	11
二、穿甲弹	14
三、曳光弹	16
四、燃烧弹	19
五、爆炸弹	24
第二节 杀伤榴弹	25
第三节 空心装药破甲弹	29
第四节 药筒	32
一、弹壳的分类	32
二、弹壳的构造	35
三、可燃弹壳、无壳枪弹和高低压弹壳	37
第五节 底火	40
第三章 装药的基本知识	45
第一节 自动武器弹药用火药	45

一、火药的分类	45
二、火药的一般性能	47
三、火药的选择	49
四、钝感发射药和多气孔发射药	51
五、发射药的标志	53
第二节 猛炸药的选择	54
一、炸药爆炸的特征	54
二、炸药的分类	55
三、炸药的爆炸作用	57
四、几种常用的猛炸药	58
第三节 烟火剂	63
一、曳光剂和引燃剂	64
二、燃烧剂	66

第二篇 弹药设计

第四章 杀伤作用	69
第一节 概述	69
第二节 破片数目及其质量分布	74
一、概述	74
二、弹体破碎性试验	75
三、破片质量的分布规律	76
四、破片数目的确定	80
第三节 破片的初速	82
一、破片初速的理论计算	82
二、破片初速的经验公式	85
第四节 破片的飞散特性	85
一、破片的飞散方向	86
二、破片空间分布的试验测定	87
第五节 破片在空气中的运动	93
一、破片的运动方程	93
二、衰减系数的计算	93
第六节 弹头及破片对有机体的致伤作用	98

一、弹头及破片对有机体的侵彻	98
二、影响杀伤作用的因素	100
三、致伤效应的判据	104
第七节 破片的杀伤作用场	107
一、有效破片与杀伤破片	107
二、杀伤破片的飞失	107
三、弹丸运动对破片作用场的影响	108
第八节 杀伤面积的计算	110
一、杀伤面积	110
二、破片杀伤生动目标的概率	111
三、杀伤面积的计算	112
四、影响杀伤面积的因素	114
第五章 穿甲作用	116
第一节 概述	116
第二节 穿甲弹对靶板的破坏作用	118
一、靶板在撞击中发生的现象	118
二、靶板破坏的几种形式	122
三、倾斜穿甲和跳弹	124
四、影响钢甲破坏的因素	127
第三节 穿甲计算的实验公式	129
一、德马尔公式	130
二、别列金公式	135
第四节 薄板穿甲问题	135
第六章 破甲作用原理	152
第一节 聚能效应的一般概念	152
一、聚能效应	152
二、金属流的概念	154
三、金属流的破甲过程	157
第二节 金属流的形成过程	159
一、射流形成的定常流动模型	160
二、准定常理想不可压缩流体模型	163
三、压垮速度 v_0 的计算	168

四、药型罩的压垮角	172
五、金属流微元的初始长度	173
第三节 破甲深度计算	175
一、金属流破甲过程的基本现象	175
二、金属流破甲的定常侵彻模型	177
三、金属流破甲的准定常侵彻模型	179
四、金属流的伸长及其破甲深度计算	181
五、计算破甲深度的经验公式	187
第四节 影响破甲效应的因素	188
一、药型罩	189
二、装药	199
三、弹丸的结构	202
四、起爆系列	208
五、靶板	209
第七章 结构设计	211
第一节 概述	211
第二节 总体结构设计	211
一、弹种的选择	211
二、弹丸质量的选择	212
第三节 结构方案的确定	215
一、弹丸外形结构	215
二、弹丸内腔结构	228
三、脱壳弹的结构	237
第四节 炸药和引信的选择	249
一、炸药的选择	249
二、引信的选择	249
第八章 结构特征量计算	252
第一节 基本计算法	253
一、截锥体	253
二、圆弧回转体	256
三、圆弧回转体母线半径的圆心有下移量时结构特征量的 计算	259

第二节 弹丸结构特征量的计算	262
一、弹丸质量 M	263
二、弹丸质心位置 x_c	263
三、弹丸极转动惯量 A	264
四、弹丸的赤道转动惯量 B	264
第三节 弹丸结构特征量的测定	269
一、弹丸质心位置的测定方法	269
二、弹丸极转动惯量和赤道转动惯量的测定方法	270
第九章 弹丸发射强度及膛内运动分析	273
第一节 发射时的受力分析	273
一、火药气体压力	274
二、惯性力	276
三、装填物压力	278
四、导转侧力	282
五、弹带压力	284
六、不平衡力	291
七、摩擦力	300
第二节 弹丸发射时的强度	300
一、发射时弹体的应力与变形	301
二、发射时弹体强度计算	307
三、弹底强度计算	313
四、装填物安全性计算	322
第三节 弹带及弹头壳的强度	325
一、弹带及弹头壳的膛内性能	326
二、弹带和弹头壳的膛外性能	329
三、弹带尺寸的确定	335
第四节 弹丸膛内运动分析	336
一、弹带紧塞条件	336
二、弹体膛线印痕	237
三、定心部与膛壁间的间隙	338
四、炮口速度分析	339
第十章 弹丸的飞行稳定性	342

第一节 一般概念	342
第二节 旋转弹丸的飞行稳定性	344
一、弹丸的急螺稳定性	344
二、弹丸的追随稳定性	349
三、弹丸飞行稳定性的综合解法	351
四、膛线缠度计算	352
第三节 尾翼式脱壳弹的飞行稳定性	355
一、弹体的升力系数和压力中心的计算	358
二、尾翼的升力系数和压力中心的计算	360
第十一章 药筒(弹壳)计算	363
第一节 药筒材料及各部分尺寸的确定	364
一、药筒材料	364
二、药筒的瓶形系数	367
三、药筒各部分尺寸的确定	369
第二节 初始间隙的选择	384
第三节 抽壳理论	389
一、射击过程中药筒的移动和变形	389
二、几种抽壳理论	392
第四节 最终间隙计算	399
一、第一种计算方法	399
二、第二种计算方法	406
第五节 抽壳力的计算	411
一、在一定膛压下抽壳时抽壳力的计算	412
二、膛压降至大气压时抽壳力的计算	417
第六节 影响抽壳力的因素	419
一、药筒的材料和机械性能	419
二、药筒尺寸	422
三、初始间隙	423
四、最大膛压	424
五、弹膛的壁厚	425
六、药筒与弹膛的表面状态	426
七、闭锁机构的刚度	427

八、抽壳时机	427
九、弹膛温度	427
第七节 药筒的强度校核	427
一、药筒的轴向变形	428
二、药筒壁的强度	431
三、药筒底缘的强度	433
四、药筒底部的强度	434
附 录	441
附表 1 α 值表	441
附表 2 β 值表	443
附表 3 μ 值表	448
附表 4 ν 值表	448
附表 5 α' 、 β' 、 μ' 及 ν' 值表	450
参考文献	458

第一篇 弹药概论

第一章 概 论

自动武器弹药设计学主要涉及步兵自动武器弹药，它将包括枪弹和自动榴弹发射器所用的主要弹药。从弹药分类的观点出发，自动榴弹发射器所用的弹药可归属于小口径炮弹。

第一节 自动武器弹药的一般知识

枪弹一般由弹丸、药筒、发射药和火帽四部分组成(图1-1-1)。在枪弹中习惯将弹丸称为弹头，药筒称为弹壳，火帽称为底火。

弹头从外形来看通常可分为三部分，即弧形部(又称弹头部)、圆柱部(又称导引部)及尾锥部(又称弹尾部)(图1-1-2)。

弧形部与尾锥部有多种形状，一般说来，弧形部与尾锥部起着使弹头在空气中飞行时获得最小阻力的作用。圆柱部对弹头运动的正确性有很大的影响。

若从结构来看，枪弹弹头又可分为弹头壳、铅套和内部配件三部分。弹头壳是用来保持弹头外形的，同时还有连接各元件、赋予弹头旋转运动的功用。铅套是用来缓冲弹头嵌入膛线时所承受的压力，防止内部配件被压坏，同时还可减小弹头对枪膛的磨损。内部配件是用来完成特定战斗任务所必须的，例如普通钢心、穿甲钢心、曳光管、击针、火帽等。

炮弹主要是由弹丸、药筒等部分组成(图1-1-3)。弹丸部分是由引信、弹体(又称弹壳)、弹带、曳光管及炸药等组成；药筒部分是由药筒、发射药及底火等组成。弹种不同，弹丸的组成部分将不同。

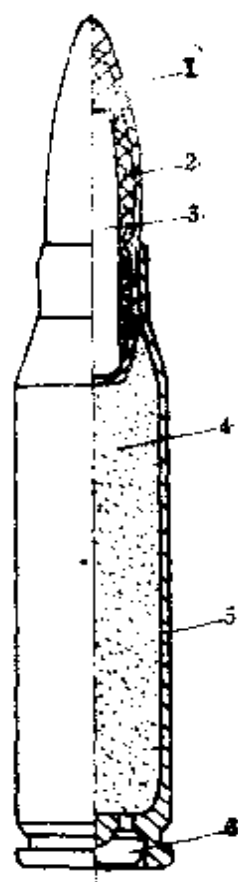


图1-1-1 枪弹

- 1—弹头壳；2—铅套；3—铜心；
4—发射药；5—弹壳；6—底火。

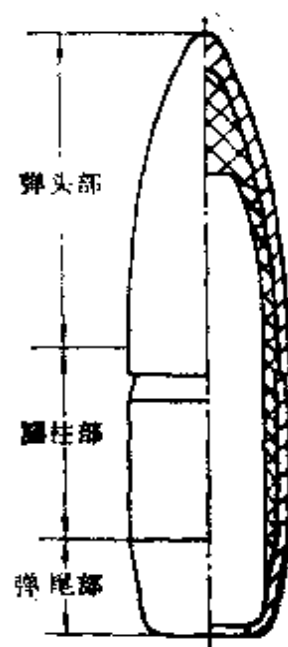


图1-1-2 弹头

炮弹弹丸的外形一般可分为弹头部、圆柱部和弹尾部（图1-1-4）。圆柱部上有定心部和弹带，定心部加工得比较精密，弹带一般用紫铜制成，发射后弹带嵌入膛，使弹丸获得旋转运动，弹丸在膛内沿轴向的正确运动靠定心部和弹带来保证，所以圆柱部也称导引部。

枪弹弹头和炮弹弹丸从用途看，它们都是用来杀伤和破坏目标的。怎样来区分它们呢？过去曾从结构上来区分，认为凡是有空腔的，弹体内装有炸药的就叫“炮弹弹丸”，若为实心的就叫做“枪弹弹头”。还有以口径来区分的，以20mm为限，大于此限者称“炮弹弹丸”，小于此限者称“枪弹弹头”。

上述二种区分方法均有其片面性，因为炮弹弹丸既有空心的

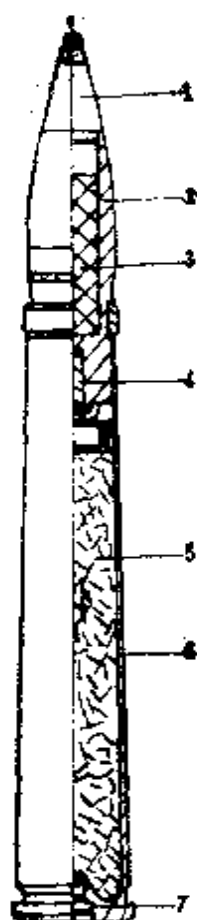


图1-1-3 定装式炮弹

1—引信；2—弹体；3—炸药；
4—曳光管；5—发射药；6—药
筒；7—底火。

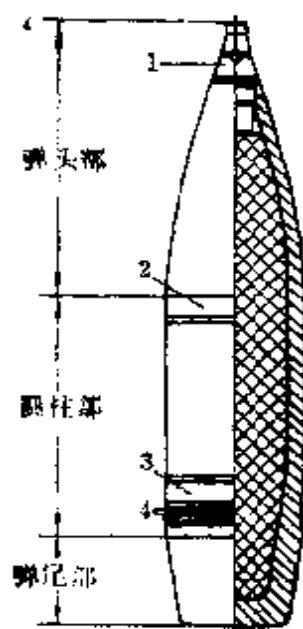


图1-1-4 炮弹弹丸的结构

1—引信；2—上定心部；
3—下定心部；4—弹带。

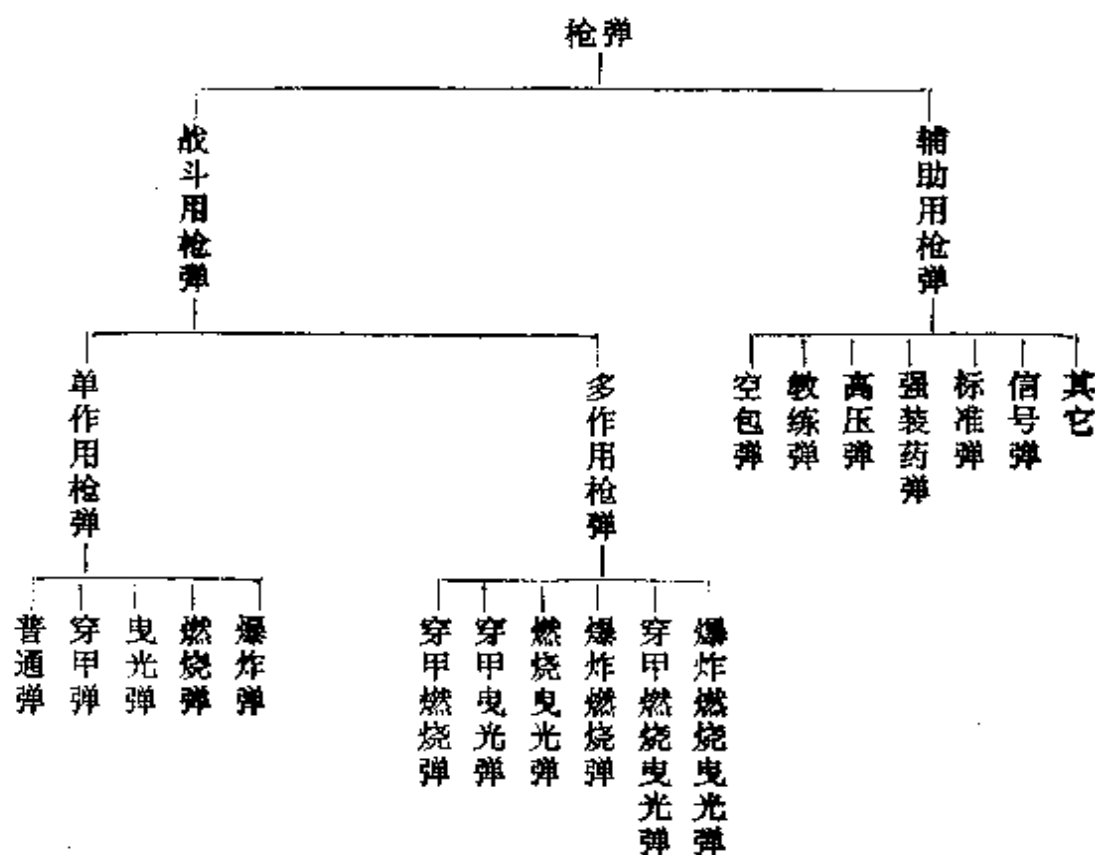
也有实心的，例如小口径穿甲炮弹弹丸。枪弹弹头不仅有实心的而且也有带空腔的普通弹头、装药剂的特种弹头，甚至装有简单引信，例如某些试射燃烧弹弹头。另外，如果按口径大小来区分虽然大体符合，但也有例外，例如德国曾装备过20mm口径的机枪和20mm口径的机关炮。

现在是根据弹丸导引部位的构造来区分枪弹和炮弹。枪弹弹头获得旋转运动，是依靠弹体本身的一部分——弹头壳嵌入膛线而得到的；炮弹弹丸则是依靠弹体上专门的导引装置——弹带嵌入膛线而获得旋转运动。但随着材料和加工工艺的改进，现已出现整体有突起导引部的枪弹，这使得枪弹和炮弹之间的界线愈来愈

愈不明显。

在步兵分队中装备着不同战斗用途的步兵武器，而且同一种步兵武器需对不同的地面目标和空中目标进行射击，因而需要各种不同用途的枪弹，所以枪弹的种类很多。枪弹按配属枪种可分为手枪弹、步机枪弹和大口径机枪弹等；按口径分，通常称口径在6mm以下的为小口径枪弹，在12mm以上的为大口径枪弹；按战术用途不同，枪弹又可作如下分类（见表1-1-1）。

表1-1-1 枪弹分类表



战场上出现的目标是多种多样的，为了完成战斗任务，要使用各种不同类型的火炮和弹药，所以炮弹根据其使用的火炮和对付目标的不同有各种各样的型式。

按用途分炮弹可分为主用弹、特种弹和辅助弹，供直接杀伤敌有生力量和摧毁目标的炮弹称主用弹，如杀伤弹、爆破弹、穿甲弹、聚能装药破甲弹、碎甲弹等；供完成某些特殊战斗任务用

的炮弹称为特种弹，如照明弹、烟幕弹、宣传弹、信号弹等；辅助弹用于靶场试验和部队训练，如演习弹、空包弹、教练弹、配重弹等。

按装填方式分炮弹可分为定装式、药筒分装式和药包分装式三类。弹丸和药筒结合为一个整体的炮弹称为定装式炮弹（图1-1-3），这类炮弹的口径一般不大于100mm，射击时一次装入炮膛，发射速度快；弹丸和药筒不结合为一体的炮弹称为药筒分装式炮弹（图1-1-5），发射时先装弹丸再装药筒，发射速度较慢，但发射药量可根据需要变换，这类炮弹的口径一般不小于122mm；药包分装式炮弹是弹丸、药包和点火门管分三次装填，没有药筒，

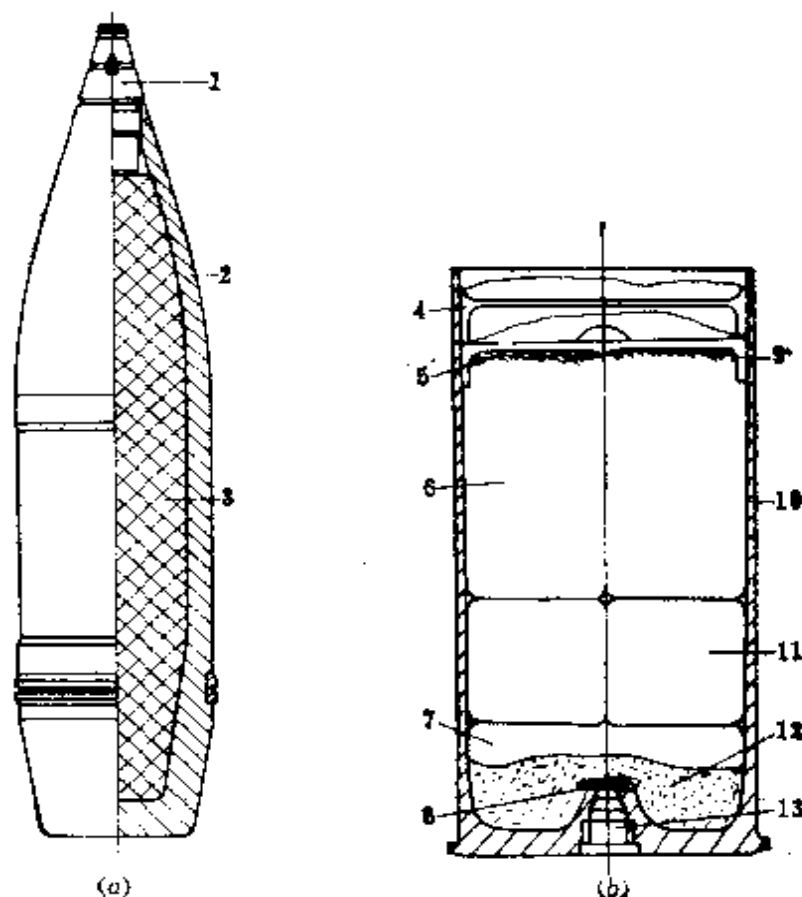


图1-1-5 分装式炮弹

(a) 弹丸部分；(b) 药筒部分。

- 1—引信；2—弹壳；3—炸药；4—密封盖；5—除铜剂；
6—上药包；7—基座；8—点火药；9—紧塞盖；
10—药筒；11—下药包；12—发射药；13—底火。

用炮闩来密闭火药气体，一般在较大口径的岸炮上采用。

按发射方式和使用火炮分，炮弹可分为后装炮弹、前装炮弹、无坐力炮弹和火箭炮弹。

按口径分，一般地面炮口径在20~70mm、高射炮口径在20~60mm称为小口径炮弹；地面炮70~155mm、高射炮60~100mm称为中口径炮弹；地面炮155mm以上、高射炮100mm以上的称为大口径炮弹。

按稳定方式分可分为旋转稳定式炮弹和尾翼稳定式炮弹两类。

按弹径与口径之比，可分为适口径炮弹，即弹径与火炮口径相同；次口径炮弹，即弹径小于火炮口径，如各种脱壳穿甲弹；超口径炮弹，即弹径大于火炮口径，如某些火箭筒发射的反坦克破甲弹属于这一类。

第二节 对自动武器弹药的战术技术要求

自动武器弹药的战术技术要求是设计弹药的基本依据，它是根据战术上的必要性和技术上的可能性提出来的。对自动武器弹药的战术技术要求一般可概括为四个方面：威力要求、作用可靠性要求、勤务性要求和生产经济性要求。

一、威力要求

自动武器弹药的威力是指弹头（丸）在一定距离上杀伤、破坏目标的能力，这种能力与弹头（丸）对目标的作用效果、精度和弹道性能等有关。

1. 弹头（丸）对目标的作用效果

弹头（丸）对目标的作用效果是与弹头（丸）的种类、结构、材料、以及目标的性质等有关。各种不同用途的弹头（丸）对它们有不同的要求，评定的标准亦随目标的性质与弹头（丸）的性能不同而异。例如，普通枪弹主要是用于杀伤有生目标，所以它

对目标的作用效果主要是以杀伤作用来评定；穿甲枪弹主要是用于射击装甲目标，所以它对目标的作用效果首先是以穿甲作用来评定。又如，杀伤炮弹是以杀伤目标为主，故通常是以杀伤半径或杀伤面积来评定；照明炮弹则以亮度、作用时间等来评定。

2. 精度

要使弹头（丸）能够杀伤或破坏目标，其首要的条件是要能打得准，即要求它的命中精度高。只有命中精度高，才能在短时间内用最少量的弹药消灭敌人。为此，就要求弹头（丸）有合理的密集度。

密集度通常用射弹散布的中间误差来表示，它以数量表示一组射弹的密集程度。产生射弹散布的原因是由于各发弹之间存在着差异，差异的存在是绝对的。例如每发弹的质量不完全一样，发射药质量不完全相同；火药的性质、火药的燃烧情况、弹膛温度等情况各发弹也不完全一样，空气的温度、密度时刻有变化；风的大小也是时刻不同……，这些差异的存在，即使射击诸元完全相同，射弹也不会落在同一点上。

提高射弹密集度的途径就是要减小初速、弹道系数和射角的散布。具体地说就是要使弹的质量、弹形和尺寸、火药成分和质量、药室容积等尽量一致；要使弹头（丸）质量偏心、推力偏心和枪（炮）口章动等尽量减小；要保证弹头（丸）有足够的飞行稳定性等。

3. 弹道性能

这里是指武器弹道参数确定的合理性而言，例如口径、弹的质量、初速、有效射程、最有利的弹形、最大膛压、弹膛尺寸等各参数匹配后的综合性能如何。良好的弹道性能是弹头（丸）命中目标的保证条件。在具体设计时，还需考虑所设计弹种各个方面的要求，综合考虑确定。例如普通枪弹，它除要求有良好的弹道性能外，还要求弹头命中目标后能产生较大的杀伤效果。这就需要全面考虑各个方面的要求。

在步兵武器战斗使用条件下（直接瞄准射击，目标距离常常

改变), 为了易于命中目标, 应该力求使弹道诸元的组合能使弹道尽量低伸, 使弹头能在尽量短的时间内到达目标。由图 1-1-6 可以看出, 比较低伸的弹道 *B* 比弹道 *A* 的杀伤区大 (当射程相同时), 同时当目标移近时可避免变动表尺。为了得到低伸的弹道, 可以采取提高初速 (如增加装填密度, 增加装药量, 改进火药性能, 增长枪管等方法) 或减小空气阻力 (如改进弹形, 增大断面密度等) 的方法, 但二者均有一定限制。合理的弹道方案也是保障射击精度的重要条件。

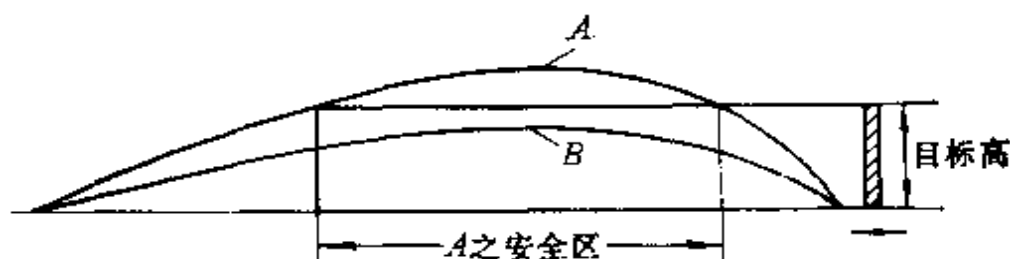


图1-1-6 弹道比较

二、作用可靠性要求

对弹药的作用可靠性要求是, 既要保证在射击过程中安全和不发生故障, 又要在命中目标后可靠的起作用。例如自动武器射速高, 供弹时惯性力大, 所以要求弹头 (丸) 与弹壳联接牢固, 保证在装填时, 弹头 (丸) 不被惯性力拔掉而发生故障; 底火与弹壳间固定要牢固, 击发时不允许有瞎火或迟发火现象; 发射药引燃要可靠; 弹壳要能顺利入膛, 可靠闭气, 保证强度, 顺利退壳; 弹头 (丸) 发射强度要足够, 在膛内运动和空气中飞行时不破裂; 曳光弹的曳光剂引燃要可靠, 不产生短迹; 燃烧弹在击中目标后应可靠发火; 引信的保险机构应确实可靠; 火工品和炸药能够承受强烈震动而不爆炸等等。

三、勤务性要求

勤务性要求主要是指弹药的运输、保管、供应方面的要求。

弹药在储存、运输、装填、携带时要绝对安全。

弹药在储存时对外界环境影响的敏感度要低。弹头（丸）、弹壳不腐蚀生锈；发射药密封可靠，不受潮，不分解；火工品长期储存不失效；炸药不分解变质等。即在各种使用条件下能保持原有的性能不变。

弹药供应应方便，特别是在战时枪弹消耗量极大，供应及时就是个极其重要的问题。为此就希望枪弹具有通用性，即同口径的同级武器尽可能地使用同一种弹药。例如半自动步枪、冲锋枪、班用轻机枪，甚至重机枪所配的枪弹要能通用。枪弹通用既简化了供应，又能使生产成本降低。

四、生产经济性要求

在现代战争中自动武器弹药的消耗量是非常大的，所以它们的生产经济性也就更具有重要的意义。为了降低成本，在保证弹药战术技术要求的条件下，结构应尽可能简单，工艺性好，原材料便宜并应立足于国内，生产设备和工具不特殊，以便在战时有广大的动员范围。

上述对弹药的各项要求，它们既是统一的又是互相矛盾的，它们之间的矛盾构成了弹药不断发展的内在因素。战术性能要求与生产经济性要求有矛盾的话，一般说来生产经济性应服从于战术性能要求；但有时在不大影响战术性能要求的情况下，就应尽可能地使生产经济性好。战术性能要求之间也是互相矛盾的。例如当口径一定时，为了减小空气阻力，就需增加弹的质量和改善弹形，增加质量就会影响初速和弹头（丸）的长度尺寸，良好的弹形会影响弹头（丸）的内腔容积，它们又会涉及到对威力和飞行稳定性的影响……。因此在具体设计时需全面地看问题，要看到事物的各个侧面，要创造条件，使矛盾向有利的方向转化。

第三节 设计任务的提出

随着科学的进步和技术的发展,战场上会不断出现新的目标,部队在装备序列、战术和使用方面会对武器和弹药提出各种新的要求,使武器和弹药不断改进或更新;生产技术的发展,新工艺、新材料的应用,使武器和弹药的生产经济性和动员性大为改善,也就为设制新的武器和弹药创造了条件。自动武器弹药的设计任务就是从上述几方面的要求出发提出来的。例如,当目标防护能力加强时(如装甲增厚、采用避弹衣),要求提高弹药的侵彻能力;当目标运动速度加快时,要求提高弹丸飞行速度,缩短飞行时间;科学技术上出现新成就(如新材料、新能源、新工艺)也会引起弹药原设计的改变,以提高性能和增加产量;工艺水平提高,以致可以采代用材料来降低成本时,也需改变弹药设计,例如以钢弹壳代替铜弹壳、钢心弹头代替铅心弹头等。此外,在供应勤务方面也会对弹药提出改进意见。

设计新弹药一般有以下两种情况:

第一种情况是武器已定,仅改进弹药就能够满足所提出的战术技术要求。在这种情况下设计的重点是弹丸。新设计的弹丸不仅威力应满足要求,还要适应已定武器的强度,更为重要的是其外弹道应与原有弹药的外弹道有一定的一致性,以便使表尺通用或射表通用。

第二种情况是整个武器系统都要重新设计。这时涉及面较广,问题较复杂。对于诸如口径、弹的质量、药室容积、装药量、初速等主要参数应反复分析论证及试验后再确定。对于弹种的配备、工艺性和经济性问题,应全面慎重考虑。要从整个武器系统出发来优化设计方案。

第二章 自动武器弹药的构造

第一节 枪 弹 弹 头

一、普通弹

普通弹主要是用于杀伤人员、马匹等有生目标，是手枪、步机枪的基本弹种，消耗量最大。它应满足的主要要求：杀伤效果好，射击密集度大，在有效射程内弹道低伸，结构简单，经济性和动员性好等。

为了增大弹头的断面密度和改善其外弹道性能，过去使用的步机枪普通弹是铅心弹（图 2-1-1）。外面是具有一定强度和塑性的弹头壳，内充以铅心。铅的塑性好、密度大，易于加工，对膛线磨损小，弹头的长度可短。弹头壳过去是用紫铜、黄铜或铜镍合金制造，现在用复铜钢或低碳钢镀铜来制造。图 2-1-1 是 53 式 7.62 铅心普通弹头，其特点是铅心底部有锥孔，发射时火药气体压力使弹尾膨胀，从而更好地嵌入膛线，使磨损了的枪管仍有较好的闭气作用，因而初速下降较小，有利于提高射击密集度和延长枪管寿命。

由于普通弹的产量大，为节省有色金属铅和降低成本，目前普遍采用钢心结构（图 2-1-2）。它是由弹头壳、铅套和钢心组成。由于钢的密度比铅小，所以钢心弹头的长度比同质量的铅心弹头要长些。图 2-1-2 为 56 式 7.62 钢心普通弹头。

为了特定的目的，有些国家曾用过一些其它结构的普通弹，如图 2-1-3 所示。图 2-1-3 a 为法国 D 型弹，它是无弹头壳的实心弹，由“九一”铜压制而成。优点是结构简单，但强度低，不适

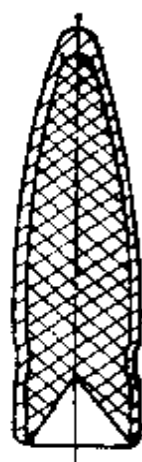


图2-1-1 53式7.62铅心
普通弹头

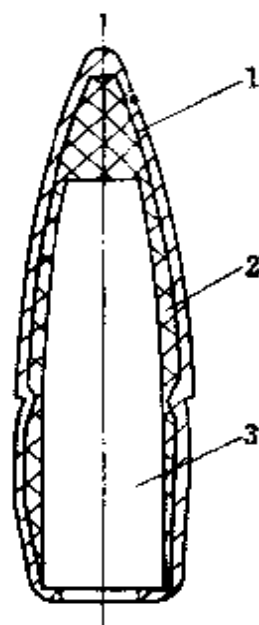


图2-1-2 56式7.62钢心
普通弹头

1—弹头壳；2—铅套；3—钢心。

于高初速的情况。若用低碳钢制造实心弹，需考虑枪管的寿命问题。图2-1-3b、c是日本三八式6.5mm铅心普通弹和英国MV-Ⅰ型枪弹，它们弹头壳内部填充物的形状和结构特点，都是为了把弹头的质心位置保持在恰当的位置，以便使弹头在飞行中有足够的稳定性。英国MV-Ⅰ型枪弹弹头壳内填充的是铝和铅。

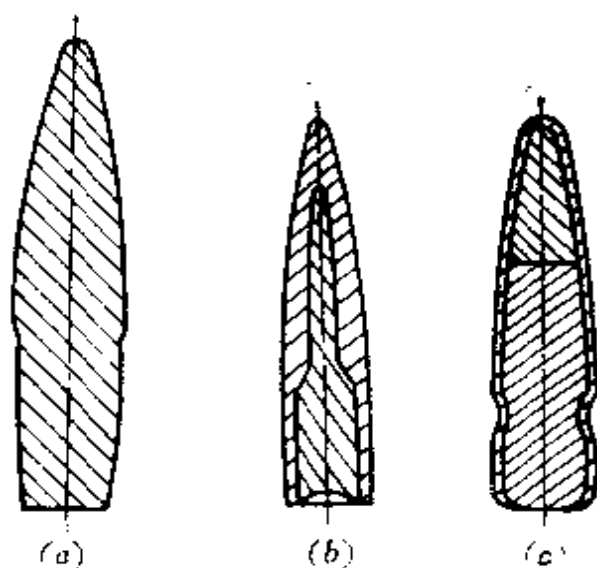


图2-1-3 几种普通枪弹

图 2-1-4a 为美国 M193 5.56 铅心普通弹，它由黄铜弹头壳和铅心组成。当时的设计思想是：距离近、火力猛、机动性好。它充分显示了小口径武器的优越性，即大幅度减轻了弹药的质量，增加了弹药携带量；明显地提高了武器的点射精度；且有低伸的弹道、巨大的杀伤能力和良好的经济性等。

图 2-1-4b 为比利时 SS109，5.56 普通弹，它采用了淬火钢心和铅心，即采用钢/铅复合式弹心结构，以提高其远距离的侵彻能力，它的杀伤性能比 M193 的有所降低。

图 2-1-4c 为苏 5.45 钢心普通弹，它是由弹头壳、铅套和钢心组成。铅套很薄，钢心的相对质量增大，以便提高侵彻性能。弹头前部有一个空腔，弹头的长细比较大，这样弹头较轻，但又十分锐长，既改善了弹形又可增大进入有肌体后的翻转力矩。同时，为了保持飞行中的稳定须减小缠度。这就可使弹头的外弹道性能和进入有生目标后的杀伤效果得到兼顾。它的性能诸元见表 2-1-1。

手枪弹的结构见图 2-1-5，它是由弹头壳和铅心组成。铅的塑性高、密度大，易于加工，对膛线磨损小，弹头的尺寸短。

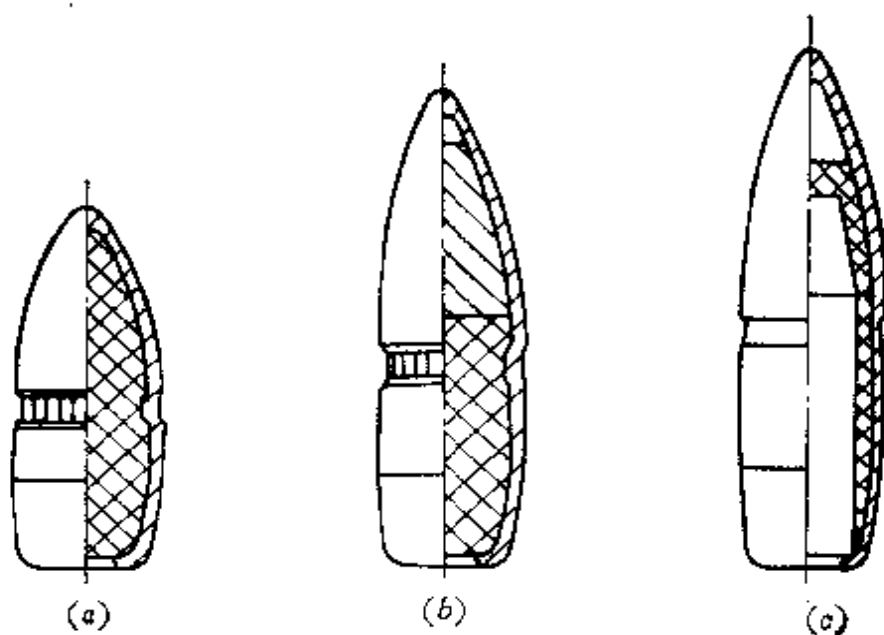


图2-1-4 三种小口径枪弹

表2-1-1 几种小口径枪弹和 NATO及 56式7.62枪弹的诸元

诸元	枪弹型号	M193	S S109	苏M74式 5.45	NATO	56式 普通弹
口径 (mm)		5.56	5.56	5.45	7.62	7.62
弹头质量 (g)		3.56	4.0	3.45	9.7	7.9
弹头长 (mm)		18.8	23.1	25.4	29.2	26.8
全弹长 (mm)		57.3	57.3	56.7	71.1	56.0
全弹质量 (g)		11.65	12.44	10.65	24.3	16.4
膛度 (口径)		54.9	32.0	35.8	40.0	31.5
初速 (m/s)		995	946	955	850	735
弹头质心距尾端面的距离 (mm)		7.5	8.7	10.8	11.6	10.7
弹头质心相对位置 (%)		39.6	37.5	42.6	39.6	39.8
弹头长细比		3.38	4.15	4.66	3.83	3.52
弹头质量系数 (g/cm ³)		20.7	23.7	21.3	21.9	17.9



图2-1-5 手枪弹头

二、穿甲弹

穿甲弹主要是用于对付具有薄装甲防护的目标，例如飞机、装甲车辆、舰艇等，以便击穿钢甲，击毁掩蔽在钢甲后面的有生力量和器材等。单一作用的穿甲弹目前已很少采用，多采用组合作用的，例如穿甲燃烧弹、穿甲燃烧曳光弹等。

穿甲弹与普通弹结构的主要区别是它有一个强度很高很硬的穿甲钢心。典型的穿甲弹是由弹头壳、铅套和穿甲钢心三个元件构成（图2-1-6）。穿甲钢心是穿甲弹的主要零件，铅套是为了减少弹头在膛内运动时对膛线的磨损。当弹头与钢甲撞击时，弹头壳和铅套首先产生变形，这就减少了钢心头部破坏的可能性。

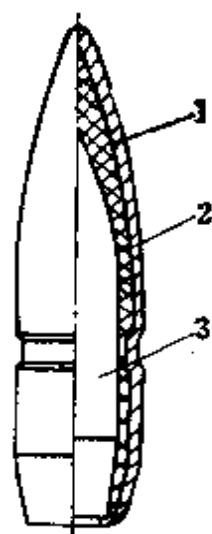


图2-1-6 穿甲弹头

1—弹头壳；2—铅套；3—穿甲钢心。

这也会减少跳弹的机率，使弹头可靠地起穿甲作用。

图2-1-7和图2-1-8是美7.62和12.7柯尔特穿甲弹头，它

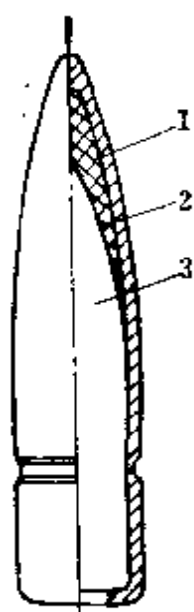


图2-1-7 美7.62柯尔特
穿甲弹头

1—弹头壳；2—铅套；
3—穿甲钢心。

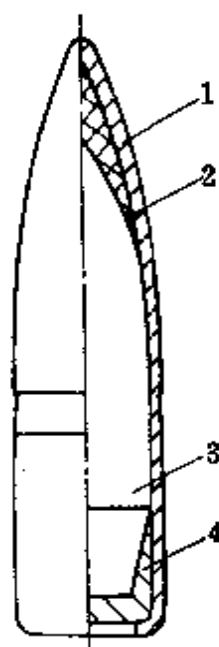


图2-1-8 美12.7柯尔特
穿甲弹头

1—弹头壳；2—铅套；
3—穿甲钢心；4—铜垫。

们的特点是弹头壳用塑性较好的铜锌镍合金制成。因此弹头壳和钢心的圆柱部之间不需衬铅套，这样穿甲钢心可做得大一些，提高了穿甲能力。

图 2-1-9 为法国 P 型穿甲弹头，它由穿甲钢心和弹头壳两个元件构成，结构简单。铅套的作用完全由软金属的弹头壳所代替。

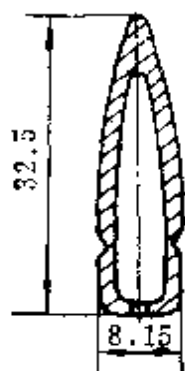


图2-1-9 法国P型 8mm穿甲弹头

弹头壳现在一般是用复铜钢制造，穿甲钢心用工具钢制造。穿甲钢心的形状对穿甲性能有一定的影响，但是提高钢心动能的效果更为显著。因此，采用密度大的材料做穿甲钢心，在结构上采用超速脱壳弹等都是提高穿甲效果的措施。

三、曳光弹

曳光弹的主要用途是修正射击和指示目标，它多用于对活动目标如飞机、装甲车辆等的射击，以便及时修正射向，达到有效地击中目标。使用时一般在数发主用弹之间夹一发曳光弹。曳光弹还可以用于发射信号和教练等。用于教练时可使射手对弹头的飞行轨迹一目了然。

曳光弹也应具有对目标的毁伤作用。例如单一作用的曳光弹，它在 100~150m 内的杀伤作用与普通弹相差甚微，超过此距离后则作用减低。同时它也有微弱的燃烧作用，对于草堆、汽油等易燃目标有一定的引燃效果。

曳光弹的弹迹曾采用过光迹和烟迹，烟迹曳光弹因夜间无法辨别，已被淘汰。

在光迹曳光弹中有红光、白光、黄光等几种，白光和黄光的光度没有红光的大，对周围背景的衬托力也差，特别是白天弹迹更不明显，故不采用。

根据曳光弹的用途，对它提出以下一些要求：

- (1) 不论昼夜，在规定的曳光距离上应有清晰易见的光迹；
- (2) 出枪口一定距离（一般要求 100m 以上）才开始曳光，以免暴露射击位置；
- (3) 曳光弹弹道应与主用弹一致，即具有弹道一致性；
- (4) 作用和点燃可靠，曳光连续，发光和亮度均匀；
- (5) 结构简单，工艺性好，生产安全，储存中性能稳定。

图 2-1-10 为 53 式 7.62 曳光弹。曳光管内的曳光剂和引燃剂接触面压成凹凸形，以增加传火面积。引燃剂表面压成花纹以便增加点火面积，使点着容易。弹头内部的环状小垫（小圆环）是防止弹头卷边时曳光管变形、引燃剂松散、影响点火和射击密集度。这种曳光弹的缺点是：曳光剂在膛内就开始燃烧，加速了枪管的烧蚀，降低了武器寿命，影响内弹道性能（初速和膛压）；出枪口即发光易暴露射击位置；当曳光药剂压药密度不足时，膛内火药气体冲击其表面，使曳光药剂破碎而不能正常曳光。为此，曳光药剂的压药压力应大大超过最大膛压值。

图 2-1-11 为美 7.62(NATO) 曳光弹。它没有曳光管，曳光药剂压成药柱直接装入弹头壳内，药柱后端有一锥形穴，上盖一薄铜片，借以延迟曳光。发射时，火药气体压力将铜片压入穴内并点燃周围露出的引燃剂。弹头出枪口后，由于有铜片（已变形）挡住大部分药面，所以看不到曳光。待弹头离枪口 150m 左右，曳光剂燃去一部分后，铜片即从尾部脱落，这时才可见到红色曳光。此外小铜片还可防止火药气体和发射药粒冲击曳光剂。

图 2-1-12 为美 7.62 曳光弹头，这种弹头零件较少。图 2-1-13 为 54 式 12.7 穿甲燃烧曳光弹头，它的底部没有小圆环。

图 2-1-14 为穿甲曳光弹头，曳光剂装在穿甲钢心中，结构简单。

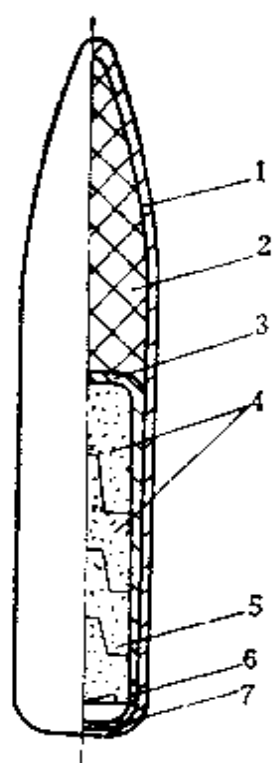


图2-1-10 53式7.62曳光弹头

1—弹头壳；2—铅心；3—曳光管，
4—曳光剂；5—传火剂；6—引燃剂，
7—小圆环。

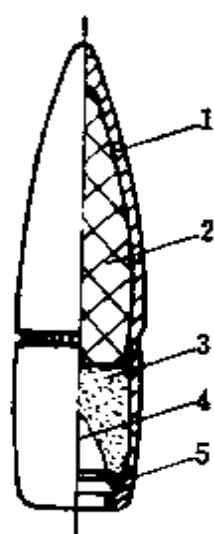


图2-1-11 美7.62 (NATO)

曳光弹头

1—弹头壳；2—铅心；3—曳
光剂；4—空穴；5—紫铜盖。

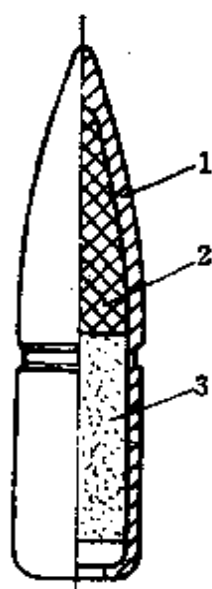


图2-1-12 美7.62曳光弹

1—弹头壳；2—铅心，
3—曳光剂。

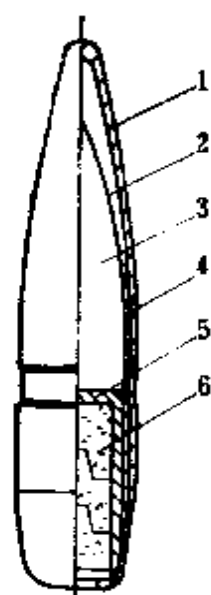


图2-1-13 54式12.7穿甲燃烧曳光弹

1—弹头壳；2—燃烧剂；3—穿甲钢心；
4—铅套；5—曳光管；6—曳光剂。

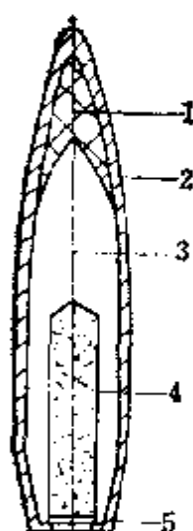


图2-1-14 穿甲曳光弹头

1—铅帽；2—弹头壳；3—钢心；4—曳光剂；5—垫圈。

四、燃烧弹

燃烧弹主要是用于引燃易燃目标，如木材、草堆、液体燃料（汽油、煤油等），及用来破坏工业、企业、城市、乡村的建筑物、仓库等，使之着火，同时也广泛用于射击敌方的飞机和车辆。由于现代战争中大量使用各种飞机和车辆，所以各种燃烧弹的作用就更加显著。

燃烧弹的结构式样很多，最早的燃烧弹是以磷作为燃烧剂的。图2-1-15是英国磷燃烧弹头（7.7mm）。它的弹头壳下部有三个小孔用易熔金属焊死。当弹头在膛内运动时，由于摩擦使弹头壳温度升高，将易熔金属熔化，同时装于弹头部的磷由于惯性及温度升高膨胀，填满了惯性铅心的三条纵沟，通过三个小孔与空气接触，使弹头在弹道上飞行时产生白色烟迹。碰击目标时，惯性铅心向前运动，将剩余的磷从孔中挤出向四方飞散，引燃目标。若射程远，弹头在飞行中会燃去过量的磷，使得对目标的引燃作用降低。图2-1-16是德国穿甲磷燃烧弹头（7.92mm）。它的穿甲钢心做成蘑菇状，使磷易于通过钢甲。由于磷有毒，且可

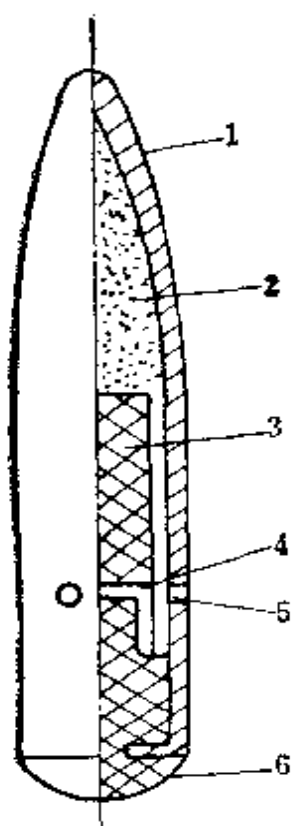


图2-1-15 英国磷燃烧弹头

1—弹头壳；2—白磷；3—惯性铅心；4—铜帽；5—小孔；6—铅垫。

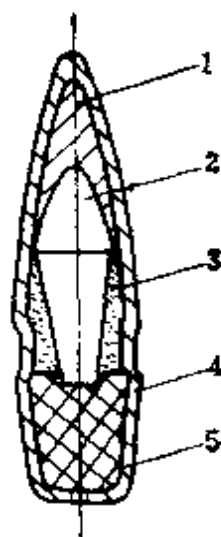


图2-1-16 德国穿甲磷燃烧弹头

1—铅帽；2—钢心；3—磷；4—铅垫；5—弹头壳。

自燃，在生产和储存中很不安全，所以磷燃烧剂已被淘汰，现在多用铝镁合金粉作燃烧剂。

图2-1-17是美国燃烧弹（7.62mm）。它由弹头壳、管状钢心、铅塞和铜垫组成。铝镁合金燃烧剂，装于管状钢心内，利用弹头撞击目标时所产生的热量而燃烧。同时管状钢心带着燃烧剂通过障碍物，此时管状钢心中的燃烧剂压力急剧增高，引起爆炸，使燃烧剂四处散开，将障碍物后面的燃料点燃。

图2-1-18为53式7.62试射燃烧弹头。它可用于射击无装甲的储油箱，使汽油燃烧；也可使软目标如木材、稻草等着火。由于它击中目标发火时有明显的火光亮点，所以可用来观察并修正射击，因此称为试射燃烧弹。这种弹头内有击针，击针外有开口保险套筒，以防止运输时击针刺发火帽。发射时由于惯性力的作用，开口保险套筒向后坐，使针尖露出，解除保险。碰击目标

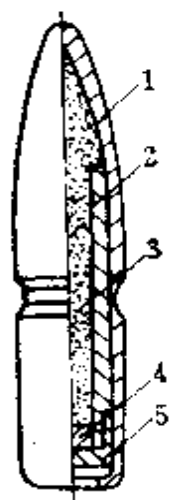


图2-1-17 美国燃烧弹

1—弹头壳；2—管状钢心；3—燃烧剂；4—铅塞；5—钢盆。

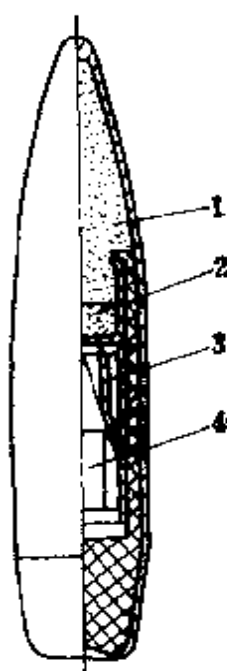


图2-1-18 53式7.62试射燃烧弹头

1—燃烧剂；2—火帽；3—保险套筒；4—击针。

时，击针靠惯性刺发火帽，引燃燃烧剂，产生大量气体，使弹头破裂，燃烧剂喷出，点燃目标。这种弹发火灵敏，对软目标射击有良好的效果。

图2-1-19为56式7.62燃烧曳光弹头。当弹头与目标相碰时，钢块因惯性向前，挤压燃烧剂而发火。弹头壳内前部有一减弱沟，以减少弹尖破坏时的能量消耗，弹头为钝形，用来增加击中目标后的阻力，使钢块挤压燃烧剂的惯性力增加，提高了发火能力。与带击针的燃烧弹相比，它结构简单，发火可靠性稍差。

图2-1-20为56式14.5燃烧曳光弹头（又称试射燃烧弹）。它的用途与53式7.62试射燃烧弹相同，对软目标有良好的发火性能，并有曳光作用。实践证明，在远距离（速度低）时，它的曳光火焰也可将草堆引燃。击针及其后面的铅块组成了击发体，击发体外有保险帽。为了使用安全，在保险帽外铆三点，以固定击发体。发射时，保险帽惯性后坐，击针刺穿它的底部（很薄），使击针处于待发状态。当弹头命中目标时，击发体惯性向前，使

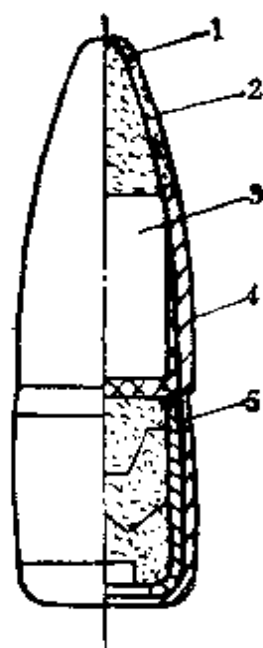


图2-1-19 56式7.62燃烧
曳光弹头

1—弹头帽；2—燃烧剂；3—钢
块；4—铅套；5—曳光管。

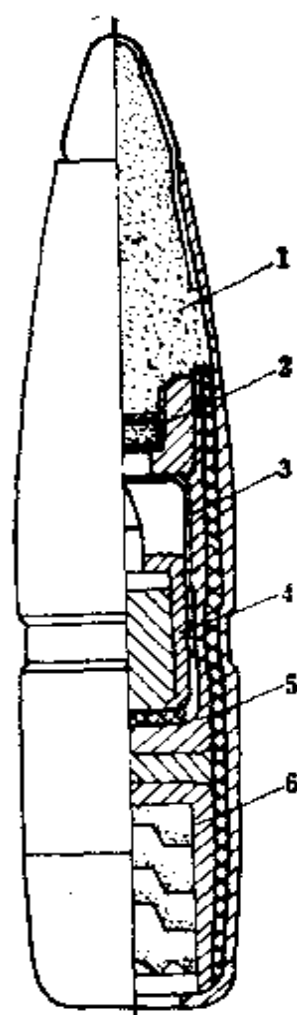


图2-1-20 56式14.5燃烧曳光弹头

1—燃烧剂；2—火帽；
3—保险帽；4—击发体；
5—击发体外壳；6—曳光管。

击针刺发火帽，点燃燃烧剂。击发体后面的铅垫在发射时起缓冲作用。击发体外壳有沟槽，以防箍紧口槽时击发体变形而失效。

图2-1-21是53式7.62穿甲燃烧弹头。它用于射击有钢甲防护的易燃目标，即穿透钢甲并点燃其后面的易燃物。当击中钢甲时，穿甲钢心向前运动，挤压燃烧剂使之发火。这种弹头结构简单，但对软目标不能起作用。

图2-1-22是56式7.62穿甲燃烧弹头。它的特点是燃烧剂在穿甲钢心的后面。在穿甲时钢心受阻，它后面的铅碗及弹头壳继续向前运动，挤压燃烧剂使之发火。钢心穿过钢甲后，由于尾

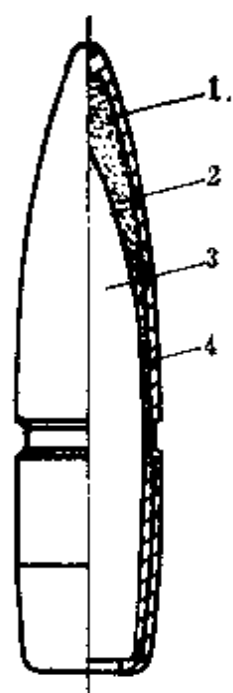


图2-1-21 53式7.62穿甲
燃烧弹头

1—弹头壳；2—燃烧剂；
3—穿甲钢心；4—铅套。

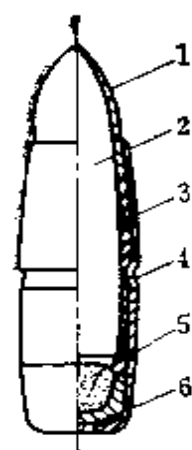


图2-1-22 56式7.62穿甲燃烧弹头

1—弹头壳；2—穿甲钢心；
3—弹头壳；4—铅套；
5—燃烧剂；6—铅碗。

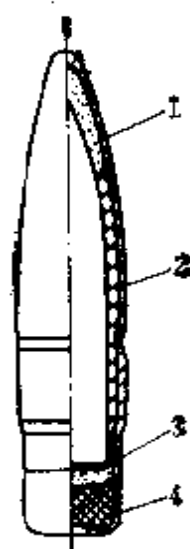


图2-1-23 穿甲燃烧弹头

1—燃烧剂；2—铅套；3—燃烧剂；4—铅垫。

部低压区的抽吸作用和铅碗的惯性，以及燃烧剂本身的惯性和燃气压力，使燃烧剂通过弹孔，向前点燃易燃物。穿甲钢心尾部也

可将粘附着的燃烧剂带过钢板。

图 2-1-23 是穿甲钢心前后都有燃烧剂的穿甲燃烧弹头。它是燃烧剂在前和在后时两种燃烧作用的综合，因此燃烧率高。它的缺点是结构复杂。

五、爆炸弹

爆炸弹是通过一定的起爆装置使弹头爆炸，用以毁伤目标。同时它也具有燃烧作用。爆炸弹可以使薄壁储油器、飞机、木质掩体等强度低而易燃的目标爆炸、燃烧、对目标的破坏作用大。

爆炸弹起爆装置的结构是根据目标的不同而异，它是一种便

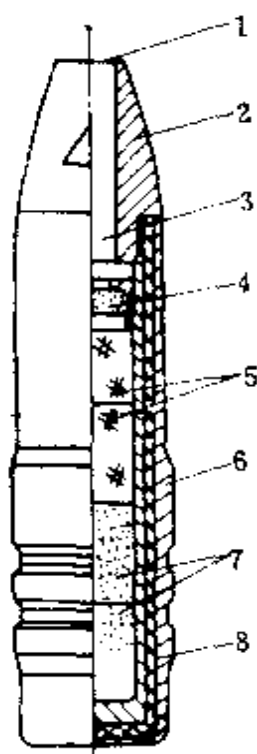


图2-1-24 苏12.7燃烧

爆炸弹头

1—盖片；2—弹头部；3—空气室；4—火帽；5—炸药；6—弹头壳；7—燃烧剂；8—铅套。

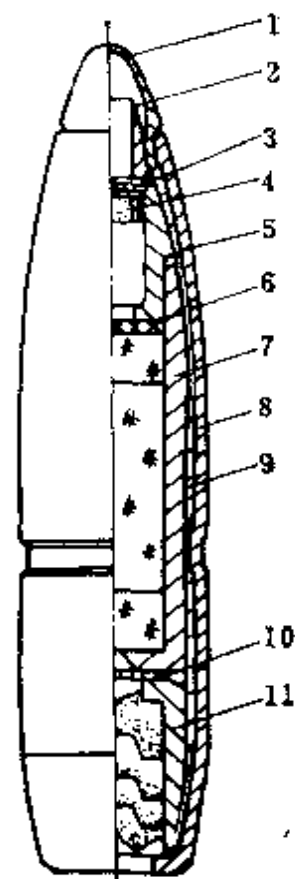


图2-1-25 14.5瞬发爆炸弹头

1—弹头帽；2—侵入管；3—纸垫；4—雷管；5—雷管座；6—线垫；7—爆炸体；8—弹头壳；9—铅套；10—铅垫；11—曳光管。

于大量生产的小型信管。要求这种信管在撞击目标时有足够的敏感度，使用时安全可靠。

图 2-1-24 是苏 12.7(M13-46) 着发燃烧爆炸弹头，内装炸药和燃烧剂。碰击目标时弹头部盖片压缩空气室内的空气，使温度升高，点燃火帽，引起爆炸和燃烧。这种弹头部较钝，空气阻力大，速度下降快。当速度太低时，不能可靠地引燃火帽，故不能用来对付远距离的目标。在未击中目标而落地时（如空中射击），由于着速低，常不会爆炸。

图 2-1-25 是 14.5 瞬发爆炸弹头，它的主要部件是侵彻管、爆炸体和曳光管。弹头壳前部有薄壁弹头帽。在撞击目标时，弹头帽变形，压缩侵彻管内腔的空气，引爆雷管，继而起爆炸药，爆破引燃目标。侵彻管是为了防止侵彻目标时弹头前部破坏，确保空气室的完整。侵彻管撞击目标后产生的碎片也可起到引爆雷管的作用。曳光管除了指示弹迹外，还可引爆炸药，使弹头自炸，以便防止弹头未击中目标时落地爆炸。

第二节 杀伤榴弹

在习惯上榴弹是起杀伤和爆破作用的弹丸统称，例如杀伤弹、爆破弹、杀伤爆破弹又称为杀伤榴弹、爆破榴弹、杀伤爆破榴弹。为了简便起见，有时就统称为榴弹。榴弹有地面的和高射的两种。

地面榴弹主要用来对付地面目标，用途比较广泛，如破坏土木工事、杀伤有生目标、摧毁建筑物和车辆等都可以使用榴弹。高射榴弹主要用来对付空中目标，如飞机。

实际上杀伤榴弹和爆破榴弹之间并无严格区别，只是偏重于杀伤作用或偏重于爆破作用而已。一般地面小口径榴弹因炸药量相对较少，故偏重于杀伤；而大口径榴弹则偏重于爆破。

1. M406 杀伤榴弹

40mm M406 杀伤榴弹（图 2-2-1）可配用于 M79 和 M203 榴

弹发射器，它由药筒、弹体和引信三大部件组成，采用高-低压发射原理。

药筒是用铝板冲压而成，形成低压室。药筒底部形成高压室，底火靠紧塞柱与筒底相连。高压室上有六个喷孔，铜孟衬在高压室内，室内装硝化甘油片状药 0.335g。底火发火后，高压药室内的速燃火药燃烧，当压力达到一定时，冲破铜孟，进入低压室，在此压力作用下弹丸被发射出去。高压室最大压力为 246 MPa，低压室压力为 21.1 MPa。初速 76m/s。

M406 的弹体为球形，是用低碳钢板冲压而成，内侧预先滚轧菱形槽线或装上用方截面钢丝预先刻槽后绕制成的衬层。弹体内注装混合炸药（RDX:TNT=60:40）约 36g。

M406 杀伤榴弹 配用 M551 型瞬发引信。发射时，在离心力和惯性力的作用下，引信的离心和惯性保险销解脱，火帽座在弹簧作用下回转 180°，使火帽、击针和雷管对成一直线。弹丸撞击目标时，击针击发火帽，引爆雷管和炸药。引信体外面用 0.5mm 厚的铝壳包覆，使引信灵敏度降低一些，以保证在弹丸飞行中碰到树叶之类的障碍物时不致早炸。

2. 小口径高射榴弹

小口径高射炮一般均为自动装填、连续发射，因此射击速度较高，这对高射武器具有特别重要的意义。因现代飞机速度很高，飞过高炮的对空射界仅几秒钟或略长一点，高炮只有提高

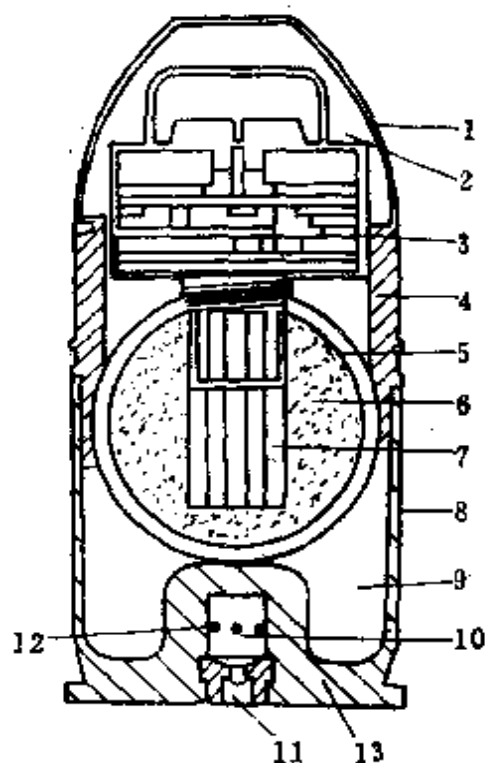


图2-2-1 40mm M406杀伤榴弹

- 1—风帽；2—引信帽；3—引信；
4—连接套筒；5—弹体；6—炸药；
7—雷管；8—药筒；9—低压室；
10—高压室；11—底火；12—喷孔；
13—筒底。

射速才能在有限的时间内多发射炮弹，以增加命中目标的机会。另外就需要尽量提高其初速。因初速提高了射高也将增加，射击范围将增大；同时弹丸命中目标的飞行时间将缩短，这对提高对活动目标的命中率有很大意义。所以目前较新型的小口径高炮初速均在 1000m/s 以上。

图 2-2-2 为 37mm 高射榴弹。它是用 S15A 钢冷挤压成型，材料利用率高，工艺性好。其弹体前部装填炸药，尾部装曳光管。弹体外表面有两条滚沟槽，以保证与药筒结合后有较大的拔弹力。弹带是用环状毛坯收压在弹带槽中，弹带槽不带燕尾，是直槽。弹体内装填黑铝炸药（又称 A-X-2 炸药），其成分为：钝化黑索金 80% + 铝粉 20% ，这种炸药的威力较大，并有一定的燃烧作用。曳光剂成分为：硝酸锶 40% 、镁粉 35% 、铝粉 10% 、粘合剂（树脂等） 15% 。曳光时间 $6 \sim 8\text{s}$ 。

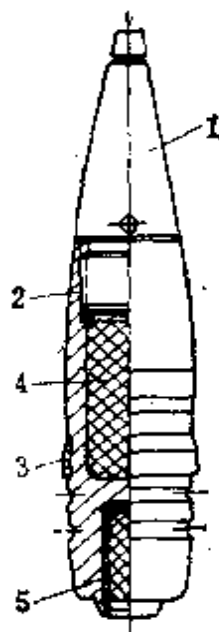


图2-2-2 37mm 高射榴弹

1—引信；2—弹体；3—弹带；4—炸药；5—曳光管。

37 高榴采用榴-1 式引信，它为弹头着发引信，弹丸飞离炮口 20m 左右，引信解除保险，这就保证了炮手的安全。榴-1 式引信有延期机构，可使弹丸侵入飞机体内再爆炸，以增大爆破威力。引信有自炸机构，弹丸如没有遇到目标，经过 $9 \sim 12\text{s}$ 后自行炸毁，以免落地造成危害。

小口径高射榴弹的口径小，威力有限，故需直接命中才能起作用，应增强其爆破作用。大、中口径高射炮射击高度较大，靠直接命中来击毁飞机的可能性较小，因此它们都是利用时间引信或非接触引信在预定空间爆炸，弹丸产生大量破片形成一个杀伤区域，目标如在这个区域中就会遭到破坏。这种方式大大增加了命中目标的机会。毁伤飞机所需的破片动能和破片质量要比杀伤

人员的大得多，一般需要 $100\sim 200\text{kg}\cdot\text{m}$ 的动能，破片质量在 $20\sim 30\text{g}$ 以上较好。所以它们的弹壳厚度应较大，以获得较大的破片动能和杀伤半径。

3. 榴弹的作用

前面已谈到，地面榴弹主要用来破坏野战工事和杀伤生动目标。对于破坏工事，主要靠弹丸的爆破作用来完成；对于杀伤生动目标，主要靠弹丸的杀伤作用来完成。在高射榴弹中，对于小口径高射榴弹主要依靠弹丸的爆破作用来毁伤飞机；对于大、中口径高射榴弹主要依靠弹丸的破片来毁伤目标。

在对于破坏野战工事，通常引信装定在“短延期”上，弹丸击中目标后并不立即爆炸，而是凭借其动能迅速钻入土壤中去。当弹丸侵彻至一定深度时，引信开始引爆炸药。炸药爆炸时形成高温高压的气体，猛烈地冲击周围的土壤介质，并把上部的土壤和工事掀掉，炸出一个很大的弹坑。在这过程中，弹丸先后完成侵彻和爆破作用，侵彻作用只是为了发挥出最大的爆破效果。如果弹丸在地面爆炸，大部分炸药能量都消耗在空中，炸出的弹坑很浅；相反，如侵彻过深，弹丸则在地层内爆炸形成空穴，地表仅隆起，对工事的破坏也不大。因此弹丸的爆破作用要和引信的作用时间相配合。

在杀伤暴露的有生目标时，需依靠弹丸爆炸后形成的高速破片来完成，这就不再希望弹丸在土壤下面爆炸了。而是把引信装定在“瞬发”上，弹丸着地后立即爆炸，破片在空中飞散，可以杀伤目标。

榴弹爆炸后破片的生成是不均匀的，圆柱部分产生的破片数量最多，约占 70% 以上。由于破片主要产生在圆柱部，弹丸的落角不同就会影响杀伤破片的分布。如弹丸垂直爆炸，破片分布近乎一圆形，具有较大的杀伤面积；如弹丸爆炸时有一定的倾角，这时两侧的破片能有效地利用，而上下方的破片则飞向天空和炸入土中，因此破片的有效杀伤区域大致是个矩形(图2-2-3)。

不难看出，离炸点越远，破片的密度越小，因此，目标被杀

伤的可能性也越小。为了衡量弹丸的杀伤威力，通常用“有效杀伤半径”或“有效杀伤面积”来表示。

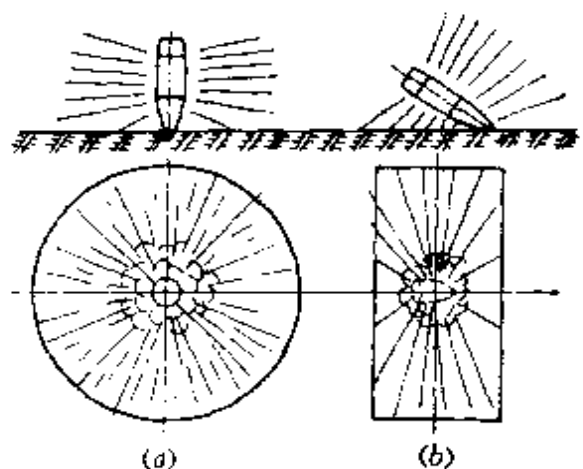


图2-2-3 落角不同的杀伤范围

(a) 垂直爆炸；(b) 倾斜爆炸。

为了杀伤在堑壕内的有生目标，可以采用小射角的跳弹射击。射角小，弹丸的落角也小，一般当落角小于 20° 时，弹丸就会在地面上滑过一条沟而跳飞起来，在空中爆炸，可以杀伤隐蔽地形上的有生目标。跳弹射击时，引信必须装定“延期”。

第三节 空心装药破甲弹

我们知道穿甲弹是依靠弹丸的动能来击穿钢甲，其动能是火药的能量通过武器来赋予弹丸的，因此只有高初速武器才能配备穿甲弹，这往往会使武器过于笨重。空心装药破甲弹是利用炸药爆炸后的聚能效应，使炸药表面的金属罩形成金属射流来破坏装甲，并不需要弹丸有很大的速度，因此这种破甲弹能广泛应用在多种武器上。甚至在枪榴弹、手榴弹和地雷上都得到了应用，起到良好的反装甲作用。

破甲弹不仅可以反装甲装备，也能对付暗堡和工事等。采取一些措施后，还能增大其杀伤威力，成为破甲、杀伤两用弹。

图 2-3-1 为 40mm M433 破甲杀伤两用弹，它配用于 M79 和

M203 榴弹发射器，采用高-低压发射原理。它的弹壳结构和所用发射药与M40 6的相同。弹体与弹带为一整体，装RDX炸药，紫铜药型罩。

发射后在弹丸距膛口14~27m远处引信解脱保险，处于待发状态。弹丸碰击目标，击针刺发雷管，引爆成型装药，产生金属射流和杀伤破片。M433破甲杀伤两用弹在0°时可穿透51mm厚的装甲，并杀伤人员。初速为76m/s，最大射程为400m。

影响破甲作用的因素很多，药形罩的形状、材料，弹丸的口径、转速、炸高以及装药结构等都对破甲作用有影响。对于自动武器弹药所使用的破甲弹，弹丸的口径、长度，药型罩的锥角等都受到一定的限制，设计合理的弹丸装药结构，将会进一步提高其破甲效果。

炸药装药是压缩药型罩使之闭合形成射流的能源。聚能效应属于炸药的猛炸作用（直接接触爆炸作用）范围，故其威力取决于炸药的猛度，即爆轰产物压力冲量的大小及其对罩的作用。在结构合理的条件下，炸药的猛度越大，破甲效果也就越好。炸药的猛度是由它的密度及爆速决定的。为了提高破甲威力，希望装药的密度和爆速都尽量大一些，使得作用于罩的压力冲量大一些，以提高压缩速度和射流速度。

在装药中加入隔板，可以改变爆轰波传播途径，从而改变药型罩的受载情况，提高破甲威力。图2-3-2示出了隔板的作用，图的左半部为无隔板的情况，O点为起爆源。起爆后，爆轰波以球面波的形式传播，经过 Δt 时刻到达罩某一截面与装药交界处

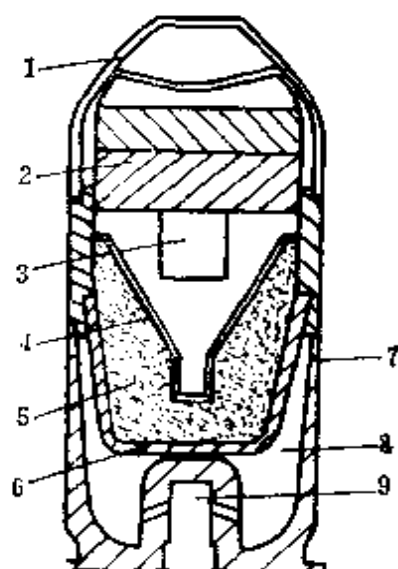


图2-3-1 40mm M433破甲杀伤两用弹结构示意图

1—风帽；2—引信；3—起爆装药；4—药型罩；5—空心装药；6—弹体；7—药筒；8—低压室；9—高压室。

的 A 点, 爆炸产物对罩 A 微元的压力冲量方向即为其矢径 $\overrightarrow{OA}$, 与罩表面成 φ 角。当 $\varphi \leq -\frac{\pi}{2}$ 时, φ 角越大, 则爆轰产物对罩的压力越大。图的右半部为有隔板情况, 经过 $\Delta t'$ 时刻到达同一截面 B 处之爆轰波走的路径是 $ODCB$ (爆轰波通过隔板内部的速度大大减慢), 爆轰产物对罩 B 微元的压力冲量方向为其矢径 $\overrightarrow{CB}$, 与罩表面成 φ' 角。 $\varphi' > \varphi$, 故有隔板时爆轰产物对罩的压力大于无隔板时爆轰产物对罩之压力, 这有利于提高射流速度与射流质量, 从而提高破甲深度。

需要指出的是, 当药型罩锥角较小时, 采用隔板结构效果不明显, 也可能不利。另外采用隔板结构也使装药结构变得复杂, 所以有些口径较大的破甲弹, 在威力能满足要求时, 也不一定要采用隔板结构。

采用低爆速炸药作为“隔板”(图 2-3-3), 也可以改变爆轰波的传播途径, 从而提高破甲效果。

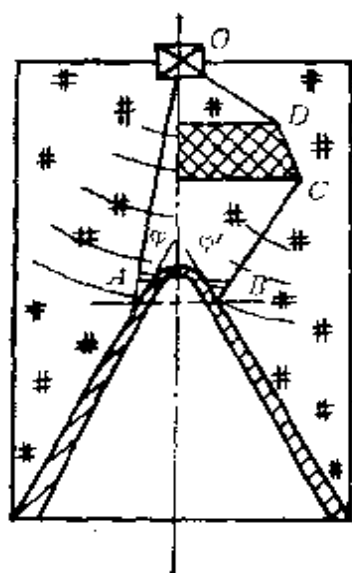


图2-3-2 隔板的作用



图2-3-3 用低爆速炸药制成的“隔板”

第四节 药 筒

药筒（弹壳）是自动武器弹药的重要组成部分。由于习惯上的原因，在枪弹中称为弹壳，而在炮弹中称为药筒。它的出现对武器的发展起了积极的作用，引起了武器的重大革新，使装填大为简化。从而提高了射速，增大了武器的威力，并且为武器向自动化发展创造了有利的条件。

弹壳的作用是把弹头（丸）、底火（火帽）、发射药等组成一个整体，并使全弹在弹膛内确实定位；盛装与密封发射药，防止受潮，并使它具有规定的药室容积；发射时密封弹膛，防止高温高压的火药气体烧蚀弹膛，或从武器尾部冲出。

为了完成上述任务，除对弹壳有一定的尺寸形状要求外，还要求它具有一定的机械性能。这是保证顺利抽壳、牢固固定弹头（丸）和可靠地密封弹膛所必须的。

弹壳的结构、形状、尺寸与武器和发射药都有密切联系。例如弹壳的定位方式会影响武器的结构，弹壳的瓶形系数会影响武器的尺寸和质量，弹壳与弹膛的间隙和最大膛压会影响抽壳性能和弹壳强度等等。

就弹壳本身来说，它是弹药质量中的消极因素，射击后要清理，尤其是那些装在车辆或掩体内的武器，因内部体积小，清理更不方便；另外弹壳要消耗金属。因此，如何改进弹壳，人们正在不断地作工作，例如塑料弹壳、可燃弹壳、无壳弹等方面的研究和使用的即是。

一、弹壳的分类

实际使用中的弹壳种类较多，为便于研究，可以有多种分类方法。按装填方式分，弹壳可分为定装式和分装式，自动武器弹药所用的弹壳皆为定装式。它平时用滚压的方法与弹丸紧密结合成一体，并要求有一定的拔弹力，保证勤务处理和装填时不松动

(图 1-1-1)。发射时一次装入膛内，所以发射速度快。按所使用的材料分，有黄铜弹壳、钢弹壳、铝弹壳、可燃弹壳等。过去应用较多的是黄铜弹壳，由于铜材较贵，现已普遍为钢弹壳所代替。钢弹壳在某些性能上较黄铜弹壳差，但随着生产水平的提高，这些性能正在不断地得到改善。从经济意义上来说，钢弹壳是比较受欢迎的，它来源广、成本低。可燃弹壳是用可燃物制成，射击时在膛内就燃烧完毕，不需退壳，对于简化武器动作、提高射速都是有利的。可燃弹壳有全可燃和半可燃之分，半可燃弹壳带一金属底。

按弹壳在膛内定位方法的不同，弹壳可分为底缘定位、部分底缘定位、斜肩定位、口部端面定位和体部环状突起定位。

底缘定位就是靠弹壳的底缘来限制它在弹膛内的轴向位置(图 2-4-1)。这种定位方式的定位精度仅由底缘厚度公差决定，容易达到。但这种弹壳的底缘突出，增大了炮闩或枪机的横向尺寸，对自动武器而言，会使弹匣的尺寸加大，同时增加了武器的质量。

部分底缘定位(图 2-4-2)和底缘定位的原理基本相同，不同的是在弹壳底部车一底槽，这样就改善了底缘定位的部分缺点。但其底厚增大，使弹壳底部质量约占弹壳全部质量的 45~50%。因此未被广泛采用。日本“三八”式枪弹曾使用过这种定位方式。

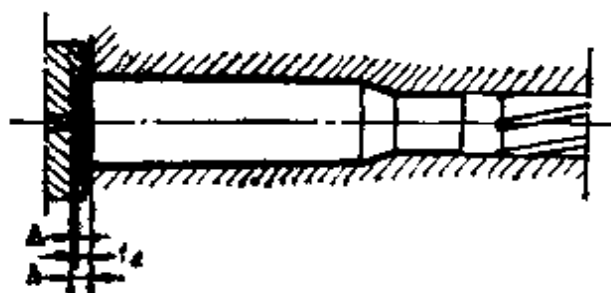


图2-4-1 底缘定位

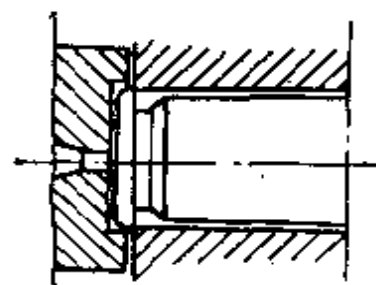


图2-4-2 部分底缘定位

斜肩定位(图 2-4-3)方式是利用弹壳的斜肩支撑在弹膛的相应部位来定位的。由于弹壳斜肩角度和弹膛的相应角度不可能完全相等，因此实际上定位是在斜肩上部或下部。这种弹壳底部

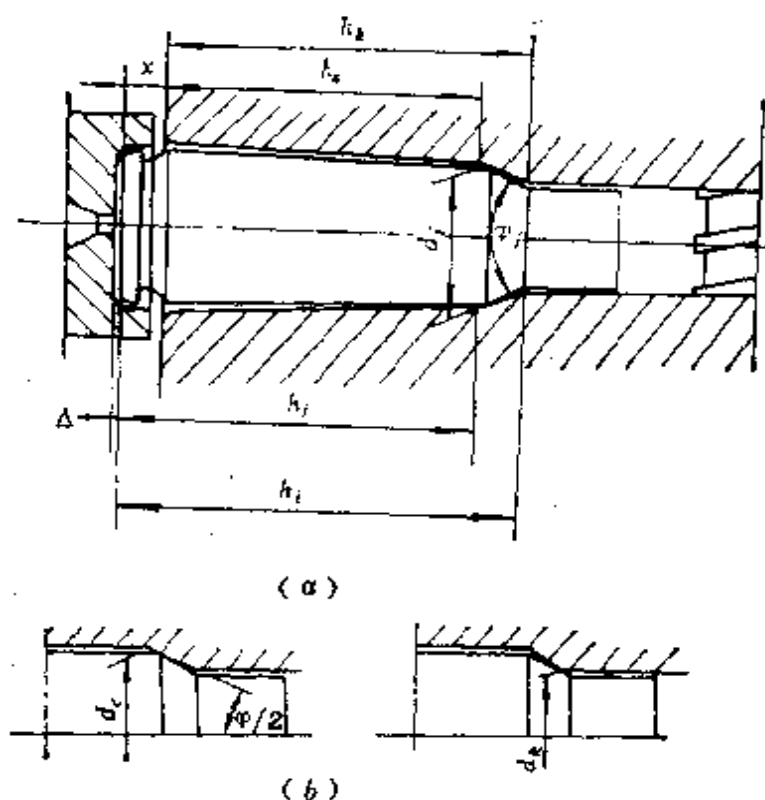


图2-4-3 斜肩定位

(a) 定位在斜肩下部；(b) 定位在斜肩上部。

的直径和体下部直径是相等的。为了便于抽壳，在底部车有底槽。这种定位方式完全克服了底缘定位的缺点，它具有供弹机构简单、横向尺寸小、武器质量轻等优点。同时还可以利用弹壳斜肩的弹性和塑性变形来减少自动机复进到位的冲击。这种定位方式的缺点是弹壳和弹膛的制造精度要求高，另外弹壳底槽若用车削法生产会切断该处金属的“纤维组织”（图2-4-4），影响底缘强度，为防止底缘拉缺，底缘必须加厚。



图2-4-4 弹壳底部金属纤维方向

(a) 纤维未被切断；(b) 纤维被切断。

口部端面定位（图 2-4-5）方式多用于手枪弹。因为手枪弹弹壳大都为圆筒形，没有斜肩。这种定位方式的特点基本上与斜肩定位相同。采用弹壳口部端面定位，不能利用紧口来提高拔弹力，而是用口部点铆。51 式 7.62 手枪弹为瓶形弹壳，它在水枪上是口部端面定位，而在冲锋枪上则利用斜肩定位。

体部环状突起定位方式（图 2-4-6）是在弹壳体下部有一环状突起，依靠它在膛内定位。这种定位方式克服了底缘定位和斜肩定位的一些缺点，但又出现了一些新的缺点：由于体部有环状突起，弹壳底部必须很厚，因而弹壳质量较大，武器尾部直径要增大，冲压加工较困难，弹链供弹困难。这种定位方式有些国家用于小口径自动炮上。

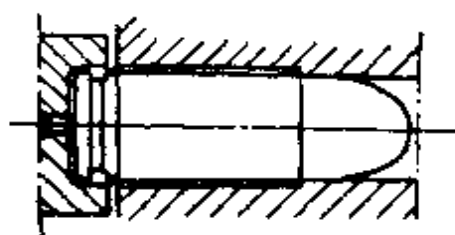


图2-4-5 口部端面定位

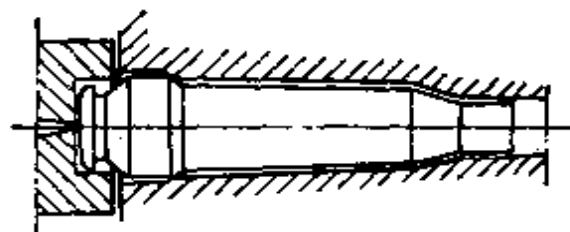


图2-4-6 体部环状突起定位

二、弹壳的构造

定装式弹壳在结构上一般可分为口部（筒口）、斜肩、体部（筒体）和底部等几部分（图 2-4-7）。

1. **口部** 它是用来固定弹头，保持一定的拔弹力，密封发射药，防止受潮；发射时紧贴膛壁，密闭火药气体。弹壳口部的长度对弹壳和弹头的连接强度有影响，口部和弹头的接触面越大，则连接得越牢固，但实际上还受弹头与之相接触部分长度的限制。

从结合强度的观点来看，要求弹壳口部的强度要高一点，材料不容易变形，结合强度就大。但为了可靠地密闭火药气体，口部的强度也不宜过高。

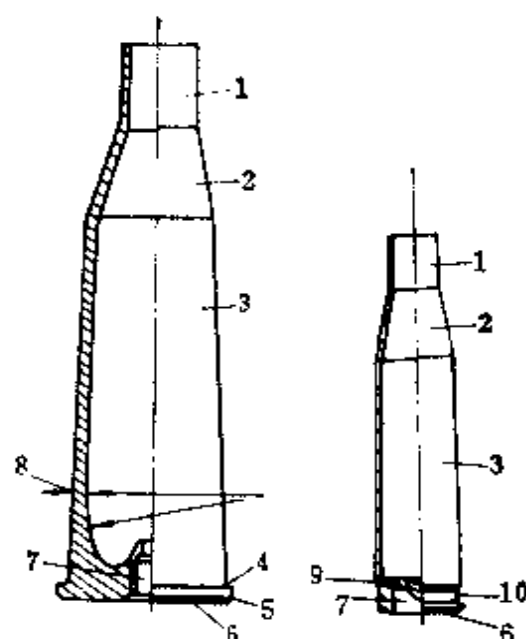


图2-4-7 弹壳的构造

1—筒口；2—斜肩；3—筒体；4—根部；5—底缘；6—筒底；
7—底火室；8—接际部；9—传火孔；10—退壳槽。

弹壳口部的内径略小于弹头处的外径，即有一公盈值，它的大小取决于弹壳与弹头结合的牢固性。通常用拔弹力来检验弹头与弹壳结合的牢固程度。几种弹药的拔弹力如表2-1-1。

表2-1-1 拔 弹 力 表

弹 药 名 称	拔 弹 力 (N)
53 式 7.62 普通弹	343~980
56 式 7.62 普通弹	343~980
56 式 14.5 穿甲燃烧弹	1470~3920
37 mm 高射炮弹	7840

2. 斜肩 瓶形弹壳有斜肩部，它是从口部过渡到体部所必需的，有些弹壳用它在膛内定位。

弹壳斜肩部分的锥度不宜过大，因为锥角过大则进膛困难，弹壳制造时收口也困难；锥角过小则制造误差对斜肩定位误差影响较大，并且在药室容积相同的情况下使弹壳长度增加。

3. 体部 体部用来盛装发射药，它的大小决定了药室容积的大小。为便于抽壳，体部外表面有一定的锥度。

4. 底部 底部一般由底火室、底缘和底槽等组成。底火室的形状与底火的形状、结构有关。一般炮弹药筒的底火室形状见图 2-4-8, 其中图 a 的螺纹是车削加工的, 图 b 的螺纹是铣削而成的。枪弹弹壳底火室(火帽室)的形状见图 2-4-9, 其中图 a 的火台是使底火(火帽)发火用的, 传火孔是底火产生的火焰进入弹壳体内以点燃发射药的通道; 图 b 是使用带火台的底火(火帽)。

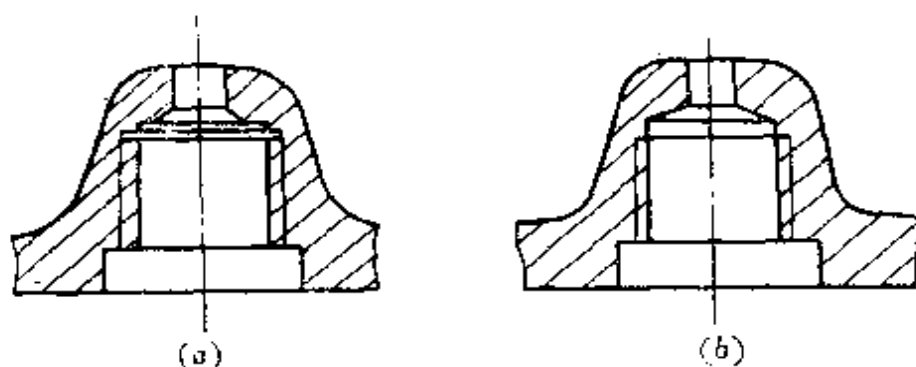


图2-4-8 火炮药筒底火室形状

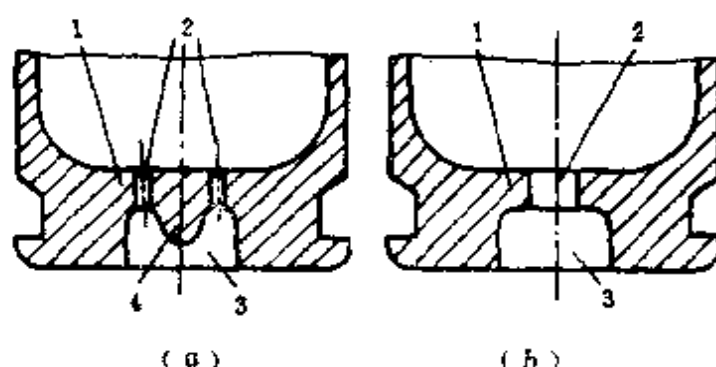


图2-4-9 枪弹弹壳火帽室形状

1—隔板; 2—传火孔; 3—底火室; 4—火台。

三、可燃弹壳、无壳枪弹和高低压弹壳

可燃弹壳(药筒)是采用可燃物制成, 发射时在膛内燃烧完, 无需退壳, 这就简化了武器结构。可燃弹壳可分为全可燃和半可燃两种, 半可燃弹壳(图 2-4-10)带有一个金属的筒底, 以便发射时密闭火药气体。使用全可燃弹壳(药筒), 闭气作用则要在枪机(炮闩)上解决, 这将使武器结构复杂。目前可燃弹壳

的组成成分主要是硝化棉、纸纤维、粘合剂及二苯胺，也可采用其它高能可燃材料与纤维材料混合制造。从内弹道性能上讲，可燃弹壳应为发射药的一部分，在内弹道计算时予以考虑。

无壳枪弹是指不带常规弹壳的枪弹，常规弹壳的功能，分别由枪械和新的装药结构来完成。带全可燃弹壳的枪弹也可视为一种无壳枪弹。

在粒状发射药内加进适当的填料，制成具有较高机械强度的药柱，再与可燃火帽和常规弹头粘结，就制成了无壳弹。根据弹头与药柱的相对位置，可分为非埋入式（见图2-4-11）和埋入式（见图2-4-12）两种。埋入式结构用在口径较大的弹药上较适宜。

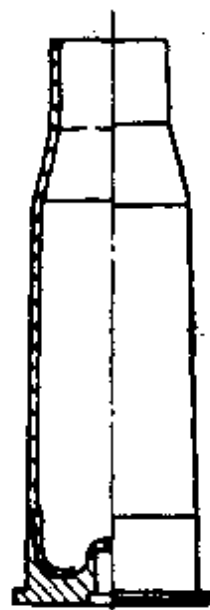


图2-4-10 半可燃弹壳

无壳弹的发展给弹药轻型化创造了良好的条件。金属弹壳约占枪弹全部质量的42~56%，口径越小占的比重越大。对于小口径枪弹金属弹壳占到全弹质量的一半以上。采用无壳弹，可以大大增加战士的弹药携带量。20~30mm无壳弹，全弹质量可减轻约45%。此外，没有弹壳，弹药的尺寸减小了，会使武器的结构简化，尺寸更加紧凑，武器质量减轻，而且有利于提高射速，并适于在战车或飞机等空间有限的场合使用。取消弹壳也会使弹药的加工工艺大为简化，节约了原材料，降低了生产成本。

目前，无壳弹仍然是自动武器弹药研究中的重要项目之一。经多年的努力，取得了一些进展，但性能尚不够完善，现在仍未正式装备部队。

高低压弹壳是为了适应单兵使用的发射榴弹（口径比枪弹大得多）的武器的特殊要求而设计的。图2-4-13为美国M79榴弹枪配用的M406榴弹的高低压弹壳，图a为低速弹壳（初速为76

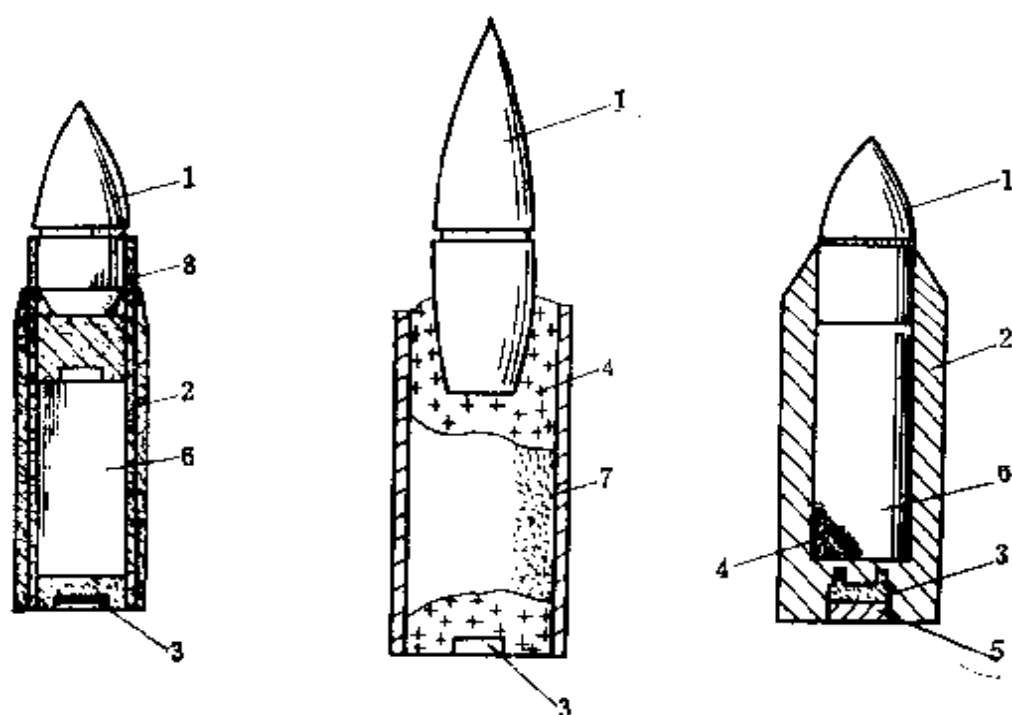


图2-4-11 非埋入式无壳弹

1—弹头；2—发射药柱；3—可燃火帽；4—发射药粒；5—底塞；
6—内腔；7—可燃弹壳；8—支撑管。

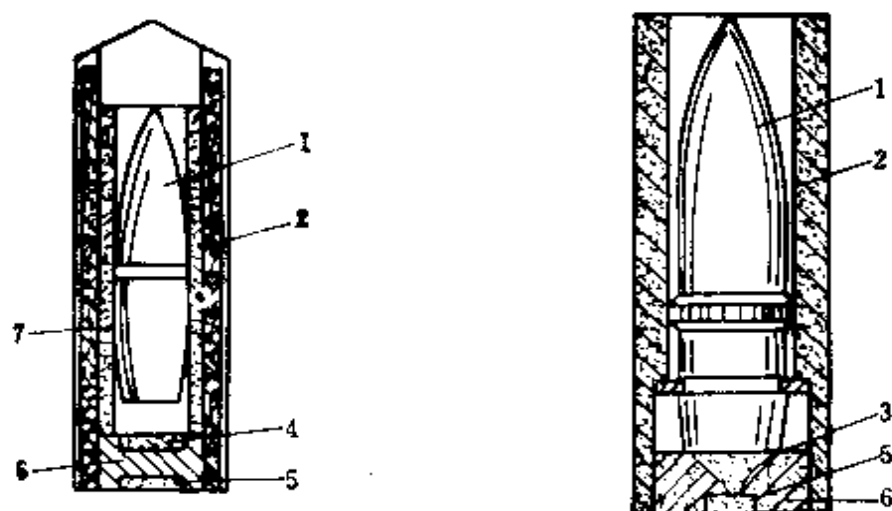


图2-4-12 埋入式无壳弹

1—弹头；2—发射药柱；3—辅助点火药；4—爆炸装药；
5—火帽击发药；6—火帽室；7—支撑管。

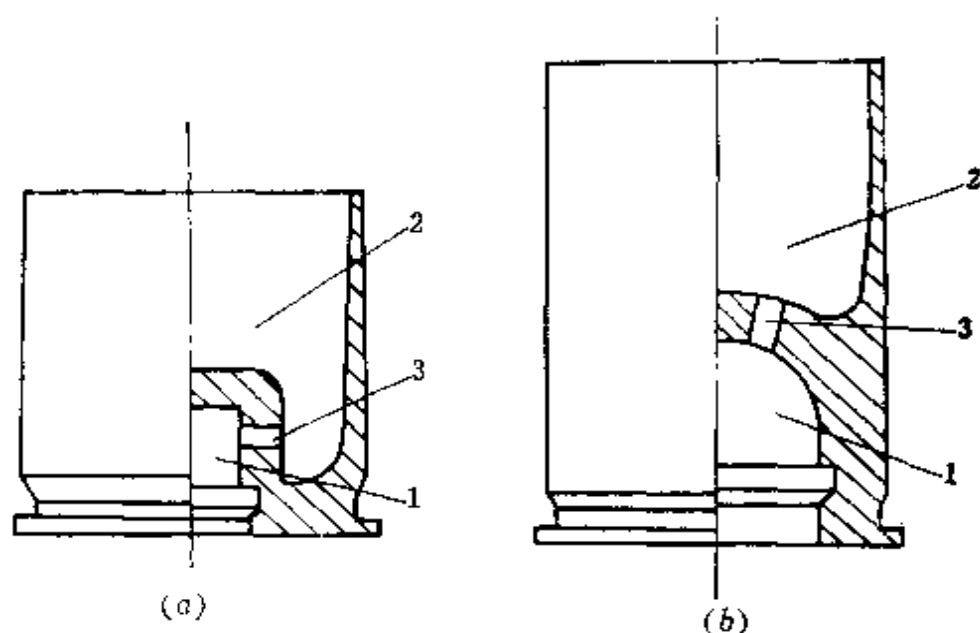


图2-4-13 高低压弹壳

1—高压室；2—低压室；3—喷孔。

m/s)，图b为高速弹壳（初速为244 m/s）。

火药在高压室中燃烧，产生的高温高压火药气体通过喷孔流入低压室，然后推动弹丸运动。这样弹丸是在低压作用下运动，这对于弹丸和武器的强度设计是有利的，可减薄弹壁厚度增加炸药质量。而火药是在高压情况下燃烧，这可保证火药正常点火和燃烧。

但是，在给定初速的条件下，膛压越低，则武器的身管也就越长，这会使武器笨重，操作使用不便，所以这种武器的初速都比较低，弹丸质量系数 C_m 也比较小。

第五节 底 火

火药在受到一定的外来能量后才能引起燃烧，因此自动武器弹药要使用底火（火帽），以便给予冲击冲量（通常是以击针撞击来产生）而产生热冲量，点燃火药装药。

一般口径在25mm以下的弹药可以单独使用火帽（枪弹中称为底火）作为点火具，37mm口径以上的弹药发射药量较大，需

要更大的激发冲量才能保证正常点火，因此往往需要少量的有烟火药作为辅助点火剂。将火帽与有烟火药结合成一体的装置称为底火。

火帽的性能会影响到弹丸的弹道性能，甚至影响武器的发射情况，对它应有一定的要求。

(1) 有适当的感度 感度是指火帽受外力作用而发火的难易程度，要求在一定的冲击冲量的作用下，能可靠发火。

(2) 有良好的点火能力，能可靠地点燃辅助点火药或发射药 点火能力是指火帽发火后能及时点燃辅助点火药或发射药的能力，火帽产生的火焰温度和火焰强度（即火焰长度及燃烧生成物气体的压力）是火帽点火能力的主要标志。火帽的火焰温度愈高，装药愈接近于瞬时发火；火焰强度愈大和作用于发射药的时间愈长，火帽可以点燃的表面愈大。如果火帽点火能力不够，就可能出现迟发火或瞎火现象。

(3) 作用一致 火帽产生的火焰温度和强度对装药的燃烧性能有影响，一般说来，点火能量强度增高会导致膛压增高。为保证弹丸有良好的弹道性能，要求火帽作用一致。

(4) 容易制造，使用安全。

(5) 长期储存性能稳定。

一般的火帽结构见图 2-5-1，底火和枪弹多配用这种火帽，图 2-5-2 是带火台的火帽，它配用在某些枪弹中，这种弹壳的制造就比较容易，不用冲火台。

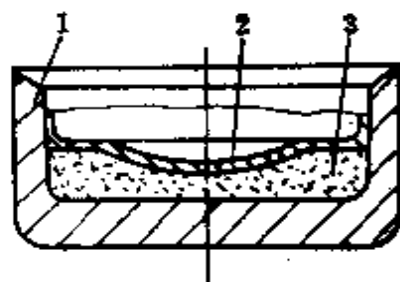


图2-5-1 火帽

1—底火壳；2—锡箔盖；
3—击发药。

图 2-5-3 是一种边缘发火枪弹，它没有专门的火帽，而是将击发药装在弹壳底部，击针直接打击弹壳底部边缘发火。

击发药通常是由雷汞 $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ （起爆药）、氯酸钾 KClO_3 （氧化剂）和硫化锑 Sb_2S_3 （可燃物）混合而成。火帽的点火能力主要决定于击发药的成分比例、药剂质量、混合的均一性和颗粒

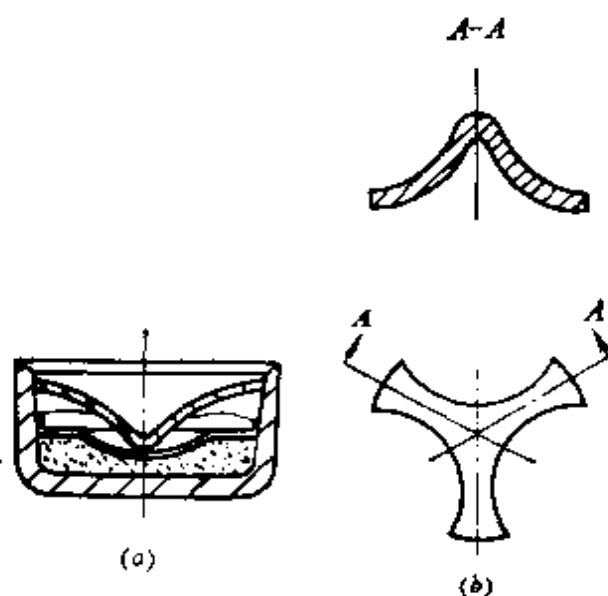


图2-5-2 带火台的火帽
(a) 带火台的底火；(b) 活动火台形状。

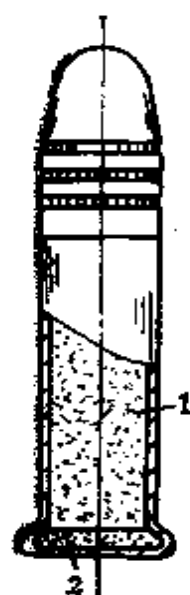
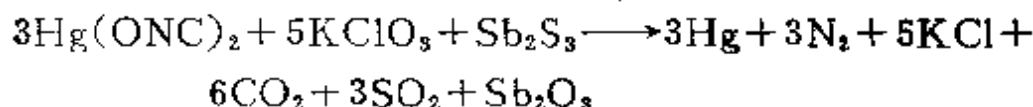


图2-5-3 边缘发火枪弹
1—发射药；2—击发药。

度等。

雷汞击发药的爆炸及燃烧反应可以用下式表示：



雷汞击发药的反应生成物中有汞蒸气，它会凝结在膛壁上与钢及其杂质生成汞剂，使膛壁生成斑疤。另外，汞蒸气附在黄铜药筒上，会使药筒变脆，容易破裂，降低了药筒的复装利用次数。反应生成物中 KCl 、 Sb_2O_3 等固态生成物，对膛壁多次冲刷容易造成膛壁的烧蚀。其中氯化钾易附于膛壁，当受到潮湿空气作用，其中的氯离子也要腐蚀膛壁，这些都会降低武器身管的使用寿命。

雷汞在生产过程中产生的废气、废水、废渣需妥善处理，否则会污染环境。另外，在密闭条件下进行射击时，燃烧产物含有汞蒸气，对人体也有影响。

由于雷汞击发药存在着一定的问题，故已逐渐为无雷汞和无锈蚀击发药所代替。

无雷汞和无锈蚀击发药，一般是以斯蒂酚酸铅加四氮烯、二硝基重氮酚或氧化铅代替雷汞作起爆药；以硝酸钡、二氧化铅或

四氧化三铅等代替氯酸钾作氧化剂；仍保留硫化锑，但引进了硫氰酸铅、铝镁合金粉、硅钙合金、铝粉、锆粉等多种可燃剂。为了调整击发药的感度和猛度，有的增加泰安、梯恩梯等猛炸药。实践证明，采用斯蒂酚酸铅加四氮烯为起爆药，以硝酸钡为氧化剂，硫化锑为可燃剂等组成的无锈蚀击发药制造枪弹底火，对枪管腐蚀大为减小。

底火中的有烟火药量应保证底火有足够的点火能力，使发射药着火确实并得到正常的弹道性能。底火本体应有足够的强度，要能够承受火药气体的压力，防止火药气体由本体冲出。在射击后底火应容易从药筒中取出。底火须保证在运输、勤务处理等情况下的安全。

图 2-5-4 是底-4 式底火，它由底火体、火帽、压螺、发火砧、锥形塞、散装黑药、黑药饼和盖片等组成。底火体用来把各

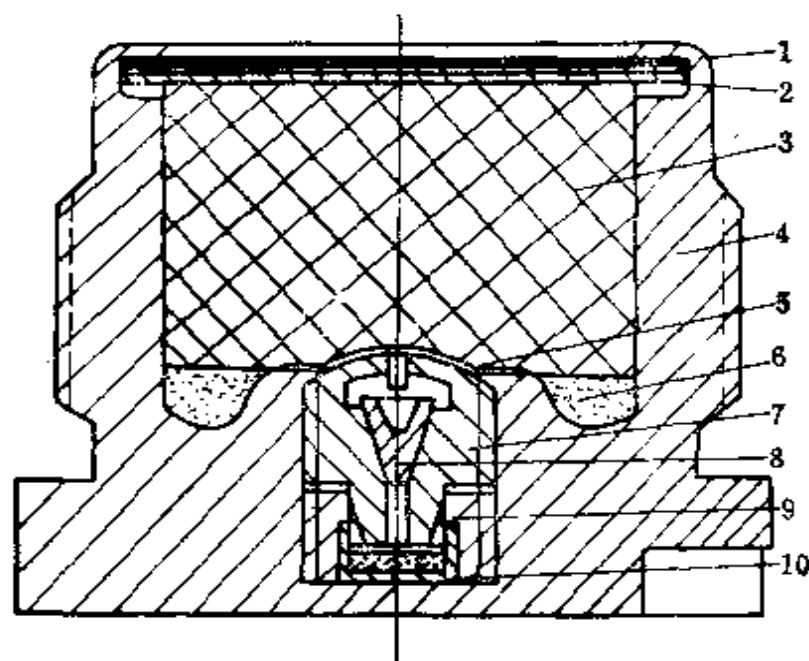


图2-5-4 底-4式底火

- 1—盖片；2—垫片；3—黑药饼；4—底火体；5—纸片；
6—散装黑药；7—发火砧；8—锥形塞；9—压螺；10—火帽。

个组件联结成一个整体，压螺是用来固定火帽。锥形塞装在发火砧的中间，它起到一个单向活门的作用。射击后，气体产物将锥形塞顶起，火焰经锥形塞与发火砧间的空隙去点燃黑药。黑药燃烧后，其气体产物将锥形塞紧压于发火砧内，防止火药气体将底火底部冲穿。底-4 式底火常用在 57mm 到 122mm 口径火炮的药筒上。底-2 式底火在结构上与底-4 式底火完全相同，只是外形尺寸略小，用在口径较小的火炮药筒上。

第三章 装药的基本知识

第一节 自动武器弹药用火药

一、火药的分类

火药的分类方法很多，目前常用的分类方法有以下几种：

(1) 以武器分，可分为枪用发射药和炮用发射药两类。

(2) 以火药燃烧时表面积变化情况分，可分为减面燃烧火药（片状、球状、带状、圆柱状、方条状）、恒面燃烧火药（单孔长管状）、增面燃烧火药（多孔粒状、多孔花边粒状药）。

(3) 以火药的物理、化学性质为基础可分为：

a. 混合火药：所谓混合火药就是以某种氧化剂和某种还原剂为主要成分，并配合其它成分，经过机械混合和压制成型等过程制成的火药。黑火药就是一种典型的混合火药。它是由硝石 75%、木炭 15% 和硫磺 10% 三种成分组成。过去这种火药曾作发射药使用，但因它的能量较小，燃烧后又有较多的固体残渣，使弹膛污染，所以在溶塑火药出现之后，很快被淘汰。然而由于黑火药的着火速度很快，燃烧后所形成的炽热粒子易于起引燃作用，所以目前它仍被广泛地作为点火药用。

b. 溶塑火药：溶塑火药的基本成分是硝化纤维素。任何纤维素脱脂后，用浓硝酸和浓硫酸组成的混酸处理，并经过硝化作用，即可制成硝化纤维素。由于它一般都采用棉花为原料，所以习惯上称它为硝化棉。如果混酸的组成不同，硝化程度又不同，则制成硝化棉的化学组成也就不同。通常都以单位质量硝化棉的含氮量百分数来表示这种组成。现在溶塑火药所采用的硝化棉，

按含氮量来区分，主要有以下三种：

- (a) 1*棉，又称强棉，含氮量为 13.0~13.5%；
- (b) 2*棉，也称强棉，含氮量为 12.05~12.4%；
- (c) 3*棉，又称弱棉，或称胶棉，含氮量为 11.5~12.1%。

硝化棉溶解于某些溶剂后，可以形成可塑体。再经过一系列的加工过程，就可以制成溶塑火药。由于所用的溶剂不同，可制成不同类形的溶塑火药。现代的溶塑火药主要分为三类：

(a) 硝化棉火药。这类火药是用 1*棉和 2*棉的混合物溶于醇醚溶剂中，形成可塑体，压制成型，再经过浸泡，把醇醚溶剂排出，最后烘干制成。火药成品中含有少量的水分和剩余溶剂。为了防止保存期间的分解作用，还附加有像二苯胺这样的安定剂，所以硝化棉火药的成分一般包含有：

硝化棉 94~98%；挥发性溶剂 0.2~5.0%；

水分 0.8~1.5%；安定剂（二苯胺）1~2%。

硝化棉火药按其成分来讲，硝化棉是唯一的主要成分，故称单基药。而按溶剂性质来讲，醇醚是属于易挥发的溶剂，故又称为挥发性溶剂火药。

硝化棉火药在制造成型时，为了使溶剂易于排除，火药厚度不能不受到一定的限制，因而这类火药常应用于中小口径的武器中。这类火药含有挥发性溶剂和具有一定的吸湿性，在保存期间，随着溶剂的挥发和水分含量的变化，将会使火药的弹道性能发生变化。因此，为了保证弹道性能的稳定性，这类火药在保存时应该具有良好的密封条件。

(b) 硝化甘油火药。硝化甘油是一种难挥发的液态爆炸性物质。它可以溶解含氮量较低的 3*硝化棉，形成可塑体。压制成型后也可以制成溶塑火药。这类火药的成分一般包含：

硝化棉 30~60%；硝化甘油 25~40%；

安定剂 1~5%；水分 0.5~0.7%；

其它成分 1~3%。

同硝化棉火药的成分相比较，这类火药具有两种主要成分，

即硝化棉和硝化甘油，故称双基药。从溶剂的性质来讲，这类火药中的硝化甘油是难挥发性溶剂。为了与硝化棉火药的挥发性醇醚溶剂相区别，故又称难挥发性溶剂火药。

同硝化棉火药的性能相比较，这类火药由于在制造过程中没有排除挥发性溶剂的问题，因而生产周期较短，并适于制造厚度较大的火药，所以硝化甘油火药常应用于较大口径的火炮中。又因为硝化棉和硝化甘油的比例可以在较大范围内变化，所以这类火药的能量能满足多种弹道性能的要求，但是这种火药的燃烧温度高，内膛容易烧蚀。此外，在保存期内，硝化甘油易于渗出，出现所谓“渗油”现象，影响安定性，并给贮藏带来困难。

现在的所谓双基药已不单纯指硝化甘油火药。凡是与硝化甘油性质类似的爆炸性物质，并能代替硝化甘油与硝化棉成溶塑体的，都可用以制造双基药。例如以硝化二乙二醇作为硝化棉的溶剂所制成的硝化二乙二醇火药，也称为双基药。

(c) 硝基胍火药。硝化二乙二醇火药的燃烧速度比较慢，如果在其中加入 20~30% 的硝基胍，则可以克服这一缺点。这样制成的火药就称为硝基胍火药。由于硝基胍中含氢和氮比较多，含氧很少，所以其燃烧温度比较低，对内膛的烧蚀较小。因此，硝基胍火药常称为“冷火药”。又因它的主要成分有三种，即硝化棉、硝化二乙二醇和硝基胍，所以又称三基药。

硝化棉与其它三种或三种以上的高能物质组成的火药，则称为多基药。

二、火药的一般性能

1. 火药的均一性

纤维素硝酸酯（俗称硝化纤维素或硝化棉）是火药的主要能量来源。因此，硝化纤维素的结构、性质和火药的结构、性质有直接关系。但由于精制纤维素具有聚合度的多分散性和酯化过程中酯化反应的不均匀性，使硝化纤维素的聚合度和酯化度以及酯基的位置不同，就形成了硝化纤维素的物理和化学的非均一性。从

火药的几何燃烧定律和武器射击过程来看，都要求火药具有良好的均一性，其中首先要求硝化纤维素的聚合度和酯化度尽可能均一，其次是火药制造过程及工艺条件的合理稳定，使所制得的火药形状、几何尺寸、理化性能具有均一性。

2. 火药的物理安定性

组成火药的各组分，除特殊要求外，一般要求均匀分布在火药单体内。如果改变火药组分的分布情况，则火药的性能也将发生变化。在贮存过程中，火药能够抵抗组分发生变化的能力称为火药的物理安定性。火药物理安定性的好坏会影响火药的机械强度、弹道性能、感度等性质，它又与火药的使用、保管、安全等有关。单基火药的物理安定性主要表现在火药中挥发分含量、樟脑含量的分布（对钝感火药）以及火药本身结构的变化上；双基药的物理安定性主要表现为火药本身结构的陈化、难挥发剂的渗出和晶析现象。

3. 火药的化学安定性

火药在贮存过程中，能防止其自然发生化学变化的能力称为火药的化学安定性。火药的化学安定性的变化可能引起一系列不良后果：由于火药的能量减少，机械强度的降低，从而破坏了火药燃烧的规律性，使弹道性能恶化，以致失去使用价值；火药的严重化学分解可引起自燃与爆炸的危险。因此，提高火药的化学安定性，以确保火药在长期贮存过程中的安全和使用价值的不变，具有重大的政治意义和经济意义。

由于周围介质的温度升高，会严重影响火药热分解；而空气湿度的增加则会加速火药的水解作用，所以在火药的贮存过程中必须通风良好，并须控制在较低的温度和湿度条件下。

4. 火药的机械感度

火药在制造、使用、保管、运输过程中都会遇到撞击、摩擦、振动等作用，这些都可能使火药燃烧，甚至爆炸。火药遇到强烈摩擦时产生静电。放电所产生的火花容易引起发射药燃烧甚至爆炸。火药的机械感度一般小于起爆药，而大于猛性炸药（如梯恩梯）。

火药的冲击感度一般取决于其化学成分、性质、物理状态和温度。双基药的机械感度则随硝化甘油含量的增加而增大，单基药的机械感度随硝化纤维素含氮量的增加和温度的升高而增大。表 3-1-1 列出了各种火药的冲击感度。

表 3-1-1 各种火药的冲击感度

火 药 名 称	不同温度下的爆炸率 (%)			附 注
	+50°C	+18°C	-50°C	
梯恩梯	—	8	—	冲击试验： 锤质量10kg， 每项试验50 次，药质量 为 0.2 g
有烟火药	100	100	100	
枪用单基药	88	68	56	
炮用单基药 (N = 12.95%)	92	68	64	
单基火药 (N = 13.2%)	100	80	75	
薄硝化甘油火药 (双迫带状药)	80	50	90	
厚硝化甘油火药 (19/1管状药)	65	45	70	

三、火药的选择

1. 对火药性能的要求

火药是武器发射弹丸的能源，它以化学能的形式把能量贮存起来，在点火具的作用下，有规律地迅速把能量释放出来，并以火药自身燃烧后生成的气体迅速膨胀而向外做功，使弹丸以一定的速度飞向目标，从而达到战术技术要求的目的。火药能量的大小最终表现为武器所作有效功的大小。因此，研究火药的能量，不仅要研究火药所贮存的能量大小，而且还要研究火药化学潜在释放和转化为功时的机理，以及效率的大小。

现代战争对武器提出了很多要求，这些要求都与火药有密切关系，也可以说是对火药的要求，如射程远、威力大、寿命长、机动性好等。这些要求是相互矛盾的，例如要求射程远，就必然提高弹丸的初速；为了满足初速的要求，必然要提高火药的热量或燃烧温度，这就必然引起膛压和膛口压力的升高，而造成后坐力大、精度差、寿命低、抽壳困难等。武器的弹道设计就是要

这些互相矛盾的东西在一定条件下统一起来，即在一定的膛压条件下，保证有足够的初速，从而保证一定的射程和弹丸动能。从火药方面考虑来解决上述矛盾一般有以下几种方法：

(1) 适当增大装药量 在武器质量、机动性许可的条件下，适当增大药室容积和提高火药的假密度，来达到增大装药量从而提高初速的目的。

(2) 提高火药能量利用率 火药能量用于使弹丸作直线运动的仅有 30~35%，热传导和摩擦散热损失约为 20%，尚有 45~50% 的能量未被利用。如何提高火药能量利用率，这是武器设计人员当前艰巨而繁重的研究课题之一。

(3) 提高火药的化学潜能 为了提高弹丸的初速，除提高火药的能量利用率外，从研究火药的观点出发，还应提高火药的化学潜能。为此就必须提高火药力或爆热，但这样做会对武器使用寿命带来一定的影响。因此，应在武器寿命许可的条件下来提高火药的化学潜能，或相应采取弥补武器寿命损失的措施。

(4) 提高火药的比容 身管的寿命受火药气体烧蚀作用影响较大，而其中主要的是燃烧后生成气体的温度（即爆温）。爆温越高，烧蚀越严重，身管寿命越低。因此，对火药的要求是能量高、烧蚀小，即化学潜能大、爆温低。为此必须提高火药的比容，即提高火药燃烧后生成气体的体积，以增大气体膨胀做功的能力，从而达到提高弹丸初速的效果。

综合上述，为满足武器的要求，火药必须具有高能量、低烧蚀的性能。也就是在一定爆温的范围内，尽量提高火药的作功能力，或在一定爆热范围内尽量提高火药气体的比容。

2. 选择火药的原则

选择火药是火药设计工作的一部分。设计火药时，先根据武器的特性和战术指标的要求，选定火药配方进行计算，求出火药力、爆温、爆热、燃速、气体比容和余容，然后计算火药燃烧层厚度，选出合适的药形反复进行试验，并验证所得结果，才能达到预期的目的。

火药的形状应该根据武器的类型、口径和威力来选择。在选择时还应考虑到在满足一定的弹道性能要求下，尽可能使制造工艺简单。

中小口径火炮较广泛使用的火药形状是多孔粒状药如 7/14、11/7 等。这是因为粒状药在弹道性能、制造和装药结构各方面有许多优点。例如增面燃烧，易于混同，易于装填以及装填密度较大等。

步兵武器一般多采用方片状、单孔管状、球形或扁球形火药，这些火药虽然是减面性较大的火药，但是经过钝化之后还是能够适应步兵武器的弹道要求。这类火药的主要优点是工艺简单，便于连续大量生产，装药时流散性好，便于实现装药自动化。通常可根据武器及弹种的具体情况来选取：

(1) 手枪弹、空包弹 此类武器枪管短、药室容积小，要求火药必须具有速燃性，即火药应有高的燃烧速度。为此，要提高火药的热量（即提高硝化棉含氮量或硝化甘油含量），或降低火药热量，增大火药的微孔性，使火药燃烧面积增加，从而提高火药的气体生成速率。在药形上可选用多孔性单基球形药、单基方片药、单孔小管状药，或双基球形药、小粒药、扁球药、方片药等。

(2) 步枪弹 此种武器所用的药粒小，要制成多孔药形火药，在工艺上困难较大，所以制成单孔管状，并用化学方法进行钝感处理，使火药燃烧成渐猛性，从而达到增面燃烧的效果。在钝感处理的同时增加假密度，以增加装药量来弥补钝感处理所损失的部分能量，例如 2/1 樟、3/1 樟等。

(3) 高射机枪弹 这类武器要求初速高、威力大、机动性好，由于武器的口径较大，故可制成多孔形的增面燃烧火药或多孔钝感火药，例如 5/7、4/7、5/7 高樟等。

四、钝感发射药和多气孔发射药

发射药在膛内燃烧时的气体生成速率，与发射药的几何形状、燃烧速度有关。燃烧气体的生成速率逐渐稳定地增加的称渐猛燃

烧，具有渐猛燃烧性质的发射药称为渐猛发射药。如果发射药开始燃烧时气体生成速率较大，随后迅速降低，那末膛内压力也会出现开始骤升，随即迅速下降的现象。如果渐猛发射药与普通发射药在膛内对弹头所作的膨胀功相等，则渐猛性发射药的最大膛压比普通发射药的低。

目前有两种方法可使发射药成为渐猛燃烧：一是控制药形，将发射药制成多孔药形；另一种是将发射药表面钝感，即使发射药表面层渗入缓燃物质，以减慢燃烧初期的气体生成速率。缓燃物随渗入厚度而减少。当缓燃层燃尽后，气体生成速率逐渐增大，形成渐猛燃烧。要制成厚度小于 0.3mm 的多孔药在工艺上有一定困难，故小粒药多采用钝感方法来达到渐猛燃烧。

在单基发射药生产中较常用的钝感剂是樟脑。樟脑是一种含氧量较少的高级碳氢化合物，燃烧缓慢。当它用作钝感剂时，是溶解于酒精中加入的。因此，药粒吸收樟脑后，需要将酒精排出，以免由于酒精的蒸发影响樟脑在发射药中的分布。

在钝感过程中需加入一定数量的石墨，以增加药粒的导电性和减少钝感过程中药粒互相粘结的现象。同时，石墨还可以增加药粒的流散性，有利于装药。

一般都要求单基发射药致密，机械强度好，密度为 $1.58 \sim 1.64 \text{ g/cm}^3$ 。要符合这些要求才能使发射药保持平行层燃烧。在一些短身管武器（如冲锋枪、手枪等）和空包弹中，发射药在膛内的燃烧时间短，采用质量致密的发射药，必须将燃烧层厚度减薄才能保证发射药在弹丸飞出膛口前燃完。但这样薄的发射药在实际生产中存在较大的困难，为了增加燃速，可制成多气孔发射药。这种发射药的燃烧层厚度较大，但组织较疏松，因而燃速增大，所以在短身管武器中仍可以燃完。

制造多气孔发射药，是在胶化时加入水溶性的无机盐——硝酸钾。在压制成型并将溶剂驱出后，用水将硝酸钾浸出。这样，药粒就形成了大量均匀的小孔。药粒中孔的大小和数量取决于加入硝酸钾的细度和数量。孔细而多的药粒，燃烧面要大些。表

3-1-2 列出了几种多气孔发射药的性能和用途。

表3-1-2 几种多气孔发射药的性能和用途

火药标志	燃烧层厚度 (mm)	孔径 (mm)	长度 (mm)	全挥发率 (%)	外挥发率 (%)	硝酸钾含量 (%)	用途
多-45	0.27~0.37	0.10~0.20	< 1.3	< 1.8	1.0~1.6	< 0.1	51式7.62手枪
多-60	0.32~0.38	0.10~0.20	0.5~0.7	< 2.0	1.0~1.8	< 0.1	标准12mm、 16mm猎枪
多-125	0.30~0.40	0.10~0.20	< 1.1	< 2.0	1.0~1.8	< 0.1	9mm手枪、 5.6mm小口径 运动步枪

五、发射药的标志

自动武器弹药常用的发射药形状有：单孔或多孔粒状药、球状药、片状药和多气孔药等，它们的尺寸和形状按以下方法标志：

(1) 单孔或多孔粒状药：用分式表示，分母表示药粒的孔数，分子表示药粒燃烧层的近似厚度，以 $1/10\text{mm}$ 为单位。如：“2/1”表示单孔粒状药，燃烧层厚度近似为 0.2mm ；“5/7”表示七孔粒状药，燃烧层厚度近似为 0.5mm 。

(2) 片状药：用数字中间夹“-”及“×”依次表示近似厚度、宽度和长度。厚度以 $\frac{1}{100}\text{mm}$ 为单位；宽度、长度以 mm 为单位。如：

“10-1×1”表示厚度约 0.1mm ，宽度和长度约为 1mm 的片状药。

(3) 多气孔药：用“多”字表示，横线后面的数字表示在胶化时加入硝酸钾为硝化棉含量的近似百分数。如：

“多-125”表示在胶化时加入约 125% 的硝酸钾制成的多气孔药。

(4) 球形药：用“球”字表示，后面的数字依次表示平均外径和假密度（单基球形药无此项）。平均外径以 $\frac{1}{100}\text{mm}$ 为单

位；假密度以 $\frac{1}{100} \text{ g/cm}^3$ 为单位。如：双球 45-85 为双基球形药的标志，单球-35 为单基球形药的标志。

(5) 小粒药：用“粒”字表示，后面的数字表示厚度，以 $\frac{1}{100} \text{ mm}$ 为单位。如“双粒 14”表示双基小粒药，其厚度约为 0.14mm。

为了区分硝化棉含氮量的不同，或含有其它附加物，或进一步标明形状，则在标志后面常附加一些文字作为辅助标记：

(1) 由不同类型含氮量的混合硝化棉制成的两种药型近似的药，其标志后加上“高”或“低”字以示区别。如“5/7 高”是指比一般 5/7 药的混合硝化棉的含氮量高；

(2) 用樟脑钝感处理过的药，在标志后加“樟”字，如 2/1 樟；

(3) 用石墨光泽过的药，在标志后加“石”字；

(4) 含有地蜡，表面又经石墨光泽过的药，在标志后加“蜡石”，如 4/7 蜡石；

(5) 含有松香（起消焰作用）的药，在标志后加“松”字，如 6/7 松；

(6) 花边形多孔药，在标志后加“花”字，如 7/14 花，表示花边形十四孔药，药厚约为 0.7mm。

第二节 猛炸药的选择

一、炸药爆炸的特征

现以雷管引爆炸药为例。当雷管引爆后，炸药在瞬间形成一团烟雾，出现强烈的火光，伴随有声响效应，在爆炸点附近的介质和建筑物受到破坏、震动和位移。在上述过程中出现强烈的火光，说明炸药爆炸过程是放热的，因而形成高温而发光；爆炸是瞬间完成的，表明爆炸过程是极迅速的；烟雾的产生表明炸药爆炸

过程中产生大量的气体和固体微粒；高温高压气体的迅速膨胀，则是周围介质和建筑物受到破坏、震动和位移的根本原因。所以炸药爆炸过程有三个特征：放热性、迅速性（或瞬时性）、生成大量的气体产物。

爆炸过程放出大量的热是爆炸反应具备的第一个必要条件，对于这一点所有炸药都没有例外。没有这个条件，爆炸过程就根本不能发生，因此也就不可能出现爆炸过程的自动传播。

反应过程的迅速性也是炸药爆炸变化的必要条件，并且是更重要的条件。它是爆炸过程区别于一般化学反当过程的重要标志。就单位质量物质的放热性而言，炸药比不上普通的燃料，但是普通燃料燃烧时，一般都不具有爆炸的特征。其根本原因在于它们的反应过程进行得很慢。例如煤炭燃烧反应的放热量为 8.928 MJ/kg ，苯燃烧放热量为 9.337 MJ/kg ，而梯恩梯的爆炸反应放出的热量只有 4.187 MJ/kg 。前两者反应完了所需的时间为数分钟或更多一些时间，燃烧反应速度慢，生成的气体、放出的热量能立即扩散到周围介质中去。而后者仅需要十到几十微秒的时间，反应放出的热量来不及向外扩散，这才能使生成的气体产物具有高温高压，在膨胀过程中对外做功。

反应过程中生成大量的气体也是一个重要因素。如若一个反应过程不生成大量的气体物质，那么，爆炸瞬间就不能造成高压状态，因此也就不可能产生由高压到低压的膨胀过程及爆炸破坏效应。只有反应过程生成大量的气体产物，才能在高温下形成高温高压的气体，将热能转变为机械功。

放热性给爆炸变化提供能源，反应迅速性则使有限的能量迅速地放出，因此放出的能量集中，功率大。反应生成大量的气体产物是能量转换的工质。三个特征必须同时具备。

二、炸药的分类

炸药的品种很多，按照它在武器中的用途可以分为以下四类：

1. **起爆药** 是一种对外界作用很敏感的药剂，在较小的分

界作用（机械作用或热作用等）下，就能引起爆炸变化。这类炸药的特点是感度大，一般用于装填各种起爆器材和点火器材，如火帽、雷管等。它常用来引爆其它高级炸药，使之发生爆炸变化。

常用的起爆药有：雷汞、迭氮化铅 $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 、斯蒂酚酸铅 $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}$ 、二硝基重氮酚 $\text{C}_6\text{H}_2\text{N}_2\text{O}(\text{NO}_2)_2$ 以及特屈拉辛 $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_{10}\text{O}$ 等。

2. 猛炸药 与起爆药相比，它的特点是 比较不敏感，即需要较大的外界作用才能引起它的爆炸。猛炸药通常用起爆药来引爆。它的另一个特点是，爆炸时对周围介质有强烈的破坏作用，故用作爆炸装药，装填各种弹体和爆破器材等。

常用的猛炸药有梯恩梯（三硝基甲苯） $\text{CH}_3\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3$ 、特屈儿（三硝基苯甲硝胺） $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}(\text{NO}_2)_4$ 、黑索金（环三亚甲基三硝胺） $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$ 、和泰安（季戊四醇四硝酸酯） $\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4$ 等。

3. 火药（发射药） 接受一定的能量进行有规律的燃烧，产生高温高压的气体，用于对弹丸做抛射功。

常用的火药有硝化棉火药、硝化甘油火药和黑火药等。

4. 烟火剂 烟火药在一般使用条件下，受到外界作用后发生燃烧反应时，发出相应的烟火效应（焰火、强光、烟幕等）。烟火剂包括照明剂、信号剂、曳光剂、燃烧剂及烟幕剂等，用以装填特种弹药。

按组成分类，炸药可分为单质炸药和混合炸药。

1. 单质炸药（又称爆炸化合物） 这类炸药大多数都含氧的有机化合物，如梯恩梯、特屈儿、黑索金、泰安等。

2. 混合炸药 它是由两种或两种以上的成分组成的混合物。一种为含氧丰富的成分（或称氧化剂），另一种为不含氧或含氧较少的成分（或称可燃物），以一定的比例均匀混合，有时加入某些附加物，用以改善炸药的爆炸性能、安全性能、机械力学性能、成型性能以及抗高、低温性能等。

混合炸药可分为爆炸气体混合物、液态混合物、固体混合物以及多相混合物。爆炸气体混合物由于它的爆炸能量密度小等原因而较少应用，目前应用最广泛的是固体混合炸药。

三、炸药的爆炸作用

1. 炸药的作功能力 在理论上，炸药的作功能力即炸药的位能，只决定于炸药的爆热。而实际上，炸药作功能力还与炸药的比容有关。这是因为爆炸气体产物是作功的工质，工质很少时，热能就不能充分转换为机械功，比容较大时，工质多，热能转换为机械功的效率也较高，即能量损失较少。因此，比容大的炸药在实际上做的功比较大。在考虑如何提高炸药的实际作功能力时，需要从增加爆热与增加比容这两个方面去考虑。为此，梯恩梯或黑索金中加入铝、镁等金属粉，以及在梯恩梯中加硝酸铵等都能够大大提高炸药的作功能力。

炸药的作功能力常用铅铸法来测定，即以一定量的炸药在铅铸孔中爆炸，按爆炸气体产物膨胀所引起的铅铸扩孔的体积数值大小来判断和比较炸药的作功能力。

2. 炸药的猛度 炸药爆炸的直接作用或猛炸作用的能力称之为炸药的猛度，决定炸药猛度的因素，主要是爆炸产物压力的大小及其作用时间的长短，即决定于爆炸产物作用于目标的压力和冲量。

炸药的猛度通常用铅柱压缩法测定。用一定尺寸的铅柱，炸药置于端面，爆炸后铅柱被压缩成蘑菇形，测出铅柱压缩前后的高度差，高度差大，则猛度大。以此来比较炸药猛度的大小。

炸药的作功能力是炸药总的破坏能力，猛度是局部的破坏能力。对于单质炸药，一般作功能力大的，猛度也大。但是，有一些混合炸药同单质炸药相比，作功能力大的猛度并不一定大。

3. 炸药的感度 炸药是一种能够发生爆炸变化的物质，但它同时具有一定的稳定性，要引起炸药的爆炸变化，还必须给予一定的外界作用。炸药的感度表示在外界作用下，炸药发生爆炸

变化的难易程度。炸药的感受度大，表示在较弱的外界作用下，就能引起它发生爆炸变化。外界作用的形式很多，一般常见的有，机械作用（冲击、摩擦、针刺、射击）、热作用（均匀加热、火焰、电火花）和爆炸作用（爆炸的直接作用、冲击波、破片）等。炸药对不同的外界作用有不同的感受度，如冲击感受度、摩擦感受度、针刺感受度、热感受度、火焰感受度、冲击波感受度、爆轰感受度等。

各种炸药对不同形式的初始冲能具有一定的选择性，如起爆药特屈拉辛对机械作用很敏感，而史蒂酚酸铅对火焰作用很敏感。

同一种炸药激起爆炸所需的某种形式的能量，也不是一个严格固定的值。它随着加载的方式、加载的速度不同而不同。如静压力作用条件下需要很大的能量才能使炸药爆炸。而冲击压力作用条件下，只需较小的能量。

同一种炸药的各种不同的感受度之间没有一个当量关系。炸药的感受度不仅和炸药本身的物理化学性质有关，而且和炸药的物理状态有关。如压装的和注装的梯恩梯爆轰感受度是不相同的。

炸药的热感受度通常用发火点（爆点）来表示，即指在一定的试验条件下，将炸药加热到发火所需加热介质的最低温度。为了比较各种炸药热感受度的大小，必须固定一个延滞期，一般采用5 s（或5 min）延滞期发火点。如果超过5 s才发火，则须增高温度；如果不到5 s就发火，则须降低温度。

炸药的冲击感受度，一般用落锤试验来测定。即以一定质量的锤在一定落高下，冲击一定质量的炸药，以其爆炸百分数来表示。

炸药的爆轰感受度，也就是对起爆药的爆炸感受度。起爆感受度的大小一般用极限起爆药量来表示，即一定量（1 g）的猛炸药完全爆轰所需的最小起爆药量。

四、几种常用的猛炸药

1. 梯恩梯

（1）性能

梯恩梯学名三硝基甲苯，缩写为TNT。它是淡黄色的结晶

物质，工业生产的是片状，在阳光照射下，会逐渐变成褐色。这是由于紫外线的作用，发生光学异构化而生成了敏感的化合物。这种化合物对梯恩梯的质量有很大的影响。

梯恩梯的密度为 1.66 g/cm^3 ，假密度为 0.9 g/cm^3 ，当压力为 300 MPa 时，它可压缩到 1.6 g/cm^3 ，熔铸的密度是 $1.55 \sim 1.59 \text{ g/cm}^3$ 。

纯三硝基甲苯的熔点为 80.9°C ，它在熔化时不分解，故可用熔铸法来装填弹丸。

它的吸湿性很小，一般为 0.05% ，难溶于水，但易溶于一般有机溶剂和硝酸、硫酸中。

它与金属不起化学反应，但和碱类反应能生成比梯恩梯更敏感的爆炸性物质。

梯恩梯的化学安定性好。在 150°C 时它开始缓慢分解，到 200°C 才急剧分解。它的 5 s 钟发火点为 475°C 。在空气中被点燃时，只冒大量烟而燃烧。

梯恩梯的机械感度很低，在立式落锤仪上试验，当锤质量 10 kg ，落高 25 cm 时，冲击感度为 $4 \sim 8\%$ 爆炸。

压装的和熔铸的梯恩梯的起爆感度是不同的：对压装的，雷汞的极限起爆量为 0.36 g ，迭氮化铅为 0.09 g ；而对熔铸的，则用 1 g 雷汞也不能使它爆炸，因此需用其它威力更大的猛炸药作传爆药柱来引爆它。

梯恩梯的爆速为 6700 m/s （当密度为 1.5 g/cm^3 时），铅铸扩张值（威力）为 285 ml ，铅柱压缩量（猛度）为 13 mm ，比容为 730 l/kg ，爆热为 4.187 MJ/kg 。

梯恩梯是一种有毒物质，多数是通过皮肤沾染和呼吸道吸入而使人中毒。但只要工房有良好的通风设备，并按规程操作，基本上可以避免中毒事故发生。

（2）用途

a. 梯恩梯可装填各种炮弹、航弹、手榴弹等弹药作爆炸装药，以及用于各种爆破器材。

b. 它可与多种炸药混合作混合炸药用, 例如和二硝基萘混合成“梯萘炸药”, 可装填迫击炮弹; 和硝酸铵混合成“铵梯炸药”, 在战时装填各种炮弹; 和一些威力较大的炸药如黑索金混合为“黑梯炸药”, 用于装填破甲弹等。

2. 特屈儿

(1) 性能

特屈儿学名三硝基甲硝铵。它是淡黄色结晶物质, 密度为 1.78 g/cm^3 , 假密度为 $0.9 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$, 它很容易被压缩到 $1.60 \sim 1.65 \text{ g/cm}^3$ 。当压药压力为 200 MPa 时, 密度可达 1.71 g/cm^3 。

特屈儿的熔点为 127.9°C , 但在溶化时稍起分解, 故不能用熔装方法来装填弹丸。

特屈儿不吸湿, 也不溶于水, 很难溶于乙醇, 但易溶于苯和二氯乙烷, 特别易溶于丙酮, 它与金属不起化学作用。

特屈儿的安定性比梯恩梯稍差些, 但在常温下储存有足够的安定性。在空气中燃烧猛, 5 s 钟的发火点为 257°C 。

特屈儿的威力大于梯恩梯, 起爆感度比梯恩梯高, 其极限起爆药量为: 雷汞 0.29 g ; 迭氮化铅 0.03 g 。

它的爆速为 7000 m/s (当密度为 1.63 g/cm^3 时), 冲击感度为 $50 \sim 60\%$ 爆炸, 铅铸值为 340 ml , 铅柱压缩值为 19 mm , 比容为 765 l/kg , 爆热为 4.605 MJ/kg 。

它的毒性比梯恩梯大, 在生产和使用时应予以注意。

(2) 用途

主要用于各种弹药的传爆药柱和雷管中的第二装药, 以及小口径炮弹的爆炸装药或与梯恩梯混合作弹丸装药。因其毒性较大, 成本又较高, 现已渐趋淘汰。

3. 黑索金

(1) 性能

黑索金学名环三亚甲基三硝胺, 代号为 RDX。它是白色结晶物质, 密度约为 1.8 g/cm^3 , 假密度为 $0.8 \sim 0.9 \text{ g/cm}^3$ 。工业

用的黑索金为细晶粉末，很难压缩。因此，常用钝化剂（提净地蜡 60%、硬脂酸 38.8%、油溶性染料 1.2%）来钝化。这样，既能降低对外界作用的感度，又能改善其压缩性（可被压缩到密度为 1.65 g/cm^3 ）。

纯黑索金的熔点为 203°C ，但在熔化时随即分解。

黑索金不吸湿，不溶于水，也不溶于一般有机溶剂，只在丙酮或浓硝酸中溶解性较好，故可作为重结晶的溶剂。稀硫酸或苛性碱与黑索金煮沸较长时间，可使其水解，在生产上常用来处理废药和清洗生产设备。它与金属不起化学作用。

黑索金的安定性好（稍次于梯恩梯）。它的 5 s 发火点为 260°C 。少量黑索金在空气中燃烧较猛烈，烟较少。1kg 以上的黑索金燃烧时，往往因急速受热分解而导致爆炸。

黑索金的机械感度比特屈儿高。在落锤仪上试验，冲击感度为 70~80% 爆炸。黑索金的起爆感度也较特屈儿高，起爆极限药量为：雷汞 0.19 g，迭氮化铅 0.05 g。

黑索金在威力方面超过特屈儿，是威力较大的炸药之一。未钝化的黑索金的爆速为 8660 m/s （当密度为 1.755 g/cm^3 时），铅铸扩张值为 475ml，铅柱压缩值为 24mm，比容为 910 l/kg ，爆热为 5.527 MJ/kg 。

黑索金也是一种有毒物质，但比梯恩梯和特屈儿的毒性小。一般经呼吸道、消化道或经皮肤吸收后，在肌体内积储，有一定的潜伏期。只要生产和使用时加以注意，其中毒是可以预防的。

（2）用途

由于黑索金的威力大，又有很好的起爆感度，原料基地广，且非常安定，因此应用较广泛。

为了扩大黑索金的使用范围，常采用以下三种处理方法：

a. 加入钝感剂：常用的钝感剂有石蜡、地蜡、蜂蜡等。将少量钝化剂包覆在黑索金颗粒表面，可降低其冲击感度。如 A-Ⅷ-1 炸药，是在黑索金中加入 5.5~6.5% 的提纯地蜡及硬脂酸后制成的。它可作为中、小口径炮弹、火箭弹及航空弹药的爆炸

装药；

b. 和其它钝感炸药混合：如“黑梯炸药”(TNT50~60%、RDX50~40%的熔合物)，可用于空心装药破甲弹的装药；

c. 制成塑性炸药：以黑索金为主体，加入少量粘合剂及增塑剂等制成具有塑性的混合炸药（可以任意捏合与成型），是一种比较优良的爆炸装药。例如“塑-1炸药”（黑索金：聚醋酸乙烯酯：环氧树脂：磷酸二苯异辛酯=92:1.6:2.7:3.7），用于碎甲弹的装药及爆破药包等。

此外，黑索金还可作传爆药柱、雷管的第二装药和导爆索的心药等。

4. 泰安

(1) 性能

泰安学名季戊四醇四硝酸酯，有时也称膨梯儿。它是白色结晶物质，密度为 1.77 g/cm^3 ，假密度为 $1.2 \sim 1.3 \text{ g/cm}^3$ ，但经压缩密度可达 1.70 g/cm^3 。

纯泰安的熔点为 142°C 。在熔化时开始分解，故不能熔装，但它能溶于梯恩梯中，可将其作成熔合物来使用。

泰安不吸湿，也不溶于水和乙醇，但易溶于丙酮。它与金属不起化学作用。

泰安的安定性较好，在加热到 170°C 时会冒黄烟分解。少量泰安在空气中能猛烈燃烧，可产生无烟的光亮火焰。如超过 1kg 时，可由燃烧转为爆炸。泰安的 5s 发火点为 225°C 。

在机械感度方面，它是常用的猛炸药中最敏感的一种。它在落锤仪上试验时会 100% 爆炸。起爆感度为：雷汞 0.17 g ，迭氮化铅 0.03 g 。

由于泰安过于敏感，若用来装填弹药时，需用石蜡等钝化剂钝化，或与其它钝感的炸药如梯恩梯混合才能使用。

未钝化的泰安爆速为 8600 m/s （当密度为 1.77 g/cm^3 时），铅铸扩张值为 470ml ，铅柱压缩值为 24mm ，比容为 790 l/kg ，爆热为 5.799MJ/kg 。

泰安稍具毒性，能使人体血压降低，并引起呼吸短促等病状，但影响不显著。

(2) 用途

它用作雷管的第二装药、导爆索的心药和传爆药。钝化过的泰安或和其它钝感炸药混合，可作为小口径高射炮弹、火箭弹等的装药。

5. 奥克托金

(1) 性能

奥克托金学名环四亚甲基四硝胺。它是白色结晶物，密度 1.902 g/cm^3 。

奥克托金的熔点为 $276 \sim 277^\circ\text{C}$ ，它的热安定性比黑索金更加安定，特别是较高温度时，与梯恩梯相近。在 230°C 下加热 100min 不分解。奥克托金有四种晶型，其中以 B 型最稳定。

奥克托金不溶于乙醇、苯、甲苯等，在硝基苯中溶解度也很小。可溶于丙酮。

奥克托金的 5s 发火点为 327°C ，它的冲击感度为 100% 。起爆感度为：氯化铅 0.3 g 。

奥克托金的爆速为 8917 m/s （当密度为 1.85 g/cm^3 时），铅铸扩张值为 486ml ，爆热为 5.652MJ/kg 。

奥克托金的化学结构类似于黑索金，但它的结晶密度高，因此能达到更高的爆速和爆压。它是目前高爆速炸药中性能较好的一种。它的机械感度高，可加入钝感剂加以改善。

(2) 用途

将奥克托金作为混合炸药的主体炸药，可应用于破甲弹的装药。奥克托金的主要缺点是生产率低，周期长，成本高。

第三节 烟火剂

烟火剂一般是由氧化剂、可燃物和附加物混合而制成，用以装填特种弹药。这里主要介绍在自动武器弹药中常遇到的曳光剂、

引燃剂和燃烧剂等。

一、曳光剂和引燃剂

曳光剂是由氧化剂（兼作染焰剂）、燃烧剂和粘合剂混合而成。

氧化剂在分解后产生氧，使燃烧剂燃烧。在曳光剂中，通常氧化剂又兼作染焰剂。在引燃剂中，一般采用强氧化剂如过氧化钡和硝酸钡等，以提高对火焰的感度。

可作红色染焰剂的盐类有：硝酸锶、氯酸锶、碳酸锶和草酸锶。钙盐燃烧的颜色是橙色或玫瑰色，它在不同的烟火剂中能起调色的作用。氯酸锶发光性能好，但机械感度大，吸湿性大。硝酸锶比氯酸锶钝感，吸湿性小，但它的火焰比色纯度较氯酸锶稍差。

可作绿色染焰剂的有：硝酸钡、氯酸钡、碳酸钡和草酸钡。铜盐也能使火焰呈碧绿色，但因吸湿性太大，未能得到应用。

为了使可燃物完全燃烧，必须有足够的氧化剂供氧。如供氧不足，则燃烧不完全，会产生有色气体生成物（烟），影响火焰颜色。

可燃物燃烧时应能产生持久的高温火焰，使曳光弹在高速旋转和飞行中火焰不易熄灭。通常用镁或铝镁合金粉作曳光剂中可燃物。它燃烧产生极高的温度，使锶或钡盐变成蒸汽，显示出红色或绿色火焰。

因铝不易点燃，故不单独使用。曳光剂中的可燃物不宜过多，否则会降低颜色浓度。

粘合剂通常采用虫胶、酚醛树脂或松脂酸钙。虫胶也是一种较好的可燃物。粘合剂可改善装药工艺性能，提高药剂的防潮能力和药柱的机械强度，在燃烧时不易破碎和散落，减缓燃烧速度，降低药剂的感度。

曳光剂和引燃剂中几种常用成分的主要性能。

1 硝酸锶 ($\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$) 白色或微黄色结晶粉末，密度

2.9 g/cm³，熔点 645°C，吸湿，溶于水，是氧化剂兼红光剂，火焰呈红色，混成曳光剂后敏感。

2 碳酸锶 (SrCO₃) 白色粉末，密度 3.6 g/cm³，微溶于水，在 1300°C 时分解为氧化锶和二氧化碳，火焰呈红色。

3 过氧化钡 (BaO₂) 白色或稍有褐色的粉末，密度 4.96 g/cm³，熔点 450°C，难溶于水，不吸湿，与水作用时放出大量的热。

过氧化钡是一种强氧化剂，在药剂中能提高对火焰的感度。混成引燃剂后对摩擦较敏感。

加热过氧化钡时可放出有效氧 9%~18%，分解时所需的温度比较低，为 800°C 左右。分解产生的固体渣粒占原质量的 91% 左右，密度较大，因此是一种较好的氧化剂。

4 镁粉 银白色金属粉末，密度 1.7 g/cm³，熔点 651°C，沸点 1100°C。镁粉容易引燃，燃烧时温度很高并发出耀眼的亮光。

纯净而干燥的镁粉在 420~440°C 即起火燃烧。在一定条件下，湿镁粉尘在 360°C 就开始燃烧。悬浮在空气中的镁粉尘，当其浓度超过 20~25 mg/l 时，就有爆炸危险。

镁粉能强烈地与水相互作用，放出大量的热，使温度升高，并产生能自燃的氢气。氢气可将氧化剂硝酸钡还原，放出热量，也有可能引起自燃。因此，药剂必须防止潮湿或落入水滴、雨雪，以免自燃着火。

5 聚氯乙烯 [(CH₂CHCl)_n] 白色或浅黄色粉末，密度约 1.4 g/cm³，软化点 80°C 左右。在 140°C 开始分解出氯化氢。

聚氯乙烯常用于红光、绿光的曳光剂和信号剂内，它能提高火焰颜色的纯度、减缓燃烧速度、提高光程并降低药剂的摩擦感度。例如应用于红色曳光剂中，并配成负氧差的药剂，此时因为在火焰内有还原气体可阻碍一氯化锶氧化成氧化锶，一氯化锶的辐射比氧化锶强得多，可以提高火焰的颜色纯度。

6 酚醛树脂 (C₁₃H₁₂O₇) 黄色透明块状，脆而易碎，密

度 1.3 g/cm^3 ，软化点 $90 \sim 110^\circ\text{C}$ 。吸湿性很小，不溶于水，溶于酒精。在曳光剂中起粘合剂兼钝感剂作用并能燃烧，它能提高药柱的防潮能力和机械强度，减缓药柱的燃烧速度。

7 松香 ($\text{C}_{20}\text{H}_{30}\text{O}_2$) 浅黄色到橙色透明块状物，密度 $1.0 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$ ，加热到 $50 \sim 65^\circ\text{C}$ 开始软化，溶于酒精。它作为粘合剂能强烈地减慢药剂的燃烧速度。

一些曳光剂的配方见表 3-3-1。

表 3-3-1 一些曳光剂的配方

含量 (%) / 颜色 成分	红 色	红 色	红 色	白 色
硝酸锶	61.5	54	45	
碳酸锶		5		
硝酸钡				75
铝镁合金粉	6			
镁粉	23	21	47	13
松脂酸钙				12
酚醛树脂	9.5	10	8	
聚氯乙烯		9		
松香		1		

一些引燃剂的配方见表 3-3-2。

表 3-3-2 几种引燃剂的配方

成 分	含 量 (%)		
过氧化钡	30	45	48
硝酸钡	48	32.5	22
镁 粉	15	15.5	21
酚醛树脂	7	7	9

二、燃 烧 剂

为了对付易燃目标如汽车、飞机、油库、木制建筑物等，在弹药基数中配备有带燃烧作用的弹药。对燃烧剂通常提出以下

要求:

(1) 有良好的燃烧能力, 即燃烧时产生高温、高热、强烈的火焰和炽热的熔渣。这是因为对易燃物一般要求有 $900\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 的温度才可点燃。

(2) 有一定的燃烧持续时间, 以利于引燃目标。此时间取决于被燃物的性质和燃烧能力, 如对液体燃料大约需要十分之几秒才能点燃。

(3) 作用确实, 要容易点燃而不易熄灭。

(4) 感度不宜过高, 以保证膛内及勤务使用保管的安全。

(5) 工艺简单, 生产安全。

常用的燃烧剂有以下几种:

1. 含有氧化剂的燃烧剂

(1) 以金属氧化物与金属可燃物为主要成分的燃烧剂。其中最常用的是铝热剂, 它是 Fe_2O_3 和铝粉加上粘合剂(树脂或松香)制成。它燃烧时放出的热量大, 因此生成物的温度很高, 可达 $2500\sim 3000^{\circ}\text{C}$ 。高温能使生成物中的三氧化二铝及铁熔化, 成为灼热的熔渣, 故不易熄灭。铝热剂的缺点是发火点高, 所以不易点燃, 必须借助点火药等。在燃烧时仅粘合剂生成气体, 所以火焰小, 作用范围小。

(2) 以金属可燃物与含氧盐为主要成分的燃烧剂, 例如金属可燃物镁、铝或铝镁合金与硝酸钾或硝酸钡混合。这类燃烧剂易点燃, 火焰温度较高(2500°C 以上), 能形成较大的火焰。

2. 不含氧化剂的燃烧剂

这类燃烧剂的主要成分是可燃物, 不含氧化剂, 依靠空气中的氧进行燃烧。常用的有:

(1) 黄磷 可单独使用或溶于二硫化碳、汽油等溶剂中使用。它的优点是有附着性, 能产生烟。它的缺点是燃烧温度不高(1000°C 以下), 火焰不大, 它能自燃, 有毒, 在生产、运输和储存过程中容易发生危险。

(2) 凝固燃料 液体有机可燃物(如汽油、煤油等)经过

凝固（常用凝固剂有脂肪酸钠、脂肪酸铝等）处理，即可制成凝胶状的凝固燃料。它的优点是燃烧时放出的热量多，容易点燃、火焰大、价廉、原料丰富。但与铝热剂比较，它燃烧温度低（ $700\sim 900^{\circ}\text{C}$ ），密度小，装填密度小，燃烧生成物中无灼热熔渣，燃烧持续时间短。所以燃烧能力比铝热剂小得多。

在自动武器弹药中，几种常用燃烧剂的配比见表 3-3-3。

表3-3-3 几种燃烧剂的配比

含量 (%) 序号	成分	硝酸 钡	铝镁 合金 粉	过氯 酸钾	四氧 化三 铁	草酸 钠	天然 橡胶	注
1		50	50					装填带燃烧作用的枪弹
2		30	70					
3			45	55				
4		47	53					
5		32	19		22	3	24	装填 122mm 加农炮燃 烧弹

硝酸钡为白色结晶颗粒或粉末，密度 3.2 g/cm^3 熔点 592°C 。它吸湿性较小，化学安定性较稳定，不与金属反应。在 600°C 以上分解，放出氧，供可燃物燃烧。

铝镁合金粉是含铝和镁各为 50% 的无机可燃剂，燃烧时有足够的特种热效应，放出大量的热，并产生约 2000°C 左右的高温。在适量的供氧条件下燃烧时，能生成强烈的火焰和炽热的熔渣。铝镁合金粉为灰色粉末，密度为 $2.15\sim 2.20\text{ g/cm}^3$ ，假密度为 1.12 g/cm^3 ，熔点为 46.3°C 。这种合金有较高的理化安定性，有利于药剂的长期贮存。

小口径高射杀伤炮弹也具有一定的燃烧作用。它是装填黑铝混合炸药。钝化黑索金加铝粉后，爆热增加，使弹药威力增大，爆炸后破片温高，在对付飞机、轻型装甲车辆等目标时能引燃内部的油箱，具有一定的燃烧能力。

第二篇 弹 药 设 计

第四章 杀 伤 作 用

第一节 概 述

杀伤作用对于自动武器弹药来说主要是指杀伤生动目标。普通枪弹靠弹头的动能杀伤生动目标；杀伤榴弹靠弹丸爆炸后，弹丸壳体形成的高速破片杀伤生动目标。因此研究弹药的杀伤作用，提高它们的杀伤威力以合理利用动能是十分重要的。

当榴弹的引信起爆后，位于引信附近的炸药，在接受了引信的起爆能量以后，开始产生物理化学反应，即炸药由原来固体状态迅速分解为高温高压的气态产物。这些产物的巨大压力和冲量作用在弹体壳壁上，使弹壁变形，同时也作用在与之相邻的尚未反应的固态炸药上，使之进一步产生连锁反应。因此，在某一瞬间，在正在反应的炸药（爆轰产物）与尚未反应的原有固态炸药之间，存在着一个界面，这个界面称为爆轰波阵面。该阵面以 $7\sim 8\text{ km/s}$ 的速度向未反应区推进，直至弹体内全部炸药爆轰完毕。

随着爆轰波的传播，弹体在爆轰产物的作用下，承受很大压力，并开始变形。当变形达到一定程度，弹体内部最薄弱环节处出现裂纹。弹体出现裂纹后，爆炸产物即通过裂缝向外流动，作用于弹体内表面的压力迅速下降。裂纹继续扩展，并彼此相交，使弹体破裂，形成破片，破片以一定速度向四周飞散。弹体从变形开始至破裂，需要一定的时间。所以，对于较短的弹体，当炸药全部爆轰完后一定时间，弹体才发生破裂；而对于很长的弹体，炸药尚未爆轰完毕，弹体的起爆端即可能发生破裂。

由于弹体在膨胀过程中获得了很高的变形速度，故弹体所形成的破片速度很高。此后当破片飞散时，在爆轰产物压力的作用下，略有加速。飞散中，破片所受的空气阻力很快和爆轰产物的作用力相互平衡，破片速度达到最大值，这就是破片的初速。根据弹体的材料，炸药的性质和质量，破片初速一般在 $600 \sim 1500 \text{ m/s}$ 的范围内变动。达到初速的位置一般为距爆炸中心 $2 \sim 3$ 倍口径。

图 4-1-1 为 20mm 榴弹爆炸过程的 X 射线照片。它由起爆到爆轰结束约经 $10\mu\text{s}$ 左右。起爆 $25\mu\text{s}$ 后，弹体膨胀到 2 倍口径以上，此时弹体出现裂缝；约在 $54\mu\text{s}$ 时，弹体全部形成破片，破片以 1000 m/s 以上的速度向四周飞散。

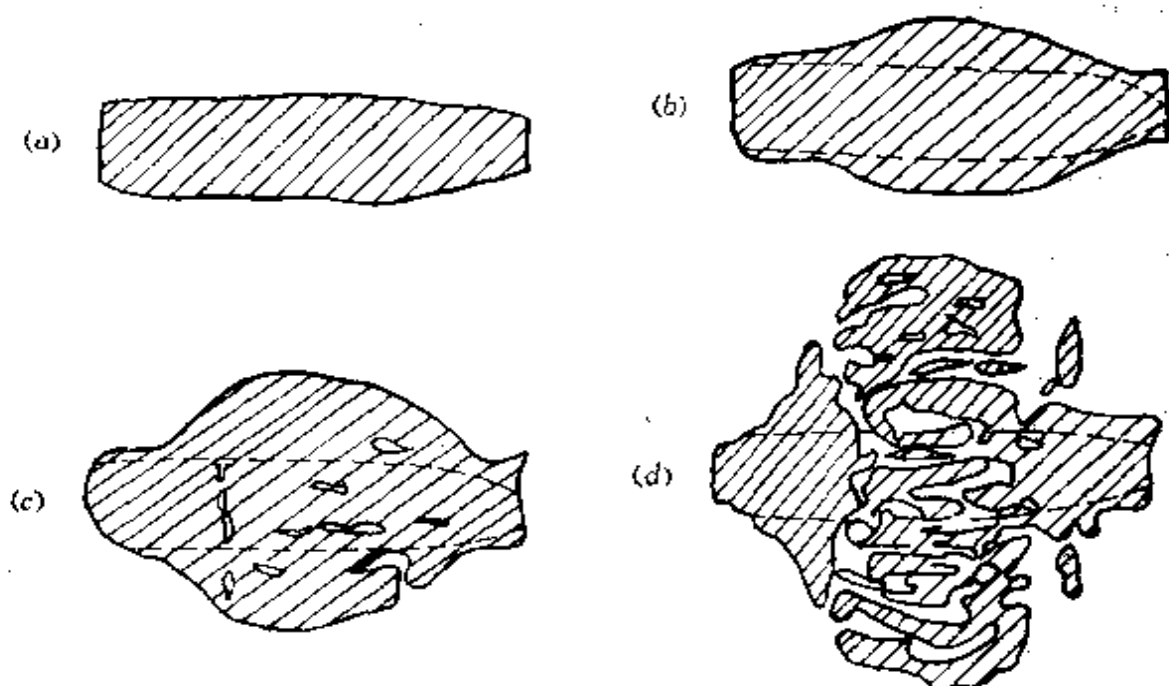


图 4-1-1 20mm 榴弹爆炸过程 X 射线照片

(a) 爆轰波到达弹底部；(b) 在 a 以后 $16\mu\text{s}$ ；

(c) 在 a 以后 $25\mu\text{s}$ ；(d) 在 a 以后 $54\mu\text{s}$ 。

由闪光 X 射线照片及实验结果分析，弹体的爆炸过程有以下一些特点：

(1) 由炸药装药起爆至爆轰结束所经过的时间，与弹体开始变形至全部破裂成破片所经过的时间相比，是很短的，可认为

爆轰是瞬时完成的；

(2) 在爆炸过程中，弹体要承受很大的冲击压力，弹体金属承受的冲击应力大大超过其在静载时的强度；

(3) 整体式弹体爆炸后，部分弹体金属被粉碎成极小的粉状碎粒，大部分弹体则形成不同质量和不同形状的破片。

弹丸爆炸后所形成的大量高速破片，向四周飞散，形成了一个破片作用场，位于作用场内的目标就有可能被毁伤。这就涉及到杀伤榴弹的威力问题。地面杀伤榴弹主要是对付集群人员目标，它的威力以指标“杀伤面积”来衡量。由于检验方式的不同，杀伤面积的具体含意亦就不同，具有代表性的有两种，即扇形靶方法和球形靶方法。目前更倾向于采用后者。

1. 扇形靶方法

用扇形靶方法测得的结果而得到的杀伤面积，称为扇形靶杀伤面积。扇形靶试验的布置情况如图 4-1-2 所示。弹丸直立于试验场中心，其质心距地面 1.5m，引信口朝上。在距离中心 10m、20m、30m、40m、50m 和 60m 处分别放置张角为 60° 的扇形靶板。靶板高 3m、厚 25mm，用松木或棕木制成。

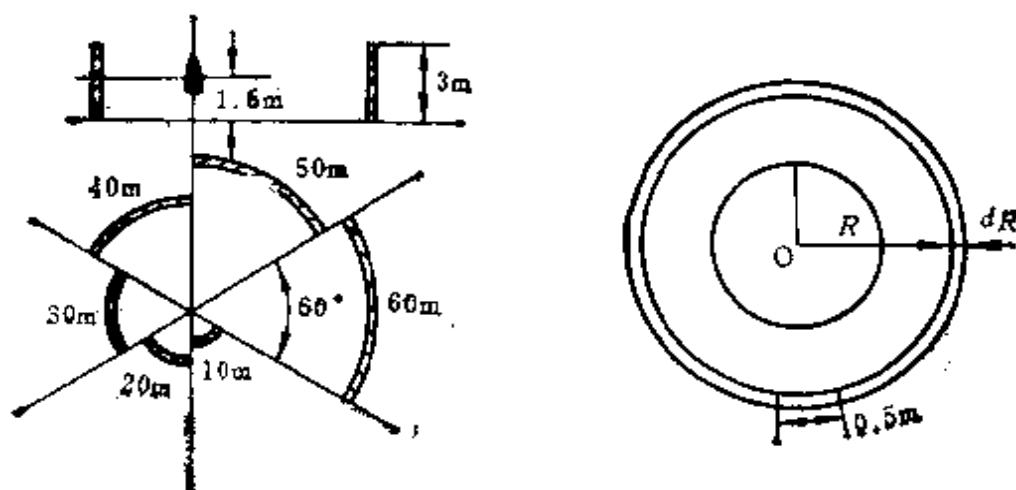


图4-1-2 扇形靶试验示意图

弹丸爆炸后，破片将命中不同距离上的扇形靶板，分别统计各扇形靶上的破片数。凡能击穿靶板的破片计为杀伤破片；嵌入靶板上的破片 2 块可折算为 1 块杀伤破片。假定弹丸爆炸后，破

片在侧向圆周上的分布是均匀的, 这样就可由各个距离上扇形靶测得的破片数, 求出不同距离处各圆周上的破片总数。

以 N' 表示任一扇形靶上的杀伤破片数, R_i 表示任一扇形靶距弹丸质心的距离, 在 R_i 处的整个圆周上的杀伤破片总数为 $6N'$, 则可作出 $R-N'$ 曲线 (图 4-1-3)。

扇形靶方法的杀伤面积 S 是这样定义的:

$$S = S_0 + S_1 \quad (4-1-1)$$

式中 S_0 ——密集杀伤面积;

S_1 ——疏散杀伤面积。

所谓密集杀伤面积是指在该区域的周界上任一点设置人形靶 (高 1.5 m、宽 0.5 m、厚 25 mm 的松木板) 平均为一块杀伤破片所击中。

$$S = \pi R_0^2$$

对应密集杀伤面积的圆半径 R_0 称密集杀伤半径。所谓疏散杀伤面积是按下列公式定义的:

$$S_1 = \int_{R_0}^{R_m} \gamma 2\pi R dR$$

式中 R ——半径变量;

γ ——在半径为 R 的圆周上每个人员目标接受的平均杀伤破片数;

R_m ——扇形靶试验布置的最大半径 (对于口径 ≥ 76 mm 的榴弹为 60 m, 小于 76 mm 口径的榴弹为 24 m)。

图 4-1-3 中的 N' 是击在 $1/6$ 圆周、高 3 m 扇形靶上的杀伤破片数, 这样击在整个圆周高 1.5 m 目标靶上的杀伤破片数 N 将为

$$N = 3N' \quad (4-1-2)$$

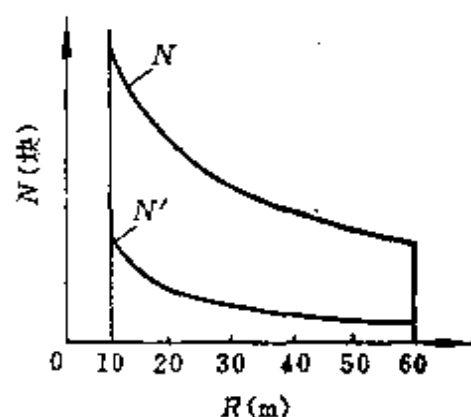


图 4-1-3 杀伤破片随距离的变化曲线

2. 球形靶方法

弹丸在空间某一位置爆炸，假定有一个球面包围着它，则向四周飞散的破片就击在球面上。根据破片击在球面上的痕迹，可以获得破片在各处的分布密度，这就是球形靶方法。

用球形靶方法求杀伤面积还必须利用弹丸破碎性试验测定破片的质量分布，然后才能处理出杀伤面积。

设弹丸在目标上空某一高度处爆炸（图4-1-4），破片向四周飞散，其中部分破片击中地面上的目标并使其伤亡。在地面任一处 (x, y) 取微面积 $dxdy$ 。设目标在此微面积内被破片击中

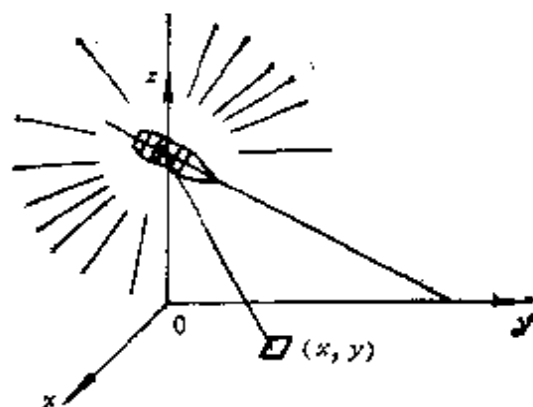


图4-1-4 弹丸对地面目标的杀伤

并杀伤的概率为 $P(x, y)$ ，则微面积内的杀伤面积为 $dS = P(x, y)dxdy$ 。全弹的杀伤面积为

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x, y)dxdy \quad (4-1-3)$$

可以看出，杀伤面积是一个等效面积，它意味着，若目标在地面以一定方式布设，目标密度 σ 为常数，以 $(\text{个}/\text{m}^2)$ 表示。则微面积 $dxdy$ 内的目标个数为 $dn = \sigma dxdy$ ，其中被杀伤的目标个数的预期值为：

$$dn_k = P(x, y)dn = \sigma P(x, y)dxdy$$

由此，地面上全部目标中被杀伤的预期值为

$$n_k = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma P(x, y)dxdy = \sigma S \quad (4-1-4)$$

即目标被杀伤数目的数学期望 n_k 直接与弹丸的杀伤面积 S 呈比例。当弹丸杀伤面积已知，将它乘以目标密度，即可求出目标被杀伤数目的预期值。

为了求杀伤面积，除须给出有关目标的数据、杀伤准则外，还需知道弹丸的破片初速、破片的质量分布和飞散时的密度分布，以及破片速度的衰减规律，然后按一定的模型进行计算。

3. 扇形靶方法与球形靶方法的比较

扇形靶方法的试验项目较少，它的杀伤面积计算主要通过试验数据稍经处理而求得，免去许多中间环节的计算与测试，具有简单易行的优点。但通过长期实践发现，扇形靶杀伤面积在某些情况下常常不能对弹丸的威力作出全面的评价，甚至出现明显有偏差的检验结果。

球形靶方法需涉及到许多中间环节（如有关破片的形成、飞散、飞行中的衰减等）的计算与测试，计算较复杂，所得结果比较接近实际。我们主要介绍这种方法，由它所涉及到的各项内容将在以后逐项介绍。

第二节 破片数目及其质量分布

一、概 述

弹丸爆炸后，弹体一般都破碎成不同质量和不同形状的破片。破片的总数及其质量的分布规律，是弹体破碎程度的标志，同时也是计算其杀伤作用的重要依据。

弹体的破片总数及其质量的分布规律与许多因素有关，其中最主要的是弹体金属的机械性能、炸药性能、装填系数、弹体的几何形状以及起爆位置等因素。由于影响因素较多，故弹体每次爆炸后所得的破片总数及其质量分布规律是不完全相同的。所以用理论方法预计弹体爆炸后产生的破片总数及其质量的分布规律是一个困难的问题。

通常用实验方法确定弹体的破片总数及其质量的分布规律。

二、弹体破碎性试验

为了更具体地了解弹丸破片质量的分布情况，通常采用弹丸破碎试验的方法，它有沙坑试验和水中试验两种。

1. 沙坑试验

图 4-2-1 是弹丸沙坑试验装置示意图。沙坑四周是防护钢板，内圆筒与外圆筒之间装有减速介质（砂子或锯木屑），其厚度需保证破片全部落于介质内，弹丸置于内圆筒的空腔中。内外圆筒用厚纸板或三合板、马粪纸等制成，其直径与高度取决于试验弹直径 d 与长度 l 。弹丸用电雷管引爆后，破片冲入砂中。将砂子过筛，除极小的破片外，95% 以上的破片均可回收。回收的破片，大小不均，

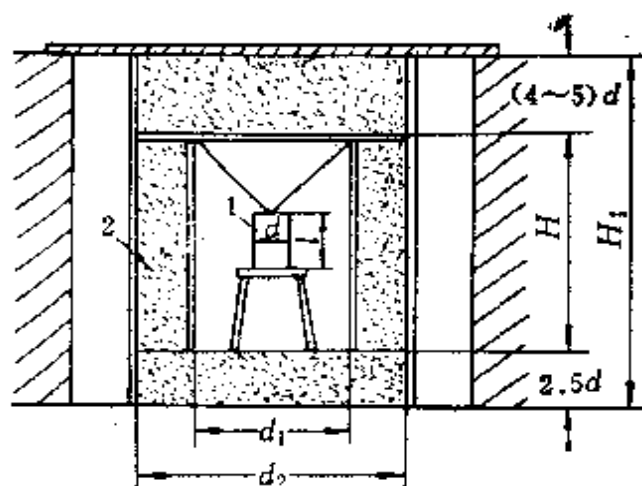


图 4-2-1 沙坑试验示意图

1—弹丸；2—减速介质。

按一定质量范围分级，记下相应的破片数目。

这种试验方法的工作量较大，工作环境和条件较差。

2. 水中试验

图 4-2-2 是弹丸水中爆炸试验装置的示意图。圆柱形水井的直径 D 为 7 m，深度 H 为 6 m。井壁用钢板砌成，上、下部分均用型钢加固以防变形，井底是由钢筋混凝土构成。为保护水井少受冲击波的冲击，延长水井使用寿命，在井底与井壁采用了减弱水中激波强度的结构，如由聚苯乙烯泡沫塑料、薄钢板和砂砾（天然砂子）三层组成的减震结构。也有在井底采用上述三层结构，而在井壁的钢板与混凝土壁之间形成一定厚度空气层。试验

弹放在空气室内，室壁由聚氯乙烯塑料薄膜制成，室顶为木板，用胶与室壁密封，空气室直径 d_1 为弹径 d 的 4~5 倍。空气室挂在网栏的中心，在网栏的下半部是带底的尼龙网（网眼为 0.5mm），上半部由塑料丝编织而成。网栏放入水井中或从水井中升起用起重机起吊。试验弹爆炸后，破片受水介质减速而沉到网中。爆炸试验后，为避免破片在空气中氧化，将破片收集到装有丙酮溶液的瓶子里，然后吹干并按质量分类。

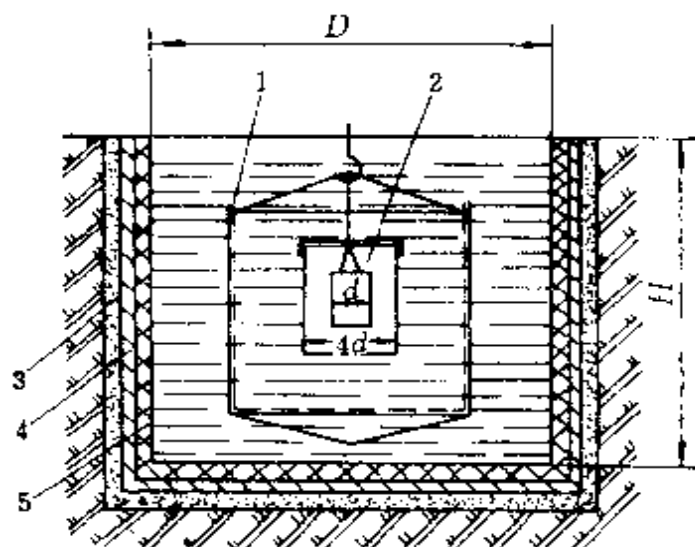


图4-2-2 水中爆炸试验示意图

1—尼龙网；2—空气室；3—砂砾，
4—薄钢板；5—泡沫塑料。

这种试验方法的优点是劳动强度较轻、工作效率高、环境清洁、破片真实性较好、介质性质较稳定等。

三、破片质量的分布规律

弹体破碎试验所得到的破片，按质量分类，统计出各类破片的数量。破片质量的分类方法主要根据弹丸的结构、预定破片质量而定，目前采用的分类方法有：

1. 等间隔分类法 按破片质量范围分成若干个质量等级，各等级的质量差相等。例如分为 2~4，4~6，6~8，8~10 g 质量等级。此方法适用于可控制破片的弹丸。

2. 变间隔分类法 按破片质量范围分成若干个质量等级, 各个等级的质量差值不等。在破片数密集区或预期破片质量处, 破片质量等级划分多些, 即质量差值小些, 而在破片稀少区, 破片质量等级划分少些。例如, 一种分类法是按破片质量分为9级, 即1~4, 4~8, 8~12, 12~16, 16~20, 20~30, 30~50, 50~100, 100~200 g。另一种分类法是按破片质量分为31级, 即在1~20 g之间, 每间隔1 g为1个质量范围, 分为20个等级; 在20~100 g之间, 每间隔10 g为1个质量范围, 分8个等级; 其次的质量等级是100~125 g, 125~150 g, 150 g以上。

根据试验结果, 可以求出破片总数和破片数随破片质量的分布规律。

设已知某杀伤榴弹的破片试验数据。根据试验数据作破片质量的分布曲线。

令横坐标 m_i 表示破片的单块质量, 纵坐标 ΔN_i 表示一定质量范围 Δm_i 内的破片块数, 于是可得到破片质量的分布图 (图4-2-3)。破片总数 N_0 即为这些矩形纵坐标值的总和,

$$N_0 = \sum \Delta N_i$$

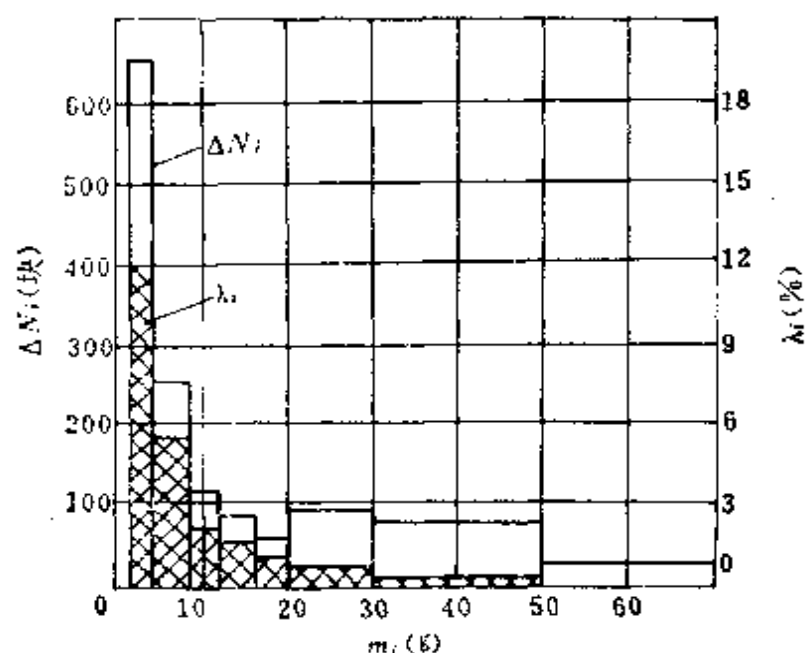


图4-2-3 破片质量分布图

若用破片数目的相对值 ΔP_i 表示, 即

$$\Delta P_i = \frac{\Delta N_i}{N_0} \quad (4-2-1)$$

则 ΔP_i 表示 Δm_i 范围内破片数的百分比或频率。容易看出, Δm_i 的范围大, 相应的 ΔP_i 值也大; 反之则小。

现令 $\Delta P_i / \Delta m_i = \lambda_i$, 即 $\lambda_i = \Delta N_i / (N_0 \cdot \Delta m_i)$, 它具有频率密度的含意。当 $\Delta m_i \rightarrow 0$, 则相应的 λ 的极限值 dP/dm 或 $dN/(N_0 \cdot dm)$ 即代表破片在某个质量上的破片频率密度。通常它为 m 的连续函数:

$$\lambda = f(m)$$

函数 $f(m)$ 称为破片质量的频率密度分布函数。

对于某一种结构的弹丸, 通过多次试验, 可以找出它的破片质量频率密度分布函数。有了频率密度分布函数, 破片按质量的分布规律即可方便地表示出来。例如, 在 m_i (g) 以上的破片总块数 N_{m_i} 可写为:

$$N_{m_i} = \int_{N_{m_i}} dN = \int_{m(m > m_i)} N_0 dm = N_0 \int_{m_i}^{\infty} \lambda dm \quad (4-2-2)$$

m_i (g) 以上的破片总质量 M_{m_i} 可写为:

$$M_{m_i} = \int_{N_{m_i}} m dN = N_0 \int_{m_i}^{\infty} \lambda m dm \quad (4-2-3)$$

m_i (g) 以上破片的平均质量为:

$$m_{pi} = \frac{M_{m_i}}{N_{m_i}} = \int_{m_i}^{\infty} \lambda m dm / \int_{m_i}^{\infty} \lambda dm \quad (4-2-4)$$

m_{pi} 是表示弹丸壳体破碎程度的重要特征量之一。 m_{pi} 愈大则表示所生成的破片尺寸愈大, 破片数少; m_{pi} 值愈小, 表示生成破片的尺寸小, 破片数多。

经验表明, 函数 $\lambda = f(m)$ 一般可用指数函数的形式表示。这里介绍目前应用最普遍的, 莫特 (Mott) 所提出的如下表示式:

(1) 对于薄壁弹丸

$$\lambda = \frac{1}{2\sqrt{\mu m}} e^{-\left(\frac{m}{\mu}\right)^{0.5}} \quad (4-2-5)$$

(2) 对于厚壁弹丸

$$\lambda = \frac{1}{3\sqrt[3]{\mu m^2}} e^{-\sqrt[3]{m/\mu}} \quad (4-2-6)$$

式中 μ —— 取决于弹丸结构的常数。

分析以上两式可以看出：质量愈小的破片 ($m \rightarrow 0$)，则 λ 值愈大；随着破片质量的增大， λ 值迅速降低 (见图4-2-4)。

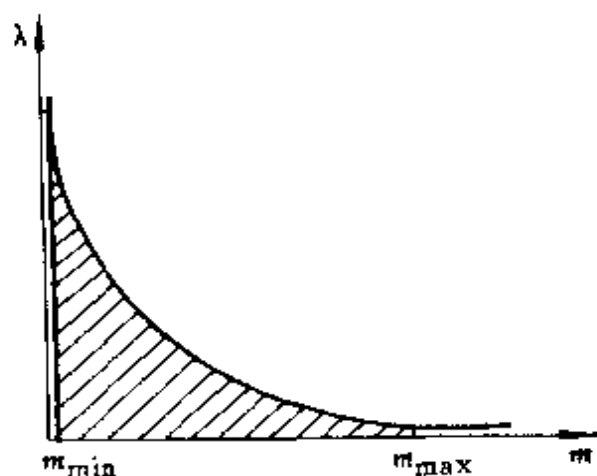


图4-2-4 破片质量的频率密度曲线

有了频率密度分布函数的数学表达式，利用式(4-2-2)、(4-2-3)则可求出破片质量的分布公式。必须指出，实际弹丸破片的质量都是有限，只能在 $0 \sim m_{\max}$ (最大破片质量) 范围内分布；或者在 $m_{\min}$ (所搜集到的 95% 以上破片数中的最小质量) $\sim m_{\max}$ 范围内分布。因此用 (4-2-2)、(4-2-3)、(4-2-4) 式求解实际问题具有一定的近似性。

将 (4-2-5) 式代入 (4-2-2)、(4-2-3) 和 (4-2-4) 式后可得薄壁弹丸的破片块数、破片总质量和平均质量：

$$\begin{aligned} N_{m_i} &= N_0 \int_{m_i}^{\infty} \frac{1}{2\sqrt{\mu m}} e^{-\left(\frac{m}{\mu}\right)^{0.5}} dm \\ &= N_0 e^{-\left(\frac{m_i}{\mu}\right)^{0.5}} \end{aligned} \quad (4-2-7)$$

$$\begin{aligned} M_{m_i} &= N_0 \int_{m_i}^{\infty} m \cdot \frac{1}{2\sqrt{\mu m}} e^{-\left(\frac{m}{\mu}\right)^{0.5}} dm \\ &= N_0 (m_i + 2\sqrt{\mu m_i} + 2\mu) e^{-\left(\frac{m_i}{\mu}\right)^{0.5}} \end{aligned} \quad (4-2-8)$$

$$m_{pi} = \frac{M m_i}{2 + m_i} = (m_i + 2 \sqrt{\mu m_i} + 2 \mu) \quad (4-2-9)$$

当 $m_i \rightarrow 0$, 则 $N_{m_i} \rightarrow N_0$, $M_{m_i} \rightarrow M$ 。 N_0 和 M 为弹丸的全部破片数目和弹丸壳体的质量。则 m_{pi} 变为

$$m_i = \frac{M}{N_0} = 2 \mu$$

或

$$N_0 = M / 2 \mu \quad (4-2-10)$$

将它代入薄壁弹壳的关系式则有:

$$N_{m_i} = \frac{M}{2 \mu} e^{-\left(\frac{m_i}{\mu}\right)^{0.5}} \quad (4-2-11)$$

$$M_{m_i} = \frac{M}{2 \mu} (m_i + 2 \sqrt{\mu m_i} + 2 \mu) e^{-\left(\frac{m_i}{\mu}\right)^{0.5}} \quad (4-2-12)$$

$$m_{pi} = (m_i + 2 \sqrt{\mu m_i} + 2 \mu) \quad (4-2-13)$$

$$N_0 = \frac{M}{2 \mu} \quad (4-2-14)$$

同理, 对于厚壁弹丸亦可得出

$$N_{m_i} = \frac{M}{6 \mu} e^{-\sqrt[3]{m_i / \mu}} \quad (4-2-15)$$

$$M_{m_i} = \frac{M}{6 \mu} (m_i + 3 m_i^{2/3} \mu^{1/3} + 6 m_i^{1/3} \mu^{2/3} + 6 \mu) e^{-\sqrt[3]{m_i / \mu}} \quad (4-2-16)$$

$$m_{pi} = (m_i + 3 m_i^{2/3} \mu^{1/3} + 6 m_i^{1/3} \mu^{2/3} + 6 \mu) \quad (4-2-17)$$

$$N_0 = \frac{M}{6 \mu} \quad (4-2-18)$$

四、破片数目的确定

弹丸爆炸后产生的破片总数主要是靠统计规律求得, 并有不同的经验公式。由 (4-2-10) 式知道, 破片总数 N_0 等于:

$$N_0 = \frac{M}{2\mu}$$

式中 M ——弹丸壳体质量 (kg);

2μ ——破片平均质量 (kg)。它与弹壳的结构和炸药装药的性能等因素有关, 可用下式计算:

$$\mu^{0.5} = K t_0^{5/6} d_i^{1/3} (1 + t_0/d_i) \quad (4-2-19)$$

式中 t_0 ——弹丸壳体的壁厚 (m);

d_i ——弹丸壳体的内径 (m);

K ——与炸药装药有关的系数 ($\text{kg}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2/3}$) (参见表 4-1-1)。

对于薄壁弹壳 μ 值还可用下式计算:

$$\mu^{0.5} = A \frac{t_0 (d_i + t_0)^{3/2}}{d_i} \sqrt{1 + \frac{1}{2} \frac{M_w}{M}} \quad (4-2-20)$$

式中 $\frac{M_w}{M}$ ——炸药与弹丸壳体的质量比;

A ——取决于炸药能量的系数 (见表 4-1-1)。

表 4-1-1 炸药系数 K 及 A 的实验值

炸药种类及 装填方法		实 验 条 件			炸 药 系 数	
		$t_0(\text{m})$	$d_i(\text{m})$	M_w/M	$K(\text{kg}^{3/2} \cdot \text{m}^{-7/6})$	$A(\text{kg}^{1/2} \cdot \text{m}^{-3/2})$
特 装 压 装	B 炸药	6.4262×10^{-3}	50.7746×10^{-3}	0.377	2.71	8.91
	TNT	6.4516×10^{-3}	50.8×10^{-3}	0.355	3.81	12.6
	泰恩/TNT (50/50)	6.4516×10^{-3}	50.7746×10^{-3}	0.366	3.03	9.92
	泰恩/TNT (50/50)	6.4008×10^{-3}	51.0794×10^{-3}	0.363	3.24	9.92
	特屈儿	6.4516×10^{-3}	51.0794×10^{-3}	0.371	3.33	11.0
	TNT	6.4262×10^{-3}	51.1048×10^{-3}	0.348	4.94	16.4

第三节 破片的初速

在炸药装药爆炸所生成的爆轰产物作用下，弹丸壳体膨胀、破裂和飞散。壳体破裂形成破片，它所达到的最大速度称为破片的初速。破片初速是由两部分构成的。第一部分是破片形成前弹体金属的变形速度；第二部分是破片形成后，爆轰产物对破片的加速作用。前一部分是破片初速的主要构成部分。所以，延性材料如钢质弹体，因第一部分影响显著，其破片初速较脆性材料弹体的大。

另外，由于弹体上各处的变形速度是有差别的，再加上爆轰产物压力作用的差别，这就会使每个破片的初速不同。因此，在此所指的初速实际上是一个概略的平均值。

一、破片初速的理论计算

影响破片初速的因素很多，目前还不能从理论上对它作出完整的分析。这里所介绍的理论计算，是在概略的理论分析基础上进行的。

在分析计算时我们认为弹体的壁是等厚的，爆炸后它所形成的破片具有相同的初速，不考虑轴向的飞散。在爆炸能量的分配上作以下假设：

(1) 炸药在爆炸过程中所释放出来的能量，完全消耗在爆炸产物和破片系统本身的动能上；

(2) 不考虑弹体破裂成破片所消耗的能量（约占1~3%左右）；

(3) 不考虑爆炸系统以外所消耗的能量，如周围介质所吸收的能量。

这样可得出如下的能量平衡方程：

$$M_0 Q_0 = E_p + E_0 \quad (4-3-1)$$

式中 M_0 ——炸药质量；

Q_0 ——单位质量炸药所具有的能量；

E_p ——破片获得的动能；

E_0 ——爆轰产物所获得的动能。

由图 4-3-1 可以看出，弹体爆炸后，壳体的半径由 r_0 膨胀到 r ，爆轰产物的体积由 V_0 增加到 V ，壳体半径的增量为 dr ，体积增量为 dV 。在半径 r 处，爆轰产物的流动速度为 v ，壳体的长度 l 假定不变。这样可得出爆轰产物的动能表达式为：

$$E_0 = \int v \frac{\delta dV}{2} v^2$$

其中

$$dV = 2\pi r \cdot l \cdot dr$$

故

$$E_0 = \int_0^r \pi l \delta v^2 r dr$$

δ 为质量密度，要积分上式必须知道 v 的表达式。通常假设任一瞬时爆炸中心的产物速度为零，周界上的产物速度 v_p 最大，其它各处产物的速度 v ，沿径向（ r 方向）呈线性分布。同时认为破片位于周界上，其速度与该处爆轰产物的速度相等，即为 v_p 。于是可得

$$\frac{v}{v_p} = \frac{r}{r_p}$$

即

$$v = \frac{r}{r_p} v_p$$

所以

$$E_0 = \int_0^{r_p} \pi l \delta \frac{r^2}{r_p^2} v_p^2 r dr = \frac{\pi l \delta}{4} r_p^2 v_p^2 \quad (4-3-2)$$

式中

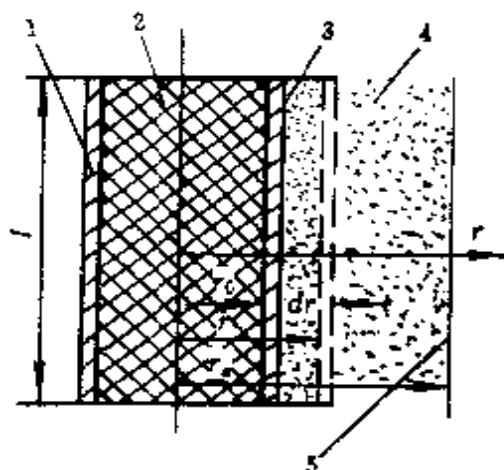


图4-3-1 弹体的膨胀过程

1—壳体；2—炸药；3—爆轰产物；4—空气介质；5—周界。

$$\pi r_p^2 l \delta = M_0$$

所以

$$E_0 = \frac{M_0}{4} v_p^2$$

根据假定，破片的总动能为：

$$E_p = \frac{\sum m_i v_{pi}^2}{2} = \frac{1}{2} M v_p^2 \quad (4-3-3)$$

式中 m_i ——单个破片的质量，

M ——全部破片的质量，即弹壳金属的质量。

将 E_p 和 E_0 代入表达式 (4-3-1) 可得：

$$v_p^2 = \frac{2Q_0}{\frac{1}{2} + \frac{M}{M_0}} \quad (4-3-4)$$

根据爆炸理论， Q_0 与爆速 D 有如下关系：

$$Q_0 = \frac{D^2}{2(K^2 - 1)} \quad (4-3-5)$$

式中 K ——爆轰产物的绝热指数，在爆炸状态下 $K = 3$ 。

将 $K = 3$ 代入 (4-3-5) 式得：

$$Q_0 = \frac{D^2}{16}$$

所以

$$v_p = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2}{\mu}}} \quad (4-3-6)$$

式中 $\mu = \frac{M_0}{M}$ ，它与装填系数 $\alpha = \frac{M_0}{M_0 + M}$ 之间的关系为 $\mu =$

$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$ ，代入上式则破片初速可表示为：

$$v_p = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\alpha}{2 - \alpha}} \quad (4-3-7)$$

在该式的推导过程中忽略了其它能量的消耗，也没有考虑爆轰产

物的密度变化以及运动的三维性。由公式看出,破片初速主要取决于炸药的爆速 D 和装填系数 α , 并随它们的增大而增大。当然,这只是一个定性结论。按此公式所得的结果将比实际值大10%左右。

西方国家在计算破片初速 v_0 时常采用格尼 (Gurney) 方程, 它有以下形式:

$$v_p = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{M_a}{M + 0.5M_a}} \quad (4-3-8)$$

式中 E ——单位质量装药的能量 (m^2/s^2)。格尼给出, 对于 TNT 炸药

$$\sqrt{2E} = 2439 (\text{m/s}) \text{①}$$

二、破片初速的经验公式

在实际设计时, 经常是采用经验公式进行计算, 这里介绍苏联炮兵科学研究所提出的经验公式:

$$v_p = A_1 \frac{\alpha^{1/2} \psi^{1/50}}{\sigma_b^{1/27}} \quad (4-3-9)$$

式中 A_1 ——取决于炸药性质的系数, 对于梯恩梯 $A_1 = 2512$, 对于阿马托 $A_1 = 2340$;

α ——弹丸炸药的装填系数;

ψ ——弹体金属的断面缩减率;

σ_b ——弹体材料的强度极限。

第四节 破片的飞散特性

弹丸爆炸后, 破片以一定的方向飞散出去, 它在空间的分布情况是确定破片杀伤作用场所必需研究的一个重要问题。其飞散情况如图 4-4-1 所示, 往弹丸前面和后面飞散的破片比较稀疏 (共约占 10% 左右), 往四周飞散的破片比较密集 (约占 90%)

① 由东工学院编《终点弹道学》中 $\sqrt{2E} = 8000 \text{ft/s}$ 换算得来。

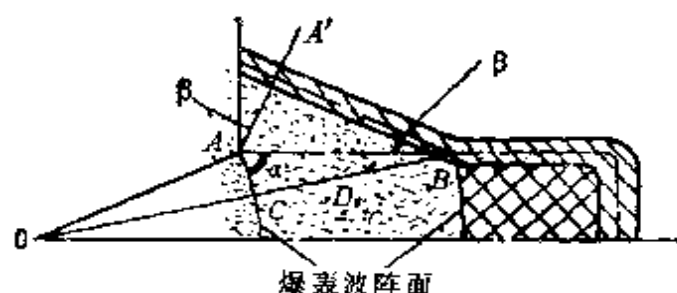


图4-4-2 破片的飞散方向

$$\frac{AA'}{\sin \beta} = \frac{AB}{\sin \frac{1}{2}(\pi - \beta)}$$

则

$$\frac{AA'}{AB} = 2 \sin \frac{\beta}{2}$$

其中 $AB = D \cdot \Delta t / \sin \alpha$ 。

假定由 A 至 A' 的平均速度为 $\frac{1}{2}v_p$ (v_p 为破片初速), 则

$$AA' = \frac{v_p}{2} \Delta t$$

将 AA' , AB 代入上式则有

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{1}{4} \times \frac{v_p}{D} \sin \alpha$$

近似取 $\sin \frac{\beta}{2} \approx \frac{\beta}{2}$, 则

$$\beta = \frac{v_p}{2D} \sin \alpha \quad (4-4-1)$$

由图 4-4-2 和式 (4-4-1) 可以看出, 随着起爆位置和弹丸内腔形状的不同, 各处的 α 值不同, 相应的飞散方向 β 也不同。

二、破片空间分布的试验测定

假定用一个球面包围住弹丸。弹丸爆炸后, 破片向四周飞散, 并击向球面。根据球面上破片的痕迹, 就可得到破片的分布情况,

也就知道了破片的飞散情况。

为了确定球面上各处的位置，用经纬线将球面划分为许多区域。二经线所夹的区域称为球瓣，二纬线所夹的区域称为球带。球带和球瓣的位置，分别用纬角 φ 和经角 ψ 表示（图 4-4-3）。这样，某微面 ΔS 的位置可用角坐标 (ψ, φ) 表示。如果落在微面 ΔS 内的破片数目为 ΔN_i ，则该处的破片平均密度将为

$$\alpha_0 = \frac{\Delta N_i}{\Delta S_{\varphi\psi}} \quad (4-4-2)$$

由于弹丸是轴对称的回转体，可以认为破片的飞散状况也将具有轴对称的性质，即认为破片在空间的分布规律与球瓣位置 ψ 无关，仅与球带位置 φ 有关，即 $\alpha_0 = \alpha_0(\varphi)$ 。所以，实际上球形靶只需安置一道半圆形的靶板（图 4-4-4）即可。靶板上画的两条曲线代表经线，它们之间的区域即为球瓣，夹角为 $\Delta\psi$ 。球瓣靶上的微面位置仅由纬角 φ 来表示图 4-4-4 上的 ΔS_0 ，即为图 4-4-3 上的 $\Delta S(\widehat{ef} \cdot \widehat{ec})$ 。

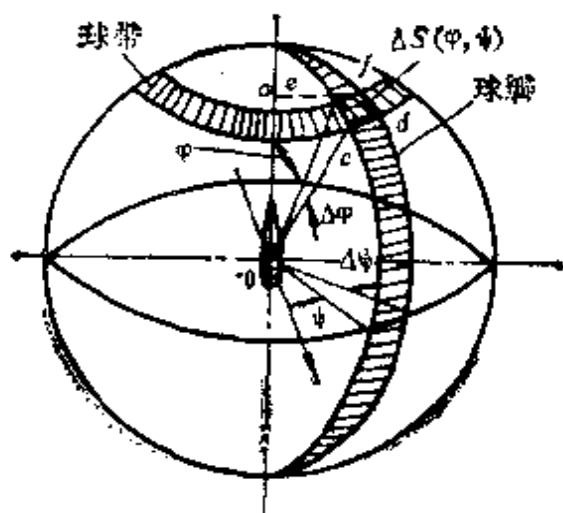


图4-4-3 破片分布球面

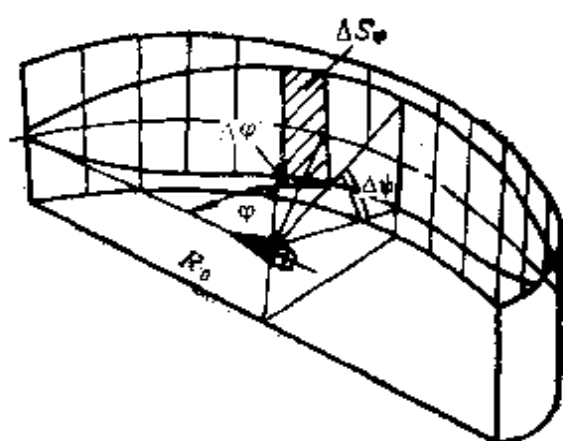


图4-4-4 半圆形靶板

$$\begin{aligned} \Delta S_0 &= \widehat{ef} \cdot \widehat{ec} = (ae \cdot \Delta\psi)(R_0 \cdot \Delta\varphi) \\ &= R_0^2 \sin\varphi \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta\psi \end{aligned} \quad (4-4-3)$$

式中 R_0 ——球形靶的半径。

根据靶的实际大小, 按上式可具体算出 ΔS_i 值。再根据靶上的破片痕迹数目 ΔN_i , 即可求出破片飞散时在空间各处的分布密度 a_i , 得出 $a_i = a_i(\varphi)$ 曲线。

为了使用方便, 可将破片的飞散状况用概率 P_i 或平均概率密度 $f(\varphi)$ 表示。

设球瓣上微面内的破片数为 ΔN_i , 球瓣内的全部破片数为 N_i , 则破片分布的概率为

$$P_i = \frac{\Delta N_i}{N_i}$$

在 $\Delta\varphi$ 角内破片分布的平均概率密度则为:

$$f(\varphi) = \frac{P_i}{\Delta\varphi} = \frac{\Delta N_i}{N_i \Delta\varphi} \quad (4-4-4)$$

由 (4-4-2) 式和 (4-4-3) 式可得:

$$\Delta N_i = a_i \Delta S_i = a_i(\varphi) R_0^2 \cdot \sin\varphi \cdot \Delta\varphi \cdot \Delta\psi$$

而球瓣上的破片数 N_i 占球面全部破片数 N_0 的 $\frac{\Delta\psi}{2\pi}$ (或 $\frac{\Delta\psi}{360^\circ}$), 即

$$N_i = N_0 \frac{\Delta\psi}{2\pi}$$

将 ΔN_i 及 N_i 代入 (4-4-4) 式得:

$$f(\varphi) = \frac{a_i(\varphi) 2\pi R_0^2 \sin\varphi}{N_0} \quad (4-4-5)$$

它可以通过相应的 $a_i(\varphi)$ 求出, 其形状如图 4-4-5 所示。

由图 4-4-5 可以看出, 沿各球带飞散出的破片数随纬角 φ 不同而不同, 具有明显的正态分布特性。下面采用典型的概率密度函数来逼近试验曲线^[42]。

令 $f(\varphi)$ 代表破片沿 φ 作正态分布的概率密度函数

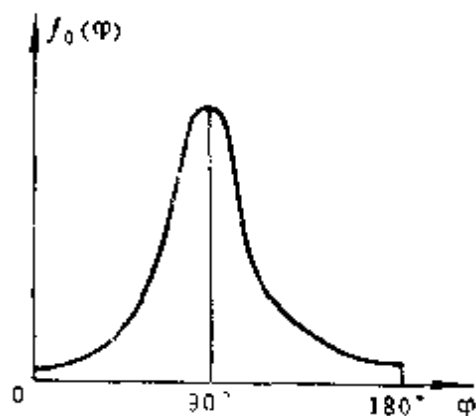


图4-4-5 破片平均分布概率密度

$$f(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(\varphi - \bar{\varphi})^2 / 2\sigma^2} \quad (4-4-6)$$

式中 σ 为 φ 的均方根差, $\bar{\varphi}$ 为 φ 的数学期望, $f(\varphi)$ 的曲线形状如图 4-4-6 所示, 图中的 Ω 为包含破片数 90% 的飞散角。

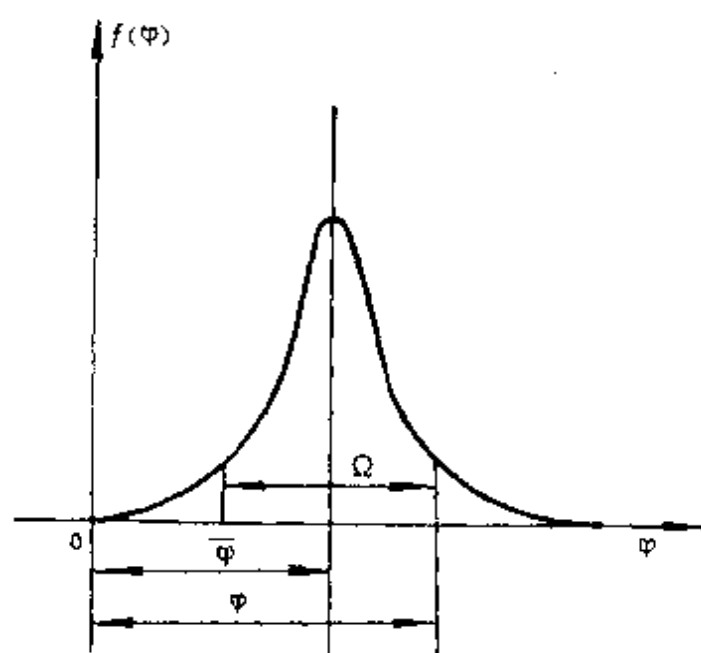


图4-4-6 破片分布的正态密度函数曲线

Ω 的大小主要与弹丸的结构形状, 炸药性质以及弹体材料的性质等有关。这里介绍近似计算 $\bar{\varphi}$ 与 σ 的经验方法。

弹体膨胀到破裂瞬间的图形, 如图 4-4-7 所示。该图只需在

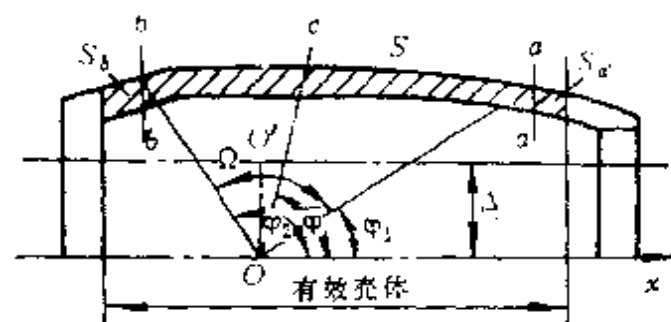


图4-4-7 膨胀到破裂瞬间的壳体图

图中符号: O' —弹丸原质心, O —膨胀弹丸的质心;

$\bar{\varphi} = (\varphi_2 + \varphi_1) / 2$, $\sigma = (\varphi_2 - \varphi_1) / 3.3$, $\Omega = \varphi_2 - \varphi_1$.

原弹体图上将弹丸轴线下移一段距离 $\Delta = K \frac{d}{2}$ ，即可得到。 d 为弹丸原来直径； K 取决于弹体的材料。对于低碳钢可取 0.6~1.1，中碳钢取 0.84。假设弹体侧面与炸药接触的部分为有效壳体。计算此有效部分的纵剖面积 S (图中的阴线部分)。确定 a 、 b 二点，使图中所示的截面积 S_a 、 S_b 分别为 S 的 5%。由膨胀壳体质心 O 联接 a 、 b 二点，并令

$$\begin{aligned}\angle aOX &= \varphi_1 \\ \angle bOX &= \varphi_2\end{aligned}$$

则

$$\bar{\varphi} = (\varphi_1 + \varphi_2) / 2 \quad (4-4-7)$$

$$\Omega = \varphi_2 - \varphi_1$$

根据 Ω 的定义 $\sigma = (\varphi_2 - \varphi_1) / 3.3$

破片的飞散特性前面已介绍过了。由式 (4-4-4) 可得破片飞散密度分布函数 $f(\varphi)$

$$f(\varphi) = \frac{dN_\varphi}{N_0 d\varphi} \quad (4-4-8)$$

式中 φ —— 弹轴与破片飞散方向的夹角，称飞散方位角 (图 4-4-8)。

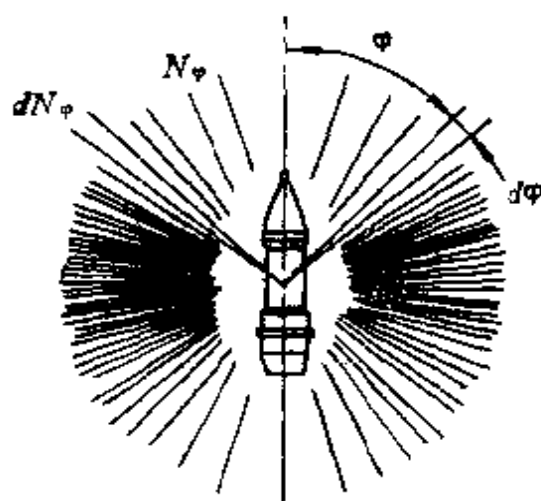


图4-4-8 破片飞散的方位角

N_φ ——以飞散方位角 φ 为锥角的圆锥范围内的破片数目;

dN_φ ——方位角变化 $d\varphi$ 破片数的变化;

N_0 ——破片总数。

破片飞散密度分布函数可用试验方法求出,也可用近似的关系式(4-4-6)表示。有了它之后,任一飞散范围内的破片数目即可按下式求出:

$$dN_\varphi = N_0 f(\varphi) d\varphi \quad (4-4-9)$$

$$N_\varphi = \int_0^\varphi N_0 f(\varphi) d\varphi \quad (4-4-10)$$

$$N_{\varphi_1 \sim \varphi_2} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} N_0 f(\varphi) d\varphi \quad (4-4-11)$$

最后一式表示在 $\varphi_1 \sim \varphi_2$ 飞散范围内的破片数目。

与式(4-4-2)相似,破片飞散后的球面密度 α 与飞散方位角 φ 及距离 R 有关,即

$$\alpha(\varphi, R) = -\frac{dN_\varphi}{dS_\varphi} \quad (4-4-12)$$

式中 $\alpha(\varphi, R)$ ——球面密度;

dS_φ ——球带微面积,它等于

$$dS_\varphi = 2\pi R^2 \sin \varphi d\varphi$$

将 dS_φ 和(4-4-9)式的 dN_φ 代入,整理后可得

$$\alpha(\varphi, R) = \frac{N_0}{R^2} \rho(\varphi) \quad (4-4-13)$$

其中

$$\rho(\varphi) = \frac{f(\varphi)}{2\pi \sin \varphi} \quad (4-4-14)$$

第五节 破片在空气中的运动

破片获得初速后,便在空气中飞行,在空气阻力的作用下,其速度逐渐减小,杀伤能力也随之减弱。为了讨论破片在飞散过

程中杀伤能力的变化，必先研究破片在空气中运动时速度的变化规律。

一、破片的运动方程

破片在空气中运动时，作用在破片上的力为重力和空气阻力。重力使破片的飞行轨迹发生弯曲，空气阻力使破片减速。忽略重力的影响。可以认为破片是沿直线飞行，其运动方程为：

$$m_i \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_x \rho S v^2$$

式中 m_i —— 破片质量 (kg)；
 C_x —— 破片迎风面空气阻力系数；
 ρ —— 空气密度；
 S —— 破片的迎风面积 (m^2)；
 v —— 破片的速度 (m/s)。

上式可改写为

$$-\frac{dv}{v} = -\frac{1}{2} \frac{C_x \rho S}{m_i} dx$$

积分得

$$\int_{v_p}^{v_x} \frac{dv}{v} = -\frac{C_x \rho S}{2m_i} \int_0^x dx$$

$$\ln\left(\frac{v_x}{v_p}\right) = -\frac{C_x \rho S}{2m_i} X \quad (4-5-1)$$

或
$$v_x = v_p e^{-\alpha x} \quad (4-5-2)$$

式中
$$\alpha = \frac{C_x \rho S}{2m_i} \quad (4-5-3)$$

α 称为衰减系数。

二、衰减系数的计算

由表达式 (4-5-2) 中可以看出，衰减系数是表示破片在飞行过程中速度衰减情况的一个参量。 α 值小，则速度衰减慢； α

值大，则速度衰减快。为了计算衰减系数必须确定破片迎面空气阻力系数 C_r 和破片的迎风面积 S 。

1. 破片迎面空气阻力系数 C_r

阻力系数 C_r 一般可通过风洞吹风试验来确定，其值与破片的速度及形状有关。由试验结果可知：当马赫数 $Ma > 1.5$ 时， C_r 随着 Ma 的增加而缓慢地下降。

在工程设计时，为处理问题方便，并考虑到一般破片的实际速度范围， C_r 变化很小，近于常数。如球形破片， $C_r \approx 1$ ；圆柱形破片， $C_r = 1.1708$ ；规则的矩形和菱形破片， $C_r = 1.24$ ；不规则的矩形和菱形破片， $C_r = 1.5$ 。

2. 破片的迎风面积 S

破片的形状是不规则的，它在飞散过程中的姿态也是不一致的，试验表明，破片在飞行过程中作无规则的旋转。因此，除球形破片外，破片的迎风面积是个随机变量，其值应取一等效值或平均值。

为了简化计算，假定破片形状为六面体，其边长分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 （图 4-5-1）。

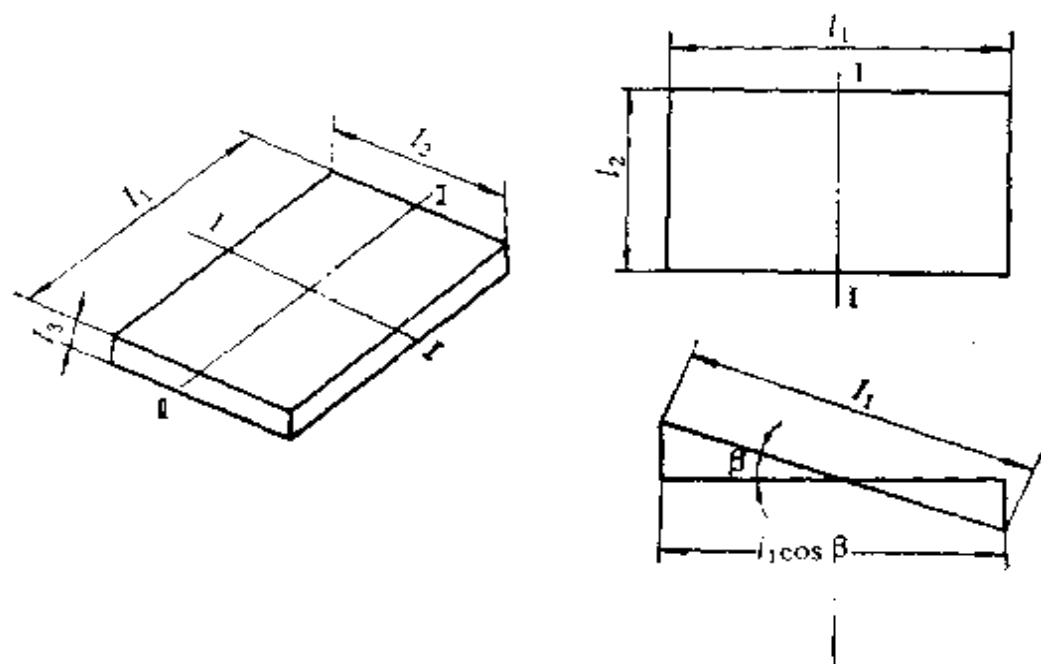


图4-5-1 六面体破片

我们先讨论某一个面 S_1 的影响, 此面由 l_1 和 l_2 构成, 故 $S_1 = l_1 \cdot l_2$, 假定破片的厚度很薄, 忽略它的影响。若破片在飞行过程中以等角速度 $\omega = \frac{d\beta}{dt}$ 绕 I—I 轴旋转, 当转动角度为 β 时, 其迎风面积为:

$$S_{1\beta} = l_1 \cdot l_2 \cos \beta$$

破片旋转一周其迎风面积的平均值为:

$$\bar{S}_{1T} = \frac{\int_0^T S_{1\beta} dt}{T}$$

式中 T 为破片转动一周的周期, $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 。将 $dt = \frac{d\beta}{\omega}$ 及 $S_{1\beta}$ 代入上式则得

$$\bar{S}_{1T} = \frac{4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} l_1 \cdot l_2 \cos \beta d\beta}{2\pi} = \frac{2l_1 \cdot l_2}{\pi}$$

令 $\bar{l}_1 = \frac{2l_1}{\pi}$, 称为等效边长, 则

$$\bar{S}_{1T} = \bar{l}_1 \cdot l_2$$

故在面积 S_1 绕 I—I 旋转时, 其平面迎风面积 $\bar{S}_{1T}$ 的计算, 只需将其原边长 l_1 换为等效边长 $\bar{l}_1$ 即可。同理, S_1 绕 II—II 轴旋转时, 其等效边长 $\bar{l}_2 = \frac{2l_2}{\pi}$ 。若 S_1 既绕 I—I 轴, 又绕 II—II 轴旋转时, 其平均迎风面积应为:

$$\bar{S}_1 = \bar{l}_1 \cdot \bar{l}_2 = \frac{4}{\pi^2} l_1 \cdot l_2 = \frac{4}{\pi^2} S_1$$

实际上破片是立体的。若考虑到另外两个面 S_2 和 S_3 的影响, 则破片的总迎风面积应为:

$$S = \bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3 = \frac{4}{\pi^2} (l_1 \cdot l_2 + l_2 \cdot l_3 + l_1 \cdot l_3)$$

令边长比 $l_1/l_3 = a$, $l_2/l_3 = b$, (l_3 为最小边长) 则

$$S = -\frac{4}{\pi^2} l_3^2 (a \cdot b + a + b) \quad (4-5-4)$$

一般破片的 a 在 $2 \sim 6$ 范围内变化, b 在 $1.1 \sim 2$ 的范围内变化。

3. 破片的断面密度 δ

破片的断面密度为

$$\delta = \frac{m_i}{S} \quad (4-5-5)$$

由 (4-5-3) 式可以看出 δ 大, 则衰减系数 α 减小, 这意味着破片保持速度的能力强, 即速度损失小, 反之则速度衰减快。所以它是表征破片在飞散过程中保持速度能力的一个参量。

令 μ 为破片材料的质量密度, 则

$$m_i = \mu l_1 \cdot l_2 \cdot l_3 = \mu \cdot a \cdot b \cdot l_3^3$$

将 m_i 和 S 代入 δ 则

$$\delta = \frac{\mu \cdot a \cdot b \cdot l_3}{-\frac{4}{\pi^2} (a \cdot b + a + b)} \quad (4-5-6)$$

或

$$\delta = m_i^{1/3} \left[\frac{(\mu \cdot a \cdot b)^{2/3}}{-\frac{4}{\pi^2} (a \cdot b + a + b)} \right] \quad (4-5-7)$$

令

$$\left[\frac{(\mu \cdot a \cdot b)^{2/3}}{-\frac{4}{\pi^2} (a \cdot b + a + b)} \right] = \frac{1}{K} \quad (4-5-8)$$

K 称为破片的形状系数, 它取决于破片的形状, 则

$$\delta = \frac{m_i^{1/3}}{K} \quad (4-5-9)$$

又知 $\delta = \frac{m_i}{S}$, 所以

$$S = K \cdot m_i^{2/3} \quad (4-5-10)$$

三、破片的飞散距离

由式 (4-5-1) 可以求出破片的飞散距离 X 。将 $S/m_i = 1/\delta$, $C_x \rho/2 = \xi$ 代入式中可得

$$\ln\left(\frac{U_x}{U_0}\right) = -\frac{\xi x}{\delta} \quad (4-5-11)$$

则飞散距离为

$$X = \frac{\delta}{\xi} \ln\left(\frac{v_p}{v_x}\right) \quad (4-5-12)$$

或

$$X = \frac{m_i^{1/3}}{\xi K} \ln\left(\frac{v_p}{v_x}\right) \quad (4-5-13)$$

若将 $S = Km_i^{2/3}$, $C_x \rho/2 = \xi$, $\frac{1}{\xi K} = H$ 代入 (4-5-1) 式则得

$$\ln\left(\frac{v_x}{v_p}\right) = -\frac{X}{Hm_i^{1/3}}$$

距离用 R 表示可得:

$$v_x = v_p \cdot e^{-\left(\frac{R}{Hm_i^{1/3}}\right)} \quad (4-5-14)$$

各类钢质破片的 C_x 、 ξ 、 H 和 K 的经验值见表 4-5-1。

表4-5-1 各类钢质破片的 C_x 、 ξ 、 H 、 K 的经验值

破片形状	球形	方形	柱形	菱形	长条形	不规则形
C_x	0.97	1.56	1.16	1.29	1.3	1.5
ξ (kg/m ³)	0.528	0.936	0.696	0.774	0.78	0.9
K (m ² /kg ^{2/3})	3.07×10^{-3}	3.09×10^{-3}	3.35×10^{-3}	(3.2~3.6) $\times 10^{-3}$	(3.3~3.8) $\times 10^{-3}$	(4.5~5) $\times 10^{-3}$
H (m/kg ^{1/3})	560	346	429	404~359	389~337	247~222

第六节 弹头及破片对有机体的致伤作用

一、弹头及破片对有机体的侵彻

弹头（指普通枪弹弹头）或破片击中人体后，对其产生的致伤作用，主要是由弹头或破片传给的动力能所造成的。具有足够飞行速度的弹头或破片，在侵彻人体过程中，可损失其部分或全部动能，传递给人体组织。其结果一方面为弹头或破片速度、姿态、形状、温度的改变；另一方面，则表现为人体组织和器官的各种创伤效应。

人体组织是一种非均匀介质，例如皮肤、肌肉（随血管的密集程度和粗细而不同）、骨骼、内脏器官（如胃、肺、心脏、肝等）等介质的密度均不相同。这样就使弹头对这些介质的侵彻成为一种不可复现的过程。目前尚不能确切地定量描述弹头或破片侵彻人体时的力学和生理过程。不过，借助动物实验、非生物模拟实验（水、肥皂和明胶等的实验）和战伤调查等，现已能对致伤过程进行大致的定性说明，对其中某些问题可进行定量分析。

弹头或破片命中有生目标时，常须先穿透目标的防护装备，才能侵入有机体内形成创伤。有生目标的防护装备（如钢盔、尼龙避弹衣等）要吸收一定的动能，然后触及皮肤。皮肤韧性大，吸收能量多。实验证明，在肌肉组织厚度相同的条件下，人体皮肤的减速系数比肌肉大 40%。

穿过皮肤的弹头或破片将侵入肌肉组织。在空气中稳定飞行的弹头侵入肌体后，由于组织密度突然增大 800 多倍，造成弹头失稳，章动角迅速增大，使弹头前进的阻力激增，前进的速度迅速减小。高速弹头的减速，其能量一部分用于克服弹道上的有机组织做功，一部分用于推动弹道四周的肌肉运动做功，弹道四周的肌肉组织因而产生径向运动，一直达到最远位置。此时弹头已飞离，这就是所形成的弹后空腔。它的最大直径比弹径大几倍、十

几倍，甚至几十倍。最大弹后空腔形成后，腔内压力较低，在肌肉弹性恢复力的作用下，空腔回缩，腔内压力逐渐升高，达到一定值时，又会使空腔膨胀……如此反复，空腔容积逐渐减小，最后稳定的空腔称为永久伤道（亦称原发伤道）。瞬时空腔的这种脉动，使永久伤道周围的肌肉组织也产生损伤。在永久伤道周围损伤严重的区域称为坏死区。坏死区外面的称震荡区。震荡区外面即为正常组织，即创伤未波及的区域。瞬时空腔形成的时间极短，只有几毫秒，肉眼观察不到，借助高速X射线照像或非生物模拟试验才能观察到。对于弹速较低的弹头所形成的创伤，有人将它描述成好似用木棍在雪地上扎的孔，意即创伤主要涉及到弹道区域，而对其周围的组织影响较小。

形状不规则的破片，造成的入口和出口形状、大小，取决于破片的速度和进入组织与离开组织时的姿态。如果破片的碰击速度不高，并以小的投影面积进入和离开组织，那末，入口和出口就较小；假若速度在 1000m/s 以上，通常会呈现浅而宽的入口。

速度较低的小钢球穿过软组织后，可产生小的入口和出口，通常出口小于入口。有时肌肉上的出口仅为一小裂缝，这是肌肉纤维沿其纵轴方向裂开所致。在速度较高时，特别是速度在 1500m/s 左右的小钢球，多造成浅而宽的入口，伤道复杂。速度在 1000m/s 以下的钢球穿过股部肌肉后，留下的永久伤道，一般略呈纺锤形。

当空腔涉及类似刚性结构的骨骼时，它的形状就会发生改变。由于瞬时空腔作用，软组织会被牵拉而离开骨骼，瞬时空腔塌陷后，这些组织往往不再恢复原位。

高速摄影和高速X射线照像表明，永久伤腔内的组织，在高速弹头或破片侵彻过程中会被抛出体外，一部分从入口以激溅形式抛出（主要是破片伤），一部分从出口以同样形式抛出（主要是弹头伤）。

骨骼的密度及硬度最大，弹性最小。当其受弹头碰撞后，往往形成粉碎性骨折，故消耗能量最多。用口径为 11.43mm ，质量 7.5g 的手枪弹，以 252m/s 的初速射击皮肤，骨骼，其能量消耗

见表 4-6-1。

表 4-6-1 11.43mm 手枪弹穿透皮肤、骨骼能量损失

组 织 名 称	速度下降(m/s)	能量损失(J)
皮 肤	38.1	10.89
骨 骼	99.1	73.66

由前面的叙述可以看出, 创伤形成后, 往往不局限于伤道本身, 而波及到伤道周围的组织, 这种作用称为侧向作用。特别是高速弹头侵入组织, 或弹头击中骨骼, 骨骼的破碎运动又会伤及周围组织, 另外在击中内脏器官中液体较丰富的部位, 由于“液体动力作用”的影响会扩大创伤……, 这些都会增大弹头的侧向作用。

二、影响杀伤作用的因素

从上述弹头或破片对有机体的侵彻过程分析可以看出, 影响致伤作用的因素很多。有投射物(弹头或破片)本身性态的影响, 如投射物的碰击速度、质量、形状和结构, 以及着靶姿态等; 也有目标本身的组织特性的影响, 如着靶部位, 目标的防护情况等。

1. 投射物的质量和碰击速度

弹头或破片碰击目标后, 对目标的致伤作用, 主要是由传递的动能造成的, 这就涉及到质量和速度两个因素。碰击目标瞬间的速度, 是决定致伤效应的一个重要因素。在质量不变的条件下, 动能与速度平方成正比。高速弹头或破片, 不仅具有较高的动能, 而且在侵彻有机体的过程中, 能较快地向机体传递能量, 从而造成严重的创伤。这可由阻力与速度的平方成正比来得到解释。弹头在介质内受到的阻力越大, 其速度衰减也就越大, 它向介质传递的能量越多, 所形成的创伤就越严重。

表 4-6-2 和表 4-6-3 列出了不同碰击速度下的致伤效应。可以看出, 用同一种弹头或破片, 在使厚度相近的肌肉组织致伤时,

随着碰击速度增大，则伤道入、出口面积之比，坏死组织清除量和伤道容积等，都将随之增加。

表4-6-2 直径5.56mm钢球致伤效应

碰击速度(m/s)	出口与入口面积之比	坏死组织清除量(g)	伤道容积(cm ³)
555	1.76	3.8	8.4
955	2.85	17.3	21.5
1151	5.29	38.2	34.5
1448	6.43	48.8	50.3

表4-6-3 56式7.62mm枪弹弹头致伤效应

碰击速度(m/s)	出口与入口面积之比	坏死组织清除量(g)	伤道容积(cm ³)
718	1.41	36.0	16.8
508	1.35	17.0	11.8

高速弹头或破片在侵彻组织过程中，其章动角会随着弹速的减小而增大；随着章动角的增大，又会使阻力增加，速度下降。

具有相同能量和阻力断面的两投射物质量越大，在介质中克服阻力、保存速度的能力越强；质量越小，在侵彻组织过程中速度衰减很快。这就会使能量释放迅速，形成宽而浅的伤道。同理，小质量的弹头或破片，速度越高，减速越快，能量释放也就越迅速，创伤效应就越大。

2. 弹头或破片的结构、形状

弹头的结构特性直接影响它在组织内的能量传递。例如增长弹头弧形部高度，或调整弹头的质量分布，可增大弹头质心与阻力中心的距离，可使弹头侵入目标后章动角容易增大，减速快，传递给目标的能量增加。

若弹头的结构使其在侵入目标后容易变形，则在目标中所受阻力加大，对目标的致伤效应也就严重。例如苏5.45mm普通弹头，在其尖部有一段较长的“空间”(见图2-1-4c)，在侵入有机体后就比较容易变形，会增大致伤效应。

弹头外形不对称，命中目标后就容易翻转，会使能量传递迅速，有利于增大致伤效应，联邦德国 4.6mm 普通弹头即属此种。非对称的弹头形状有：弹尖部一侧斜着“切去”一部分，“切面”为平面或凹面；弹尖两侧都“切去”一部分，两边斜面的角度不对称，切面大小不等；在弹尖两侧斜“切去”一部分，一侧“切面”较大，为凹面，另一侧“切面”较小，为凸面，使弹尖略微偏向一侧，微带钩形（图 4-6-1）。

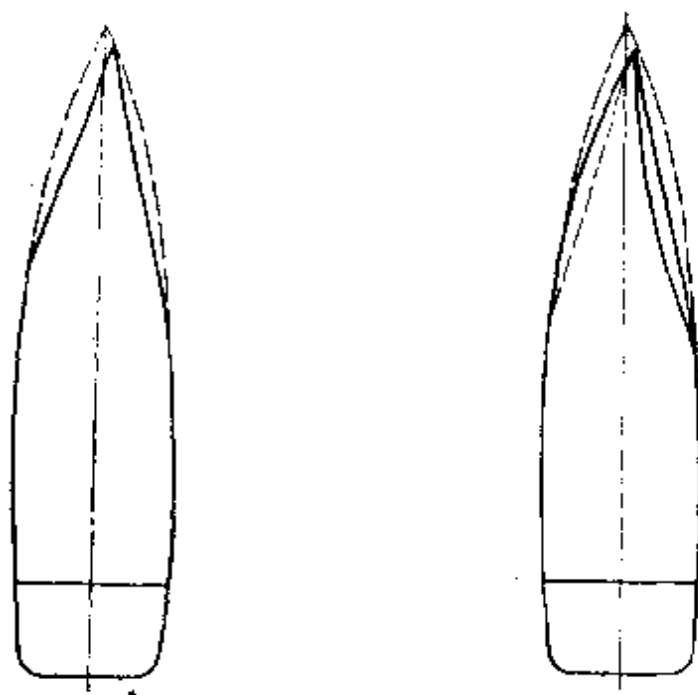


图4-6-1 非对称的弹头

钢珠在组织内不易变形，但当遇到组织内的密度不均匀部位时，容易改变其前进方向，从而造成迂回曲折的伤道。

3. 投射物侵入组织后的运动状态

弹头由空气中侵入有机体，介质密度突然增大，弹头的章动角将迅速增大，其值与弹头的初始章动角（着靶姿态）有关。初始章动角愈大，弹头在目标内章动角增加得愈快，弹头减速快，传递给目标的能量迅速增加。

投射物侵入组织后的运动状态对致伤效应的影响，正日益受到重视。在空气中飞行稳定的弹头，当其侵入有机组织后，由于介质密度的剧增，则阻力也将剧增，于是弹头在此密介质中将不

能保持飞行稳定。章动角将迅速增大，甚至大于 90° ，但这需要一定的时间。原来很稳定的弹头需较长的时间，稳定性稍差的弹头所需时间较短。肥皂的射击试验可形象地描述这种情况（图4-6-2）。图中的虚线表示有机组织的界面。可以看出，弹头在组织内的运动状态，直接影响伤道的出、入口面积的比值，也就是影响致伤效应。稳定性很好的弹头，侵彻厚度不大的组织时，弹头传递给组织的能量不大，创伤较轻。稳定性较差的弹头，侵入组织后，稳定性失去得较快，章动角增加得较迅速（翻倒），即使是组织的厚度不太大，也会将较多的能量传递给组织，伤道的出、入口面积的比值大，创伤较严重。

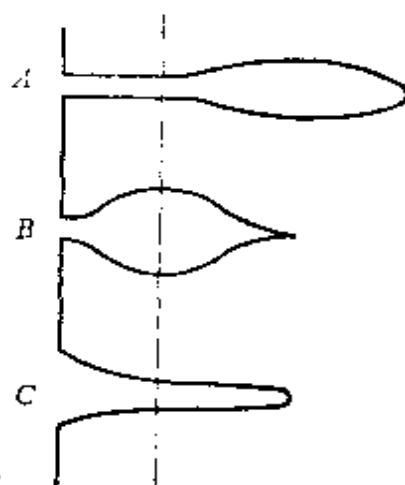


图4-6-2 弹头的状态与形成创伤的关系

A—很稳定的弹头；B—稳定性较差的弹头；C—球形弹头（或预制钢珠破片）。

弹头在组织内产生翻倒，会使弹头受力较大，这就容易产生变形或破碎，会造成更严重的创伤。

通过上述分析可以看出，增大初始章动角或弹头侵入组织后能及早产生翻倒，都会显著增大致伤效应。

有人曾做过如下实验：用56式7.62 mm弹头对狗的双后肢射击，当碰击速度为725 m/s时，伤道出、入口面积之比为1.41，坏死组织清除量48.5 g。若紧靠狗后肢肥的前面。放置厚度为186 mm的肥皂块，射击条件与前同。这时弹头穿过肥皂，碰击狗后肢的速度为570 m/s，但狗后肢出、入口面积之比为前述实验的10倍，坏死组织清除量为3倍。这说明当弹头穿透肥皂后，速度虽然有所降低，但它碰击狗腿时的初始章动角增大了，即比以前更容易翻倒了，因而造成较严重的创伤。

在使用避弹衣时也有类似情况。据经验：柔韧的避弹衣，可

使某些弹头的速度减少 305 m/s 。因此, 对初速约 300 m/s 的手枪弹, 人体利用避弹衣能得到充分的保护; 对于碰击速度不大的流弹、破片, 也有相应的防护作用。此外, 避弹衣还能使某些较软的弹头发生严重变形而大量减速, 从而减轻对人体组织的损伤。但是对于速度相当高、而且不太容易变形的弹头或破片, 避弹衣减速作用带来的好处将不明显。因为, 避弹衣使某些弹头更容易失稳、变形, 反而加剧了弹头的致伤效应。如在 100 m 距离上, 某些弹头通过 11~12 层尼龙布的避弹衣所造成的减速, 还不到 100 m/s 。将 12 层尼龙布的避弹衣材料放在肥皂外面, 无论用 5.56 M193 弹, 还是 56 式 7.62 弹进行射击, 肥皂内部都反映出增长得很快能量传递。56 式 7.62 弹的能量传递, 比没有避弹衣防护时大两倍。

三、致伤效应的判据

由上述讨论可以看出, 影响投射物杀伤效果的因素很多, 如何用—个综合指标来衡量或评定武器的杀伤效能呢? 一个弹头或一块破片应具备何种能力方有可能杀伤目标呢? 这些都是比较复杂的问题。

停止作用是被人们广泛用于表示致伤效应的一个术语。它的含意是弹头或破片使被击中者丧失战斗力的能力, 可用目标被击中后立即或在数十秒内丧失战斗力的概率表示。

所谓丧失战斗力, 是指作战人员的伤情使之不能继续执行指派的任务。例如在执行进攻任务的步兵, 若其下肢受伤不能行走, 则意味着进攻能力的丧失。但这样的伤员, 在防御战斗中并不一定丧失其防御能力。除非人员的致命部位 (如脑、心脏、中枢神经等) 受伤后可引起立即死亡外, 在大多数情况下, 从人员被命中至肌体失去协调, 即丧失战斗力, 都需经历一定时间。

一般来说, 在给定时间间隔内, 中弹者丧失战斗力的概率值的大小, 主要取决于弹头或破片传递的能量、中弹部位和战斗条件。这里介绍对人员目标几种有代表性的致伤效应的判据。

1. 动能判据

该判据给出致伤能量的临界值,是与停止作用相对应的一种能量标准量。对人员杀伤的动能 E , 取为 $78 \sim 98 \text{ J}$, 即投射物命中目标时的动能小于此值则不能杀伤; 命中时的动能大于此值则可达到杀伤目的。

2. 比动能判据

该判据考虑了破片与目标遭遇时的着靶面积。由于破片是多边形, 飞行中是旋转的, 故着靶面积是随机变量。

$$e_y = \frac{E_y}{s} \quad (4-6-1)$$

式中 e_y ——破片的比动能;

E_y ——破片的着靶动能;

s ——破片着靶面积的数学期望值。

杀伤人员所需的比动能可取 $1.27 \sim 1.47 \text{ MJ/m}^2$ 。

3. A—S 判据

这是 1956 年美国的 F. Allen 和 J. Sperrazza 提出的公式, 它考虑了士兵(目标)的任务和从受伤到丧失战斗力的时间间隔。按照这一概念, 当士兵因受伤而不能执行其指定任务时, 就被认为伤亡。该公式可用于计算执行特定任务的士兵丧失战斗力的条件概率:

$$P_{hk} = 1 - e^{-a(9.17 \times 10^4 m v^{1.5-b})^n} \quad (4-6-2)$$

式中 P_{hk} ——钢弹随机命中目标, 使执行特定战术任务的士兵丧失战斗力的条件概率;

m ——钢弹质量 (kg);

v ——撞击速度 (m/s);

a, b, n ——取决于若干军事紧急情况 and 从受伤到丧失战斗力的时间间隔的常数值 (表 4-6-4)。

〔例题〕 破片质量 $m_p = 1 \text{ g}$, $v = 1000 \text{ m/s}$, 击中防御人员, 试求在 30 s 内使之失去战斗力的概率。

解 由表 4-6-4 查出防御-30 s 之 a, b, n 值, 分别为

表4-6-4 四种典型情况的 a 、 b 、 n 值

序号	说 明	a	b	n
1	防御-30 s ①	8.8771×10^{-4}	31400	0.45106
2	突击-30 s 防御-5min	7.6442×10^{-4}	31000	0.49570
3	突击-5min 防御-30min 防御-0.5 d	1.0454×10^{-3}	31000	0.48781
4	供应-0.5 d 供应-1 d 供应-5 d 预备队-0.5 d 预备队-1 d	2.1973×10^{-3}	29000	0.44350

① 即防御人员在30 s内丧失战斗力(其余类推)。

8.8771×10^{-4} 、31400 和 0.45106, 代入公式 (4-6-2)

$$P_{Ak} = 1 - e^{-8.8771 \times 10^{-4} \times (8.17 \times 10^{-4} \times 0.01 \times 1000^{1.5} - 31400) 0.45106} = 0.516$$

表4-6-5 不翻滚箭形弹的 a 、 b 及 n 值

情况序号	a	b	n
1	0.55311×10^{-3}	15000	0.44371
2	0.46134×10^{-3}	15000	0.48535
3	0.69193×10^{-3}	15000	0.47352
4	1.8579×10^{-3}	15000	0.41498

表 4-6-6 给出了 0.3 in 口径的步枪子弹 (M2) 随机命中 274.3 m 内目标使之丧失战斗力的条件概率。

表4-6-6 0.30in子弹随机命中使目标丧失战斗力的概率值

敌方紧急情况	受伤后时间			敌方紧急情况	受伤后时间		
	30 s	5min	30min		30 s	5min	30min
进攻	0.61	0.73	0.89	后备	0.64	0.74	0.90
防御	0.49	0.65	0.84	补给	0.79	0.85	0.93

第七节 破片的杀伤作用场

一、有效破片与杀伤破片

讨论破片的杀伤作用场，除与破片的杀伤判据有关外，还不得不涉及有效破片与杀伤破片的概念。直到目前还存在着不同的提法。例如对人员，一种较老的规定是，1 g 以上破片作为有效破片，4 g 以上破片作为杀伤破片。但随着弹药技术的发展，破片初速的提高，人们对创伤机理的认识和更加完善的杀伤判据的提出，这种规定已经逐渐失去了其合理性。为了计算杀伤面积，这里对有效破片及杀伤破片提出以下定义。

有效破片 弹丸爆炸后那些对目标具有杀伤能力的初始破片。这样，初速高的破片其质量可小。此外，有效破片的具体质量还取决于杀伤判据。例如，当破片初速 $v_p = 1000 \text{ m/s}$ ，根据动能判据，其有效破片质量约为 $0.16 \sim 0.2 \text{ g}$ ；但根据 A-S 判据反为 0.01 g 。

杀伤破片 破片在飞行过程中，速度是不断衰减的。在一定距离上，仍具有杀伤能力的破片，即称为杀伤破片。可见，质量较小的有效破片，在飞行不大的距离后，就不再是杀伤破片了。

二、杀伤破片的飞失

由前述讨论可以看出，破片的杀伤作用与破片的质量和存速有关。在飞行过程中，破片的速度在不断衰减，所以随着飞行距离的增大，破片的杀伤作用逐渐减弱，有的破片甚至不起杀伤作用。杀伤破片的最小质量是速度的函数。设在一定距离上破片的存速为 v ，则杀伤破片最小质量应为 $m_{p_r}(v)$ 。由此，大于 $m_{p_r}(v)$ 的全部破片数目 N_r 为

$$N_r = N(m_{p_r}) = N_0 e^{-(m_{p_r}/\mu)^{0.8}} \quad (4-7-1)$$

由杀伤破片的定义可知,只要在一定距离上 $P_{hk} > 0$ 的破片,即为杀伤破片。但它们的杀伤能力并不相同,其杀伤概率的具体值是与所采用的致伤效应的判据有关。当采用能量判据时,由于认为每块杀伤破片是具有充分杀伤能力的,即 $P_{hk} = 1$ 。当采用 A-S 判据时,杀伤概率与破片的质量、速度等有关,故应将 N_i 块破片按质量分为若干组(例如 n 组),然后按其条件杀伤概率用加权平均的方法求得杀伤破片的平均数 $\bar{N}_s$:

$$\bar{N}_s = \sum_{i=1}^n N_i P_{hk}^i \quad (4-7-2)$$

式中 N_i ——第 i 组内破片数目,

$$N_i = N_0 \left[e^{-(m_{p_i}/k)^{0.5}} - e^{-(m_{p_{i+1}}/k)^{0.5}} \right]$$

m_{p_i} 、 $m_{p_{i+1}}$ ——该组内的破片单块质量界限,

P_{hk}^i ——该组内破片的平均条件杀伤概率,

$$P_{hk}^i = 1 - e^{-\alpha (9.17 \times 10^4 \bar{m}_{p_i} v_i^{1.5} - b)^n}$$

$\bar{m}_{p_i}$ ——该组内破片平均质量,可近似取为 $(m_{p_i} + m_{p_{i+1}})/2$ 。

显然,若采用能量判据,则

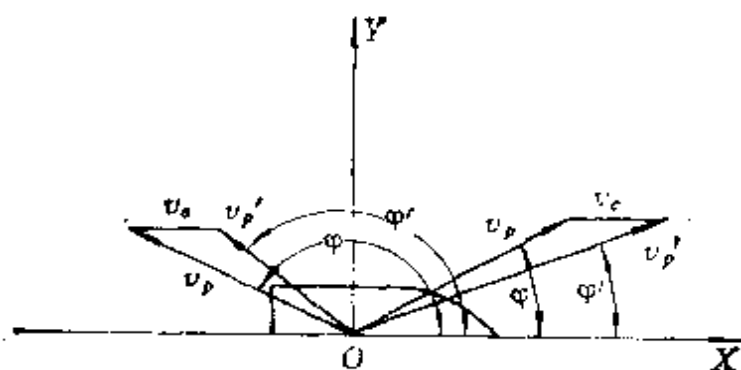
$$\bar{N}_s = N_s \quad (4-7-3)$$

对于任意距离 R 及飞散方位 φ 上的杀伤破片平均球面密度 $a_s(R, \varphi)$ 可根据公式 (4-4-13) 求出,即

$$a_s(R, \varphi) = \frac{\bar{N}_s}{R^2} \rho(\varphi) \quad (4-7-4)$$

三、弹丸运动对破片作用场的影响

以前讨论的问题都是弹丸在静止爆炸时的情况。实际上,在爆炸时弹丸本身具有一定的运动速度 v_e 。这个速度将影响每个破片,从而使弹丸破片的飞散分布发生变化。破片的速度将由原来的 v_p 改变为 v'_p ; 飞散方向由原来的 φ 变为 φ' 。 v'_p 和 φ' 可用平行四边形法则求出(图 4-7-1)。

图4-7-1 v_c 对破片飞散运动的影响

$$v_p' = \sqrt{v_p^2 + v_c^2 + 2v_p v_c \cos \varphi} \quad (4-7-5)$$

$$\varphi' = \operatorname{tg}^{-1} \frac{v_p \sin \varphi}{v_c + v_p \cos \varphi} \quad (4-7-6)$$

式中 v_p ——静态下爆炸破片的速度；

v_c ——弹丸速度；

v_p' ——动态下爆炸破片的速度。

由式 4-7-6 可知，在第一象限内，破片速度增大，在第二象限内，破片速度减小。总的来说，使全部破片的飞散方向前倾，即方向角减小。

在近似的情况下，仍然认为动态下的破片飞散密度服从正态分布，但飞散角的数学期望由 $\bar{\varphi}$ 变至 $\bar{\varphi}'$ ，均方差由 σ 变至 σ' 。具体值可按下列方式确定：

$$\bar{\varphi}' = \operatorname{tg}^{-1} \left(-\frac{v_p \sin \bar{\varphi}}{v_c + v_p \cos \bar{\varphi}} \right) \quad (4-7-7)$$

$$\sigma' = (\varphi'_2 - \varphi'_1) / 3.3 \quad (4-7-8)$$

在动态条件下的破片飞散密度分布函数为

$$f_{\mu}(\varphi') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma'} e^{-\frac{(\varphi' - \bar{\varphi}')^2}{2\sigma'^2}} \quad (4-7-9)$$

第八节 杀伤面积的计算

一、杀伤面积

若弹丸在布有目标的地面上一定高度处爆炸 (图 4-8-1), 破片向四处飞散, 根据前面讨论过的内容, 我们可以得出弹丸杀伤破片的作用范围。这个杀伤作用范围与目标平面相交, 割出相应一块面积 S 。目标如果位于此面积内, 则可能被杀伤破片击中而毁伤; 目标如果处于此面积以外, 因该处破片已不具备杀伤能力, 目标即使被击中也不会被杀伤。

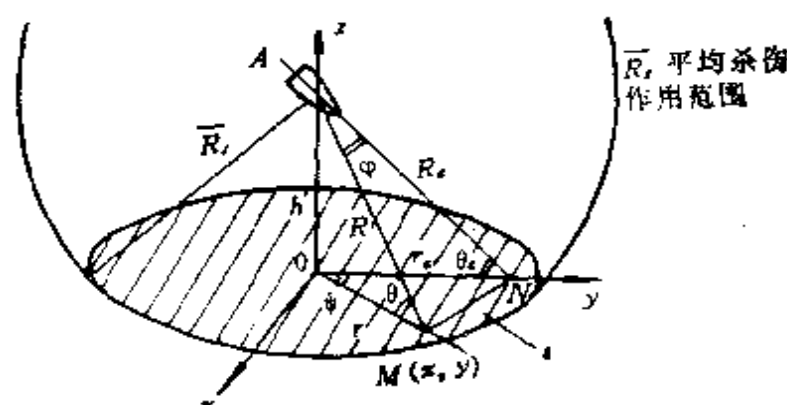


图4-8-1 杀伤面积的计算

但是, 在面积 S 内, 各处的破片密度是不同的。因此目标被杀伤的机率也处处不同。在地面上任一处 (x, y) 取微面积 $dxdy$, 若目标在此微面积内被击中并毁伤的概率为 $P(x, y)$, 则微面积 $dxdy$ 内的杀伤面积为 $dS_A = P(x, y)dxdy$, 全弹的杀伤面积 S_A 、目标被杀伤数目的数学期望 n_k 即为式 (4-1-3) 和式 (4-1-4) 所表示的。

可以看出, 杀伤面积是一个等效面积, 它是比较弹头攻击特定目标效能的一个量。杀伤面积越大, 弹头的杀伤效果越好。

二、破片杀伤生动目标的概率

弹丸爆炸后生成 N_0 块破片, 破片的大小与飞散都是随机的, 故击中任意点 (x, y) 处目标的破片数与各破片的杀伤能力亦是随机的。目标可能为一块破片击中, 也可能为 2 块、3 块……直至 N_0 块击中。设单块破片击中目标的概率为 P_h , 则目标为 i 块破片击中的概率服从二项式分布, 即

$$P_i = C_N^i P_h^i (1 - P_h)^{N_0 - i}$$

当 P_h 很小及 N_0 很大, 可导致

$$P_i \approx \frac{(N_0 P_h)^i}{i!} e^{-(N_0 P_h)} = \frac{\bar{m}^i}{i!} e^{-\bar{m}}$$

这就是泊松 (Poisson) 分布。其中 $N_0 P_h = \bar{m}$ 称为破片命中数目的数学期望。

在击中目标的 i 块破片中, 由于破片大小不同, 杀伤能力亦不相同。现令单块破片对目标的平均杀伤率以其条件概率 $\bar{P}_{hk}$ 表示, 并假定各破片杀伤目标为独立事件, 则目标被 i 块破片击中条件下被杀伤的概率为

$$q_i = 1 - (1 - \bar{P}_{hk})^i$$

则目标被 i 块破片击中并杀伤的概率为 $P_i q_i$ 。目标为破片所杀伤的全概率为

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^{N_0} P_i q_i = \sum_{i=1}^{N_0} \frac{\bar{m}^i}{i!} e^{-\bar{m}} [1 - (1 - \bar{P}_{hk})^i]$$

由于 $\bar{m}$ 为定值, 故上式可写为

$$P(x, y) = e^{-\bar{m}} \left\{ \sum_{i=1}^{N_0} \frac{\bar{m}^i}{i!} - \sum_{i=1}^{N_0} \frac{[\bar{m}(1 - \bar{P}_{hk})]^i}{i!} \right\}$$

当 N_0 很大时, 则

$$\sum_{i=1}^{N_0} \frac{\bar{m}^i}{i!} \approx e^{\bar{m}} - 1$$

$$\sum_{i=1}^{N_0} \frac{[\bar{m}(1-\bar{p}_{hk})]^i}{i!} = e^{\bar{m}(1-\bar{p}_{hk})} - 1$$

代入前式得

$$P(x, y) = 1 - e^{-\bar{m}\bar{p}_{hk}} = 1 - e^{-\bar{N}_r} \quad (4-8-1)$$

式中 $\bar{m}$ ——破片命中数目的数学期望,

$\bar{p}_{hk}$ ——每个破片的平均杀伤概率,

$\bar{N}_r$ ——击在 (x, y) 处目标上杀伤破片数目的数学期望。

击中目标的杀伤破片预期数参照 (4-4-2) 式又可写为

$$\bar{N}_r = a_r(x, y) S_n$$

式中 $a_r(x, y)$ ——杀伤破片的球面分布密度,

S_n ——目标的迎弹面积, 即目标在炸目连线上的投影面积。在更准确时亦可考虑成目标要害部位的投影面积。

则 (4-8-1) 式可写成

$$P(x, y) = 1 - e^{-a_r(x, y) S_n} \quad (4-8-2)$$

所以, 为了求出破片杀伤生动目标的概率 $P(x, y)$, 需求出杀伤破片的分布密度。这就涉及到破片的生成规律, 包括破片初速、质量大小和飞散方向的分布; 还涉及破片飞行规律及杀伤判据。

三、杀伤面积的计算

假设弹丸在距地面某高度 h 处爆炸, 其落角为 θ_0 。根据破片的飞失规律, 由 (4-4-13) 式可求出地面被破片击中某方向 φ 处的破片球面密度 $a(\varphi, R)$, 即

$$a(\varphi, R) = \frac{N_0}{R^2} \rho(\varphi) \quad (4-8-3)$$

R 和 φ 可由几何关系求出 (图 4-8-1)。

$$R = \sqrt{h^2 + (x^2 + y^2)}$$

另外由

$$\overline{MN^2} = R_c^2 + R^2 - 2RR_c \cos \varphi = r_c^2 + r^2 - 2rr_c \cos \psi$$

可解出

$$\cos \varphi = \frac{(R_c^2 - r_c^2) + (R^2 - r^2) + 2rr_c \cos \psi}{2RR_c}$$

又知

$$R_c^2 - r_c^2 = R^2 - r^2 = h$$

$$r \cos \psi = y$$

$$\frac{h}{R_c} = \sin \theta_c, \quad \frac{r_c}{R_c} = \cos \theta_c$$

所以

$$\cos \varphi = \frac{1}{R} (h \sin \theta_c + y \cos \theta_c)$$

或

$$\varphi = \cos^{-1} \left[\frac{1}{\sqrt{h^2 + x^2 + y^2}} (h \sin \theta_c + y \cos \theta_c) \right] \quad (4-8-4)$$

由 (4-2-14) 式

$$N_0 = \frac{M}{2\mu}$$

μ 可由 (4-2-19) 式求出。

$\rho(\varphi)$ 由 (4-4-14) 式求出, 即

$$\rho(\varphi') = \frac{f(\varphi')}{2\pi \sin \varphi'}$$

$f(\varphi')$ 采用正态分布, 即 (4-7-9) 式所表示的。

按公式 (4-3-8) 计算破片初速 (略去弹丸速度的影响)。根据公式 (4-5-14) 计算不同质量 (考虑到对人员目标的实际情况, 小于 0.1 g 的破片质量可以不计入) 破片在距离 R 处的存速 v_0 。依据所遵循的杀伤判据, 计算各质量组破片的杀伤概率 P_{hk}^i 。按公式 (4-7-2) 算出在半径为 R 球面上的杀伤破片预期值 $\bar{N}_r$ 。

杀伤破片球面密度按公式 (4-7-4) 计算。每个目标在破片

飞散方向的投影面积 S_m 。例如对地面上的卧姿和立姿目标分别为

$$\left. \begin{aligned} S_m &= S \sin \theta \\ S_n &= S \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (4-8-5)$$

式中 θ ——破片飞散方向与地面的夹角。

这样用公式 (4-8-2) 可求出破片对目标的杀伤概率 $P(x, y)$ 。单元小格内的杀伤面积 ΔS 为

$$\Delta S = P(x, y) \Delta x \Delta y$$

弹丸的全部杀伤面积

$$S = \sum \Delta S \quad (4-8-6)$$

四、影响杀伤面积的因素

以上所述表明, 杀伤榴弹的效能是通过杀伤面积来衡量和比较。弹丸结构良好、合理的设计, 必然对应着较大的杀伤面积。影响杀伤面积的因素很多, 对于一定目标和射击条件下, 破片初速、块数、破片质量分布, 都直接影响着杀伤面积的大小。而这些又都是取决于弹丸的结构特性, 如弹体尺寸形状、弹体材料和炸药性能等。下面将分别予以讨论。

1. 破片的状态

破片的质量分布、初速、形状、总数量等均对杀伤面积有影响。一般来说, 当破片数目多, 杀伤破片数目及其平均密度增加, 则杀伤面积增加。破片初速增加, 杀伤面积增大。球形或立方体破片, 有利于保持速度, 使破片在较远的距离上仍具有杀伤能力, 亦可使杀伤面积增大。从整体来看, 为了获得好的综合效果, 应从改善弹体的破碎性入手, 即尽量减少过重和过轻的破片数, 并使破片的形状尽量趋于立方体形。

2. 弹丸直径和弹体的几何形状

随着弹丸直径的增大, 弹丸破片数目增多, 破片的平均质量也增大, 经验证明, 由于弹丸直径增大而增多的破片数量中, 其

中 70~80% 属于 1g 以上的破片, 1~3g 的破片仅占 20~30%。因此, 破片平均质量趋大, 使单位质量的破片数目相应减少 (图 4-8-2)。

弹体的几何形状与结构主要影响破片的质量分布和飞散角。通常弹壁薄, 破片就少; 弹壁厚, 破片就较大; 弹壁各处厚薄不均匀, 破片大小也不均匀。为了获得较理想均匀的破片, 可在弹体外表面分别刻出相应的纵向和横向沟槽。

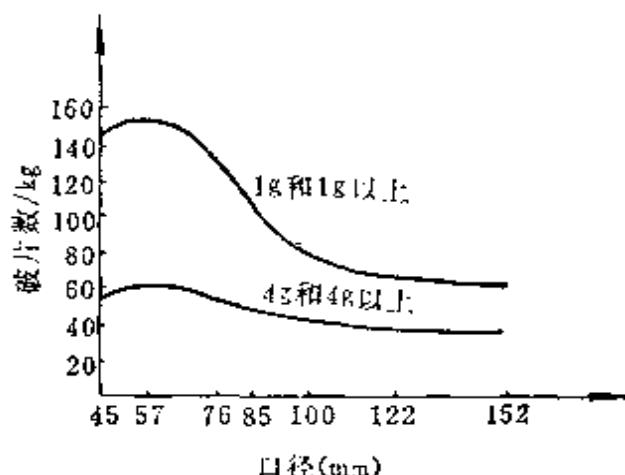


图 4-8-2 弹丸直径对破片的影响

3. 弹体的金属材料

弹体的金属材料主要是通过其机械性能对破片的状态产生影响。其中尤其是材料的塑性、断面缩减率和冲击韧性的影响。通常塑性材料 (如钢) 的断面缩减率和冲击韧性较大, 而脆性材料 (如各种铸铁) 则较小。

由经验可知, 随着材料塑性的增大, 弹体的破碎性变差, 即破片的数目减少, 质量分布不均, 破片的平均质量偏大; 与此同时, 破片的速度却有所增加。反之, 随着冲击韧性或断面缩减率的减小, 材料脆性增大, 形成的破片较规则, 破片弹道性能较好, 但因破裂时弹体的膨胀变形过程较短, 炸药传给破片的能量就较少, 使破片的初速相对较小。

4. 炸药性能和量的影响

弹体的破碎性质主要取决于炸药对弹体壁的冲量。比冲量愈大, 破片愈碎, 数目愈多, 速度也愈大。影响炸药比冲量的主要因素是炸药的爆轰速度和炸药的相对质量 (与弹体质量的比值)。一般说来, 炸药威力大, 装填密度大, 爆速和比冲量也大。同样, 炸药质量多, 比冲量也随之增加。

第五章 穿甲作用

第一节 概 述

穿甲作用是指弹头（丸）对装甲碰击后侵彻和破坏装甲的作用，是研究弹头接触装甲以后的弹道运动。弹头对装甲的侵彻意即弹头撞击靶板后，弹头钻入（或侵入）靶板的行为。在弹头侵彻靶板的过程中，可能会出现三种后果，即穿透、嵌入和跳飞。穿透是指弹头贯穿通过靶板的现象；嵌入是指弹头在侵彻过程中，被阻止停留在靶板内的现象；跳飞是指弹头在对靶板的侵彻过程中，从靶板表面脱离了靶板的现象。

弹头的穿甲作用是一个比较复杂的物理过程，属于高速碰撞问题的一个方面，是一个十分复杂、困难的问题，涉及广泛的数学、力学知识，目前仍然是国内外有关人员在努力解决的课题之一。

影响穿甲作用的因素较多，例如弹头撞击靶板的速度，弹头与靶板间的命中角，穿甲弹（心）的材料和机械性能，靶板的材料和机械性能、靶板的厚度等等。它们之间是互相影响的，这就需要分各种情况来讨论穿甲作用，例如弹头的结构和靶板的性能不同时，在侵彻过程中，穿甲弹体[●]对靶板的相互作用过程及靶板的破坏形式也就不同。

战场上的装甲防护目标，例如飞机、军舰、装甲运兵车、坦克等所采用钢甲材料，按其性质可分为均质和异质两种。均质钢甲的硬度和韧性在整个厚度上是一样的。异质钢甲的硬度和韧性

● 穿甲弹体是指穿甲弹参予穿甲的部分，对穿甲枪弹指穿甲弹心。

在整个厚度上是不同的, 表面硬度大, 内层硬度低但韧性较高, 这可用表面渗碳或表面淬火等方法得到。

根据钢甲的防护要求, 均质钢甲按硬度可分为高、中、低三种。高硬度钢甲的硬度最大, 韧性低 ($\alpha_k=343\sim686\text{kJ/m}^2$, $dH_s=2.6\sim3.1\text{mm}$, $\sigma_b=1274\sim1666\text{MPa}$); 中硬度钢甲具有较高的硬度和足够的韧性 ($\alpha_k=784\sim1274\text{kJ/m}^2$, $dH_s=3.3\sim3.6\text{mm}$, $\sigma_b=931\sim1078\text{MPa}$); 低硬度钢甲具有高的韧性和相当低的硬度 ($\alpha_k=1372\text{kJ/m}^2$, $dH_s=3.7\sim4.1\text{mm}$, $\sigma_b=764\sim833\text{MPa}$)。高硬度均质钢甲对枪弹和小口径穿甲弹的抵抗能力较强, 所以它主要用于制造装甲车辆、轻型坦克和飞机结构中。中硬度均质钢甲, 由于其韧性较大, 对中口径以上穿甲炮弹的抵抗能力较好, 因此广泛使用于中型和重型坦克上。低硬度均质钢甲仅用于坦克的次要部位上, 如底部和隔壁等。

靶板按其厚度可分为以下几种:

(1) 半无限厚靶板: 当弹体的侵彻过程不受远方边界表面的影响时, 这种靶板可看作半无限厚靶。

(2) 厚靶板: 当弹体侵彻靶板相当远的距离后, 远方边界才对侵彻过程发生影响, 这种靶板可看作厚靶板。

(3) 中厚靶板: 在弹体的整个侵彻过程中, 远方边界表面对侵彻的全过程都有不可忽视的影响, 这种靶板可看作中厚度靶板。

(4) 薄靶板: 在弹体与靶板的作用过程中, 靶板的应力和变形在厚度方向没有梯度, 这种靶板可看作薄靶板。

上述靶板厚度特征, 可以用撞击作用从弹体和靶板的撞击接触面传播到它们各自的背面所需时间的长短来决定。假定这种效果是通过应力波传播的 (例如, 在低速撞击时, 应力波是以弹性波速传播的), 当弹体中的应力波完成一次传播时, 靶板中的应力波一般可以传播多次。设这个传播次数用 n 表示, 则

$$n = \frac{c_r}{c_p} \times \frac{L_t}{b}$$

式中 c_r 、 c_p ——分别为应力波在靶板、弹体中的传播速度;

b 、 L_r ——分别为靶板厚度、弹体长度。

若用弹径相对值表示，则

$$n = \frac{c_t}{c_p} \times \frac{L_r/d}{b/d}$$

规定当 $n > 5$ 时，即为薄靶板。这个数字是根据弹头前方靶板内的应力逐渐取得稳定值这个要求决定的。当 $1 < n < 5$ 时是中厚度靶板。在这种情况下，靶板背面的影响业已存在，但应力尚未稳定。当 $n < 1$ 时是厚靶板，应力波从靶板背面反射回来所需时间比弹体中的应力波反射回来所需时间还要长。虽然上述所规定的 n 值都是主观的，但它们建立了弹-靶相对尺寸的粗略范围，在此范围内能把薄、中厚、厚靶板区分开来。

弹体的着靶速度对各种各样的侵彻现象影响特别大，是一个重要因素。按着靶速度分，弹体对靶板的侵彻可分为低速穿甲、高速穿甲和超速穿甲。穿甲弹通常用的发射装置是常规的枪炮，它们的初速一般在 $500 \sim 1300 \text{ m/s}$ 之间，通常称为“枪炮速度范围”，简称“弹速范围”。一般认为弹体着速在 1000 m/s 以下为低速穿甲，此时弹坑直径与弹径接近，侵彻深度受弹径影响很大，随弹速增加而增加。弹体着速在 1000 m/s 和 1300 m/s 之间为高速穿甲，此时弹体开始破裂，弹坑直径增大，坑壁粗糙，弹坑深度随速度增加而增大，但并不明显。当着速大于 1300 m/s 为超速穿甲，在开始碰撞阶段，弹体和靶板材料呈流体力学性质，弹坑深度受弹长细比影响大，随速度升高而增大的趋势又明显了起来。

第二节 穿甲弹对靶板的破坏作用

一、靶板在撞击中发生的现象

根据靶板在碰撞过程中所出现的各种现象，也可以来区分弹头着靶的速度范围。当着速很低时，靶板只产生弹性变形，这是

某些实验室中的实验经常遇到的低速范围。当撞击速度达到某一个极限值 v_{EA} 时, 不是靶板就是弹体的接触应力达到其材料的压缩屈服应力 σ_{ya} , 这时它们产生永久变形, 这种变形通常是一种较为复杂的力学过程。现在首先研究弹性撞击的弹性应力和撞击速度的关系。

设有一平头杆体以速度 v_E 垂直撞击平面靶 (见图5-2-1), 杆体的密度为 ρ_p , 弹性波速为 C_{op} :

$$C_{op} = \sqrt{E_p / \rho_p}$$

其中 E_p 为杆体的弹性模量; 靶体中膨胀压缩弹性波的传播速度 c_{it} 为

$$C_{it} = \sqrt{[(\lambda_t + 2G_t) / \rho_t]}$$

其中 λ_t 和 $G_t = E_t / 2(1 + \mu_t)$ 为靶体的拉梅常数, E_t 和 μ_t 为靶体的弹性模量和泊桑比, ρ_t 为靶体密度。在弹性撞击后, 杆体与靶之间的接触应力为 σ_c , 相对速度为零。设平头杆体由于接触应力 σ_c 的作用而引起的向左方后退速度为 v_1 , 靶面由于接触应力 σ_c 的作用而引起的向右方后退速度为 v_2 。接触面的真实速度为

$$v_E - v_1 = v_2$$

或

$$v_E = v_1 + v_2 \quad (5-2-1)$$

根据撞击时的动量冲量关系, 在微小的时间间隔 δt 内, 撞击应力波在杆体内向左传播 δx , 则有

$$\sigma_c \delta t = \rho_p \delta x v_1$$

但根据定义

$$\left(\frac{\delta x}{\delta t} \right)_p = C_{op}$$

所以有

$$v_1 = \frac{\sigma_c}{\rho_p C_{op}} \quad (5-2-2)$$

同理, 以靶板为对象, 可以得到

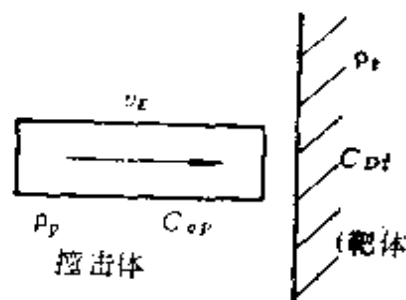


图5-2-1 碰撞前简图

$$v_2 = \frac{\sigma_s}{\rho_t C_{Dt}} \quad (5-2-3)$$

将 v_1 和 v_2 值代入 (5-2-1) 式, 则得

$$v_s = \sigma_s \left(\frac{1}{\rho_p C_{op}} + \frac{1}{\rho_t C_{Dt}} \right) \quad (5-2-4)$$

该式表示了撞击速度与撞击接触应力之间的关系。若从该式中利用 (5-2-2) 和 (5-2-3) 式消去 σ_s , 则有

$$v_1 = \frac{v_E}{1 + \frac{\rho_p C_{op}}{\rho_t C_{Dt}}} \quad (5-2-5)$$

$$v_2 = \frac{v_E}{1 + \frac{\rho_t C_{Dt}}{\rho_p C_{op}}} \quad (5-2-6)$$

v_1 和 v_2 实际上分别代表了在弹性撞击条件下, 在杆体内和靶内撞击波的传播速度。当接触应力等于杆体或靶板的屈服应力 σ_{ys} 时, 杆体或靶板中必有一者产生永久变形。和这屈服应力 σ_{ys} 有关的撞击速度应该是一种弹性撞击的极限速度 v_{EA} , 按 (5-2-4) 式则有

$$v_{EA} = \sigma_{ys} \left(\frac{1}{\rho_p C_{op}} + \frac{1}{\rho_t C_{Dt}} \right) \quad (5-2-7)$$

在此极限速度以上的弹靶撞击, 将进入塑性变形范畴。对于常用的弹靶钢质材料来说, $v_{EA} \leq 100 \text{ m/s}$ 。

在薄靶板的非穿孔性破坏中, 有两种由于塑性变形而造成的横向位移。一种是在撞击弹体头部接触部分, 靶板产生和弹头形状完全相同的隆起变形; 另一种是从直接受撞击的靶板部分, 延伸很远的由于靶板弯曲而造成的盘形凹陷变形 (见图5-2-2)。

薄靶板产生非穿孔性的塑性变形的弹体撞击速度 v_p , 有上下两个极限, 下极限即为 (5-2-7) 式的极限速度 v_{EA} , 上限为产生靶板流动变形的塑性极限速度 v_{pA}

$$v_{pA} = \sqrt{\sigma_t / \rho_t} \quad (5-2-8)$$

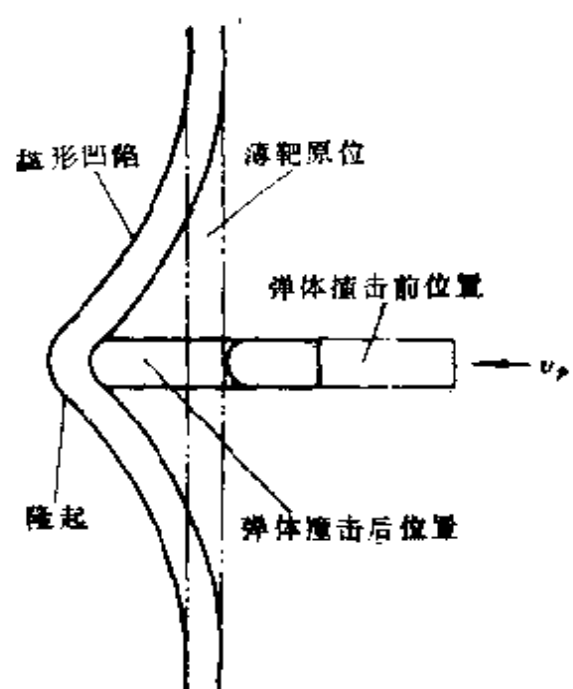


图5-2-2 薄靶板被撞击后的变形

其中 σ_y 为靶板的屈服应力。

当靶板的厚度提高时，上述靶板的塑性撞击变形就减小，也就是说厚靶板的挠度很小，塑性撞击变形只局限于靶板撞击面一边的很小局部，在很厚的靶板上，只能在撞击面上形成一个弹坑。

靶板在各种速度的弹体撞击中经历各种现象，它们包括弹性波、塑性波、流体动力学波的传播，以及造成局部或整体的变形和摩擦生热等。流动是在撞击速度达到 v_{pA} 以后开始的，一般认为当撞击速度达到与材料的体积模量 K 有关的传播波速 v_{HA} 以后，就产生根本变化，即产生流动变形的撞击速度 v_H 在 v_{pA} 和 v_{HA} 之间

$$v_{pA} \leq v_H \leq v_{HA} \quad (5-2-9)$$

其中 v_{HA} 为流动变形极限速度，

$$v_{HA} = \sqrt{K_t / \rho_t} \quad (5-2-10)$$

当撞击速度超过 v_{HA} 以后，固体的可压缩性相对减弱，即变形速度超过了固体中压缩波的传播速度，从而在固体中形成激波。其

中 K_i 为材料的体积模量 $K_i = E_i / 3(1 - 2\mu_i)$, E_i 和 μ_i 分别为弹性模量和泊桑比。但是人们对激波形成后的撞击现象研究得不多。在比它更高的撞击速度打击下, 即约在三倍于 v_{HA} 的速度时, 就会发生粉碎、相变、气化、甚至撞击爆炸等现象。

由上述可见, 穿甲作用的速度 v_c 处于 $v_{cA} \leq v_c \leq v_{HA}$ 的范围内, 包含了弹靶材料的各种各样的破坏形式。对有限厚靶板破坏来说, 情况与上述相近。对于某一穿透过程, 虽然靶板的破坏有多种机制共同起作用, 但必定有一种是占主导地位的, 它随靶板材料的性质、几何形状、以及撞击速度, 还有弹头条件的不同而各有特点。下面将分别予以讨论。

二、靶板破坏的几种形式

穿甲弹沿靶板表面法线方向命中靶板时, 靶板产生局部破坏。破坏的形式是各种各样的, 但归结起来有以下几种: 延性破坏、冲孔型破坏、花瓣型破坏、崩落型破坏和初始应力波产生的破坏等 (见图5-2-3)。

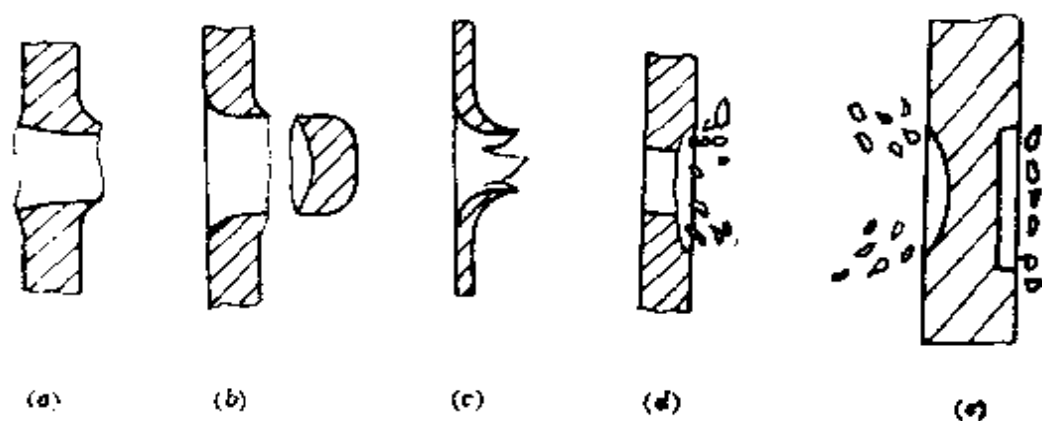


图5-2-3 靶板的破坏形状

影响靶板破坏形式的因素很多, 通常和弹体的着速、靶板的相对厚度、靶板材料的机械性能以及弹体的形状等因素有关。所以实际上靶板的破坏形式常是以上几种破坏形式的组合。

延性破坏 弹体侵入靶板时, 随着弹体的穿入, 在压应力的

作用下，金属沿径向被挤开，向最小抗力方向产生塑性流动，故入口处四周有金属向外堆积，形成翻起的唇边（图5-2-4）。靶板金属的流动取决于弹体头部的形状和靶板材料的塑性。头部较长，弧形半径较大时，靶板金属的流动就较为明显。

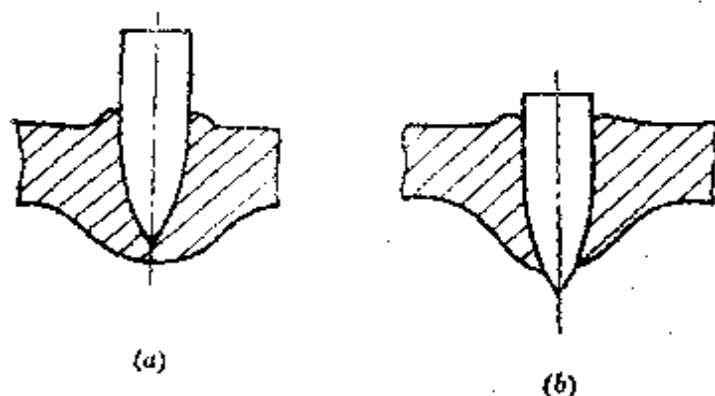


图5-2-4 尖头弹穿透低硬度钢板时的情况

弹体继续侵入时，由于金属流动抗力的增加或由于表面金属堆积而难以流动，靶板中的金属被弹体压缩而产生横向位移。同时，靶板产生因弯曲而形成的塑性变形。

随着弹体继续侵入，靶板背面的凸起越来越大，直到产生裂纹，弹头从背面鼓包处露出（图5-2-4b），形成靶后的翻唇。其穿孔中部的直径与弹体直径大致相同。靶板材料越硬，金属向靶前、后流动及横向位移的阻力越大，因此弹体所受的侵彻阻力随着靶板材料硬度的增加而增加。这种破坏形式多见于靶板厚度与弹体直径之比 $\frac{t}{d} > 1$ ，尖头弹穿入较软靶板时的情况。

冲孔型破坏 弹体冲击靶板后，首先侵彻至靶板的一定深度，然后从靶板上冲出一块柱形塞块，塞块的直径大于弹径。冲孔过程大致是：在弹体头部的作用下，靶板材料受到很大的冲击压力，从而在压缩范围的边缘产生剪切变形，最后冲出塞块，形成冲孔。

一般钝头弹侵彻非均质钢甲或侵彻韧性较低的钢甲时，会出现这种破坏形式。当弹体头部硬度很高的尖头弹侵彻非均质钢甲

时, 也会形成冲孔型破坏。高速弹头冲击薄钢甲时也出现这种破坏形式。从非均质靶板或高硬度靶板上冲出的钢塞通常变形较小, 厚度与靶板厚度相差不大。从均质靶板上冲出的塞块往往是在弹头部侵入并产生相当大的变形之后出现的, 穿孔的入口和出口直径均大于弹径。

花瓣型破坏 这种破坏形式主要是在弹速比较低, 对薄靶板侵彻时出现。当弹体侵彻薄靶板时, 靠近弹尖较近的靶板变形较大, 在其应力达到破坏极限时, 变形大的部分便形成裂纹, 出现花瓣形状。由实验得知存在一个临界速度, 在小于临界速度时, 侵彻薄靶板就会出现花瓣型破坏; 在大于临界速度时, 就会出现冲孔型破坏。花瓣型破坏的穿孔远大于弹径。

崩落型破坏 弹速较高, 靶板硬度稍高或轧制质量不好时, 容易产生这种破坏形式。

初始应力波产生的破坏 这是由于弹头在撞击靶板后产生压缩应力波, 应力波传播至靶板背面就会产生反射, 变成拉伸应力波 (图5-2-5)。若反射后某点处的拉应力超过材料的抗拉强度极限, 靶板就会产生破坏、崩落等现象。

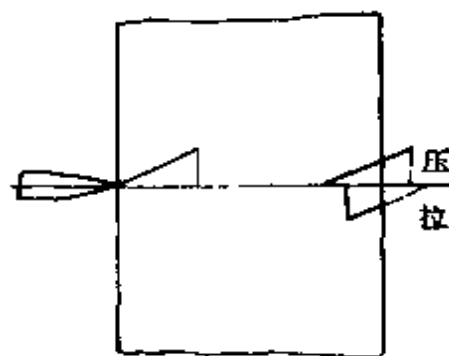


图5-2-5 应力波在靶板中的反射

以上讨论的是弹体垂直着靶时的几种典型破坏形式, 对于一个实际的穿甲过程多是上述典型破坏形式综合的结果, 这取决于弹体与靶板系统的情况, 所以实际的穿甲问题是很复杂的。

三、倾斜穿甲和跳弹

实际上弹体着靶时, 靶板相对于弹体的着靶弹道常是倾斜的, 下面讨论在这种情况下穿甲现象。

如果弹体轴线与靶板法线之间的夹角为 θ (图5-2-6), 在这种情况下弹体碰击钢甲, 则钢甲抗力 F 不通过弹体质心 (图5-2-

7), 而产生一个使弹体翻转的力矩 M 。根据弹体的结构和夹角 θ 的大小, 此力矩可能使弹体转正 (θ 角减小), 也可能使弹体跳飞。

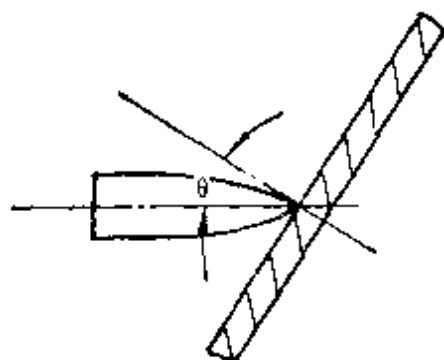


图5-2-6 弹体与靶板的夹角

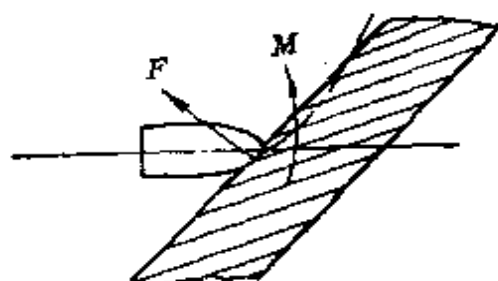


图5-2-7 钢甲作用在弹体上的跳飞力矩

一般认为当 θ 角小于 20° 时, 产生与垂直命中时同样的冲孔、崩落或其它破坏形式。当 θ 角大于 30° 时, 对于弹速不太高的情况, 弹体就可能挖靶板表面而产生跳弹现象 (图5-2-8); 弹速高, 弹体在弯矩的作用下有可能产生坏损。

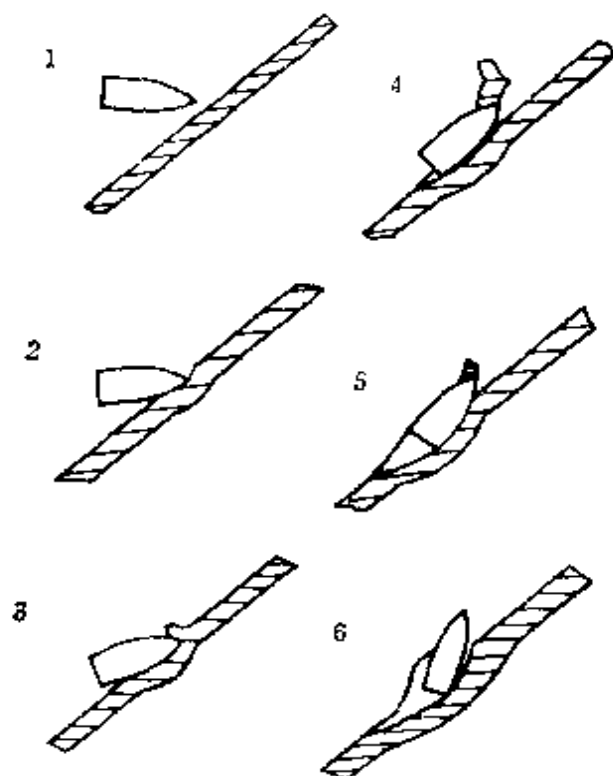


图5-2-8 弹体的跳飞过程

尖头弹体命中钢甲时，钢甲阻力最初对弹体产生一个翻转力矩，此力矩使弹体向偏离钢甲法线的方向转动。若弹体碰击钢甲的着速较大，则弹体来不及转动很大的角度而继续钻入钢甲，待弹体钻入钢甲某一定深度或塞块将要形成时，弹体所受力矩的方向将改变(图5-2-9)，使弹体转正而继续侵入钢甲(图5-2-10)。若弹体撞击能量不足，或 θ 角过大，弹头则不能深入钢甲，此时弹头在翻转力矩的作用下产生跳弹(图5-2-8)。

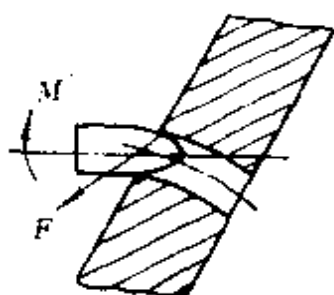


图5-2-9 钢甲作用在弹体上的转正力矩

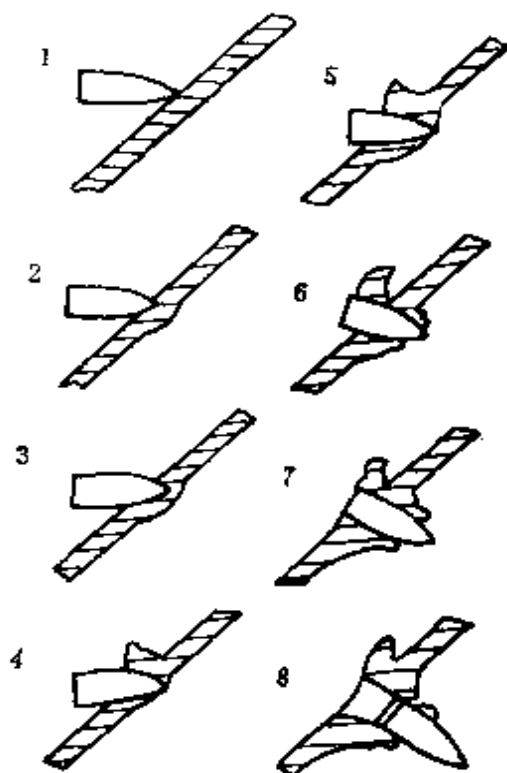


图5-2-10 弹体侵彻钢甲的过程

钝头弹侵彻钢甲时，在撞击初期，若其钝化边缘侵入钢甲，则弹体将正常穿甲；若 θ 角很大或钝化边缘没有侵入或破裂，则也会产生跳弹。

跳弹时，在钢甲上出现一个较浅的坑，钢甲没有很大变形，弹体以较大速度向另一侧跳飞而去。有时虽然弹体的动能足够，但是由于弹体不能使钢甲飞溅成坑，致使整个弹体产生飞跳。因此，要防止跳弹，关键是撞击的第一阶段，弹体要在靶板表面撞击出一个坑来，才能保证第二阶段弹体正常的侵彻钢甲。

一般普通穿甲弹在 60° 着角下几乎百分之百跳弹，而杆式超

速穿甲弹在着角 60° 甚至 65° 时,可以不产生跳弹。这主要是由于它的初速高,弹体破碎穿甲而产生的飞溅成坑现象比较明显。弹体破碎对防止跳弹是有好处的。因为弹体在大着角下撞击钢甲时,使其跳飞的法向力是很大的,普通穿甲弹一般不破碎,故容易跳飞。而杆式穿甲弹的弹体是逐段破碎的,跳飞的部分被破碎了,成为飞溅的金属离开了弹体,就不致影响弹体完整部分的运动方向。同时,飞溅的弹体破坏块,也将钢甲表面破碎的金属一起带着抛出,形成一个坑。弹体进入坑内后钢甲的抗力方向也发生改变,弹体就不容易跳飞了,而转为正常的反挤侵彻穿甲。

四、影响钢甲破坏的因素

影响钢甲破坏的基本因素,除了着速和着角之外,还有弹体头部形状、钢甲的相对厚度和机械性能等。

1. 弹体头部形状

尖头弹撞击钢甲时,钢甲常产生延性破坏;钝头弹穿甲时,则易产生冲孔型破坏。这是因为尖头弹侵彻钢甲时容易排挤金属,使其产生塑性流动。钝头弹由于作用面积大,应力小,故不易使金属流动而利于剪切。但究竟是产生延性破坏还是冲孔型破坏,还要看钢甲的相对厚度和机械性能。

2. 钢甲相对厚度

钢甲的相对厚度是指钢甲厚度 b 与弹径 d 之比,令 $c_s = b/d$ 。在 $c_s < 1$ 时,亦即钢甲厚度小于弹径时,则钢甲弯曲是主要变形,而弯曲引起的径向应力是最大应力。在这种情况下,韧性钢甲将在穿孔破裂的同时,因径向拉伸在靶板背面形成鼓包。对于脆性钢甲则形成环形剪切破坏。

弯曲变形较小时,钢甲的破坏形状主要取决于钢甲抗剪切冲塞的力和抗弹体侵入力之间的关系。

若将钢甲视为理想弹塑性体,弹体视为直径为 d 的圆柱形绝对刚体,忽略钢甲的惯性抗力。则塞块抗剪切的力为

$$F_1 = \pi d b r_s$$

剪切面的容许应力 τ_r 与屈服限 σ_r 的关系为

$$\tau_r \approx \frac{1}{2} \sigma_r$$

故

$$F_1 = \frac{1}{2} \pi db \sigma_r$$

抗弹体侵入力为

$$F_2 = H_s \frac{\pi d^2}{4}$$

H_s 为钢甲柱形硬度（不是用球体或锥体而是用柱体打入钢甲的硬度）。屈服限与硬度的关系为

$$\sigma_r \approx 0.4 H_s$$

则

$$F_2 = 2.5 \sigma_r \frac{\pi d^2}{4}$$

如果钢甲的破裂过程开始就剪切塞块，则抗侵入力必须大于抗剪切力，即

$$F_2 > F_1$$

或

$$2.5 \sigma_r \frac{\pi d^2}{4} > \frac{1}{2} \pi db \sigma_r$$

则得

$$\frac{b}{d} < 1.25$$

如果钢甲破坏开始为侵入，则必须有

$$F_2 < F_1$$

或

$$\frac{b}{d} > 1.25$$

从上面的分析可以看出，在其它条件相同的情况下，钢甲厚度大于弹径时，容易出现延性破坏形式；当钢甲厚度小于弹径

时，则易产生冲孔型破坏；而当钢甲厚度与弹径相差不大时，往往出现这两种破坏形式的组合。

3. 钢甲机械性能

当钢甲厚度近于弹径时，钢甲硬度对破坏形态的影响较大，随着钢甲硬度的增加，弹体难以侵入，因而冲击塞块的可能性就增加。实践证明，表层硬度大的（ $dHB=2.6\sim 2.7mm$ ）非均质钢甲，不论其背层的硬度如何，它被弹体冲击时往往冲出塞块，且塞块的变形小，高度近似于钢甲的厚度。

钢甲表层硬度减小（如表层硬度近于 $dHB=3.0mm$ ，背层硬度为 $dHB=3.4\sim 3.7mm$ ），钢甲破坏的性质稍有改变，在弹体侵入钢甲很深时才开始剪切塞块。若继续降低表面硬度（例如表层的 $dHB=3.2mm$ ，背层的 $dHB=3.4\sim 3.7mm$ ），钢甲破坏不是冲出塞块，而是呈延性破坏。

对硬度 $dHB=3.0\sim 3.1mm$ 的均质钢甲，典型的破坏是冲孔型破坏；对于中硬度的均质钢甲（例如 $dHB=3.5\sim 3.6mm$ ），它的破坏形式是弹体局部侵入钢甲，并剪切出变形很大的塞块；对于低硬度均质钢甲（例如 $dHB=4.0\sim 4.1mm$ ），其破坏形式为延性破坏。

铸造钢甲一般均为显著的脆性材料，破坏形式大多数是冲孔型破坏，硬度对破坏形式影响不大。

碳化钨弹芯的硬度很高，它对钢甲作用时往往使钢甲发生延性破坏，即使钢甲的相对厚度很大也是如此。

第三节 穿甲计算的实验公式

我们研究穿甲作用的目的是，要了解弹体在侵彻钢甲过程中的运动规律，以便合理地设计穿甲弹的结构。例如研究了弹体侵彻靶板过程中阻力变化规律，就可以求出最大阻力，以便于校核弹体的撞击强度，并为引信设计等其它方面提供必要的数 据；又如研究穿甲弹着靶时的撞击能量与穿甲厚度的关系，以便合理地

确定弹体的结构参数和初速值。通常所谓的穿甲计算，就是计算一定结构的弹体穿透一定厚度的某种钢甲所应具备的速度，它是设计穿甲弹所必需的。但是，由于穿甲现象是一种高速而复杂的现象，许多因素混合在一起，要想用单一的公式给以完整的描述是很困难的。目前有关穿甲计算的公式较多，有经验公式，也有理论公式，但都有其应用条件和适用范围。在实际工作中常借助一些实验公式，下面介绍几个主要的常用公式。

一、德马尔公式

德马尔公式是在大量实验射击的基础上建立起来的，是一个半经验公式。我们可以从能量观点来理解它。若将弹体的穿甲过程视为一个平冲头冲入钢甲（图5-3-1）。假设弹体撞击钢甲时不变形，它的全部动能都消耗在克服钢甲的阻力上，即穿甲后存速为零。同时，认为穿甲弹垂直命中，弹体在钢甲内只有直线运动，忽略旋转运动。并认为钢甲固定牢靠，它的材料性能均匀。这样根据图5-3-1可列出弹体侵彻钢甲时的能量方程：

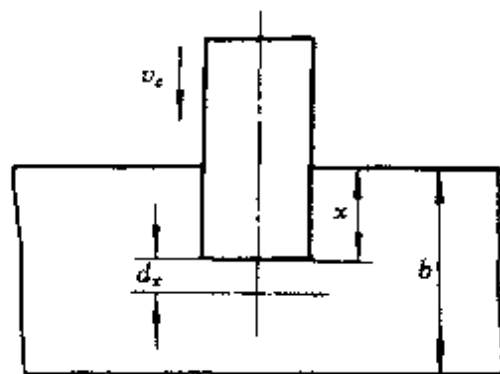


图5-3-1 剪切冲塞模型

$$\frac{1}{2} M v_c^2 = \int_0^b \pi d \cdot \tau \cdot x dx$$

式中 M ——弹体质量；

v_c ——弹体穿透钢甲所必需的速度；

d ——弹体直径；

τ ——钢甲的抗剪强度；

b ——钢甲厚度。

上式积分得

$$v_c = \sqrt{\pi \tau \cdot \frac{d^{1/2}}{M^{1/2}} \cdot b}$$

令

$$K = \sqrt{\pi \tau}$$

则

$$v_c = K \frac{d^{1/2}}{M^{1/2}} b$$

写成普遍形式则得

$$v_c = K \frac{b^\alpha}{M^\beta} b^\gamma \quad (5-3-1)$$

系数 K 、 α 、 β 和 γ 是根据实验来确定的，故属于半经验式。

根据实验，德马尔取 $\alpha = 0.75$ 、 $\beta = 0.5$ ， $\gamma = 0.7$ ，则德马尔公式为

$$v_c = K \frac{d^{0.75}}{M^{0.5}} b^{0.7} \quad (5-3-2)$$

K 值是考虑钢甲机械性能和穿甲弹结构等影响的修正系数，其值见表 5-3-1。

表 5-3-1 修正系数 K 值

钢 甲 性 能	K 值
异质钢板	2000~3000
高硬度或中硬度均质钢板	2000~3000
低硬度均质钢板	1000~2000

式中各量的单位为

v_c ——m/s；

d ——dm；

b ——dm；

M ——kg。

实际上式中的 K 值是按试射的结果确定的，因而德马尔公式只适用于在一定射击条件下所实验弹头及钢甲系统。

若弹头与钢甲成命中角 θ 时，则德马尔公式可修正为

$$v_c = K \frac{d^{0.75}}{M^{0.5} \cos \theta} b^{0.7} \quad (5-3-3)$$

实验结果表明, 这种修正是近似的, 实际上它们之间的关系是比较复杂的, 较为准确的可用下式表示。

对非均质钢甲

$$v_{c\theta} = \frac{v_{c0}}{\cos(\theta + \lambda)} = N_1 v_{c0} \quad (5-3-4)$$

对均质钢甲

$$v_{c\theta} = \frac{v_{c0}}{\cos(\theta - \lambda)} = N_2 v_{c0} \quad (5-3-5)$$

式中 v_{c0} —— $\theta = 0$ 时弹体穿透钢甲所需的速度,

$v_{c\theta}$ —— $\theta > 0$ 时弹体穿透钢甲所需的速度,

θ —— 穿甲弹的命中角,

λ —— 修正角。

N_1 、 N_2 与 θ 的关系见表 5-3-2。

表 5-3-2 系数 N_1 、 N_2 与 θ 的关系

$\theta (^{\circ})$	N_1	N_2
0	1.000	1.000
5	1.015	1.000
10	1.035	1.005
15	1.046	1.015
20	1.093	1.035
25	1.122	1.064
30	1.155	1.105
35	1.305	1.122
40	1.415	1.155
45	1.556	1.305
50	1.661	1.465
55	1.887	1.625
60	2.220	1.844

枪弹的穿甲弹头除钢心外还有弹头壳和铅套, 它们不能全部参与穿甲, 因此枪弹穿甲弹头穿甲时的质量应该是:

$$M = M_k + \Delta \cdot M_k$$

式中 M_x ——穿甲钢心的质量；

M_K ——弹头壳的质量；

Δ ——弹头壳参与穿甲的百分数，它与弹头结构、命中角等有关。

Δ 可近似取 $\frac{1}{2}$ ，则公式可写成：

$$v_c = K \frac{d_x^{0.75} b^{0.7}}{(M_x + 0.5M_K)^{0.5} \cos \theta} \quad (5-3-6)$$

式中 d_x 为穿甲钢心的直径。

软壳次口径穿甲弹因软壳本身亦不穿甲，但给予弹心一定的能量，故通常采用下式：

$$v_c = K \frac{d_x^{0.75} b^{0.7}}{(M_x + \mu M_T)^{0.5} \cos \theta} \quad (5-3-7)$$

式中 M_T ——软壳质量；

μ ——考虑到软壳参与击穿钢甲的系数，其值见表5-3-3。

表5-3-3 系数 μ 的数值

弹 径 \ 着角 θ	0°	30°
37 mm	1.0	0.45
57 mm	0.49	0.3

下面介绍德马尔公式的应用。

(1) 计算穿甲弹的极限穿透距离。所谓极限穿透距离是指穿甲弹在一定的射击条件下，能穿透给定钢甲的最大射击距离。由已定弹的质量 M ，口径 d 及穿甲厚度，通过德马尔公式求出 v_c ，然后根据已有的初速，用外弹道公式即求出极限穿透距离。

(2) 决定侵彻过程中弹体所受的阻力

根据弹体侵彻钢甲的能量方程可得

$$\frac{Mv_c^2}{2} - \frac{Mv_n^2}{2} = FS$$

式中 F ——钢甲对弹体的平均阻力；

v_c ——穿甲弹的着速 (m/s);

v_n ——弹体穿过钢甲后的剩余速度 (m/s);

M ——弹体质量;

$$S = H + \frac{b}{\cos \theta};$$

H ——弹头部长度的 (见图5-3-2);

b ——钢甲厚度。

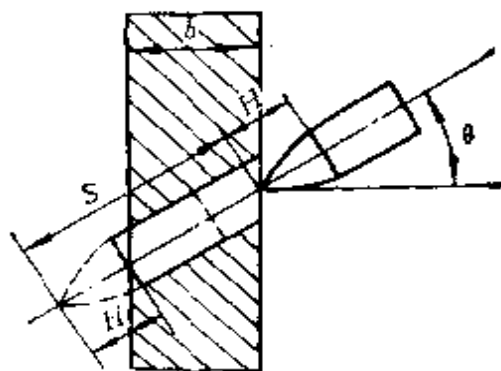


图5-3-2 弹体穿透钢甲的行程

将 S 代入后可得

$$F = \frac{(v_c^2 - v_n^2)M}{2 \left(H + \frac{b}{\cos \theta} \right)}$$

由上式还可求得弹体在侵彻过程中的平均减加速度 $a = F/M$ 。

为了计算 F ，必须首先求出弹体穿过钢甲后的剩余速度 v_n ，该速度可用以下方法求出。

根据前面的假设，按照能量条件

$$\frac{Mv_c^2}{2} = \frac{Mv_n^2}{2} + \frac{Mv_c^2}{2} + \frac{M_1v_n^2}{2}$$

式中 M_1 是被击出的钢塞质量。由此可得

$$v_n = \sqrt{\frac{M}{M_1 + M} (v_c^2 - v_c^2)}$$

钢塞的质量 M_1 可按下式进行估算,

$$M_1 = 0.8 \frac{\pi d^2}{4} b \cdot \gamma_0$$

式中 γ_0 为钢甲金属的质量密度。

求出弹体侵彻钢甲的平均减速度以后, 便可估算出弹体所受的惯性力。

二、别列金公式

根据实验, 别列金取 $\alpha = 1$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 0.5$, 则(5-3-1)式可写成

$$v_0 = K \frac{d_x b^{0.5}}{M_x^{0.5}} \quad (5-3-8)$$

如果考虑命中角则公式变成:

$$v_0 = K \frac{d_x b^{0.5}}{M_x^{0.5} \cos \theta} \quad (5-3-9)$$

式中 K 值由实验确定, 对中硬度钢板 $K = 85000$, 对木质目标 $K = 11200$, 式中各量的单位为:

v_0 ——穿甲速度 (m/s);

d_x ——穿甲钢心直径 (m);

b ——钢甲厚度 (m);

M_x ——钢心质量 (kg)。

K 值是用实验方法确定的。以某一种弹体对欲测的目标进行射击, 利用改变发射药量或改变射击距离的方法来调整弹的着速, 这样可以得到弹 刚刚穿透目标时的着速 v_0 。然后将 M_x 、 b 、 d_x 和 v_0 值代入公式即可求出 K 。

第四节 薄板穿甲问题

薄钢甲主要是用在飞机、装甲车辆以及自行火炮上。研究薄板穿甲问题对那些带有起爆系统的弹头、燃烧弹、穿甲燃烧弹, 以及对引信和弹体设计等都是有价值的。

解决薄板穿甲问题的理论较多，但总括起来主要有两种：一种是从能量观点来解决问题；另一种是从动量观点来解决问题。根据实验，动量方法更与实际情况符合，因此本书介绍动量方法。

在处理薄板穿甲问题时，我们假设：

(1) 当弹体高速撞击薄靶板时，材料的强度影响与薄板的惯性力相比较是可以忽略的，这样问题就会简化得多，实验证实这样考虑也是合理的；

(2) 弹体所失去的动量，应等于钢甲所增加的动量；

(3) 弹体垂直侵彻钢甲。

在弹体的侵彻过程中，钢甲变形与弹体各结构参量间的关系用图 5-4-1 表示。这里我们认为钢甲是花瓣式破坏，认为钢甲变形后的花瓣与弹体弧形部相接触，同时不考虑花瓣的拉伸变形。

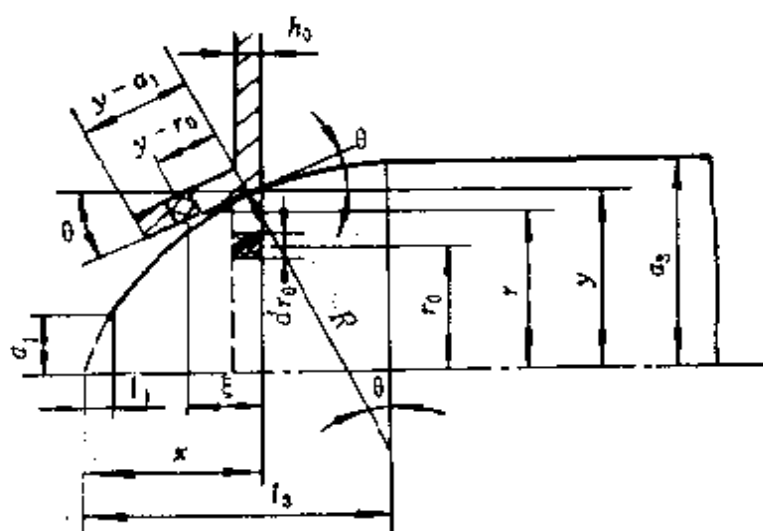


图 5-4-1 截顶卵形弹体与靶板的尺寸和记号

首先确定弹头侵彻过程中的速度降落。

根据假设条件可列出弹头碰击钢甲的动量方程：

$$mv_0 = mv + D(x) \quad (5-4-1)$$

式中

m —— 弹头的质量；

v_0 —— 弹头的速度；

v —— 弹头侵入过程中某一瞬时的速度 $v = \frac{dx}{dt}$ ；

$D(x)$ ——钢甲获得的轴向冲量。

若认为穿孔周围不变形，则在侵彻过程中对钢甲上某一微元 A 来说显然有：

$$dD(x) = 2\pi r_0 h_0 \delta \dot{\xi} dr_0$$

式中 $\dot{\xi}$ 为微元 A 的轴向速度， δ 为钢甲材料的密度

$$\dot{\xi} = \frac{d\xi}{dt} = v \frac{d\xi}{dx}$$

则

$$D(x) = 2\pi h_0 \delta \int v r_0 \frac{d\xi}{dx} dr_0 \quad (5-4-2)$$

式中 ξ 为微元 A 的轴向位移， $\xi = \xi(r_0, x)$ 。

取 $m(x) = \frac{D(x)}{v}$ ， $m(x)$ 称为相当质量，即它的速度与弹头速度相等，它的动量变化与钢甲相当。所以

$$m(x) = 2\pi h_0 \delta \int \frac{d\xi}{dx} r_0 dr_0$$

这样速度降落 Δv 等于：

$$\Delta v = v_e - v = \frac{m(x) \cdot v}{m} \quad (5-4-3)$$

$m(x) \cdot v$ 是仅考虑钢甲变形的冲量。若考虑弹头有一平头，如图 5-4-1 实线所示，这就还必须考虑平头冲出的钢塞所获得的动量。即

$$m_K v_K = \pi a_1^2 h_0 \delta \cdot K v_e$$

式中 m_K ——钢塞的质量；

v_K ——钢塞所获得的速度；

K ——与 v_e 及 h_0 有关的系数，根据实验 $K = 1 \sim 2$ （上限是属弹性碰撞，下限是属非弹性碰撞）。 K 的数值可参考表 5-4-1。

这样在这种情况下速度降落 Δv 为

$$\Delta v = \frac{1}{m} [K m_K v_e + m(x) v] \quad (5-4-4)$$

表5-4-1 靶块逸出速度和撞击速度的比例系数

钢甲厚度 (mm)	撞击速度 (m/s)	K
1	766	1.33
3.2	790	1.23
1	275	1.16
3.2	275	1.12

从 Δv 的表示式中可以看出, 速度降落与 m_K 、 v 、 $m(x)$ 以及弧形部的结构参数有关。为求出各个时间间隔的 Δv , 需将弹头的轴向位移划分为小间隔, 间隔的大小由所需的准确度来确定。

考虑弧形部有一平顶的情况, 则速度降落的计算方法如下。

第一距离间隔弹头的行程 $x = l_1 + h_0$, 此时弹顶从钢甲上冲出一个圆盘, 所以

$$m \Delta v = m_K v_K = \pi a_1^2 h_0 \delta \cdot K v_0$$

得

$$\Delta v_1 = \frac{\pi a_1^2 h_0 \delta}{m} K v_0 \quad (5-4-5)$$

则

$$v_1 = v_0 - \Delta v_1$$

第二距离间隔以后的速度降落可按公式(5-4-3)计算, 即

$$\Delta v = \frac{m(x) \cdot v}{m}$$

其中

$$m(x) = 2 \pi h_0 \delta \int_{r_{2lim}}^{r_{2lim}} \frac{d\xi}{dx} r_0 dr_0 \quad (5-4-6)$$

式中 r_{2min} ——第二距离间隔开始时穿孔的半径;

r_{2lim} ——第二距离间隔结束时穿孔的半径;

函数 $\xi = \xi(r_0; x)$ 可由图 5-4-1 确定, 因

$$\xi = (y - r_0) \cos \theta$$

由此可得

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{dy}{dx} \cos \theta - (y - r_0) \sin \theta \cdot \frac{d\theta}{dx}$$

其中

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{l_3 - x}{y + R - a_3}$$

又知

$$x = l_3 - R \sin \theta$$

则

$$\frac{d\theta}{dx} = -\frac{1}{R \cos \theta}$$

将 $\frac{dy}{dx}$ 、 $\frac{d\theta}{dx}$ 代入 $\frac{d\xi}{dx}$ 得:

$$\frac{d\xi}{dx} = \sin \theta + (y - r_0) \frac{\operatorname{tg} \theta}{R}$$

因此

$$\begin{aligned} m(x) &= 2\pi h_0 \delta \int_{r_{2\min}}^{r_{2\max}} \left[\sin \theta + (y - r_0) \frac{\operatorname{tg} \theta}{R} \right] r_0 dr_0 \\ &= \frac{2\pi h_0 \delta l_3}{6} \left(1 - \frac{x}{l_3} \right) \left(\frac{y}{R} - \frac{a_1}{R} \right) \left[3(y + a_1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{(y + 2a_1)(y - a_1)}{y - a_3 + R} \right] \end{aligned}$$

将 $m(x)$ 代入 Δv 式得:

$$\begin{aligned} \Delta v &= \frac{2\pi h_0 \delta l_3 v R}{6 m} \left(1 - \frac{x}{l_3} \right) \left(\frac{y}{R} - \frac{a_1}{R} \right) \\ &\quad \times \left[3 \left(\frac{y}{R} + \frac{a_1}{R} \right) + \frac{\left(\frac{y}{R} + \frac{2a_1}{R} \right) \left(\frac{y}{R} - \frac{a_1}{R} \right)}{\frac{y}{R} - \frac{a_3}{R} + 1} \right] \end{aligned} \quad (5-4-7)$$

这样在第二距离间隔内的速度降落为

$$\Delta v_2 = \frac{2\pi R h_0 \delta l_3 v_1}{6 m} \left(1 - \frac{x_2}{l_3} \right) \left(\frac{y_2}{R} - \frac{a_1}{R} \right) \\ \times \left[3 \left(-\frac{y_2}{R} + \frac{a_1}{R} \right) + \frac{\left(-\frac{y_2}{R} + \frac{2a_1}{R} \right) \left(\frac{y_2}{R} - \frac{a_1}{R} \right)}{\frac{y_2}{R} - \frac{a_3}{R} + 1} \right] \quad (5-4-8)$$

则

$$v_2 = v_1 - \Delta v_2$$

第三、第四以及以后各距离间隔的速度可同样用上述方法求出。

在弹头表面和花瓣根部之间，只要花瓣动量不断增加，则总是处于受压状态。只要动量不变，而且变化速度继续减小时，按照所介绍的模型，花瓣和弹头就脱离接触。所以花瓣和弹头脱离，按解的求解条件为

$$\frac{\partial}{\partial x} (\text{花瓣动量}) = 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\text{花瓣动量}) < 0$$

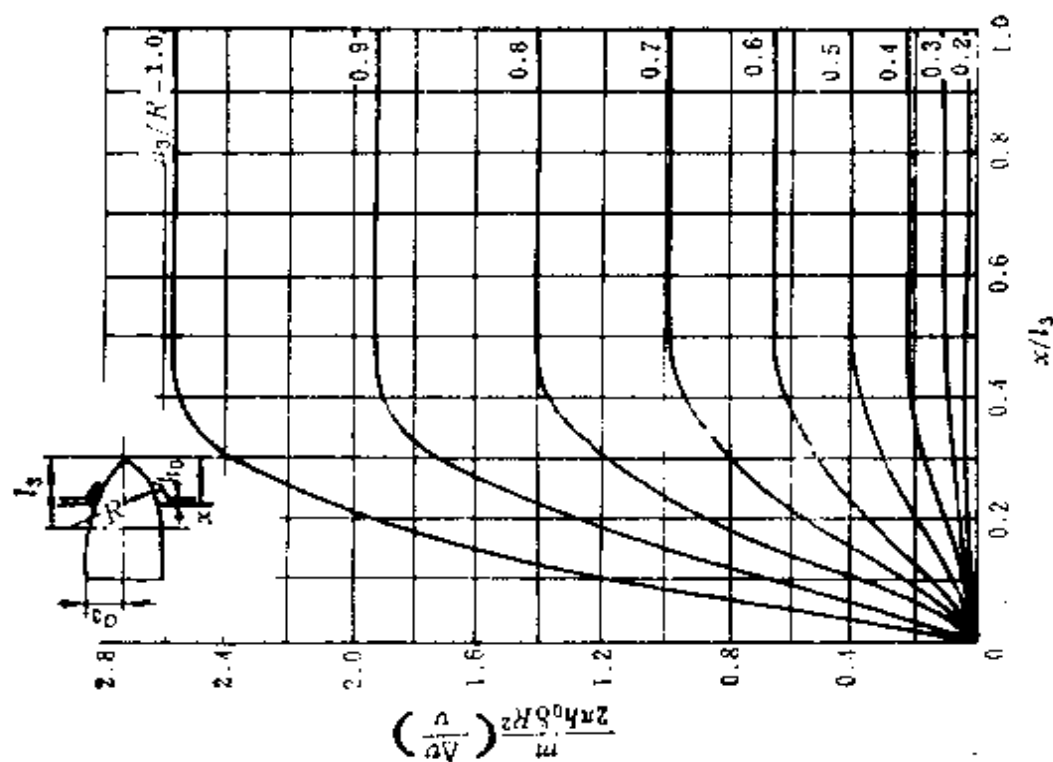
由 (5-4-7) 式可以看出，花瓣动量在 $x = l_1$ ， $x = l_3$ 时都为零，在这个域内，到处都大于零。因此，它在 $l_1 \leq x \leq l_3$ 之间至少有一个极大点。所以卵形弹头在撞击靶板，到弹头击穿靶板之前，必有一个脱离点 x^* ，在这点上，花瓣脱离弹头表面。这个脱离点的位置 x^* ，必满足

$$l_1 < x^* < l_3$$

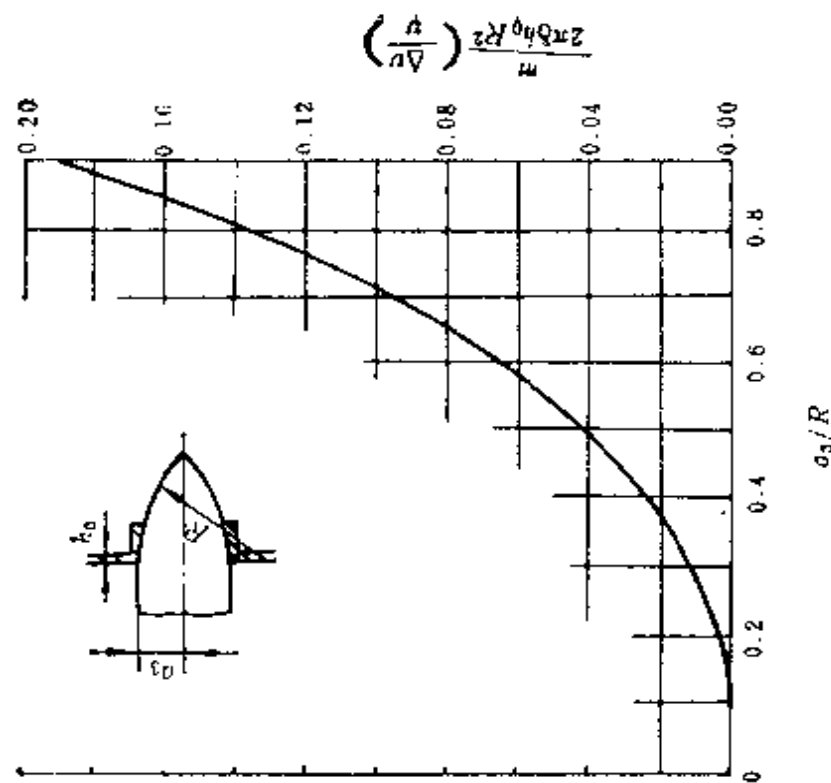
故速度降计算到 x^* 点即可

图 5-4-2 为尖头卵形弹体的速度降落 Δv 对 x/l_3 的关系。图 5-4-3 为尖顶弹头的弧形部形状即 a_3/R 对速度降落的影响。

对于平顶的卵形弹头而言，速度降落应该分为两部分。即冲出圆盘的速度降落〔式 (5-4-5)〕和花瓣的速度降落，前者与 x 无关。图 5-4-4 为平顶卵形弹头的速度降落（由于花瓣造成）和 x/l_3 的关系。

图5-4-2 尖头卵形弹头的速度降落 Δv 对弹头位置的关系

m —弹头质量; δ —板的密度; v —冲击速度。

图5-4-3 尖头卵形弹头的总速度降落对 σ_3/R 的关系

m —弹头质量; δ —板的密度; v —冲击速度。

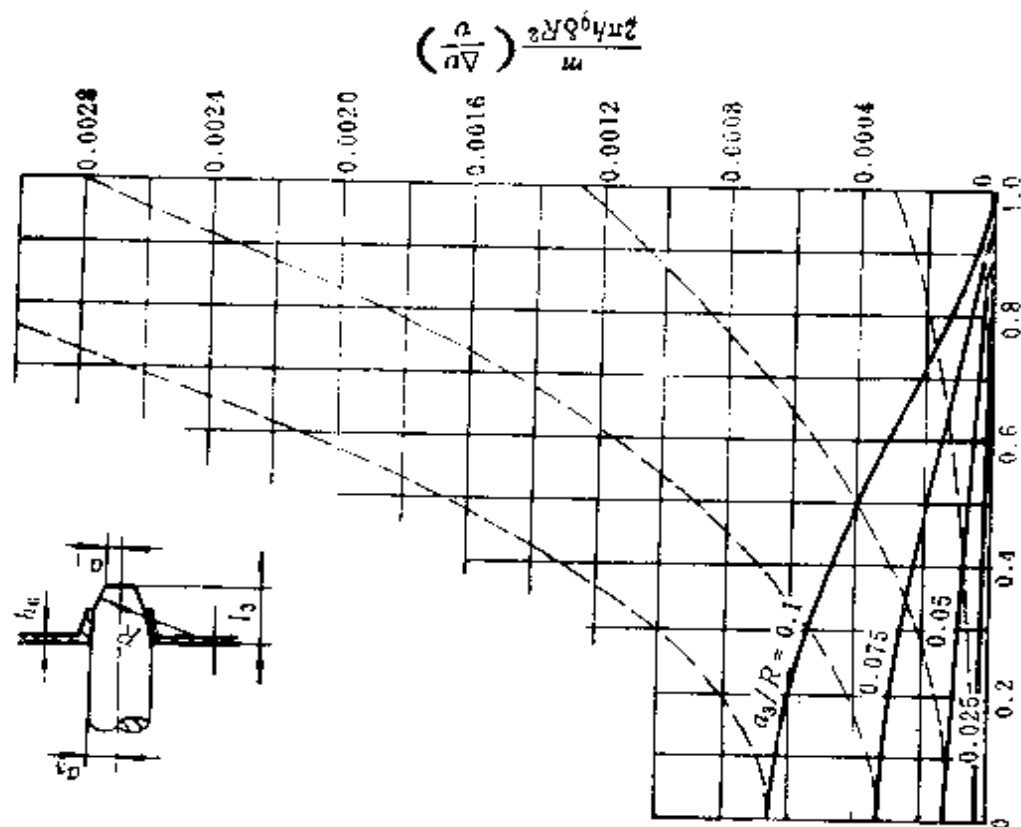


图5-4-5 截顶卵形弹头的速度降落和 a_1/a_3 的关系
—总速度降落曲线, ——“花瓣”速度降与 a_1/a_3 的关系曲线, m —弹头质量, δ —板的密度, v —冲击速度。

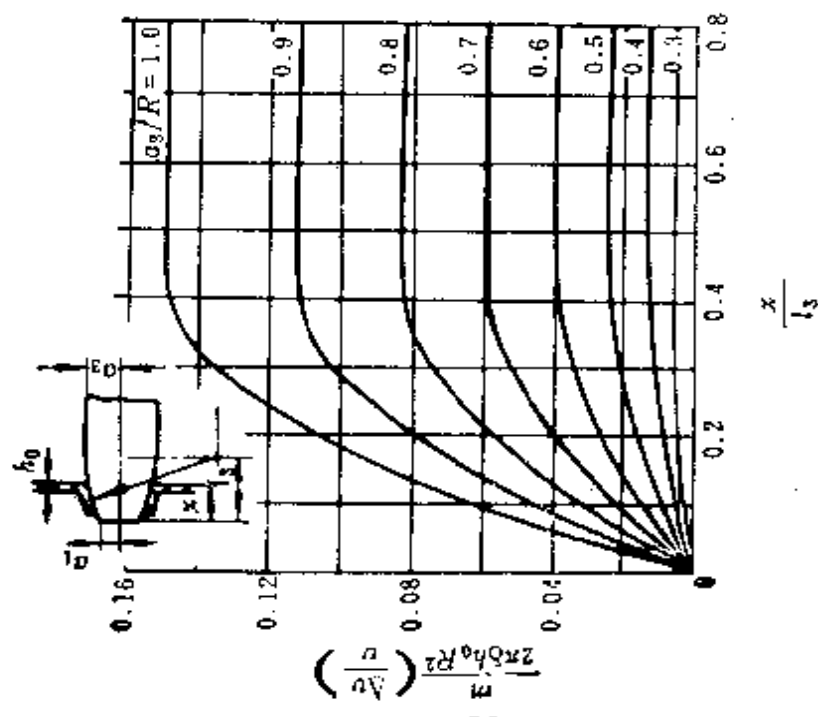


图5-4-4 平顶卵形弹头的速度降落和 x/l_3 的关系

图 5-4-5 为截顶卵形弹头的速度降落和 a_1/a_2 的关系曲线。

下面计算侵彻过程中作用于弹头上的力。先分别求出作用于弹头上的轴向力和径向力,就可求出综合力以及其与弹轴的夹角。

轴向力 F_A

在第一距离间隔,钢甲被弹头冲出一个圆盘,作用于弹头上的惯性力为

$$F_{A1} \cdot \Delta t = m_K v_K = \pi a_1^2 h_0 \delta \cdot K v_0$$

其中

$$\Delta t \approx \frac{2h_0}{K v_0}$$

则

$$F_{A1} = -\frac{\pi a_1^2 \delta K^2 v_0^2}{2} \quad (5-4-9)$$

第二距离间隔以后弹头所受的轴向力为

$$F_A = -m \frac{dv}{dt} = -m v \frac{dv}{dx}$$

以前知

$$[v_0 - v] = \frac{m(x)}{m} v$$

求导数后可得

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{v}{m + m(x)} \times \frac{dm(x)}{dx}$$

将 $m(x)$ 代入后可得

$$F_A = -\frac{mv^2}{(m - K m_K) v_0} \times \frac{dm(x)}{dx} \quad (5-4-10)$$

根据前面求出的 $m(x)$ 可得

$$\begin{aligned} \frac{dm(x)}{dx} = 2\pi h_0 \delta \left[\left(y \sin \theta + \frac{y^2 - a_1^2}{2R} \operatorname{tg} \theta \right) \frac{dy}{dx} \right. \\ \left. + \left(\frac{y^2 - a_1^2}{2} \cos \theta + \frac{y^3 - 3a_1^2 y + 2a_1^3}{6R} \sec^2 \theta \right) \frac{d\theta}{dx} \right] \end{aligned}$$

将 $\frac{dy}{d\theta}$ 与 $\frac{d\theta}{dx}$ 代入上式则得:

$$\begin{aligned} \frac{dm(x)}{dx} = & 2\pi h_0 \delta R \left\{ \left[\frac{\left(\frac{y}{R}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{R}\right)^2}{2} \right. \right. \\ & + \left. \frac{y}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{l_3}{R} - \frac{x}{R}\right)^2} \right] \\ & \cdot \left[\frac{\frac{l_3}{R} - \frac{x}{R}}{\frac{y}{R} + 1 - \frac{a_3}{R}} \right]^2 - \frac{\left(\frac{y}{R}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{R}\right)^2}{2} \\ & - \frac{\left(\frac{y}{R}\right)^3 - 3\left(\frac{a_1}{R}\right)^2\left(\frac{y}{R}\right) + 2\left(\frac{a_1}{R}\right)^3}{6} \\ & \cdot \left. \left[1 + \left(\frac{\frac{l_3}{R} - \frac{x}{R}}{\frac{y}{R} + 1 - \frac{a_3}{R}} \right)^2 \right]^{3/2} \right\} \end{aligned}$$

将 $\frac{dm(x)}{dx}$ 代入 F_A 式可得出第二距离间隔以后各间隔的轴向力的表达式, 即

$$\begin{aligned} F_A = & \frac{mv^2}{(m - Km_K)v_0} \cdot 2\pi h_0 \delta R \left\{ \left[\frac{\left(\frac{y}{R}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{R}\right)^2}{2} \right. \right. \\ & + \left. \frac{y}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{l_3}{R} - \frac{x}{R}\right)^2} \right] \\ & \cdot \left[\frac{\frac{l_3}{R} - \frac{x}{R}}{\frac{y}{R} + 1 - \frac{a_3}{R}} \right]^2 - \frac{\left(\frac{y}{R}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{R}\right)^2}{2} \\ & - \frac{\left(\frac{y}{R}\right)^3 - 3\left(\frac{a_1}{R}\right)^2\left(\frac{y}{R}\right) + 2\left(\frac{a_1}{R}\right)^3}{6} \\ & \cdot \left. \left[1 + \left(\frac{\frac{l_3}{R} - \frac{x}{R}}{\frac{y}{R} + 1 - \frac{a_3}{R}} \right)^2 \right]^{3/2} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\left(\frac{y}{R}\right)^3 - 3\left(\frac{a_1}{R}\right)^2\left(\frac{y}{R}\right) + 2\left(\frac{a_1}{R}\right)^2}{6} \\
& \times \left[1 + \left(\frac{\frac{l_3}{R} - \frac{x}{R}}{\frac{y}{R} + 1 - \frac{a_3}{R}} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (5-4-11)
\end{aligned}$$

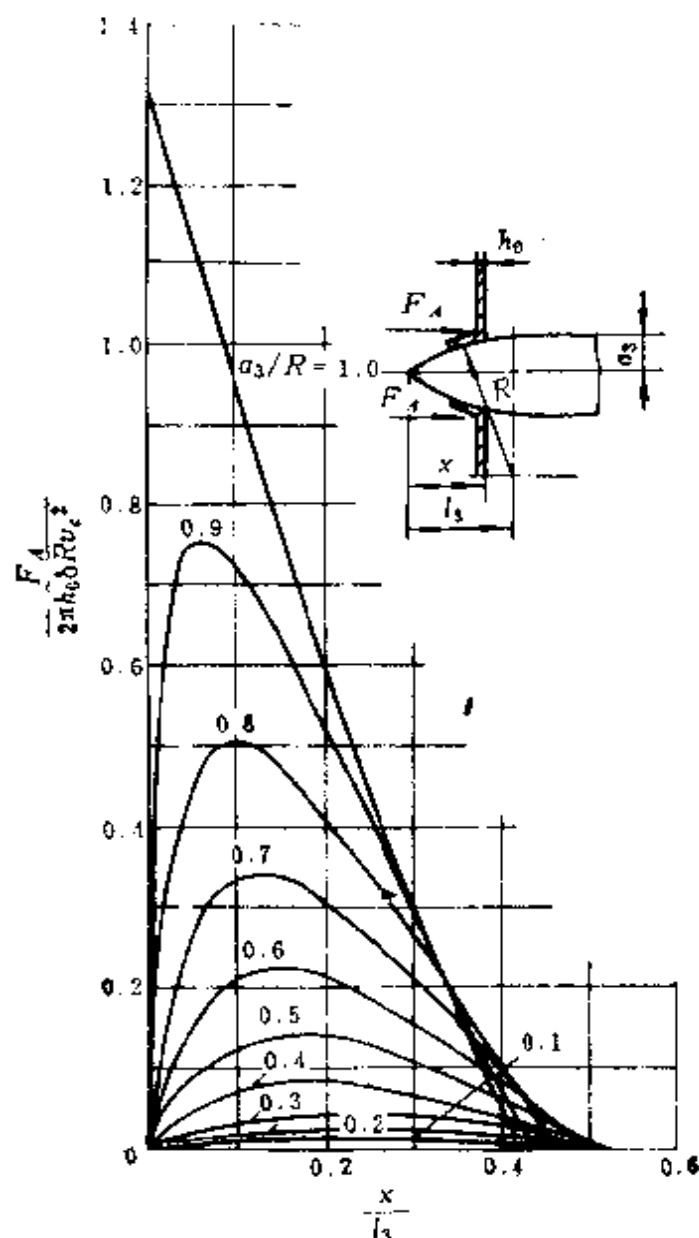
由此可得出第二距离间隔内的轴向力

$$\begin{aligned}
F_{A2} = & \frac{mv_2^3}{(m - Km_K)v_s} 2\pi h_0 \delta R \left\{ \left[\frac{\left(\frac{y_2}{R}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{R}\right)^2}{2} \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{y_2}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{l_3}{R} - \frac{x_2}{R}\right)^2} \right] \right. \\
& \times \left[\frac{\frac{l_3}{R} - \frac{x_2}{R}}{\frac{y_2}{R} + 1 - \frac{a_3}{R}} \right]^2 - \frac{\left(\frac{y_2}{R}\right)^2 - \left(\frac{a_1}{R}\right)^2}{2} \\
& - \frac{\left(\frac{y_2}{R}\right)^3 - 3\left(\frac{a_1}{R}\right)^2\left(\frac{y_2}{R}\right) + 2\left(\frac{a_1}{R}\right)^2}{6} \\
& \left. \times \left[1 + \left(\frac{\frac{l_3}{R} - \frac{x_2}{R}}{\frac{y_2}{R} + 1 - \frac{a_3}{R}} \right)^2 \right]^{3/2} \right\} \quad (5-4-12)
\end{aligned}$$

用同样的方法可求出第三、第四……距离间隔内的 F_A 值。图 5-4-6 为 F_A 对 x/l_3 的曲线。

径向力 F_r ：

在第一距离间隔内，钢甲材料无径向运动。因此弹头不受径向力作用。

图5-4-6 轴向力对 x/l_3 的关系

下面求第二距离间隔以及以后各距离间隔内弹头所受的径向力。

由图 5-4-1 可知微元 A 的径向位移为

$$r = y - (y - r_0) \sin \theta$$

则径向速度为

$$\begin{aligned} \frac{dr}{dt} &= v \left[\frac{dy}{dx} (1 - \sin \theta) - \cos \theta \frac{d\theta}{dx} (y - r_0) \right] \\ &= v \left[\frac{dy}{dx} \left(1 - \frac{l_3 - x}{R} \right) + \frac{y - r_0}{R} \right] \end{aligned} \quad (5-4-13)$$

每个花瓣的质量可用下式求出,

$$m_i = \int \frac{2\pi\delta h_0 r_0}{n} dr_0$$

因此每个花瓣的动量为

$$\begin{aligned} D_r &= \frac{2\pi\delta h_0}{n} v \int_{a_1}^y \left[\frac{dy}{dx} \left(1 - \frac{l_3 - x}{R} \right) + \frac{y - r_0}{R} \right] r_0 dr_0 \\ &= \frac{2\pi\delta h_0}{n} v \left[\frac{dy}{dx} \left(1 - \frac{l_3 - x}{R} \right) \left(\frac{y^2 - a_1^2}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{y(y^2 - a_1^2)}{2R} - \frac{y^3 - a_1^3}{3R} \right] \end{aligned}$$

每一个花瓣所受的径向力为

$$F_r = v \frac{dD_r}{dx}$$

$$\begin{aligned} \frac{dD_r}{dx} &= \frac{2\pi\delta h_0}{n} \left\{ \left[\frac{dy}{dx} \left(1 - \frac{l_3 - x}{R} \right) \left(\frac{y^2 - a_1^2}{2} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{y(y^2 - a_1^2)}{2R} - \frac{y^3 - a_1^3}{3R} \right] \frac{dv}{dx} \right. \\ &\quad \left. + v \left[\frac{y^2 - a_1^2}{2R} \times \frac{dy}{dx} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(1 - \frac{l_3 - x}{R} \right) \left(\frac{y^2 - a_1^2}{2} \right) \sec^2 \theta \frac{d\theta}{dx} \right] \right. \\ &\quad \left. + v \operatorname{tg} \theta \left[\left(1 - \frac{l_3 - y}{R} \right) y \frac{dy}{dx} + \frac{y^2 - a_1^2}{2R} \right] \right\} \end{aligned}$$

将 $\frac{dD_r}{dx}$ 、 $\frac{dy}{dx}$ 、 $\frac{d\theta}{dx}$ 、 $\frac{dv}{dx}$ 值代入后可得径向力

$$\begin{aligned} F_r &= \frac{2\pi\delta h_0 v}{n} \left\{ \frac{v^3}{(Km_K - m)v_0} \left[\operatorname{tg} \theta (1 - \sin \theta) \left(\frac{y^2 - a_1^2}{2} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{y^3 - 3a_1^2 y + 2a_1^3}{6R} \right] 2\pi\delta h_0 \left[\operatorname{tg}^2 \theta \left(y \cos \theta + \frac{y^2 - a_1^2}{2R} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{y^2 - a_1^2}{2R} - \frac{y^3 - 3a_1^2 y + 2a_1^3}{6R^2 \cos^3 \theta} \right] + v \left[\operatorname{tg} \theta \frac{y^2 - a_1^2}{R} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (1 - \sin \theta) \left(y \operatorname{tg}^2 \theta - \frac{y^2 - a_1^2}{2R} \sec^3 \theta \right) \right] \right\} \end{aligned}$$

(5-4-14)

将 v_2 、 y_2 和 θ_2 值代入 (5-4-14) 式可求出第二距离间隔末的径向力。同理可求出第三、第四……距离间隔末每个花瓣的径向力。

弹头单位圆周长度上的轴向力为

$$L_A = \frac{F_A}{2 \pi y} \quad (5-4-15)$$

图 5-4-7 为弹头单位圆周长度上所受轴向力 L_A 和 x/l_3 的关系。单位圆周长度上的径向力为

$$L_r = \frac{n F_r}{2 \pi y} \quad (5-4-16)$$

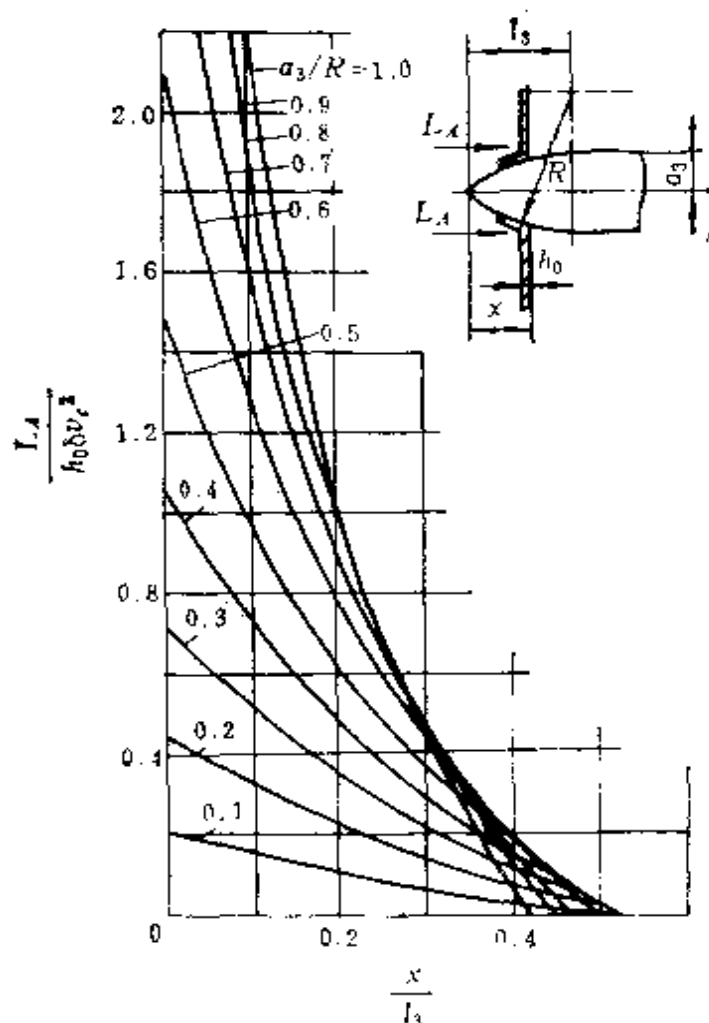


图 5-4-7 弹头单位圆周长度上所受轴向力和 x/l_3 的关系

δ —板的密度； v_c —冲击速度； L_A —单位圆周上的轴向力。

图 5-4-8 为弹头单位圆周长度上所受径向力 L_r 和 x/l_3 的关系。
单位圆周长度上的合力为

$$L = \sqrt{L_A^2 + L_r^2} \quad (5-4-17)$$

L 与弹轴的夹角

$$\gamma = \operatorname{tg}^{-1} \frac{L_r}{L_A} \quad (5-4-18)$$

式(5-4-17)和(5-4-18)的结果见图 5-4-9 和图 5-4-10。

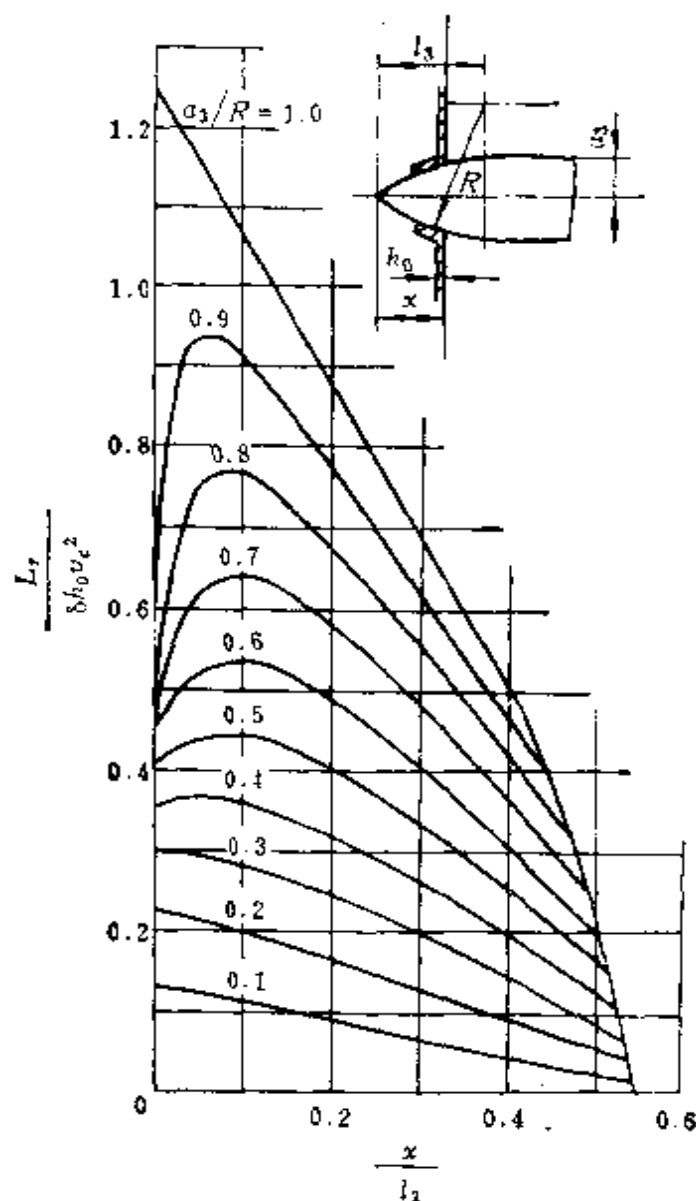
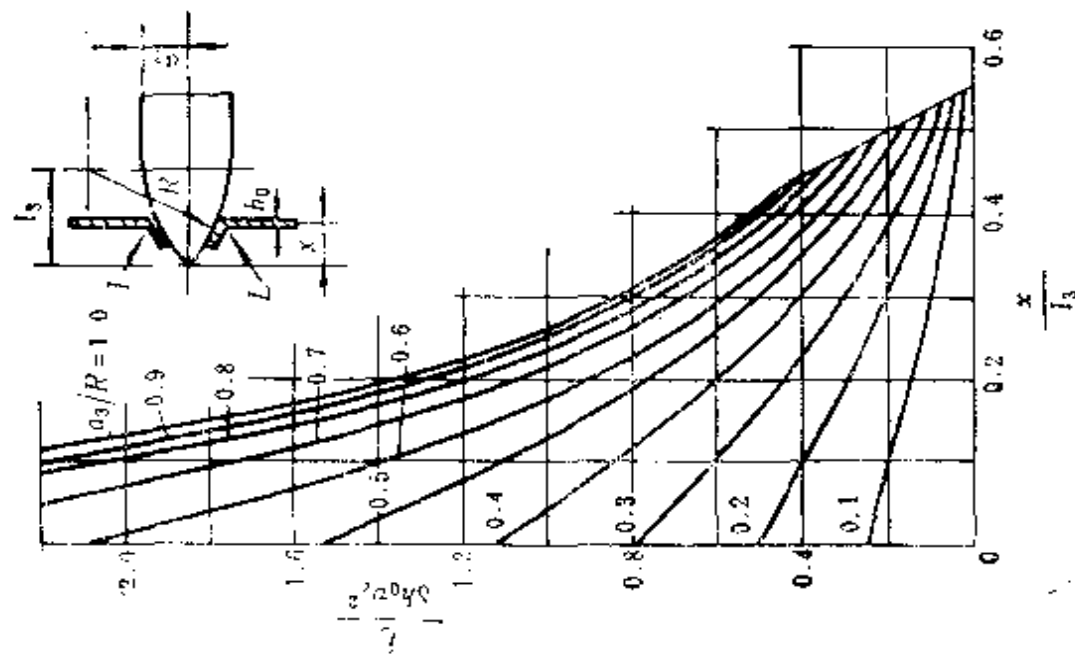
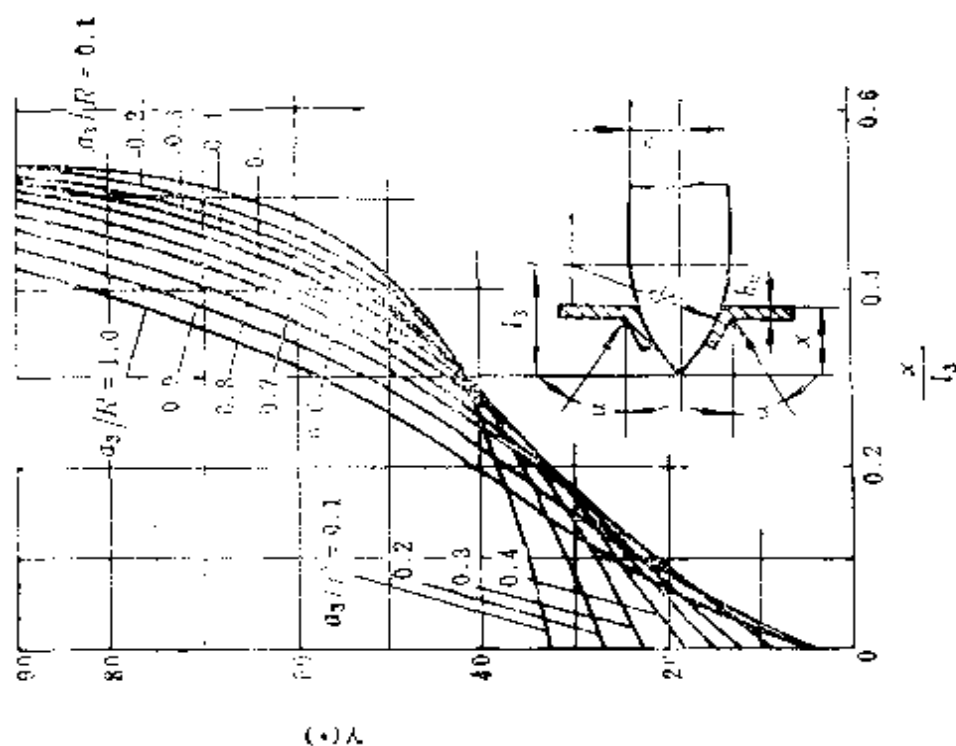


图5-4-8 弹头单位圆周长度上所受径向力和 x/l_3 的关系

图5-4-9 弹头单位圆周长上所受合力和 x/l_3 的关系

$L^2 = L_1^2 + L_2^2$; δ —板的密度; v_0 —冲击速度; L —单位圆周长上的合力。

图5-4-10 合力与弹轴的夹角 γ 和 x/l_3 的关系

上面求出的结果是弹头部为卵形的情况。对于圆锥形弹头只需将 $\operatorname{tg} \theta = \text{const}$ 即可得出相应的计算公式。如弹顶是尖的，只需将 $a_t = 0$ 代入即可。

实验结果证明：只要撞击速度足够大，一般 $v_0 > 300 \text{ m/s}$ ，这种花瓣型薄板穿甲理论就很接近实际。换句话说，花瓣的动量所做的功，在这时是主要成分，塑性变形功是可以略去的。

第六章 破甲作用原理

第一节 聚能效应的一般概念

一、聚能效应

为了说明聚能效应，首先看一组实验结果。实验用的药柱由 TNT/RDX50/50 铸装，直径为 30mm，高度为 100mm，靶板材料为中碳钢。由实验结果观察到（图 6-1-1）：

（1）将药柱直接放在靶板上只炸出了一个很浅的凹坑（a 图）；

（2）药柱带有锥形凹窝，仍放在靶板上爆炸，则靶板上炸出了一个 6 ~ 7 mm 深的坑（b 图）；

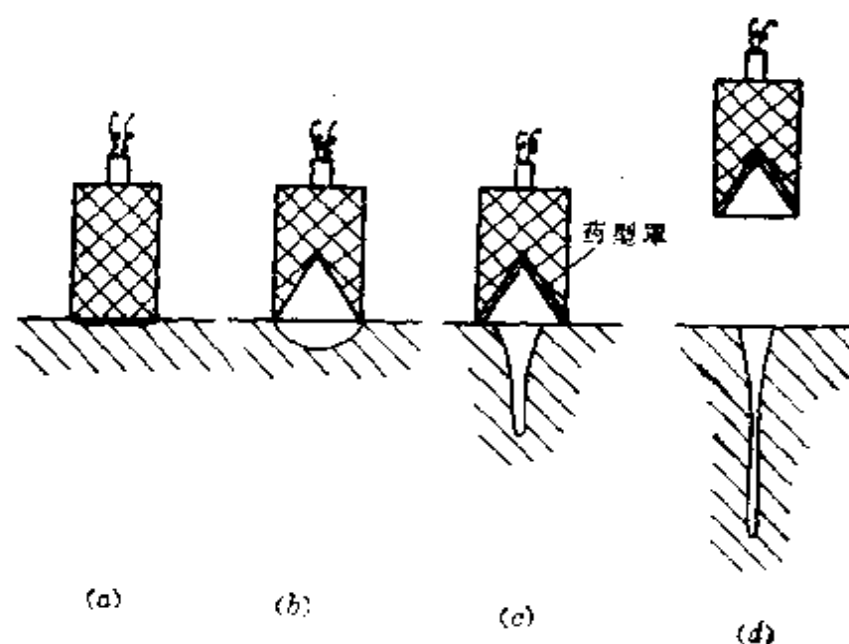


图 6-1-1 聚能效应实验

(3) 药柱的锥形凹窝内放一钢药型罩，仍放在靶板上爆炸，在靶板上就能炸出80mm深的洞(c图)；

(4) 带有药型罩的药柱在离靶板70mm处爆炸，则炸坑深达110mm(d图)。

这种由于装药一端的空穴而提高局部破坏作用的效应，称为聚能效应。

下面解释聚能效应形成的原因。

圆柱形药柱爆炸后，高温高压的爆轰生成物，将沿近似垂直于药柱原表面的方向飞散(图6-1-2a)，作用于靶板上的仅仅是药柱端部的爆轰产物，作用的面积等于药柱端面积。当药柱带锥形凹窝后情况就不同了。凹窝部分的爆轰生成物沿与药柱表面垂直的方向飞散，在装药轴线处汇合成一股高速、高温、高密度的气流(图6-1-2b)。它对靶板的作用面积较小，能量集中，在靶板上就打出较深的洞。当锥穴表面带有金属药型罩时，在装药轴线处汇合的就是能量密度更高的金属流，所以威力也就更大了。

对于不带药型罩的聚能装药来说，这种高速、高温、高密度的气流有一个集聚得最好的距离 F (图6-1-2b)，也就是说在这个距离处气流的横截面积最小，能量密度最大。小于此距离气体

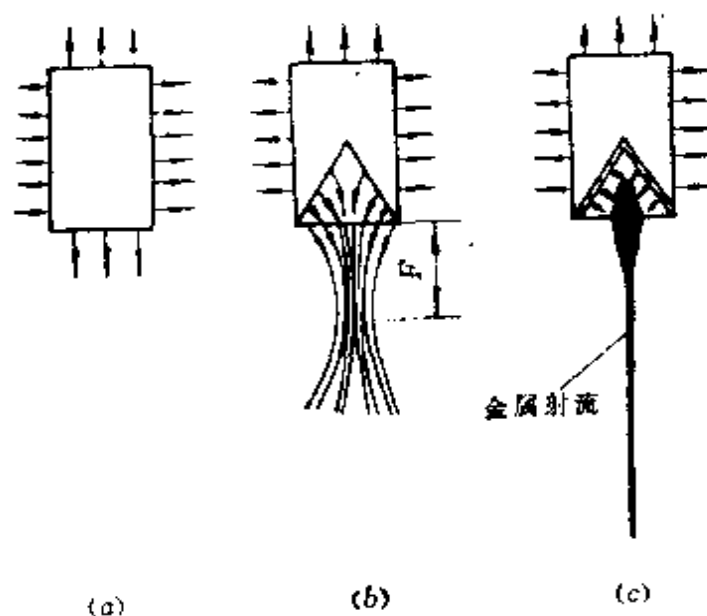


图6-1-2 爆轰生成物的飞散

流还没有很好地集聚，而大于这个距离气体流又开始发散。这都使得作用于靶板的能量密度不是最大，穿孔效果不好。

对于带有铜药型罩的装药（图6-1-2c），爆轰产物在推动罩壁向轴线运动过程中，将能量传递给铜罩。由于铜的可压缩性很小，因此内能增加很少，能量的极大部分表现为动能形式。另外金属流各部分的速度是不同的，头部速度高，尾部速度低，因此金属流在运动过程中一面前进，一面拉长。当装药距离靶很近时，金属流还没有充分拉长，使破甲孔径大深度浅；当距离过大时，金属流被拉断了，即断裂成很多不连续的颗粒，使作用于靶板的能量分散不利于破甲。这样，空心装药与靶板的距离存在一个最佳值，使装药的破甲深度最深，称为有利炸高（装药底端面与靶板的距离）。

二、金属流的概念

由实验可以看出，装药带有药型罩后破甲效果显著提高，这主要是能量密度很大的金属流对目标作用的结果。下面研究金属流的形成过程。

破甲弹撞击目标，引信引爆传爆药和炸药，爆轰波从底部向弹头部传去。当爆轰波到达罩顶部时，顶部的金属由于受到强烈的压缩，它以高达 $1000\sim 3000\text{m/s}$ 的速度（称压垮速度）向中心塑性流动而闭合。闭合后，从罩内表面挤出一部分高速运动的金属向前运动，形成了金属流（或称射流）；另一部分金属（相当于罩外层的金属）闭合而形成低速运动的杵状体，简称杵体。随着爆轰波的向前传播，药型罩亦依次（从罩顶至罩底）不断闭合，不断形成金属流和杵体。

图6-1-3是射流形成的示意图。其中（a）图为聚能装药的原来形状，图中把罩分成四个部分，称为微元。（b）图表示爆轰波阵面到达罩微元2的末端，各罩微元在爆轰产物的作用下，先后依次向中心轴运动，微元2正在向中心轴闭合，微元3有一部分正在中心轴处碰撞，微元4已经在轴线处碰撞完毕。微元4碰

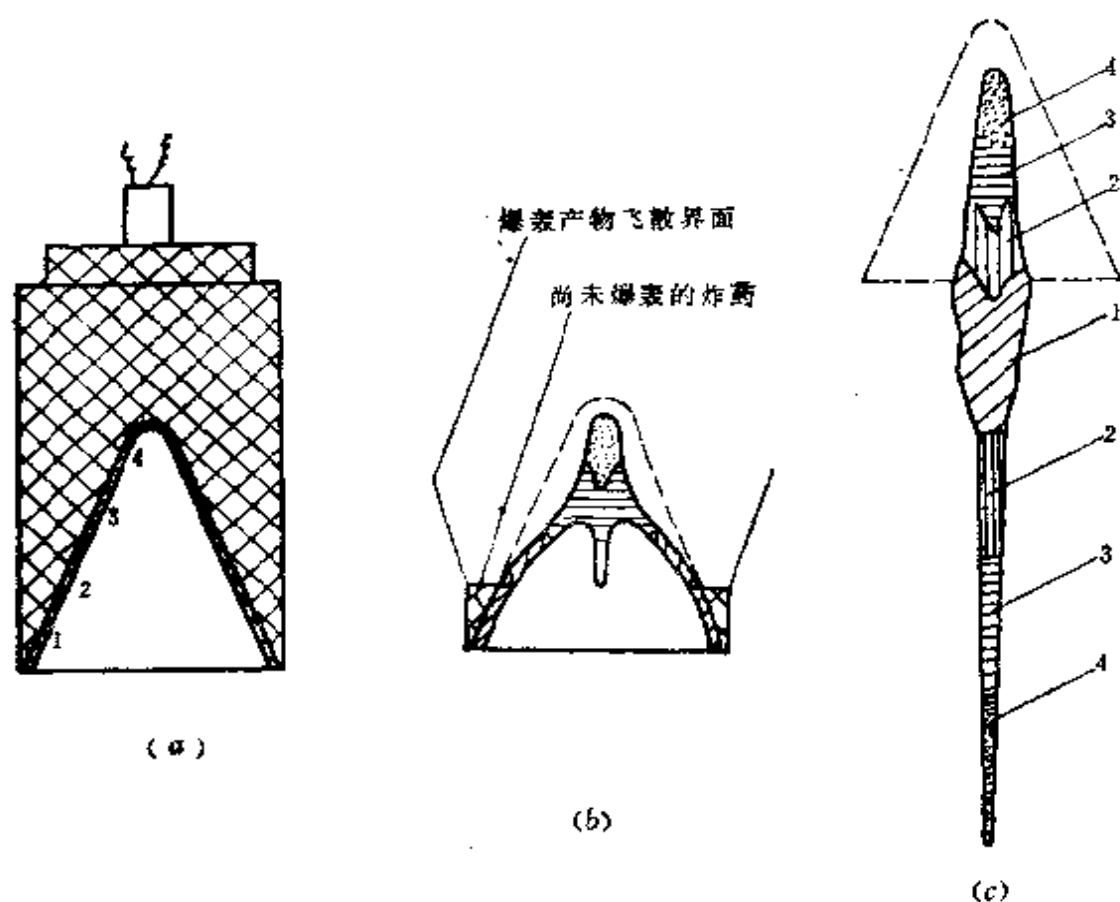


图6-1-3 射流形成示意图

撞后，分成射流和杵体两部分（此时尚未分开），由于这两部分的速度相差很大，很快就分离开来。微元3接踵而来，填补了微元4让出来的位置，并且在那里发生碰撞。这样就出现罩微元不断闭合、不断碰撞、不断形成射流和杵体的连续过程。（c）图表示药型罩的变形过程已经完成，药型罩已变成射流和杵体两大部分。各微元的排列次序，由图中可以看出，杵体和罩微元爆炸前是一致的，射流则倒过来了。

药型罩除了形成射流和杵体外，还有相当一部分形成碎片，这主要是由锥底部分形成的。如果罩碰撞时的对称性不好，也会产生偏离轴线的碎片。而实际上不可能完全对称，因此碰撞时或多或少的要分出一些碎片。另外，碰撞时产生的压力和温度都很高，有时也可能产生局部熔化甚至气化现象。

相对说来，作用在药型罩顶部处的有效装药量大，而金属质

量又较少，故闭合时的碰撞速度大，形成的金属流速度也高，反之，作用于罩底部的有效装药量少，而金属的质量相对较大，故碰撞速度和形成的金属流速度也比前者低。所以对整个金属流而言，头部速度高，尾部速度低，存在着速度梯度。这样，随着金属流的向前运动，金属流本身不断拉长，并在其内部产生拉应力。当拉应力大于金属流的内聚力时，金属流就被拉断，断裂成很多小颗粒。

如在钢质药型罩内表面镀一层很薄的铜，在杵体内不会发现任何铜的痕迹；但如在钢罩外表面镀上一层很薄的铜，则在杵体内会发现氧化铜。这个试验证明了，金属流是由药型罩内表层金属闭合形成的，杵体是由药型罩外层金属形成的。根据药型罩锥角的不同，金属流质量大约只占整个罩金属质量的15~30%左右。

半球形药型罩的变形过程与锥形药型罩的不同。半球形药型罩顶部受到爆轰产物作用后，首先沿轴线向前运动，然后侧面部分罩微元向轴线运动，罩顶部因翻过来了，则形成向后的凹穴（图6-1-4b），进一步运动，凹穴产生反射流。正反两股射流同时向两个方向延伸。半球形药型罩与锥形药型罩相比，射流速度较低，直径较粗，射流的质量较多，杵体的速度差不多。

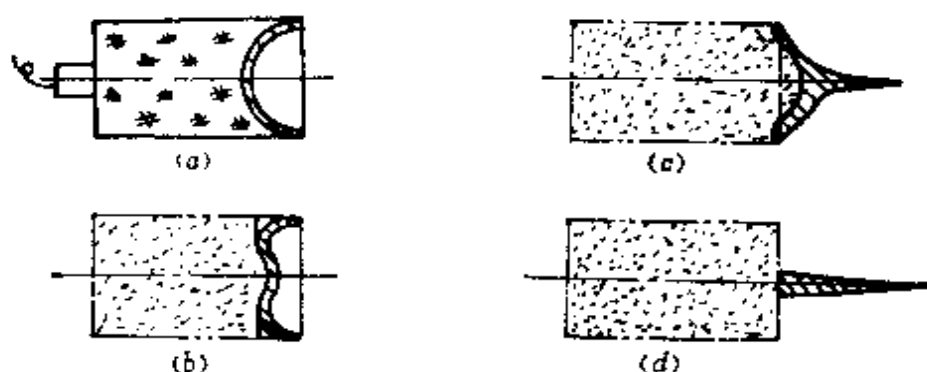


图6-1-4 半球形药型罩变形及射流形成示意图

当药型罩锥角增大到 100° 以上时，药型罩大部分翻转，罩壁在爆轰产物的作用下仍然汇合到轴线处，但和小锥角的药型罩大

不相同,不再发生罩壁内外层的能量重新分配,也不区分为射流和杵体两部分,药型罩被压合成为一个直径较小的“高速弹丸”,由于头尾存在速度差,高速弹丸在运动过程中仍有所拉长,但基本上保持完整。“高速弹丸”和金属射流有本质的不同,它的直径较粗,能量密度也低得多。

三、金属流的破甲过程

通过静破甲试验我们发现,破孔的入口直径较大,整个破孔近似为一个漏斗形(图6-1-5),但在相当一段长度上孔径变化缓慢。对侵彻后的靶板进行研究后发现,破孔表面有一层铜沉积层,厚度约为 $0.035\sim 0.15\text{mm}$,紧邻沉积层的是硬化层,该层厚约为 0.15mm ,这层金属发生了相变,说明在破甲过程中温度是较高的。距破孔表面小于 1.5mm 处属于严重变形区,这一区中的晶粒被拉长、变形、歪扭。距离大于 1.5mm 小于 4mm 处属于变形区,该区内晶粒发生了一定程度的变形。距离大于 4mm 小于 9mm 范围内为轻变形区,晶粒只有轻度的变形。大于 9mm 处晶粒就没有什么变形了。

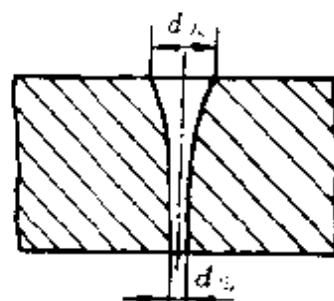


图6-1-5 破孔剖面

可以看出,金属流破甲只在很小范围内对靶板金属有影响。下面研究金属流的破甲过程。

金属流的速度很高,能量密度很大,当与钢甲碰击时就要产生很高的碰撞速度和很大的压力。所以,无论在钢甲或射流中均将产生冲击波。它的破甲过程如图6-1-6所示。

图中(a)为射流刚接触靶板,然后发生碰撞,由于碰撞速度超过了钢和铜中的音速,自碰撞点开始向靶板和射流中分别传入冲击波,同时在碰撞点产生很高的压力,能达到 $2 \times 10^5 \text{MPa}$,温度升高到绝对温度 5000K 。射流与靶板碰撞后,速度降低,但不为零,它等于碰撞靶板后的质点速度,也就是碰撞点的运动速度,

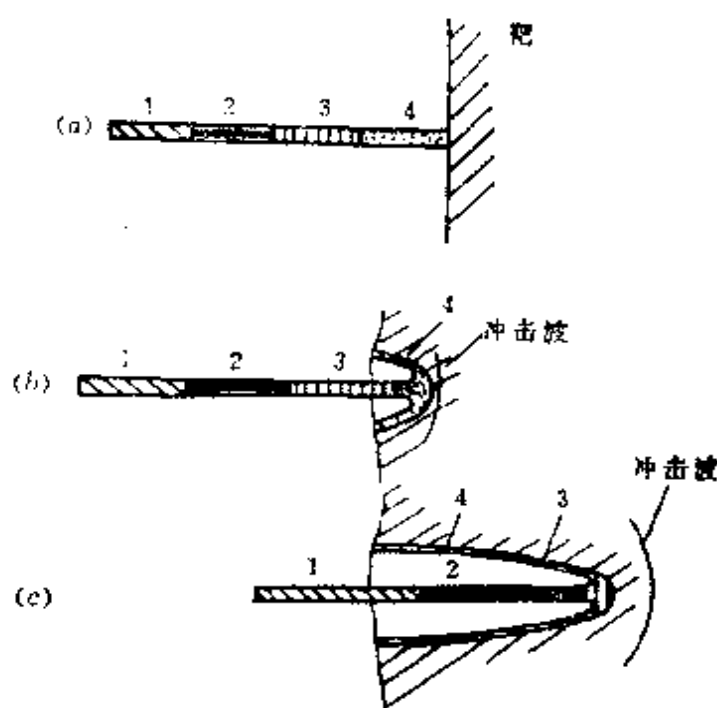


图6-1-6 破甲示意图

称为破甲速度。碰撞后的射流并没有消耗其全部能量，剩余的部分能量虽不能进一步破甲，却能扩大孔径。此部分射流受到压缩，并在后续射流的推动下，向四周扩张。后续射流到达碰撞点后，继续破甲，但此时射流所碰到的靶板质点不再是静止状态的，靶板质点经过冲击波的压缩已有一定的速度，故碰撞点的压力小了一些，约为 $(2 \sim 3) \times 10^4 \text{ MPa}$ ，温度也降低到 1000 K 左右。在碰撞点周围，金属产生高速塑性变形。这样在碰撞点附近有一个高压、高温、高速变形的区域，简称三高区。图(b)表示射流4正在破甲，在碰撞周围形成三高区。图(c)表示射流4已附在孔壁上，有少部分飞溅出去；射流3已完成破甲作用；射流2即将破甲。可见射流残留在孔壁的次序和原来射流中的次序是相反的。整个破甲过程可分为三个阶段：

第一阶段——金属流开坑阶段

这是破甲的开始阶段。当射流头部碰击静止的钢靶时，产生很高的压力，从碰撞点向靶板和射流中分别传入冲击波。靶板自由界面崩裂，靶板金属和射流残渣飞溅，射流在靶板中建立三高

区。此阶段的侵彻深度仅占孔深的很小一部分。

第二阶段——准定常阶段

这是破甲的主要阶段。射流碰靶后，在靶板中形成三高区，此后射流对三高状态的靶板破孔，碰撞压力较小。在此阶段中，射流速度的降低和破孔直径的减小都比较缓慢，基本上与破孔时间无关，故称准定常阶段。也就是说可以把射流速度、侵彻速度等作为常量处理。该阶段的侵彻深度占整个侵彻深度的大部分。

第三阶段——终止阶段

这阶段情况很复杂，首先，射流速度已相当低，靶板强度的作用愈来愈明显，不能忽略。其次，由于射流速度降低，不仅破甲速度减小，而且扩孔能力也下降，后续射流推不开前面已经释放能量的射流残渣，后续射流作用于残渣上，而不是作用于靶孔的底部，影响了破甲的进行。实际上在射流和孔底之间，总是存在射流残渣的堆积层。在准定常阶段堆积层很薄，在终止阶段则愈来愈厚，最后使射流破甲过程终止。第三，在破甲后期射流产生了颈缩和断裂，对破甲不利。

有一点还需明确，射流在破甲过程中是不断消耗的，所以射流要拉长到一定的长度破甲为最好，此时侵彻深度最大。当射流拉断时，断裂成很多颗粒，破坏了破甲作用的连续性，使破甲深度下降。

第二节 金属流的形成过程

由前面的讨论中可以看出，金属流的能量形式主要是动能形式，它对靶板的破坏是由于它各部分的动能和靶板连续交换的结果。因此，研究金属流破甲就需要首先研究动能沿金属流长度的分布，也就是研究速度和质量的分布。这需从金属流的形成过程入手。

聚能装药从起爆到射流破甲可分为两个阶段：第一个阶段是炸药爆轰，推动药型罩向轴线运动；第二个阶段是药型罩各微元

运动到轴线，发生碰撞，分成射流和杵体两部分。

炸药爆轰波到达药型罩壁面的初始压力达几万兆帕，远大于药型罩材料的强度（几百兆帕），而罩在运动过程中，塑性变形功转化为热能，使罩温升高，进一步降低材料的强度。药型罩向轴线压合运动时，其体积压缩和形状变化相比较是很小的，可以忽略不计。这样，金属药型罩在形成金属流的过程中可以当作理想不可压缩流体来处理。但是实际上药型罩金属的金相组织、结晶取向，以及加工过程中的残余内应力等对破甲性能是有影响的。用不同的加工工艺制造的药型罩其破甲性能是不同的。因此把药型罩金属当作理想不可压缩流体处理也是近似的。

一、射流形成的定常流动模型

现在以定常理想不可压缩流体模型来考虑药型罩的变形过程，并建立求射流速度的公式。

假设药型罩为圆锥形。图6-2-1(a)中，OC为罩壁初始位置，OH为罩轴线， α 为半锥角。该模型是在如下假设下建立的：

(1) 爆轰波到达罩面后，微元即以压垮速度 v_0 向轴线运动，大小和方向不变；

(2) 罩各微元的速度 v_0 及变形角 δ 相等；

(3) 变形过程中罩长度不变；

(4) 将罩金属视为理想不可压缩流体；

(5) 爆轰波扫过罩壁的速度不变。

当爆轰波到达微元A点时，A点开始运动，速度 v_0 的方向与罩面法线成 δ 角。A点到达轴线时，爆轰波到达C点，AC段运动到了BC位置。BC与轴线的夹角 β 称为压垮角（或压合角）。由假设条件可知，变形后的罩壁BC必为直线。过C点作AB的垂线CF，则 $\angle ACF = \delta$ 。因三角形ABC是等腰三角形，故

$$\angle ACB = 2\delta$$

同理

$$\angle GAE = 2\delta$$

故AE平行于CB， $\angle AEB = \angle CBH = \beta$ ，即罩各微元的压垮角

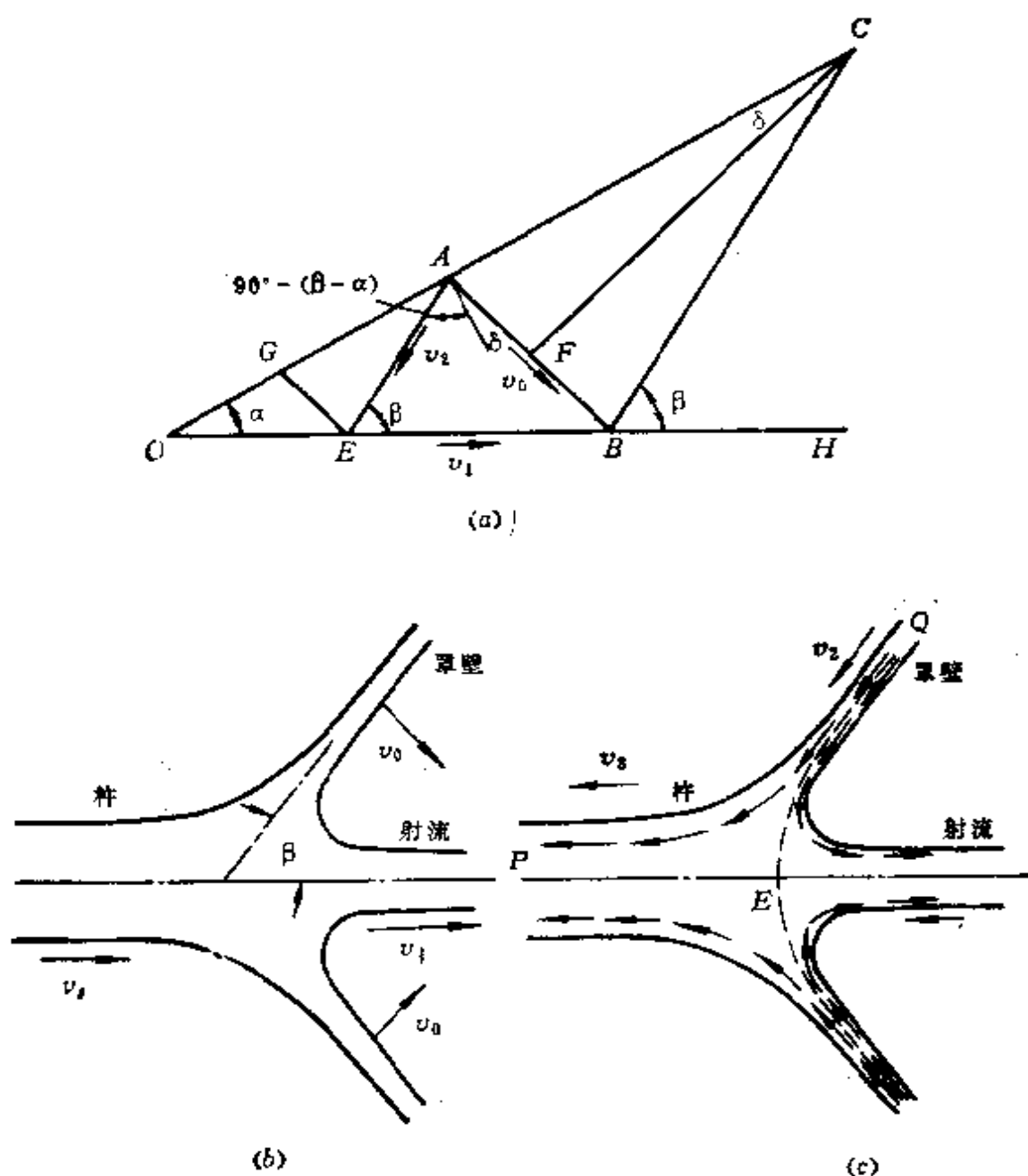


图6-2-1 射流形成的定常流动模型

(a) 计算图形, (b) 静坐标, (c) 动坐标。

相等。

当微元 G 在 E 处碰撞时, 爆轰波到达 A 点; 当爆轰波到达 C 点时, 微元 A 到达 B 处, 也就是说碰撞点从 E 点到了 B 点。碰撞点的运动速度用 v_1 表示。罩壁以压垮速度 v_0 向轴线运动, 在它到达碰撞点时, 分成杵体和射流两部分, 杵体以速度 v_1 运动, 射流

以速度 v_1 运动。设(c)图中观察者以速度 v_1 和碰撞点一起运动,则可看到罩壁以相对速度 v_2 向碰撞点运动,然后分成两股,一股向碰撞点左方离去,另一股向碰撞点右方离去。这运动状况不随时间而变,是定常过程,或稳定过程。图中罩壁外层向碰撞点左方运动成为杵体,罩壁内层向碰撞点右方运动,成为射流。根据流体力学,定常理想不可压缩流体可用伯努利方程

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常量} \quad (6-2-1)$$

式中 p ——流线上任一点处的流体压力;

v ——该点处之流体运动速度;

ρ ——流体密度。

流线上任一处之压力相等,密度不变,即: $p = \text{常量}$, $\rho = \text{常量}$ 。所以,射流在刚性壁碰撞后,其分流速度不变。即

$$v_2 = v_3 = v'_1 \quad (6-2-2)$$

于是在动坐标下,罩壁以速度 v_2 流向碰撞点,仍以速度 v_2 向左和向右离去,取向右为正,向左为负。在静坐标中,只要加上一个动坐标的速度 v_1 就可得:

$$v_f = v_1 + v_2 \quad (6-2-3)$$

$$v_r = v_1 - v_2 \quad (6-2-4)$$

其中 v_f 和 v_r 分别为射流和杵体的速度。

由质量守恒定律可得

$$M = M_f + M_r \quad (6-2-5)$$

其中 M 为罩微元的质量, M_f 和 M_r 分别为射流和杵体的质量。

根据轴线方向的动量守恒有

$$-Mv_2 \cos \beta = -M_r v_2 + M_f v_2 \quad (6-2-6)$$

由(6-2-5)和(6-2-6)式可解得:

$$M_f = M \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (6-2-7)$$

$$M_r = M \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad (6-2-8)$$

现在求碰撞点速度 v_1 和罩壁相对速度 v_2 。

罩壁上微元 A 点在 t 时间内从 A 点到达轴线上 B 点, 碰撞点则从 E 点到达 B 点(图6-2-1a), 则

$$AB = v_0 t, \quad EB = v_1 t, \quad AE = v_2 t$$

$$\angle EAB = 90^\circ - (\beta - \alpha - \delta)$$

$$\angle ABE = 90^\circ - (\alpha + \delta)$$

对于三角形 AEB , 由正弦定理有

$$\frac{v_1}{\sin[90^\circ - (\beta - \alpha - \delta)]} = \frac{v_0}{\sin \beta} = \frac{v_2}{\sin[90^\circ - (\alpha + \delta)]}$$

所以
$$v_1 = v_0 \frac{\cos(\beta - \alpha - \delta)}{\sin \beta} \quad (6-2-9)$$

$$v_2 = v_0 \frac{\cos(\alpha + \delta)}{\sin \beta} \quad (6-2-10)$$

将上述两式代入(6-2-3)和(6-2-4)式得

$$v_x = \frac{1}{\sin \frac{\beta}{2}} v_0 \cos \left(\frac{\beta}{2} - \alpha - \delta \right) \quad (6-2-11)$$

$$v_z = \frac{1}{\cos \frac{\beta}{2}} v_0 \sin \left(\alpha + \delta - \frac{\beta}{2} \right) \quad (6-2-12)$$

(6-2-7)、(6-2-8)、(6-2-11)和(6-2-12)式就是定常理想不可压缩流体条件下的射流和杆体参量(速度和质量)的表达式。

二、准定常理想不可压缩流体模型

由(6-2-7)、(6-2-8)、(6-2-11)和(6-2-12)式可以看出, 只要药型罩各微元的 M 、 v_0 、 β 和 δ 值不变, 则所求出的 M_x 、 M_z 、 v_x 和 v_z 就不变, 这就保证了定常条件。但实际上, 对于轴对称情况来说, 药型罩壁在压垮过程中要变厚, 罩内外壁要产生速度差, 各微元的质量由罩顶至罩底是逐渐增大的, 因此不能看作是定常过程, 另外聚能装药的结构大都是药型罩顶部炸药较多, 罩

底炸药较少。这样 β 、 δ 和 v_0 也是变数，不符合定常条件。但实验测定表明，大多数药型罩的 β 、 δ 和 v_0 值沿罩母线的变化率是不大的（罩顶部和罩底部除外）。所以对某一微元来说，可以近似地当作定常情况来处理，即将各微元的 M 、 β 、 δ 和 v_0 值分别代入 (6-2-7) 和 (6-2-11) 式，求出各微元对应的 M_j 和 v_j 值。这就是把定常条件的公式应用到随时间变化的准定常情况中去。

对准定常模型作如下假设：

(1) 爆轰波到达罩面后，该微元立即达到压垮速度 v_0 ，并以不变的大小和方向运动；

(2) 认为罩内、外层的速度 v_0 相等；

(3) 将罩金属视为理想不可压缩流体。

图 6-2-2 为带隔板的聚能装药。图中 O 点为药型罩锥边延长线的交点。取 O 点为坐标原点， r 、 z 分别与半径方向和轴线方

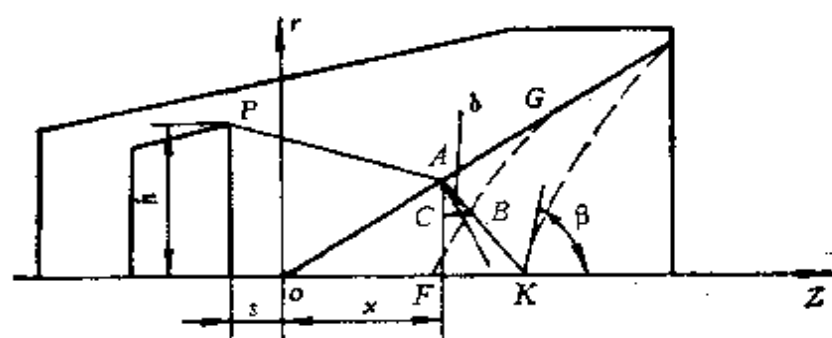


图 6-2-2 带隔板的聚能装药计算图

向一致。设隔板把爆轰波隔死，主装药由 P 处环形引爆，爆轰波到达 P 点（一个环）时间算零。现考虑微元 A 。 A 点的横坐标为 x ，纵坐标为 r ， $r = x \tan \alpha$ ， α 为半锥角，爆轰波到达 A 点的时间为 T ，则

$$T = \frac{\overline{PA}}{D} \quad (6-2-13)$$

其中 D 为炸药的爆速。

在爆轰产物的作用下，微元 A 的速度立即达到 v_0 ，它沿偏离壁面垂线 δ 角的方向运动，在 t 时到达 B 点。由直角三角形 ABC

可求出 B 点的坐标, 显然

$$\overline{AB} = v_0(t - T) \quad (6-2-14)$$

令 $\angle BAC = \alpha + \delta = A \quad (6-2-15)$

则 B 点的坐标为

$$z = x + v_0(t - T)\sin A \quad (6-2-16)$$

$$r = x \operatorname{tg} \alpha - v_0(t - T)\cos A \quad (6-2-17)$$

只要将其它微元的 x 、 v_0 、 T 和 δ 值代入上式, 也可求出其它微元在同一时刻的坐标。联结各坐标点, 可得 t 时刻罩壁的位置, 如图 6-2-2 中虚线 FBG 所示。因是非定常条件, 各点的 x 、 v_0 、 T 和 δ 值不同, 故 FBG 不是直线。 β 角的正切即为变形后罩壁在轴线处的斜率。例如对微元 A 来说, 它的 β 角就是 A 点到达轴线上的 K 点时, 罩壁曲线在 K 点的斜率。为了求 β 角, 可以先求罩壁曲线各点斜率表达式, 再求各点在轴线处的斜率表达式。各微元的坐标 r 、 z 还是时间的函数, 故斜率用偏导数 $\frac{\partial r}{\partial z}$ 表示。

(6-2-17) 式对 z 求偏导数得

$$\begin{aligned} \frac{\partial r}{\partial z} = & \frac{\partial x}{\partial z} [\operatorname{tg} \alpha - v'_0(t - T)\cos A \\ & + v_0(t - T)A' \sin A + T'v_0\cos A] \end{aligned}$$

式中 $v'_0 = \frac{\partial v_0}{\partial x}$, $T' = \frac{\partial T}{\partial x}$, $A' = \frac{\partial A}{\partial x}$ 。(6-2-16) 式对 z 取

偏导数得

$$\begin{aligned} 1 = & \frac{\partial x}{\partial z} [1 + v'_0(t - T)\sin A - T'v_0\sin A \\ & + v_0(t - T)A' \cos A] \end{aligned}$$

将此式代入前式消去 $\frac{\partial x}{\partial z}$ 得

$$\begin{aligned} & \frac{\partial r}{\partial z} \\ &= \frac{\operatorname{tg} \alpha - v'_0(t-T)\cos A + v_0(t-T)A'\sin A + T'v_0\cos A}{1 + v'_0(t-T)\sin A - T'v_0\sin A + v_0(t-T)A'\cos A} \end{aligned} \quad (6-2-18)$$

这就是罩微元 A 到达 B 点时斜率的表达式。

令 (6-2-17) 式中 $r = 0$ ，可得

$$t - T = -\frac{x \operatorname{tg} \alpha}{v_0 \cos A} \quad (6-2-19)$$

代入 (6-2-18) 式中消去 $t - T$ ，即得 $r = 0$ 处的斜率

$$\begin{aligned} & \left. \frac{\partial r}{\partial z} \right|_{r=0} = \operatorname{tg} \beta \\ &= \frac{\operatorname{tg} \alpha - \frac{v'_0}{v_0} x \operatorname{tg} \alpha + T'v_0\cos A + A'x \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} A}{1 + \frac{v'_0}{v_0} x \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} A - T'v_0\sin A + A'x \operatorname{tg} \alpha} \end{aligned} \quad (6-2-20)$$

下面求 T' 和 A' 。

由图 6-2-2 可得

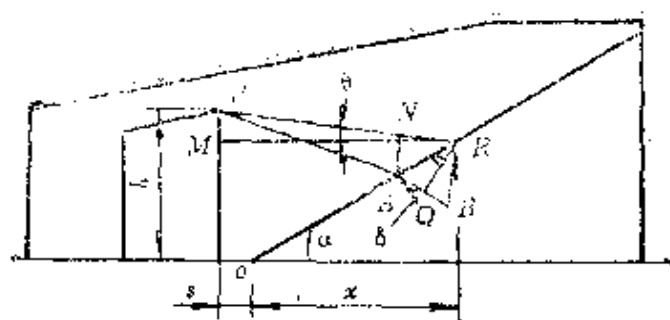
$$T = \frac{\overline{PA}}{D} = \frac{1}{D} [(x+s)^2 + (h - x \operatorname{tg} \alpha)^2]^{1/2} \quad (6-2-21)$$

$$\begin{aligned} T' = \frac{\partial T}{\partial x} &= -\frac{1}{D} [(x+s)^2 \\ &+ (h - x \operatorname{tg} \alpha)^2]^{-1/2} [x+s - \operatorname{tg} \alpha (h - x \operatorname{tg} \alpha)] \end{aligned} \quad (6-2-22)$$

在罩壁上考虑 A 点 (图 6-2-3)，当爆轰波从罩壁 A 扫到 R 时，微元 A 运动到 B 。设 $AR = BR$ ，作 AB 的垂线 RQ ，则 $\angle QRA = \angle QRB = \delta$ ，则

$$\sin \delta = \frac{\overline{AQ}}{\overline{AR}} = \frac{v_0/2}{u} = \frac{v_0}{2u} \quad (6-2-23)$$

式中 u 为爆轰波扫过罩壁的速度。作 AN 垂直 PR ，因 AR 很小，可取 $PA = PN$ 。从 P 点发出的爆轰波同时到 A 和 N ，经过时间 t ，

图6-2-3 A 和 A' 的计算图

爆轰波从 N 点到达 R ，爆轰波与罩壁的交点由 A 到达 R ，即 $NR = Dt$ ， $AR = ut$

$$\cos \angle ARN = \cos(\alpha + \theta) = \frac{D}{u}$$

作直角三角形 PRM ，则有

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{h - x \operatorname{tg} \alpha}{x + s}$$

代入上式则得

$$u = D \sec \left(\alpha + \operatorname{arctg} \frac{h - x \operatorname{tg} \alpha}{x + s} \right)$$

代入 (6-2-23) 式得

$$\delta = \arcsin \left[\frac{v_0}{2D} \cos \left(\alpha + \operatorname{arctg} \frac{h - x \operatorname{tg} \alpha}{x + s} \right) \right] \quad (6-2-24)$$

所以

$$A = \alpha + \arcsin \left[\frac{v_0}{2D} \cos \left(\alpha + \operatorname{arctg} \frac{h - x \operatorname{tg} \alpha}{x + s} \right) \right] \quad (6-2-25)$$

该式对 x 求偏导数则得 A'

$$\begin{aligned} A' &= \frac{\partial A}{\partial x} \\ &= \frac{v_0(h + s \operatorname{tg} \alpha) \sin(\alpha + \theta)}{\left[1 - \frac{v_0^2}{4D^2} \cos^2(\alpha + \theta) \right]^{1/2} 2D[(x + s)^2 + (h - x \operatorname{tg} \alpha)^2]} \end{aligned} \quad (6-2-26)$$

式中 $\theta = \arctg \frac{h - x \operatorname{tg} \alpha}{x + s}$ 。

将(6-2-25)、(6-2-26)和(6-2-22)式代入(6-2-20)式, 消去 A 、 A' 和 T' 可得:

$$\operatorname{tg} \beta = \beta(v_0, v'_0, x, \alpha, D, s, h) \quad (6-2-27)$$

其中 α 、 s 、 h 为装药结构参数, D 是爆速, 均为已知。射流速度 v_j 和射流质量 M_j 仍用定常公式(6-2-11)和(6-2-7)计算。这样在(6-2-24)、(6-2-27)、(6-2-11)和(6-2-7)四式中, α 、 s 、 h 、 D 为已知值, M 为 x 点单位微元的质量, 也是给定的。因此有五个未知数 v_j 、 M_j 、 β 、 δ 和 v_0 (v_0 知道后 v'_0 也就知道了), 但仅有四个方程。若用实验方法测定其中的一个参量, 其余的参量即可算出。

三、压垮速度 v_0 的计算

目前, 尚无准确的压垮速度计算式, 下面仅推导一维情况下的近似计算式。

为了推导压垮速度的计算公式, 需引入有效装药量的概念。炸药在爆轰过程中, 爆轰产物是各向飞散的, 对某一方向只有一部分爆轰产物起作用, 在给定方向上飞散的那部分爆轰产物所相对应的装药量称为有效装药量。为便于考虑有效装药量, 假设装药为瞬时爆轰, 即假定爆轰在整个装药中同时进行, 在同一瞬间炸药全部变成爆炸产物, 这产物占有原装药的体积, 并且在整个体积内爆炸产物的状态参数都是相同的。

装药瞬时爆轰后, 产物同时以同样的速度向各方向飞散, 飞散方向与装药面的法线方向一致。当表面层爆轰产物离开了装药表面时, 后一层装药将相继按平行层补充上来。根据这个原理, 在不同方向上的有效装药可根据相邻两方向的角平分线来得到。如图柱形装药瞬时爆轰后, 爆轰产物的飞散情况如图 6-2-4 所示。沿 x 轴正方向飞散的有效装药是 $cf d$ 圆锥体, 其体积为

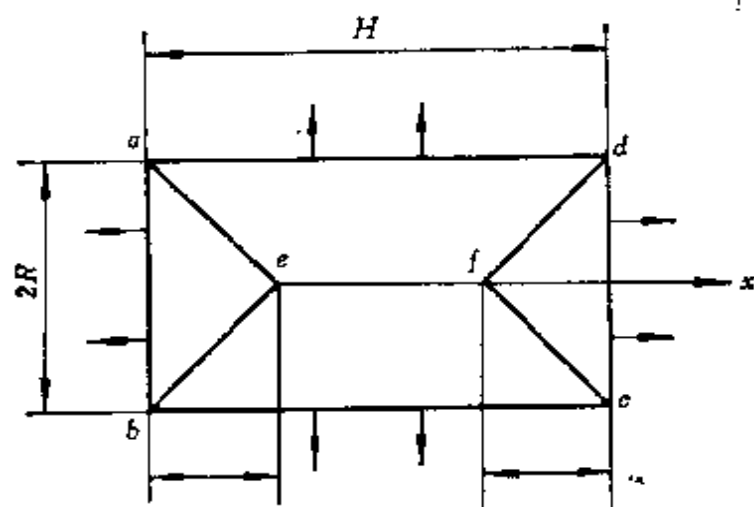


图6-2-4 圆柱形装药瞬时爆轰后产物飞散图

$$V_s = \frac{1}{3} \pi R^3$$

显然，只有当 $H \geq 2R$ 时，才能获得上述体积。

根据平行层原理，空心装药结构在瞬时爆轰条件下的有效装药如图 6-2-5 中的斜线部分，它也就是使药型罩闭合产生金属流的装药部分。

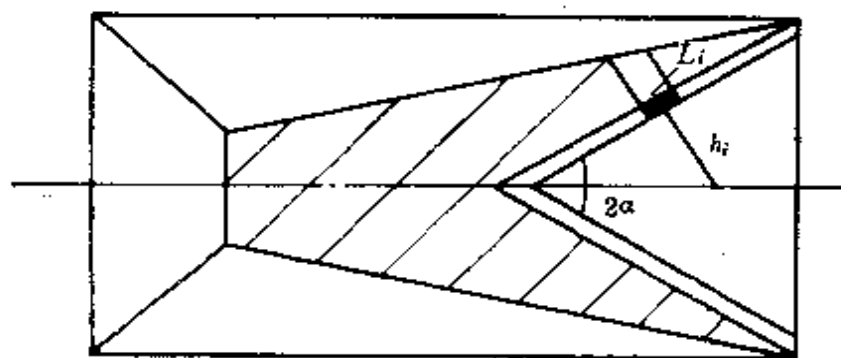


图6-2-5 空心装药的有效装药

现在我们研究的问题是有效装药的爆轰产物对金属罩的作用，这可以认为是一维问题。药型罩微元的运动方程为

$$M_i \frac{dv_{0i}}{dt} = S_i p$$

式中 M_i ——药型罩 i 微元的质量；

v_{0i} ——药型罩 i 微元的速度；

S_i ——药型罩 i 微元的表面积；

p ——爆轰产物作用于 i 微元上的压力。

经过变换后可得：

$$\begin{aligned} M_i \frac{dv_{0i}}{dt} &= M_i \frac{dh_i}{dt} \times \frac{dv_{0i}}{dh_i} = M_i \cdot v_{0i} \cdot \frac{dv_{0i}}{dh_i} \\ &= M_i \frac{dv_{0i}^2}{2dh_i} \end{aligned} \quad (6-2-28)$$

由爆轰理论可知，爆轰产物在膨胀初期压力和容积应满足条件 $pV^K = \text{常数}$ 。其中 K 称为多方指数，在粗略计算中，可取 $K = 3$ 。即

$$pV^3 = p_0V_0^3 \quad (6-2-29)$$

式中 p_0 ——爆轰产物作用在微元 i 上的初始压力；

V_0 ——爆轰产物的初始容积，即有效装药量的容积；

V ——爆轰产物膨胀至 t 时的容积。

当爆轰产物由药型罩表面膨胀至中心轴线时，相应的体积比为

$$\frac{V_0}{V} = \frac{S_i L_i}{S_i (L_i + h_i)} = \frac{L_i}{L_i + h_i}$$

式中 L_i ——作用于 i 微元的有效装药高度；

h_i ——微元 i 的膨胀距离。

爆轰产物的起始压力，根据爆轰理论，假定为瞬时爆轰，则可写为

$$p_0 = \frac{1}{8} \rho_0 D^2$$

式中 ρ_0 ——装药的密度；

D ——炸药的爆速。

将 p_0 和 (V_0/V) 值代入 (6-2-29) 式则得

$$p = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \left(\frac{L_i}{L_i + h_i} \right)^3 \quad (6-2-30)$$

将 (6-2-30) 式代入 (6-2-28) 式得：

$$M_i \frac{dv_{oi}^2}{2dh_i} = \frac{\rho_0 S_i D^2}{8} \left(\frac{L_i}{L_i + h_i} \right)^3$$

知药型罩 i 微元的有效装药质量 $m_i = \rho_0 S_i L_i$, 则

$$d\left(\frac{v_{oi}}{D}\right)^2 = \frac{m_i}{M_i} \cdot \frac{1}{4\left(1 + \frac{h_i}{L_i}\right)^3} d\left(\frac{h_i}{L_i}\right) \quad (6-2-31)$$

对上式积分

$$\int_0^{v_{oi}} d\left(\frac{v_{oi}}{D}\right)^2 = \frac{m_i}{4M_i} \int_0^{h_i} \frac{1}{\left(1 + \frac{h_i}{L_i}\right)^3} d\left(\frac{h_i}{L_i}\right)$$

最后得:

$$v_{oi} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\rho_0 L_i}{\rho_i b_i} \left[1 - \left(\frac{L_i}{L_i + h_i} \right)^2 \right]} \quad (6-2-32)$$

式中 ρ_i ——药型罩材料的密度;

b_i ——药型罩 i 微元处的厚度。

在上述推导过程中, 微元 i 的行程为 h_i , v_{oi} 在原始罩面的法线方向, 实际上的行程不是 h_i , 而应是 h_{li} , v_{oi} 的方向与原来罩面的法线成某一角度 δ 。由图 6-2-6, 采用正弦定理可得

$$h_{li} = \frac{l_{Mi} \sin \alpha}{\cos \frac{\beta + \alpha}{2}}$$

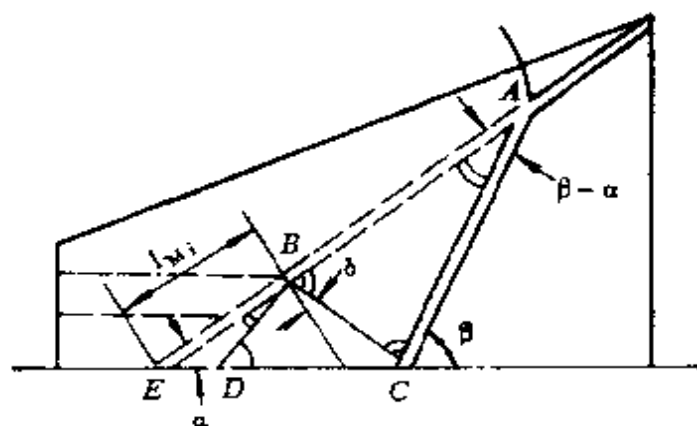


图 6-2-6 药型罩的压垮过程

将 h_i 代替(6-2-32)式中的 h_i , 最后得:

$$v_{oi} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1}{2} \times \frac{\rho_0 L_i}{\rho_i b_i} \left[1 - \left(\frac{L_i \cos \frac{\beta + \alpha}{2}}{l_{Mi} \sin \alpha + L_i \cos \frac{\beta + \alpha}{2}} \right)^2 \right]} \quad (6-2-33)$$

实际计算表明, 上式与实际有一定误差, 应用时须作适当的修正。

由公式中可以看出, 装药密度 ρ_0 和爆速 D 越大, 则压垮速度 v_{oi} 越大。药型罩各微元的有效装药量 m_i , 从罩顶到罩底越来越少, 各微元罩的质量 M_i 从罩顶至罩底越来越多, 另外, 罩微元至轴线的加速路程, 从罩顶至罩底越来越长。这样就使药型罩在闭合的初期, 虽然压垮速度较大, 但加速路程较短, 金属流头部速度并不是最大, 而是在靠近罩顶部附近速度才是最大, 顶部速度要高于底部速度, 在运动过程中, 射流速度重新分布, 使射流头部速度最大。

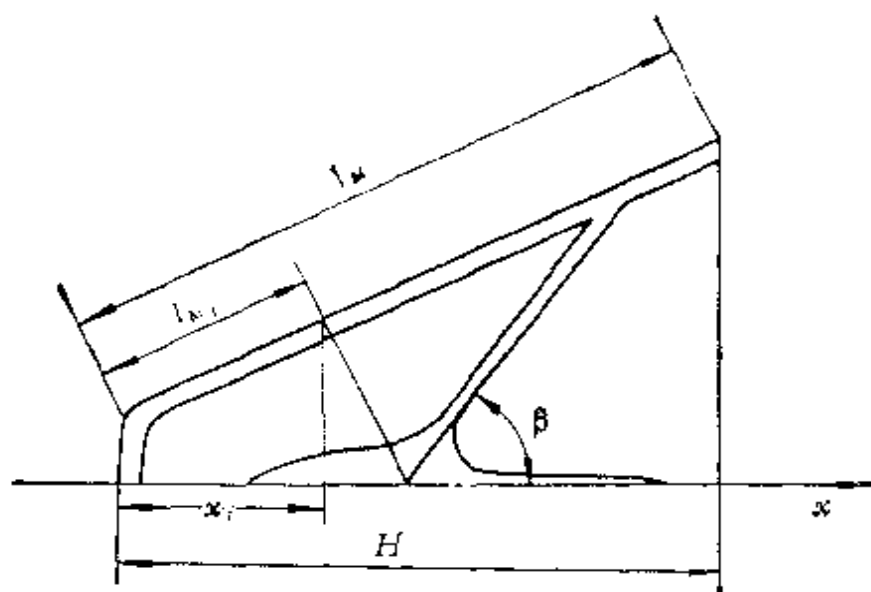
四、药型罩的压垮角

罩面压垮以后与轴线所成的角度称为压垮角, 以 β 表示。 β 的变化规律与压垮速度 v_0 沿轴线的分布有关。当 v_0 为常数时, 则 β 为定值, 罩面变形以后仍是一个圆锥面, 如图6-2-7所示。当 v_0 逐渐减小时, β 逐渐增大, 罩面变形后为一曲面。根据闪光X射线照相观察, 愈靠近罩底部 β 愈大, 变形后罩面为曲线。

从理论上计算压垮角可用公式(6-2-27), 但使用不便, 亦存在一定误差。下面介绍一个适用于锥形罩的经验公式:

$$\beta = e^t \quad (6-2-34)$$

$$t = \begin{cases} -0.035\alpha(\lambda - 0.28)^2 + 0.026\alpha + 2.465(\lambda - 0.152) + 3.08 & \text{(有隔板)} \\ -0.1\alpha(\lambda - 0.228)^2 + 0.029\alpha + 4.49(\lambda - 0.16)^2 + 2.83 & \text{(无隔板)} \end{cases}$$

图6-2-7 药型罩的压垮角 β

式中 α ——药型罩的半锥角 (度);
 λ ——药型罩微元的相对位置, 即

$$\lambda = \frac{x_i}{H} = \frac{l_{M_i}}{l_M}$$

H 和 l_M 分别为药型罩的高度和母线长度, x_i 和 l_{M_i} 分别为罩微元距罩顶的高度和对应 x_i 的母线长度, 见图 6-2-7。

采用 (6-2-34) 式计算时, 限于一定的范围, 否则误差较大。对于带隔板的聚能破甲弹, $2\alpha = 44^\circ \sim 80^\circ$; 对于不带隔板的聚能破甲弹, $2\alpha = 32^\circ \sim 80^\circ$ (2α 为药型罩的锥角)。

五、金属流微元的初始长度

金属流的初始长度, 是破甲弹设计及破甲威力计算的基本参数。通常可用各微元所形成的金属流长度之和来表示。在实际计算中可将药型罩分成许多微元, 求出各微元形成金属流的长度。

设微元 i 变形前的横坐标为 x_i 、 x_{i+1} , 纵坐标为 r_i 、 r_{i+1} , 当此微元全部运动到轴线以后, 纵坐标为 0, 横坐标为 ξ'_i 、 ξ'_{i+1} , 微元 i 形成的金属流以速度 v_{ji} , 向右运动, 如图 6-2-8 所示。

令 T_i 为爆轰波由顶点 O 至 A 所经过的时间, T_{i+1} 为爆轰波

由于

$$\begin{cases} x_i \operatorname{tg} \alpha = (t_i - T_i) v_{0i} \cos(\alpha + \delta_i) \\ x_{i+1} \operatorname{tg} \alpha = (t_{i+1} - T_{i+1}) v_{0i+1} \cos(\alpha + \delta_{i+1}) \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} (t_i - T_i) = \frac{x_i \operatorname{tg} \alpha}{v_{0i} \cos(\alpha + \delta_i)} \\ (t_{i+1} - T_{i+1}) = \frac{x_{i+1} \operatorname{tg} \alpha}{v_{0i+1} \cos(\alpha + \delta_{i+1})} \end{cases} \quad (6-2-37)$$

同时

$$\begin{cases} \xi'_i = x_i + r_i \operatorname{tg}(\alpha + \delta_i) \\ \xi_{i+1} = x_{i+1} + r_{i+1} \operatorname{tg}(\alpha + \delta_{i+1}) \end{cases} \quad (6-2-38)$$

令

$$\Delta \xi_i = \xi_{i+1} - \xi'_i, \quad \Delta x_i = x_{i+1} - x_i$$

故

$$\Delta \xi_i = \Delta x_i + r_{i+1} \operatorname{tg}(\alpha + \delta_{i+1}) - r_i \operatorname{tg}(\alpha + \delta_i) \quad (6-2-39)$$

将 (6-2-37)、(6-2-39) 代入 (6-2-36) 式, 则得

$$\begin{aligned} l_{0i} = & \left\{ -\frac{\Delta x_i}{D} + \frac{x_{i+1} \operatorname{tg} \alpha}{v_{0i+1} \cos(\alpha + \delta_{i+1})} - \frac{x_i \operatorname{tg} \alpha}{v_{0i} \cos(\alpha + \delta_i)} \right\} v_{0i} \\ & - [\Delta x_i + r_{i+1} \operatorname{tg}(\alpha + \delta_{i+1}) - r_i \operatorname{tg}(\alpha + \delta_i)] \end{aligned} \quad (6-2-40)$$

第三节 破甲深度计算

聚能弹破甲深度的计算是设计聚能弹必然遇到的问题, 在建立破甲深度的计算公式之前, 先讨论一下破甲过程中的一些基本现象, 以及对破甲过程的力学分析。

一、金属流破甲过程的基本现象

金属流的破甲过程属于超高速冲击的范围, 和一般穿甲弹相比, 出现了许多新的现象和问题。

1. 金属流在破甲过程中逐渐消失

从金属流冲击靶板开始，随着破甲过程的发展，金属流逐渐失掉自己的能量。金属流一部分依附于穿孔的表面上，少部分从入口处飞溅出去，当破甲过程结束后，金属流完全丧失原来的形状。金属流冲击靶板时，在接触面上产生很高的压力，随之逐渐降低。就紫铜金属流冲击合金钢板而言，金属流的绝大部分达到熔化状态，这样无论是飞溅出去的金属，还是依附于穿孔表面的金属都是达到熔化状态的紫铜。

2. 被穿孔后的靶板质量基本不减

靶板经过金属流穿孔以后，尽管孔的容积不小，但实际上靶板的质量基本上不减。在破甲过程中，虽然有一部分金属流依附在穿孔表面上，但质量很少。因此可以认为金属流的穿孔过程就是靶金属向侧向和前面流动的过程，而且主要是流向侧面，从入口和出口失掉的靶金属是极有限的。如果金属流对半无限靶作用，从入口飞溅出去的靶金属就更少了，一般不超过5%。

3. 靶板的穿孔呈圆锥形

由于金属流的速度从头部至尾部逐渐减小，当金属流破甲时，相应地入口孔径大，入口以后孔径依次减小，穿孔呈圆锥形。

4. 破甲的深度和孔径与靶板的强度有关

金属流穿孔的孔径远远大于金属流相应部分的断面直径，这主要是由于金属流的高速特性所致。金属流垂直破甲时，入口孔径通常为金属流直径的5~7倍。同种金属流的破甲深度和孔径取决于靶板的强度。表6-3-1列出了同一种聚能装药对几种不同材料靶柱的破甲情况。所用装药的直径为26mm，炸药为梯黑50/50，紫铜圆锥形（40°）药型罩，罩厚为0.8mm，炸高为60mm。

5. 穿孔周围形成一个硬化层

金属流破甲之后，穿孔的表面从入口到出口依附着一层金属流的金属。穿孔周围的靶金属由于经受金属流的强烈冲击，硬度

表6-3-1 对不同材料靶柱的破甲数据

靶柱材料	极限强度 (MPa)	破甲深度 (mm)	入口孔径 (mm)	终止孔径 (mm)
合金钢	900	68.6	15	1.0
中碳钢	750	86.2	18	2.0
低碳钢	430	95		
紫铜	240	134.6		
铅柱		137.4		
铜柱		207.4	25	3~4

普遍提高,形成了一定厚度的硬化层。紧靠穿孔表面的靶金属,一般达到相变温度以上,再往里温度越来越低。

二、金属流破甲的定常侵彻模型

因为射流的速度很高,在碰击靶板时将产生很大的局部压力。在这种情况下因冲击压力比靶板的强度高得多,靶板本身的强度可以不考虑。认为射流的速度是均匀的,侵彻速度也是不变的,将靶板也作为理想不可压缩流体处理。

金属流的破甲过程如图 6-3-1 所示,射流速度为 v_j ,破甲速度为 u 。把坐标原点放在动点 A 上。 A 点是射流与靶板的接触点。站在 A 点观察,见到射流以速度 $v_j - u$ 流来,靶材以速度 u 流来。取向右方向为正,则靶材在动坐标上的速度为 $-u$,这样,整个流动图形是不随时间而变的,因此是定常运动过程。设恒速射流的长度为 l ,总破甲时间为 t ,则

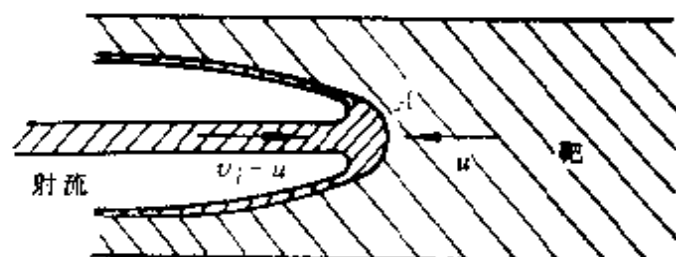


图6-3-1 破甲过程示意图

$$t = \frac{l}{v_j - u} \quad (6-3-1)$$

破甲深度

$$P = ut \quad (6-3-2)$$

由于在整个破甲时间 t 内, 破甲是定常理想不可压缩流体的流动过程, 可以应用伯努利公式, 在点 A 左侧, 取远离 A 点的一点和 A 点, 根据伯努利公式, 该两点的静压力与单位体积动能之和应相等, 即

$$(p_j)_{\infty} + \frac{1}{2} \rho_j (v_j - u)^2 = (p_j)_A + \frac{1}{2} \rho_j u^2$$

式中 $(p_j)_{\infty}$ 为远离 A 点处射流的静压力, $(p_j)_A$ 为 A 点左侧射流的静压力, 该处速度 u 为零。同样, 在 A 点右侧, 取远离 A 点的一点和 A 点, 可得:

$$(p_t)_{\infty} + \frac{1}{2} \rho_t u^2 = (p_t)_A + \frac{1}{2} \rho_t u^2$$

式中 $(p_t)_{\infty}$ 为远离 A 点处靶板的静压力, $(p_t)_A$ 为 A 点右侧靶板的静压力, 该处速度 u 为零。在 A 点压力必相等, 即

$$(p_j)_A = (p_t)_A$$

亦即

$$(p_j)_{\infty} + \frac{1}{2} \rho_j (v_j - u)^2 = (p_t)_{\infty} + \frac{1}{2} \rho_t u^2 \quad (6-3-3)$$

式中 ρ_j 、 ρ_t 分别为射流和靶板的密度。远离 A 点处的压力 $(p_j)_{\infty}$ 和 $(p_t)_{\infty}$ 可看成与大气压平衡, 故可忽略。则 (6-3-3) 式可写成

$$u = \frac{v_j}{1 + \sqrt{\frac{\rho_t}{\rho_j}}} \quad (6-3-4)$$

这是在定常条件下, 射流速度和侵彻速度之间的关系。将 (6-3-4) 式代入 (6-3-1) 和 (6-3-2) 式, 消去 t 则得:

$$P = l \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (6-3-5)$$

这就是由定常理想不可压缩流体理论导出的破甲深度计算公式。该式表明, 破甲深度 P 与射流长度 l 成正比, 与射流和靶板

密度之比的平方根成正比。此式与某些实验相符合，例如增加炸高时，使射流长度 l 增加，只要射流不断裂和不分散，便能使破甲深度提高。又如，铜罩比铝罩的破甲深度深，这是因为铜罩的射流密度较大；铝靶比钢靶破甲深度大，因为铝靶密度小。公式还表明，破甲深度仅决定于射流的长度和密度以及靶板的密度，而与靶板强度无关，甚至与射流速度无关。这是因为在建立公式时假设靶板是理想流体，不考虑强度，射流有一点速度就能穿孔。这一点与实际情况是不符的。但是就射流头部来说，由于它的速度很高，忽略靶板强度的影响还是可以的。

(6-3-5) 式是假设射流速度不变的条件下得到的。实际上射流速度是变化的，故对它要作修正。

三、金属流破甲的准定常侵彻模型

实际的射流总是头部速度快，尾部速度慢，沿射流长度有速度分布，不具备定常侵彻条件，不能直接应用伯努利公式。但是就一小段射流来看，可以认为速度不变，因此可以应用伯努利公式，这就是准定常条件。

现在应用侵彻深度计算图（图 6-3-2）来研究破甲过程。图中 y 是轴向距离，药型罩的锥底处在 O ， t 是时间，以射流头部到达药柱底部为 0。设射流速度沿长度是线性分布的。在图上是从小点 A 发出的一族直线，每条直线的斜率就是该射流的速度， H 是炸高。射流头部在 B 点与靶板相遇，开始破甲， BC 线是破甲孔随时间加深的曲线，曲线上每一点的斜率就是该点的破甲速度 u 。例如 C 点表示破甲深度是 P ， C 点的切线的斜率是 u ，而 AC 线的斜率是相应的射流速度 v_j ，破甲到 D 点停止，最大破甲深为 P_m 。如果是恒速射流，则破甲速度不变， BC 将是直线，由于射流速度愈来愈慢，因此 BC 是曲线。

对于某一点 C ，破甲深为 P ，破甲时间为 t ，则

$$(t_0 + t - t_s)v_j = P + H - b \quad (6-3-6)$$

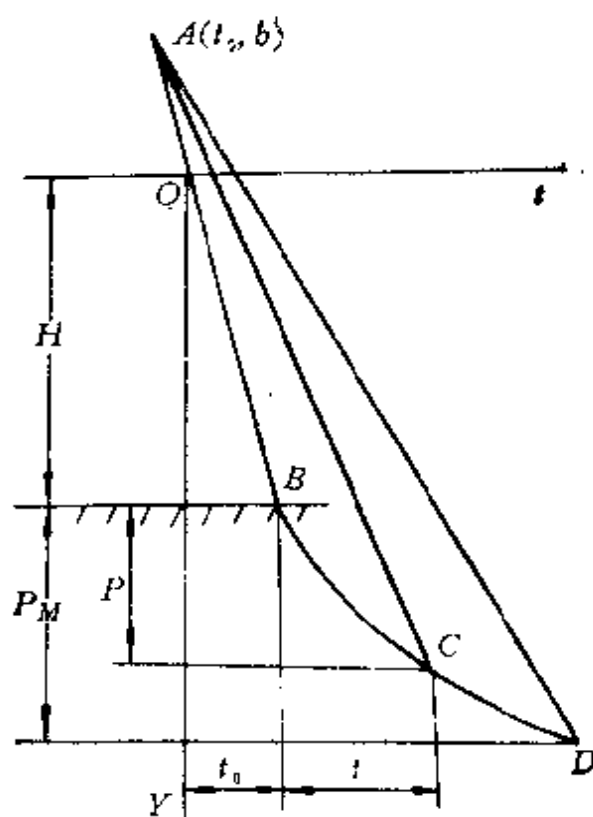


图6-3-2 侵彻深度计算图

对 t 求导, $\frac{dP}{dt} = u$, 则可得

$$v_j + (t_0 + t - t_a) \frac{dv_j}{dt} = u$$

$$\int_{t_0 - t_a}^{t_0 + t - t_a} \frac{dt}{t} = - \int_{v_{j0}}^{v_j} \frac{dv_j}{v_j - u}$$

积分得

$$t = t_a - t_0 + (t_0 - t_a) e^{-\int_{v_{j0}}^{v_j} \frac{dv_j}{v_j - u}} \quad (6-3-7)$$

式中 t_0 是射流头部到达靶板表面的时间。将 (6-3-7) 式代入 (6-3-6) 式得

$$P = (t_0 - t_a) v_j e^{-\int_{v_{j0}}^{v_j} \frac{dv_j}{v_j - u}} - H + b \quad (6-3-8)$$

需有 $v_j - u$ 的关系, 消去积分项中的 u 值, 上式就可解出。对于定常侵彻模型曾有

$$u = \frac{v_j}{1 + \sqrt{\frac{\rho_i}{\rho_j}}}$$

则

$$e^{-\int_{v_{j0}}^{v_j} \frac{dv_j}{v_j - u}} = \left(\frac{v_j}{v_{j0}} \right)^{-1 - \sqrt{\rho_j/\rho_i}}$$

代入 (6-3-8) 式得

$$P = (H - b) \left[\left(\frac{v_{j0}}{v_j} \right)^{\sqrt{\rho_j/\rho_i}} - 1 \right] \quad (6-3-9)$$

这便是准定常理想不可压缩流体的破甲公式。由此式可以看出：

(1) 破甲深度与 $H - b$ 成正比， b 很小时，破甲深度与炸高 H 成正比；

(2) 射流头部速度 v_{j0} 和尾部速度 v_j 的比值愈大， P 愈大；

(3) 射流和靶板的密度比愈大， P 愈大。

四、金属流的伸长及其破甲深度计算

当金属流形成之后，它在空气中作惯性运动。由于运行距离不远，可以忽略空气阻力的作用。金属流从头部至尾部存在着速度梯度，在运行中它将不断地伸长，直至全部消耗为止。金属流伸长到某一定长度后，就由连续状态变为不连续状态，断裂为高速运动的金属颗粒。

假设金属流在最初形成时，它在整个长度上的速度分布为线性分布，如图 6-3-3 所示。图中 v_{jm} 为金属流头部的速度， v_k 为金属流临界速度， v_{jmn} 为金属流尾部速度， $l_0 (= x_m - x_0)$ 为金属流的初始有效长度。

取 v_{ji} 表示金属流某一断面 x 的速度，则

$$v_{ji} = v_k + m(x - x_0) \quad (6-3-10)$$

式中 m 为直线的斜率，且

$$m = \operatorname{tg} \alpha = \frac{v_{jm} - v_k}{x_m - x_0}$$

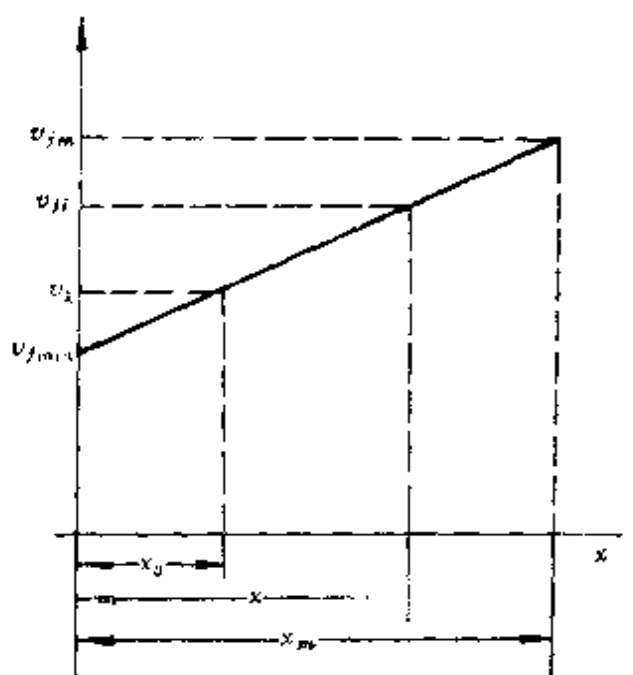


图6-3-3 金属流速度的线性分布

若金属流运行至靶板时它的长度为 l ，所经过的时间间隔为 t ，则

$$l = l_{0i} + (v_i - v_k) t \quad (6-3-11)$$

现在来分析金属流某微元 i 在着靶前的长度 (图 6-3-4)。图中 F 为静止炸高， ΣP_{i-1} 是微元 i 以前所有金属流微元的破甲深度之和。设 i 微元 l_{0i} 从其形成的位置运动到 O 点，所经过的距离为 D_i ，则

$$D_i = (h - \xi_i) + F + \Sigma P_{i-1}$$

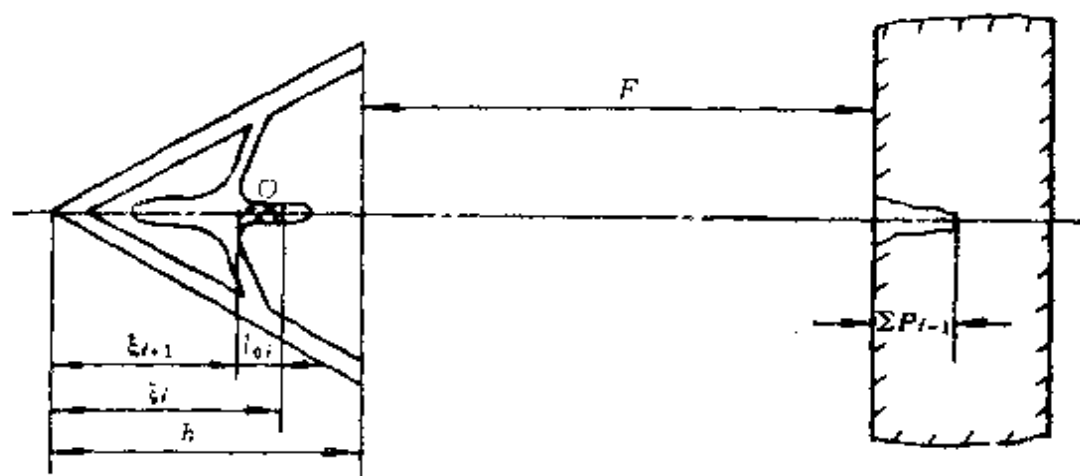


图6-3-4 金属流的伸长和破甲情况

式中 h ——药型罩的高度;

ξ_i ——微元 i 头部至罩顶的距离。

微元 i 头部经过距离 D_i 所需的时间为

$$t_{Di} = \frac{D_i}{v_{ji}} = \frac{h - \xi_i + F + \sum P_{i-1}}{v_{ji}}$$

在此时间内, 微元 i 长度的增量为 $(v_{ji} - v_{ji+1})t_{Di}$ 。设微元 i 破甲前的长度为 l_i , 则

$$l_i = l_{ci} + \left(\frac{v_{ji} - v_{ji+1}}{v_{ji}} \right) (h - \xi_i + F + \sum P_{i-1}) \quad (6-3-12)$$

前面介绍的金属流破甲的侵彻模型, 导出了计算侵彻深度的公式, 在计算时需借助实验确定出公式中的有关参数, 而后计算侵彻深度。但在实际工作中, 当进行破甲弹的初步设计时, 往往需要进行各种方案的比较, 从中选出结构较优的方案。这里介绍一种在初步设计中采用的破甲深度的计算公式。

该计算公式是在定常侵彻模型的基础上进行两方面的修正而得的:

一方面是考虑靶板强度的修正, 当射流速度小于二倍临界速度时, 靶板强度起作用, 故进行强度修正, 即当 $v_j \geq 2v_{jc}$ 时, 侵彻深度用流体公式计算

$$P_i = l_i \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \quad (6-3-13)$$

当 $v_j < 2v_{jc}$ 时, 侵彻深度用考虑强度的经验公式计算

$$P_i = \frac{l_i}{\frac{v_{ji}}{u_i} - 1} \quad (6-3-14)$$

式中

$$u_i = v_{jc} \cdot \bar{u}_i$$

$$\bar{u}_i = \frac{v_{ji} \sqrt{1 - 1/v_{ji}^2}}{\left(1 + \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}} \right) \sqrt{\frac{3}{2}}} \quad (6-3-15)$$

$$\bar{v}_H = \frac{v_H}{v_{js}}$$

其中实际的射流临界速度 v_{js} 对于 45° 钢 约为 2000m/s, 对于均质钢甲约为 2200m/s。

另一方面是考虑射流断裂的修正, 对于紫铜药型罩而言, 认为射流形成后伸长到初始长度的 5 ~ 6 倍就断裂。对于断裂射流的侵彻深度计算要进行修正。

将 (6-3-12) 式代入 (6-3-13) 或 (6-3-14) 式即可求出不修正或修正靶板强度时, 微元 i 的破甲深度。

由图 6-3-4 可以看出, 在一定的炸高下, 当 ΣP_{i-1} 达到某一定值后, 金属流微元由于过分拉长而断裂。断裂后, 射流的密度将减小, 因而将射流密度 ρ_j 乘一个小于 1 的系数 γ , 作为断裂射流的密度, 从而使 (6-3-13) 式和 (6-3-15) 式在断裂射流情况下变为

$$P_i = l_i \sqrt{\frac{\gamma \rho_j}{\rho_i}} \quad (6-3-16)$$

$$\bar{u} = \frac{\bar{v}_H \sqrt{1 - 1/\bar{v}_H}}{\left(1 + \sqrt{\frac{\rho_i}{\gamma \rho_j}}\right) \sqrt{\frac{3}{2}}} \quad (6-3-17)$$

下面介绍计算修正系数 γ 的近似方法。

当射流拉长时, 它的长度增长, 直径相应减小, 以 l_{ci} 表示金属流的临界长度, R_{ci} 表示相应的临界半径。金属流长度超过 l_{ci} 之后, 使断裂成不连续的高速颗粒, 如图 6-3-5 所示。现取 $l_{ci} = \lambda_r l_{0i}$, λ_r 称为金属流的延伸系数。根据实验, 对于中碳钢药型罩, 近似地取 $\lambda_r = 4 \sim 5$; 对于紫铜药型罩, 取 $\lambda_r = 5 \sim 6$ 。

由于 $M_{ji} = \pi R_{ci}^2 \rho_j \lambda_r l_{0i}$, 故

$$R_{ci} = \sqrt{\frac{M_{ji}}{\pi \rho_j \lambda_r l_{0i}}}$$

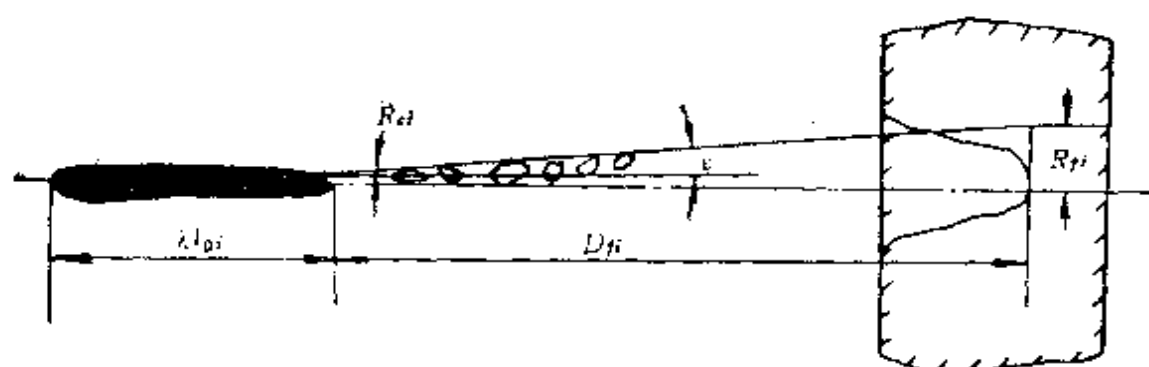


图6-3-5 金属流断裂及其以后的运动

由 (6-2-7) 式知

$$M_{ji} = M_i \sin^2 \frac{\beta_i}{2}$$

代入上式可得

$$R_{ei} = \sqrt{\frac{M_i}{\pi \rho_i \lambda_i l_{0i}}} \sin \frac{\beta_i}{2}$$

金属流断裂成高速颗粒之后，颗粒之间的距离不断增大，同时这些颗粒将偏离轴线，偏离逐渐增大（见图 6-3-5）。以 l_i 与 R_{fi} 表示微元断裂以后直到冲击靶板前的长度和半径，则

$$\pi R_{ei}^2 \rho_i \lambda_i l_{0i} = \pi R_{fi}^2 l_i \gamma \rho_i$$

由此可得

$$\gamma = \left(\frac{R_{ei}}{R_{fi}} \right)^2 \frac{\lambda_i l_{0i}}{l_i} \quad (6-3-18)$$

由式中可以看出，要求出 γ ，必先求出 R_{fi} ，式中其它各值可由前面的关系式求出或选定。下面求 R_{fi} 。

设 F_i 表示药型罩底部至断裂点的距离，微元 i 形成后运动到断裂点，所需的时间为

$$t_{fi} = \frac{F_i + (l_i - \frac{F_i}{\gamma})}{v_i}$$

微元 i 延伸到断裂开始时，其长度的增量为

$$\begin{aligned}\lambda_r l_{0i} - l_{0i} &= l_{0i}(\lambda_r - 1) \\ &= (v_{ji} - v_{ji+1})t_{ji}\end{aligned}$$

将 t_{ji} 代入上式则有

$$F_i + (h - \xi_i) = \frac{v_{ji}}{v_{ji} - v_{ji+1}} (\lambda_r - 1) l_{0i}$$

金属流微元 i 由断裂点运动到着靶前的行程为

$$D_{ji} = F - F_i + \sum P_{i-1} \quad (6-3-19)$$

由 (6-3-12) 式可得

$$F + \sum P_{i-1} = \frac{(l_i - l_{0i})v_{ji}}{v_{ji} - v_{ji+1}} - (h - \xi_i)$$

故

$$D_{ji} = \frac{v_{ji} l_{0i}}{(v_{ji} - v_{ji+1})} \left(\frac{l_i}{l_{0i}} - \lambda_r \right) \quad (6-3-20)$$

为了简化问题, 假定金属流断裂后, 其散布半径按线性规律随距离增大, 从断裂点开始, 高速粒子形成一个 2ε 的圆锥角, 此角称为金属流分散角, 见图 6-3-5。因此

$$R_{ji} = R_{0i} + D_{ji} \operatorname{tg} \varepsilon \quad (6-3-21)$$

将 (6-3-20) 式代入上式则得

$$R_{ji} = R_{0i} + \frac{v_{ji} l_{0i}}{v_{ji} - v_{ji+1}} \left(\frac{l_i}{l_{0i}} - \lambda_r \right) \operatorname{tg} \varepsilon \quad (6-3-22)$$

根据理论计算与实验结果比较, ε 与 F 的关系列于表 6-3-2, F 代表炸高。由炸高 F 用表可查出相应的 ε , 代入 (6-3-22) 式可求出 R_{ji} , 然后用 (6-3-18) 式计算 γ , 有了 γ 和 l_i , 可由 (6-3-13)、(6-3-14) 式求出微元 i 的破甲深度。

表6-3-2 ε 与 F 的关系

F (cm)	0.00	2.54	5.08	7.62	10.16	12.7
ε (°)	0.00	0.02	0.06	0.10	0.14	0.18
F (cm)	15.24	17.78	20.32	22.86	25.4	
ε (°)	0.21	0.23	0.25	0.27	0.29	

综上所述,现将破甲深度的计算步骤归纳如下:

(1) 根据装药结构图,用作图法求出药型罩方向的有效装药量,然后将药型罩划分成若干个(视计算精度而定)等高度的微元,计算各微元的有效装药高度 L_i 及罩厚;

(2) 计算罩各微元的平均压垮角 β_i ,可采用公式(6-2-34);

(3) 计算罩各微元的质量 M_i 和对应的射流质量 M_{ji} ,所采用的射流质量计算公式为(6-2-7)式;

(4) 计算罩各微元的压垮速度 v_{oi} ,所用公式为(6-2-33);

(5) 计算罩各微元的变形角 δ_i 和相应的射流速度 v_{ji} ,所用公式分别为(6-2-23)及(6-2-11);

(6) 计算各射流微元的初始长度 l_{oi} ,可用公式(6-2-40)计算;

(7) 计算破甲前各射流微元的长度 l_i 和破甲深度 P_i ,相应的计算公式分别为(6-3-12)和(6-3-14);

(8) 根据射流各微元的破甲深计算射流的总破甲深。

根据以上步骤,将所用计算公式整理后,可编成计算机程序进行计算。

五、计算破甲深度的经验公式

上述基于破甲理论的计算方法,不仅繁琐复杂,而且计算结果不精确。因此,在设计中采用简便的经验算法有其一定的实用意义。这里介绍几个典型的经验公式,作为结构设计中初步估算破甲威力之用。

1. 根据现有制式装药结构总结的经验公式:

这个经验公式是在定常流破甲理论基础上,根据制式装药结构的试验数据归纳整理而成的静破甲深度公式,破甲深度为

$$P_y = \eta (-23.18\alpha^2 + 33.98\alpha + 0.475 \times 10^{-10} \rho_0 D^2 - 9.84) l_M \quad (6-3-23)$$

$$\bar{P}_s = \eta (0.3874\alpha^2 + 6.073\alpha + 0.25 \times 10^{-10} \rho_0 D^2 - 0.50) l_M \quad (6-3-24)$$

式中 $\bar{P}_y$ ——有隔板的静破甲平均深度 (m);
 $\bar{P}_w$ ——无隔板的静破甲平均深度 (m);
 α ——药型罩的半锥角 (rad);
 l_k ——药型罩的母线长 (m);
 ρ_0 ——装药密度 (kg/m^3);
 D ——装药的爆速 (m/s);
 η ——考虑药型罩材料、加工方法及靶板材料对破甲的影响系数 (表 6-3-3)。

表 6-3-3 η 表

药型罩	紫铜冲压		钢冲压	铝车制
靶板	碳钢	装甲钢	装甲钢	装甲钢
η	1.1	0.97~1.02	0.77~0.79	0.4~0.49

2. 其它经验公式

根据现有一些装药结构进行分析, 总结了一些经验, 归纳为以下一些经验公式:

$$\bar{P} \approx (5.0 \sim 6.5) d_k (\text{m}) \quad (6-3-25)$$

$$\bar{P} \approx (0.7 \sim 1.0) M_w (\text{m}) \quad (6-3-26)$$

$$\bar{P} \approx 3 M_k (\text{m}) \quad (6-3-27)$$

式中 d_k ——药型罩口部内直径 (m);
 M_w ——装药质量 (kg), 对柱状装药结构 $\bar{P}$ 取下限, 对收敛形装药结构则取上限;
 M_k ——药型罩质量 (kg)。

第四节 影响破甲效应的因素

为了有效地摧毁装甲目标, 要求聚能装药具有良好的破甲效应, 它是聚能装药对目标作用的最终效果, 其中包括破甲深度、

后效作用及射流破甲的稳定性等。后效作用是指金属流穿透装甲目标后，破坏装甲目标后面的人员及器材装置的能力；破甲的稳定性主要是指穿深的跳动量(即最大穿深与最小穿深之差)，一般在要求的穿深指标下，穿深的跳动量越小越好。

影响破甲效应的因素是一个复杂的问题，它不仅涉及到各个因素本身，例如所采用的药型罩、装药、弹丸结构、靶板等都对破甲效应产生影响，而且还受各种因素的综合影响。下面对上述各个因素进行分析。

一、药型罩

药型罩是形成射流的主要零件，罩的结构、材料、及加工方法直接影响射流质量的优劣，从而影响破甲效应。下面来分析药型罩对破甲效应有影响的各个因素。

1. 药型罩形状

常用的药型罩形状有锥形、喇叭形、半球形三种，此外，还有几种改进型的药型罩，例如双锥罩、曲线组合罩和筒形药型罩等。

我们知道，破甲深度与射流的有效长度成正比，在射流刚形成时，其长度约与罩母线长度相等，故射流的初始有效长度取决于罩母线长度。在罩底直径相同的情况下，喇叭形罩母线最长，锥形次之，半球形最短。喇叭形罩的射流头部速度最高，锥形次之，半球形最小。喇叭形罩实际上是一个变锥角的药型罩，顶部锥角小，底部锥角大，如图 6-4-1 所示。它有利于提高射流头部

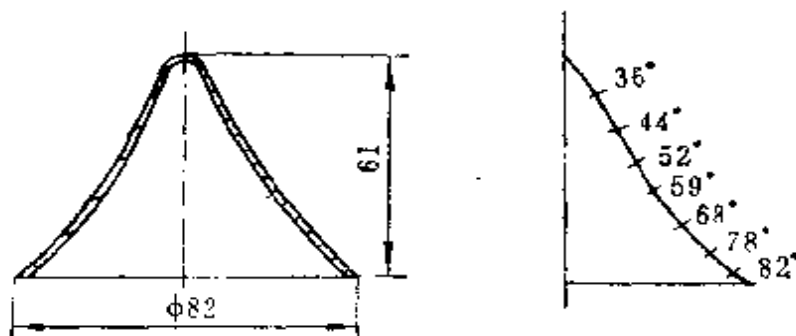


图6-4-1 喇叭形罩

速度，增加射流速度梯度，便于射流拉长。所以，从理论上分析，喇叭形罩破甲深度最大，锥形次之，半球形最小。各种罩的破甲实验数据见表 6-4-1。实际使用中发现喇叭形药型罩破甲深度的增加很有限，且破甲的稳定性较差，罩的加工工艺也较复杂，故一般较少使用。

表 6-4-1 三种形状药型罩的破甲数据

实验条件：紫铜药型罩、装药为黑梯-60、中碳钢靶板			
罩形状	喇叭形	锥形	半球形
药型罩口部内径 (mm)	46.2	47	44
炸高 (mm)	100	112	120
破甲平均深 (mm)	220	185	125

由于喇叭形药型罩可增加装药量，因而射流速度较大，加之其速度梯度也大，旋转时离心力的影响会小一些，所以有些旋转稳定的破甲弹采用喇叭形药型罩，以减小旋转对破甲的影响。

目前最常用的是锥形药型罩。它不仅可以满足威力要求，而且工艺简单，故无论是单兵用的还是炮兵用的破甲弹，一般均采用锥形罩。

半球罩和锥形罩相比，形成的射流速度低，头部速度约为 4000 m/s ，射流粗而短，因而破甲深度浅，但其穿孔直径较大，故一般多用于大口径弹药中。

采用双锥罩是为了调整罩中各微元的射流速度和质量分布，以提高罩各部分的破甲效率，弥补单锥罩的不足。目前，国内外所采用的双锥罩，一般顶部为小锥角，底部为大锥角。例如顶部为 30° ，底部为 60° ，如图 6-4-2 所示，在相同口径下，双锥罩的母线较单锥罩的长些，炸药装药量也增加，且小锥角部位能提高射流头部速度，有利于开坑和增加穿深；大锥角部位的射流较粗，有利于后续侵彻和提高后效。

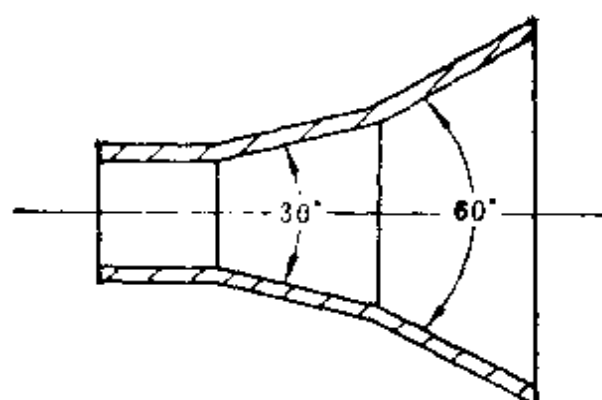


图6-4-2 双锥罩

2. 药型罩的锥角

根据前述的定常理论，射流的速度和质量分别为

$$v_j = \frac{1}{\sin \frac{\beta}{2}} v_0 \cos \left(\frac{\beta}{2} - \alpha - \delta \right)$$

$$M_j = M \sin^2 \frac{\beta}{2}$$

为了分析问题方便，假设炸药为瞬时爆轰，并且药型罩壁面同时平行地向轴线闭合，这时可得 $\alpha = \beta$ ， $\delta = 0$ ，因而有

$$v_j = v_0 \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}$$

$$M_j = M \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

由以上化简后公式可以看出，射流速度随药型罩锥角减小而增加，射流质量随药型罩锥角减小而减小。表 6-4-2 给出了不同锥角药型罩的破甲试验结果。试验条件为：装药黑梯 50/50，直径 38mm，密度 1.6g/cm^3 ，紫铜罩，壁厚 1 mm，罩底直径 30mm，随锥角不同，有不同的药型罩高度和装药高度。

表6-4-2 不同锥角药型罩试验结果

罩锥角	装药尺寸 (mm)		炸高 (mm)	射流头 部速度 (m/s)	破甲深度 (mm)			试验发数
	罩高	药高			平均	最大	最小	
0°	75	115		14000				
30°	47	96	40	7800	132	155	104	12
40°	36	93	50	7000	129	140	119	5
50°	29	91	60	6200	123	135	114	7
60°	24	90	60	6100	120	127	106	7
70°	24	88	60	5700	121	124	113	7

从表 6-4-2 中看出, 当药型罩锥角在 $30^\circ \sim 70^\circ$ 之间时, 射流具有足够的质量和速度。大锥角时射流头部速度较低, 而射流质量较大, 且速度梯度较小, 使得射流短而粗。在这种情况下, 破甲深度下降, 而破孔直径增加, 后效作用增强, 破甲稳定性较好; 小锥角时, 射流头部速度较高, 而射流质量较小, 但速度梯度较高, 使得射流细而长, 破甲深度增加, 而破孔直径减小。当药型罩锥角小于 30° 时, 破甲性能很不稳定。 0° 时则为筒形罩, 这种罩所形成的射流速度很高, 无速度梯度。在国外这种罩用于分离式空心装药中, 如图 6-4-3 所示。

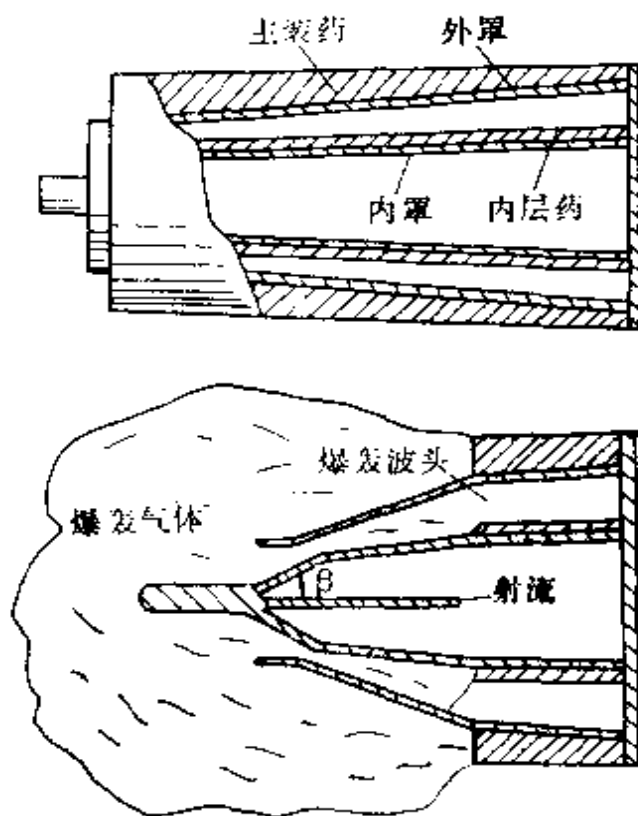


图6-4-3 分离式空心装药及其作用过程

分离式空心装药是为了提高小口径破甲弹的威力, 解决已定口径下增大药型罩长度以提高射流长度而设计的一种新型聚能装药结构。这种装药由内、外两个药型罩和两层装药组成(图6-4-3)。

外药型罩作为驱动体，内药型罩形成射流。内外药型罩可以选用筒形、钟形或小锥形（例如外药型罩壁面与其轴线夹角为 10° 左右，内药型罩壁面与其轴线夹角为 7° 左右）。装药（普通炸药）起爆后，爆轰以其爆速（如 8000m/s ）由后向前传播，主装药（外层炸药）的能量传递给外药型罩，整个传递过程也是由后向前依次进行的，这种剧烈的爆轰过程驱动外药型罩和内药型罩向轴线运动。外药型罩在由内层炸药产生的气体中爆聚。这种爆聚通过气体传递了冲击，并加速了内药型罩向轴线上的运动。由于分配在外药型罩上的炸药比分配在内药型罩上的炸药厚，因此，外药型罩向内压垮的初速要比内药型罩的大，结果外药型罩追上内药型罩的相应部分并发生碰撞。整个压垮过程迅速猛烈，使内药型罩形成长而高速的射流和杵体。

药型罩锥角大于 70° 之后，金属流形成过程发生新的变化，破甲深度迅速下降。药型罩锥角达到 90° 以上时，药型罩在变形过程中产生翻转现象，出现反射流，药型罩主体变成翻转的高速弹丸，速度约为 $2000\sim 4000\text{m/s}$ 左右，其破甲深度很小，但孔径很大，这种结构用来侵彻薄装甲效果很好，例如舰艇的装甲。

破甲弹药型罩锥角通常在 $35^\circ\sim 60^\circ$ 之间选取，对于中、小口径弹丸以选取 $35^\circ\sim 44^\circ$ 为宜。采用隔板时锥角宜大些，不采用隔板时，锥角宜小些。

3. 药型罩壁厚及壁厚变化率

药型罩的最佳壁厚 b 随药型罩的材料、锥角、直径和炸药种类、装药形状，以及弹壳外形、炸高等而变，其中弹壳和锥角是主要影响因素。总的来说，药型罩最佳壁厚随罩材料的密度的减小而增加，随罩锥角的增大而增加，随罩底直径的增加而增加，随外壳的加厚而增加。

研究表明，药型罩最佳壁厚与罩半锥角的正弦成比例。但是，在锥角小于 45° 时，这个比例略大一些；大于 45° 时，这个比例略小些。

图 6-4-4 是直径为 41.36mm 的装药，在有、无外药

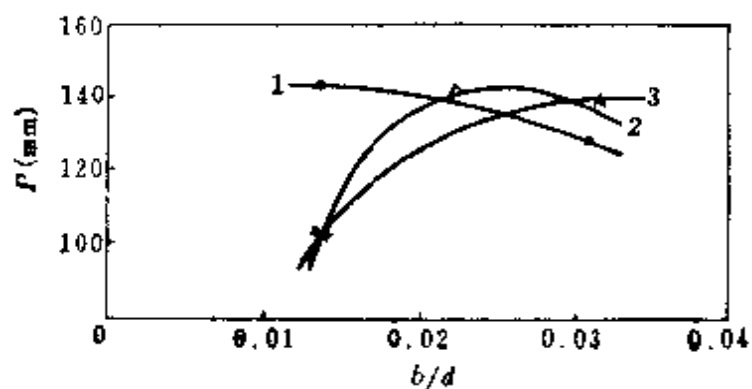


图6-4-4 外壳对药型罩最佳厚度的影响

1—无外壳；2—外壳厚1.54mm；
3—外壳厚4.72mm； d —锥底直径。

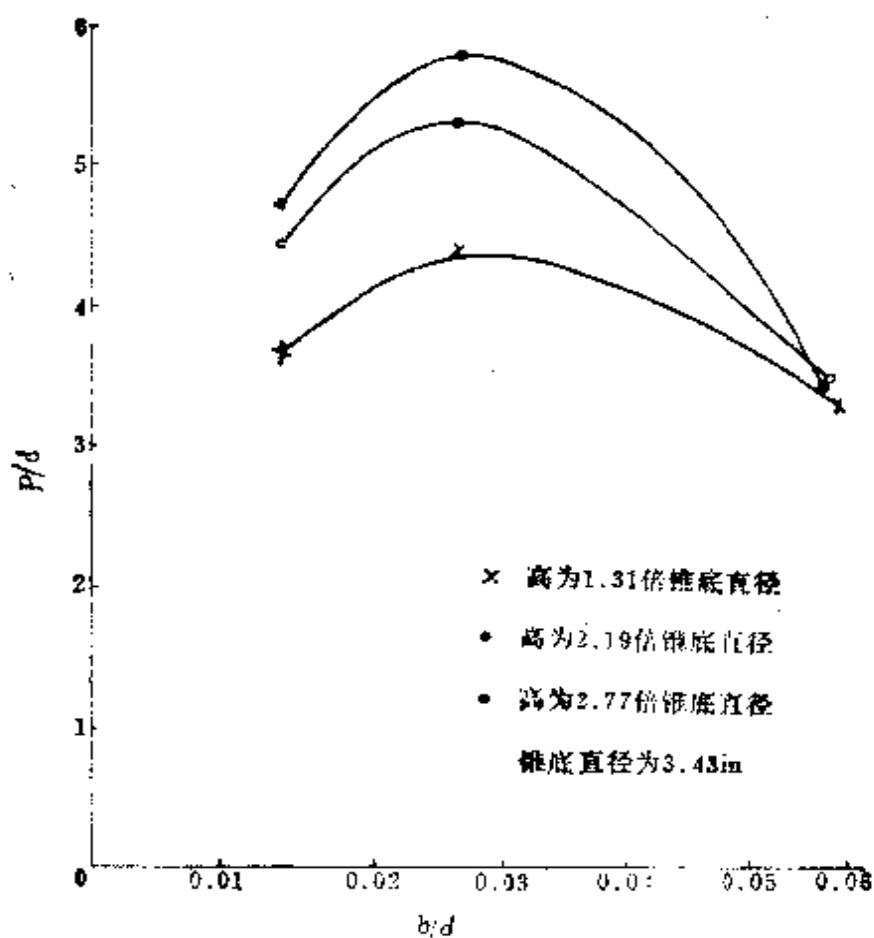


图6-4-5 穿深与罩壁厚度的关系

不同时的试验结果。由图可以看出,当药柱有外壳时,药型罩最佳厚度增加,并且随着外壳的加厚,应当采用稍厚的药型罩。

图 6-4-5 示出了国外有关不同罩厚下的破甲深度试验曲线,试验是用 45° 的铜锥罩进行的。由图可知,在相同的条件下,不同的炸高对应着不同的最佳罩壁厚度。

当爆轰产物的冲量足够大时,增加药型罩的壁厚 b , 对提高破甲威力有利。因为在这种情况下,参加射流的金属多了,也就是射流的质量 M_j 提高了,但壁厚也不能太大,因壁厚 b 太大,将使压垮速度 v_0 变小,也可能因 b 太大而将罩炸坏形成破片,影响射流的正常形成。但 b 也不能太薄,太薄使得 M_j 减小,也可能不能形成正常的射流。目前在炮兵弹药中,通常按 $b = (0.02 \sim 0.03)d_k$ 选取,其中 d_k 为药型罩底部的内径。

为了改善射流性能,提高破甲效应,通常采用变壁厚的药型罩。这就有一个最佳壁厚变化率的问题。壁厚变化率 Δ 是指药型罩在单位母线长度上壁厚的差值,如图 6-4-6 所示: $\Delta =$

$$\frac{b_{i+1} - b_i}{\Delta l_i}.$$

在实际使用中,采用

两种变壁厚药型罩,一种是顶部薄、底部厚的药型罩;另一种是顶部厚、底部薄的药型罩,图 6-4-7 是壁厚变化对破甲效应影响的试验结果。试验采用的是钢质药型罩,外锥角 45° ,罩底直径为 111mm,炸高为 152mm,其它尺寸如图所示。从试验中看出,采用顶部薄、底部厚的药型罩,只要变化适当(如图 6-4-7 c),穿孔进口变小,随之出现“鼓肚”,且收敛缓慢,能够提高破甲效应。但如壁厚变化不当,则降低破甲深度。采用顶部厚、底部薄的药型罩,穿孔浅而且成喇叭形。

顶部薄底部厚的变壁厚药型罩能提高破甲深度的原因主要在

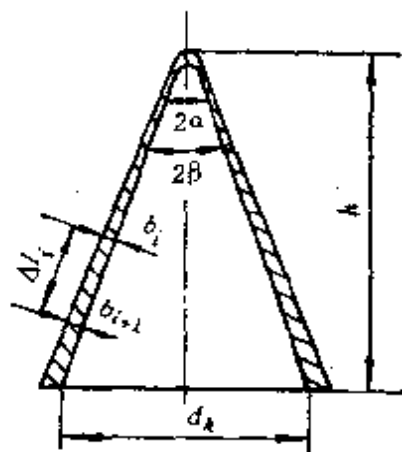


图 6-4-6 药型罩的尺寸

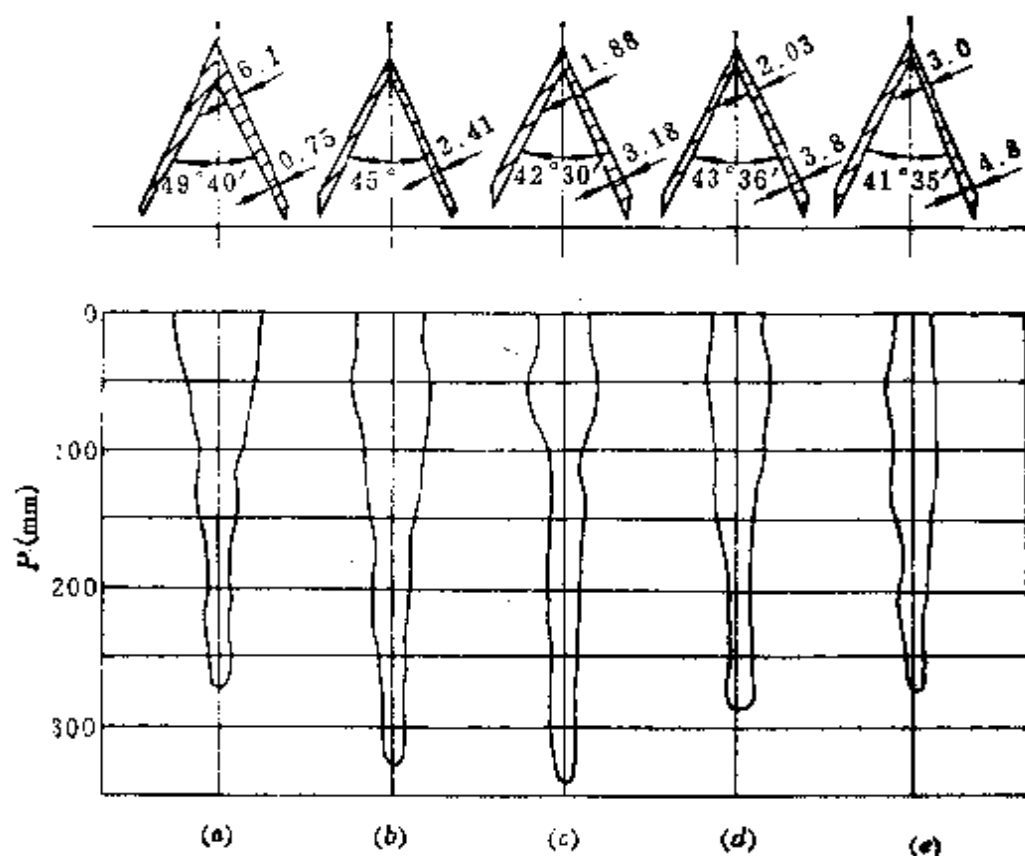


图6-4-7 各种变壁厚药型罩的破甲孔形

a—956 g (药型罩质量, 下同); b—447 g;

c—552 g; d—647 g; e—880 g。

于, 沿罩母线方向之罩微元质量 M_i 是增加的, 而从罩顶到罩底 M_i/M_i 逐渐减小, 因而使压垮速度 v_0 不断减小, 从而增大了射流的速度梯度, 使射流充分拉长, 使破甲深度增加。当然, 对于小锥角而言, 因其速度梯度原来就较大, 射流已经够细了, 故壁厚变化率可取小一些。否则, 射流容易过早拉断或稳定性不好, 影响破甲。对大锥角罩来说, 壁厚变化率可取大一些, 使其在低炸高情况下, 射流得到充分拉长, 保证破甲威力。目前, 从破甲弹的药型罩统计情况来看, 大致可归纳为:

$$2\alpha \leq 50^\circ \quad \Delta \leq 1.0\%$$

$$2\alpha \leq 60^\circ \quad \Delta \approx 1.1 \sim 1.2\%$$

4. 药型罩材料

从破甲理论知道, 破甲深度与射流长度、射流密度的平方根成正比。因此, 就要求药型罩材料的塑性好、密度大。同时, 为

了使射流形成过程中的相对流动为亚音速，即相对速度 v_2 (图 6-2-1 c) 不大于材料的音速，以保证射流的形成，这样就不应选取音速过低的材料作为药型罩材料。此外，还应保证形成过程中射流不汽化。

表 6-4-3 为不同材料药型罩的破甲数据。试验条件为：装药直径 36mm，黑梯 50/50 炸药，药量为 100 g，密度为 1.6g/cm^3 ，罩锥角为 40° ，罩壁厚为 1 mm，罩底直径为 30mm，炸高为 60mm。从试验结果看出，紫铜的密度较高，塑性好，破甲效果最好；生铁虽然在通常条件下是脆性的，但在高速、高压的条件下却具有良好的可塑性，所以破甲效果也相当好；铝虽然延展性好，但密度太低；铅虽然延展性好，密度又高，但它的熔点和沸点都很低，在形成射流过程中易于汽化，故铝罩和铅罩的破甲效应均不好。

表 6-4-3 不同材料药型罩的破甲试验

罩材料	破甲深度 (mm)			试验发数
	平均	最大	最小	
紫铜	123	140	103	23
生铁	111	121	98	4
钢	103	113	96	5
铝	72	73	70	5
锌	79	93	60	6
铅	91	/	/	/

表 6-4-4 为粉末冶金罩的破甲试验。试验条件为带隔板的黑梯 50/50 装药，主药柱 125 g，副药柱 42 g，药型罩锥角 45° ，罩底直径 50mm，炸高 100mm。试验表明，粉末冶金罩的破甲深度比同种材料的车削药型罩的浅，但它不形成杵体。此外，铁基粉末冶金罩形成射流时，还伴随有强烈的火花，有一定的燃烧效应。

表6-4-4 粉末冶金罩的破甲试验

罩材料	破甲深度 (mm)	试验发数
车制紫铜罩	200	3
铜粉末冶金罩	180	1
铁粉末冶金罩	128	8

为了在形成过程中射流不汽化,低熔点、低沸点、低蒸发点的金属不宜选作药型罩材料。但在双金属面药型罩中,内层用铜,可以产生密实而拉长的侵彻射流,外层用蒸发点低的金属如锌、铅和铝等,这样产生的杵体可迅速蒸发消失。试验表明,双金属间的粘结强度不够,装药爆炸后会使层间分离,影响射流的形成,致使双金属面药型罩与铜药型罩相比,破甲深度明显下降。

5. 药型罩的加工方法及加工精度

目前药型罩所用的加工方法有旋压、冲压和车削以及电解加工等。车削药型罩的金属利用率低,生产效率不高,同一批或批与批之间的一致性差,易造成破甲深度的跳动;冲压加工的药型罩,其金属利用率与生产效率均较高,结构尺寸由模具保证,易于一致;旋压加工的药型罩,不仅具有冲压加工的优点,且具有旋转补偿能力,可有效地克服转速对侵彻带来的不利影响,从而提高旋转破甲弹的侵彻深度。电解加工药型罩是近几年来发展的一种新工艺。

加工精度的影响主要指药型罩几何尺寸误差给破甲带来的影响。采用冲压工艺时,几何形状和尺寸由模具保证,但加工过程中不可避免的是易出现壁厚差,由于壁厚差的存在,药型罩的对称性就差,易造成射流扭曲,使其稳定性能变坏,而影响破甲效应。试验表明,壁厚差 $\leq 0.1\text{mm}$,对破甲影响不大。在车削加工时,罩的壁厚差一般为 $0.03\sim 0.05\text{mm}$;旋压加工时,壁厚差可控制在 $0.02\sim 0.04$ 的范围内。另外,罩顶部的壁厚差的影响大,因此必须严格控制罩顶部壁厚差。

在加工过程中要注意热处理(退火)、酸洗、校形等工序。退火次数不宜过多,否则影响材料结构,退火温度和时间要适宜,一般取铜的最低再结晶温度为宜,以保证成品罩的良好塑性;酸洗过度易造成罩表面严重侵蚀,并使罩的质量减轻;校形不当会造成较大的壁厚差。

二、装药

破甲弹的爆炸装药是压缩药型罩使之闭合形成射流的能源。因此,装药结构的好坏及所用炸药的性能,对破甲效应的影响很大。

1. 炸药性能和密度

聚能效应属于炸药的直接接触爆炸作用范围,故效果的好坏取决于所选炸药的猛度,即爆轰产物压力冲量大小及其对罩的作用。理论分析和实验研究都表明,炸药影响破甲威力的主要因素是爆轰压力。

国外有人曾做过不同炸药的破甲威力试验,试验条件为:药柱的直径为48mm,长度为140mm;钢制药型罩,锥角 44° ,底径为41mm,炸高为50mm。试验结果如表6-4-5所示。

表6-4-5 炸药性能对破甲效应的影响

炸 药	密度 (g/cm^3)	爆速 (m/s)	爆轰压力 (MPa)	破甲深 (mm)
B炸药(60黑索金,40梯恩梯)	1.71	7880	23200	144
B炸药50,梯恩梯50	1.646	7440	19400	140
乙烯二硝酸50,梯恩梯50	1.53	7180	17000	127
梯恩梯	1.591	6910	15200	124
黑索金	1.126	6530	12300	114
乙烯二硝酸	1.048	6070	9500	107
特屈儿	1.051	5760	8400	81

由表6-4-5中可以看出,随着爆轰压力的增加,破甲深度增加。这是由于爆轰产物作用在药型罩上的压力大,使罩的压垮速度大,因而射流的速度高,提高了破甲能力。

根据爆轰理论, 炸药的爆轰压力 p 可表示为装药密度 ρ_0 和炸药爆速 D 的函数, 即

$$p = \frac{1}{4} \rho_0 D^2$$

所以装药的密度和所选炸药的爆速直接影响破甲效应。而对于同种炸药来说, 爆速又随密度的增加而增大。在同样条件下, 用密度不同的同一种炸药进行实验, 得到如表 6-4-6 的结果。

表 6-4-6 装药密度对破甲效应的影响

炸药	ρ_0 (g/cm ³)	D (m/s)	P (MPa)	破甲深度 (mm)	破孔体积 (cm ³)
TNT	1.591	6910	15200	124	19.2
TNT	0.812	4400	3600	46	2.1

表 6-4-6 可以说明, 装药密度对射流破甲能力的影响是很大的。因此, 为了提高破甲威力, 聚能装药应尽量选用高爆速的炸药。当炸药选定后, 应尽可能地提高装药密度。

对于带隔板的装药, 一般采用主、副药柱的结构形式, 这时主药柱的密度可尽量高一些, 副药柱的密度最好与引信的起爆能量配合好, 可以小一些。这样, 副药柱比较容易起爆, 使副药柱及主药柱能迅速达到稳定爆轰, 以保证破甲威力与稳定性。

2. 装药尺寸、形状

装药的尺寸和形状, 主要是指药柱的高度、罩顶药高和收敛角等。

药柱高度主要根据作用在药型罩上的有效装药量来确定。也就是说, 要保证获得最大有效装药(见图 6-4-8)。一般药型罩底部外径接近装药直径, 瞬时爆轰后, 产物同时以同样的速度向各方向飞散, 产物中的膨胀波同时以同样速度从药柱表面向轴心传播。这样就可以绘出作用在药型罩上的有效装药。图中 ce 、 de 、 ae 及 be 的直线段, 均为各顶角的等分角线, 它们是膨胀波的交

界面。由图中可以看出，当药柱高 $H_w = h_s + 2r$ 时，作用在药型罩上的有效装药量最大。如再增大药柱高度，作用在药型罩上的有效装药量并不增加，只能增大侧向飞散。目前，对无隔板的装药结构，药柱高度一般为 $H_w = h_s + r$ ，有的甚至比这个数值还小。因为稍降低一点装药高度，药量可以减少很多，但有效装药量减少不多，而药柱高度小了，对缩短弹丸的长度、减小弹丸质量均有好处。有隔板的装药结构如图 6-4-9 所示，药柱高度 H_w 一般小于 $3r$ 。从隔板到罩顶的距离称为罩顶药高，图 6-4-9 中用 h 表示。由于爆轰通过隔板后有一个冲击加热—引爆—爆轰稳定的过程，即在隔板前药柱有一个起爆深入距离和起爆延滞时间，此距离和时间随隔板厚度的增加而增加。故采用隔板之后，隔板

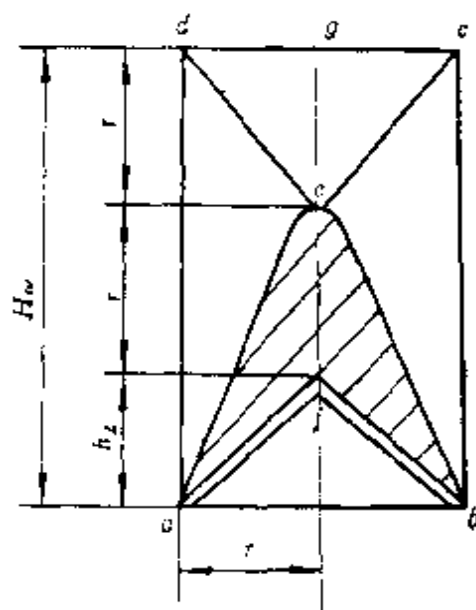


图 6-4-8 作用在药型罩上的有效装药

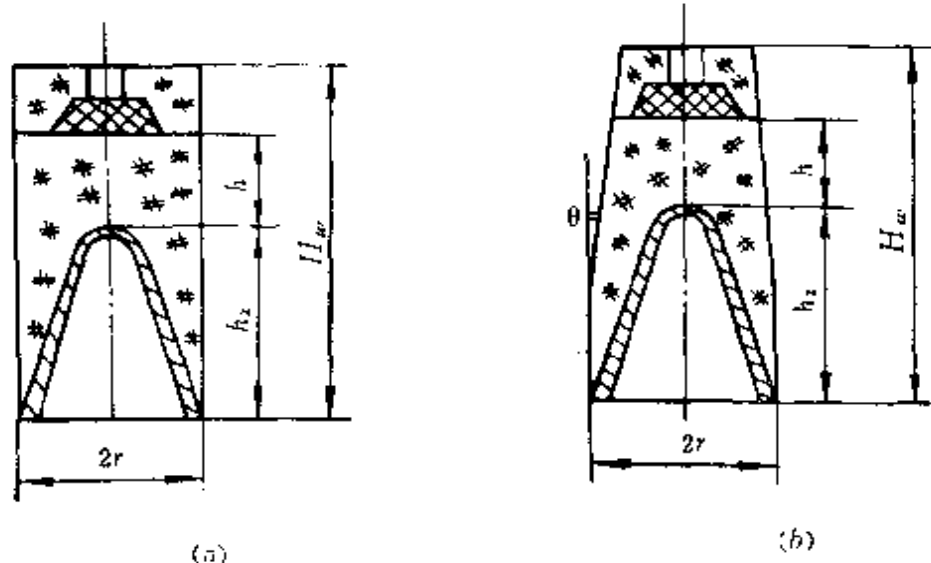


图 6-4-9 装药的结构形状

(a) 柱形装药，(b) 收敛形装药。

至罩顶间的装药高度对破甲效果影响很大。

装药形状目前有柱形和收敛形两种，如图6-4-9。装药形状应根据弹的结构与有效装药来考虑。收敛形装药如图6-4-9(b)所示，这种形状的装药可减少装药质量，而有效装药量比柱形装药的减少不多，故两者的破甲能力几乎相同。装药质量减少，可使弹丸质量减少，对提高初速有利。但药柱的收敛角 θ 不能过大，否则会使有效装药量减少太多，而降低破甲威力。 θ 一般取 $10^\circ \sim 12^\circ$ 。采用圆柱形装药结构，弹丸质量增加了一些，但有效装药量也适当增加了，有利于破甲，而更主要的是使弹的结构简化，有利于生产。

3. 装药工艺

对聚能装药来说，除上面所介绍的那些因素对破甲有影响外，生产过程药柱的质量、与罩的结合、药柱的装配等也影响破甲效应，易出现破甲能力的跳动。

对铸装装药而言，应保证装药质量均匀，无缩孔等。由于铸装药易产生疵病，故在同样的条件下与压装药相比，其破甲跳动量大一些，破甲威力也稍差一些。

对压装装药来说，如果主、副药柱是分开压制然后合装入弹体的话，应保证主、副药柱的同轴性。药型罩与装药要贴紧，压药密度应均匀，如果是带罩压药的话，还应保证装药与药型罩的同轴性，且不能使药型罩在压药过程中有较大的变形，以免降低威力和引起破甲的不稳定。如果是弹体直接压药的话，应保证隔板的位置及药型罩、装药的同轴性。

三、弹丸的结构

这里主要是讨论弹丸的结构对破甲的影响，以便在设计破甲弹时能更全面地考虑分析问题。

1. 旋转运动

为了提高弹丸的射击精度，尾翼稳定的破甲弹在飞行中一般都低速旋转，这样，可使弹丸的气动力偏心或增程弹的推力偏心

影响小些。旋转稳定的弹丸，一般装药也随之旋转，在这种情况下破甲效应将受到很大影响。这一方面是由于旋转运动破坏金属流的正常形成；另一方面在离心力的作用下，使射流径向分散，横截面增大，中心变空，致使穿孔不在一条轴线上。这种现象随转速的增加而加剧。

转速对破甲性能的影响随装药直径的增大而加剧，这主要是由于在大口径时，射流的转速增大。

另外，旋转对破甲的影响，还随炸高的增加而增大。表6-4-7示出了炸高对旋转装药破甲效应影响的试验结果。由表看出，当小炸高时，由于射流没有充分拉长，加之旋转运动的影响，破甲深度就较浅。当炸高增加时，射流得到进一步拉伸，故在同样转速的影响下，破甲深度比小炸高时的要深，但随着炸高的增加，平均穿深下降较多。

表6-4-7 炸高对旋转装药破甲作用的影响

破甲深度 (mm)	炸 高 (mm)			
	10	40	76	152
旋转速度				
$n = 0$	100	132	—	120
$n = 20000 (r/min)$	70	90	70	40

聚能装药具有旋转运动时，有利炸高比无旋转运动时要小，而且随转速的增加，其有利炸高变得更短。

此外，旋转运动对破甲性能的影响还随药型罩锥角的减小而增加，表6-4-8给出了不同锥角对破甲性能的影响。

为了克服旋转运动对破甲的不利影响，国内外曾进行过许多研究，提出了一些措施，目前采用的有：旋压药型罩、错位药型罩、外壳旋转而装药微旋的弹丸结构，以及滑动弹带结构等。其中以近年来发现的旋压成型的药型罩使用起来最为简便。由于旋压药型罩在成形过程中，晶粒产生某个方向的扭曲，即织构的不

表6-4-8 药型罩锥角对旋转装药破甲的影响

药型罩参数			破甲深度 (mm)		旋转对破甲 效率降低 (%)
形状	2α	罩底直径 (mm)	$n = 0$	$n = 20000$	
锥形	27°	56	205 ± 5	82 ± 2	60
锥形	35°	56	160 ± 5	86 ± 8	46
锥形	60°	56	130 ± 5	90 ± 5	32

对称性，药型罩在压合时会产生沿扭曲方向的压合分速度，致使药型罩微元所形成的射流不是在对称轴上汇合，而是在以对称轴为中心的圆周上汇合，从而使射流具有一定的自旋转速，在这种情况下，如果射流的自旋转速与弹丸所具有的转速方向相反，则可抵消一部分弹丸旋转运动给侵彻带来的不利影响，从而起到“抗旋”的作用(图6-4-10)。

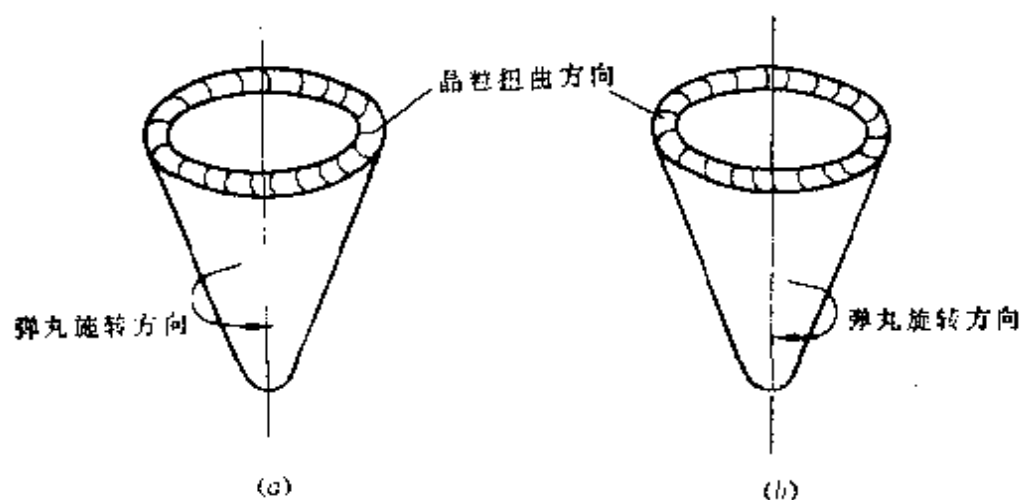


图6-4-10 旋压成型药型罩抗旋作用示意图

(a) 破甲效果好；(b) 破甲效果差。

旋压成型药型罩破甲试验结果见图6-4-11。由图中可以看出，旋压药型罩的“抗旋”作用是很明显的，在弹丸一定转速情况下，破甲深度不仅没有降低反而有所提高，而当弹丸不旋转时，破甲深度反比某些转速下的要低，这不仅说明旋压罩有“抗旋”作

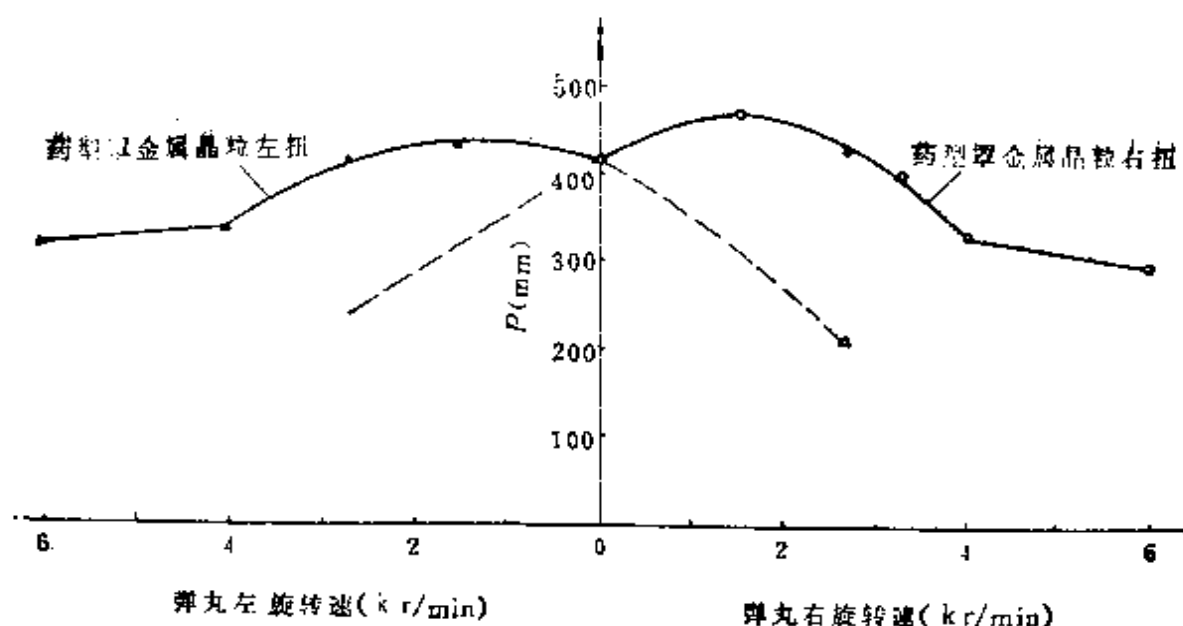


图6-4-11 旋压成型药型罩的转速和破甲深度的关系曲线

用，而且也证明旋压罩所形成的射流具有一定的自旋转速。

由于旋压成形工艺简单，加工出的罩子壁厚差小，故破甲跳动力也小，因此，它是一种“抗旋”的好方法。

错位“抗旋”罩的作用是使形成的射流获得与弹丸转向相反的旋转运动，以抵消弹丸旋转对金属流产生的离心作用。错位式抗旋药型罩的形状是由若干个同样的扇形体组成，每个扇形体的圆心都不在轴线上，而是偏一个距离，在一个半径不大的圆周上，当爆轰压力作用在药型罩壁面上时，扇形体在此圆周上压合，由于偏心作用而引起旋转运动，其它扇形体也是如此，从而获得一个具有旋转运动的金属流，如图6-4-12。以减小弹丸旋转运动对破甲效应的影响。

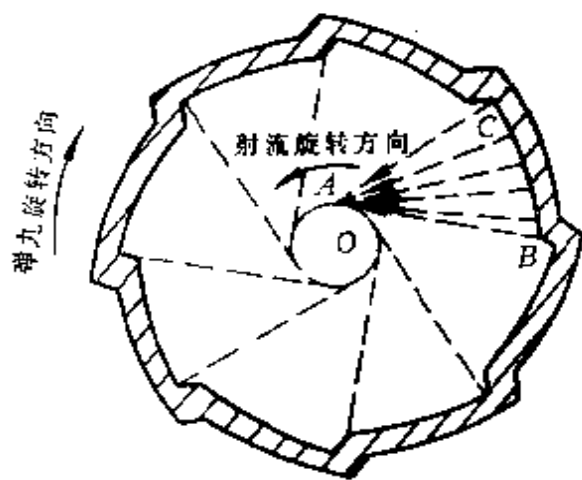


图6-4-12 扇形错位药型罩

2. 壳体

在研制破甲弹的过程中，经常以光药柱进行静破甲试验，这样就出现了带壳药柱与光药柱破甲深度有差别的问题，尤其是经常出现带壳药柱比光药柱破甲深度低的情况。表 6-4-9 列出了某产品的破甲试验结果。试验采用圆柱形药柱，圆台形隔板，主药柱 312 g，副药柱 110 g，药柱直径 62mm，隔板材料为夹布胶木，壳体厚度 3 ~ 4 mm。

表 6-4-9 一种典型结构的破甲弹装药

壳体不同时的破甲试验

序号	壳体情况	隔板尺寸直径 × 厚度 (mm)	平均破甲深度 (mm)	破甲降低率 (与无壳体的相比)
1	无壳体	($\phi 22 \sim \phi 58$) $\times 17$	455	
2	全壳体	($\phi 22 \sim \phi 58$) $\times 17$	282	38 %
3	壳体中去除弹底	($\phi 22 \sim \phi 58$) $\times 17$	440	3 %
4	壳体中去除副 药柱周围部分	($\phi 22 \sim \phi 58$) $\times 17$	436	4 %
5	全壳体	($\phi 21 \sim \phi 54$) $\times 17$	387	16 %

从试验中看出，有壳体的和无壳体的相比，破甲效应有很大差别，此差别主要是由弹底和副药柱周围部分的壳体所造成的，在同样条件下，如果减小隔板的直径和厚度，则可降低壳体的影响。

壳体通过对爆轰波形的影响而产生对破甲效果的影响。用光药柱时，通过试验使爆轰波形与药型罩的压合得到很好的配合，能够保证隔板前的中心爆轰波与通过隔板周围的侧向爆轰波同时到达罩顶部，致使罩顶各部分受载平衡。当增加壳体后，由于爆轰波在壳体壁面上发生反射，并且稀疏波进入推迟，从而使靠近壳体壁面附近爆轰能量得到加强，这样就加强了侧向爆轰波的冲量，使侧向爆轰波较之中心爆轰波提前到达药型罩壁面，破坏罩顶各部分的受载情况，迫使罩顶后喷，形成反射流，破坏了罩的正常压合次序，使得最后形成的射流不集中、不稳定，导致破甲深度下降。

上面所述是壳体影响的不利一面。另一方面,当药柱增加壳体后,减弱了稀疏波的作用,有利于提高炸药的能量利用率。上面讲到的降低破甲深度,只是由于破坏了光药柱试验所得到的最佳波形,如果适当改变装药结构,尤其是隔板尺寸,便可提高破甲深度。一般来说,对于带隔板的聚能装药,加上壳体有点类似于不合理地增大隔板直径的作用。因而将光药柱试验得到的隔板直径和厚度减小,可使爆轰波形趋于合理,从而可以提高破甲深度。对于不带隔板的聚能装药,可以采用改变药柱锥度和药型罩锥角的办法达到调整爆轰波形的目的。

3. 炸高

破甲弹的动炸高也就是弹头部的高度。炸高的影响可以从两方面来分析,一方面随着炸高的增加,使射流伸长,从而提高破甲深度;另一方面,随着炸高的增加,射流产生径向分散和摆动,延伸到一定程度后产生断裂,使破甲深度降低。

与最大破甲深度相对应的炸高,称为最有利炸高、实际上,最有利炸高是一个区间,设计时选择炸高应选择最有利炸高区间中的小值,这样,既可保证所需的穿深,又可使破甲的跳动量小,还可减少弹丸的消极质量,最有利炸高与药型罩的锥角、材料、壁厚和炸药的性能,以及有无隔板等有关。

图 6-4-13 描述了不同锥角条件下炸高和破甲深度的关系。图中表明,最有利炸高随锥角的增加而增加。

图 6-4-14 为罩锥角为 45° 时,不同材料药型罩破甲深度随炸高的变化曲线。由图中看出,铝材料由于延展性好,形成的射流较长,因而最有利炸高

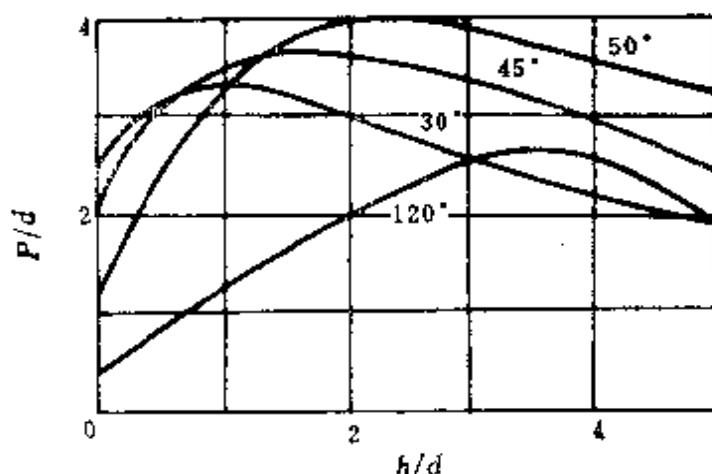


图 6-4-13 不同罩锥角时炸高与破甲深度曲线

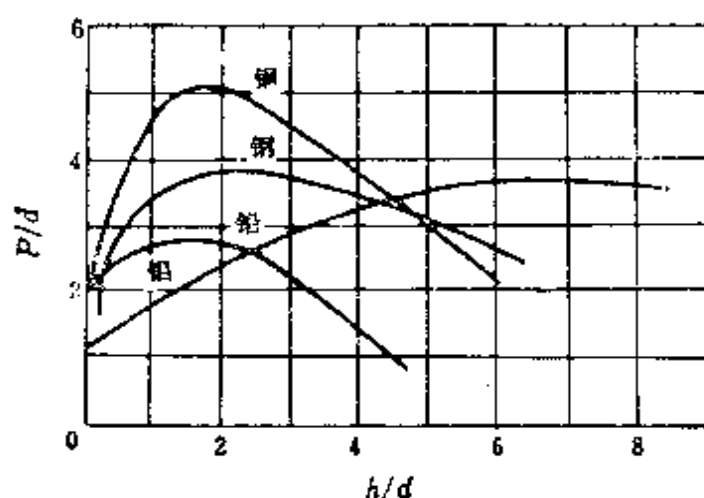


图6-4-14 不同罩材料时炸高与破甲深度曲线

大，约为罩底直径的 6 ~ 8 倍，适用于大炸高的场合。

实际上，对于一般常用的锥形铜药型罩，最有利炸高选定为 1 ~ 3 倍罩底直径。在实际应用中，希望获得平直的穿深与炸高曲线，即增加或减小炸高，不会引起大的破甲深度变化。

另外，采用高爆速炸药以及增大隔板直径，都能使药型罩所受的冲击压力增加，从而增大射流速度，并使射流质量增加而耐拉断，故最有利炸高增加。

四、起爆系列

对聚能装药破甲弹来说，起爆系列对破甲的影响也就是引信对破甲的影响。除了引信作用时间对动炸高有影响外，引信雷管的起爆能量、导引传爆药、传爆药等也直接影响到破甲威力及稳定性。

在试验过程中遇到破甲不稳定时，起爆系列能量不够是可能的原因之一。这就要根据具体的装药结构选择合适的引信。雷管的能量不足以稳定起爆传爆药的话，就要加强导引传爆药，使之能够稳定起爆传爆药。为了使破甲性能稳定，传爆药要有足够的

能量，既要保证足够的药量，也要使传爆药柱具有一定的直径与高度，并与副药柱恰当地配合，以便稳定地起爆装药。

如果使用弹头起爆引信，则应很好地选择传爆药外壳，因为引爆弹底雷管主要是靠传爆药壳的破片或壳底形成的射流的能量。平底管壳靠破片引爆弹底雷管，作用时间较长；凹槽管壳可形成射流引爆雷管，作用时间较短。

五、靶板

靶板对破甲效应的影响包括靶板材料性能和靶板的结构形式。

靶板材料性能方面的影响，主要因素是材料的强度和密度。按照定常理论，破甲深度为

$$P = l \sqrt{\frac{\rho_r}{\rho_t}}$$

显然，破甲深度与靶板材料密度 ρ_r 的平方根成反比。

实际上，不考虑靶板强度是不行的，特别是当前随着高强度靶板和复合靶板的应用，更要求对靶板强度的影响进行认真的分析。聚能射流侵彻靶板，依赖于高速运动的射流撞击靶板时所产生的极高的撞击压力。当射流微元速度大于 5000 m/s 时，此撞击压力高达几万到十万兆帕，相对来说，靶板强度可以忽略不计，以至可以认为靶板是流体状态，此时破甲速度与射流速度成正比。当射流速度小于 5000 m/s 时，靶板强度的影响就明显地表现出来，并且靶板强度愈高，与流体相差愈大，此时破甲速度下降比射流速度下降得更快些。

靶板的结构形式，如靶板倾斜角的大小、多层间隔靶、钢与非金属材料的复合靶等对破甲效应的影响，目前正在研究中，许多现象还没有得到本质的了解。总的来说，倾斜角大，容易产生跳弹。通过试验发现，多层间隔均质钢靶的抗射流侵彻能力，比同样厚度的单层均质靶板强一些，这主要是由于在多层间隔板中，

除了多次开坑消耗一部分射流能量外，随着靶间距离的增大，射流穿靶的状态有了改变，对间隔靶中的后面几个靶，射流基本是处于断裂状态穿靶的，因而侵彻效果降低。

上面分析了各种因素对破甲效应的影响，实际上，这些因素是相互连系的。从本质上讲，这些因素主要是影响射流的速度、质量、密度、有效长度及稳定性等，在设计破甲弹时应综合分析这些影响因素，选择合理的弹丸结构，以提高破甲威力。

第七章 结构设计

第一节 概 述

在新产品设计时，弹药设计人员往往要和武器、火药等设计人员一起，共同研究战术技术要求。在研究形成的总体方案基础上来进行弹药设计。

设计者的主要依据是对弹药提出的战术技术要求，所以在着手进行设计之前，须对所提出要求应有透彻的了解，对现有国内外装备使用的类似产品进行认真的分析对比，统计其有关数据，比较其结构，分析优缺点，以作为设计产品的参考。

在具体进行设计时的第一步是总体方案设计，即根据战术技术要求来确定弹丸(头)的口径、弹种、结构类型及弹丸质量。若为现有武器配弹种或改进弹药的性能，则口径是已经给定的。若是新设计的武器系统，则口径的确定不仅是弹药总体设计的重要参数，也是整个武器系统的重要参数，一般说来，口径愈大其威力亦愈大，而整个武器系统的机动性要变差。在通常情况下，口径的选择要符合装备口径序列的要求，不可随意制定新口径，确系需要设计新的口径，需经反复试验分析论证后，报上级批准后确定。本章涉及的主要内容将是弹种、弹丸(头)质量及结构参数的确定。

第二节 总体结构设计

本节主要介绍弹种和弹丸质量的确定原则。

一、弹种的选择

1. 弹种选择原则

弹种的确定主要是根据弹丸的用途，即所对付目标的性质来

确定。目标的性质包括目标的类型、目标强度、目标的运动性、目标的大小及在战场上的位置等。在详细分析的基础上确定要求的弹种、威力、射程、精度以及武器的速射性。

2. 根据目标性质选择弹种

对付有生目标，枪弹可选用普通弹，炮弹结构的选用榴弹，它可对付暴露的有生目标和在轻型掩蔽物后的目标。

对付装甲目标可选用各种穿甲弹，各种口径的枪弹一般都配有穿甲弹。为加剧破坏效果，穿甲弹大都带有燃烧作用。空心脱壳穿甲弹配用于大口径机枪上，初速高，穿甲威力大。

破甲弹是靠金属流来穿甲，它对弹丸速度没有过高的要求，可配用于自动榴弹发射器等低初速的武器，使它们具有反装甲的能力。

对于空中目标可选用大口径机枪用的穿甲燃烧弹、爆炸弹等。

为了特定的目的、例如修正射击、观察弹迹，可选用各种曳光弹和试射燃烧弹；又如为观察敌人行动和对敌射击效果，可选用榴弹发射器发射的照明弹。

二、弹丸质量的选择

选择弹丸的质量是以满足所提出的战术技术要求为前提的。弹丸质量的大小常直接影响它的作用效果、弹道性能及勤务性能等。

作用效果 对于枪弹来说，它的作用效果经常和弹着点处所具有的能量联系着，例如穿甲弹在弹着点穿透一定厚度的钢甲所需的速度 v_c 可按式(5-3-5)确定，即

$$v_c = K \sqrt{\frac{d^{0.75} b^{0.7}}{M^{0.5} \cos \theta}}$$

该式是由能量关系得到的，可以看出弹丸质量 M 愈大，所需的速度愈小；又如普通枪弹，使有生目标致命的落点能量也是与弹丸质量相联系着的。对炮弹结构的弹丸，例如杀伤榴弹，弹丸质量愈大，可获得更多的杀伤破片。

弹道性能 步兵自动武器多用于直接瞄准射击，弹道低伸常是它的基本要求。弹道越低伸，在有效射程内的危险区也越大，毁伤目标的机会也就越多，在设计时将根据目标的情况，提出具体要求。弹丸的弹道性能直接与弹丸的质量有关，不同的弹丸质量可获得不同的初速，不同的初速和弹道系数（与弹丸质量有关），又决定着不同的弹道性能。

连发精度 这是步枪自动化带来的一个问题，即使弹丸飞行稳定性满足旋转稳定的要求，但对自动步枪连发射击的情况而言，其射击精度并不一定良好。除稳定条件外，影响连发精度的主要因素是枪的后坐能，其次是武器的结构，如自动方式、枪托形状等。减小枪的后坐能 E_K 对提高连发精度是有利的。 E_K 的计算公式为

$$E_K = \frac{1}{2} M_F V^2$$

式中 M_F ——枪的质量 (kg)；

V ——枪的后坐速度 (m/s)，根据实验，后坐速度可用下式计算：

$$V = -\frac{M + \beta M_0}{M_F} v_0$$

式中 M 是弹丸质量 (kg)； M_0 是发射药质量 (kg)； v_0 为弹丸初速 (m/s)； β 为后效系数，根据实测得：

$$54 \text{ 式 } 7.62 \text{ 手枪弹} \quad \beta = \frac{1130}{v_0}$$

$$56 \text{ 式 } 7.62 \text{ 枪弹} \quad \beta = \frac{1070}{v_0}$$

$$53 \text{ 式 } 7.62 \text{ 枪弹} \quad \beta = \frac{1290}{v_0}$$

$$\text{美 M59 } 7.62 \text{ 枪弹} \quad \beta = \frac{1110}{v_0}$$

对于新设计的枪弹可参考 P_g (枪口压力) 和 v_0 相近的枪弹选取之。

几种步枪的后坐动能见表 7-2-1。

表 7-2-1 几种枪弹的枪口冲量、枪口动能和后坐动能

型式和口径	弹头质量 (g)	初速 (m/s)	枪的质量 (kg)	枪口冲量 (N·S)	枪口动能 (J)	后坐动能 (J)
56式7.62半自动步枪	7.9	735	3.75	7.35	2136	7.55
苏AKM7.62自动步枪	7.9	710	3.5	7.35	1989	7.64
美M14 7.62自动步枪	9.6	853	3.95	11.26	3489	17.84
西德G 3 7.62自动步枪	9.6	800	4.52	11.27	3067	14.21
日T64 7.62自动步枪	9.6	800	4.54	11.27	3067	14.11
美M16A1 5.56自动步枪	3.52	990	3.22	5.59	1725	4.7
西德HK33 5.56自动步枪	3.52	960	3.57	5.49	1627	4.12
捷AP70式7.62自动步枪	7.9	717	3.9	7.45	2029	7.06
意AR70 5.56自动步枪	3.52	970	3.69	5.49	1666	4.02
法FA MAS 5.56自动步枪	3.52	960	3.84	5.44	1627	3.92
以73式5.56自动步枪	3.52	980	4.28	5.59	1686	3.63
西德HK36 4.6自动步枪	2.7	850	2.85	3.72	980	2.45

由表 7-2-1 可以看出, 口径减小, 弹头质量减轻, 虽然初速增加了, 但后坐动能还是减小不少。

从后勤供应和战士携弹量来看, 尽量减小弹丸的质量将是有利的, 这可减轻战士的负荷, 或在不减轻负荷的情况下增加携弹量, 这是步枪自动化以后尤为突出的要求。

综上所述, 确定合理的弹丸质量, 首先应考虑弹丸的作用效果和弹道性能, 在此基础上可兼顾其它要求。

实际上, 在具体选择弹丸质量时, 是根据长期实践中对各种武器和弹种总结出的质量范围来确定的。它常用相对质量 C_m 的形式来表示, $C_m = \frac{M}{d^3}$, d 为口径。各种枪弹质量范围如表 7-2-2 所示。这些数据只是过去的经验总结, 不是一成不变的。

随着枪弹口径的减小, 质量系数应取得较大一些。当口径小于 7 mm 时, C_m 值可取得大于表 7-2-2 中所列的数值。

对于小口径地面杀伤榴弹 $C_m = (14 \sim 24) \times 10^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$; 相对装药质量 $C_w = w/d^3 = (1.0 \sim 1.5) \times 10^8 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 。

表7-2-2 各种枪弹的 C_m 范围

弹 种	C_m (g/cm ³)
平 枪 弹	8~13
钢 心 弹	17~23
穿甲燃烧弹	21~24
穿 甲 弹	21~26
燃 烧 弹	19~22
曳 光 弹	17~22

在上述经验数据的基础上, 选定弹丸质量的范围。根据对武器的战术技术要求, 从终点弹道出发进行外弹道设计(口径、弹丸质量和初速较好的组合)和内弹道设计(装药量、最大膛压、药室容积及身管长度的合理匹配), 最后结合武器情况, 选出较为合理的方案。

第三节 结构方案的确定

当弹丸(头)的总体方案确定之后, 则进行结构方案设计, 它将包括弹丸的外形结构, 内腔结构及零件结构尺寸的确定等。

结构方案的确定是在对各种实践经验资料的分析基础上进行的, 它是很难用某些确定的公式计算得到的。所以在这一节将对各种因素作一概括分析, 并指出设计的方向。

一、弹丸外形结构

确定弹丸的外形结构需要考虑弹丸对目标的作用效果、弹道性能、飞行稳定性等的影响。它的基本尺寸应根据战术技术要求和弹丸的特点来选择。

图 7-3-1 示出了枪弹弹头(图 7-3-1 a)和炮弹弹丸(图 7-3-1 b)的外形结构, 它们的基本尺寸见图 7-3-2。

在这些尺寸中, 圆柱部直径 d_c , 全长 l , 弹头部长 l_h , 圆柱部长 l_c 及弹尾部长 l_w 是决定整个外形结构布局的基本尺寸。其

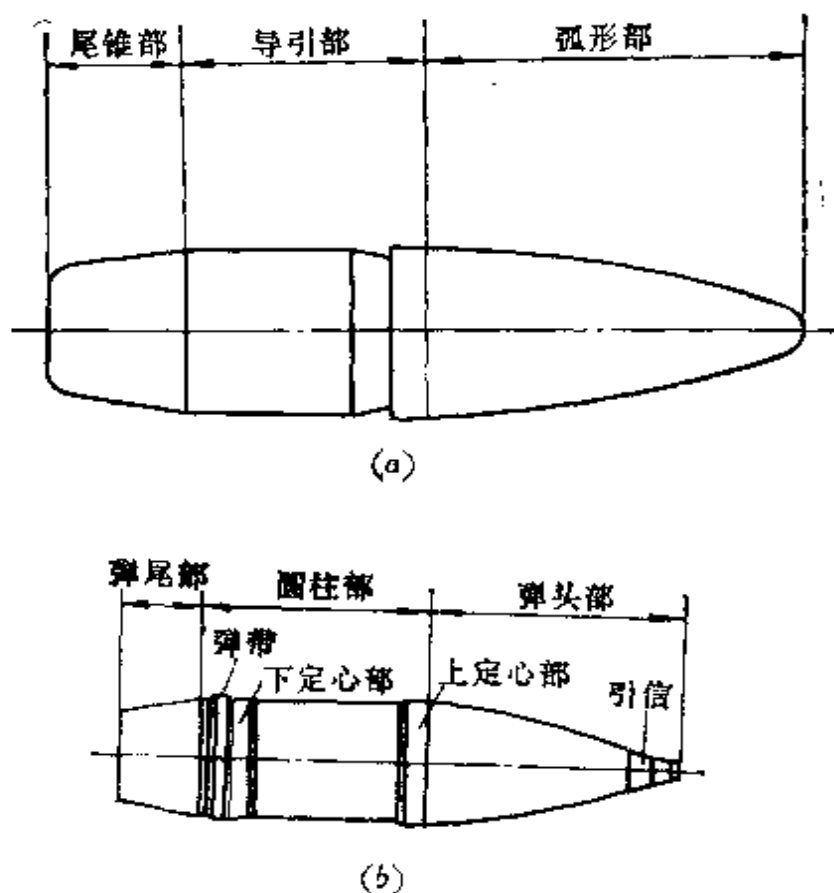


图7-3-1 弹丸的组成部分

余尺寸则进一步表征弹丸外形特点。因此，在确定尺寸时，首先着眼于基本尺寸，在此基础上就容易确定其它尺寸。

1. 弹丸全长 l

弹丸全长是在弹丸质量已定后确定的。旋转弹丸的最大长度受到飞行稳定性的限制。旋转弹丸在空中飞行时，受到空气阻力翻转力矩的作用，迫使弹丸翻转。但是由于弹丸高速旋转，产生了一种克服弹丸翻筋斗的急螺效应，而使弹丸飞行稳定。弹丸愈长，空气阻力的翻转力矩越大，相应要求弹丸的转速也愈高。为了赋予弹丸较高的转速，就需要减小武器膛线的缠度。膛线缠度过小，磨损快，影响武器（身管）寿命。另外，对炮弹弹丸来说，限于弹带材料的强度，弹丸转速不可能无限制提高。因此，在一般情况下，旋转弹丸的全长很少有超过 5.5 倍口径。

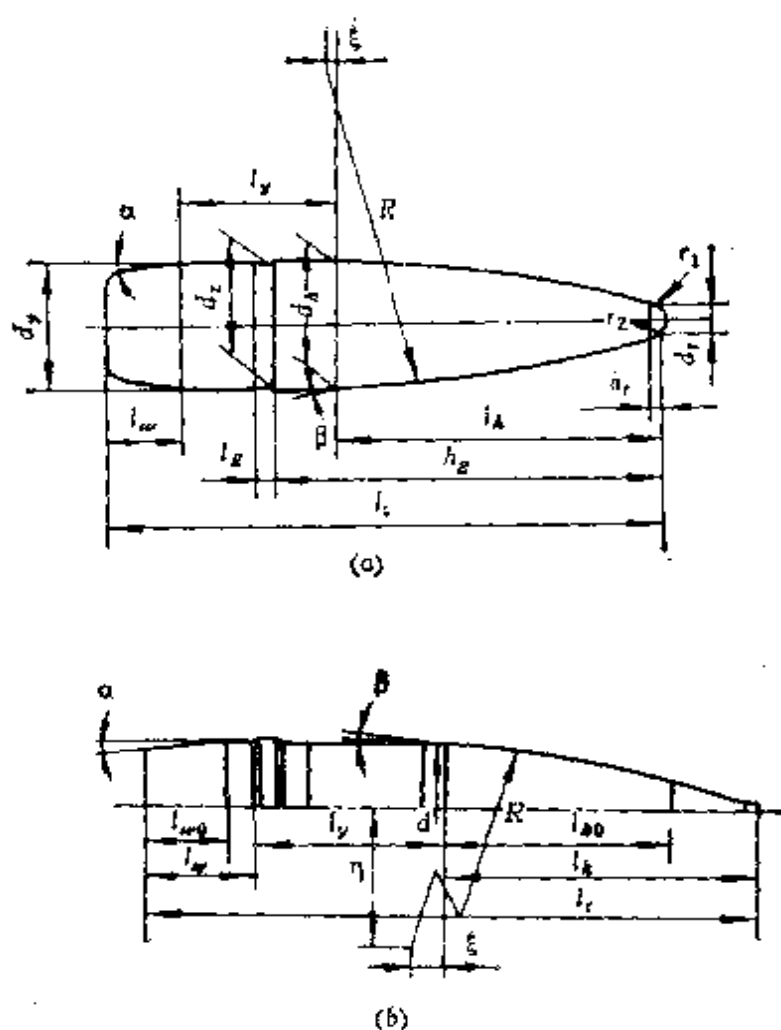


图7-3-2 弹丸的基本尺寸

d —弹丸口径； d_y —圆柱部直径； l_t —弹丸全长； l_h —弹头长度； l_{h0} —弹壳头部长； R —弹头部外形圆弧半径； ξ 和 η —圆弧母线中心坐标； l_y —圆柱部长度； l_w —弹尾部长度； l_{w0} —弹丸截锥部长； α —尾锥半角； β —弹头部与圆柱部的联接角。

枪弹弹头长度（弹丸全长）一般为

$$l_t = (3.5 \sim 5.0) d$$

式中 d 为口径。特种弹头的长度比普通弹的长，因为特种弹内装填物的比重小。手枪弹弹头的长度小于上述范围。

2. 弧形高（弹头部长） l_h

弧形（弹头）部尺寸和形状对正面空气阻力影响较大，特别

是在超音速时, 对弹丸飞行弹道影响更大。

从空气阻力的角度来看, 对于飞行稳定的弹丸, 弧形(弹头)部长度越长, 弹丸形状越尖锐, 其阻力值就越小。因此, 就整个弹头(丸)而言, 弧形(弹头)部长短对正面阻力起着重要影响。图 7-3-3 表明, 弧形(弹头)部增长, 弹形系数减小, 将会减小空气阻力。

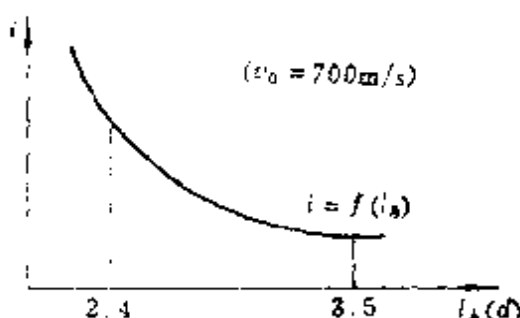


图7-3-3 弧形高度(弹头长度) l_h 与弹形系数的关系

由图 7-3-3 可以看出, 当弧形高度(弹头长度)过分增长, 则弹形系数不再有显著变化。另外, 由于弹头(丸)质量已定, 所以它的全长是有一定限制的, 亦即 l_h 值不可能太大, 否则将会使其它部位减短。

对初速为 $600 \sim 1000 \text{ m/s}$ 的枪弹弹头, l_h 值可取

$$l_h = (1.9 \sim 3.5) d$$

初速越低, l_h 值应取得越小些。例如手枪弹, 由于要求结构尺寸小, 有效射程不远(不可能远), 不必要初速高, 所以 $l_h < 1.5 d$, 甚至可做成半球形, 即 $l_h = 0.5 d$ 。这样的钝头弹侵入有机体时能量损失大, 有利于增大杀伤作用。

母线形状 弧形部(弹头部)是旋成体, 其母线形状有直线的、圆弧的、抛物线的和椭圆形的几种, 此外也有这些曲线组合型的。

从阻力观点来看, 以抛物线形母线最有利而以椭圆形母线最差。但当弹丸速度较小时, 母线形状对阻力没有显著影响。从制造工艺来看, 以直线及圆弧形为宜。从内腔容积来看, 以椭圆和圆弧形为好。

目前绝大部分枪弹和大部分榴弹都采用圆弧形母线, 所以枪弹弹头部亦称为弧形部。枪弹的弧形半径 R 一般取

$$R = (5 \sim 10) d$$

对超音速飞行的弹丸, 一般说来, 弹丸越尖飞行阻力越小。在

l_a 和 d 已定的条件下, 如果再要增加弹头部的尖锐程度, 可将圆弧的圆心位置向尾锥方向移动一个距离 (也称下移量)。这样, 弧形 (弹头) 部和圆柱 (导引) 部相连的部位, 由原来的相切变为相割 (图 7-3-4)。割点的圆弧切线与导引 (圆柱) 部形成夹角 β 。一般来说, β 不应超过 3° , 否则会造成导引 (圆柱) 部与弹头 (弧形) 部的不平滑联接, 以致产生涡流或激波, 反而加大了飞行阻力。

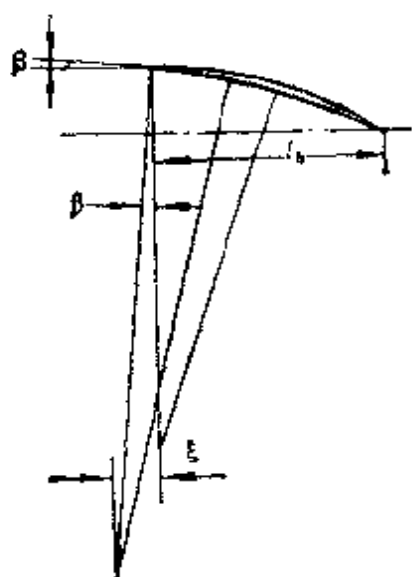


图 7-3-4 圆弧圆心下移量



图 7-3-5 弹顶钝化

根据试验, 对于 $v < 700 \text{ m/s}$ 的同一母线头部的弹丸来说, 弹尖 (顶) 以稍微钝些为有利。其原因如图 7-3-5 所示, 弹尖 (顶) 稍微钝些, 当有攻角存在时, 附面层不易分离, 可使阻力减小。

手枪弹头尖部形状如图 7-3-6 (a) 所示。它由半径较大的弧形半径 R 和半径较小的圆弧 r 相切而成, 以适应手枪弹初速低、外形小的特点。图 7-3-6 (b) 为步、机枪弹头尖部形状 (如 53 式和

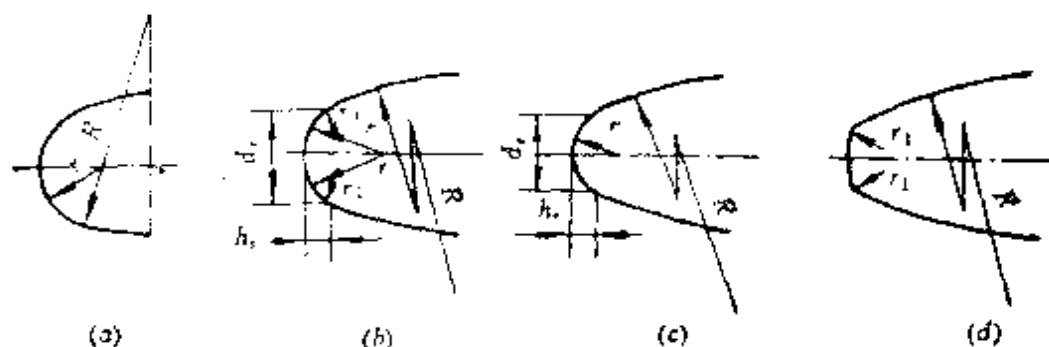


图 7-3-6 枪弹弹头尖部形状

56 式 7.62 弹头)。图中 d_r 是距弹尖 h_r 处弧形部的直径。弹尖由 r 、 r_1 与 R 各弧连续相切构成。图 7-3-6(c) 为大口径机枪弹头尖部形状。由于它的 d_r 大, 故常用一个 r 和 R 弧形相切, 构成弹尖形状。图 7-3-6(d) 是燃烧弹头尖部形状, 其前端做成平面, 是为了增大弹尖碰击目标时的阻力, 有利于发火。一般

$$d_r = (0.16 \sim 0.24) d$$

$$r = (0.15 \sim 0.20) d$$

因为弹尖稍钝对于形成环流和防止附面层分离较为有利, 所以一般枪弹弹尖的直径 d_r 都稍大于 1 mm。对于口径很小的弹头, 由于不易加工出直径小于 1 mm 的弹尖, 因而弹尖相对地做得较钝, 阻力相应增大。特别是在弹头飞行速度很高时, 这种影响会明显表现出来。

榴弹的弹顶平台, 常为弹头引信头部平台所限制。

在实际设计时, 一般先确定圆柱(导引)部的直径, R 和 l_a 两个量只要确定一个即可, R 与弹头部其它尺寸的关系为(图 7-3-7);

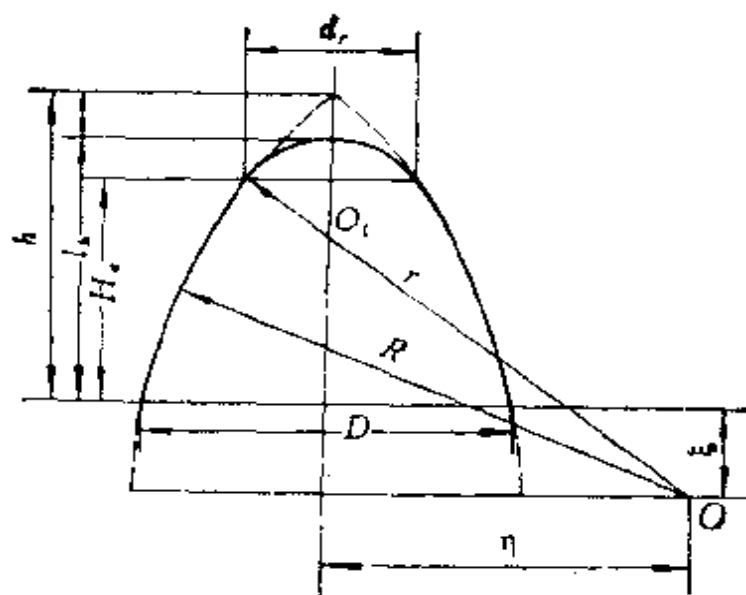


图7-3-7 弹头部尺寸

$$R = \sqrt{\eta^2 + (h + \xi)^2}$$

$$R = \sqrt{(\eta + 0.5D)^2 + \xi^2}$$

$$R = \sqrt{\eta^2 + (l_h - r + \xi)^2} + r$$

$$R = r \left(\frac{2\eta}{d_r} + 1 \right)$$

圆弧母线中心的坐标 ξ 、 η 可根据以下关系计算。

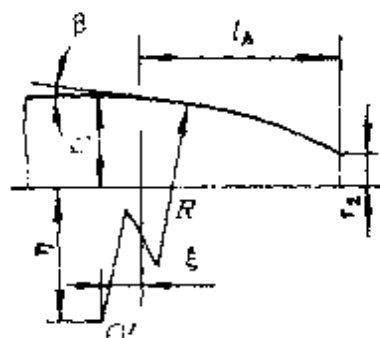


图7-3-8 弹头部圆弧母线中心的坐标及半径

由圆方程 (图 7-3-8)

$$\begin{cases} \xi^2 + (r_1 + \eta)^2 = R^2 \\ (l_h + \xi)^2 + (r_2 + \eta)^2 = R^2 \\ \xi = (r_1 + \eta) \operatorname{tg} \beta \end{cases}$$

式中 r_1 、 r_2 、 l_h 为已知尺寸，当 β 确定后，可解出母线中心的坐标 ξ 、 η 及半径 R ：

$$\begin{cases} \eta = -\frac{l_h^2 - (r_1^2 - r_2^2) + 2l_h r_1 \operatorname{tg} \beta}{2(r_1 - r_2) - 2l_h \operatorname{tg} \beta} \\ \xi = \left[\left(-\frac{l_h^2 - (r_1^2 - r_2^2) + 2l_h r_1 \operatorname{tg} \beta}{2(r_1 - r_2) - 2l_h \operatorname{tg} \beta} \right) + r_1 \right] \operatorname{tg} \beta \\ R = \left[\left(-\frac{l_h^2 - (r_1^2 - r_2^2) + 2l_h r_1 \operatorname{tg} \beta}{2(r_1 - r_2) - 2l_h \operatorname{tg} \beta} \right) + r_1 \right] \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \beta} \end{cases} \quad (7-3-1)$$

若已知 r_1 、 r_2 、 l_h 和 R 的情况下，可以由图 7-3-9 求出圆弧中心坐标 ξ 、 η 。图中 A 、 B 两点的半径分别为 r_1 及 r_2 ， AB 弦长为 $2L$ ，由几何关系可知

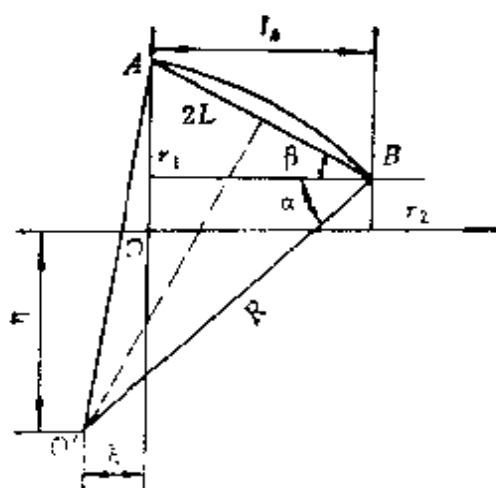


图7-3-9 圆弧母线中心的坐标

$$\begin{cases} 2L = \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + l_s^2} \\ \tan \beta = \frac{r_1 - r_2}{l_s} \\ \alpha = \sin^{-1} \sqrt{1 - \left(\frac{L}{R}\right)^2} - \beta \end{cases} \quad (7-3-2)$$

由此可得

$$\begin{cases} \xi = R \cos \alpha - l_s \\ \eta = R \sin \alpha - r_2 \end{cases} \quad (7-3-3)$$

3. 圆柱部

圆柱部尺寸 l_y 对枪弹来说, 是从起弧点到尾锥起始点之间的距离; 对炮弹来说, 是指上定心部至弹带之间的距离。一般情况下, 它也是弹丸导引部的长度。因此, 它对弹丸在膛内的运动有着决定性的影响, 另外它与弹丸的内腔容积也有密切的关系。

从弹丸运动状态考虑, 若圆柱尺寸 l_y 大, 则膛内导引性能好, 弹丸在膛口的初始扰动小, 具有较好的飞行稳定性, 从而提高了精度。从正面空气阻力来看, 减短圆柱部是有利的。因此, 合理的圆柱部长度应从所设计弹丸的战术技术要求出发, 来全面衡量确定。

目前绝大多数的枪弹是靠圆柱部嵌入膛线来密封枪管和使弹头获得正确的旋转运动，故圆柱部又称导引部。应当指出，当枪弹嵌入膛线时，弹头部和弹尾部的一部分也起导引作用，故实际导引长度要比圆柱部长些。所以，对枪弹来说，若圆柱部过长将增加枪膛的磨损，并使膛压升高。对于特种弹，由于装填了密度较小的药剂或内部有空腔，为了保证弹丸质量不变， l_y 不得不做得长些，有时可达 $3d$ 。对于曳光弹等不易制成尾锥的弹头， l_y 明显增大。由于手枪弹弹头全长很短，又用于近距离，故 l_y 值常小于一倍口径。对于一般的枪弹 l_y 值为

$$l_y = (1.0 \sim 1.5) d$$

枪弹圆柱部直径需和枪管线膛尺寸密切配合（图7-3-10）。为了密封枪管，弹头圆柱部横断面积 S_y 应大于（至少应等于）线膛内横断面积 S 。根据对现有枪（矩形膛线）和弹的统计，其关系为

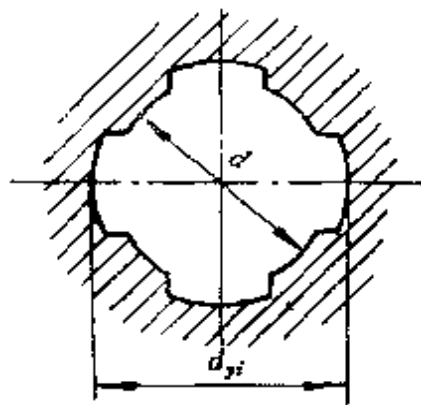


图7-3-10 枪管膛线横截面

$$\frac{S_y}{S} = 1.01 \sim 1.03$$

对矩形膛线的 S 值可用几何关系求出，也可用下面的经验式求出，

$$S = (0.81 \sim 0.825) d^2$$

在一般情况下，枪管阳线直径的名义尺寸等于口径，故弹头圆柱部直径一定大于口径。对矩形膛线的枪管来说，应取圆柱部名义尺寸等于阴线的名义尺寸，即

$$d_y = d_{yi}$$

或

$$\frac{d_y}{d} = 1.03 \sim 1.04$$

式中 d_y ——圆柱部直径名义尺寸,

$d_{y\prime}$ ——枪管阴线直径名义尺寸。

当 d_y 过小时, 枪管密封性差, 射弹密集度降低; d_y 过大时, 膛压升高 (因挤过压力增大), 枪管磨损也严重。

在枪弹弹头的圆柱部辊紧口沟是为了在与药筒联接时, 便于用紧口的方法来提高拔弹力, 而且在圆柱部太长时还可以减少弹头和膛线间的摩擦。手枪弹是用点铆药筒口部的办法提高拔弹力的, 故没有紧口沟。对于没有铅套的曳光弹头, 为了防止辊沟时压碎药剂, 所以也不设计紧口沟。紧口沟的形状如图 7-3-11 所示。图中 a 为带辊花的紧口沟, 这种辊花对产品性能没有实际意义, 但在加工时有利于弹头的转动; b 、 c 为直形沟, 断面为梯形或弧形; d 为斜形沟, 它的外形有利于减少飞行阻力。目前枪弹多为一个紧口沟。

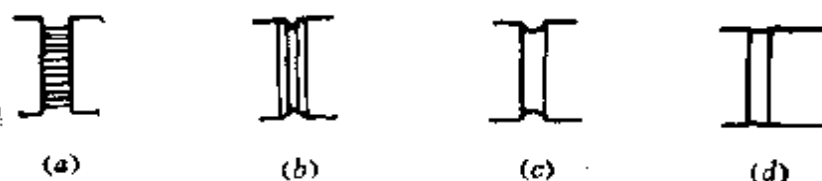


图7-3-11 紧口沟的形状

炮弹圆柱部的上下两端有两个定心部和弹带。弹丸在膛内沿轴向的正确运动靠上、下定心部和弹带来保证, 所以圆柱部也称导引部。有些小口径榴弹没有下定心部, 依靠上定心部和弹带来进行导引。

定心部 弹丸定心部分为上定心部和下定心部, 它的作用是使弹丸在膛内正确定心。两个定心部表面可以承受膛壁的反作用力。定心部加工精度较高, 它与炮膛有一很小的间隙, 以保证弹丸顺利装填。定心部的间隙不能过大, 否则会使弹丸在膛内摆动过大, 影响膛内的正确运动, 并使射弹密集度变差。定心部的宽度应保证弹丸在膛内摆动时不会在定心部上造成过深的阳线印痕。下定心部一般都在弹带之前, 可保证弹丸装填时弹带的正确

位置，承受部分膛壁的径向压力。

弹带 弹带的作用是在弹丸发射时，它嵌入膛线，赋予弹丸一定的转速，并密封火药气体，保证弹丸在膛内的定位。

随着弹丸长度和初速的增大，必须相应增大弹丸的转速，以保证弹丸的飞行稳定性。这样就对弹带的强度有一定的要求。为此，除了合理选择弹带材料外，还需将弹带的宽度加大。然而随着弹带宽度加大，就会增大弹带压力（见第九章）和弹体壁的挠度，破坏了弹带前部和炮膛壁间的接触。另外，过宽的弹带在与膛线挤压时会产生“飞边”，影响弹丸外弹道性能。权衡利弊，常采用两条较窄的弹带来代替一条宽弹带。铜质弹带的最大宽度一般为：小口径弹 10mm，中口径弹 15mm。

弹带的直径应大于炮膛阴线的直径，其超出部分称为弹带的强制量（图 7-3-12）。强制量的大小对弹丸沿膛内运动的正确性有重要意义。弹带的外径 D 为弹丸口径 d 、膛线深度 t_r 及弹带强制量 δ 三部分之和。即

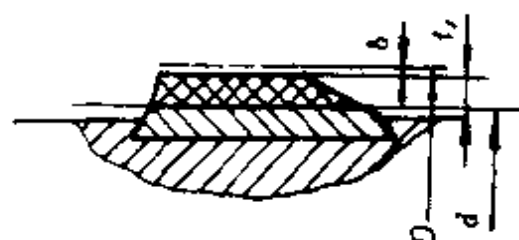


图7-3-12 弹带的强制量

$$D = d + 2(t_r + \delta)$$

δ 的选择应考虑：

(1) 保证弹丸在膛内运动时，紧塞火药气体，避免火药气体对炮膛的烧蚀；

(2) 防止弹带与弹体产生相对旋转，使弹丸出炮口后有一定的转速。

强制量 δ 也不能太大，否则会影响火炮的寿命，尤其在坡膛处磨损会增大。根据经验，一般取

$$2\delta = (0.002 \sim 0.005) d$$

弹带的形状对弹带嵌入膛线有很大影响。当弹带嵌入膛线时，起初强制压缩弹带到坡膛内；以后在弹带上形成导转突起部，也

就是已经压缩的弹带开始嵌入膛线，如图 7-3-13 所示。

为了使弹带容易嵌入膛线，并起到较好的定心作用和减小飞行中的空气阻力，要求弹带前端应为一斜面。为了接纳弹带嵌入坡膛和膛线时产生的积铜，防止形成“飞边”，后端面也应作成斜面（图 7-3-14）。用于分装式弹丸弹带的后斜面应从弹体开始，而定装式炮弹还必须在弹带的后面留下一个小平面，以便支持药筒口部。

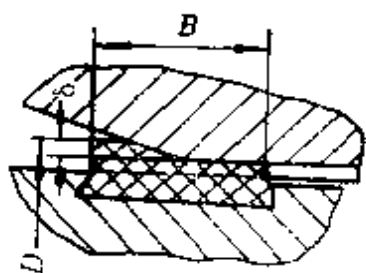


图7-3-13 弹带嵌入膛线过程



图7-3-14 弹带的断面形状

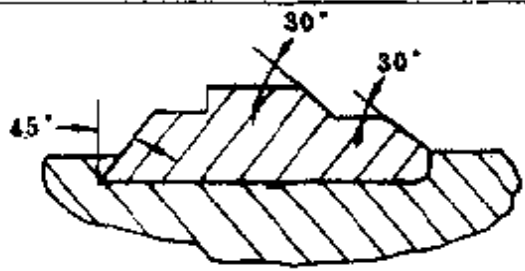


图7-3-15 带环形沟槽的弹带

如果采用一条宽弹带，则应在弹带上开一些矩形或梯形的环形沟槽（图 7-3-15）。环形槽的深度不应大于膛线深度，而槽宽也不应大于阳线宽度。沟槽的数目应这样选择，在弹带嵌入膛线时，挤塌的弹带金属能把沟槽填满。几种弹带的形状和尺寸见表 7-3-1。

为了提高高速火炮的寿命，常常在弹带上加一个起缘突起部（图 7-3-16），以减小对火炮磨损的敏感性。一般弹带是通过其前斜面与膛线起始部接触进行定位的。而火炮膛线的起始部最容易被高温火药气体烧蚀，从而引起装填定位不准确，使药室容积增大，初速减低。有起缘部的弹带则通过起缘部与坡膛接触而定位。膛线起始部的磨损，对弹丸定位影响不大，并能可靠地紧密火药气体。

表7-3-1 几种榴弹弹带的形状和尺寸

弹丸名称	弹 带		
	直径 (mm)	宽度 (mm)	形 状
37mm高射炮曳光榴弹	38.1	12	
57mm高射炮曳光榴弹	59.3	26	
	60.7	26	
30mm自动炮曳光榴弹	31.4 32.3		

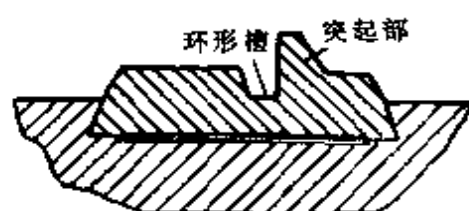


图7-3-16 有凸缘的弹带

4. 弹尾部

为了减小尾部波阻和底阻，以采用截头锥形尾部(船尾形)较好。根据试验：最佳尾锥角 α 约在 $6^\circ \sim 9^\circ$ 范围内变化。在保证附面层不分离的条件下，尾锥部愈长，弹底面愈小，底阻愈小。在最佳尾锥角时尾锥部长约 $1d$ 左右为宜。如过长，附面层可能在弹底前分离，并且各发分离点不一致，造成阻力的变化使密集度变坏。

枪弹尾锥的长度 l_w 一般为

$$l_w = (0.5 \sim 1) d$$

在一般情况下，应尽量设计成有尾锥的弹头，以提高远距离的存速能力和枪弹精度。

从炮弹的某些特殊要求来看，例如为了使定装式炮弹的弹丸和药筒有牢固的结合，弹尾部的柱形部分长度至少应为 $(0.25 \sim 0.5) d$ ；有时在其上还必须加工 $1 \sim 2$ 个紧口沟槽以固定药筒用。又如，为现有火炮设计弹丸时，如果必须采用制式发射药，那么在确定弹尾部尺寸时，应考虑保持原来的发射药装填密度不变。

二、弹丸内腔结构

1. 炮弹弹丸的内腔结构

弹丸内腔形状及基本尺寸如图 7-3-17 所示。

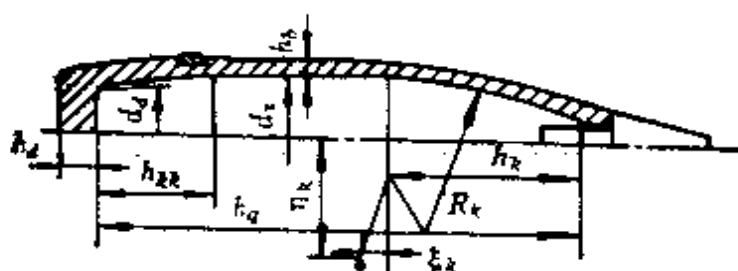


图7-3-17 弹丸内腔的基本尺寸

h_g —内腔深度； h_k —内腔弧形部长度； R_k —内腔弧形部的母线半径； ξ_k 、 η_k —内腔头部母线中心的坐标； h_{zk} —内腔锥部长度； d_g —内腔在圆柱部上的直径； h_b —弹壁平均厚度（一般按圆柱部的壁厚计算）； d_d —内腔底部直径； h_d —内腔底部厚度。

内腔的形状和尺寸除了决定弹丸质量和装填物质量以外，还影响到弹丸质量的合理分布，从而影响弹丸在膛内的运动性能以及在空中的飞行稳定性。内腔尺寸也决定了弹体的壁厚和底厚，影响弹丸在发射时的强度和弹丸威力。

(1) 内腔形状

一般榴弹的内腔形状有圆柱部（带有小锥度）、截锥圆柱部及

弧形部的组合型。

从弹丸威力出发，为了使爆破榴弹尽量多装炸药，则必须加大内腔容积。为此，内腔形状大致与等强度壁厚相适应。为了使杀伤榴弹具有良好的破片性能，其内腔形状也应尽量适应等壁厚的要求。

从弹丸在膛内的运动条件来看，弹丸的质量分布应尽可能集中在质心处，而质心以靠近弹带处为宜。

从制造工艺简单考虑，内腔形状应与炸药的装填条件相适应。例如，小口径高射榴弹多采用压装药法，其内腔则应做成柱形，见图7-3-18。对抛射式弹丸，如照明弹、宣传弹、燃烧弹、烟幕弹、子母弹等，因有装填物抛出，所以内腔尺寸也应为圆柱形，如图7-3-19所示。

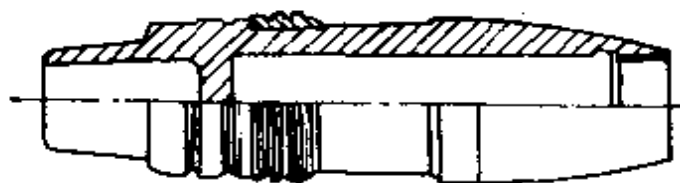


图7-3-18 小口径高射榴弹的内形

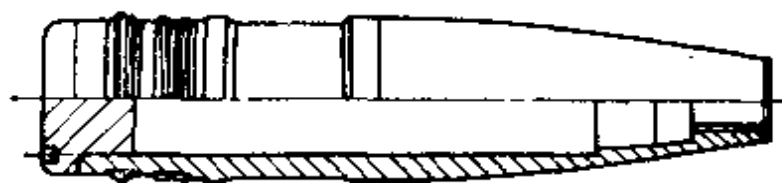


图7-3-19 照明弹弹体的内形

内腔多为平底形，周边有一定圆角。为了改善底部装填物的应力分布，加强弹底强度和有利于冲压加工，弹丸内腔底部也有做成双圆弧形，甚至为半球形。为了便于机械加工，内腔应尽量避免阶梯形突变，而在曲线衔接处采用圆弧连接。

(2) 弹丸的壁厚

榴弹的壁厚与弹丸的作用威力有着密切的联系。不同类型的榴弹，其壁厚范围往往不同，所以它常用来作为表征弹丸结构的一个特征数。

爆破弹的壁厚完全取决于发射强度。在保证发射强度的前提下,采用最小壁厚可以增加炸药的装填量。发射时,弹丸底部惯性力最大,而头部较小,故等强度壁厚将是底部最厚,而沿着头部方向递减。

对于杀伤榴弹的壁厚除了要考虑发射强度外,还应保证得到所要求的破片。因此,应当综合考虑弹体金属材料与炸药性质来确定壁厚。一般说来,当炸药猛度较高,或弹壁金属较脆时,壁厚尺寸可以稍大一些;相反,当炸药猛度较低,弹体金属强度较高,壁厚应相对减小。高射杀伤榴弹的壁厚一般比地面杀伤榴弹大。

杀伤爆破弹的壁厚介于爆破弹与杀伤弹之间。

特种弹的壁厚在满足弹壁强度的条件下,应尽量薄一些,并使内腔成圆柱形,以便装填更多的装填物 and 使其顺利抛出。

2. 枪弹弹头的内腔结构

枪弹弹头的外壳(弹头壳)是用冲压方法制造的,弹头的最终形状是由弹头装配成形工序形成的,这样它的内腔形状也是靠这道工序来最终形成。弹头的内腔是为了容纳完成其作用效果的各个零件,例如普通弹的内腔容纳着铅套、钢心;穿甲燃烧曳光弹内容纳着铅套、穿甲钢心、曳光管和燃烧剂等。

弹头壳 弹头壳是用来保持弹头外形,组合各个元件成为一个整体,并赋予弹头旋转运动的元件。因此,弹头壳必须保证弹头在膛内运动和飞离枪口后的强度要求。弹头壳的厚度 t_2 按经验选取,然后再进行强度校核。其厚度范围为

$$t_2 = (0.055 \sim 0.08) d$$

现在常用的弹头壳材料是复铜钢片或钢片(成型后镀黄铜)。弹头壳零件图产生的程序是,根据产品图上弹头的尺寸形状特点,参照与其相类似的枪弹资料,并考虑到装配时的加工量和装配后的回弹量,来设计弹头合装模具及冲尖模具。经过反复试验和修改,直至装配成的弹头完全合乎产品图时,此冲尖后产品的尺寸即为所设计弹头的弹头壳产品图的尺寸。

铅套 钢心弹、穿甲弹、燃烧弹和爆炸弹,以及各种多作用

弹，一般都采用铅套。铅套的作用是使弹头壳容易嵌入膛线，减小枪膛的磨损，同时在弹头加工时容易使各元件填充紧密。

铅比较软，有时为便于加工，在其中适当地加入一些锑，以提高其硬度。组合锑量过多会影响枪弹精度。

铅套厚度的选取范围为

$$t = (0.02 \sim 0.065) d$$

小口径枪弹一般取上限，大口径枪弹取下限。

各种枪弹的铅套厚度见表 7-3-2。

普通弹钢心 为了节省铅，铅心弹已改成铅套加钢心的形式。这时，钢心只起填充作用，保证一定的弹头质量。钢心直径按下式确定：

$$d_c = d_y - 2(t + t_2)$$

式中 d_c ——钢心直径；

d_y ——弹头圆柱部直径；

t ——铅套厚度；

t_2 ——弹头壳厚度。

普通弹钢心的尺寸形状见表 7-3-3。

穿甲钢心 穿甲钢心是穿甲弹的主要零件，它的质量、尺寸、材料机械性能直接影响穿甲性能。穿甲钢心直径的确定方法与普通弹钢心的相同。穿甲钢心应选用高强度并要求有一定冲击韧性的材料。现在常用的材料是高碳工具钢。硬质合金的密度大、硬度高，用作穿甲钢心材料时穿甲效果好，但生产成本低。穿甲钢心材料对穿甲性能的影响见表 7-3-4。

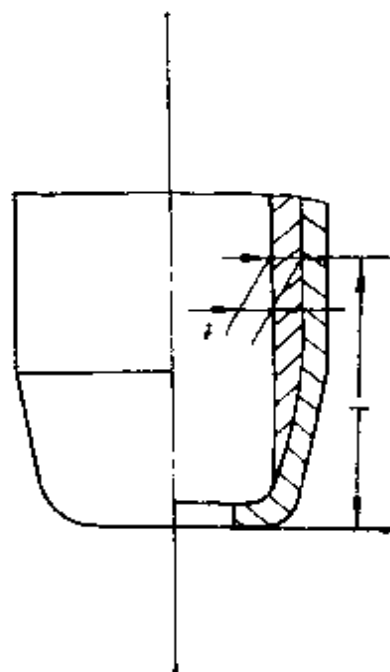
穿甲钢心质量的选取范围为

$$M_x = (0.4 \sim 0.65) M$$

式中 M_x 为穿甲钢心质量， M 为弹头质量。

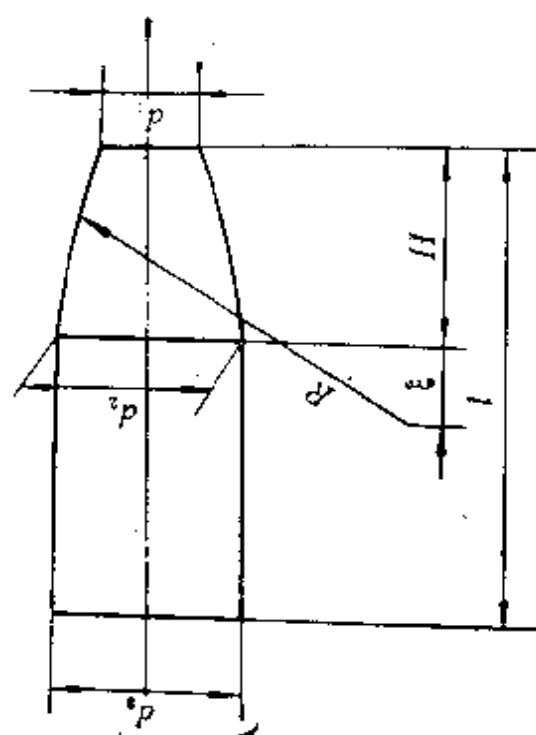
由穿甲计算公式(5-3-3)可看出，在钢板厚度一定时，为了减小穿透钢板所需的药速，可以采取减小穿甲钢心直径和增加穿甲钢心质量的方法。这两者之间虽然是矛盾的，但可通过增加穿甲钢心长度的办法来解决。当然，穿甲钢心过长容易折断，对穿甲

表7-3-2 各种枪弹的铅套厚度



弹种 铅套厚度	53式7.62 钢心弹	53式7.62 穿甲燃 烧弹	53式7.62 试射燃 烧弹	56式7.62 钢心弹	56式7.62 穿甲燃 烧弹	54式12.7 穿甲燃 烧弹	54式12.7 穿甲燃 烧弹	54式12.7 穿甲燃 烧弹	56式14.5 穿甲燃 烧弹	56式14.5 穿甲燃 烧弹	56式14.5 穿甲燃 烧弹	56式14.5 穿甲燃 烧弹	56式14.5 穿甲燃 烧弹
t (mm)	0.39	0.385	0.39	0.475	0.34	0.36	0.37	0.33	0.34	0.34	0.33	0.33	0.33
$\frac{t}{d}$	0.051	0.051	0.051	0.062	0.045	0.028	0.029	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023
距弹底距离 l (mm)	7	—	—	7	6.5	13	13	13	13	13	13	13	13

表7-3-3 普通弹钢心的尺寸



尺寸 (mm) 弹种	d_1	d_2	d_3	R	ξ	H	l
53式7.62钢心弹	3.86	6.09-0.09	6.12-0.09	38.1	0.05	8.1	23.6-0.62
56式7.62钢心弹	3.35	5.76-0.16	5.85-0.15	30.7	0.02	3.5	20.05-0.47

表7-3-4 不同材料的穿甲钢心的穿甲性能

弹种	穿甲钢 心材料	初速 v_{15} (m/s)	弹头质量 (g)	穿甲钢 心质量 (g)	弹轴与 钢板法 线夹角 (rad)	靶距 (m)	钢板 厚度 (mm)	穿甲率 (%)
56式14.5 穿甲燃烧 烧弹	T12A	980~995	63~64.8	40.2~41	0	300	20	≥ 80
56式14.5 穿甲燃烧 曳光弹	YG 6 或YT15	965~985	67~70.2	38.5~40.7	0	300	35	≥ 80
54式12.7 穿甲燃 烧弹	T12A	810~825	47.2~49.2	29.25~ 30.5	0	100	20	≥ 90
54式12.7 穿甲燃 烧弹	GCr 9	810~825	47.2~49.2	29.25~ 30.5	0	100	20	100
54式12.7 穿甲燃 烧弹	G60	810~825	47.2~49.2	29.25~ 30.5	0	100	20	90
54式12.7 穿甲燃烧 曳光弹	YG 6 或YT15	826~837	52~53	31.5~32.5	0	100	35	≥ 80

不一定有利，所以增加钢心长度有一定的限度。

钢心头部弧形对穿甲性能有一定影响。当弧形半径较大时（即头部较尖时）对穿甲有利，但穿甲时钢心尖部易损坏。当钢心强度不足时，头部弧形做得钝一些好，以防止钢心损坏和增加穿甲的可靠性。

钢心加工的粗糙度和热处理质量也影响穿甲率。加工粗糙度降低，一方面可减小摩擦，另一方面可消除钢心表面疵病，避免应力集中。实践证明，提高钢心尾部的韧性可防止穿甲时尾部断裂，有利于提高穿甲率。

曳光管 曳光剂通常是在曳光管内压制成型的，个别情况下是压成药柱后放入弹头内的。各种曳光管的构造见图 7-3-20。

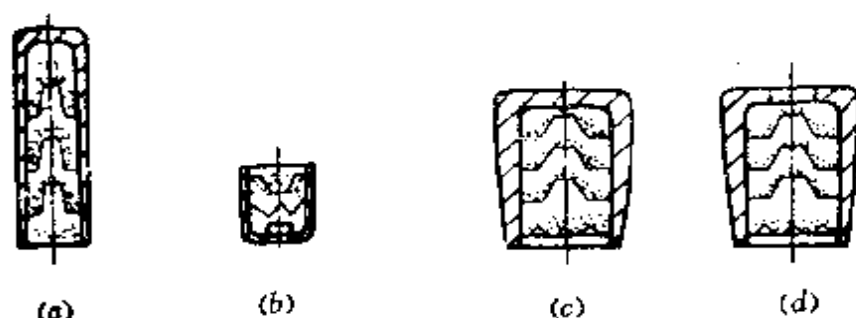


图7-3-20 曳光管的构造及种类

图 7-3-20(b) 是倒装的曳光管，底部冲孔，这种结构可以省去环形小垫。它的缺点是，曳光剂的热量更易传到前面的铅心或其它零件上，使铅熔化变形。

图 7-3-20(c) 是有尾锥的弹头的曳光管。

图 7-3-20(d) 是曳光管底部开孔，用以引爆前面的雷管，使爆炸弹自炸。

曳光剂不易点燃。为了点燃曳光剂，应给予一定的热冲量，所以在曳光剂的上层压有引燃剂。引燃剂表面压成凹凸不平的花纹，以增加点燃面积。

曳光管在燃烧过程中，会使弹头的质量和质心位置产生变化。实测的各种曳光弹头在静止燃烧前后质心位置的变化及静止和飞行时的燃烧时间见表 7-3-5。

试验表明，射击时由于离心力作用，可使曳光剂燃烧残渣紧贴管壳内壁。残渣飞出量要比静止时少，即在实际飞行条件下，弹头质量的减轻比静止时要小些。静止试验时，曳光剂残渣都集中在出口处，而旋转燃烧时残渣分布较均匀，所以静止燃烧后质心向前移动量比实际飞行时质心前移量要小。

曳光管的内腔深度是根据要求的曳光时间和曳光剂的燃烧速度确定的。曳光管的出口断面积与内腔断面积之比为 $0.7 \sim 1$ 时，可以得到良好的发光性能。为了避免曳光管出口结渣，曳光管的

表7-3-5 几种曳光弹静止燃烧前后质心位置的变化

枪弹名称	引燃剂和燃烧剂总质量 (g)	质量变化				质心位置变化				燃烧时间变化			
		燃 烧 前 质 量 (g)	燃 烧 后 质 量 (g)	减		燃 烧 前 质 心 距 弹 底 距 离 (mm)	燃 烧 后 质 心 距 弹 底 距 离 (mm)	前		静 止 燃 烧 时 间 (s)	飞 行 燃 烧 时 间 (s)	提 高	
				绝 对 值 (g)	相 对 值 (%)			绝 对 值 (mm)	相 对 值 (%)			绝 对 值 (s)	相 对 值 (%)
56式7.62 燃烧曳光弹	0.5	6.675	6.375	0.302	4.6	11.60	11.96	0.3	2.57				
53式7.62 曳光弹	1.07	9.64	9.05	0.57	5.9	18.19	19.24	1.05	5.81	4.6	3.6	1	21.7
54式12.7 穿甲燃烧曳光弹	1.8	44	42.55	1.45	3.3					4.4	3.7	0.7	15.9
56式14.5 穿甲燃烧曳光弹	2.3	59.26	57.76	1.5	2.53	27.99	28.57	0.58	2.07	4.8	3.3	1.5	31.3

内腔深度不宜过大。

确定了曳光管的内腔直径和药剂高度后，根据曳光剂的平均压药密度（表 7-3-6）确定曳光剂的质量。

为了使曳光剂里外层压药均匀一致，每次压药高度不应超过管壳内径的 1.5~2 倍。

表 7-3-6 各种曳光弹曳光剂的平均压药密度

性 能 弹 种	假密度 (g/cm^3)		曳光管内药剂 平均压药密度 (g/cm^3)
	曳光剂	燃烧剂	
53式7.62曳光弹	0.75		2.32
56式7.62曳光弹	0.75		2.0
54式12.7穿甲燃烧曳光弹	0.75	0.9	2.1
56式14.5穿甲燃烧曳光弹	0.75	0.9	2.4

三、脱壳弹的结构

在弹丸设计中，初速和射程往往是一对矛盾。例如，在装填条件一定时，提高初速的办法通常是减小弹丸质量，但在空气中飞行时，由于断面密度小，则会使速度下降得快；弹丸质量大，提高初速困难多，但它的断面密度大，保存速度的能力强，脱壳弹结构比较好地解决了初速和射程之间的矛盾。

脱壳弹是由小于口径的飞行部分和弹托构成。在膛内，弹托承受火药气体的作用，使质量轻的弹丸获得较高的初速；出膛口后，弹托脱落，具有良好弹形和很大断面密度的飞行部分飞向目标。由于飞行部分的存速能力好，故在较远的距离上仍能保持其作用效果（如穿甲弹的穿甲效果）。

在设计脱壳弹时，应注意合理地确定小于口径飞行部分的直径、质量和弹丸质量，它们直接影响着弹丸的内外弹道性能和对目标的作用效果。要正确设计飞行部分与弹托的结合方式，既要作用可靠，又要结构尽量简单。在平时弹头飞行部分和弹托是结

合成一体的（制锁状态）；但发射后，二者又必须在适当的时刻脱开（解脱状态）。弹丸的飞行部分与弹托彼此脱开，是借助一定的外力来实现的。因此，必须保证有足够的脱壳力，使弹丸脱壳迅速；同时还应注意在脱壳过程中不使弹头飞行部分受到大的干扰；另外，脱下的弹托不能对发射方人员造成危害。

根据脱壳弹的具体用途和要求，它有旋转脱壳弹和尾翼式脱壳弹。

1. 旋转脱壳弹

为了提高穿甲弹的穿甲能力（例如大口径机枪的穿甲弹），可以采用旋转脱壳穿甲弹的结构。这种穿甲弹的特点是弹头较轻，初速较高，穿甲钢心的断面密度和比动能较大，可以提高穿甲能力。在具体设计时应尽量增加穿甲钢心的质量，减小弹托的质量。但前者受到飞行稳定性的限制；后者受到膛内发射强度的限制。弹头飞行部分直径的确定也很重要。飞行部分直径过小，虽然弹丸质量小，初速大，但因有效质量太小，飞行部分的穿甲性能不会很高；反之，飞行部分直径过大，其比动能值有限，也不能体现出脱壳穿甲弹特有的优越性。实际上，由于脱壳弹设计是属于旧武器配新弹的设计，即武器已有，膛线缠度已定。因此，脱壳弹飞行部分的长度受急螺稳定性的限制；飞行部分直径 d_1 与弹丸直径 d 的比值，即 $\frac{d_1}{d}$ ，由最佳的穿甲效果来确定。

（1）飞行部分与弹托的结合方式

弹托设计是脱壳穿甲弹结构设计中的一个关键问题。平时穿甲钢心与弹托结合成一体，发射时弹丸在膛内能正确运动，出膛口时穿甲钢心从弹托中脱出并在空中稳定飞行，所有这些，基本都是通过一定形式的弹托来保证的。弹托虽然是个辅助部分，但其结构设计的好坏，直接影响弹丸的作用性能。

从结构形式来看，弹托结构可以是多种多样的，不存在某种固定的格式。对于大口径机枪脱壳穿甲弹的弹托，结构应尽量简单，作用可靠。

为了提高脱壳穿甲弹的穿甲性能，减少不必要的能量损失，弹托应尽可能地轻。为此，相应的弹托结构应紧凑，尽可能采用轻材料，但也要考虑到发射时弹托受力部分的强度。

穿甲钢心与弹托的结合方式与脱壳方式也十分重要。总的说来，结合方式平时应牢固可靠，脱壳前应解脱；脱壳应迅速利落，脱壳干扰小；脱壳后的弹托（或碎块）应满足安全性的要求。

图 7-3-21 为小口径机关炮上采用的旋转脱壳穿甲弹。弹托由上弹托和底弹托组成。上弹托由塑料制成，其上刻有 2~4 条沟槽。用上弹托包住穿甲弹心，可起到防水、防尘、防弹心脱落以及防止其它有害环境条件的影响和作用。底弹托由塑料制成，其上有塑料弹带，是用来保证弹丸在膛内正确地作直线运动和旋转运动。穿甲弹心是用高质量密度的金属和可燃金属制成，以便穿透钢板，并引燃板后的易燃物质。

上弹托与底弹托靠螺纹联接，穿甲弹心与弹托是滑配合。发射时，在火药气体压力作用下，弹托上的弹带嵌入膛线带动弹心旋转前进，使弹心获得飞行稳定所需的角速度。

弹丸飞出炮口后，上弹托在离心力的作用下裂成 2~4 瓣，平时，散落在一个与弹道成一定夹角的锥形面内。底弹托受空气阻力，飞行速度减慢，但仍沿着穿甲弹心的弹道继续前进，在距炮口一定距离处掉落。

图 7-3-22 所示为 12.7mm 脱壳穿甲弹的结构图。钨钢心的

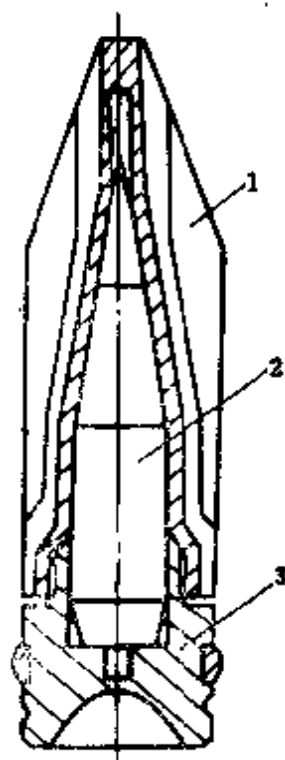


图 7-3-21 小口径机关炮用

旋转脱壳穿甲弹

1—上弹托；2—穿甲弹心；

3—底弹托。

尾端面有沟槽，发射时在惯性力的作用下，铝弹托的金属被挤入沟槽内，确保铝弹托将转速传给钨钢心。

在脱壳穿甲弹的结构设计完成后，还需要进行脱壳计算，弹心在膛内的旋转运动以及弹心飞行稳定性等验算。

(2) 脱壳计算

脱壳计算是结合脱壳弹的具体结构来进行的。对于图 7-3-21 所示的结构来说，在脱壳之前上弹托在离心力的作用下须先分裂成 2~4 瓣而飞散，这称之为结合状态的解除，但并不是脱壳动作的实现。

图 7-3-21 和 7-3-22 都是借助空气阻力来实现脱壳的。假设作用在弹心和弹托上的空气阻力分别为 R_1 和 R_2 (图 7-3-23)，则有

$$a_1 = \frac{R_1}{M_1}, \quad a_2 = \frac{R_2}{M_2}$$

式中 a_1 、 a_2 ——弹心和弹托的阻力加速度，

M_1 、 M_2 ——弹心和弹托的质量。

弹心从弹托中脱出的条件是

$$a_1 < a_2$$

由此可得空气阻力脱壳需满足的条件为

$$R_1 M_2 < R_2 M_1 \quad (7-3-4)$$

从上式可以看出，弹托的空气阻力越大，质量越小，或弹心的空气阻力越小，质量越大，就越有利于实现空气阻力脱壳。式中的空气阻力 R_1 和 R_2 之值，取决于弹心头部的外形尺寸和弹

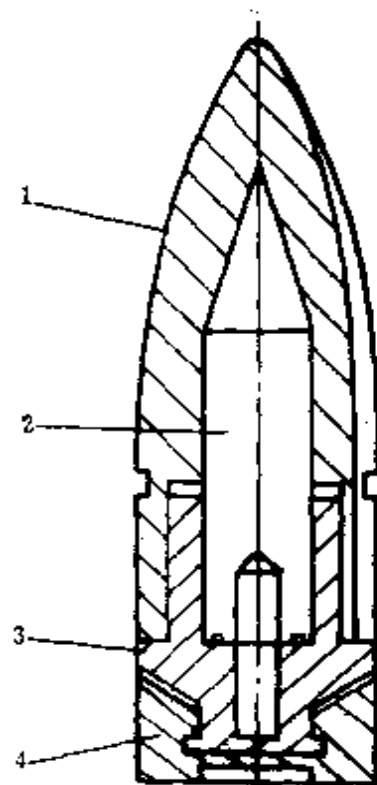


图 7-3-22 钨心脱壳穿甲弹

1—尼龙壳；2—钨钢心；
3—铝弹托；4—密封环。

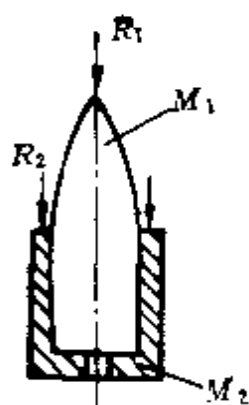


图7-3-23 空气阻力对弹心和弹托的作用

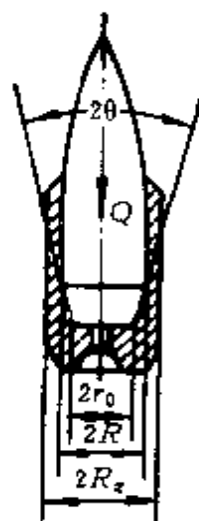


图7-3-24 弹心与弹托锥面接触

托的结构尺寸。由于空气阻力在脱壳过程中是不断变化的，目前还很难从理论上计算出来。因此，条件式(7-3-4)的最后定论往往需要通过风洞实验或射击试验验证。

这种脱壳方式的特点是：弹托部分脱离完整，不易造成对发射方前沿部队的伤亡威胁；脱壳力小，脱壳动作比较缓慢；为使弹心在脱壳时不在后部产生负压作用，在弹托中心处应开小孔；这种脱壳方式宜用塑料弹托，因在离心力作用下，这种弹托容易胀大，便于释放弹心。

(3) 弹心在膛内的旋转运动

弹托在膛内嵌入膛线产生旋转，对于图7-3-21的结构，弹托是通过摩擦力带动弹心一起转动，从而保证弹心的飞行稳定性。为了防止在膛内产生相对滑动，在设计时必须保证摩擦力矩大于弹心的惯性力矩。

先讨论弹心与弹托是锥面接触的情况（图7-3-24）。

作用在锥面上的法向压强为

$$p_N = \frac{Q}{S \cdot \sin \theta} \quad (7-3-5)$$

式中 Q ——弹心的轴向惯性力，

S —— 接触锥面的面积,

θ —— 半锥角。

锥面的面积为

$$S = \pi (R^2 - r_0^2) / \sin \theta$$

代入 (7-3-5) 式后得

$$p_N = \frac{Q}{\pi (R^2 - r_0^2)} \quad (7-3-6)$$

轴向惯性力 Q 可根据弹心与弹托结合的具体情况来求。对于图 7-3-24 的情况为

$$\begin{aligned} Q &= M_1 \frac{dv}{dt} - p_1 \pi r_0^2 \\ &= p \pi R_z^2 \left(\frac{M_1}{M} - \frac{p_1 r_0^2}{p R_z^2} \right) \end{aligned} \quad (7-3-7)$$

式中 M_1 —— 弹心质量;

M —— 弹丸质量;

p —— 火药气体压力;

p_1 —— 作用在弹心底部的压力 (可能为膛压, 也可能低于膛压)。

在弹托与弹心尾锥接触面上, 由于弹心惯性力的作用所产生的摩擦力矩为

$$\begin{aligned} M_{\text{fr}} &= \int_{r_0}^R r f p_N 2\pi r \cdot dr / \sin \theta \\ &= \frac{2}{3} \pi f \frac{p_N}{\sin \theta} (R^3 - r_0^3) \end{aligned}$$

式中 f —— 摩擦系数。

将 (7-3-6) 和 (7-3-7) 式代入上式得:

$$M_{\text{fr}} = \frac{2}{3} \pi f \frac{R^3 - r_0^3}{\sin \theta (R^2 - r_0^2)} p \pi R_z^2 \left(\frac{M_1}{M} - \frac{p_1 r_0^2}{p R_z^2} \right) \quad (7-3-8)$$

弹心旋转的惯性力矩 M_{rot} 为

$$M_{\text{rot}} = J_1 \frac{d\omega}{dt}$$

式中 A_1 ——弹心的极转动惯量;

$\frac{d\omega}{dt}$ ——弹丸在膛内旋转的角加速度, 对于等齐缠度膛线则

可表示为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{\eta R_*} \times \frac{dv}{dt}$$

而

$$\frac{dv}{dt} = \frac{p\pi R_*^2}{M}$$

将各值代入 $M_{\text{转}}$ 式最后得到:

$$M_{\text{转}} = A_1 \frac{p\pi^2 R_*}{\eta M} \quad (7-3-9)$$

式中 η ——膛线的缠度。

弹托与弹心之间旋转力矩的传递条件为

$$M_{\text{弹托}} > M_{\text{转}}$$

将 (7-3-8) 和 (7-3-9) 式代入传递条件中, 则得到弹心在膛内正常旋转运动的条件:

$$\frac{2}{3} f \left(\frac{R^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \right) \left(\frac{M_1}{M} - \frac{p_1 r_0^2}{p R_*^2} \right) > \frac{A_1 \pi}{R_* \eta M} \sin \theta \quad (7-3-10)$$

或

$$\eta > \frac{3}{2} \times \frac{\sin \theta}{f} \times \frac{A_1 \pi}{M \cdot R_*} \times \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \times \frac{1}{\left(\frac{M_1}{M} - \frac{p_1 r_0^2}{p R_*^2} \right)} \quad (7-3-11)$$

若取 $p_1 = p$, 则上两式变为:

$$\frac{2}{3} f \left(\frac{R^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \right) \left(\frac{M_1}{M} - \frac{r_0^2}{R_*^2} \right) > \frac{A_1 \pi}{R_* \eta M} \sin \theta \quad (7-3-12)$$

或

$$\eta > \frac{3}{2} \times \frac{\sin \theta}{f} \times \frac{A_1 \pi}{M R_*} \times \frac{R^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \times \frac{M R_*^2}{M_1 R_*^2 - M r_0^2} \quad (7-3-13)$$

若 $\theta = 90^\circ$ ，即弹心与弹托是端面接触的情况，在这种情况下弹心在膛内正常旋转运动的条件为

$$\frac{2}{3} f \left(\frac{R^3 - r_0^3}{R^2 - r_0^2} \right) \left(\frac{M}{M_1} - \frac{r_0^2}{R_x^2} \right) > \frac{A_1 \pi}{R_x \eta M} \quad (7-3-14)$$

或

$$\eta > \frac{3}{2} \times \frac{1}{f} \times \frac{A_1 \pi}{M R_x} \times \frac{R^2 - r_0^2}{R^3 - r_0^3} \times \frac{M R_x^2}{M_1 R_x^2 - M r_0^2} \quad (7-3-15)$$

比较 (7-3-12) 和 (7-3-14) 式可以看出，前式的情况条件更容易得到满足。因此，从弹心在膛内获得可靠的旋转运动的观点出发，锥面接触的结构是可取的。

对于图 7-3-22 所示的结构，因射击后铅弹托与弹心之间靠摩擦及嵌入沟槽中的金属带动，这时需对金属挤入沟槽及强度进行计算。

2. 尾翼式脱壳弹

脱壳弹采用旋转稳定的方式，弹心的长细比不能太大，否则难以保证飞行稳定。因此增大断面密度的办法往往是用高密度材料（例如碳化钨）做弹心。采用尾翼式脱壳弹，弹长不受稳定性限制，可采用长细比较大的弹心，获得较大的断面密度和碰击比动能。对于穿甲弹来说，获得了较大的碰击比动能，可提高穿甲性能。

(1) 长细比问题

对于尾翼式脱壳穿甲弹来说，其长细比从穿甲作用来看增大长细比对穿甲有利。由公式 (5-3-1) 知道一般形式的穿甲公式可写成如下的形式，

$$v_s = K \frac{d^\alpha}{M^\beta} b^\gamma$$

β 值一般取 0.5，这样 $M^{0.5} v_s$ 取决于碰击动能。由式中可以看出来，不论 α 、 γ 取何值，在碰击动能一定时，弹径缩小穿甲深度会增加。

在一定条件下，缩小弹径可以提高穿甲深度看来是符合客观

规律的。从物理意义上可以这样解释：在弹头细长的情况下，能量更加集中了，而破坏钢甲的范围也缩小了，故破坏钢甲所消耗的动能要减小。这样一来，穿甲深度必然可以提高。但如果把有条件的公式加以无条件的推广，必然得出荒谬的结论：弹丸趋于无限细而穿甲深度变得无穷大。所以，弹丸细长到一定程度之后，穿甲深度便不会再增大，相反要下降。此外，过分细长的弹丸在碰击钢甲时，可能出现弯曲、折断或容易飞跳等不利情况。穿甲的最佳长细比需由试验来确定。相对于不同的穿甲厚度和倾角，其值可能也是不同的。

长细比大的尾翼式脱壳穿甲弹要注意它在发射时的强度，特别是弹心与弹托联接处的强度，尤其是与卡瓣结合的齿部，由于齿槽的削弱和应力集中，是最容易折断的地方。

在理论上增大长细比可以减小空气阻力。但尾翼阻力约占总阻力的一半，并且在有章动角的情况下，增长弹丸，阻力也要增大。所以空气阻力由于弹丸直径减小而减小的量是有限的。

另外，过分细长的弹体稳定性不好。因为全弹质心相对位置要后移（尾翼质量不变时），全弹赤道转动惯量的增大也使稳定性变差。稳定性差的弹丸，射弹散布也必然要大。

（2）弹托

弹托在膛内起传力和定心作用，把火药气体作用在弹托面积上的力传给弹丸，使较轻的弹丸获得很大的加速度，以便在膛口获得较高的初速。

出膛口后，弹托脱落，弹心具有较大的断面密度，大大提高了弹心保存速度的能力。对穿甲弹来说，就使弹心碰击钢甲时有较大的比动能，另外高的着速对防止跳弹有利，较细长的弹心穿透钢甲所需的能量较小。

与旋转脱壳弹相似，弹托会给尾翼式脱壳弹带来一些问题。目前弹托的结构设计主要还是依靠试验来摸索。

在尾翼式脱壳弹上一般采用分瓣式弹托（卡瓣）。下面研究一下分瓣式弹托在膛内的受力情况。分瓣式弹托按受力情况不同可

以有两种：一种是抱紧式，即在火药气体压力作用下，卡瓣能抱紧弹体（图 7-3-25）；另一种是外翻式，即在火药气体压力下，卡瓣在膛内有外翻的趋势，但受到膛壁的约束（图 7-3-26）。

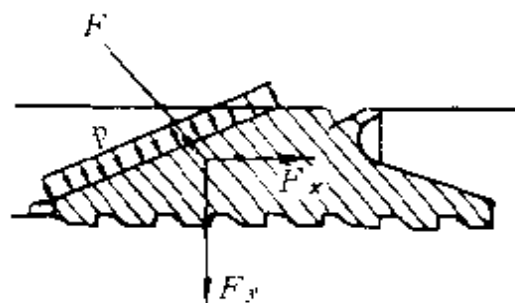


图7-3-25 卡瓣径向抱紧示意图



图7-3-26 外翻式卡瓣

这种依靠火药气体压力使卡瓣抱紧弹体的结构，必须采取密封措施使火药气体不能钻到卡瓣的间隙之中，才能保证有抱紧力存在。一旦火药气体钻入，卡瓣就可能外翻。外翻式卡瓣在卡瓣的外缘存在膛壁的反力。

卡瓣抱紧弹体可以使齿部受力均匀，卡瓣的发射强度好，但脱壳可能比较困难些。而外翻式卡瓣，在膛内的约束解除时即开始脱壳，但这种卡瓣在膛内受力情况不好，缝隙中漏气对弹膛的冲刷和外翻压力对膛壁的磨损作用大。

弹托的位置应选择在弹丸质心的上方。由图 7-3-27 可以看

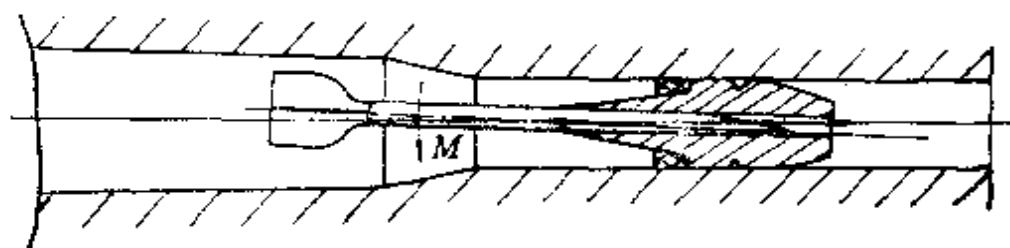


图7-3-27 弹丸在膛内的摆动

出，作用在质心上的惯性力产生了一个使弹丸回到平衡位置的力矩。当弹丸进膛后存在一定程度歪斜的情况下，这个平衡力矩有利于弹丸的正直前进。这样看来，弹托的位置与弹丸质心位置的

距离大些，对弹丸在膛内正确运动是有利的。某些脱壳弹就采用弹托位于弹丸头部的结构（图 7-3-28），这种结构对缩短全弹的长度也是有利的。

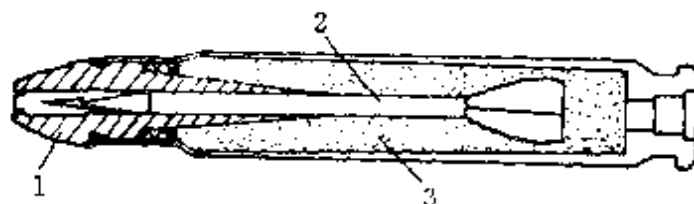


图7-3-28 小箭弹示意图

1—弹托；2—小箭；3—发射药。

另外，弹托出膛口后，火药气体即大量喷出，膛压迅速下降。若增大尾翼和弹托之间的距离，有利于减小后效期中作用在尾翼上的火药气体压力，对减小起始章动角有利。此外，在脱壳时，弹托与尾翼相碰的可能性减小。所以适当增大导引部长度对改善射弹散布有利，但对减小空气阻力和飞行稳定性不利。

所以弹托位置的选择需综合考虑膛内运动、膛外运动和射弹散布等因素，主要通过试验来确定。

（3）脱壳

弹托除了要保证质量小、强度高之外，还必须保证脱壳顺利。如果有时脱，有时不脱，或有时早脱，有时晚脱，则射弹散布肯定差。

脱壳可以利用后效期火药气体的作用来脱壳或利用空气阻力脱壳。

弹丸出膛口后在后效期内火药气体速度超过弹丸速度，继续推动弹丸前进。这个时期的作用时间很短，压力衰减得很快，但对卡瓣的作用力还是相当大的，同时高压气体迅速向侧方扩散有利于卡瓣的脱壳。为了充分利用火药气体的后效作用，在卡瓣后部可以设计成凹形槽的形式来增大侧向力。弹托离开膛口后，火药气体压力的合力产生了一个外翻力矩，使卡瓣绕最前一齿向外翻转，火药气体向侧方膨胀使卡瓣外翻得更迅速（图 7-3-29）。

后效期结束后，弹丸立即遇到迎面高速空气流的冲击，这个

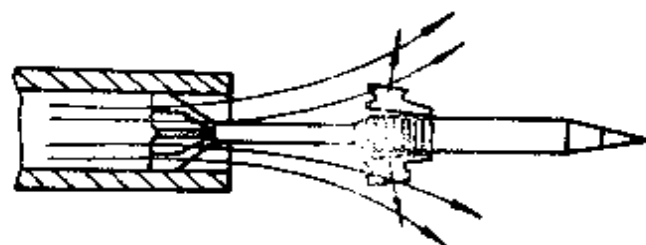


图7-3-29 卡瓣在火药气体
作用下脱壳

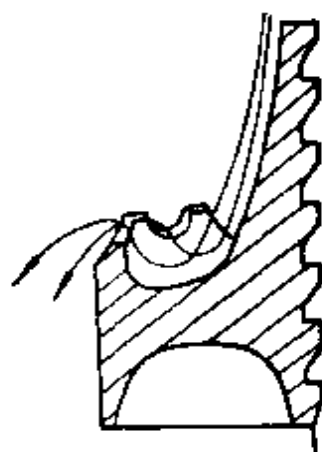


图7-3-30 花瓣形迎
风槽的作用

力也是相当大的。卡瓣的受阻面积比弹体大，质量轻，所以就相对于弹体向后运动。高速气流流过弹托时受阻，气流要向外折转，与在后效期中的作用一样，气流作用在卡瓣前部的凹形槽上，也产生一个向外的侧向力，有利于卡瓣继续向侧方运动（图7-3-30）。

空气阻力脱壳在旋转稳定的脱壳弹上用得较多，也便于实现，对弹体干扰也很小。在卡瓣式弹托的尾翼式脱壳弹中，带锥形尾部的卡瓣结构也是主要依靠空气阻力脱壳。这种结构的弹托，在后效期中，火药气体难以使弹托分离，只有在空气阻力作用下，卡瓣沿弹体表面滑脱。为了增大侧向分力，在卡瓣前部可设计凹槽结构（图7-3-31）。

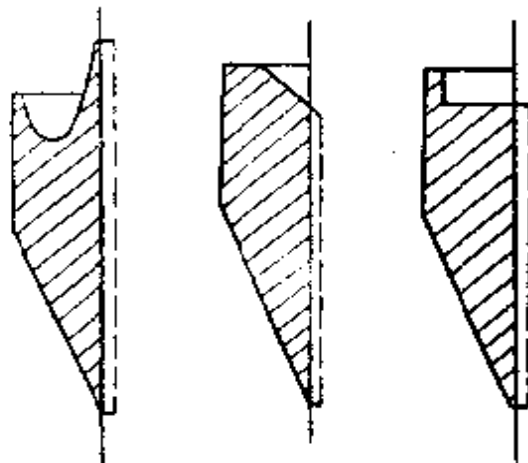


图7-3-31 带迎风槽的卡瓣

为避免这种弹托与尾翼相碰而影响射弹散布，可将卡瓣的位置与尾翼的空隙处对正（例如四块卡瓣与四片尾翼的空隙处对正）。

第四节 炸药和引信的选择

一、炸药的选择

除实心穿甲弹外，大部分炮弹弹丸中都装有炸药。选择炸药的原则是：

(1) 炸药的威力和猛度应适合弹丸性能的要求，如榴弹一般选用 TNT 或 B 炸药，破甲弹一般选用以黑索金为主的混合炸药；

(2) 理化性能稳定（不吸湿，与弹体材料有相容性，挥发性小，热安定性好），能长期贮存，不变质；

(3) 原材料丰富，价格便宜，生产和装填方便。

目前常用的炸药有：

(1) 梯恩梯——有较大的威力，安全可靠，理化性能安定，可以长期贮存，生产价廉，是应用最广泛的军用炸药。梯恩梯熔点较低，装填方法可以是螺装、压装和铸装。

(2) 钝化黑索金——黑索金因其机械感度较大，一般都予以钝化处理（加入适量的钝化剂），这种炸药一般采用压装。

(3) 黑铝炸药——在黑索金中加入适当的铝粉和钝感剂，以增加爆热，增强炸药的燃烧作用。

(4) 梯黑混合炸药——将梯恩梯与黑索金按一定的比例（如 4:6，5:5 等）混合后，可以提高炸药的威力与猛度，B 炸药即为梯黑 50/50 混合炸药，常作为榴弹的主要炸药。

(5) 硝酸铵炸药——这种炸药的威力、猛度都较低，但其原料丰富，制造容易，价格便宜，在战时常作为代用炸药。

二、引信的选择

引信的作用在于控制弹丸在弹道某一点上适时、准确地引爆弹体，而产生最好的作用效果。

在选择引信时,应当首先选择在装备中或生产中现有的类型。只有当现有引信不能满足要求时,才提出设计新引信。

在选择现有引信时,应当考虑到下列几点:

- (1) 引信的类型必须与设计弹丸的类型相配合;
- (2) 引信的作用时间必须满足弹丸适时作用的要求(适时性要求);
- (3) 在配用弹丸中要确保配用的引信发射时安全,能可靠地解除保险,适时引爆弹体;
- (4) 引信的起爆冲量应与弹丸的炸药量相适应,保证起爆完全;
- (5) 引信的外形和联接部尺寸应与弹丸外形螺口部尺寸相适应。

下面列举几种弹丸对引信的一些特殊要求。

1. 小口径高射榴弹着发引信的选择

小口径高射榴弹一般应在击中飞机后于飞机内部爆炸,这样可获得最好的杀伤爆破效果,因此要求引信具有一定的短延期作用(一般为 $0.001\sim 0.007\text{ s}$),以保证弹丸适时起爆。

另外,引信的着发灵敏度要高,即使碰到飞机薄弱的部分也能可靠作用。

为了保证我方阵地安全,引信应具有远距离解除保险装置和自炸机构,使弹丸射出炮口后,万一碰到炮口附近遮蔽物时不会发生作用。同时在火力空域内未击中目标时,能在空中自行爆炸。

2. 地面榴弹引信的选择

地面榴弹的杀伤作用主要为了消灭暴露的有生力量,要求当应用着发引信时弹丸落地即炸,使破片不致大量钻入土内。因此,引信应具有较高的瞬发性(作用时间在 0.001 s 以下)。对于杀伤作用用近炸引信效果更好。

由于大部分地面榴弹通常都兼有杀伤、爆破两重作用。即使单一作用的榴弹,由于射击方式的不同(例如杀伤榴弹的着发射击或跳弹射击,爆破弹以不同射角射击不同性质目标)也要求同

一引信具有多种时间装定。

3. 破甲弹引信的选择

破甲弹引信要求有高度的作用迅速性，这样可使弹丸的头部在碰碎之前，保证有利炸高和防止在大着角下偏转和滑移的条件下迅速起爆弹丸。

用于破甲弹的引信有两类，机械引信和压电引信。破甲弹机械引信现只用于初速较低的无坐力炮破甲弹和反坦克枪榴破甲弹上。

由于现代破甲弹的发展，初速和直射距离不断提高，机械引信已不能满足要求，而压电引信的瞬发度比较高，即引信在数十微秒时间内就能起爆弹丸（机械引信是数百微秒），所以压电引信在炮弹、航弹或火箭弹的破甲战斗部上得到广泛的使用。

下面简单谈一下引信的外形和内部联接尺寸的选择。

引信的外形应与弹丸的外形相一致，否则会引起弹丸阻力的增加。我国引信的外形还没有确定的标准，但是根据弹丸口径的不同，其外形尺寸多为平顶截锥体外形、圆顶截锥体外形等。

引信与弹口螺纹尺寸，我国有多种规格，例如M26.56×10，M26.96×1.5，特27×1.5，M33×2，特M36.14×10等等，都采用右螺纹。引信与弹口的联接螺纹的类型也较多，需要标准化。

第八章 结构特征量计算

弹丸的结构特征量是用来表示弹丸结构基本特点的一些参量, 对于枪弹弹头来说它一般包括:

(1) 弹头的口径 d (mm) 和质量 M (g);

(2) 弹头的相对质量 $C_m = M/d^3$ (kg/m³);

(3) 弹头质心至弹底端面的距离 x_c (mm);

(4) 弹头质心至弹底端面的距离与弹头长度的比值 $\frac{x_c}{l_t}$ (%) ;

(5) 弹头的极转动惯量 A (g·cm²);

(6) 弹头的赤道转动惯量 B (g·cm²)。

对于炮弹弹丸来说, 除实心穿甲弹外, 大部分弹体内都有装填物, 这样它的结构特征量将包括:

(1) 弹丸的口径 d (mm) 和质量 M (kg);

(2) 弹丸的相对质量 $C_m = M/d^3$ (kg/dm³);

(3) 弹丸装填物的质量 M_o (kg);

(4) 装填物的相对质量 $C_o = M_o/d^3$ (kg/m³);

(5) 弹丸的装填系数 $\alpha = \frac{M_o}{M}$ (%);

(6) 弹壁在圆柱部上的平均厚度 t_b (mm);

(7) 弹丸质心至弹底端面的距离 x_c (cm);

(8) 弹丸的极转动惯量 A (kg·m²);

(9) 弹丸的赤道转动惯量 B (kg·m²)。

弹丸(头)的结构特征量是弹丸威力计算、强度计算和飞行稳定性计算的必要数据。在弹丸设计中通常要确定的结构特征量有: 弹丸质量 M 、装填物质量 M_o 、质心位置 x_c 、极转动惯量 A

和赤道转动惯量 B 。这些参量的计算是在弹丸尺寸、各零件材料和尺寸及装填物已选定的基础上进行的。计算弹丸结构特征量的方法很多, 这里介绍基本计算法, 是以弹丸的名义尺寸进行计算。

第一节 基本计算法

图 8-1-1 示出了一般枪弹弹头和炮弹弹丸外形和内腔的几何形状, 由图中可以看出它们一般由三种几何形体组成: 截头圆锥体、圆柱体、母线为圆弧的回转体。圆柱体可认为是截头圆锥体的一种特殊形式, 因此, 它们可认为是由截头圆锥体和母线为圆弧的回转体二种基本形体组成。

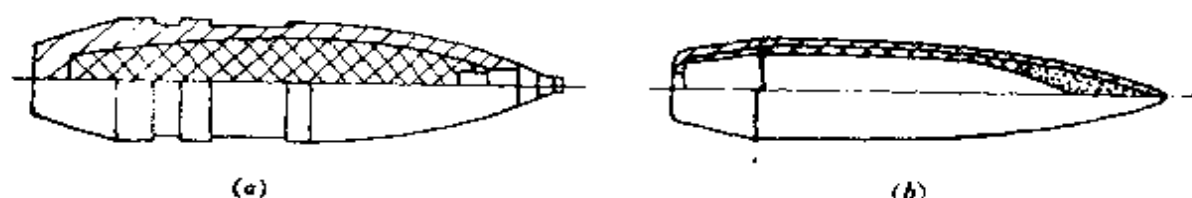


图8-1-1 弹丸外形和内腔的几何形状

基本计算法是将弹丸划分为许多单元部分, 每个单元是以其外形轮廓和内腔几何形状的特点划分的, 这些形状不外乎圆柱体、截头圆锥体和母线为圆弧的回转体, 分别对各单元部分进行计算, 然后相加得出整个弹丸的结构特征量。

下面介绍截头圆锥体和母线为圆弧的回转体二种基本形体结构特征量的计算公式。

在实际计算时, 为了清楚和便于检查, 常列成表格形式。

一、截锥体

1. 体积 V_0

若截锥体的尺寸如图 8-1-2 所示, 则其体积为:

$$V_0 = \frac{1}{3} \pi (r^2 + rr_0 + r_0^2) h$$

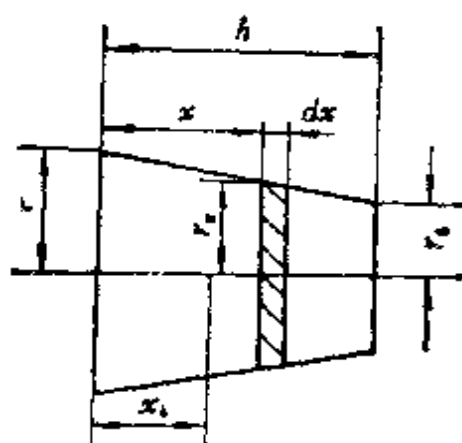


图8-1-2 截头圆锥体

令

$$\rho = \frac{r_0}{r} \quad (8-1-1)$$

$$\alpha = \frac{1}{3} \pi (1 + \rho + \rho^2) \quad (8-1-2)$$

则

$$V_* = \alpha r^2 h \quad (8-1-3)$$

α 值可根据 ρ 值在附表 1 中查到。

2. 形心到大底的距离 x_c

$$X_* = \frac{1}{V_*} \int_0^{V_*} x dv = \frac{1}{4} \times \frac{1 + 2\rho + 3\rho^2}{1 + \rho + \rho^2} h \quad (8-1-4)$$

令

$$\beta = \frac{1}{4} \times \frac{1 + 2\rho + 3\rho^2}{1 + \rho + \rho^2} \quad (8-1-5)$$

则

$$x_c = \beta h \quad (8-1-6)$$

β 值可根据 ρ 值在附表 2 中查到。

3. 极转动惯量 (或称轴向转动惯量) A_*

极转动惯量是指绕弹丸轴线的转动惯量。

$$A_* = \int_0^{V_*} \frac{r_x^2}{2} dV_* = \frac{3}{10} \left(-\frac{1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \rho^4}{1 + \rho + \rho^2} \right) V_* r^2 \quad (8-1-7)$$

令

$$\mu = \frac{3}{10} \left(\frac{1 + \rho + \rho^2 + \rho^3 + \rho^4}{1 + \rho + \rho^2} \right) \quad (8-1-8)$$

则

$$A_{\phi} = \mu V_{\phi} r^2 \quad (8-1-9)$$

μ 值可根据 ρ 值在附表 3 中查到。

4. 赤道转动惯量 B_{ϕ}^*

赤道转动惯量是指绕物体赤道平面的轴(此轴通过物体形心, 并垂直于物体的对称轴)的转动惯量。

求截锥体的赤道转动惯量, 需分两步进行。

第一步先求出整个截锥体绕端面轴 Z 的转动惯量 B_{ϕ}^* (图 8-1-3)。根据平行移轴定理可以把 B_{ϕ}^* 的式子写为

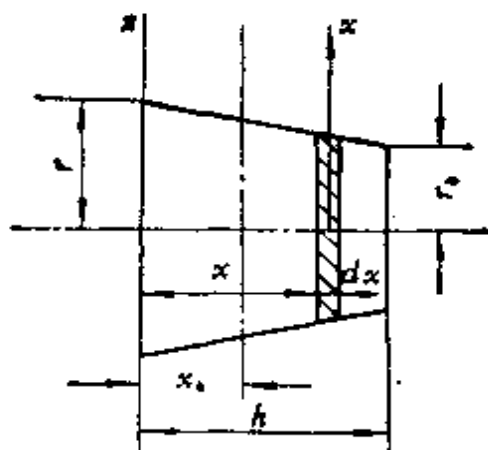


图8-1-3 截锥体的赤道转动惯量

$$B_{\phi}^* = \int_0^{B_{\phi}^*} dB_{\phi}^* = \int_{B_{\phi}^*} (dB_{\phi} + x^2 dV_{\phi})$$

式中的 dB_{ϕ} 为极薄圆片自身的赤道转动惯量

$$dB_{\phi} = \frac{1}{2} dA_{\phi}$$

故

$$\begin{aligned} B_{\phi}^* &= \int_0^{A_{\phi}} \frac{1}{2} dA_{\phi} + \int_0^{V_{\phi}} x^2 dV_{\phi} \\ &= \frac{A_{\phi}}{2} + V_{\phi} h^2 \left[\frac{1 + 3\rho + 6\rho^2}{10(1 + \rho + \rho^2)} \right] \end{aligned} \quad (8-1-10)$$

第二步应用平移轴定理, 将截锥体的转动惯量由端面的 Z 轴移到通过形心的赤道轴上去, 则得截锥体的赤道转动惯量:

$$B'_{\phi} = B''_{\phi} - V_{\phi} \cdot x_{\phi}^2 = \frac{A_{\phi}}{2} + \left[-\frac{3}{80} \times \frac{(1+\rho)^4 + 4\rho^2}{(1+\rho+\rho^2)^2} \right] V_{\phi} h^2 \quad (8-1-11)$$

令

$$v = \frac{3}{80} \times \frac{(1+\rho)^4 + 4\rho^2}{(1+\rho+\rho^2)^2} \quad (8-1-12)$$

则

$$B'_{\phi} = \frac{A_{\phi}}{2} + v V_{\phi} h^2 \quad (8-1-13)$$

v 值可根据 ρ 值在附表 4 中查到。

5. 截锥体对通过弹丸质心, 与弹轴垂直的轴线的转动惯量 B_i

$$B_i = B'_{\phi} + V_{\phi} l^2 \quad (8-1-14)$$

l 为弹丸质心与截锥体形心之间的距离 (图 8-1-4)。

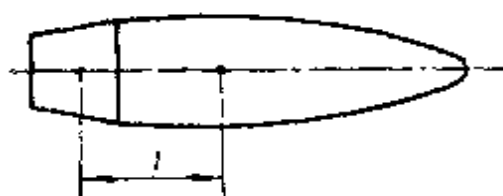


图 8-1-4 弹丸质心与截锥体形心间的距离

二、圆弧回转体

1. 圆弧回转体的体积 V_{ϕ}

圆弧回转体的符号如图 8-1-5 所示, 则其体积为

$$V_{\phi} = \pi \int_0^h r_x^2 dx = \pi h \left[\frac{2R^2 + J^2}{3} - \frac{JR^2}{h} \arcsin \frac{h}{R} \right]$$

取

$$R = nr$$

则

$$J = (n-1)r$$

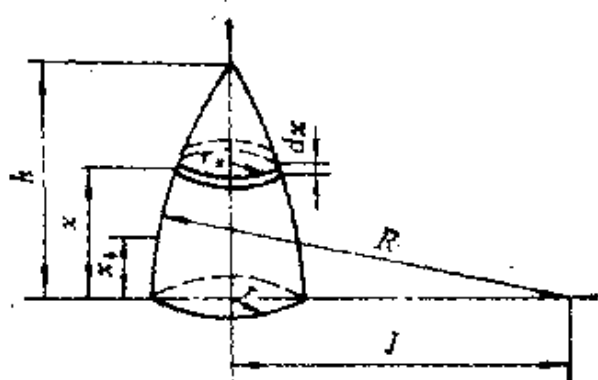


图8-1-5 圆弧回转体

$$h = \sqrt{2n-1} r$$

所以

$$V_0 = \pi h r^2 \left[\frac{2n^2 + (n-1)^2}{3} - \frac{(n-1)n^2}{\sqrt{2n-1}} \times \arcsin \frac{\sqrt{2n-1}}{n} \right]$$

取

$$\alpha'_0 = \frac{2n^2 + (n-1)^2}{3} - \frac{(n-1)n^2}{\sqrt{2n-1}} \arcsin \frac{\sqrt{2n-1}}{n} \quad (8-1-15)$$

$$\alpha' = \pi \alpha'_0 \quad (8-1-16)$$

则

$$V_0 = \alpha' r^2 h \quad (8-1-17)$$

α' 值可根据 $n \left(n = \frac{R}{r} \right)$ 或 $\rho \left(\rho = \frac{h}{r} \right)$ 值在附表 5 中查到。

2. 形心距底部的距离 x_0

$$x_0 = \frac{\pi}{V_0} \int_0^h r_x^2 X dx = \frac{4n-1}{12(2n-1)} \times \frac{1}{\alpha'_0} h$$

取

$$\beta' = \frac{4n-1}{12(2n-1)} \times \frac{1}{\alpha'_0} \quad (8-1-18)$$

则 $x_{\phi} = \beta' h$ (8-1-19)

β' 值可根据 n 或 ρ 值在附表 5 中查到。

3. 极转动惯量 A_{ϕ}

$$A_{\phi} = \int_0^h \frac{1}{2} \pi r_x^4 dx = \frac{3n^2 + 4(n-1)^2}{4} V_{\phi} r^2 - \frac{7}{30} n h^5$$

因为

$$h = \sqrt{2n-1} r$$

$$V_{\phi} = \alpha'_0 \pi h r^2$$

取

$$\mu' = \frac{3n^2 + 4(n-1)^2}{4} - \frac{7}{30} \times \frac{(2n-1)^3}{\alpha'_0} \quad (8-1-20)$$

则

$$A_{\phi} = \mu' V_{\phi} r^2 \quad (8-1-21)$$

μ' 值可根据 n 或 ρ 值在附表 5 中查到。

4. 赤道转动惯量 B'_{ϕ}

为了求整个圆弧回转体的赤道转动惯量, 需分两步进行。第一步先求出整个圆弧回转体绕其基面上的轴 Z 的转动惯量 B'_{ϕ} (图 8-1-6)。

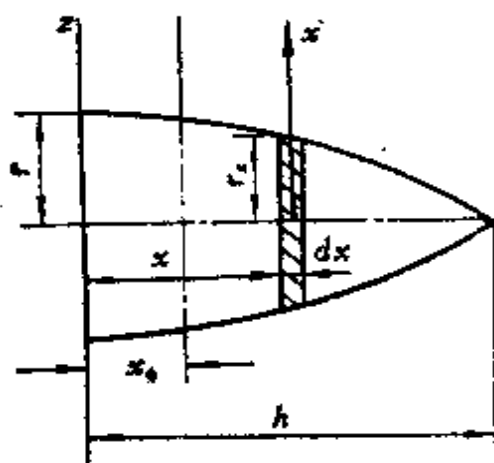


图8-1-6 圆弧回转体的赤道转动惯量

$$B'_{\phi} = \frac{A_{\phi}}{2} + \pi \int_0^h x^2 r_x^2 dx = \frac{A_{\phi}}{2} + \frac{R^2}{4} V_{\phi} - \frac{\pi}{2} \left[\frac{2}{5} h^5 - \frac{5R^2 - 2J^2}{6} h^3 + \frac{R^2 - J^2}{2} R^2 h \right] \quad (8-1-22)$$

第二步应用平行移轴定理, 将圆弧回转体的转动惯量由基面的 Z 轴移到通过形心的赤道轴上, 即得到圆弧回转体的赤道转动惯量 B'_ϕ ,

$$\begin{aligned} B'_\phi &= B_\phi - V_\phi x_\phi^2 \\ &= \frac{A_\phi}{2} + \left[\frac{\mu'}{7(2n-1)} + \frac{1}{7} - \beta'^2 \right] V_\phi h^2 \end{aligned}$$

取

$$v' = \frac{\mu'}{7(2n-1)} + \frac{1}{7} - \beta'^2 \quad (8-1-23)$$

则

$$B_\phi = \frac{A_\phi}{2} + v' V_\phi h^2 \quad (8-1-24)$$

v' 值可根据 n 或 ρ 值在附表 5 中查到。

5. 圆弧回转体对通过弹丸质心并与弹轴垂直的任一轴线的转动惯量 B_ϕ 。

$$B_\phi = B'_\phi + V_\phi l^2 \quad (8-1-25)$$

式中 l 为圆弧回转体的形心与弹丸质心间的距离 (图 8-1-7)。

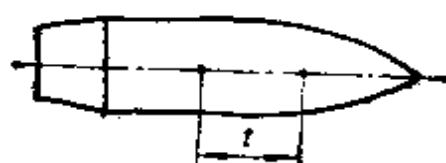


图8-1-7 圆弧回转体形心与弹丸质心间的距离

三、圆弧回转体母线半径的圆心有下移量时结构特征量的计算

在这种情况下, 可将圆弧回转体分成三段 (图 8-1-8) 计算, 也可将弧形部分成若干小段 (图 8-1-9), 每段按截锥体计算。

图 8-1-8 示出了圆弧回转体的分段方法: 先将圆弧回转体的弧形沿弹轴向大底方向延长 ξ 距离, 这样圆心就与新的大底在同一平面上。若是弹尖端直径不为零的情况, 可将弧形向弹尖方向

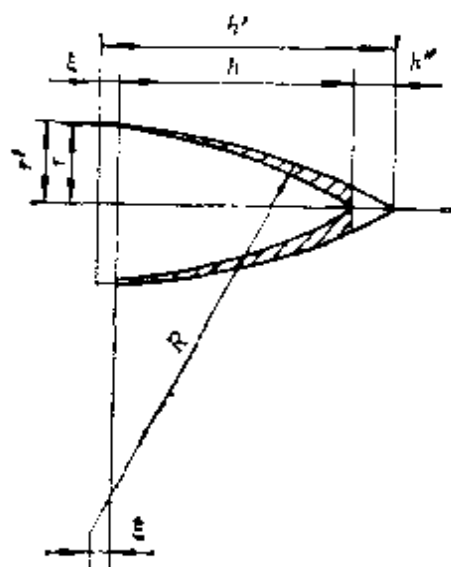


图8-1-8 有下移量时结构特征量计算

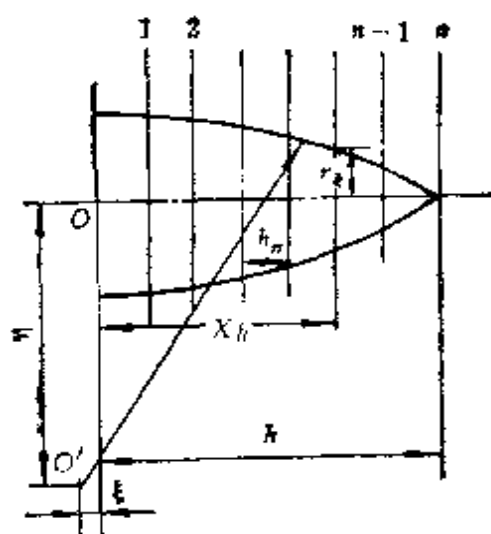


图8-1-9 分段计算弧形部

延长至与弹轴相交。

计算时，首先计算高度为 h' 的弧形回转体的特征量(无下移量)，然后减去大头新增加的宽为 ξ 的那一部分和新增加的高为 h'' 的小尖锥的特征量，即可得到圆弧半径的圆心不在基面上、弹尖直径又不为零、高为 h 的圆弧回转体的特征量。

图 8-1-9 所示是将弧形部分成若干小段，每段按截锥体计算，然后相加得最后结果。为了保证必要的计算精度，分段应使

$$h_n \leq (0.03 \sim 0.04) R$$

弧形体在 X_k 处的半径为

$$r_k = \sqrt{R^2 - (X_k + \xi)^2} - \eta \quad (8-1-26)$$

式中 R ——圆弧回转体母线的曲率半径，

ξ 、 η ——圆弧回转体母线曲率中心的坐标。

再有一种方法是用修正系数来修正有下移量 ξ 时产生的影响。图8-1-10中，有下移量 ξ 、高度为 h 的弧形回转体的特征量用下式计算：

$$V_\phi = K_1 \alpha' r^2 h \quad (8-1-27)$$

$$x_\phi = K_2 \beta' h \quad (8-1-28)$$

$$A_\phi = K_3 \mu' V_\phi r^2 \quad (8-1-29)$$

$$B_{\text{总}} = K_4 \left(\frac{A_0}{2} + v' V_0 h^2 \right) + V_0 l^2 \quad (8-1-30)$$

修正系数 K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 可由曲线图 8-1-11~8-1-14 中查出，图中 ξ 以口径倍数表示。

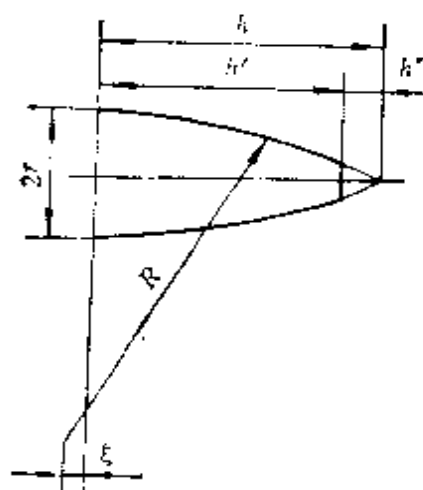


图8-1-10 弧形
回转体下移量 ξ

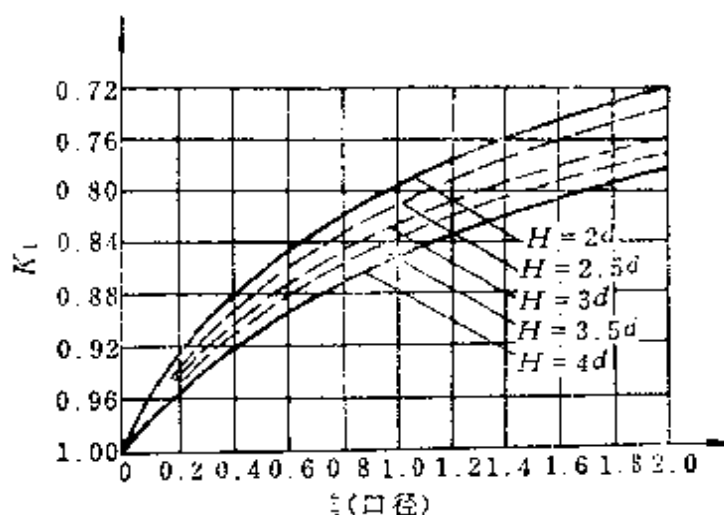


图8-1-11 修正系数 K_1

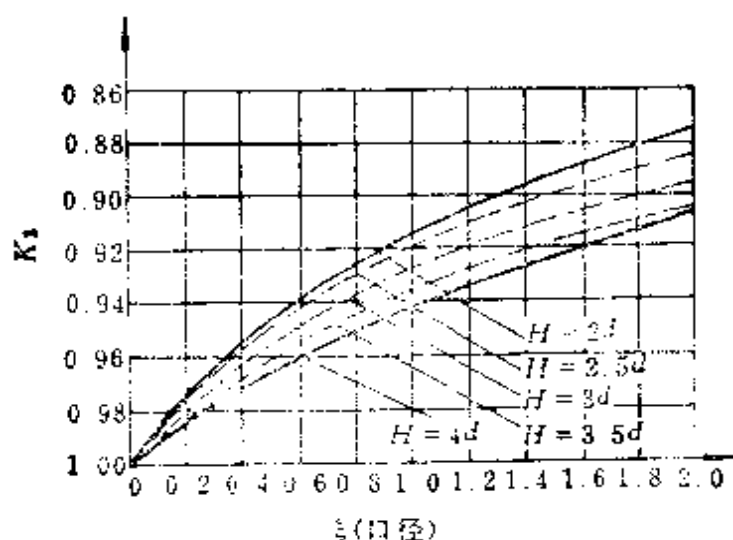
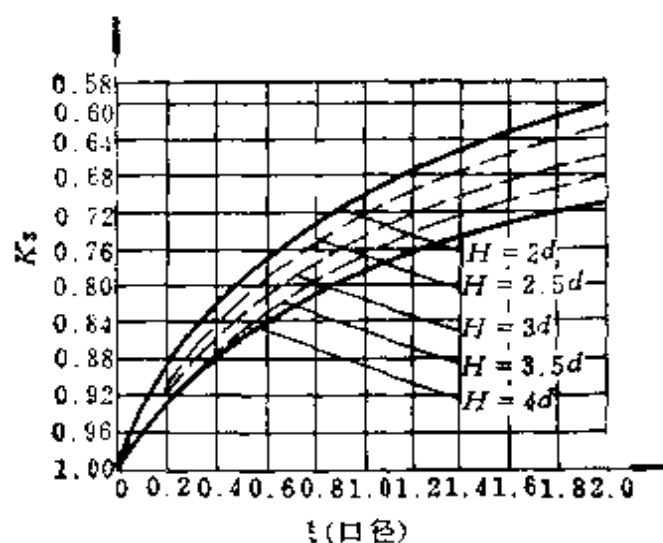
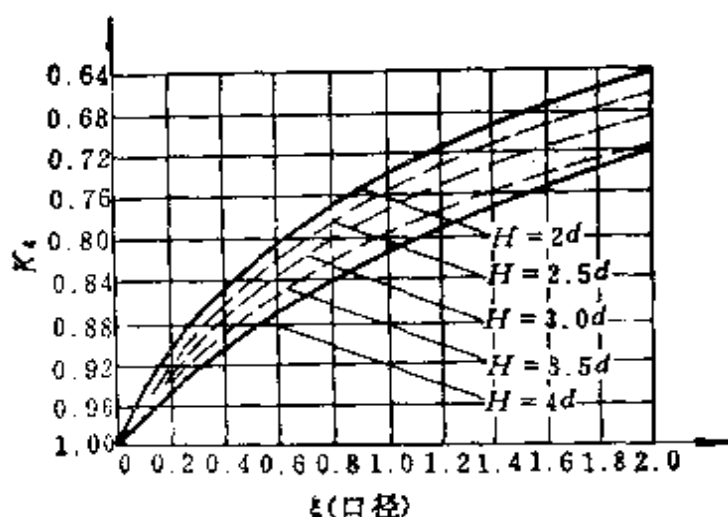


图8-1-12 修正系数 K_2

图8-1-13 修正系数 K_3 图8-1-14 修正系数 K_4

第二节 弹丸结构特征量的计算

将弹丸各零件分别按外廓、内廓分成数量不等的简单形体(截锥体、圆柱体或圆弧回转体),然后将各个简单形体(单元)按外廓计算的特征量总和减去按内廓各单元计算的特征量总和就得该部分的特征量。再将这些零件的特征量相加,就得到全弹丸的特征量。这些特征量包括质量、质心位置、极转动惯量和赤道转动惯量等。

一、弹丸质量 M

$$M = \sum_{i=1}^n M_i \quad (8-2-1)$$

式中 M_i ——各零件的质量；

n ——零件个数。

各零件的质量计算式为

$$M_i = \left(\sum_{j=1}^{n_1} V_{\ast j} - \sum_{j=1}^{m_1} v_{\ast j} \right) \rho_i \quad (8-2-2)$$

式中 $V_{\ast j}$ ——此零件外形单元体积；

$v_{\ast j}$ ——此零件内形单元体积；

n_1 ——外形所分单元数；

m_1 ——内形所分单元数；

ρ_i ——此零件的密度。

某些零件或装填物如炮弹弹丸选用的引信，枪弹弹丸中装填的燃烧剂等，其质量已知，这时可用其所占的体积除质量得出计算密度 ρ_i ，再代入公式计算。

二、弹丸质心位置 x_c

$$x_c = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^n M_{yi} \quad (8-2-3)$$

式中 M_{yi} ——各零件对弹底的质量矩。

$$M_{yi} = \left(\sum_{j=1}^{n_1} V_{\ast j} X_j - \sum_{j=1}^{m_1} v_{\ast j} x_j \right) \rho_i \quad (8-2-4)$$

$$= \left(\sum_{j=1}^{n_1} M_{\ast j} - \sum_{j=1}^{m_1} m_{\ast j} \right) \rho_i \quad (8-2-5)$$

式中 X_j 、 x_j ——分别为外、内形单元形心至弹底端面的距离；

$M_{\ast j}$ 、 $m_{\ast j}$ ——分别为外、内单元对弹底的体积矩。

三、弹丸极转动惯量 A

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \quad (8-2-6)$$

式中 A_i ——各零件的极转动惯量。

$$A_i = \left(\sum_{j=1}^{n_i} A_{\phi\omega j} - \sum_{j=1}^{m_i} A_{\phi n j} \right) \rho_i \quad (8-2-7)$$

即各零件的极转动惯量，等于各零件外形体积极转动惯量与内形体积极转动惯量之差再乘以零件密度。

四、弹丸的赤道转动惯量 B

$$B = \sum_{i=1}^n B_i \quad (8-2-8)$$

式中 B ——各零件对全弹质心的赤道转动惯量。

$$B_i = \left(\sum_{j=1}^{n_i} B_{\phi\omega j} - \sum_{j=1}^{m_i} B_{\phi n j} \right) \rho_i \quad (8-2-9)$$

即各零件的赤道转动惯量，等于各零件外形体积赤道转动惯量与内形体积赤道转动惯量之差再乘以零件密度。

在具体进行结构特征量计算时，为了容易检查，避免错误，通常是用绘制计算表格的方法进行计算，其步骤如下：

(1) 将产品图变换成便于计算的计算用图，它包括把弹丸各零件外廓和内廓分成单元，每单元为简单形体，求出每单元大小底半径及高度。

(2) 绘制计算表格。

(3) 计算各简单形体的 ρ 值填入表中。

(4) 依 ρ 查附表 1~5 得 α 、 β 、 μ 、 ν (或 α' 、 β' 、 μ' 、 ν')，填入表中。

(5) V_* 部分计算完以后，算出弹丸各零件的体积并乘以各

自的密度即得各零件的质量, 各零件质量相加得弹丸质量。此时可检查弹丸质量是否合乎要求, 可进行修改。此步计算合格后, 再进行以下计算。

(6) 根据各单元对弹底的体积矩 M_{ϕ} , 计算弹丸质心 x_c 。

(7) 计算弹丸的极转动惯量 A 和赤道转动惯量 B 。

下面举实例进行计算。

[例] 计算 54 式 12.7 穿甲燃烧弹弹头的质量、质心位置、极转动惯量和赤道转动惯量。

各零件的体积:

$$V_{\text{弹心}} = 0.6801 + 0.0468 + 1.8941 + 0.3358 + 0.9189 \\ = 3.8758 (\text{cm}^3)$$

$$V_{\text{药室}} = (0.8849 - 0.6801 - 0.0468 - 0.0401) \\ + (2.1529 - 1.8941) + (1.8218 - 0.3358 \\ - 0.9189 - 0.5248 + 0.0918) = 0.5108 (\text{cm}^3)$$

$$V_{\text{燃烧剂}} = 0.5248 - 0.0918 = 0.433 (\text{cm}^3)$$

$$V_{\text{头壳}} = (1.1449 - 0.8849) + (2.7027 - 2.1529) \\ + (2.64 - 0.0074 - 1.8218) = 1.62 (\text{cm}^3)$$

弹头质量:

$$M = V_{\text{弹心}} \cdot \rho_{\text{弹心}} + V_{\text{药室}} \cdot \rho_{\text{药室}} + V_{\text{燃烧剂}} \cdot \rho_{\text{燃烧剂}} + V_{\text{头壳}} \cdot \rho_{\text{头壳}} = 49.7 \text{ g}$$

各零件的体积矩:

$$M_{\phi \text{弹心}} = 9.3189 \text{ cm}^4$$

$$M_{\phi \text{药室}} = 0.978 \text{ cm}^4$$

$$M_{\phi \text{燃烧剂}} = 2.2322 \text{ cm}^4$$

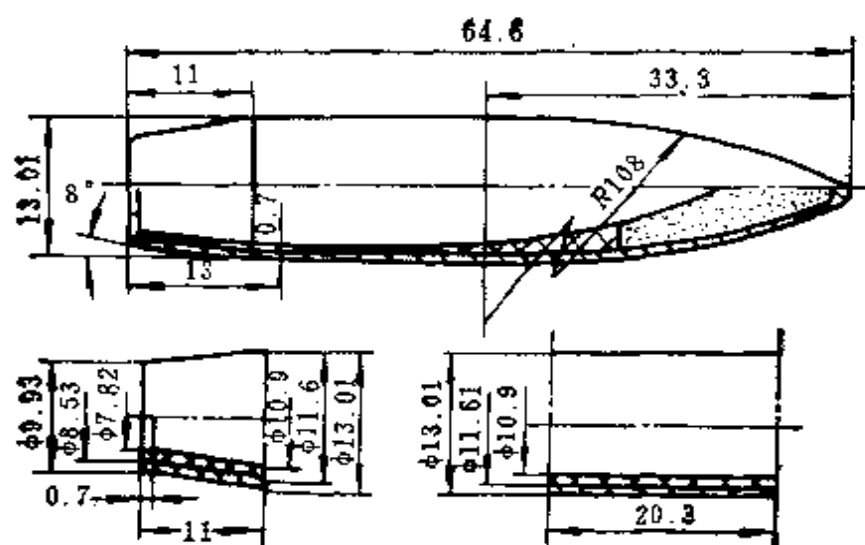
$$M_{\phi \text{头壳}} = 4.9662 \text{ cm}^4$$

弹头质心距弹底的距离:

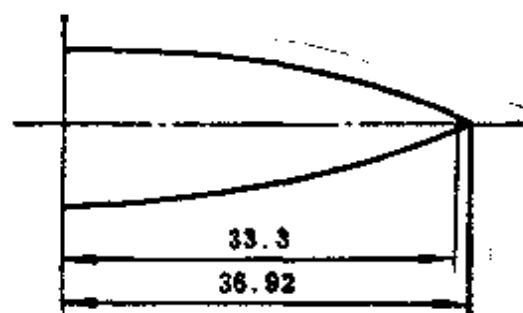
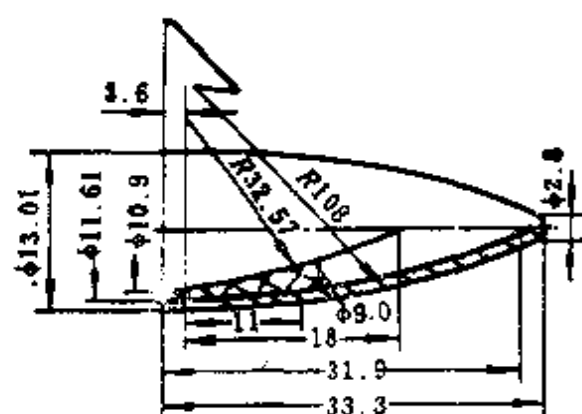
$$x_c = \frac{M_{\phi \text{弹心}} \rho_{\text{弹心}} + M_{\phi \text{药室}} \rho_{\text{药室}} + M_{\phi \text{燃烧剂}} \rho_{\text{燃烧剂}} + M_{\phi \text{头壳}} \rho_{\text{头壳}}}{M} = 2.47 \text{ cm}$$

$$\text{比率} \quad \frac{x_c}{l} \times 100 = \frac{2.47}{6.46} \times 100 = 38.2\%$$

各零件体积的极转动惯量:



公 式		尾 锥 部					圆 柱 部		
		弹头壳 外形	弹头壳 内腔	穿甲 钢心 (截锥)	穿甲钢心 (圆柱)	底凹	弹头壳 外形	弹头壳 内形	穿甲 钢心
		$\rho = \frac{r_0}{r}$	0.763	0.735	0.717	1	1	1	1
$V_{\Phi} = \alpha r^2 h$	α	2.4559	2.3827	2.3364	3.1416	3.1416	3.1416	3.1416	3.1416
	r^2	0.4238	0.3376	0.297	0.297	0.1823	0.4238	0.3376	0.297
	h	1.1	1.1	0.98	0.05	0.07	2.03	2.03	2.03
	V_{Φ}	1.1449	0.8849	0.6801	0.0468	0.0401	2.7027	2.1529	1.8941
$X_{\Phi} = \beta h$	β	0.4554	0.4495	0.4456	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	x_{Φ}	0.5009	0.4945	0.4367	0.025	0.035	1.015	1.015	1.015
$M_{\Phi} = V_{\Phi} x$	x	0.5991	0.6055	0.6133	1.075	0.035	2.115	2.115	2.115
	M_{Φ}	0.6859	0.5358	0.4171	0.0503	0.0014	5.7162	4.5534	4.046
$A_{\Phi} = \mu V_{\Phi} r^2$	μ	0.4002	0.3909	0.3851	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	A_{Φ}	0.1942	0.1168	0.0778	0.0697	0.0366	0.5727	0.3634	0.2813
$B_{\Phi}^* = v V_{\Phi} h^2 + V_{\Phi} l^2$	v	0.0818	0.0812	0.0810	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833
	h^2	1.21	1.21	0.9604	0.0025	0.0049	4.1209	4.1209	4.1209
	$v V_{\Phi} h^2$	0.1123	0.0869	0.0529	0.00001	0.00002	0.9278	0.739	0.6502
	$V_{\Phi} l^2$	4.0075	3.0763	2.3445	0.0911	0.2378	0.3405	0.2713	0.2387
	l^2	3.5003	3.4764	3.4473	1.946	5.9292	0.126	0.126	0.126
	B_{Φ}^*	4.1208	3.1632	2.3974	0.0911	0.2378	1.2683	1.0103	0.8889



公式	弧形部						
	弹头壳尖端 (虚线)	弹头壳外形	弹头壳内腔	穿甲钢心 (圆柱)	穿甲钢心 (圆弧)	穿甲钢心 (圆锥)	弹头壳内腔 (铅套以上)
$\rho = -\frac{h}{r}$	$\rho = \frac{r_0}{r} = 0$	5.67	5.491	1	3.303	$\rho = \frac{r_0}{r} = 0$	3.604
$V_\phi =$ $\alpha' r^2 h$ V_ϕ	α'	1.0472	1.6937	1.6917	3.1416	1.7189	$K_1 = 0.77$ 1.7097
	r^2	0.0196	0.4238	0.3376	0.297	0.297	0.1253
	h	0.362	3.69	3.19	0.36	1.8	0.7
	V_ϕ	0.0074	2.64	1.8218	0.3358	0.9189	0.0918
$x_\phi = \beta' h$	β'	0.25	0.3146	0.3147	0.5	0.3186	$K_2 = 0.905$ 0.3173
	x_ϕ	0.09	1.16	1.0039	0.18	0.5735	0.175
$M_\phi =$ $V_\phi x$	x	6.55	4.29	4.1339	3.31	4.0835	4.765
	M_ϕ	0.0485	11.3	7.5311	1.1115	3.734	0.4374
$A_\phi = \mu'$ $V_\phi r^2$	μ'	0.3	0.3872	0.3878	0.5	0.3953	$K_3 = 0.68$ 0.3942
	A_ϕ	0.44×10^{-7}	0.433	0.2385	0.0499	0.1079	0.0345
$B_\phi^* = v'$ $V_\phi h^2$ $+ V_\phi l^2$	v'	0.0383	0.0456	0.0457	0.0833	0.0463	$K_4 = 0.715$ 0.0375
	h^2	0.131	13.6	10.1761	0.1296	3.24	0.49
	$v' V_\phi h^2$	0.00004	1.64	0.8472	0.0036	0.1378	0.0002
	$V_\phi l^2$	0.1248	7.7	5.0438	0.2369	2.3333	0.4835
	l^2	16.865	2.9207	2.7686	0.7056	2.5392	5.267
	B_ϕ^*	0.1248	9.34	5.891	0.2405	2.4711	0.4837

$$A_{\text{弹心}} = 0.5866 \text{ cm}^5$$

$$A_{\text{药套}} = 0.0832 \text{ cm}^5$$

$$A_{\text{燃烧剂}} = 0.0132 \text{ cm}^5$$

$$A_{\text{壳壳}} = 0.4813 \text{ cm}^5$$

各零件体积的 B^* :

$$B_{\text{弹心}}^* = 0.6089 \text{ cm}^5$$

$$B_{\text{药套}}^* = 0.5758 \text{ cm}^5$$

$$B_{\text{燃烧剂}}^* = 3.1619 \text{ cm}^5$$

$$B_{\text{壳壳}}^* = 4.54 \text{ cm}^5$$

表8-2-1 一些弹头的 M 、 x_c 、 A 、 B 值

弹种	弹头的结构特征量	弹头质量 M (g)	极转动惯量 A (g·cm ²)	赤道转动惯量 B (g·cm ²)	$\frac{B}{A}$	质心距弹底的距离 x_c (mm)	$\frac{x_c}{l_c}$ (%)
51式7.62手枪弹		5.45~5.6	0.385	0.9283	2.41	6.1	43.5
59式9.0手枪弹		6~6.2	0.6175	0.8038	1.3	4.9	43.1
53式7.62铅心弹		9.45~9.75	0.6332	3.833	6.05	11.1	38.6
53式7.62钢心弹		9.45~9.75	0.7517	9.036	12.02	13.4	41.3
53式7.62曳光弹		9.4~9.9	0.8781	8.882	10.43	18.5	48.6
53式7.62穿甲燃烧弹		10.09~10.68	0.7171	7.224	10.07	14.6	39
53式7.62试射燃烧弹		9.45~9.75	0.7687	8.127	10.57	14	35.7
56式7.62钢心弹		7.75~8.05	0.4802	3.309	6.96	10.9	40.7
56式7.62曳光燃烧弹		6.48~6.78	0.5622	3.509	6.24	11.6	41.3
56式7.62穿甲燃烧弹		7.74~7.87	0.5622	3.509	6.24	11.6	41.7
56式7.62曳光弹		7.45~7.67	0.5511	3.589	6.51	13.9	49
美M193式5.56普通弹		3.52	0.1172	0.7017	5.99	7.5	40
日三八式6.5枪弹		8.9	0.437	6.034	13.82	13.7	42
北大西洋公约组织 M59式7.62普通弹		9.4~9.7	0.643	4.281	6.66	11.6	40
日九九式7.7普通弹		11.65~12.47	0.85	7.3	8.81	12.8	40.7
德7.9毛瑟重尖弹		12.67	0.776	5.883	7.58	10.9	37
54式12.7穿甲燃烧曳光弹		43.2~44.8	8.722	94.08	10.8	27.1	42
54式12.7穿甲燃烧弹		47.4~49	9.325	101.53	10.9	24.7	38.2
56式14.5穿甲燃烧曳光弹		59.5	16.9	121.09	7.16	26.4	39.6
56式14.5穿甲燃烧弹		63~64.8	16.39	137.48	8.4	25.3	38
56式14.5曳光燃烧弹		60	17.35	140.14	8.08	28.2	40.7

弹头的极转动惯量:

$$A = A_{\text{重心}} \cdot \rho_{\text{重心}} + A_{\text{药盒}} \cdot \rho_{\text{药盒}} + A_{\text{药}} \cdot \rho_{\text{药}} + A_{\text{壳}} \cdot \rho_{\text{壳}} = 9.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$$

弹头的赤道转动惯量:

$$B = \frac{A}{2} + (B_{\text{重心}}^* \cdot \rho_{\text{重心}} + B_{\text{药盒}}^* \cdot \rho_{\text{药盒}} + B_{\text{药}}^* \cdot \rho_{\text{药}} + B_{\text{壳}}^* \cdot \rho_{\text{壳}})$$

$$= 101.53 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$$

比率 $\frac{B}{A} = 10.9$

应该指出, 编制计算机程序, 在计算机上进行弹丸结构特征量的计算, 将会大大加快计算速度, 提高计算精度。有关程序这里不作介绍。

一些枪弹的 M 、 x_c 、 A 、 B 、 $\frac{B}{A}$ 、 $\frac{x_c}{l_r}$ 见表 8-2-1。

第三节 弹丸结构特征量的测定

对弹丸实际的结构特征量值可用实验方法进行测定, 它包括: 弹丸质量、质心位置、极转动惯量和赤道转动惯量。

一、弹丸质心位置的测定方法

枪弹质心位置测定仪的原理见图 8-3-1。

调整弹丸底平面至杠杆限制面间的距离 C , 使质心测定仪平衡 (指针在中间位置)。根据杠杆平衡条件可得:

$$x_c = b - \frac{M_P \cdot a}{M} - C$$

式中 a —— 支点到平衡体质心的距离;

b —— 支点到杠杆支撑面的距离;

M_P —— 平衡体的质量;

M —— 弹丸质量;

C —— 弹丸底平面与杠杆限制面之间的距离;

x_c —— 弹丸质心至弹丸底平面的距离。

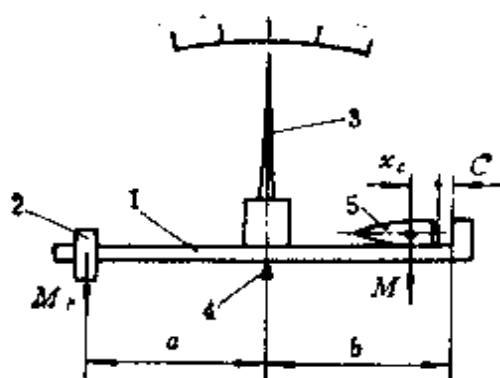


图8-3-1 质心测定仪原理图

1—杠杆，2—平衡体，3—指针，4—支点，5—弹丸。

上式中各值均为已知，所以调整 C (a 亦为可调) 使仪器平衡后， x_c 即可由公式求出。

二、弹丸极转动惯量和赤道转动惯量的测定方法

测定弹丸转动惯量的方法较多，枪弹通常使用的是三线法，即利用三根线下悬挂一个圆盘来测量，其原理见图 8-3-2。三根线固定在一根支柱上，下悬一圆盘，弹丸装在盘内。如果圆盘绕垂直轴转动角度不大（此轴通过圆盘及弹丸的质心），则圆盘将绕此轴作摆动。测出摆动的周期就可以求出弹丸的转动惯量。

设圆盘绕垂直轴转动角度 α (图 8-3-2)，则悬线端点 a 移动到 a' 点处，而圆盘由位置 I 升至位置 II。

利用拉格朗日方程可列出圆盘的运动微分方程式。取转角 α 为广义坐标，则

$$-\frac{d}{dt}\left(-\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_\alpha \quad (8-3-1)$$

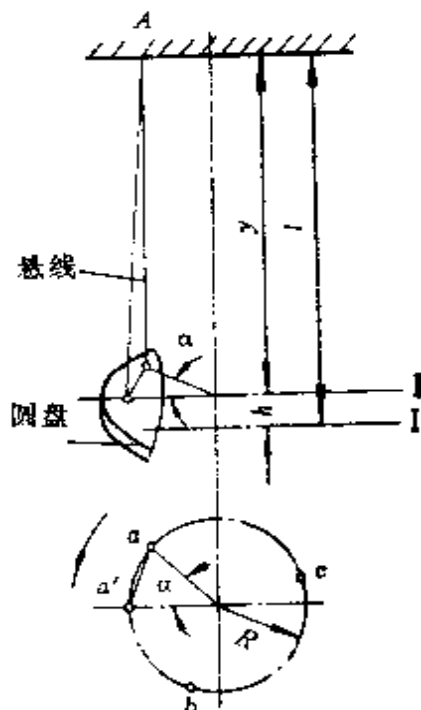


图8-3-2 三线式转动惯量测定仪原理图

装有弹丸的圆盘转动运动和直线运动（沿垂直方向）的动能

T 可用下式求出:

$$T = \frac{A_s \dot{\alpha}^2}{2} + \frac{1}{2} M_s \dot{y}^2$$

式中 A_s ——圆盘中有弹丸时的转动惯量;

M_s ——圆盘和弹丸的质量;

y ——轴向位移量。

式中的第二项较第一项小得多可以不考虑, 所以

$$T = A_s \frac{\dot{\alpha}^2}{2} \quad (8-3-2)$$

由圆盘虚位移作功来求广义力 Q_α 。当圆盘转动某一角度 δ_α 所作之功为

$$\delta W = M_s \cdot g \cdot \delta y = Q_\alpha \cdot \delta_\alpha$$

式中 g ——重力加速度。

根据几何关系知

$$y = l - \frac{2R^2}{l} \sin^2 \frac{\alpha}{2}$$

式中 l ——线的长度;

R ——三根线所构成的圆半径。

所以

$$Q_\alpha \delta \alpha = -M_s g \frac{R^2}{l} \sin \alpha \cdot \delta \alpha$$

因而

$$Q_\alpha = -M_s g \frac{R^2}{l} \sin \alpha \quad (8-3-3)$$

将各值代入方程式(8-3-1)得:

$$A_s \ddot{\alpha} + M_s g \frac{R^2}{l} \sin \alpha = 0$$

在转角很小时可取 $\sin \alpha \approx \alpha$, 所以

$$\ddot{\alpha} + K^2 \alpha = 0$$

式中

$$K^2 = \frac{M_s g R^2}{A_s l}$$

这是简谐振动微分方程，可求得其解。然后求出当 $\alpha = \alpha_0$ （初始转动角）时，其摆动周期

$$T = \frac{2\pi}{K} = 2\pi \sqrt{\frac{A_b I}{M_y g R^2}}$$

则
$$A_b = \frac{M_y g R^2}{4\pi^2 I} T^2 \quad (8-3-4)$$

式中 T ——回转摆动周期。

$$A = A_b - A_y \quad (8-3-5)$$

式中 A ——弹丸的转动惯量，

A_y ——圆盘的转动惯量。

圆盘的转动惯量可用下式求出

$$A_y = \frac{M_y g R^2}{4\pi^2 I} T_y^2 \quad (8-3-6)$$

式中 M_y ——圆盘的质量；

T_y ——圆盘的回转摆动周期。

根据公式(8-3-4)、(8-3-5)、(8-3-6)可求出弹丸的极转动惯量和赤道转动惯量。

测定弹丸赤道转动惯量前需先测出弹丸的质心位置。实验时将弹丸夹装在圆盘上，并使弹丸质心与圆盘转动轴线重合。测出夹装弹丸与未夹装弹丸的回转摆动周期，利用前述公式即可求出转动惯量。弹丸在圆盘上的夹装位置见图8-3-3。

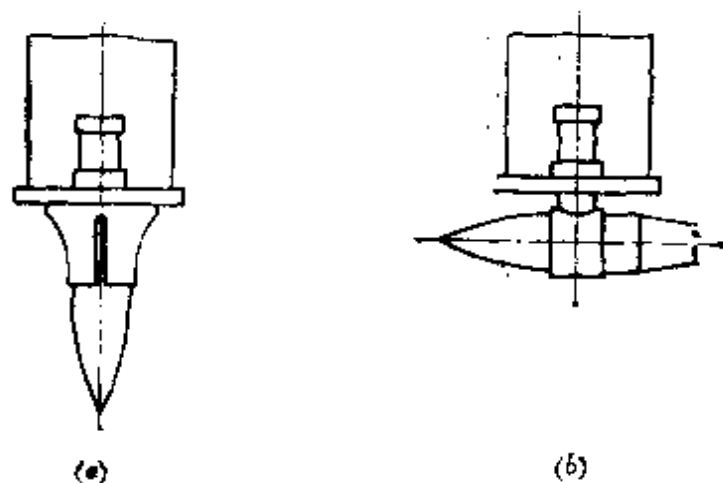


图8-3-3 弹丸在圆盘上的夹装位置
(a) 测定极转动惯量；(b) 测定赤道转动惯量。

第九章 弹丸发射强度及 膛内运动分析

发射时，弹丸（头）沿弹膛运动，承受着多种载荷。在这些载荷的作用下，弹丸的零件将发生变形，这些变形应控制在允许的范围之内，以保证弹丸的安全发射和对目标的有效作用。若变形超过允许值，则可能影响弹丸沿弹膛的正确运行，或零件破裂、炸药被引爆等严重事故，这是弹丸设计中绝对不允许的。

弹丸的导引部设计是与弹丸在膛内的正确运行、射弹散布、身管寿命等密切相关的，要求导引部设计得较为合理。对于枪弹弹头的结构来说，即导引部的直径和长度尺寸要较为合理；对于炮弹弹丸来说，即弹炮之间的间隙、弹带的尺寸形状、定心部的尺寸等都较为合理，使弹头（丸）在膛内运行正确，出膛口瞬间的初始偏量较小，可以改善弹丸的射弹散布和提高身管寿命。

在弹丸发射强度的计算方面，由于其结构形状的不规则和载荷的复杂性，给精确计算带来困难。日前在计算时采用简化假设，并注意参考现有弹丸在使用中积累的有关经验数据来进行初步计算，最后要经过一系列严格的射击试验考核。

第一节 发射时的受力分析

发射时，弹丸在火药气体压力作用下沿弹膛运动，获得一定的加速度，弹丸的各个零件由此而引起多种载荷的作用，载荷的作用形式与弹丸的具体结构是密切相关的。一般来说，在膛内所受到的载荷主要有：火药气体压力，惯性力，装填物压力，导转侧力，弹带压力（弹带挤入膛线而引起的力），不均衡力（弹丸运动中由不均衡因素引起的力），摩擦力等。这些载荷，有的对发射

强度起直接影响，有的则主要影响弹丸在膛内运动的正确性。

所有这些载荷在作用过程中，其值都是变化的。为此，需找到其最大临界状态时的值，使弹丸在各相应临界状态下都有足够的强度。

一、火药气体压力

火药气体压力是弹丸所受诸载荷中的基本载荷。它是发射药点燃后，在膛内形成的大量高压气体所产生的，它一方面随着发射药的燃烧而变化，另一方面又随着弹丸在膛内的运动而变化，图9-1-1所示为火药气体压力（膛压）随弹丸行程的变化规律。膛压曲线上的最大值 p_m 表示火药气体压力的最大值，计算弹丸的强度必须考虑这个临界状态。

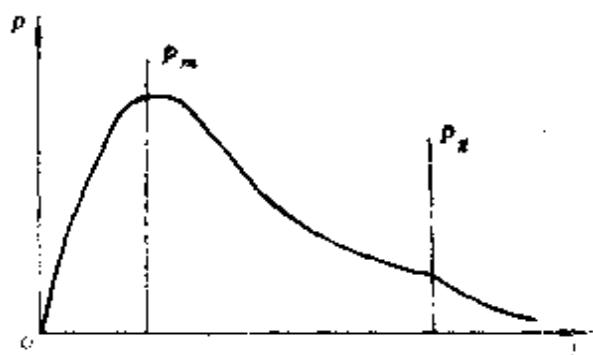


图9-1-1 膛压随弹丸行程的变化规律

膛压曲线可由理论计算或试验测定的方法获得。对于新设计的武器系统，只能用前一种方法。所得膛压曲线上的膛压值，是指弹后空间内的平均压力。实际上，弹丸在运动过程中，任一瞬时弹后空间内的压力分布是不均匀的，其分布情况如图9-1-2所示，是一个二次曲线关系。膛底部压力 p_b 最

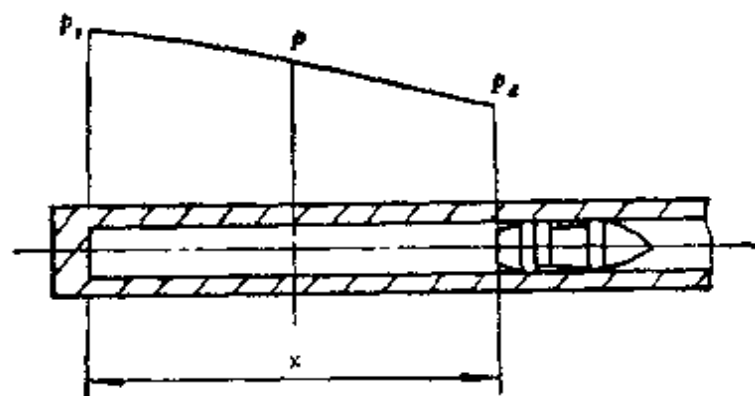


图9-1-2 膛内压力分布曲线

大，弹底处压力 p_d 最小，平均压力 p 即为膛压曲线上的名义压力值。

由内弹道学中可知：

$$p_t = p_d \left(1 + \frac{M_o}{2\varphi_1 M} \right)$$

式中 M_o ——发射药质量；

M ——弹丸质量；

φ_1 ——次要功计算系数（弹丸旋转运动功及摩擦功系数），
对于火炮约在 1.02 左右，对于一般枪弹 $\varphi_1 = 1.05$ ，
穿甲弹 $\varphi_1 = 1.07$ （由于枪弹整个导引部挤入膛线）。

若简化为按直线关系递减，则

$$p = \frac{1}{2} (p_t + p_d)$$

那么

$$p_d = \frac{p}{1 + \frac{1}{4} \times \frac{M_o}{\varphi_1 M}}$$

在临界状态 $p = p_{\max}$ 相应的最大弹底压力为

$$p_{d\max} = \frac{p_m}{1 + \frac{1}{4} \times \frac{M_o}{\varphi_1 M}}$$

对于一般火炮，比值 $\frac{M_o}{M} \approx 0.2$ ，对于一般枪弹比值 M_o/M 约在 0.3 左右，这就是说这种弹丸实际上承受的火药气体压力 p_d ，比膛压曲线的压力名义值 p 要小 5%~7%。

在火炮弹丸的弹体及零部件强度计算时，考虑到弹底所承受压力的最大可能值，来选取火药气体的计算压力 p_j ，目前一般火炮都取

$$p_j = 1.1 p_m \quad (9-1-1)$$

因此，在火炮弹丸的设计计算中必须用 p_j 来进行校核。同样，在

弹丸的靶场验收试验中，也采用相应的试验方法，即用强装药射击来检验弹体的强度。所谓强装药，即用增加装药量或保持高温的方法，使膛压达到最大膛压的 1.1 倍。

二、惯性力

弹丸在膛内作加速运动时，弹丸各零件沿轴向均作用有惯性力，旋转弹丸还产生径向和切向惯性力。

轴向惯性力 轴向惯性力是由于弹丸沿弹膛轴线作加速运动而产生的，此加速度 a 可由牛顿第二定律求得，即

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{p\pi r^2}{M} \quad (9-1-2)$$

式中 p ——火药气体压力，

r ——弹丸半径。

由于加速度存在，弹丸各断面上均有轴向惯性力，作用在弹丸任一断面 nn 上的轴向惯性力 F_n (图 9-1-3) 为

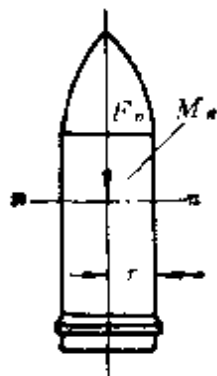


图9-1-3 作用在 nn 断面上的轴向惯性力

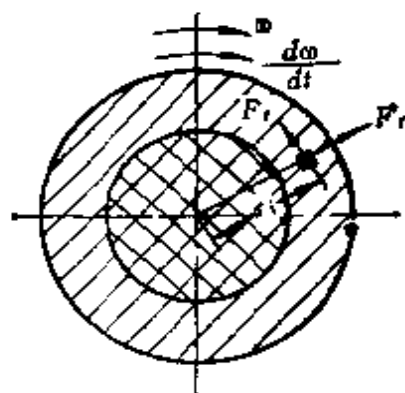


图9-1-4 弹丸的径向惯性力和切向惯性力

$$F_n = M_n a = p\pi r^2 \frac{M_n}{M} \quad (9-1-3)$$

式中 M_n —— nn 断面上部的弹质量。

由于弹丸各断面以上部分的质量是不相等的，故各断面上所受的惯性力也不相等，愈靠近底部 M_n 愈大， F_n 也愈大。

弹丸加速度是弹丸设计的重要参量，加速度愈大，各断面上

所受的惯性力也愈大。电式 9-1-2 可以看出, 弹丸最大加速度在数值上等于弹丸所受火药气体总压力与弹丸质量之比。

径向惯性力 径向惯性力是由于弹丸旋转运动所产生的径向加速度 (即向心加速度) 而引起的 (图 9-1-4)。断面上任一半径 r_i 处质量 M_i 的径向惯性力为

$$F_r = M_i r_i \omega^2 \quad (9-1-4)$$

式中 ω ——弹丸的旋转速度。

当膛线为等齐缠度时, 弹丸角速度与线速度的关系为

$$\omega = \frac{\pi}{\eta r} v \quad (9-1-5)$$

式中 η ——膛线缠度 (口径倍数)。

将 ω 之值代入 (9-1-4) 式, 则得

$$F_r = M_i r_i \left(\frac{\pi}{\eta r} v \right)^2 \quad (9-1-6)$$

由上式可知, 弹丸质量所产生的径向惯性力与速度平方成正比, 随着弹丸在膛内运动, 速度越来越大, 径向惯性力也越来越大, 至膛口达最大值。

切向惯性力 切向惯性力是由弹丸的角加速度 $d\omega/dt$ 引起的 (参见图 9-1-4), 断面上任一半径 r_i 处质量为 M_i 的切向惯性力为

$$F_t = M_i r_i \frac{d\omega}{dt} \quad (9-1-7)$$

当膛线为等齐缠度时, 弹丸角加速度与轴向加速度成正比, 即

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\pi}{\eta r} \times \frac{dv}{dt} \quad (9-1-8)$$

代入 (9-1-7) 式, 并考虑 (9-1-2) 式的关系, 可得

$$F_t = \frac{p \pi^2 r r_i}{\eta} \times \frac{M_i}{M} \quad (9-1-9)$$

由式中可以看出, 切向惯性力与膛压成正比。

由上述得到的求惯性力的公式 (9-1-3)、(9-1-6) 和 (9-1-9) 可知,

(1) 惯性力在发射过程中的变化 如果同时比较惯性力的三个公式可以看出, 轴向惯性力 F_a 和切向惯性力 F_t 与膛压成正比, 在发射过程中, 其变化规律与膛压曲线相似, 径向惯性力 F_r 与弹丸速度的平方成正比, 故其变化规律与速度曲线的变化趋势有关 (图 9-1-5), 所以 F_a 及 F_t 的最大值在最大膛压处, 而 F_r 的最大值在膛口处。

(2) 惯性力的大小 轴向惯性力 F_a 与切向惯性力 F_t 相比较, 后者较小; 在极限条件下, 其值也不超过前者的 $1/10$, 即 $F_t \approx 0.1F_a$ 。故在强度计算时, 切向惯性力可以略去。径向惯性力 F_r 与

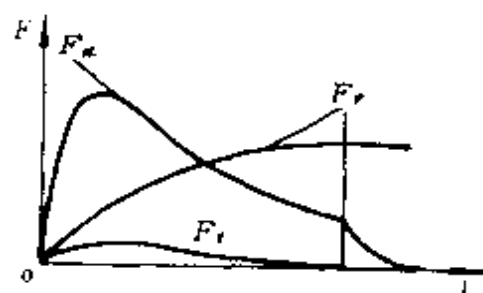


图9-1-5 惯性力的变化曲线

F_a 不同步, 但就其最大值而言, 仍然小于轴向惯性力。由图 9-1-5 可知, 当 F_a 达到最大值时, F_r 尚很小, 因此在计算最大膛压时弹丸的发射强度, 也可以略去径向惯性力。如果计算膛口区的弹丸强度, 就应当考虑径向惯性力。

三、装填物压力

在炮弹弹丸中, 除某些特种弹、实心穿甲弹外, 绝大多数弹丸都装填炸药。有的枪弹弹头中亦有装填物, 如瞬爆弹即是。发射时, 装填物本身也产生惯性力, 其中轴向惯性力使装填物下沉, 因而产生轴向压缩径向膨胀的趋势; 径向惯性力则直接使装填物产生径向膨胀, 这两种作用均使装填物对外壳产生压力。

1. 轴向惯性力引起的装填物压力

为简化问题, 现作如下假设:

- (1) 装填物为均质理想弹性体;
- (2) 弹体壁为刚性, 即在装填物的挤压下不发生变形;
- (3) 装填物对弹壁的压力为法向方向 (忽略了弹壁与装填物间的摩擦影响)。

下面分析靠近断面内壁处装填物对弹壁的作用。为此在该处

装填物上取一微元体 (图 9-1-6), 并令微元体上的三向主应力分别为 σ_z 、 σ_r 和 σ_t , 其中径向应力 σ_r 也就是装填物对弹壁的法向压力。

由弹性理论可知, 此微元体在三个方向的变形分别为:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E_c} [\sigma_z - \mu_c(\sigma_r + \sigma_t)]$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_c} [\sigma_r - \mu_c(\sigma_z + \sigma_t)]$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_c} [\sigma_t - \mu_c(\sigma_z + \sigma_r)]$$

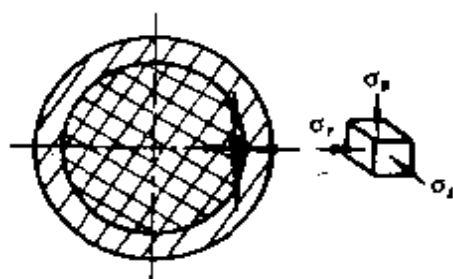


图 9-1-6 装填物微元体上的应力

式中 E_c ——装填物的弹性模量;

μ_c ——装填物的泊桑系数。

由上述第二个假设可知, 弹壁不变形, 故装填物的径向和切向也不发生变形, 即

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = 0$$

由此可知

$$\sigma_r = \mu_c(\sigma_z + \sigma_t)$$

$$\sigma_t = \mu_c(\sigma_z + \sigma_r)$$

将上述二式联立, 并消去 σ_t 得

$$\sigma_r = -\frac{\mu_c}{1 - \mu_c} \sigma_z \quad (9-1-10)$$

式中的轴向应力 σ_z 是由于装填物在轴向惯性力 F_{an} 的作用下产生的, 由 (9-1-3) 式可知

$$F_{an} = M_{an} a = \rho \pi r_{an}^2 \frac{M_{an}}{M} \cdot$$

其中 M_{an} ——此断面上部的装填物质量。

此轴向惯性力在此断面上产生的轴向压应力即为 σ_z , 其值为

$$\sigma_z = \frac{F_{an}}{\pi r_{an}^2}$$

式中 r_{an} ——此断面上壳体的内径。

将 F_{an} 之值代入上式得

$$\sigma_x = p \frac{r^2}{r_{an}^2} \times \frac{M_{an}}{M} \quad (9-1-11)$$

再将 σ_x 值代入(9-1-10)式, 即可求出轴向惯性力引起的装填物压力 p_c , 即

$$p_c = \sigma_x = \frac{\mu_c}{1 - \mu_c} p \frac{r^2}{r_{an}^2} \times \frac{M_{an}}{M} \quad (9-1-12)$$

装填物的泊桑系数 μ_c 随装填物的性质及装填条件而变化。对注装炸药 $\mu_c = 0.4$; 螺旋装药和压装时 $\mu_c = 0.35$; 对于液体及一切不可压缩材料 $\mu_c = 0.5$ 。

当所取断面位于弹丸内腔锥形部时, 由于单元体上的主应力方向改变, 使 p_c 之精确表达式变得十分繁复, 为了简化起见, 在设计实践中均将装填物看作液体来处理, 这样只需考虑断面面积上方相应装填物柱形体内的质量 M'_{an} 来计算装填物压力, 而将其余部分 M''_{an} 附加作用在弹体金属上 (图 9-1-7)。

这时 $n-n$ 断面上装填物对弹壁压力为

$$p_c = p \frac{r^2}{r_{an}^2} \times \frac{M'_{an}}{M} \quad (9-1-13)$$

并且可知, 装填物压力 p_c 是与膛压 p 成正比的, 因而在发射过程中其变化规律也与膛压曲线相似。

2. 径向惯性力引起的装填物压力

径向惯性力即离心惯性力。弹丸旋转时, 在离心惯性力的作用下, 装填物向外膨胀, 对弹壁有压力。如将装填物按液体处理, 截取单位厚度的弹丸进行计算, 只要研究中心角为 α 的小扇形块对弹壁的压力, 设微元体的离心惯性力为 dF_r (图 9-1-8), 则

$$dF_r = dM \cdot r_K \omega^2 \quad (9-1-14)$$

式中 dM ——微元体的质量;

r_K ——微元体所处的半径;

ω ——弹丸旋转角速度。

由图可知

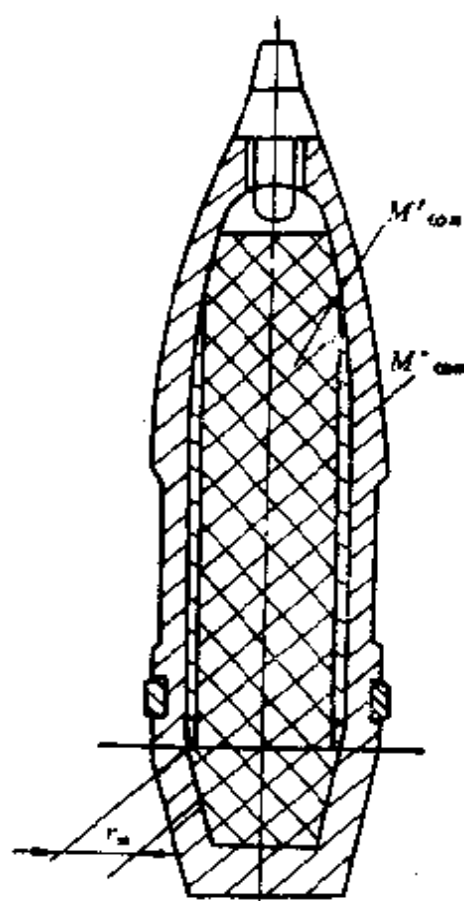


图9-1-7 作用在nn
断面上装填物质量

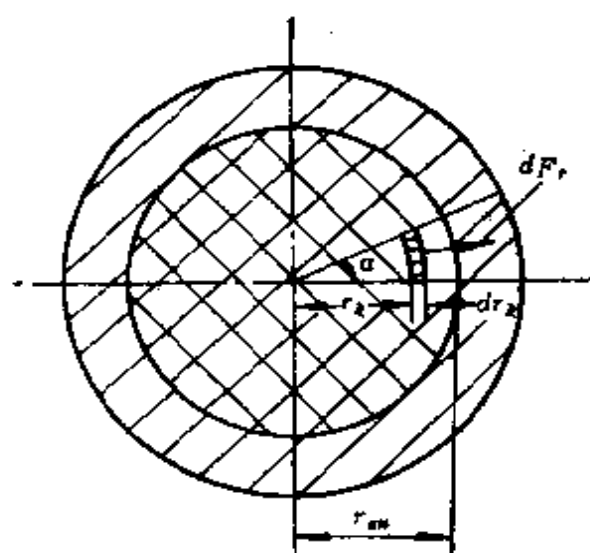


图9-1-8 径向惯性
力引起的装填物压力

$$dM = \alpha \rho_{\omega} r_K dr_K \quad (9-1-15)$$

式中 ρ_{ω} ——装填物密度。

代入(9-1-14)式，并在小扇形块内积分，得小扇形块总的离心惯性力为

$$F_r = \int_0^{r_{\omega n}} \alpha \rho_{\omega} \omega^2 r_K^2 dr_K = \alpha \omega^2 \rho_{\omega} \frac{r_{\omega n}^3}{3} \quad (9-1-16)$$

此离心惯性力作用在弹内壁扇形柱面上，由离心惯性力引起的装填物压力 p_r 为

$$p_r = \frac{F_r}{\alpha r_{\omega n}} = \frac{r_{\omega n}^2}{3} \omega^2 \rho_{\omega}$$

考虑(9-1-5)式，则

$$p_r = \frac{\pi^2 \rho_{\omega}}{3} \left(\frac{v}{\eta} \right)^2 \left(\frac{r_{\omega n}}{r} \right)^2 \quad (9-1-17)$$

由上式可知, p_r 与弹丸在膛内的速度平方成正比, 变化规律也和速度曲线变化趋势有关。

总的装填物压力应为 p_c 与 p_r 之和。但这两个力并不同步, p_c 在最大膛压时刻达到最大, p_r 在膛口区达到最大。从绝对值讲, p_r 远较 p_c 为小, 所以在计算最大膛压时弹体的强度, 可忽略 p_r 的影响。

四、导转侧力

膛线的侧表面称为导转侧。发射时, 弹丸嵌入膛线。由于膛线有缠度, 导转侧表面对弹带凸起部或导引部 (枪弹) 产生压力, 此力称为导转侧力 (图 9-1-9)。

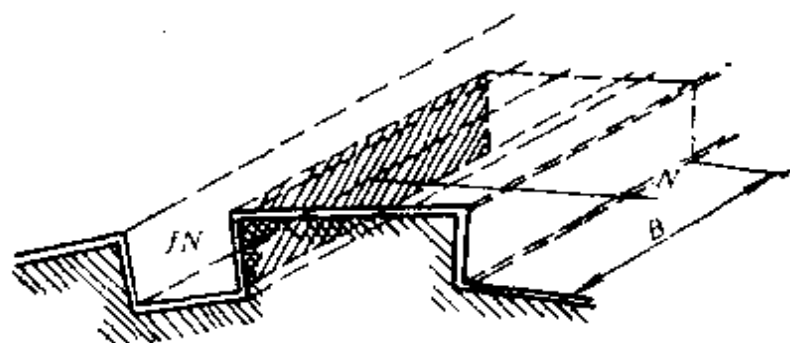


图9-1-9 导转侧力

弹丸在膛内运动时主要受以下诸力作用: 火药气体压力 p 、导转侧力 N 及摩擦力 fN 。在这些力的作用下, 弹丸产生直线运动与旋转运动。

膛线缠度有等齐缠度和非等齐缠度两种, 等齐缠度膛线展开为一条直线, 非等齐缠度膛线展开为一曲线 (图 9-1-10), 若此

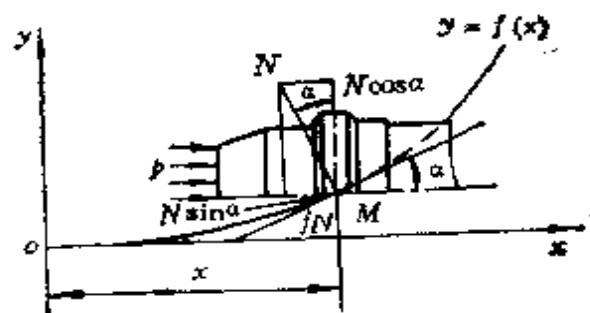


图9-1-10 导转侧力分析

曲线为

$$y = f(x)$$

弹丸的旋转运动方程为

$$A \frac{d^2\varphi}{dt^2} = rnN(\cos\alpha - f\sin\alpha) \quad (9-1-18)$$

式中 n ——膛线根数;

f ——摩擦系数;

r ——弹丸半径;

α —— M 点处膛线的倾斜角 (缠角);

φ ——角位移。

弹丸的直线运动方程

$$M \frac{dv}{dt} = p\pi r^2 - n(N\sin\alpha + fN\cos\alpha) \quad (9-1-19)$$

根据角位移和线位移的关系

$$y = r\varphi$$

得弹丸角速度

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{r} \times \frac{dy}{dt} = \frac{1}{r} \times \frac{df(x)}{dx} \times \frac{dx}{dt}$$

弹丸的角加速度为

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{1}{r} \left[\frac{d^2f(x)}{dx^2} \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{df(x)}{dx} \times \frac{d^2x}{dt^2} \right]$$

考虑到

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{dv}{dt}, \quad \frac{df(x)}{dx} = \operatorname{tg}\alpha$$

则

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{1}{r} \left[\frac{d^2f(x)}{dx^2} v^2 + \frac{dv}{dt} \operatorname{tg}\alpha \right] \quad (9-1-20)$$

由(9-1-19)式知

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} [p\pi r^2 - nN(\sin\alpha + f\cos\alpha)]$$

代入(9-1-20)式

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{d^2f(x)}{dx^2} v^2 + [p\pi r^2 - nN(\sin\alpha + f\cos\alpha)] \frac{\operatorname{tg}\alpha}{M} \right\}$$

再代入(9-1-18)式

$$Nr n(\cos\alpha - f\sin\alpha) = \frac{A}{r} \left\{ \frac{d^2f(x)}{dx^2} v^2 + [p\pi r^2 - nN(\sin\alpha + f\cos\alpha)] \frac{\operatorname{tg}\alpha}{M} \right\}$$

化简后得

$$\begin{aligned} nN \left[\cos\alpha - f\sin\alpha + \frac{A}{r^2} (\sin\alpha + f\cos\alpha) \frac{\operatorname{tg}\alpha}{M} \right] \\ = \frac{A}{r^2} \left[\frac{d^2f(x)}{dx^2} v^2 + p\pi r^2 - \frac{g}{M} \right] \end{aligned}$$

公式左端方括号内的数，在缠角 α 较小时，趋近于1，因此可以简化方程为

$$N = \frac{A}{nr^2} \left[\frac{d^2f(x)}{dx^2} v^2 + p\pi r^2 - \frac{g}{M} \right] \quad (9-1-21)$$

对于等齐膛线， $\frac{d^2f(x)}{dx^2} = 0$ ，则导转侧力为

$$N = p \cdot \frac{\pi}{n} \times \frac{A}{M} \operatorname{tg}\alpha \quad (9-1-22)$$

此时导转侧力与膛压曲线同步。

对于非等齐膛线，则要由 $y = f(x)$ 曲线的形式来决定。目前一般渐速膛线都是采用二次曲线中的一段。

五、弹带压力

炮弹弹丸入膛过程中，弹带嵌入膛线，弹带赋予膛壁一个作用力，反之膛壁对弹带也有一个反作用力，均称为弹带压力。此压力使炮膛发生径向膨胀，并使弹带、弹体产生径向压缩，所以此力是炮管、弹丸设计中需要考虑的一个重要因素。

1. 弹带压力产生的原因

由于弹带与膛壁间有强制量 δ 存在（图9-1-11），所以在嵌入过程中，弹带金属将发生以下变化：

(1) 弹带发生弹塑性变形, 并挤入炮膛膛线内;

(2) 弹带被向后部挤压, 挤压后的弹带材料顺延在弹带后部, 尤其是被炮膛阳线凸起部挤出的弹带, 发生轴向流动, 使弹带变宽。

(3) 少量弹带金属将被膛线切削下来, 成为铜屑, 有的粘在炮膛内部, 有的留在膛内。一般情况下, 由发射装药内的除铜剂将其清除掉。

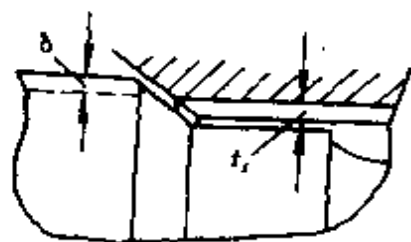


图9-1-11 弹带入膛时的情况

由此可见, 弹丸的入膛过程, 是一种强迫挤压的过程, 必须有一定的挤进压力弹丸才开始运动。一旦弹带嵌入膛线, 弹带将受到很大的径向压力, 即弹带压力。

弹带压力用 p_b 表示, 是指炮膛壁赋予弹带的压力, 并非直接作用在弹体上, 但此力经由弹带材料的传递, 包括弹带材料变形的消耗, 再作用在弹体材料上。这个压力也称为弹带压力, 用 p_{b1} 表示。 p_{b1} 对弹体强度有较大的影响。

2. 弹带压力的分布与变化

如果弹带的加工是对称的, 装填入膛与嵌入膛线也是均匀的和对称的, 那么弹带压力的分布也是对称均匀的 (图 9-1-12a), 如果弹带加工具有壁偏差, 或弹带嵌入时偏向一方, 则弹带压力

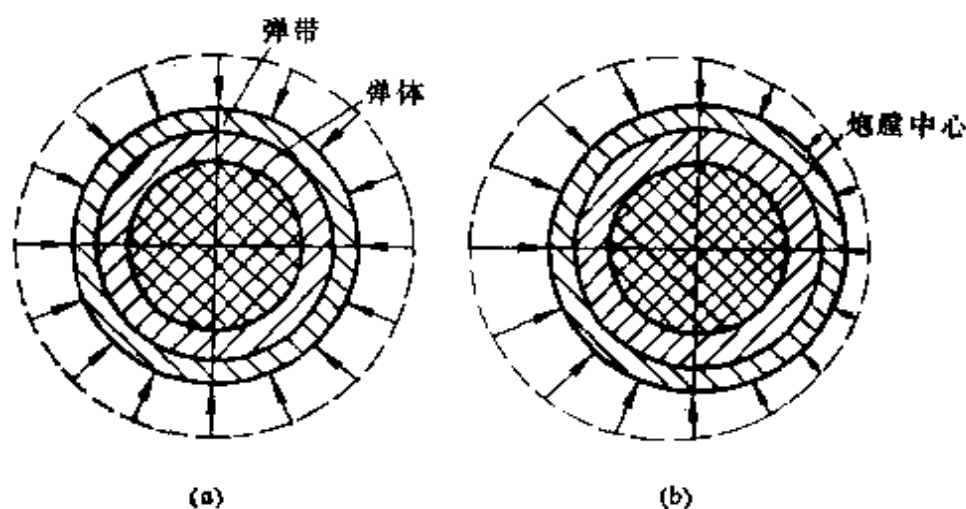


图9-1-12 弹带压力分布情况

(a) 弹带中心与膛室中心相重合, (b) 弹带中心与膛室中心不重合。

也相应偏向一边 (图 9-1-12b)。这种弹带压力不对称的情况, 会造成弹丸在膛内的倾斜; 严重时, 将使定心部或圆柱部产生膛线印痕, 使弹丸出炮口后射弹散布变坏。

弹带压力在弹丸沿炮膛的运行过程中, 其变化情况如图 9-1-13 所示。

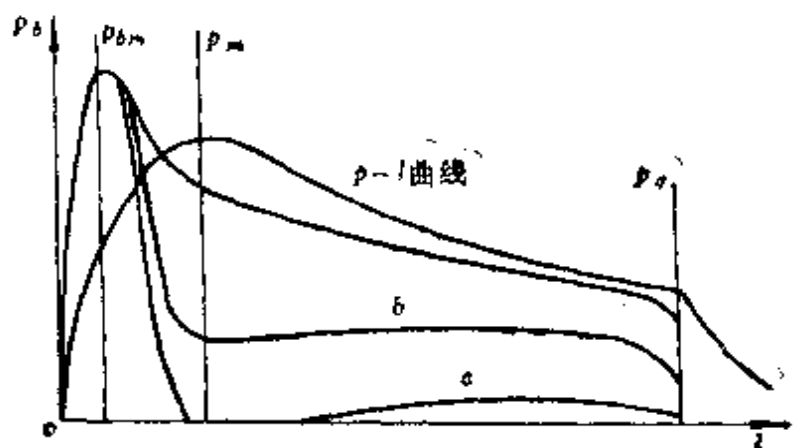


图9-1-13 弹带压力的变化情况

弹带刚嵌入膛线时, 弹带压力随之产生, 并且迅速上升, 至弹带全部嵌入完毕而达到最大值 p_{bm} , 但此时膛压还很低。随着弹丸向前运动, 膛压急剧上升, 使炮膛发生径向膨胀, 弹体发生径向压缩, 减弱了炮膛壁与弹带的相互作用; 另一方面由于弹带在嵌入过程中的磨损与切削, 都会使弹带压力逐渐下降。对于薄壁弹体, 其影响更为显著。在最大膛压时, 弹带压力将减至最小值, 甚至为零, 即在此瞬间, 弹带与炮膛内壁之间互相没有压力作用。当弹丸经过最大膛压点后, 火药气体压力开始下降, 膛压对弹带压力的影响效应随之减弱, 对于厚壁弹体 (图 9-1-13 曲线 a), 弹带压力下降开始缓和, 下降至一定程度后, 弹带压力趋于稳定, 直至炮口; 对于薄壁弹体, 由于火药气体压力的影响效应超过弹带的磨损因素, 所以当膛压下降时其弹带压力将有所回升 (图 9-1-13 的曲线 b 和 c)。弹丸出炮口后, 弹带压力全部消失。

3. 影响弹带压力的因素

弹带压力的大小取决于以下因素:

(1) 弹带强制量 δ 的大小

弹带强制量 δ 是密闭火药气体和保证赋予弹丸旋转所必须的, 如果强制量为零, 将会引起火药气体外泄、弹丸初速产生跳动影响射弹精度; 但强制量增加, 弹带在嵌入过程中, 被挤压的金属增多, 因而弹带压力也会增加。如果强制量增加很多, 弹带压力将不正比地增加。因为这时大部分弹带材料被剪切和推向后部, 使弹带压力不会明显上升, 但会造成较多的铜屑留在膛内, 影响火炮射击。

(2) 弹带材料性质

弹带材料的机械性能, 特别是其韧性或延展性的好坏, 将影响弹带压力的大小。一般弹带均采用软质韧性较大的材料制成, 使弹带容易产生变形, 并减小嵌入时的阻力。当材料产生流动后, 内部应力将不再增加, 弹带压力也就不会增加。反之, 过硬的材料将会使弹带压力增大, 增加弹体承载。

(3) 弹带的尺寸与形状

弹带尺寸中对弹带压力影响较大的是弹带宽度与前倾角。弹带宽度不宜过大。宽度过大, 弹带难于嵌入膛线, 而且被挤压和剪切下来的弹带材料过多地堆积在弹带后部, 不利于弹丸继续运动, 造成弹带压力增加。具有前倾角的弹带, 易于嵌入膛线, 能减缓弹带压力增加。弹带上的沟槽能容纳被挤压与剪切下来的金属, 也可以使弹带压力减小。

(4) 弹体壁厚与弹体材料性质

由图 9-1-11 可知, 如果弹体壁较薄, 弹体材料较软, 在弹带嵌入过程中, 弹体发生的径向压缩较大, 实际上等于减小了弹带强制量, 因而可减小弹带压力。但对于弹带位于弹底附近 (如小口径高射榴弹) 的结构, 没有多大影响。

(5) 炮膛的尺寸与材料

炮膛的膨胀变形也会减小弹带压力。而炮膛尺寸与所用材料决定着炮膛的变形程度, 但其影响甚微, 一般可不考虑。

(6) 火药气体压力的大小

火药气体压力大小将直接影响弹丸和炮膛的变形程度，并间接影响弹带的压力大小。但在最大弹带压力 p_{bm} 时，火药气体压力较小，因而对 p_{bm} 的影响不大，但对弹丸继续运行过程中的弹带压力，有一定程度的影响。

4. 弹带压力计算

如前所述，影响弹带压力的因素很多，要写出其解析表达式是困难的。对于弹丸设计而言，要求在实验的基础上，推导出满足一定条件的经验关系式，以便估算弹带压力。

为推导关系式，现作如下假说：

(1) 弹体材料与弹带材料均满足线性强化条件，即应力应变曲线呈双线性关系（图 9-1-14）。弹性模量 $E = \tan \alpha_1$ ，强化模量 $E' = \tan \alpha_2$ ， σ_s 为屈服极限，强化系数 λ 为

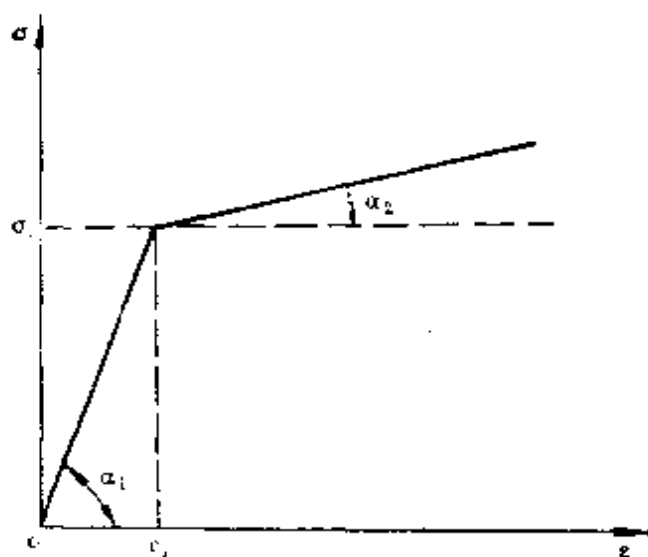


图9-1-14 真实应力曲线

$$\lambda = \frac{E - E'}{E} \quad (9-1-23)$$

对于一般弹体钢材 $\lambda = 0.95 \sim 1.0$ ，弹带钢材 $\lambda = 0.98 \sim 0.99$ 。

(2) 在塑性变形中，弹体金属材料体积不变。

(3) 弹体变形中发生的径向压缩量内外表面相等，此假设的误差不会超过 4 %。

其力学模型是将弹体看作半无限长圆筒，它的一端置于刚性

壁内,可近似表征弹底的影响(图9-1-15)。设弹带压力为 p_b ,经弹带传到弹体上的力为 p_{b1} 。分析弹带嵌入后能充满膛线的情况(即强制量 $\delta > 0$ 的情况),对于弹体可利用壳体理论,对于弹带可利用大变形塑性理论,这样可导出下列关系式。

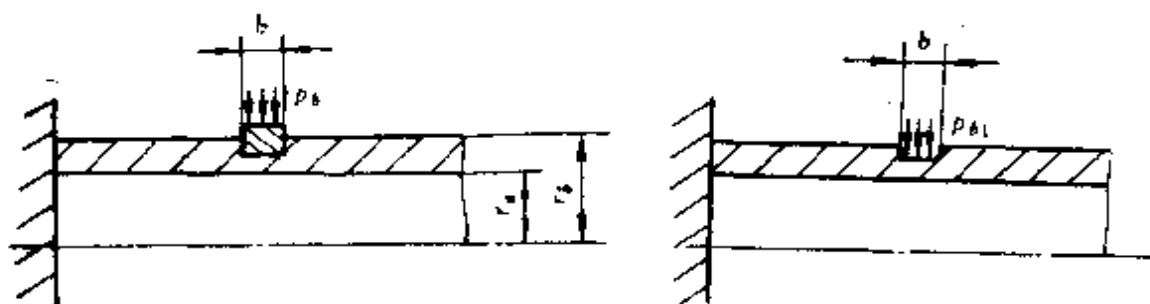


图9-1-15 弹带压力的力学模型

弹体所受局部载荷 p_{b1} 与弹体变形 W_0 的关系

$$p_{b1} = A_0 + B_0 W_0 \quad (9-1-24)$$

式中 A_0 、 B_0 是与弹体尺寸、材料有关的系数,分别为

$$A_0 = 0.94 \lambda_0 \frac{r_0 \sigma_{r0}}{K E_0} \left(1 + \frac{h_0}{2 r_0} \right) \quad (9-1-25)$$

$$B_0 = \frac{1}{K} (1 - 0.94 \lambda_0) \quad (9-1-26)$$

其中 r_0 ——弹带区弹体中间半径(图9-1-16);

E_0 ——弹体材料弹性模量;

λ_0 ——弹体材料的强化系数;

σ_{r0} ——弹体材料屈服极限;

h_0 ——弹体弹带区壁厚;

W_0 ——弹体压缩变形,半径上的位移量。

式中系数0.94是对目前各种榴弹适用的系数。 K 值是由壳体理论推导出来的变形与载荷关系的系数,在弹带不是位于弹底处的情况下, K 值为

$$K = \left(1 + \frac{h_0}{2 r_0} \right) \frac{r_0^2}{E_0 h_0} \left[1 - e^{-\beta b/2} \cos \left(\frac{1}{2} \beta b \right) \right] \quad (9-1-27)$$

式中的 β 由弹性理论得出

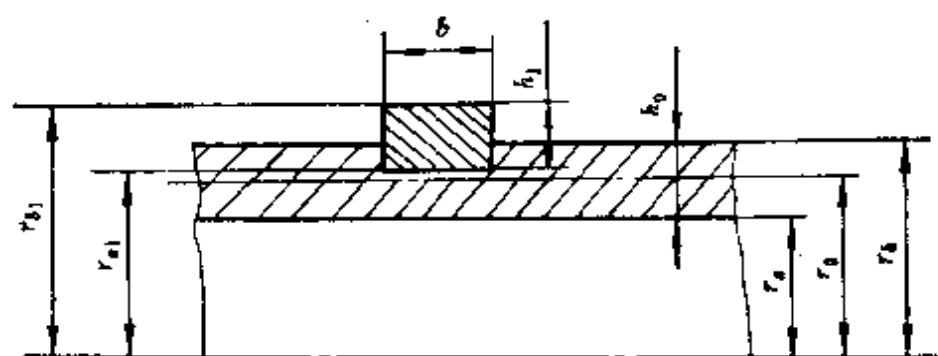


图9-1-16 弹带区的尺寸

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\mu^2)}{r_{a1}^2 h_1^2}} \quad (9-1-28)$$

b 为弹带宽度。

弹带压力的传递关系，由大变形规律可以导出

$$p_b - p_{b1} = A_1 + B_1 W_0 \quad (9-1-29)$$

式中 A_1 、 B_1 是与弹带尺寸材料有关的系数

$$A_1 = \frac{2\lambda_1 \sigma_{s1}}{\sqrt{3}} - \ln\left(\frac{r_{b1}}{r_{a1}}\right) \quad (9-1-30)$$

$$B_1 = \frac{4}{3r_{a1}} E_1 (1 - \lambda_1) \left(1 - \frac{r_{a1}^2}{r_{b1}^2}\right) \quad (9-1-31)$$

其中 r_{b1} ——弹带外半径，如有沟槽，可用等效外径（用面积等效法计算）；

r_{a1} ——弹带内半径；

σ_{s1} ——弹带材料屈服限；

E_1 ——弹带材料弹性模量；

λ_1 ——弹带材料强化系数。

对于弹带充满膛线的情况，弹带压力与弹带变形的关系可由下式表示：

$$p_b = A_2 - B_2 W_0 \quad (9-1-32)$$

其中 A_2 、 B_2 是与弹带尺寸、材料有关的系数

$$A_2 = \frac{2\lambda_1 \sigma_{s1}}{\sqrt{3}} + \frac{8}{3} E_1 (1 - \lambda_1) \frac{\delta_1}{h_1} \quad (9-1-33)$$

$$B_1 = -\frac{8}{3} E_1 (1 - \lambda_1) \left(\frac{1}{h_1} - \frac{1}{r_{b_1}} \right) \quad (9-1-34)$$

式中 δ_1 ——弹带平均强制量，即弹带外半径减去膛线平均半径；

h_1 ——弹带厚度。

由 (9-1-24)、(9-1-29) 和 (9-1-32) 式联立求解

$$\begin{cases} p_{b_1} = A_0 + B_0 W_0 \\ p_b - p_{b_1} = A_1 + B_1 W_0 \\ p_b = A_2 - B_2 W_0 \end{cases}$$

可得

$$W_0 = \frac{A_2 - A_1 - A_0}{B_0 + B_1 + B_2} \quad (9-1-35)$$

六、不均衡力

旋转式炮弹弹丸在膛内运动时，如果处于理想状况下，弹丸与膛壁之间除弹带压力外将不再有其它作用力，也就是说除弹带外其它部位将不与弹膛接触。但实际上，由于下列不均衡因素的影响，弹丸与膛壁之间互相还有作用力存在。这些不均衡因素是：

- (1) 弹丸质量分布的不均衡性；
- (2) 旋转轴与弹轴不重合；
- (3) 火药气体合力的偏斜；
- (4) 身管的弯曲与振动。

由于不均衡因素的存在，旋转炮弹在膛内运动时，弹丸的定心部将与炮膛接触，并产生压力，称为不均衡力。此力主要作用在上定心部与弹带上，方向为径向。一般讲这种力对弹丸的发射强度影响不大，但对弹丸在膛内运动、弹丸出膛口的初始姿态影响较大，最后将直接影响弹丸的射弹散布。

下面主要讨论前三个因素引起的不均衡力。

1. 弹丸质量分布不均衡引起的力

由于弹丸尺寸公差及材料密度变化，使弹丸的质量分布不可

能完全对称, 这种质量分布的不均衡性, 发射时就破坏了弹丸均衡运动的条件。因而将与膛壁间产生作用力。下面分析一下回转体静平衡与动平衡的概念及弹丸不均衡力的计算。

(1) 回转体平衡的概念

当一个质量分布均衡的回转体置于无摩擦的水平支座上 (图 9-1-17), 其支座反力与重力相平衡。无论把回转体转到什么位

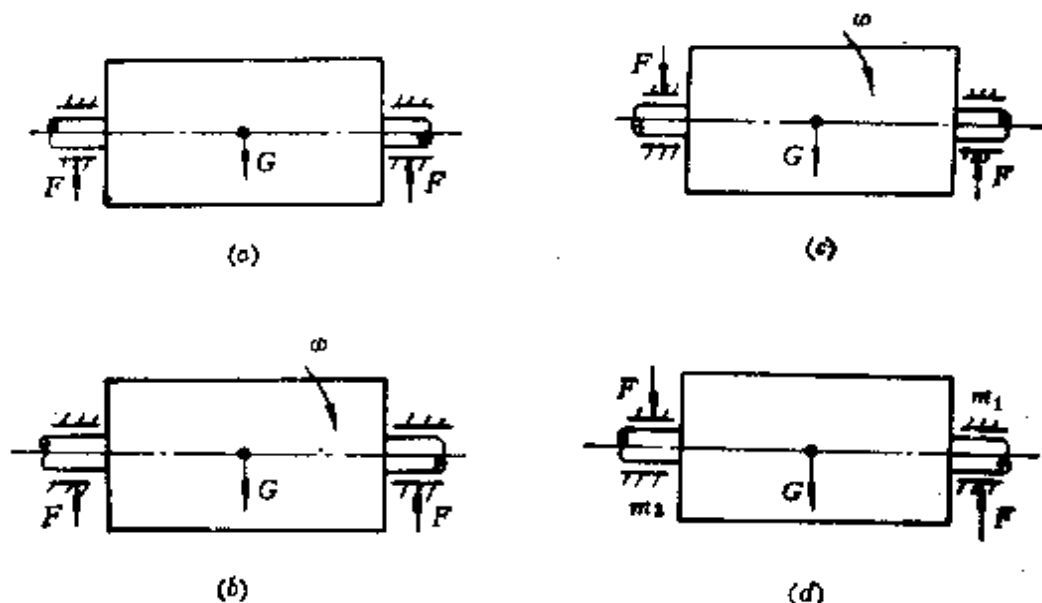


图9-1-17 静平衡和动平衡

置, 物体都可以在该位置保持静止平衡, 因而称之为静平衡体 (图 9-1-17 a)。此物体旋转时, 各质点离心力的合力为零, 支座反力不会增加或减少, 物体处于平衡状态, 称之为动平衡体 (图 9-1-17 b)。如果物体由于质量不均衡, 旋转时离心力合力不为零, 支座反力除平衡其重力外, 还将产生附加反力以平衡其转动形成的力矩, 这种物体称为动不平衡体 (图 9-1-17 c)。一般讲任何动不平衡体都可以分解为一个动平衡体加上两个不均衡质量 m_1 、 m_2 (图 9-1-17 d), 这两个质量的大小、位置 (设 m_1 位于半径 r_1 处, m_2 位于半径 r_2 处)、夹角 α 的大小将用来表示物体动不平衡的程度。一般常用参量

$$\begin{cases} D_1 = m_1 r_1 \\ D_2 = m_2 r_2 \end{cases} \quad (9-1-36)$$

来表示。

弹丸是一个动不平衡体。根据上面所述, 可以将它分解为一个较大的动平衡体 (弹丸), 加上两个较小的不平衡的质量 m_1 、 m_2 , 并认为这两个质量分别位于上定心部与弹带的外表面处 (这样假设并不会引起很大误差, 但可使问题简化)。 m_1 、 m_2 、 α 的具体数值与加工精度、尺寸公差、材料密度等均有关, 要写出具体的解析表达式是有困难的, 一般只能通过实验确定。

下面来考虑弹丸质量不平衡力的计算。

当弹丸沿内膛运动时, 弹丸质量均衡部分产生的离心力互相抵消, 而不均衡质量的影响则通过上定心部和弹带传至膛壁上, 从而形成膛膛反力。

图 9-1-18 表示弹丸在膛内运动时所受的力, 图中考虑两种极限情况, 即 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 180^\circ$, 其它情况显然均在此范围以内。根据力的平衡条件, 可列出下列方程式:

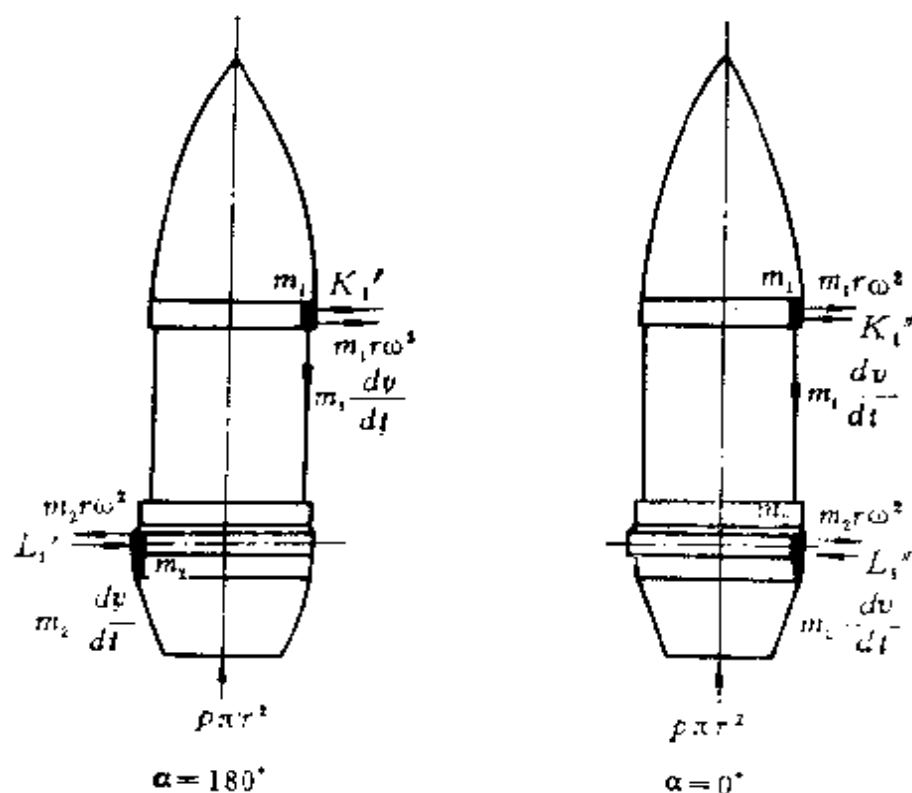


图 9-1-18 不平衡质量引起的膛壁反力

$\alpha = 180^\circ$ 时

$$\begin{cases} K'_1 + m_2 r \omega^2 = L'_1 + m_1 r \omega^2 \\ (K'_1 - m_1 r \omega^2) l_y + m_2 \frac{dv}{dt} r = m_1 \frac{dv}{dt} r \end{cases} \quad (9-1-37)$$

式中 l_y ——上定心部中心至弹带中心的距离,

ω ——弹丸的旋转角速度,

v ——弹丸膛内速度,

K_1 ——作用在上定心部的质量不平衡力,

L_1 ——作用在弹带上的质量不平衡力,

r ——弹丸半径。

由这两个方程式, 可以解出

$$\begin{cases} K'_1 = r \left[m_1 \omega^2 + (m_1 - m_2) \frac{1}{l_y} \times \frac{dv}{dt} \right] \\ L'_1 = r \left[m_2 \omega^2 + (m_1 - m_2) \frac{1}{l_y} \times \frac{dv}{dt} \right] \end{cases} \quad (9-1-38)$$

$\alpha = 0^\circ$ 时

$$\begin{cases} K''_1 + L''_1 = m_1 r \omega^2 + m_2 r \omega^2 \\ (K''_1 - m_1 r \omega^2) l_y = \left(m_1 \frac{dv}{dt} + m_2 \frac{dv}{dt} \right) r \end{cases} \quad (9-1-39)$$

解得

$$\begin{cases} K''_1 = r \left[(m_1 + m_2) \frac{dv}{dt} \times \frac{1}{l_y} + m_1 \omega^2 \right] \\ L''_1 = r \left[m_2 \omega^2 - (m_1 + m_2) \frac{1}{l_y} \times \frac{dv}{dt} \right] \end{cases} \quad (9-1-40)$$

比较 (9-1-38) 与 (9-1-40) 式可以看出:

$$K''_1 > K'_1$$

$$L'_1 > L''_1$$

也就是说, 当 $\alpha = 180^\circ$ 时, 弹带处不平衡力 L'_1 达到最大值, $\alpha = 0^\circ$ 时, 上定心部处的不平衡力 K''_1 达到最大值。

2. 旋转轴与弹轴不重合引起的力

回转体的动平衡性要求回转体绕其对称轴旋转。如果绕对称

轴以外的任何轴线旋转时，它的动平衡性也会遭到破坏，此时将会成为一个动不平衡体。

弹丸装填入膛后，由于弹、炮之间的间隙，弹丸在膛内总是倾斜一些。这时弹丸旋转是以炮膛轴线为旋转轴，于是在旋转轴与弹轴之间将产生一定角度。最严重的情况是，上定心部完全靠在一边（图 9-1-19），这时

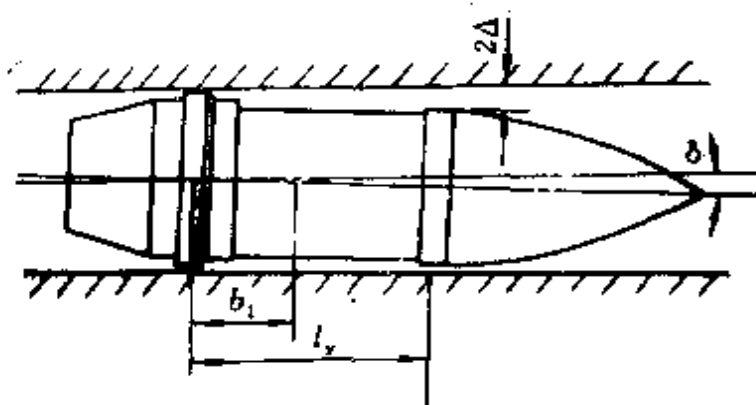


图 9-1-19 弹丸在膛内的偏斜

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\Delta}{l_y} \approx \frac{\Delta}{l_y} \quad (9-1-41)$$

式中 δ —— 膛内最大偏转角；

Δ —— 弹炮半径上的间隙，为火炮阳线半径减去弹丸上定心部半径。

δ 值取决于弹丸性能、火炮磨损，以及操作技术熟练程度。在良好情况下， δ 可能只有上述值的 1/5。

下面讨论旋转轴与弹轴不重合时所产生的不平衡力。先选择直角坐标系 $O-XYZ$ ，原点位于弹带中心， X 轴与弹丸旋转轴重合， Y 轴垂直 OX 轴并在旋转轴与弹轴所成的平面内， Z 轴垂直 XOY 平面（图 9-1-20）。

然后，在弹体上截取一个长条形单元体，它垂直于坐标平面 XOY ，其横截面为 $dx \cdot dy$ ，质量为 dm ，质心坐标为 $(x, y, 0)$ 。此单元体产生的离心力 dc 为

$$dc = y\omega^2 dm$$

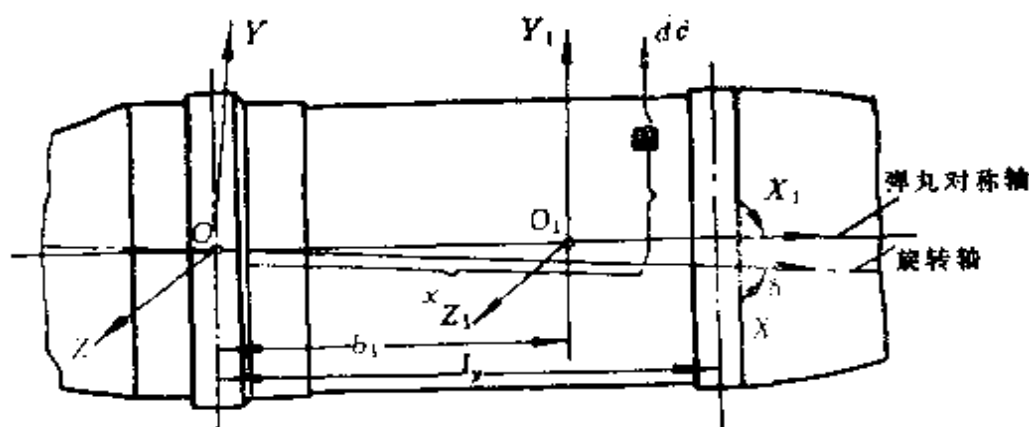


图9-1-20 弹丸上的旋转坐标

式中 ω ——弹丸的旋转角速度。

积分上式，得到弹丸的总离心力

$$c = \int_m dc = \omega^2 \int_m y dm = m\omega^2 b_1 \sin \delta \quad (9-1-42)$$

式中 b_1 ——弹丸质心至弹带中心的距离。

因为 δ 值很小，故可视 $\sin \delta = \delta$ ，所以

$$c = m\omega^2 b_1 \delta \quad (9-1-43)$$

由于旋转轴不是弹轴，总离心力也不通过弹丸质心。故在 XOY 平面内，不平衡力垂直于旋转轴 OX 。

条形单元体的离心力对 Z 轴产生的转矩

$$dM_K = x dc = xy\omega^2 dm$$

对整个弹丸质量积分，则得总转矩为

$$M_K = \int_m xy\omega^2 dm = \omega^2 \int_m xy dm \quad (9-1-44)$$

$\int_m xy dm$ 为弹丸对 x 轴和 y 轴的惯性积，以 J_{xy} 表示。为了求 J_{xy} ，必须另取一坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ ，原点 O_1 取在弹丸质心， O_1X_1 轴与弹轴重合， O_1Y_1 轴位于旋转轴与弹轴组成的平面内。可以看出，这两个坐标系的 XOY 平面和 $X_1O_1Y_1$ 平面重合，而 OX 轴和 O_1X_1 轴的夹角为 δ （图 9-1-20），这两个坐标系的关系由下列变换式得出

$$\begin{cases} x = (b_1 + x_1)\cos \delta - y_1\sin \delta \\ y = (b_1 + x_1)\sin \delta + y_1\cos \delta \\ z = z_1 \end{cases} \quad (9-1-45)$$

将惯性积 J_{xy} 用此坐标系表示, 即

$$\begin{aligned} J_{xy} &= \int_m (b_1\cos \delta + x_1\cos \delta - y_1\sin \delta)(b_1\sin \delta \\ &\quad + x_1\sin \delta + y_1\cos \delta)dm \\ &= b_1^2 \frac{\sin 2\delta}{2} \int_m x_1 dm + \frac{\sin \delta}{2} \int_m x_1 dm \\ &\quad + b_1\cos^2 \delta \int_m y_1 dm + b_1 \frac{\sin 2\delta}{2} \int_m x_1 dm \\ &\quad + \frac{\sin 2\delta}{2} \int_m x_1^2 dm + \cos^2 \delta \int_m x_1 y_1 dm \\ &\quad - b_1\sin^2 \delta \int_m y_1 dm - \sin^2 \delta \int_m x_1 y_1 dm \\ &\quad - \frac{\sin 2\delta}{2} \int_m y_1^2 dm \end{aligned}$$

因为新坐标系的原点即弹丸质心, 故

$$\int_m x_1 dm = 0$$

及

$$\int_m y_1 dm = 0$$

又因弹丸是对称的回转体, x_1 轴又是弹丸对称轴, 故

$$\int_m x_1 y_1 dm = 0$$

所以

$$\begin{aligned} J_{xy} &= mb_1^2 \frac{\sin 2\delta}{2} + \frac{\sin 2\delta}{2} \int_m x_1^2 dm \\ &\quad - \frac{\sin 2\delta}{2} \int_m y_1^2 dm \end{aligned}$$

根据弹丸赤道转动惯量公式

$$B = \int_m (x_1^2 + y_1^2) dm$$

及无限薄圆片转动惯量的公式可知

$$\int_m y_1^2 dm = \frac{1}{2} A$$

并得出

$$\int_m x_1^2 dm = B - \frac{1}{2} A$$

代入惯性积公式得

$$J_{xy} = [(B + mb_1^2) - A] \frac{\sin 2\delta}{2}$$

因 δ 一般很小, $\sin 2\delta \approx 2\delta$, 则

$$J_{xy} = [(B + mb_1^2) - A] \delta \quad (9-1-46)$$

代入 (9-1-44) 式得

$$M_K = \omega^2 J_{xy} = [(B + mb_1^2) - A] \delta \omega^2$$

在最不利的情况下, $\delta = \Delta / l_y$, 故

$$M_K = [(B + mb_1^2) - A] \frac{\Delta}{l_y} \omega^2 \quad (9-1-47)$$

此转矩使弹丸紧靠在膛壁上, 从而产生的不均衡力为

$$K_2 = \frac{M_K}{l_y} = [(B + mb_1^2) - A] \frac{\Delta}{l_y^2} \omega^2 \quad (9-1-48)$$

式中 K_2 ——因旋转轴与弹轴不重合引起的上定心部的不均衡力。

若不考虑总离心力的方向误差, 则在弹带上同样也产生不均衡力 L_2 (图 9-1-21)。由图可见

$$L_2 = C - K_2$$

式中 L_2 ——因旋转轴与弹轴不重合引起的弹带的不均衡力。

将 (9-1-43) 式代入, 并整理得

$$L_2 = [mb_1(l_y - b_1) - (B - A)] \frac{\Delta}{l_y} \omega^2 \quad (9-1-49)$$

比较 (9-1-48) 和 (9-1-49) 两式可知, 当弹丸质心位置正好在弹带中心 ($b_1 = 0$), 则两个力的大小相等, 方向相反。但

一般情况下, 弹丸质心位于弹带前面 (即 $b_1 > 0$), 则 $K_2 > L_2$ 。

3. 火药气体压力合力偏斜引起的力

一般认为, 火药气体压力合力的作用线与炮膛轴线重合, 由于弹丸在膛内运动时相对于炮膛轴线有偏斜, 则火药气体压力合力也与弹轴发生偏斜。在此情况下, 火药气体对弹丸产生转矩的作用 (图 9-1-21)。

弹丸质心离开火药气体作用线距离为

$$\xi = b_1 \sin \delta \approx b_1 \delta$$

由此产生的转矩为

$$M_K = p\pi r^2 \xi = p\pi r^2 b_1 \delta$$

此转矩在上定心部与弹带处产生的反力分别为 K_3 与 L_3 , 于是

$$K_3 = L_3 = \frac{M_K}{l_y} = p\pi r^2 b_1 \frac{\Delta}{l_y^2} \quad (9-1-50)$$

可见, K_3 与 L_3 大小相等, 方向相反。

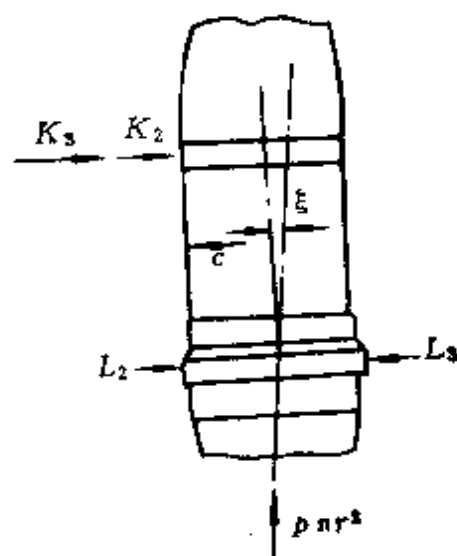


图9-1-21 旋转轴与对称轴不重合引起的不平衡力

4. 最大可能不平衡力

上定心部处 在最不利的情况下, 各种因素引起的不平衡力在上定心部同时达最大值, 且方向一致, 这时有

$$K_{\max} = K_1^* + K_2 + K_3$$

将 K_1^* 、 K_2 和 K_3 值代入, 并注意到 $dv/dt = p\pi r^2/m$ 和 $\omega = \frac{\pi}{\eta} \times \frac{v}{r}$, 则

$$K_{\max} = \left[m_1 r + (B - A + b_1^2 m) \frac{\Delta}{l_y^2} \right] \left(-\frac{\pi}{r\eta} \right)^2 v^2 + p\pi r^2 \left[\frac{m_1 + m_2}{m} \times \frac{r}{l_y} + \frac{\Delta b_1}{l_y^2} \right] \quad (9-1-51)$$

弹带处 如果满足 $K_{\max}$ 条件, L_1' 与 L_3 与 $K_{\max}$ 反向, L_2 与 $K_{\max}$ 同向, 所以最大不平衡力为

$$L_{\max} = L'_1 - L_2 + L_3$$

将各值代入，并整理得

$$L_{\max} = \left\{ m_2 r + [B - A - mb_1(l_1 - b_1)] \cdot \frac{\Delta}{l_v^2} \right\} \left(-\frac{\pi}{\eta r} \right)^2 v^2 \\ + p\pi r^2 \left(\frac{m_1 - m_2}{m} \times \frac{r}{l_v} + \frac{\Delta b_1}{l_v^2} \right) \quad (9-1-52)$$

由以上两式可知， $K_{\max}$ 与 $L_{\max}$ 与膛内的膛压和速度有关。由于它们和速度的平方相关，故总的来说还是在炮口处达到最大值。

七、摩擦力

弹丸在膛内运动时所受的摩擦阻力分为两部分，一部分是弹带（或枪弹导引部）嵌入膛线后，在导转侧面上产生的，对炮弹来说外圆柱面也与炮膛紧密接触，从而产生摩擦力，其摩擦阻力 F 为

$$F = f \cdot N + f p_b S_0 \quad (9-1-53)$$

式中 p_b ——弹带压力；

N ——导转侧力；

S_0 ——弹带与炮膛接触的外圆柱面积；

f ——摩擦系数。

第二部分是因不平衡力使弹丸上定心部与弹带偏向一方，在某些位置上引起摩擦力。对于枪弹一般没有这部分力。

第二节 弹丸发射时的强度

弹丸发射时的强度，主要是指炮弹弹体在发射时强度应满足的要求和炸药等装填物不发生危险。枪弹弹头壳的强度将与弹带一起在下节讨论。分析的方法是，计算弹丸在各种载荷下所产生的应力与变形，根据设计要求，使其满足一定的强度条件。

弹丸的强度计算与一般机械零件的强度计算是有区别的，要

考虑到弹丸是一次性使用的产品,其强度计算没有必要过分保守,这样可以充分发挥弹丸的威力;另一方面弹丸的安全性又必须是完全可靠的。这就需要从实际情况出发,制定出既科学又合理的强度条件。

一、发射时弹体的应力与变形

弹体在发射时的应力分析,是基于材料力学的应力应变分析方法。根据弹体结构和载荷的具体情况,对于上节所介绍的各种载荷,有的对发射强度影响甚微,因此在弹体应力分析中,只考虑火药气体压力、惯性力、装填物压力和弹带压力,其余可不计及。

由材料力学可知,为了分析一点处的应力状态,可在该点处取一个小的六方体微元,在一般情况下,一点处的应力状态由六个应力分量来表示,即三个正应力和三个剪应力。若所取立方体上只有正应力而没有剪应力,这样的立方体的平面称为主平面,其表面上的正应力称为主应力。主平面的法线方向即为主方向。用主应力来表示应力状态,会使问题的分析与计算大为简化。

弹体是轴对称体,弹体的外表面上显然没有剪应力,因而外表面任意点的切平面都是主平面,故对火炮弹丸而言,一般认为轴向、径向和切向为其主方向,其三向主应力为轴向应力 σ_x 、径向应力 σ_r 和切向应力 σ_t (图 9-2-1)。

由图可见,对于弹体圆柱部这三向主应力是与实际相符合的,而对于弧形部与尾锥部则有一定的误差。一般认为弧形部受力较小,应力也比较小,对弹体强度影响不大,应力方向的误差可以不予考虑。尾锥部带有尾锥角,三个主方向也要发生变化,但大部分尾锥部的尾锥角在 $6^\circ \sim 9^\circ$ 范围以内,对主方向改变也影响不大。因此为简化起见,对整个弹体均以轴向应力、径向应力和切向应力为三向主应力。下面讨论这三向应力。

1. 轴向应力 σ_x

弹体内的轴向应力,主要是由轴向惯性力引起的,在弹体的不同断面上轴向惯性力不同,因而轴向应力也不同。以某一断面

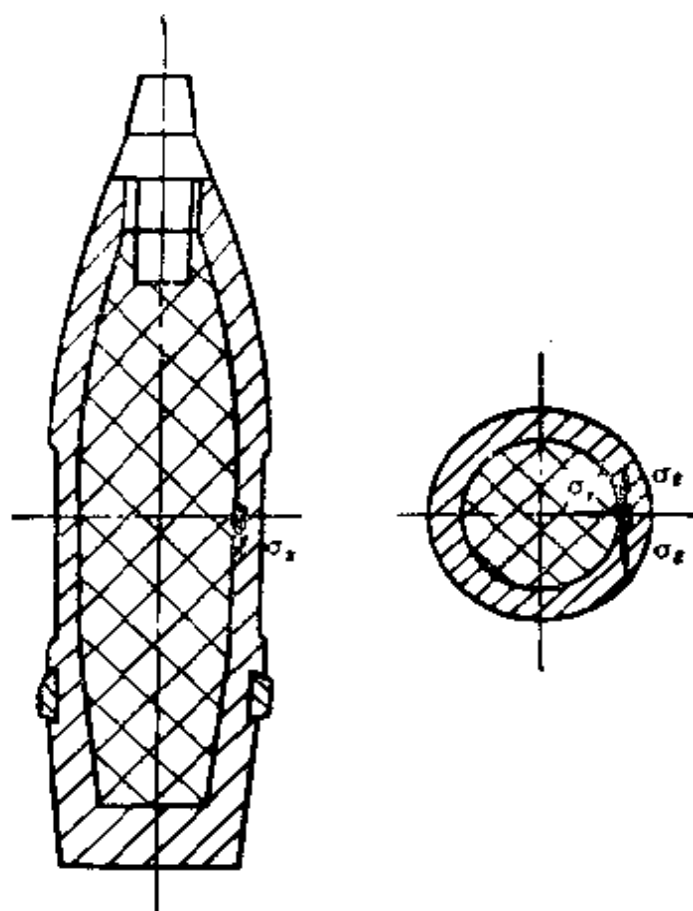
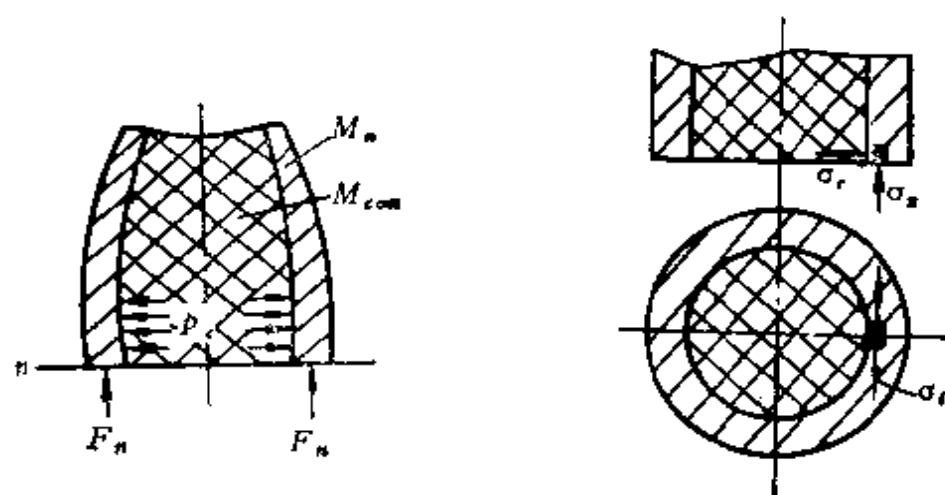


图9-2-1 榴弹弹体的主应力

$n-n$ 割截弹体，则弹体截面上受的 惯性力（图 9-2-2）为

图9-2-2 $n-n$ 断面上所受载荷与应力

$$F_n = p\pi r^2 \frac{M_n}{M} \quad (9-2-1)$$

式中 p ——计算压力,

r ——弹丸半径,

M_n ——断面以上弹体联系质量 (即包括与弹体连在一起的其它零件),

M ——弹丸质量。

由此力引起的轴向应力为

$$\sigma_z = \frac{-F_n}{\pi(r_{bn}^2 - r_{an}^2)} = -p \frac{r^2}{r_{bn}^2 - r_{an}^2} \times \frac{M_n}{M} \quad (9-2-2)$$

式中 r_{bn} —— $n-n$ 断面上弹体的外半径,

r_{an} —— $n-n$ 断面上弹体的内半径。

当 $n-n$ 断面取在尾锥部时, 作用在此断面上的质量, 除断面以上弹体质量外, 还有一部分装填物的质量 (见图 9-1-7), 故此时轴向应力应为

$$\sigma_z = -p \frac{r^2}{r_{bn}^2 - r_{an}^2} \times \frac{M_n + M'_{wn}}{M} \quad (9-2-3)$$

2. 径向应力 σ_r

在整个弹体壁厚上径向应力是不相等的。由厚壁圆筒应力分布可知, 一般内表面的应力较大, 因此从强度分析来说主要分析内表面的应力状态。

弹体 $n-n$ 断面的内表面上所受的 压力即装填物对弹体的压力, 由 (9-1-13) 式可知, 其径向应力为

$$\sigma_{r1} = -p_s = -p \frac{r^2}{r_{an}^2} \times \frac{M'_{wn}}{M}$$

由于弹丸旋转, 内部装填物将有附加压力作用在弹壁上, 由 (9-1-17) 式可知其附加径向应力为

$$\sigma_{r2} = -p_r = -\frac{\pi^2 \rho_{\omega}}{3} \left(\frac{v}{\eta} \right)^2 \left(\frac{r_{an}^2}{r} \right)$$

其总的 径向应力应为 σ_{r1} 和 σ_{r2} 之和。但 σ_{r2} 远小于 σ_{r1} , 故在分析最大膛压时刻的弹体强度时, 也可以忽略 σ_{r2} 的影响。

3. 切向应力 σ_t

若将弹体简化为只受内压的厚壁圆筒, 则 σ_t 为

$$\sigma_r = \frac{\rho_l (r_{bn}^2 + r_a^2)}{r_{bn}^2 - r_a^2} \quad (9-2-4)$$

4. 由弹体旋转产生的径向应力和切向应力

由于弹丸旋转在弹体上引起的应力，可以应用材料力学中旋转圆盘公式进行计算，如图 9-2-3 所示。圆盘任一半径 r_x 处的应力为

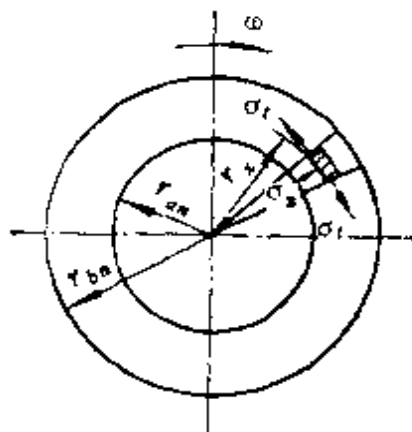


图9-2-3 旋转圆盘

$$\sigma_{rs} = \frac{(3+\mu)\rho_m\omega^2}{8} \left(r_{an}^2 + r_{bn}^2 - \frac{r_{an}^2 r_{bn}^2}{r_x^2} - r_x^2 \right)$$

$$\sigma_{rt} = \frac{\rho_m\omega^2}{8} \left\{ (3+\mu) \left(r_{an}^2 + r_{bn}^2 + \frac{r_{an}^2 r_{bn}^2}{r_x^2} \right) - (1+3\mu)r_x^2 \right\}$$

因为旋转圆盘的应力状态是平面应力状态，而弹丸旋转时存在 σ_z ，应看作为平面应变状态。只需将上两式中的 μ 用 $\frac{\mu}{1-\mu}$ 代入，即可得弹体旋转时的应力

$$\sigma_{rs} = \frac{3-2\mu}{1-\mu} \times \frac{\rho_m\omega^2}{8} \left(r_{an}^2 + r_{bn}^2 - \frac{r_{an}^2 r_{bn}^2}{r_x^2} - r_x^2 \right) \quad (9-2-5)$$

$$\sigma_{rt} = \frac{3-2\mu}{1-\mu} \times \frac{\rho_m\omega^2}{8} \left(r_{an}^2 + r_{bn}^2 + \frac{r_{an}^2 r_{bn}^2}{r_x^2} - \frac{1+2\mu}{3-2\mu} r_x^2 \right) \quad (9-2-6)$$

式中 μ —— 弹体材料泊桑系数；

ρ_m —— 弹体材料密度；

ω —— 弹丸旋转角速度。

若只计算弹体内表面处的应力, 则由(9-2-5)、(9-2-6)式可见, 当 $r_2 = r_{an}$ 时, $\sigma_{r2} = 0$, 其时 σ_t 为最大值, 内表面处的切向应力为

$$\sigma_{t2} = \frac{3-2\mu}{1-\mu} \times \frac{\rho_m}{4} \left(\frac{\pi}{\eta r} \right)^2 v^2 \left(r_{bn}^2 + \frac{1-2\mu}{3-2\mu} r_{an}^2 \right) \quad (9-2-7)$$

从上式可知, 由旋转产生的应力与弹丸膛内速度的平方成正比, 故在炮口区达到最大值。

弹体总的切向应力为

$$\sigma_t = \sigma_{t1} + \sigma_{t2}$$

由于 σ_{t1} 与 σ_{t2} 不同步, σ_{t1} 在最大膛压时刻达到最大值, σ_{t2} 在炮口处达到最大值, 因此, 一般在计算最大膛压时的发射强度, 也可以忽略 σ_{t2} 的影响。

下面具体讨论发射时弹体受力状态和变形情况。

发射时弹丸在各种载荷的作用下, 产生应力和变形。从载荷变化的特点来看, 对一般线膛火炮弹丸而言, 弹丸受力与变形有三个危险的临界状态, 如图 9-2-4 中的 I、II、III 时刻。为了确保弹丸发射时的强度, 必须对每个临界状态进行强度校核。

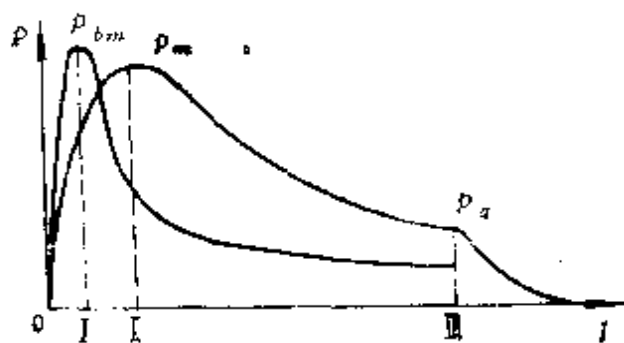


图9-2-4 弹体受力与变形的三个危险临界状态

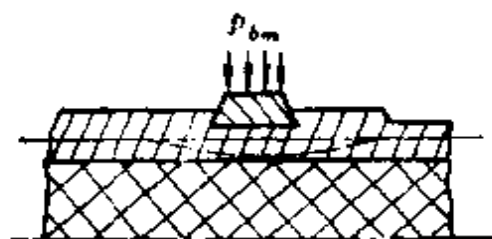


图9-2-5 第一临界状态时弹带区的变形情况

(1) 弹丸受力和变形的第一临界状态

这一临界状态相当于弹带嵌入膛线完毕, 弹带压力达到最大值时(图 9-2-4 的 I 点处)的情况。这一时期的特点是: 火药气体压力及弹体上相应的其它载荷都很小, 整个弹体其它区域的应力

和变形也很小，唯有弹带区受较大的径向压力，使其达到弹性或弹塑性径向压缩变形。变形情况如图 9-2-5 所示。

(2) 弹丸受力和变形的第二临界状态

这一临界状态相当于最大膛压时期（图 9-2-4 的 I 点处）。这一时期的特点是：火药气体压力达到最大，弹丸加速度也达到最大，同时由于加速度而引起的惯性力等均达到最大。这时弹体各部分的变形也极大。榴弹的变形情况是：弧形部和圆柱部在轴向惯性力作用下产生径向膨胀变形和轴向压缩变形；弹带区与尾锥部，由于有弹带压力与火药气体压力作用，会发生径向压缩变形；弹底部在弹底火药气体作用下，可能产生向里弯凹（图 9-2-6）。在这些变形中，尾锥部与弹底区变形比较大，有可能达到弹塑性变形。

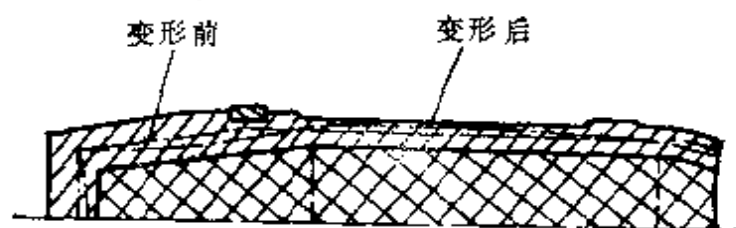


图 9-2-6 第二临界状态弹体的变形

从弹丸发射安全性角度出发，只要能保持弹体金属的完整性、弹体结构的稳定性和弹体在膛内运动的可靠性，以及发射时炸药的安全性，弹体发生一定的塑性变形是可以允许的。

(3) 弹丸受力和变形的第三临界状态

这一临界状态相当于弹丸出炮口时刻（图 9-2-4 的 III 点处）。这一时期的特点是：弹丸的旋转角速度达到最大，与角速度有关的载荷达到最大值，但与弹体强度有关的火药气体压力等载荷均迅速减小，弹体上变形也相应减小。弹丸飞出炮口瞬间，大部分载荷突然卸载，将使弹体材料因弹性恢复而发生振动，这种振动会引起拉伸应力与压缩应力的相互交替作用。因此对于某些抗拉强度大大低于抗压强度的脆性材料，必须考虑由于突然卸载而产生拉伸应力对弹体的影响。

二、发射时弹体强度计算

发射时弹体强度计算,就是在求得弹体内各处应力的条件下,根据有关强度理论对弹体进行校核。如前所述,弹丸在膛内应当校核第一临界状态(弹带压力最大)和第二临界状态(膛压最大)时的强度。弹体强度校核的标准有两类,一类是用应力表示,即按照不同强度理论计算弹体上各断面的相当应力(综合应力),然后与弹体材料的许用应力相比较;另一类是用变形表示,即按照不同理论公式或经验公式计算某几个断面上的变形和残余变形,然后与战术技术要求的变形值相比较。实际应用中这两类方法可同时采用。其中对于后者,可以用试验来验证,它是弹药验收的必做项目。

1. 第一临界状态的强度校核

弹丸处于第一临界状态时,弹体上所受载荷主要是弹带压力,其余载荷均比较小,因此可只考虑弹带压力的影响。故只需校核弹带区的强度,一般应用第二类校核方法,即校核其变形或残余变形。

在弹带压力计算中已述及,弹带区可简化为半无限长圆筒,承受局部环形载荷(图 9-1-15)。由 (9-1-35) 式可知,外表面的变形为

$$W_0 = \frac{A_2 - A_1 - A_3}{B_0 + B_1 + B_2}$$

弹体和弹带的材料、尺寸等因素的影响反映在参量 A_1 、 B_1 、等之中。

弹体的残余变形减去弹性恢复变形,即

$$W^* = W_0 - K p_{b1} \quad (9-2-8)$$

式中 W^* ——弹体(弹带区)外半径上的残余变形;

K ——系数,由 (9-1-27) 式确定;

p_{b1} ——弹体上所受局部环形载荷,由 (9-1-24) 式确定。

其强度条件为

$$2W^* < [2W^*] \quad (9-2-9)$$

式中 $[2W^*]$ ——战术技术条件所允许的残余变形。

2. 第二临界状态的强度校核

弹丸处于第二临界状态时，弹体受到的膛内火药气体压力作用达到最大，加速度也达到最大，因而惯性力、装填物压力等均达到最大值。相比之下，弹带压力下降很多，故可将弹带压力略去（若不略去此压力，则对弹体安全更有利）。另外此时弹丸的旋转角速度尚很小，在应力计算中可以略去由旋转产生的应力。

这时必须对整个弹体所有部位都进行强度校核，在整个弹体上找出最危险断面（应力最大断面），对最危险断面进行强度校核。校核时，可以用第一类校核方法（限制应力），也可以用第二类校核方法（限制变形）。

常用的方法有：

（1）布林克方法

将弹体简化为无限长厚壁圆筒，并将弹体分成若干断面，计算每个断面内表面处的三向主应力，用第二强度理论校核弹体内表面的强度。

对于旋转式弹丸，如不计及旋转的影响，其三向应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_z = -p \frac{r^2}{r_{bn}^2 - r_{an}^2} \times \frac{M_n}{M} \\ \sigma_r = -p \frac{r^2}{r_{an}^2} \times \frac{M_{wn}}{M} \\ \sigma_t = \frac{p(r_{bn}^2 + r_{an}^2)}{r_{bn}^2 - r_{an}^2} \end{cases}$$

式中正号表示拉应力，负号表示压应力。如果断面位于尾锥部，则 σ_z 用 (9-2-3) 式代替， σ_r 用 (9-1-13) 式代替。

根据广义虎克定律，三个方向上的主应变分别为

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= -\frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_r + \sigma_t)] \\ \varepsilon_r &= -\frac{1}{E} [\sigma_r - \mu (\sigma_t + \sigma_z)] \end{aligned}$$

$$\varepsilon_r = -\frac{1}{E} [\sigma_r - \mu (\sigma_z + \sigma_t)]$$

式中 E ——弹体金属的弹性模量,

μ ——弹体金属的泊桑系数。

根据第二强度理论 (最大应变理论), 若某点处主应变超过一定值, 则材料屈服 (或破坏), 对应此应变的相当应力为

$$\bar{\sigma}_z = \varepsilon_z E = \sigma_z - \mu (\sigma_r + \sigma_t)$$

$$\bar{\sigma}_r = \varepsilon_r E = \sigma_r - \mu (\sigma_t + \sigma_z)$$

$$\bar{\sigma}_t = \varepsilon_t E = \sigma_t - \mu (\sigma_z + \sigma_r)$$

将应力表达式代入上式, 取 $\mu = \frac{1}{3}$ 则得:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_z = -\frac{p}{3M} \times \frac{r^2}{r_{bn}^2 - r_{an}^2} (2M_{on} + 3M_n) \\ \bar{\sigma}_r = -\frac{p}{3M} \times \frac{r^2}{r_{bn}^2 - r_{an}^2} \left(2M_{on} \frac{2r_{bn}^2 - r_{an}^2}{r_{an}^2} - M_n \right) \\ \bar{\sigma}_t = \frac{p}{3M} \times \frac{r^2}{r_{bn}^2 - r_{an}^2} \left(2M_{on} \frac{2r_{bn}^2 + r_{an}^2}{r_{an}^2} + M_n \right) \end{cases} \quad (9-2-10)$$

分析以上三式的符号可以看出:

a. 轴向相当应力 $\bar{\sigma}_z$ 恒为负值, 故弹体在轴向总是压缩变形;

b. 切向相当应力 $\bar{\sigma}_t$ 恒为正值, 故弹体内表面在切向总是拉伸变形;

c. 径向相当应力 $\bar{\sigma}_r$ 的正负取决于括号内的数值。

弹体的强度条件为:

$$\bar{\sigma}_z \leq \sigma_{0.2}$$

$$\bar{\sigma}_r \leq \sigma_{0.2}$$

$$\bar{\sigma}_t \leq \sigma_{0.2}$$

在一般情况下, $\bar{\sigma}_r$ 远小于 $\bar{\sigma}_z$ 与 $\bar{\sigma}_t$, 所以只需校核 $\bar{\sigma}_z$ 与 $\bar{\sigma}_t$, 即可。

最危险断面可能发生在弹尾区 (因这些断面上 M_n 、 M_{on} 较大), 也可能发生在弹带槽处 (因断面积较小)。为了找出最危

险断面，可作出相当应力沿弹长分布曲线（图 9-2-7）。应当指出，布林克方法是基于无限长厚壁圆筒的力学模型，故对于弹体定心部、圆柱部等处的断面校核比较合理，而接近弹底区域不能简化为无限长圆筒，这样误差就大得多。因此，用布林克方法校核强度只需计算到弹尾尾柱部分，不宜一直算到弹底。显然，在弹底断面处是不符合假设条件的。

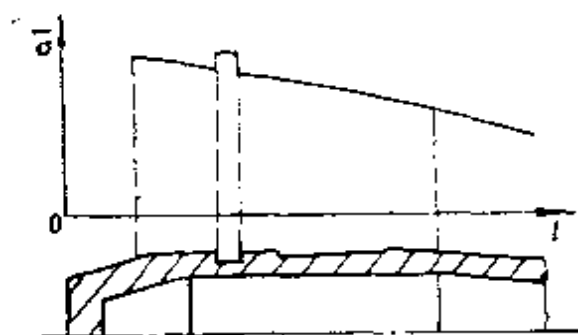
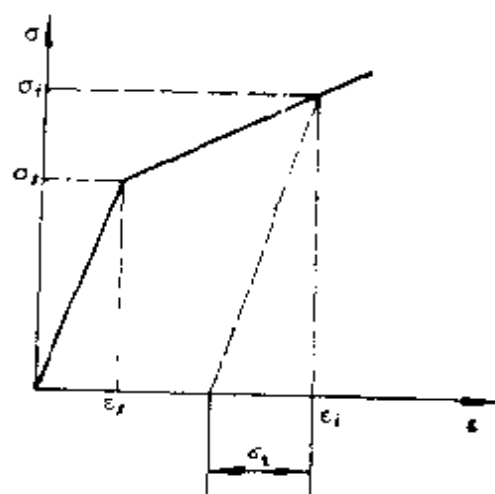


图9-2-7 弹体上相当应力分布曲线

图9-2-8 线性强化的 $\sigma - \epsilon$ 曲线

布林克方法的优点是，计算简单，对弹带区以前的弹体强度基本上与实际符合。因此，此法目前仍然被广大弹丸设计工作者所采用。它的缺点是，简化模型与弹尾部相差较大，因而弹尾部的计算误差就较大。另外，没有考虑弹体的塑性变形，用材料屈服限来限制应力，要求太苛刻。为了与实际情况更接近，可将强度条件修改为

$$\bar{\sigma} \leq K \sigma_{0.2} \quad (9-2-11)$$

式中 K 为符合系数，它可由经过考验的类似弹丸的数据得出。对于目前弹丸 K 值，一般在1.2~1.4的范围内。

（2）弹塑性计算

布林克方法基本上没有考虑弹体的塑性变形。实际上在第二临界状态时，弹丸受到的膛压为最大，弹体有可能发生塑性变形。因此，在各断面处均需计算其弹塑性变形，尤其在上定心部和下定心部等处，弹丸间隙较小，膨胀变形过大，将会引起较大的膛

线印痕，甚至发生阻塞事故。

弹塑性计算，是考虑弹体材料进入塑性变形后弹体外表面所发生的应变和残余变形，并将残余变形限于某一允许范围内。

若材料符合线性强化规律，则其应力应变曲线如图 9-2-8 所示。当材料所受的应力 σ_i 超过屈服限 σ_s 后，其应力为：

$$\sigma_i = \varepsilon_s E + (\varepsilon_i - \varepsilon_s) E' \quad (9-2-12)$$

式中 E ——材料的弹性模量，

E' ——材料的强化模量。

取强化系数 $\lambda = (E - E')/E$ ，则 (9-2-12) 式可简化为

$$\sigma_i = \varepsilon_s E + \varepsilon_i E' - \varepsilon_s E' = \varepsilon_s \lambda E + \varepsilon_i (1 - \lambda) E$$

由此可得

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{\sigma_i - \varepsilon_s \lambda E}{(1 - \lambda) E} = \frac{\sigma_i - \sigma_s \lambda}{E(1 - \lambda)} \\ &= \frac{\sigma_i - \sigma_s \lambda}{E(1 - \lambda) \sigma_i} \cdot \sigma_i = \frac{\sigma_i}{E''} \end{aligned} \quad (9-2-13)$$

式中 E'' ——总应变折算模量。

$$E'' = \frac{\sigma_i (1 - \lambda)}{\sigma_i - \sigma_s \lambda} E = \frac{1 - \lambda}{1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_i} \lambda} E \quad (9-2-14)$$

故弹塑性应力应变关系仍然可以采用弹性区相似形式的关系式，只是将弹性模量 E 换成折算模量 E'' 即可。

按弹塑性变形计算弹体应变一般是计算弹体外表面的应变，在所选择断面的外表面处取一微元体（图 9-2-9），计算此微元体的三向主应力。由于弹带密闭火药气体，计算中可以将弹体看作为只受内压的薄壁圆筒处理：

$$\begin{cases} \sigma_z = -p \frac{r^2}{r_{bn}^2 - r_{an}^2} \times \frac{M_s}{M} \\ \sigma_r = 0 \\ \sigma_t = \frac{p_0(r_{bn} + r_{an})}{2(r_{bn} - r_{an})} \end{cases} \quad (9-2-15)$$

其三个方向的主应变为

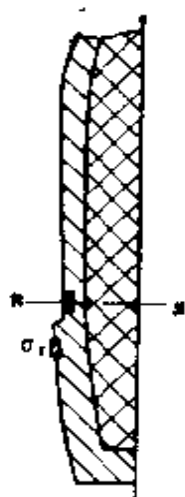


图9-2-9 弹体外表面处的单元体

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E''} \left[\sigma_x - \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_t) \right]$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E''} \left[\sigma_r - \frac{1}{2} (\sigma_t + \sigma_x) \right]$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E''} \left[\sigma_t - \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_x) \right]$$

E'' 应用 (9-2-14) 式计算, 式中的 σ_i 可用综合应力表示, 即

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_x)^2}$$

材料进入塑性状态后, $\mu = -\frac{1}{2}$ 。

为了与试验结果相比较, 尚需计算外表面的残余变形。由图 9-2-8 可见

$$\begin{aligned} \varepsilon^* &= \varepsilon_t - \varepsilon_r = \frac{\sigma_t - \sigma_r \lambda}{E(1 - \lambda)} - \frac{\sigma_r}{E} = \frac{(\sigma_t - \sigma_r) \lambda}{E(1 - \lambda)} \\ &= \frac{(\sigma_t - \sigma_r) \lambda}{E(1 - \lambda) \sigma_i} \sigma_i = \frac{\sigma_i}{E^*} \end{aligned} \quad (9-2-16)$$

式中 E^* ——残余应变折算模量,

$$E^* = \frac{E(1 - \lambda) \sigma_i}{(\sigma_t - \sigma_r) \lambda} = \left(1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_t} - \lambda \right) E \quad (9-2-17)$$

此式中 σ_r 仍可用相当应力代入。

弹体外表面的径向变形为

$$W = r\varepsilon_r$$

径向残余变形为

$$\begin{aligned} W^* &= r\varepsilon_r^* = r \frac{1}{E^*} \left[\sigma_r - \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_z) \right] \\ &= r \left(\frac{1 - \frac{\sigma_z}{\sigma_r}}{E(1 - \lambda)} \right) \lambda \left[\sigma_r - \frac{1}{2} (\sigma_r + \sigma_z) \right] \quad (9-2-18) \end{aligned}$$

弹体强度条件为

$$2W^* < [2W^*] \quad (9-2-19)$$

式中 $[2W^*]$ ——战术技术要求所允许的残余变形，由产品图规定。

三、弹底强度计算

发射时弹底直接承受火药气体压力和装填物惯性力的作用，使弹底部产生弯曲变形。在变形过大时，可能会引起其上部装填物产生较大的局部应力，甚至使弹底破坏，导致发射时不安全。因此弹底必须具备一定强度，使发射时的变形量保持在许可的范围内。

目前弹底强度计算主要是从弯曲强度角度来考虑。

1. 弹底上的受力与变形分析

因为弹底与弹尾部是一个整体，研究弹底部的应力与变形必须联系到弹尾部的受力状态。图 9-2-10 示出弹底区的受力情况。由图可见，弹底区外部直接受火药气体压力 p ，内部承受装填物压力 p_c ，此外还有弹底金属本身的惯性力 F_a 。

弹底区的变形情况，可以分别考虑轴向载荷与径向载荷的作用。对于轴向载荷，一般 p 远大于 p_c ，故弹底为向上弯曲变形，如图 9-2-11(a) 所示。随着弹底向上弯曲，弹尾部的侧面将向外膨胀。对于径向载荷同样是 p 大于 p_c ，所以径向也是向内压缩，如图 9-2-11(b) 所示。随着弹尾部侧面向内压缩，弹底将产

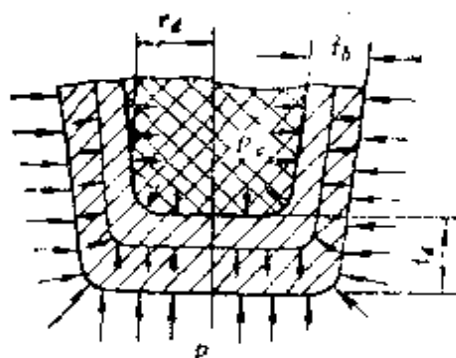
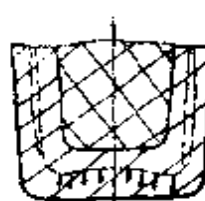
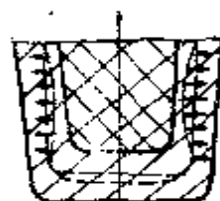


图9-2-10 弹底区的受力情况



(a)



(b)

图9-2-11 弹底的变形情况

生向下弯曲的趋势，这样轴向载荷与径向载荷对弹底的作用是互相补偿的。也就是说，尾锥部上的径向压力在一定程度上抵消了轴向载荷对弹底的作用，为了简化弹底强度计算和保证安全，我们将仅从轴向载荷来考虑弹底部的强度。

基于以上分析，将弹底区作如下简化。将弹底看成一块周边受到夹持的圆板，承受一等效载荷 $\bar{p}_z$ 。 $\bar{p}_z$ 为火药气体压力 p 、装填物压力 p_c 及弹底惯性力 F_d 综合而成（图 9-2-12），即

$$\bar{p}_z = p - p_c - \frac{F_d}{\pi r_d^2}$$

p_c 与 F_d 可用下式表示，

$$p_c = p \frac{r^2}{r_d^2} \times \frac{M'_w}{M}$$

$$F_d = p \pi r^2 \frac{M_d}{M}$$

其中 r ——弹丸半径，

r_d ——弹底半径，

M'_w ——弹底面上装填物柱体质量，

M_d ——弹底部分质量。

则可得到

$$\bar{p}_z = p \left(1 - \frac{r^2}{r_d^2} \times \frac{M'_w + M_d}{M} \right) \quad (9-2-20)$$

2. 平底弹底的弯曲强度分析

(1) 弹底应力的计算

平底弹底的应力分析是将其简化为一周边夹持的圆板，受轴

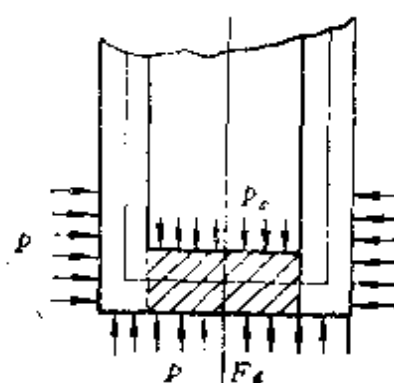


图9-2-12 弹底的等效载荷

向有效载荷 $\bar{p}_z$ 的作用后, 发生弯曲, 板内各点的应力计算, 可利用受均布载荷的圆板弯曲公式计算。

单独考虑弹底圆板的应力状态, 将弹底圆板与弹体壁分开, 其相互作用可用一个力偶 M_0 和一个剪力 F 来代替 (图9-2-13)。圆板的应力状态可通过这些载荷来分析确定。

由弹性理论可知, 受均布载荷的圆板其任一点 N 的应力与变形的关系 (图9-2-14) 为:

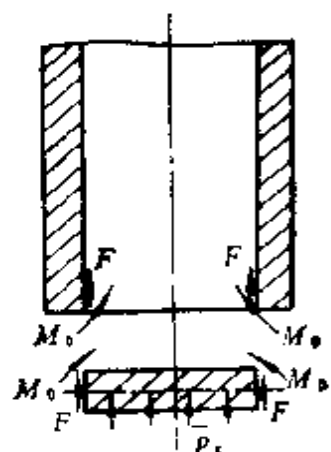


图9-2-13 弹底圆板的载荷

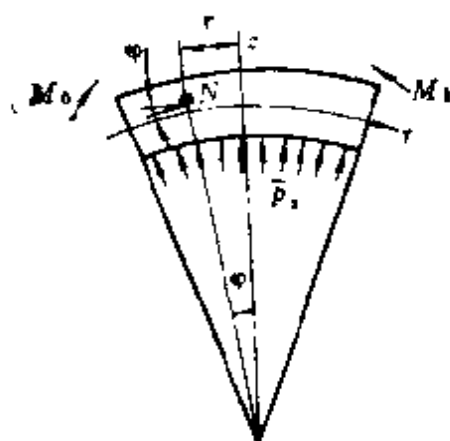


图9-2-14 圆板的弯曲变形

$$\sigma_r = \frac{EZ}{1-\mu^2} \left(\frac{d\varphi}{dr} + \mu \frac{\varphi}{r} \right) \quad (9-2-21)$$

$$\sigma_t = \frac{EZ}{1-\mu^2} \left(\frac{\varphi}{r} + \mu \frac{d\varphi}{dr} \right)$$

式中 σ_r 、 σ_t ——分别为 N 点的径向应力和切向应力;

φ —— N 点的角变形;

Z —— N 点的 Z 坐标位置;

r —— N 点的 r 坐标位置。

由图 9-2-14 可看出, 圆板下表面受压缩变形, 其上的应力为负; 上表面受拉伸变形, 它的应力为正。

弹底圆板的角变形可由下述公式求得:

$$\varphi_s = \frac{p_s r}{16D} \left(\frac{3+\mu}{1+\mu} r_d^2 - r \right) - \frac{M_0 r}{D(1+\mu)} \quad (9-2-22)$$

式中 D ——圆板的抗弯刚度, 由下式表示,

$$D = \frac{Et_d}{12(1-\mu^2)} \quad (9-2-23)$$

r_d ——弹底圆板外半径,

t_d ——弹底圆板厚度。

从式中可以看出, 在圆板中心处 $r = 0$, 角变形 $\varphi = 0$, 故仍为对称变形。将 (9-2-22) 式代入 (9-2-21) 式中, 即可求出 σ_r 和 σ_t 。但在代入求解以前, 应先求出弹底与弹体的相互作用力偶 M_0 。

为了求出 M_0 , 需要分析弹体变形, 将弹尾部看成端部受 M_0 力偶作用的空圆筒 (图9-2-15), 并分析其角变形。

将弹体壁简化为弹性基础梁, 受力偶 M_0 的作用, 按弹性理论, 离底面距离为 z 的任一点的角变形为

$$\varphi_z = -\frac{M_0}{D_b \beta} e^{-\beta z} \cos \beta z \quad (9-2-24)$$

式中 D_b ——圆筒的抗弯刚度, 其值为

$$D_b = \frac{Et_b^3}{12(1-\mu^2)} \quad (9-2-25)$$

t_b ——圆筒壁厚,

β ——系数, 其值为

$$\beta = \sqrt{\frac{3(1-\mu^4)}{t_b^3 r_0^3}} \quad (9-2-26)$$

r_0 ——圆筒中性面初始半径。

由于弹体与弹底变形的连续性, 在交接处必须满足角变形相等的原则 (图9-2-16), 即

$$(\varphi_d)_{r=r_d} = (\varphi_b)_{z=0}$$

上式为弹底周边处的角变形。可将 $r = r_d$ 代入 (9-2-23) 式得

$$(\varphi_d)_{r=r_d} = -\frac{\partial_z r_d^3}{16D} \left(\frac{3+\mu}{1+\mu} - 1 \right) - \frac{M_0 r_d}{D(1+\mu)}$$

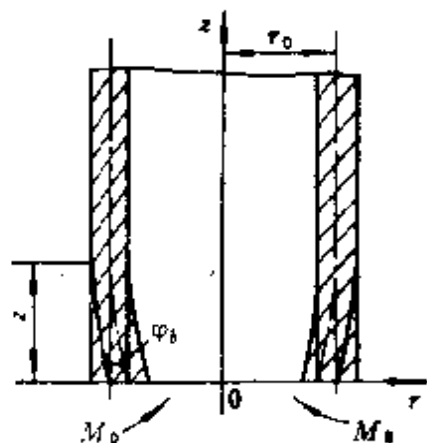


图9-2-15 弹尾部的角变形

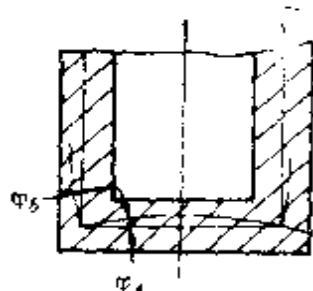


图9-2-16 弹底的角变形

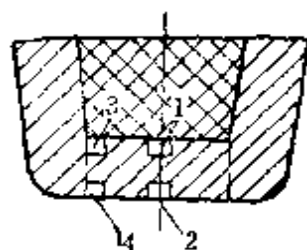


图9-2-17 弹底内四个危险点位置

圓筒底端面的角变形，可将 $z = 0$ 代入 (9-2-24) 式得

$$(\varphi_b)_{z=0} = -\frac{M_0}{D_b \beta}$$

联立两式可解出 M_0 。

$$M_0 = \frac{\bar{p}_z r_b^2}{8} \left[\frac{1}{1 + \frac{(1 + \mu) D}{D_b \beta}} \right]$$

令

$$K = \frac{1}{1 + \frac{(1 + \mu) D}{D_b \beta}}$$

考虑到

$$D = \frac{E t_d^3}{12(1 - \mu^2)}$$

$$D_b = \frac{E t_b^3}{12(1 - \mu^2)}$$

代入，则得

$$K = \frac{1}{1 + \left(\frac{t_d}{t_b} \right)^3 \left(\frac{1 + \mu}{\beta r_d} \right)} \quad (9-2-27)$$

$$M_0 = K \frac{\bar{p}_z r_d^3}{8} \quad (9-2-28)$$

式中 K 称为弹底与弹体的联系系数。 K 值越大，表示夹紧影响也越大。当 $K = 1$ ，表示弹底被完全夹紧； $K = 0$ ，表示弹底

周边为自由支撑。现将 M_0 代入 (9-2-22) 式, 然后将 φ_d 对 r 取导, 再代入 (9-2-21) 式, 最后可得弹底圆板内任一点 (E, r) 的径向应力与切向应力:

$$\sigma_r = \frac{3Z}{4t_d^3} \bar{p}_s r_d^2 \left[(3 + \mu) \left(1 - \frac{r^2}{r_d^2} \right) - 2K \right] \quad (9-2-29)$$

$$\sigma_t = \frac{3Z}{4t_d^3} \bar{p}_s r_d^2 \left[(3 + \mu) - (1 + 3\mu) \frac{r^2}{r_d^2} - 2K \right] \quad (9-2-30)$$

实际上在弹底强度计算中, 并不需要将弹底内所有位置的应力都计算出来, 只需考虑其中某些较危险的位置即可。根据弹底变形的性质, 可以分析如图 9-2-17 所示四个危险点的位置。将此四个位置的坐标代入 (9-2-29) 和 (9-2-30) 式中, 即可求出径向应力与切向应力, 另外还需考虑其轴向应力。

取 $\mu = 0.3$, 则四个危险点的应力分别为

第 1 点: $r = 0, Z = t_d/2$

$$\sigma_{r1} = \frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{3.3 - 2K}{8} \right)$$

$$\sigma_{t1} = \frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{3.3 - 2K}{8} \right)$$

$$\sigma_{z1} = -p_s$$

第 2 点: $r = 0, z = -t_d/2$

$$\sigma_{r2} = \frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{3.3 - 2K}{8} \right)$$

$$\sigma_{t2} = -\frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{3.3 - 2K}{8} \right)$$

$$\sigma_{z2} = -p$$

第 3 点: $r = r_d, z = t_d/2$

$$\sigma_{r3} = \frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \times \frac{K}{4}$$

$$\sigma_{t3} = \frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{K - 0.7}{4} \right)$$

$$\sigma_{z3} = -p_s$$

第 4 点: $r = r_d, z = -t_d/2$

$$\sigma_{r_4} = \frac{3\bar{p}_z r_d^2}{t_d^3} \times \frac{K}{4}$$

$$\sigma_{r_4} = \frac{3\bar{p}_z r_d^2}{t_d^3} (K - 0.7)$$

$$\sigma_{\theta_4} = -p \quad (9-2-31)$$

弹底的强度可用第四强度理论校核, 计算上述四个危险点的相当应力

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}$$

强度条件为

$$\sigma_i \leq \sigma_{0.2}$$

在平底弹的弹底强度计算中, 还可以用简化公式进行计算, 即计算弹底金属所能承受的临界相当应力 $\bar{p}'_z$

$$\bar{p}'_z = 2.42\sigma_{0.2} \left(\frac{t_d}{r_d} \right)^2 \quad (9-2-32)$$

其强度条件为

$$\bar{p}_z < \bar{p}'_z$$

当不满足此条件时, 应当增加弹底厚度, 才能保证发射安全。

发射时, 由于弹底弯曲, 其中心处挠度最大值为

$$f = \frac{1}{2} \frac{r_d^4}{t_d^3} \times \frac{\bar{p}_z}{E} \quad (9-2-33)$$

式中 E ——弹底金属的弹性模量。

(2) 弹底应力的修正

在上述应力分析中仅考虑轴向载荷 $\bar{p}_z$ 的作用, 忽略了径向载荷 p 的作用。若将径向载荷 p 所产生的径向应力与切向应力迭加上去, 可对弹底应力进行修正。

弹底圆板的径向载荷即为圆板周边上承受的径向均布压力 p 。这是一个均匀受载问题, 板内任一点的应力为

$$\sigma_r = -p$$

$$\sigma_\theta = -p$$

将此关系迭加到弹底四个危险点的应力计算式上去, 则可得

修正后的弹底应力公式。

第 1 点:

$$\sigma_{r1} = -\frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{3.3 - 2K}{8} \right) - p$$

$$\sigma_{t1} = \frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{3.3 - 2K}{8} \right) - p$$

$$\sigma_{s1} = -p_s$$

第 2 点:

$$\sigma_{r2} = -\frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{3.3 - 2K}{8} \right) - p$$

$$\sigma_{t2} = \frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{3.3 - 2K}{8} \right) - p$$

$$\sigma_{s2} = -p$$

第 3 点:

$$\sigma_{r3} = -\frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \times \frac{K}{4} - p$$

$$\sigma_{t3} = -\frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{K - 0.7}{4} \right) - p$$

$$\sigma_{s3} = -p_s$$

第 4 点:

$$\sigma_{r4} = \frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \times \frac{K}{4} - p$$

$$\sigma_{t4} = \frac{3\bar{p}_s r_d^2}{t_d^2} \left(\frac{K - 0.7}{4} \right) - p$$

$$\sigma_{s4} = -p$$

(9-2-34)

3. 球形弹底的强度分析

有些小口径炮弹弹底作成球形 (图9-2-18), 以提高威力。在这种情况下可用厚圆球公式计算弹底应力, 并校核弹底内表面中心部位的强度即可。

内表面中心点的三向应力为

$$\sigma_r = \sigma_t = p_s \cdot \frac{2r_{sd}^3 + r_{bd}^3}{2(r_{bd}^3 - r_{sd}^3)} - p \cdot \frac{3r_{bd}^3}{2(r_{bd}^3 - r_{sd}^3)} \quad (9-2-35)$$

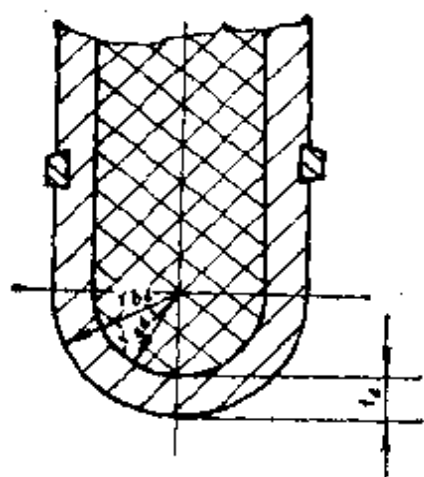


图9-2-18 球形弹底

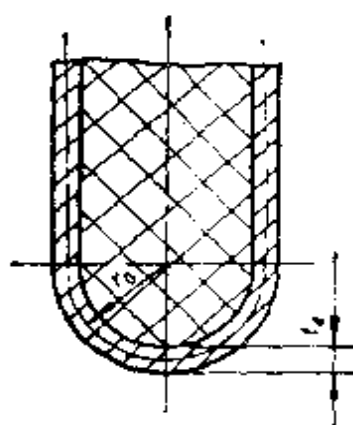


图9-2-19 薄壳球形弹底

$$\sigma_z = -p_s$$

式中 r_{ad} 、 r_{bd} ——球形弹底的内外半径。

计算公式中 p_s 一般也是将装填物看作液体，即

$$p_s = \rho_s h g \quad (9-2-36)$$

式中 ρ_s ——装填物的密度；

h ——从弹底中心到装填物表面的高度。

若球形弹底的壁厚较薄，如某些枪榴弹，带预制破片的小口径高射榴弹等，其壁厚比曲率半径小得多，则应力可按薄壁容器的公式进行计算。

弹底内表面中心点的三向应力（图9-2-19），

$$\sigma_r = \sigma_t = -\frac{(p_s - p)r_0}{2t_s} \quad (9-2-37)$$

$$\sigma_z = -p_s$$

式中 r_0 ——球形弹底中间半径；

t_s ——弹底壁厚。

4. 弹底的抗剪强度

发射时由于火药气体的作用，在弹底周边上作用有剪力，因此要校核其剪切强度。由图9-2-10可知，弹底周边所受的剪力为

$$Q = \bar{p}_s \pi r_s^2$$

抗剪面积为

$$S = 2\pi r_d t_d$$

式中 t_d ——弹底厚度。

剪应力为

$$\tau = \frac{Q}{S} = \frac{\bar{p}_x r_d}{2t_d} \quad (9-2-38)$$

则弹底的抗剪强度条件为

$$\tau \leq [\tau]$$

其中 $[\tau]$ ——弹底材料的允许剪应力，通常取

$$[\tau] = \frac{1}{2} \sigma_{0.2}$$

对于带底螺的弹底（图9-2-20），考虑到螺纹部位使强度减弱，所以用螺纹高度的一半作为有效承载的面积，即

$$S = 2\pi r_d \left(t_f + \frac{1}{2} t_p \right) \quad (9-2-39)$$

式中 t_f ——底缘高度（图9-2-20），

t_p ——螺纹高度；

r_d ——螺纹中径。

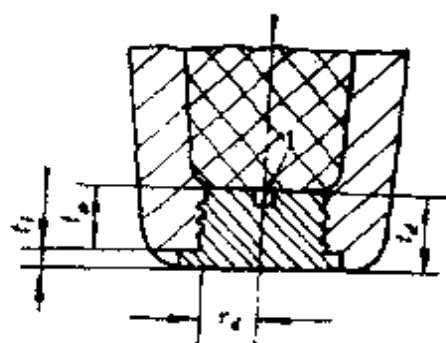


图9-2-20 带底螺的弹底

四、装填物安全性计算

炮弹的主要装填物是炸药，必须保证发射时炸药的安全性。根据爆炸理论，炸药之所以引起爆炸，是由于外界给予了一定的起爆冲量（或起始冲量）。起爆能量可以为机械能、热能、电能以及这些能的综合形式。起爆不同的炸药，需要的初始冲量也不同。需要起始冲量小的炸药，其敏感度大，反之则敏感度小。另外，同一种炸药，由于其理化性能特点，对不同形态的起爆能量的灵敏度也是不同的。如有的炸药对机械能较敏感，有的则对热能较敏感等。还有，同一种炸药，对于同一形态的起爆能量，也随着能量的传递方式和条件不同，其感度也有明显的差异。综

所述,影响炸药的起爆的因素是很多的。

发射时,在炸药中作用有惯性力和相应的压应力,并使炸药内部产生一定的变形,或者发生颗粒间的相对移动和摩擦,从而导致热现象。如果炸药应力过大,就有可能引起炸药早炸。为了确保发射时的安全,必须限制发射时炸药内的最大应力值。此值通常与炸药的敏感度有关。

轴向惯性力在炸药任一断面上引起的压应力,可由(9-1-11)式给出,即

$$\sigma_{an} = p \frac{r^2}{r_{an}^2} \times \frac{M_{an}}{M}$$

式中 M_{an} ——位于 $n-n$ 断面以上炸药质量;

r_{an} —— $n-n$ 断面处弹丸内腔半径。

在弹底断面上,炸药受压应力达到最大,即

$$\sigma_{a\max} = p \frac{r^2}{r_d^2} \times \frac{M_0}{M}$$

式中 r_d ——弹底内腔半径;

M_0 ——炸药柱质量。

当内腔底部有锥度时, M_0 应以相应的药柱质量 M'_0 代替,见图 9-1-7。

炸药发射时安全性条件为

$$\sigma_{a\max} \leq [\sigma_0]$$

各种炸药的允许应力 $[\sigma_0]$ 值列于表 9-2-1 中。

对炸药的安全性分析时应注意以下几点:

(1) 不能把 $[\sigma_0]$ 看作某种炸药的一种固定不变的特征值。因为 $[\sigma_0]$ 取决于炸药的装填方式、装填质量,并且和弹丸的加速情况有关。在计算弹丸炸药安全性时,除了参考表中数据外,还可参考相似弹丸的数据,最后还应通过试验来验证。

(2) 炸药底部最大应力(也称炸药底层应力)的计算,是基于弹底面积上相应的药柱质量全部作用在底层断面上,而忽略了炸药与弹体之间的相互作用,以及炸药颗粒之间的相互作用。实

表9-2-1 某些炸药的力学性能和许用应力

炸 药 名 称	ρ (kg/m ³)	E_c (GPa)	μ_c	σ_c (MPa)	$[\sigma_w]$ (MPa)
黑药					14.7
苦味酸					49
阿马托					98
梯恩梯 (压装)	1500	1.078	0.35	176.4	98
梯恩梯 (注装)	1580	1.15	0.4	196	107.8
特屈儿	1450	1.2	0.35	83.3	83.3
梯/黑-50/50	1620			142	73.5
梯/黑-1/2					103
A IX-2	1650			245	147
A-IX-1				294	127.4

注：表中 σ_c 系指炸药的临界应力。

际上这两者的相互作用是很复杂的，简单地把装填物处理成流体将使应力计算出现误差。从炸药介质来看，它既不同于金属固体，也不同于液体，其弹性模量 $E_c = 1.078 \text{ GPa}$ ，仅为金属的 $\frac{1}{200}$ ，结构比较松，属于粘弹性介质。

（3）如果所设计的弹丸内腔底部是曲面，则给炸药底层应力计算带来较大的困难。对此，目前尚没有精确的解析式。较好

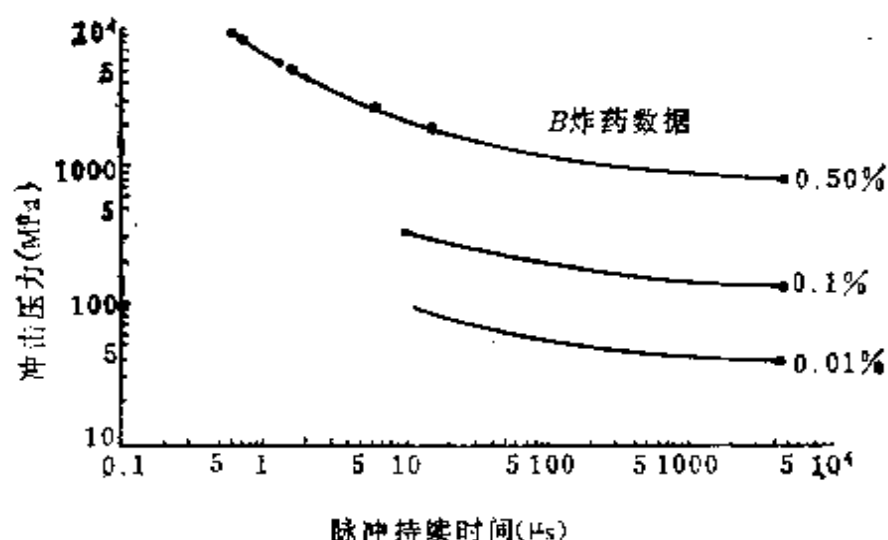


图9-2-21 B炸药的起爆概率

的办法是，采用有限元法计算炸药内部应力。

(4) 实际上，炸药的安全性不仅与作用在炸药上的压力有关，而且还与压力的作用持续时间有关。图 9-2-21 示出了 B 炸药的起爆概率，说明在一定的载荷和作用时间下，各种炸药具有一定的起爆概率。这种观点值得弹丸设计者考虑。

第三节 弹带及弹头壳的强度

炮弹和枪弹弹丸在膛内的旋转运动，分别是靠弹带和弹头壳赋予的。为了保证它们的旋转运动，在发射时其强度应能承受住膛线导转侧的压力，弹丸才能得到一定的角速度。

对于已选定结构尺寸的弹带和弹头壳，须对它进行强度计算，通过计算来加以确定。

弹带需要确定的尺寸有：直径 D 、宽度 b 、厚度 h 和倾角 α_A ，如图 9-3-1 所示。除此以外，还需确定弹带的数目、位置和断面形状等。

在弹带的强度计算中采用弹带等效宽度的概念。弹带等效宽度 B 为

$$B = \frac{S_d}{t_r} \quad (9-3-1)$$

式中 S_d ——弹带的承压面积，即嵌

入膛线以前弹带暴露部

分的断面积，如图 9-3-1 中所示的阴影面积，

t_r ——膛线深度。

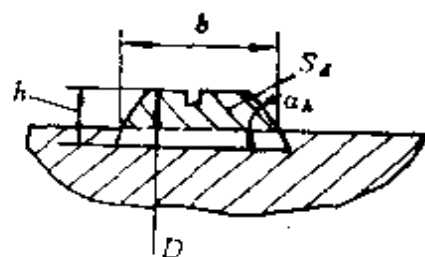


图9-3-1 弹带的尺寸

由此可见，弹带的等效宽度相当于弹带嵌入膛线以后弹带的宽度，没有考虑弹体的变形，弹带被挤压、剪切部分，也没有考虑膛线缠角的影响。

枪弹弹头是靠其圆柱部（导引部）嵌入膛线来获得旋转运动的，圆柱部的直径、长度尺寸在外形结构设计时已确定。

发射时，弹头壳需要验算在导转侧压力作用下，对应表面承

受的挤压应力，及圆柱部嵌入膛线后其突起部所受的剪切应力，以及弹丸飞离膛口后，在离心力作用下弹头壳的强度，以保证弹头正确飞行及对目标的可靠作用。

一、弹带及弹头壳的膛内性能

1. 弹带的膛内性能

发射时，弹带应具有一定强度，能承受导转侧压力的作用，而不能被压坏或剪切；在膛内运动过程中，其磨损不能过大，否则会破坏闭气性能。

(1) 抗压强度

在导转侧力 N 作用下，弹带突起部受有压力，其承受力的面积为 Bt_r ，故弹带上压应力为

$$\sigma = \frac{N}{Bt_r}$$

对于等齐膛线有

$$N = p \cdot \frac{\pi}{n} \times \frac{A}{M} \operatorname{tg} \alpha$$

则

$$\sigma = \frac{p}{Bt_r} \times \frac{\pi}{n} \times \frac{A}{M} \operatorname{tg} \alpha \quad (9-3-2)$$

式中 p ——膛压（用计算压力），

A ——弹丸极转动惯量；

α ——膛线缠角。

弹带的强度条件式为

$$\sigma \leq \sigma_s$$

σ_s 为弹带材料的强度极限。

(2) 抗剪强度

弹带嵌入膛线后，每一个弹带突起部将受到剪切应力（图 9-3-2）作用，即

$$\tau = \frac{N}{B\sigma}$$

式中 a —— 膛线的阴线宽。

对于等齐膛线有

$$\tau = \frac{p}{Ba} \times \frac{\pi}{n} \times \frac{A}{M} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (9-3-3)$$

其剪切强度条件为

$$\tau \leq \frac{\sigma_b}{2}$$

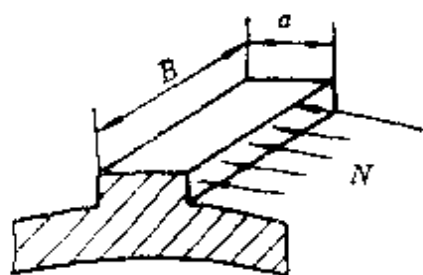


图9-3-2 弹带突起部所受的剪力

(3) 抗磨强度

弹丸在膛内运动时，弹带突起部与膛线急剧摩擦而产生磨损。当磨损过大时，将会影响弹带的正常作用，这对于高初速火炮尤其明显。

以摩擦比功 A_k 作为抗磨强度的特征数。所谓摩擦比功是指每一弹带突起部在单位面积上所受的摩擦功。

弹带突起部与膛线导转侧之间的摩擦力为

$$F = fN$$

式中 f —— 钢对铜的摩擦系数。

弹丸在膛内运动的整个行程 l_g 的摩擦功为

$$T = \int_0^{l_g} fN \frac{dl}{\cos \alpha}$$

式中 l_g —— 炮管中膛线部分长度。

故摩擦比功为

$$A_k = \frac{T}{t_r B} = \frac{f}{t_r B \cos \alpha} \int_0^{l_g} N dl$$

将 N 代入上式

$$A_k = \pi \frac{f \operatorname{tg} \alpha}{t_r B n \cos \alpha} \times \frac{A}{M} \int_0^{l_g} p dl$$

由于

$$\int_0^{l_g} p \pi r^2 dl = \frac{1}{2} M v_0^2$$

故

$$A_k = A \frac{v_0^2}{2r^2} \times \frac{f \operatorname{tg} \alpha}{n t E \cos \alpha} \quad (9-3-4)$$

弹带的抗磨强度条件为

$$A_k \leq [A_k]$$

其中 $[A_k]$ 为允许的摩擦比功, 它可由相近的制式弹丸的摩擦比功来取值 (表 9-3-1)。

表 9-3-1 几种弹丸的摩擦比功

弹 丸	A_k (N · m/m ²)
37 mm 高射炮榴弹	34×10^6
57 mm 高射炮榴弹	22×10^6
100 mm 高射炮榴弹	50×10^6
57 mm 反坦克榴弹	32×10^6
85 mm 加农炮榴弹	91×10^6

2. 弹头壳的膛内性能

在导转侧力作用下, 弹头壳的对应表面承受挤压应力。它所承受的最大挤压应力为

$$\sigma = \frac{N}{l_y \cdot \delta_{\min}} \quad (9-3-5)$$

式中 N ——导转侧力;

l_y ——弹丸圆柱部长度;

$\delta_{\min}$ ——弹头圆柱部嵌入膛线的最小深度。

考虑到枪管与弹头的公差以及热膨胀量, $\delta_{\min}$ 由下式求出:

$$\delta_{\min} = \frac{(d_y)_{\min} - (d_{ya})_{\max}}{2} - it \frac{d_{ya}}{2} \quad (9-3-6)$$

或

$$\delta_{\min} = \frac{(d_{yi})_{\min} - (d_{ys})_{\max}}{2} \quad (9-3-7)$$

式中 d_y ——弹头圆柱部直径;

d_{ya} ——阳线直径;

d_{yi} ——阴线直径;

i ——线膨胀系数 (钢 $i = 12 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$);

t ——猛烈射击时枪管变热的平均温度, 一般 t 可达 500°C 。

对等齐膛线

$$N = p_m \frac{\pi}{n} \times \frac{A}{M} \operatorname{tg} \alpha$$

式中 p_m ——最大膛压;

α ——膛线缠角;

各种弹头壳材料的许用压应力和许用剪应力值见表 9-3-2。

表9-3-2 弹头壳材料的许用压应力和许用剪应力

弹头壳材料	许用压应力 (MPa)	许用剪应力 (MPa)
钢或复铜钢	300	280
铜	250	
铜锌合金	330	250~300

发射后, 弹头壳嵌入膛线, 其突起部分所受剪应力为

$$\tau = \frac{N}{l_y \cdot a} \quad (9-3-8)$$

式中 a ——阴线宽度。

一般 $a \gg \delta_{\min}$, 所以 $\tau < \sigma$ 。

二、弹带和弹头壳的膛外性能

1. 弹带的膛外性能

当弹丸出炮口后, 由于离心力作用, 可能将弹带从弹体上撕开。这就会影响弹丸在空中飞行时的外弹道性能。克服弹带撕破的抗力取决于弹带的连接强度。目前广泛使用的弹带有两种形式: 小口径弹丸多采用环状弹带毛坯压入矩形弹带槽内; 中大口径弹丸多采用条状弹带毛坯压入燕尾形弹带槽内。对于这两种弹带的连接强度分别按如下方法校核:

(1) 矩形槽弹带 (图 9-3-3) 的连接强度的计算方法是, 在

环形弹带上, 坐标位置为 φ 角处, 取质量为 dm 的扇形微元体, 则此微元体在出炮口瞬间的离心力 dC 为

$$dC = dm \cdot r_{cp} \omega_0^2$$

式中 r_{cp} ——出炮口时弹带的平均半径;

ω_0 ——出炮口时弹丸的角速度。

由于

$$\omega_0 = \frac{\pi}{\eta r} v_0$$

$$dm = B h r_{cp} \rho_b d\varphi$$

代入, 并考虑到 $r_{cp} = r$, 最后得

$$dC = B h \frac{\pi^2}{\eta^2} \rho_b v_0^2 d\varphi$$

式中 h ——弹带厚度;

ρ_b ——弹带密度。

离心力在弹带断面上产生的撕破力为

$$F = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi dC = B h \rho_b \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2}$$

此力在弹带断面上产生的应力为

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

其中 S 应当取弹带的最弱断面, 即

$$S = B(h - t_r)$$

由此可得

$$\sigma = \frac{\pi^2 v_0^2 \rho_b}{\eta^2} \times \frac{h}{h - t_r} \quad (9-3-9)$$

弹带的连接强度条件为

$$\sigma \leq [\sigma]$$

式中 $[\sigma]$ 为弹带金属的允许压应力, 它的值是根据弹带金属的强

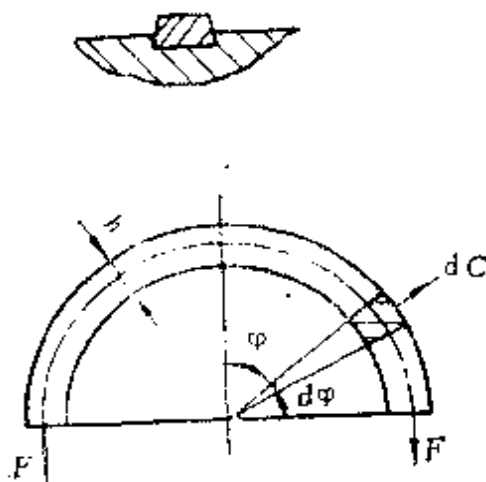


图9-3-3 矩形槽弹带

度极限 σ_b 和弹带强度的储备系数确定的。储备系数一般在 1.6~2.0 的范围内。所以弹带连接强度条件式为

$$(1.6 \sim 2.0) \frac{\pi^2 v_0^2 \rho_b}{\eta^2} \times \frac{h}{h - t_s} \leq \sigma_b \quad (9-3-10)$$

(2) 燕尾槽弹带的连接强度 燕尾槽弹带一般是由条状毛坯压入的。条状毛坯压入后, 其两端经过多次锻压连接在一起, 所以其连接处是弹带的最薄弱环节。根据有关技术要求, 弹丸射击后, 条状毛坯弹带在接缝处的分离不能超过 0.5mm。

在计算燕尾槽弹带的连接强度时, 假定作用在弹带上的离心力, 全部由燕尾槽的斜面所支撑, 而在弹带内部不产生圆周切线方向的拉伸应力。

从弹带压合的接触断面开始, 取一个单位长度的单元体 (图 9-3-4), 则单元体的质量 m' 为

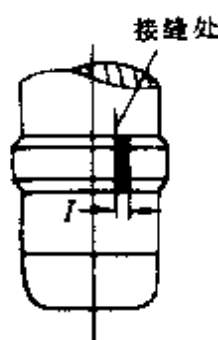


图 9-3-4 弹带单元体

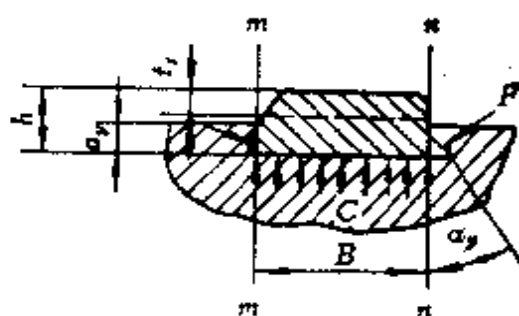


图 9-3-5 弹带单元的受力

$$m' = Bh\rho_b$$

它的离心力为

$$C = m' r_{cp} \omega_0^2$$

将 ω_0 代入, 并考虑到 $r_{cp} \approx r$, 则单元体的离心力为

$$C = Bh \frac{\pi^2 v_0^2 \rho_b}{\eta^2 r}$$

根据上面假定, 受离心力作用的弹带单元体, 可以看作是一个两端简支并受均布载荷的矩形梁 (图 9-3-5)。为了保证弹带的连接强度, 此矩形梁必须保持一定的抗压强度 (在支撑面处)、抗剪强度 (在 $m-m$ 及 $n-n$ 断面处), 以及抗弯强度。

a. 抗压强度校核

由图 9-3-5 可知, 支撑面的法向反力为

$$F = \frac{C}{2} \times \frac{1}{\sin \alpha_y} = \frac{Bh}{2} \times \frac{\pi^2 v_0^2 \rho_b}{\eta^2 r \sin \alpha_y}$$

支撑面积为

$$S = a_y \frac{1}{\cos \alpha_y}$$

支撑面上的压应力为

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{1}{2} \times \frac{Bh\rho_b}{a_y \operatorname{tg} \alpha_y} \times \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 r} \quad (9-3-11)$$

式中 a_y ——燕尾槽深度;

α_y ——燕尾槽斜面倾角。

为了不被压坏, 单元体上的压应力应小于或等于弹带金属材料 σ_b , 即

$$\sigma \leq \sigma_b$$

b. 抗剪强度校核

单元体在 $m-m$ 断面与 $n-n$ 断面上剪应力为

$$\tau = \frac{C}{2a_y} = \frac{Bh\rho_b}{2a_y} \times \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 r} \quad (9-3-12)$$

为了不被剪断, 单元体上的剪应力应该小于或等于弹带金属材料允许的剪应力 $[\tau]$, 即

$$\tau \leq [\tau]$$

通常 $[\tau]$ 值可以取弹带金属强度极限 σ_b 值的一半。

c. 抗弯强度校核

如果把弹带单元体看成是一个受均布载荷 C' 的梁, 则最大弯矩 M 可由简支梁条件得出。由于

$$C' = \frac{C}{B \cdot 1}$$

则

$$M = \frac{C' B^2}{8} = \frac{CB}{8}$$

弹带单元体的平均厚度为 $\left(h - \frac{t_r}{2}\right)$ ，它的截面模量为

$$W = \frac{1}{6} \left(h - \frac{t_r}{2}\right)^2 \cdot 1$$

故弹带单元部分最大弯曲应力为

$$\sigma_p = \frac{M}{W} = \frac{3}{4} \times \frac{B^2 h \rho_b}{\left(h - \frac{t_r}{2}\right)^2} \times \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2 r} \quad (9-3-13)$$

抗弯强度的强度条件为

$$\sigma_p \leq \sigma_b$$

燕尾槽弹带必须同时满足上述三个条件，才能达到弹带的性能要求。

2. 弹头壳的膛外性能

发射时，枪弹弹头在火药气体压力作用下，获得很大的直线速度和旋转速度，使弹头壳承受很大的离心力。在膛内时此力由枪管承受，对弹头壳作用不大。当弹丸飞离枪口后，离心力在弹头壳内引起的切向应力就会使它发生破坏，使弹头失去稳定，以致不能命中目标。

如果有铅套，同样也将产生离心力，因铅的比重大，抗张强度小，所以其离心力也作用在弹头壳上，促使弹头壳破坏。

通过弹头对称轴的平面将弹头壳截开，用 F 表示截面上的作用力。由于弹头壳很薄，近似地用外径 d 来代替它的平均直径。在平均直径处作用着附加力 F （撕破力）和切向速度 v_r （图9-3-6）。

出枪口瞬间单元体所受的离心力 dC 为

$$dC = dm \cdot \frac{d_p}{2} \cdot \omega_0^2$$

式中 ω_0 ——出枪口时弹丸的角速度。

由于

$$\omega_0 = \frac{\pi}{\eta d_p / 2} v_0$$

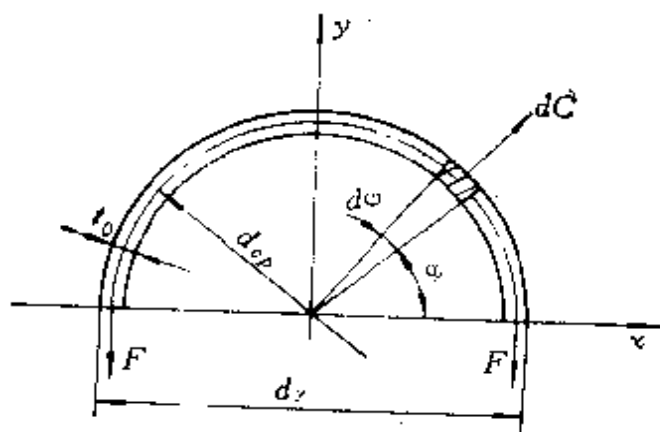


图9-3-6 弹头壳内的切向力

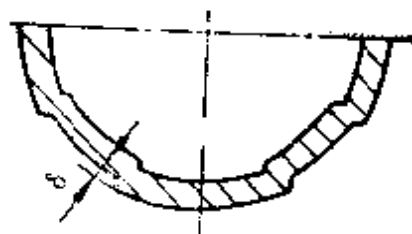


图9-3-7 弹头壳嵌入膛线的深度

$$dm = l_y \cdot t_0 \cdot \frac{d_z}{2} \cdot \rho_K \cdot d\varphi$$

代入后得 $\left(\frac{d_{cp}}{2} \approx \frac{d_y}{2} \right)$;

$$dC = l_y t_0 \frac{\pi^2}{\eta^2} \rho_K v_0^2 d\varphi$$

式中 l_y ——弹头圆柱部长度;

t_0 ——弹头壳厚度;

ρ_K ——弹头壳材料密度。

离心力在弹头壳断面上产生的撕破力为

$$F = \int_0^{\pi/2} \sin \varphi dC = l_y t_0 \rho_K \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2}$$

此力在弹头壳壁内产生的应力为

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{l_y t_0 \rho_K \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2}}{l_y (t_0 - \delta)} = \rho_K \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2} \times \frac{t_0}{t_0 - \delta} \quad (9-3-14)$$

式中 δ 为弹头壳嵌入膛线的深度 (图 9-3-7)。

如果考虑铅套则所受的应力 σ 为

$$\sigma = \frac{F + F_q - f_q}{l_y (t - \delta)} \quad (9-3-15)$$

$$F_q = l_q \cdot t_q \cdot \rho_q \cdot \frac{\pi^2 v_0^2}{\eta^2} \quad (9-3-16)$$

式中 F_q ——铅套产生的附加力；
 l_q ——铅套嵌入圆柱部长度（近似取圆柱部长度）；
 t_q ——铅套厚度；
 ρ_q ——铅套密度；
 f_q ——铅套承受的力， $f_q = l_q \cdot t_q \cdot \sigma_{bq}$ ， σ_{bq} 为铅套的强度极限。

弹头壳在离心力作用下的强度校核公式为

$$\sigma \leq [\sigma]$$

式中 $[\sigma]$ ——弹头壳材料的许用应力。

三、弹带尺寸的确定

1. 弹带宽度 b

由 (9-3-2)~(9-3-4) 三个公式可以算出弹带的等效宽度 $B_1 \sim B_3$ ，在这三个值中取最大者作为设计值。由等效宽度可求出弹带突起部的承压面积，选择适当的弹带形状即可得出弹带宽度 b 。

2. 弹带的位置

弹带的位置是相对于弹底而言的。从弹体强度考虑，弹带的位置应当越靠近弹底越好。这样，由于有弹底的支撑，使弹体上的变形大为减小，所以带曳光药室的小口径榴弹，其弹带位于中间底附近。除此之外，在弹带位置安置时，还需考虑以下情况，致使弹带并非都能安置在弹底处。

(1) 定装式弹丸需要与药筒相连接，弹带后面的弹体长度应该为药筒提供足够的支撑面。在支撑面上还要加工 1~2 个紧口槽。所以弹带位置距弹底不能太近。对于具有尾锥部的弹丸，弹尾圆柱部也应保证有 1/4 倍口径的长度。

(2) 从弹丸的膛内运动正确性来看，如果弹带位于质心处，将会使运动较为平稳。弹带离弹丸质心越远，对弹丸起始章动的影响越大。故从膛内运动的观点看，弹带不宜离质心太远。

3. 弹带的厚度

弹带的厚度 h 在弹带外径确定后将取决于弹带槽的深度。弹带槽不宜过深，以保证弹带的连接强度为准。

对于矩形槽的弹带，其厚度由 (9-3-10) 式确定；对于燕尾槽的弹带，其厚度由 (9-3-11)~(9-3-13) 式确定，应取同时满足三式的 h 值。

第四节 弹丸膛内运动分析

弹丸在膛内的旋转运动是靠弹带嵌入膛线获得的，它边前进边旋转。最理想的运动条件是，弹轴与炮轴重合。但实际上由于不均衡因素的影响，弹丸在膛内并不是沿理想轴线运动的。因此，要求弹丸在膛内既要使弹带起到紧塞火药一体的作用，又要限制弹体上膛线印痕的程度。在弹丸设计中，应控制弹炮间隙，有时还必须增加下定心部。

一、弹带紧塞条件

当一均衡对称的弹丸在膛内沿理想轴线运动时，膛壁作用在弹丸上的力仅仅是弹带压力。此压力在弹体上是均匀分布的，具有对称的性质。弹丸在膛内运动时，弹带压力的大小随行程而变化，但其对称性并不改变。

由于不均衡性的影响，在弹带处还作用有不均衡力。此力也随弹丸的行程而变化，而且仅作用于弹带的某一部分侧面上，在弹带压力和不均衡力的综合作用下，破坏了弹带区压力的对称性 (图 9-1-12)。由图可见，分布在圆周上压力的最小值与最大值分别为

$$\begin{aligned} p_{b_{\min}} &= p_b - \frac{L}{bD} \\ p_{b_{\max}} &= p_b + \frac{L}{bD} \end{aligned} \quad (9-4-1)$$

式中 p_b ——弹带压力，
 L ——弹带处的不平衡力，
 b ——弹带宽度，
 D ——弹带直径。

由上式可知，弹带处不平衡力越大，造成的不对称性也越大。当 $L > p_b b D$ 时， $p_{b_{\min}}$ 成为负值。在此条件下，弹带的某处将与炮膛脱离接触，使弹带的紧塞作用失效，火药气体将由此向外泄漏。紧塞失效现象，一般出现在最大膛压处（此处对应弹带压力最小），或者炮口处（此处不平衡力最大）。

为了保证弹带能够密闭火药气体，要求弹丸在膛内任一位置都必须满足下列条件：

$$p_b > \frac{L}{bD} \quad (9-4-2)$$

为此在保证弹丸发射强度的前提下，适当增加弹带压力也是可行的。或者提高弹丸的制造精度，从而减少不平衡力，以便满足密闭条件的要求。

二、弹体膛线印痕

弹丸在膛内运动是否正确的重要标志之一，是弹体上有否膛线印痕。印痕的分布与深度常作为靶场验收的条件之一。

弹丸在膛内的理想运动情况是，弹体上无论定心部还是圆柱部都应没有膛线印痕。也就是说，上定心部、圆柱部都与膛线不接触。但实际上，由于装填弹丸时的偏心，以及不平衡因素的存在，使弹丸从入膛一开始就处于非理想情况下运动。一般弹丸的上定心部都与炮膛有所接触，因而在运动时上定心部将有阳线印痕产生。如果仅在局部位置（圆周的 $\frac{1}{3}$ ）上有轻微印痕，尚属允许范围内，但印痕过大就说明弹丸膛内运动不够正常。

弹丸定心部（上、下定心部），甚至圆柱部出现膛线印痕的现象，多产生于初速大、身管长的火炮中。尤其对于磨损严重的

炮管,此现象更为明显。从弹丸角度分析,产生膛线印痕的原因有,

(1) 弹丸质量偏心较大,因而产生的不均衡力较大,使弹丸的一侧压紧在膛壁上。

(2) 弹带相对于弹丸轴线有倾斜,装填时弹丸产生偏斜。

(3) 弹丸在发射时,上定心部产生膨胀变形。如果膨胀变形过大,超过弹、炮间间隙,将产生整个圆周上膛线印痕。

因此,膛线印痕的产生,表明弹丸在膛内运动不正确,从而影响弹丸的射弹散布。应当采取各种措施减少弹丸的不均衡因素,并适当减少弹、炮之间的间隙,以及规定正确的弹带尺寸。

在减少不均衡力的措施中,增加弹丸下定心部是一种实用的办法。下定心部可以保证弹带比较准确地嵌入膛线,加强弹丸在膛内的定心性。应该指出,下定心部并非弹丸必要的组成部分,如果控制弹丸的制造误差,减少不均衡因素,并不一定要增加下定心部。

三、定心部与膛壁间的间隙

为了便于装填,定心部与膛壁间保持一定的间隙是必要的。如果没有这个间隙,或者间隙值偏小,将使装填困难,达不到规定的射击速度要求。因此定心部与膛壁之间应具有一个最低限度的保证间隙 $\Delta_{\min}$, 一般为

$$\Delta_{\min} = 0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$$

从另一方面看,定心部间隙增大,会引起不均衡力 (K 、 L) 增大,并产生一系列不利因素。为此,必须限制此间隙在最小限度以内。

对于理想的均衡弹丸来说,此间隙越小越好,但对于实际的不均衡弹丸而言,有一个最适当的间隙值 Δ_r 。在此情况下,不均衡力最小,而在其它情况下,不均衡力都会增加。 Δ_r 值可用下式表示:

$$\Delta_r = k \frac{l_y}{b_1} \xi \quad (9-4-3)$$

式中 ξ ——弹丸的偏心矩（质心偏离弹轴的距离）；
 l_y ——弹丸导引部长度；
 b_1 ——弹丸质心至弹带中心的距离；
 k ——取决于弹丸质量分布的系数，它始终小于1而接近于1。

弹、炮间间隙是通过弹丸定心部公差来实现的。若定心部制造公差为 Δ_d ，炮膛制造公差为 Δ_r ，则弹、炮间最大间隙为

$$\Delta_{\max} = \Delta_{\min} + (\Delta_d + \Delta_r)$$

由于公差不会同时出现最大值，一般实际取为

$$\bar{\Delta} = \Delta_{\min} + 0.15(\Delta_d + \Delta_r)$$

为了使实际间隙等于最合适间隙，应由下式确定弹丸上定心部公差

$$\Delta_{\min} + 0.15(\Delta_r + \Delta_d) = k \frac{l_y}{b_1} \xi$$

$$\Delta_d = \frac{1}{0.15} \left(k \frac{l_y}{b_1} \xi - \Delta_{\min} \right) - \Delta_r \quad (9-4-4)$$

一般炮膛的制造公差 $\Delta_r = 0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ ，则上式的 Δ_d 即可确定。

四、炮口精度分析

弹丸在出炮口瞬间，除有向前运动的直线速度外，还存在有侧方速度。侧方速度的大小与方向，对于每次射击来说都不相同，这是造成弹丸产生散布的原因之一。

1. 第一侧方速度

由于弹丸上定心部与炮膛壁之间存在间隙，以及弹丸质量中心不通过其旋转轴，在这种情况下，弹丸质心在膛内的运动轨迹不再是一根理想的直线，而是一条螺旋线。因此弹丸出炮口时，其质心由于旋转产生一个侧向分速度 W_1 ，称为第一侧方速度（图 9-4-1）。

考虑不利情况，即弹丸的不均衡质量 m_1 、 m_2 位于同一侧（ $\alpha = 0$ ），并偏向旋转轴的另一方（图 9-4-2）。由于不均衡质

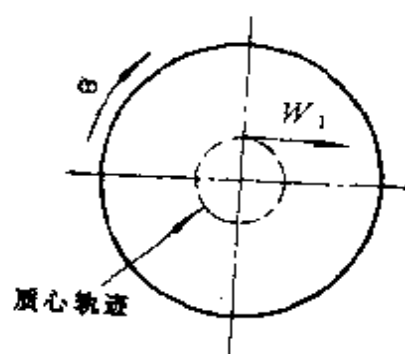


图9-4-1 第一侧方速度

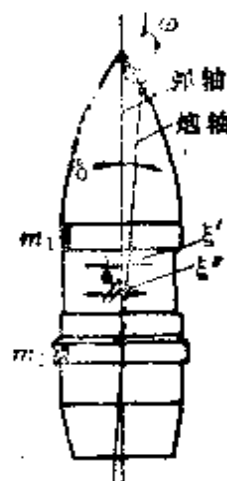


图9-4-2 弹丸的偏心矩

量的原因，弹丸质心不在其对称轴上，稍微偏向不均衡质量一侧，于是弹丸质心相对于对称轴的偏心矩为

$$\xi' = -\frac{m_1 + m_2}{M} r$$

式中 r —— 弹丸半径，

M —— 弹丸质量。

又因为弹丸对称轴与旋转轴有倾角 δ ，故弹丸质心至旋转轴的距离为

$$\xi = \xi' + \xi'' = -\frac{m_1 + m_2}{M} r + \frac{\Delta}{I_y} b_1$$

式中 Δ —— 弹、炮半径间的间隙值。

第一侧方速度为

$$W_1 = \xi \omega = \left(-\frac{m_1 + m_2}{M} r + \frac{\Delta}{I_y} b_1 \right) \frac{\pi}{\eta r} v_0 \quad (9-4-5)$$

第一侧方速度的向量位于炮膛的横断面内。因为每发弹丸的偏心距都有变动，出炮口瞬时偏心位置也不一样，因此第一侧方速度每次发射在大小方向上都不相同。这是影响弹丸散布的原因之一。

2. 第二侧方速度

当弹丸定心部飞出炮口时，上定心部处的不均衡力不再为膛壁所抵消。在弹丸继续向前运动时，此力将使弹丸在子午面（即通过弹轴的纵剖面）绕弹带中心回转。这种回转致使弹丸质心产

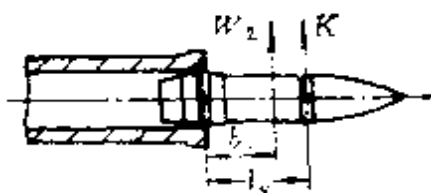


图9-4-3 弹丸质心的第二侧方速度

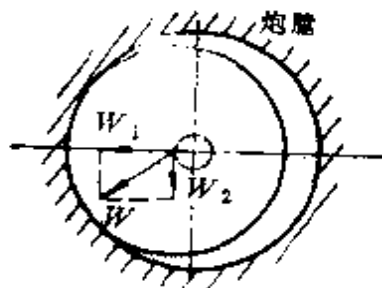


图9-4-4 侧方速度合成

生第二侧方速度 (图 9-4-3)。

以弹带中心为支点, 弹丸偏转的运动方程为

$$(B + Mb_1^2) \frac{d^2\delta}{dt^2} = Kl,$$

将上式对时间积分, 可得

$$(B + Mb_1^2) \frac{d\delta}{dt} = Kl_y t$$

其中 t 指转矩 Kl_y 作用的时间, 在数值上等于弹丸上定心部飞出炮口瞬间到弹带出炮口所经过的时间, 即

$$t \approx \frac{l_y}{v_0}$$

代入弹丸偏转运动方程, 并求出回转角速度

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{Kl_y^2}{(B + Mb_1^2)v_0}$$

故弹丸的第二侧方速度为

$$W_2 = b_1 \frac{d\delta}{dt} = \frac{Kb_1 l_y^2}{(B + Mb_1^2)v_0} \quad (9-4-6)$$

第二侧方速度的向量位于炮膛的子午面内。每次射击其大小与方向均不相同。这也是引起弹丸散布的原因之一。

3. 弹丸质心侧方速度的合成

弹丸出炮口时, 在质心上同时作用两个侧方速度。从以上分析可知, 此两个侧方速度在任意情况下都是互相垂直的 (图 9-4-4), 于是合成的侧方速度为

$$W = \sqrt{W_1^2 + W_2^2} \quad (9-4-7)$$

第十章 弹丸的飞行稳定性

第一节 一般概念

实际的弹丸均近似为一轴对称的刚体，它在飞行中同时具有质心运动和围绕质心的运动。

弹丸在飞行中受有空气阻力，通常阻力中心不通过弹丸质心，对于旋转弹丸一般位于弹顶与质心之间。当弹轴与速度矢量不重合（即章动角 $\delta \neq 0$ ）时，将产生一个翻转力矩使 δ 增大，这将影响质心运动规律，使射击准确性变坏。

尾翼弹是利用尾翼作用使阻力后移到质心之后，由此所形成的力矩——稳定力矩，将使章动角减小。这样的尾翼弹称为静态稳定弹。

另一种办法是使不带尾翼的轴对称弹丸高速旋转。只要转速高于某个数值，弹轴将不会因翻转力矩的作用而翻转，而是围绕某个平均位置旋转与振动。根据弹丸在飞行中的实际情况，通常将弹道起始段的弹丸质心运动轨迹近似为一直线，叫弹道直线段。随后重力影响逐渐增大，弹道向下弯曲，直到落点。此弯曲的弹道叫弹道曲线段。飞行稳定的弹丸，弹丸飞行时，其弹轴不至于偏离弹道切线。弹丸飞行稳定性越好，不但有利于提高射程，而且散布精度较高。旋转弹丸飞行稳定性包括急螺稳定性、追随稳定性及动态稳定性三部分。

急螺稳定性 发射时，在膛内由于各种不均衡因素的作用，使弹丸获得一个力矩冲量。当弹丸出膛口后，弹轴与弹道切线就不重合。这样，空气阻力的作用线不通过弹丸的质心，而形成一个迫使弹丸翻转的力矩。此力矩的大小取决于弹丸飞行速度和弹

轴对弹道切线的偏角，并在弹道的起始段具有最大值。在该力矩的作用下弹丸将产生翻转的趋势。为了实现飞行稳定，弹丸应绕自身轴线进行高速旋转，以此来克服翻转力矩的不利作用。旋转弹丸的这种性质，称为急螺稳定效应。

追随稳定性 当弹丸在弹道曲线段飞行时弹道切线的方向时刻都在改变。这时亦要求弹丸的动力平衡轴作相应的变化，以保持二者在任何时刻都没有很大的偏差。弹丸的动力平衡轴能够随着弹道切线作相应变化，这种跟随弹道切线以同样角速度向下转动的特性称为追随稳定性。弹丸的追随稳定性是由于空气动力矩对弹丸的作用达到的。在弹道顶点处，该处的空气动力矩小而弹道曲率较大，故其追随稳定性最差。

动态稳定性 具有急螺稳定性和追随稳定性的弹丸，其弹轴的摆动虽然是周期性的，但因条件的不同，其摆动幅值可能是逐渐衰减或逐渐增大。如果幅值逐渐增大，就有可能使章动角过大而导致射击密集度变坏。为了保证射击的准确性，必须防止摆动幅值的增大。摆动幅值始终衰减的弹丸称之为具有动态稳定性。

炮弹弹带（或枪弹导引部）被迫嵌入膛线，而使弹丸产生绕其自身几何轴线的旋转运动。膛线与螺纹相似，它沿膛轴旋转一周（即 2π 弧度）前进的距离（与螺纹的螺距相当）称为膛线导程 h 。如将导程 h 用口径 d 的倍数 η 表示，就是膛线缠度，所以 $\eta = \frac{h}{d}$ 。

假定弹丸在膛口附近经过 dt 的时间转动 $d\gamma$ 的角度，此角度与 $\frac{d\gamma}{2\pi}$ 周相当，此时的角速度为 $\omega = \frac{d\gamma}{dt}$ ，它沿膛线前进的相应距离为 $\frac{d\gamma}{2\pi} \eta d$ 。设弹丸相对于膛口的真实速度为 v_x ，则

$$v_x = \frac{d\gamma}{2\pi} \eta d / dt$$

这样，得到弹丸的起始自转角速度 ω_0 为

$$\omega_0 = \frac{2\pi v_x}{\eta d}$$

由于实际上 $v_x \approx v_0$, 故

$$\omega_0 = \frac{2\pi v_0}{\eta d} \quad (10-1-1)$$

从上式可以看出, 在初速、膛线缠度相同的情况下, 口径愈小, 自转角速度愈大, 反之, 口径愈大, 自转角速度愈小。也可以从表 10-1-1 列出的几种弹丸的起始自转角速度值, 推算得出此结论。

表10-1-1 几种弹丸的起始自转角速度

弹 丸	d (mm)	η (d)	v_0 (m/s)	ω_0 (rad/s)	n (r/min)
美5.56M193枪弹	5.56	54.86	997	20540	196100
56式7.62普通弹	7.62	31.5	735	19240	183700
54式12.7枪弹	12.7	30	840	13850	132300
56式14.5枪弹	14.5	29	990	14790	141260
20mm炮弹	20	30	900	9430	90000
25mm炮弹	25	34	900	6640	63500
37mm高射炮弹	37	30	880	4980	47600
57mm高射炮弹	57	30	1000	3670	35100

另外, 由于弹丸自转角速度很高, 比一般机械转速高得多, 故当弹丸质心或者引信零件偏离弹丸的几何轴线时, 将产生极大的惯性离心加速度。例如当零件的偏心距离为 1mm、转速 $\omega = 2000\text{rad/s}$ 时, 惯性离心加速度将达 4000m/s^2 。因此在设计弹丸时, 应对弹丸的质量偏心或引信零件的偏离弹轴问题予以足够的重视。

第二节 旋转弹丸的飞行稳定性

一、弹丸的急螺稳定性

如上所述, 弹丸在直线段的飞行稳定性是通过其急螺稳定性来衡量的。由外弹道学可知, 弹丸的急螺稳定性可通过下式来

分析:

$$\sigma = 1 - \frac{\beta}{\alpha^2} \quad (10-2-1)$$

式中 σ —— 稳定系数;
 α —— 进动角速度;
 β —— 翻转力矩系数。

根据弹丸飞行的具体情况, 来分析以下三种可能出现的情况:

当 $\sigma < 0$, 即 $\beta > \alpha^2$, 这时弹丸的章动角将随时间呈指数函数 (双曲正弦函数) 而迅速增加, 这样弹丸就不具备急螺稳定性。

当 $\sigma = 0$, 即 $\beta = \alpha^2$, 这时弹丸在初始力矩冲量的作用下, 其章动角随时间呈直线递增, 这样弹丸也不具备急螺稳定性。

当 $\sigma > 0$, 即 $\beta < \alpha^2$, 则章动角随时间在有限幅度内作周期性的振动而不翻转。即

$$\delta = \frac{1}{\alpha \sqrt{\sigma}} \times \frac{d\delta_0}{dt} \sin \alpha \sqrt{\sigma} t. \quad (10-2-2)$$

式中 $\frac{d\delta_0}{dt}$ 为弹丸在初始力矩冲量作用下的章动角速度。

由以上分析可知, 为使弹丸具备急螺稳定性, 必须使 σ 值大于零, 并且 σ 值越大, 弹丸的急螺稳定性也越大。当 σ 趋于极限值 1 时 (相当于 $\alpha \rightarrow \infty$), 由 (10-2-2) 式可见, 弹丸在有限的外界冲量作用下, 弹轴不会发生章动, 而且不会偏离其初始平衡位置。

对于旋转弹丸, α 及 β 的具体值如下:

$$\alpha = \frac{A}{2B} \omega_0$$

$$\beta = \frac{M_x}{B\delta} = k_x v^2$$

式中 A —— 弹丸极转动惯量;
 B —— 弹丸的赤道转动惯量;

ω_0 ——弹丸的角速度，一般认为

$$\omega_0 = \frac{2\pi v_0}{\eta d}$$

M_z ——由空气阻力产生的翻转力矩。

当章动角 δ 较小时，翻转力矩式又可写为

$$M_z = \frac{h d^2}{g} \times 10^5 H(y) v^2 k_{mz}(M) \delta$$

式中 h ——弹丸质心至空气阻力中心的距离，

$H(y)$ ——称为气重函数，它取决于弹道高度，当 $Y = 0$ 时 $H(y) = 1$ ，

$k_{mz}(M)$ ——翻转力矩的速度函数。

将 α 、 β 值代入 (10-2-1) 式，则有

$$\sigma = 1 - \frac{h d^4 \eta^2}{\pi^2 g A} \left(-\frac{B}{A} \right) \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \times 10^5 H(y) k_{mz}(M)$$

为了进一步简化，将

$$A = M \mu \left(-\frac{d}{2} \right)^2 = -\frac{C_m \mu}{4} d^3$$

代入上式，可得

$$\sigma = 1 - \frac{4}{\pi^2} \frac{\eta^2}{\mu C_m g} \times \frac{h}{d} \times \frac{B}{A} \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \times 10^5 H(y) k_{mz}(M)$$

式中 μ ——弹丸质量分布系数（又称弹丸的惯性系数），

g ——重力加速度 (m/s^2)，

C_m ——弹丸的相对质量， $C_m = \frac{M}{d^3}$ 。

计算弹丸的急螺稳定性时，应当控制膛口处的急螺稳定系数，因为在这点的 $H(y) = 1$ ， $v/v_0 = 1$ ，故 σ 值最小。

$$\sigma_0 = 1 - \frac{4}{\pi^2} \times \frac{\eta^2}{\mu C_m g} \times \frac{h}{d} \times \frac{B}{A} \times 10^5 k_{mz}(M) \quad (10-2-3)$$

式中的 h/d 可按式计算 (图 10-2-1)：

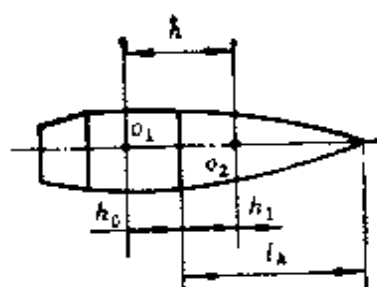


图10-2-1 质心至阻心的距离

O_1 —质心, O_2 —阻心。

$$\frac{h}{d} = \frac{h_0}{d} + 0.57 \frac{l_A}{d} - 0.16 \quad (10-2-4)$$

式中 h_0 ——弹丸质心到弧形部界面的距离,

l_A ——弧形部长度。

函数 $k_{ms}(M)$ 由实验确定, 实验条件 (如口径、弹长等) 不同, 则数值不同。表 10-2-1 中列出了用弹长 $l=4.5d$ 的 76.2 mm 榴弹测出的 $k'_{ms}(M)$ 函数。对所设计弹丸的 $k_{ms}(M)$ 值可用下式进行计算:

$$k_{ms}(M) = \sqrt{\frac{l}{4.5d}} k'_{ms}(M) \quad (10-2-5)$$

表10-2-1 函数 $k'_{ms}(M)$ 的数值

v_0 (m/s)	$k'_{ms}(M)$ (N/m ²)	v_0 (m/s)	$k'_{ms}(M)$ (N/m ²)	v_0 (m/s)	$k'_{ms}(M)$ (N/m ²)
200	95×10^{-4}	480	101×10^{-4}	720	93×10^{-4}
260	95×10^{-4}	500	101×10^{-4}	740	93×10^{-4}
280	96×10^{-4}	520	100×10^{-4}	760	92×10^{-4}
300	98×10^{-4}	540	99×10^{-4}	780	91×10^{-4}
320	100×10^{-4}	560	98×10^{-4}	800	91×10^{-4}
340	104×10^{-4}	580	98×10^{-4}	850	90×10^{-4}
360	105×10^{-4}	600	97×10^{-4}	900	89×10^{-4}
380	105×10^{-4}	620	96×10^{-4}	950	88×10^{-4}
400	105×10^{-4}	640	96×10^{-4}	1000	88×10^{-4}
420	104×10^{-4}	660	95×10^{-4}	1050	88×10^{-4}
440	103×10^{-4}	680	95×10^{-4}	1100	87×10^{-4}
460	102×10^{-4}	700	94×10^{-4}	1150	86×10^{-4}

表10-2-2 $k_{mz}(M)$ 表 (范特莱里实验值)

v_0 (m/s)	$k_{mz}(M)$ (N/m ³)	v_0 (m/s)	$k_{mz}(M)$ (N/m ³)	v_0 (m/s)	$k_{mz}(M)$ (N/m ³)
0~200	95×10^{-4}	400	137×10^{-4}	750	131×10^{-4}
250	98×10^{-4}	450	137×10^{-4}	800	130×10^{-4}
275	103×10^{-4}	550	135×10^{-4}	850	129×10^{-4}
300	111×10^{-4}	550	135×10^{-4}	900	129×10^{-4}
325	122×10^{-4}	600	133×10^{-4}	950	129×10^{-4}
350	130×10^{-4}	650	132×10^{-4}	1000	128×10^{-4}
375	134×10^{-4}	700	131×10^{-4}	1050	128×10^{-4}
400	137×10^{-4}	750	131×10^{-4}	1100	128×10^{-4}

表10-2-3 现有枪弹的缠度计算结果

枪弹名称	参数	用表10-2-1算的结果		用表10-2-2算的结果		枪的缠度 η (d)
		v_0 (m/s)	$k_{mz}(M)$ (N/m ³)	$k_{mz}(M)$ (N/m ³)	η (d)	
51式7.62手枪弹		425.66	$107 \sim 121$	137×10^{-4}	73.7~83.6	31.5
59式9.0手枪弹		303.51	225~253	111×10^{-4}	154~175	28
53式7.62铅心弹		848.82	51.6~58.5	129×10^{-4}	39.6~44.9	31.5
53式7.62钢心弹		840.87	34.3~38.8	129×10^{-4}	28.3~32.1	31.5
53式7.62曳光弹		808.96	36.3~41.1	130×10^{-4}	31.9~36.1	31.5
53式7.62穿甲燃烧弹		808.95	28.2~32	130×10^{-4}	26.3~29.8	31.5
53式7.62试射燃烧弹		808.96	27.7~31.4	130×10^{-4}	24.0~27.1	31.5
56式7.62普通弹		735.82	40.4~45.6	131×10^{-4}	36.8~41.7	31.5
56式7.62曳光燃烧弹		748.84	48~54.4	131×10^{-4}	38.6~43.7	31.5
56式7.62穿甲燃烧弹		733.84	46.3~52.5	131×10^{-4}	37.2~42.3	31.5
56式7.62曳光弹		718.84	46.5~52.7	131×10^{-4}	38.1~43.2	31.5
54式12.7穿甲燃烧弹		828.98	30.0~33.8	129×10^{-4}	26.6~30.2	29.9
54式12.7穿甲燃烧曳光弹		828.98	28.6~32.4	129×10^{-4}	24.8~28.2	29.9
56式14.5穿甲燃烧弹		1000.89	34.3~38.8	128×10^{-4}	28.3~32.1	29
56式14.5穿甲燃烧曳光弹		1005.89	38.3~43.4	130×10^{-4}	31.9~36.2	29
56式14.5曳光燃烧弹		998.91	35.7~40.5	130×10^{-4}	30~34	29
美M193式5.56普通弹		997.58	54.7~61.5	129×10^{-4}	36.9~41.8	55
NATO7.62普通弹		853.83	37.8~42.8	129×10^{-4}	35.6~40.3	40
日三八式6.5普通弹		780.96	29.8~33.8	130×10^{-4}	25.7~29.1	30.8

式中 l 和 d 分别为所设计弹丸的长度和口径。表 10-2-2 为范特柴里实验结果。计算结果表明, 用它进行计算所得的 η 值, 与枪弹实际采用的比较接近 (表 10-2-3)。

在理论上, 只要使急螺稳定系数 $\sigma_0 > 0$, 即可使弹丸保持急螺稳定。这个“稳定”的含义是: 弹丸飞行时, 其章动角 δ 应维持在有限的范围内变化。也就是说, 弹丸不会翻筋斗。这样由 (10-2-3) 式可以得到:

$$\eta < \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{A \mu C_m g}{B \times 10^3 \frac{h}{d} k_{mx} (M)}} \quad (10-2-6)$$

这个不等式与 $\sigma_0 > 0$ 是完全等效的, 它的左端是满足弹丸在弹道直线段上急螺稳定性时, 枪炮所容许选取的膛线缠度。换句话说, 为了满足弹丸在弹道直线段上的急螺稳定性, η 必选在小于 (10-2-6) 式右端所确定的值以内。

急螺稳定性条件的另一种表示方法, 是用陀螺稳定因子 S 来表示, 即

$$S = \frac{\alpha^2}{\beta} = \frac{1}{4k_z} \left(-\frac{A}{B} \right)^2 \left(\frac{\omega}{v} \right)^2 = \frac{\pi^2 g A^2}{10^3 B \eta^2 h d^4 k_{mx} (M)} \quad (10-2-7)$$

急螺稳定性条件为 $S > 1$, 通常保持在 $S = 1.3 \sim 1.5$ 范围内。

二、弹丸的追随稳定性

弹丸在曲线段飞行时, 弹轴的进动运动较之于直线段上的进动运动有某些质的差别。这时, 弹轴不再是绕弹道切线作圆锥运动, 而是绕某一动力平衡轴作圆锥运动。动力平衡轴偏离弹道切线的夹角, 称为动力平衡角, 以 δ_p 表示。一般采用动力平衡角 δ_p 作为弹丸追随稳定性的特征数。也就是说, δ_p 值越小, 弹丸的追随稳定性也越好。

动力平衡角的表达式可写为

$$\delta_p = \frac{2\alpha}{\beta} \times \frac{g \cos \theta}{v} \quad (10-2-8)$$

将 α 、 β 值代入，整理后得

$$\delta_p = \frac{\pi g^2}{2} \times \frac{\mu C_m v_0 d}{10^3 \eta \cdot \frac{h}{d} H(y) v^3 k_{mx}(M)} \cos \theta \quad (10-2-9)$$

式中 θ —— 弹道切线与水平轴的夹角。

由上式可以看出， δ_p 在弹道上是有变化的。在弹道顶点附近，因 v 、 $H(y)$ 、 $k_{mx}(M)$ 值均达到最小值，而 $\cos \theta$ 值最大，故相应的 δ_p 也最大。亦即该处的追随稳定性最差，所以应把 δ_p 控制在符合要求的范围以内。

将弹道顶点的各量代入 (10-2-9) 式中，得到弹道顶点的飞行动力平衡角为

$$\delta_{pr} = \frac{\pi g^2}{2} \times \frac{\mu C_m v_0 d}{10^3 \eta \cdot \frac{h}{d} H(y_r) v_r^3 k_{mx}(M)} \quad (10-2-10)$$

式中 v_r —— 弹道顶点的速度；

y_r —— 弹道顶点的高度；

δ_{pr} —— 弹道顶点的动力平衡角。

为了保证所设计弹丸具有需要的追随稳定性，必须使弹丸在最不利条件下，也就是顶点处的动力平衡角小于一个允许值。

因为 v_r 在大射角 θ_0 下具有比较小的值，而 $H(y_r)$ 则在大初速 v_0 下具有比较小的值，故当其它条件相同时，大的射角和初速将引起最大的动力平衡角 δ_{pr} 。在计算弹丸追随稳定性时，应当在这个最不利的条件下来进行。

动力平衡角的允许值，是根据追随稳定性良好的制式弹丸的弹道特征数，计算求得的。通常对它的限制为

$$\delta_{pr} < 12^\circ \sim 15^\circ \quad (25) \quad (10-2-11)$$

三、弹丸飞行稳定性的综合解法

如前所述, 弹丸在整个弹道上必须分别满足急螺稳定性与追随稳定性的要求, 即式 (10-2-3) 和 (10-2-10) 中的 σ_0 和 δ_{ps} 须分别符合它们允许值 $[\sigma_0]$ 和 $[\delta_{ps}]$ 的要求, 亦即

$$1 - \frac{4000}{\pi^2} \times \frac{\eta^2}{\mu C_m g} \times \frac{h}{d} \times \frac{B}{A} k_{ms}(M) \geq [\sigma_0]$$

和

$$\frac{\pi g^2}{2} \times \frac{\mu C_m v_0 d}{10^3 \eta \frac{h}{d} H(y_r) v_r^3 k_{ms}(M)} \leq [\delta_{ps}]$$

在有些场合下, 欲使所设计的弹丸同时满足上述两个要求是很困难的, 甚至是相互矛盾的。即当改善了其中一个特征数, 又会使另一特征数变坏。例如当减小弹丸质心和空气阻心间的距离, 可以提高 σ 值, 但却加大了 δ_{ps} 值。对于其它参量也有类似情况。因此, 必须综合全面地解决弹丸飞行稳定性问题。现将有关方法介绍如下。

根据上述两个条件, 考虑到 $\mu C_m = 4A/d^5$, 可以写出

$$\left(\frac{1}{A} \times \frac{h}{d} \right) \leq \left[\frac{\pi^2 g (1 - \sigma_0)}{10^3 d^5 \eta^2 k_{ms}(M)} \right] \left(\frac{A}{B} \right) \quad (10-2-12)$$

和

$$\left(\frac{1}{A} \times \frac{h}{d} \right) \geq \left[\frac{2\pi g^2 v_0}{10^3 d^4 \eta H(y_r) v_r^3 k_{ms}(M) \delta_{ps}} \right] \quad (10-2-13)$$

式中 σ_0 与 δ_{ps} 即表示允许值。令

$$\frac{\pi^2 g (1 - \sigma_0)}{10^3 d^5 \eta^2 k_{ms}(M)} = a$$

$$\frac{2\pi g^2 v_0}{10^3 d^4 \eta H(y_r) v_r^3 k_{ms}(M) \delta_{ps}} = b$$

可以看出, a 、 b 与所设计弹丸的结构无关。当射击条件一定时, a 、 b 为固定不变的常量。这样飞行稳定性条件为

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{A} \times \frac{h}{d} &\leq a \cdot \frac{A}{B} \\ \frac{1}{A} \times \frac{h}{d} &\geq b \end{aligned} \right\} \quad (10-2-14)$$

联立二式可以解出

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{A}{B} &\geq \frac{b}{a} \\ \frac{h}{d} &\geq bA \end{aligned} \right. \quad \text{或} \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{B}{A} &\leq \frac{a}{b} \\ \frac{h}{d} &\geq \frac{b^2}{a} \cdot B \end{aligned} \right. \quad (10-2-15)$$

因此, 为了全面满足弹丸的飞行稳定性要求, 最有效的措施是减小 B 值, 同时增加 h 值 (例如加大弹头部长, 或增添风帽), 使之适应上述条件式。

四、膛线缠度计算

在弹丸的急螺稳定性分析中, 我们引出了公式 (10-2-6), 枪炮所选用的 η 值须小于该式右端所确定的值, 此即为膛线缠度的上限值 $\eta_{\text{上}}$, 枪炮的膛线缠度 η 须满足

$$\eta < \eta_{\text{上}}$$

在弹丸的追随稳定性分析中, 引出了公式 (10-2-9), 为要使 δ_{pr} 小于所允许的值, 则膛线缠度应大于由 (10-2-10) 式所确定的 η 值, 这是保证追随稳定性的膛线缠度下限 $\eta_{\text{下}}$, 这样枪炮膛线缠度 η 还须满足

$$\eta > \eta_{\text{下}}$$

因此, 为了保证弹丸在全弹道上的飞行稳定性, 枪炮的膛线缠度 η 须满足

$$\eta_{\text{下}} < \eta < \eta_{\text{上}}$$

如图 10-2-2 所示。

在具体选取 η 值时, 除了弹丸飞行稳定性的条件外, 还须考虑其它条件, 如武器的寿命, η 过小即转速过

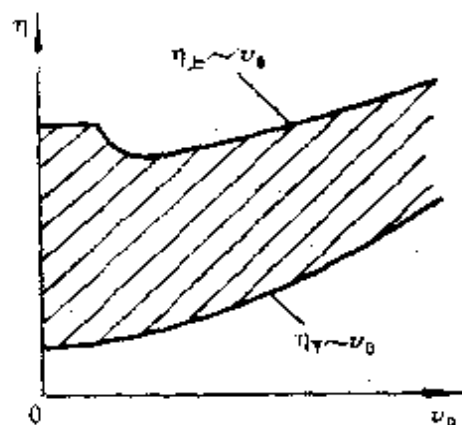


图10-2-2 膛线缠度的应用范围

大，武器内膛磨损必然加剧，会使寿命降低。通常是以 $\eta_{\perp}$ 作为计算枪炮膛线缠度的标准，并乘以小于 1 的安全系数 α ，这样就得到

$$\eta = \alpha \eta_{\perp} = \alpha \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{A}{B} \times \frac{\mu C_m g}{10^8 \frac{h}{d} k_{mz}(M)}} \quad (10-2-16)$$

一般取 $\alpha = 0.75 \sim 0.85$ ，它是考虑到公式推导中一些假设的误差，以及在严寒条件下空气密度增加对稳定性的影响。 α 值的具体数值须根据具体情况来确定。

对于步机枪或反坦克炮膛线的缠度计算，由于它们的射角很小（高射机枪除外），弹道低伸，最大动力平衡角在一般情况下远小于 $12^\circ \sim 15^\circ$ ，因此，它们的膛线缠度 η 一般只要考虑 $\eta_{\perp}$ 即可，也就是说应用 (10-2-16) 式进行计算，一般可以不验算 η_r 。为了提高枪炮寿命，安全系数 α 取较大为好，约为 $0.85 \sim 0.88$ 。

脱壳穿甲弹的缠度计算，根据急螺稳定性条件，由 (10-2-1) 式，即

$$\sigma = 1 - \frac{\beta}{\alpha^2} > 0$$

式中的 α 为弹心的进动角速度

$$\alpha = \frac{A_1}{2B_1} \omega_0$$

式中 A_1 ——弹心的极转动惯量；

B_1 ——弹心的赤道转动惯量；

ω_0 ——弹心的角速度，在枪口处

$$\omega_0 = \frac{2\pi v_0}{\eta d_x}$$

d_x ——弹托的外径。

β 为翻转力矩系数，对于弹心

$$\beta = \frac{d_1^2 h}{B_1 g} \times 10^8 H(y) v^2 k_{mz}(M)$$

在枪口处 β 值最大，即 $v = v_0$ ， $H(y) = 1$ ，则

$$\beta = \frac{d_1^2 h}{B_1 g} \times 10^3 v_0^2 k_{mx}(M)$$

式中 d_1 ——弹心直径。

将 α 和 β 值代入 (10-2-1) 式整理后得到, 旋转脱壳穿甲弹弹心保证飞行稳定所需要的缠度

$$\eta = \alpha \cdot \frac{\pi}{2} = \frac{d_1}{d_2} \sqrt{\frac{A_1 \mu C_m g}{B_1 \times 10^3 \frac{h}{d_1} k_{mx}(M)}} \quad (10-2-17)$$

式中 g ——重力加速度 (m/s^2);

C_m ——弹心的相对质量。

〔例题〕 计算 56 式 14.5 穿甲燃烧弹的急螺稳定性。

已知: 弹头的相对质量 $C_m = 21.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$

弹头的相对长度 $l_t/d = 4.6$

弹头部的相对长度 $l_h/d = 2.44$

弹头质心至弹头底面的相对距离

$$X_c/d = 1.74$$

极转动惯量

$$A = 0.1639 \times 10^{-6}$$

$$\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

赤道转动惯量

$$B = 1.375 \times 10^{-6}$$

$$\text{kg} \cdot \text{m}^2$$

弹头初速

$$v_0 = 990 \text{m/s}$$

56 式 14.5 机枪的缠度

$$\eta = 29$$

解: 1. 用缠度条件计算

$$\frac{h_0}{d} = \frac{l_t}{d} - \frac{l_h}{d} - \frac{x_c}{d} = 0.42$$

$$\frac{h}{d} = \frac{h_0}{d} + 0.57 \frac{l_h}{d} - 0.16 = 1.65$$

$$h = 0.02394 \text{m}$$

$$\mu = \frac{4A}{C_m d^5} = 0.476$$

取 $\alpha = 0.85$

由表 10-2-1 查出 $v_0 = 990 \text{ m/s}$ 时, $k'_{ms}(M) = 88 \times 10^{-4}$, 则

$$k_{ms}(M) = \sqrt{\frac{4.6}{4.5}} k'_{ms}(M) = 89 \times 10^{-4}$$

计算 $[\eta]$

$$\begin{aligned} [\eta] &= \alpha - \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{A}{B} \frac{\mu C_m g}{1000 - \frac{h}{d} k_{ms}(M)}} \\ &= 0.85 \times \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{0.1639 \times 10^{-5}}{1.375 \times 10^{-5}} \times \frac{0.476 \times 21.8 \times 10^3 \times 9.81}{1000 \times 1.65 \times 89 \times 10^{-4}}} \\ &= 38.4 \end{aligned}$$

现用 56 式 14.5 机枪的膛线缠度 $\eta = 29$, $\eta < [\eta]$, 故判明该弹头具有急螺稳定性。

2. 用陀螺稳定因子计算

$$\begin{aligned} S &= \frac{\pi^2 g A^2}{1000 B \eta^2 h d^4 k_{ms}(M)} \\ &= \frac{\pi^2 \times 9.81 \times (0.1639 \times 10^{-5})^2}{1000 \times 1.375 \times 10^{-5} \times 29^2 \times 0.02394 \times 0.0145^4 \times 89 \times 10^{-4}} \\ &= 2.39 \end{aligned}$$

因 $S > 1$, 故该弹头具有急螺稳定性。

第三节 尾翼式脱壳弹的飞行稳定性

和旋转弹丸一样, 所谓飞行稳定性, 即指弹丸在飞行中抵抗力图使弹轴偏离弹道的外力的能力。当由于某些偶然因素, 使弹轴偏离弹道时, 能够自动产生返回原弹道的力和力矩的尾翼弹是稳定的, 反之是不稳定的。

尾翼的存在改变了弹丸表面的压力分布, 使得空气阻力合力的作用点 (压力中心) 由质心前移到质心后。若压力中心在质心前则阻力对弹丸形成翻转力矩, 当压力中心移至质心后面则阻力对弹丸形成的是稳定力矩。正是由于这个稳定力矩的作用, 当弹

丸一旦出现由攻角产生的扰动时, 它将阻止攻角进一步增大, 并迫使弹丸绕弹道切线作往返摆动。这是尾翼弹飞行稳定性的必要条件。此外, 为了使弹丸在整个弹道上稳定飞行, 还要求尾翼弹的摆动迅速衰减。

当攻角不为零时, 作用在尾翼弹上的空气阻力如图10-3-1所示。 O_1 是质心, O_2 是压力中心。飞行稳定的弹丸, 空气阻力 R 的作用点位于质心与尾翼之间。若通过质心作两个方向相反, 大小均等于 R 且平行于 R 的力 R' 和 R'' , 则 R 被化成一个通过质心的阻力 R' 和一个使 δ 减小的稳定力矩 M_c , 即由 R 和 R'' 构成的力偶矩。 R' 可以分解为沿弹丸速度方向的正面阻力 R_T 和垂直于速度方向的法向力 R_N 。

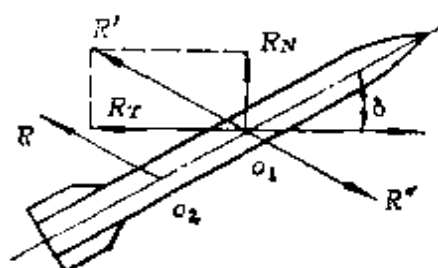


图10-3-1 攻角不为零时作用在尾翼弹上的空气阻力

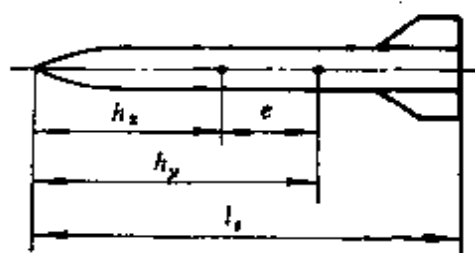


图10-3-2 尾翼弹的稳定储备量

在稳定力矩的作用下, 尾翼弹成摆动状态飞行。由于尾翼在空气中摆动, 空气阻力就阻止其摆动而产生抑制力矩, 在抑制力矩的作用下尾翼弹的摆动衰减。

弹丸的压力中心越靠后, 质心越靠前, 它的飞行稳定性越好。压力中心和质心间的距离与全弹长的比值称为稳定储备量(图 10-3-2), 即

$$\xi = \frac{e}{l_i} \times 100\%$$

式中 e ——压力中心和质心间的距离,

$$e = h_y - h_x$$

h_y ——压力中心至弹顶的距离;

h_x ——质心至弹顶的距离,

l_t ——弹丸长度。

尾翼弹飞行稳定性的计算问题即为分别求质心和压力中心的问题。质心位置的计算可用弹丸结构特征量的计算方法来解决,下面主要讨论压力中心的计算。

为了求得阻力中心至弹顶的距离 h_y , 通常是首先求出弹体及尾翼的法向力及其作用点的位置, 然后用作用力的合成原理再求出全弹的法向力和阻力中心的位置。当攻角不大时, 可近似将升力代替法向力来处理 (图 10-3-3)。

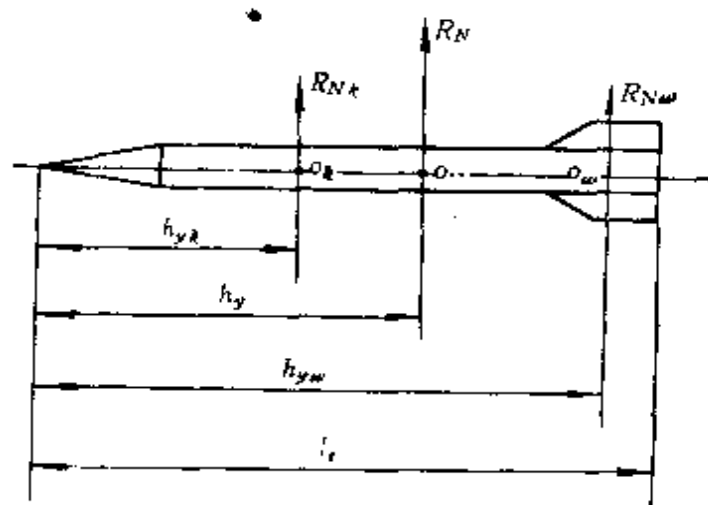


图10-3-3 尾翼弹的压力中心

这样, R_N 和 h_y 分别表示为下式:

$$R_N = R_{Nk} + R_{Nw}$$

$$h_y = \frac{h_{yk} R_{Nk} + h_{yw} R_{Nw}}{R_{Nk} + R_{Nw}}$$

式中 R_{Nk} ——弹体的升力,

R_{Nw} ——尾翼的升力,

h_{yk} ——弹体的压力中心至弹顶的距离,

h_{yw} ——尾翼的压力中心至弹顶的距离。

用相对量来表示:

$$C_y = \frac{h_y}{l_t}$$

$$C_{y\kappa} = \frac{h_{y\kappa}}{l_r}$$

$$C_{yw} = \frac{h_{yw}}{l_s}$$

又知

$$R_N = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_R$$

$$R_{N\kappa} = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_{R\kappa}$$

$$R_{Nw} = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_{Rw}$$

式中 C_R 、 $C_{R\kappa}$ 、 C_{Rw} ——分别为全弹、弹体和尾翼的升力系数。

$$C_y = \frac{C_{y\kappa} C_{R\kappa} + C_{yw} C_{Rw}}{C_{R\kappa} + C_{Rw}} \quad (10-3-1)$$

如果把质心位置也用相对量表示，则

$$C_z = \frac{h_z}{l_r}$$

则稳定储备量为

$$\xi = (C_y - C_z) \times 100\% \quad (10-3-2)$$

一、弹体的升力系数和压力中心的计算

弹体的升力系数可用下列公式计算

$$C_{R\kappa} = C'_{R\kappa} \cdot \delta$$

式中 δ ——攻角 ($^\circ$)。

$C'_{R\kappa}$ 可由图 10-3-4 中查得，或近似取

$$C_{R\kappa} = 3\delta$$

式中 δ ——攻角 (rad)。

由圆弧形头部和圆柱形尾部组成的弹体部的压力中心 (图 10-3-5) 可由下式求出：

$$C_{y\kappa} = \frac{0.733 + 0.667\delta\lambda_H(x_1^2 - 1)}{x_1[1.57 + 1.334\delta\lambda_H(x_1 - 1)]}$$

$$x_1 = \frac{l_r}{l_s} = \frac{\lambda_r}{\lambda_s}$$

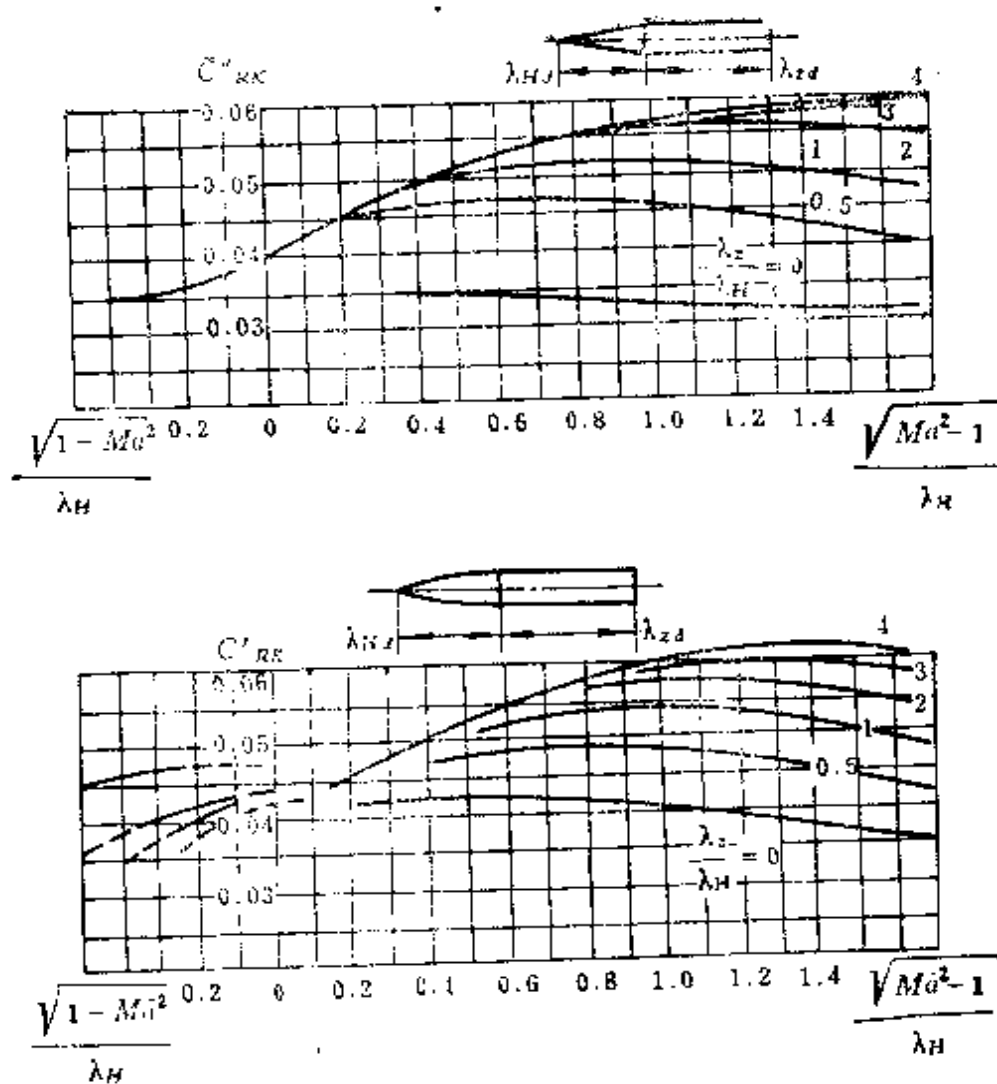


图10-3-4 锥形和圆弧形头部弹体升力系数曲线

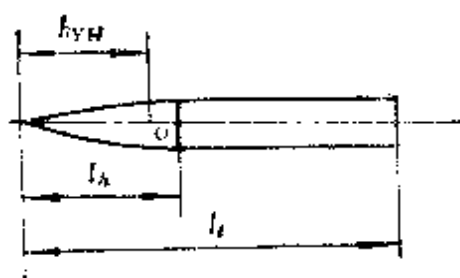


图10-3-5 圆弧形头部的压力中心

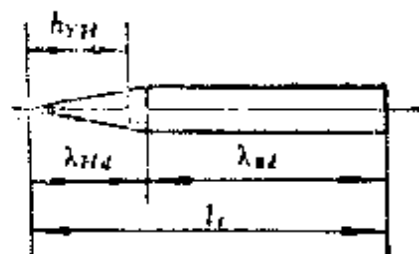


图10-3-6 锥形头部的压力中心

公式适合于 $\delta < \beta$ 、 $\alpha \geq 1$ 的情况。式中

δ ——攻角 (rad);

β ——弧形部母线的半顶角。

由圆锥和圆柱组成的弹体部的压力中心 (图 10-3-6) 可用下式求出:

$$C_{yK} = \frac{0.667\lambda_H + 0.813\lambda_z\delta(\lambda_H + 0.5\lambda_x)}{(1 + 0.813\lambda_z\delta)\lambda_x}$$

式中

$$\lambda_H = \frac{l_h}{d}, \quad \lambda_z = \frac{l_z}{d}, \quad \lambda_x = \lambda_H + \lambda_z$$

更近似一些, 可用下式求:

$$C_{yK} \approx 0.4$$

二、尾翼的升力系数和压力中心的计算

尾翼的升力与尾翼的形状有关。描述尾翼形状的特征尺寸 (图 10-3-7) 有翼片面积 S_w , 翼片展度 l_w , 翼片平均弦长 b_{cp} 及翼片厚度 t_s 。此外, 还与下列无量纲参量有关。

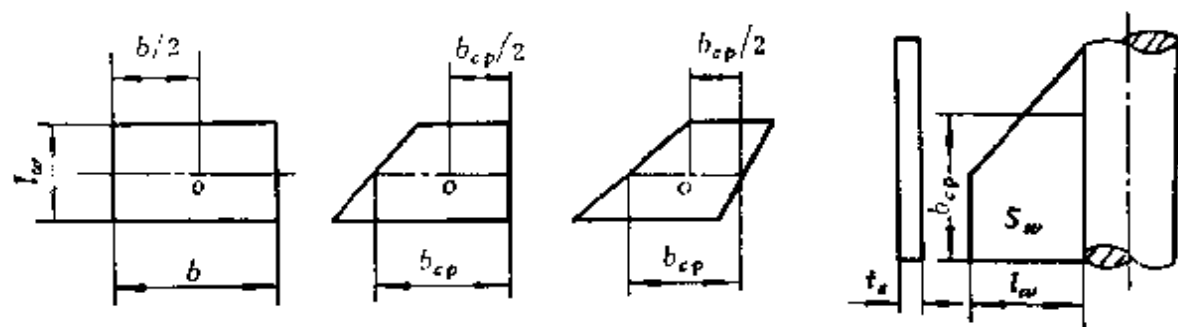


图10-3-7 尾翼的展弦比

$$\lambda_w = \frac{(2l_w)^2}{S_w}, \quad S_w = l_w \cdot b_{cp}$$

式中 λ_w 称为尾翼的展弦比。

对于展弦比 $\frac{\lambda_w}{4} > \sqrt{\frac{1}{Ma^2 - 1}}$ 的尾翼, 它的升力系数可用下

式计算:

$$C_{yw} = \frac{4\delta}{\sqrt{Ma^2-1}} \left(1 - \frac{1}{2\lambda_w \sqrt{Ma^2-1}} \right) \frac{2S_w}{S} \quad (10-3-3)$$

式中 S ——弹体的横截面积。

对于展弦比 $\frac{\lambda_w}{4} < \sqrt{Ma^2-1}$ 的尾翼，它的升力系数可用下式计算：

$$C_{yw} = 1.35 \delta \left(\lambda_w + \sqrt{Ma^2-1} \right) \frac{2S_w}{S} \quad (10-3-4)$$

公式 (10-3-3) 和 (10-3-4) 一般适用于四片尾翼的情况 (只有一对尾翼提供升力)。对于六片尾翼，如不考虑翼片间的相互影响，可用 $3S_w$ 代替公式中的 $2S_w$ 。由于通常翼片间的气流干扰作用，使有效攻角及实际升力均减小，所以有时也可取 $2.5S_w$ 来计算。

在超音速条件下，尾翼压力中心的位置可近似认为在平均弦长的中点处 (图 10-3-7)，故压力中心至弹顶的距离 h_{yw} 为

$$h_{yw} = l_r - \frac{1}{2} b_{cp}$$

或者尾翼压力中心系数

$$C_{yw} = \frac{h_{yw}}{l_r} = 1 - \frac{1}{2} \times \frac{b_{cp}}{l_r}$$

最后将各值代入 (10-3-1) 和 (10-3-2) 式可求得稳定储备量。

在具体计算时需要注意的是，尾翼弹的压力中心位置随攻角的改变而有所变化，但变化甚微。在缺乏实验数据的情况下，可按给定的一个不大的攻角 (例如 $\delta = 0.05\text{rad}$) 计算。在超音速情况下 (尾翼式枪弹在有效射程内一般都处于超音速飞行)，尾翼枪弹的压力中心随着飞行马赫数 Ma 的增加而向前移动，即稳定程度降低。这是由于尾翼部分产生的法向力系数随着 Ma 数的增大而急剧减小的缘故。这也就是说，对一定结构的弹丸，在高

Ma 数的情况下能够稳定, 则低 Ma 数时更能稳定。因而, 尾翼弹的稳定性, 只需对高 Ma 数的情况进行计算即可。

稳定飞行是保证弹丸具有一定射击密集度的前提条件。如前所述, 尾翼式弹丸的稳定程度是由稳定储备量 ξ 来表示的。 ξ 大, 表示弹丸的稳定程度高, 即抵抗外力干扰的能力强。一般来说, ξ 增大对提高弹丸的射击密集度有利。但过大, 对飞行反而是不利的。因为尾翼弹的稳定飞行是靠尾翼来保证的, 对一定结构的弹体, ξ 大就是说尾翼面积大。这样一方面增大了弹丸飞行中的阻力; 另一方面对提高射击密集度不一定有利 (尾翼面积增大, 固然增大了飞行中的稳定力矩, 但同时也增大了弹丸的法向力, 而后者的增大, 扩大了弹丸的散布)。因而, 要使弹丸具有一定的射击密集度, 必须保证其稳定性具有一定的储备量。稳定储备量究竟多大为最佳, 应由弹丸的结构形式、飞行速度范围、飞行中的外界干扰等具体情况而定。对尾翼式枪弹, 目前还缺乏试验数据。一般说来, 由于是在弹道的直线段上飞行, 没有跟随性的要求, 稳定储备量不必太大, 可以取 $\xi = 10 \sim 15\%$ 。

实际上, 稳定性计算是估算性质的, 可以用来从理论上比较各个方案的稳定性大小。因公式的近似性较大, 真正的稳定性必须考虑立靶精度, 由射击试验来确定。

第十一章 药筒（弹壳）设计

前已述及，设计新弹药一般有两种情况：第一种情况是武器已定，仅改进弹药就能够满足所提出的战术技术要求，在这种情况下，若药筒（弹壳）也需要重新设计（例如更换药筒材料，由黄铜改为钢），这时武器的弹膛尺寸已定，可作为设计的已知条件；第二种情况是整个武器系统都重新设计，这时药筒设计工作者要与武器设计者共同商定弹膛与药筒的相关参量，以满足对整个系统所提出的战术技术要求。

对药筒的战术技术要求通常包括使用性能和生产经济性方面的要求。

在使用性能方面对药筒的要求有：

（1）能顺利地装入弹膛 即要求药筒容易装填，送到位后能关得上闩，闭锁之后能可靠击发底火，这一要求是保证其战斗性能的重要条件，对于射速高的武器尤为重要。

（2）射击时闭气可靠 射击时不允许火药气体从武器尾部（炮闩或枪闩）泄出。

（3）具有一定的强度及刚度 射击时，在火药气体压力作用下，药筒产生变形，在变形过程中不允许破裂；在勤务处理时，药筒必须具备一定的刚度，不致因轻微碰撞而变形，妨碍其顺利入膛。

（4）射击后能可靠退壳 可靠退壳是武器继续战斗的重要保障，武器“卡壳”就意味着它失去战斗力。对于航空武器尤其不允许“卡壳”事故发生，因为在空中，驾驶员不能排除卡壳的故障。

（5）能牢固地与弹丸联接 对于整装式弹药，药筒应与弹丸牢固联接，不会因运输时的振动和入膛时的惯性，而造成弹丸脱落，歪斜等，以致妨碍其顺利装填。

(6) 多次使用性 对于火炮药筒, 猎枪弹药筒有这项要求, 即射击后的药筒, 经简单复修即可再次使用, 这无论从战斗性还是从经济性来说都是很重要的。

(7) 长期储存的安定性 弹药需要有一定的保存期限, 在储存过程中, 应不被腐蚀, 不使发射药的性能产生改变。

在生产经济性方面, 由于在战争中弹药的消耗量是相当大的, 这就使得药筒的生产经济性更需要引起特别的注意, 通常对它的要求有:

- (1) 原料便宜, 国内有大量储备且易于获得;
- (2) 结构简单, 且具有良好的结构工艺性;
- (3) 能利用通用设备制造;
- (4) 战时动员性好。

第一节 药筒材料及各部分尺寸的确定

一、药筒材料

药筒材料的选取主要是考虑其使用性能、生产工艺以及经济性等方面的要求。正确地选择药筒材料具有重要意义, 它不仅影响到能否满足药筒的战术要求, 还会影响到药筒质量、生产效率和生产周期等。

1. 使用方面的要求

(1) 应有适当的弹性 (弹性模数小), 使射击后易于形成最终间隙, 以利抽壳;

(2) 有足够的机械强度和刚度, 以防射击时破裂和轻微碰撞时变形, 并有利于抽壳;

(3) 低温冲击性能好, 防止低温射击时破裂;

(4) 在长期储存过程中, 不应改变在制造过程中所获得的机械性能, 或稍有改变也不影响使用时的性能;

(5) 应具有良好的抗蚀性, 不致因长期储存而腐蚀、破坏;

(6) 与发射药不起化学作用。

2. 工艺方面的要求

(1) 有良好的热、冷塑性变形能力，能适应轧、辗、冲压及引伸等压力加工的要求；

(2) 为恢复塑性或达到一定机械性能所采用的热处理方法应简单；

(3) 应易进行切削加工。

3. 经济方面的要求

(1) 国内资源丰富，材料来源广，工艺简单；

(2) 成本低。

目前常用的药筒材料有：黄铜及其合金、钢、轻金属及代用材料等。

(1) 黄铜 它具有良好的弹性、塑性和抗腐蚀性，也有适当的强度，是较理想的药筒材料。但它的来源有限，成本高，故已逐渐被钢所代替。

(2) 钢 钢的主要优点是来源广、成本低。它的缺点是弹性模数大，抽壳性能较差，低温冲击性能不好，以及冲压性能和防腐性能差等。但随着生产水平的提高，这些困难和缺点都相继得到克服，故枪弹弹壳和小口径炮弹药筒已普遍用钢制造。

覆铜钢是钢板的两面覆以H-90铜。铜层厚度约占钢板厚度的3.4~4.0%，这样就改善了冲压的润滑性能和弹壳的防腐性能，又可节约有色金属铜。所以枪弹弹壳曾一度用覆铜钢来制造。但它仍需一部分铜，而且覆铜钢板生产工艺复杂，边料处理困难。因此，覆铜钢正被以钢棒作原料的工艺所代替。

钢药筒所用钢的化学成分和机械性能见表11-1-1和表11-1-2。

(3) 轻金属 用来制造药筒的轻金属，主要是铝合金。铝合金的最大特点是质量密度小，制出的药筒轻，可以增加战士的弹药携带量。美国以及其它少数国家，现在已开始试用铝合金弹壳枪弹。美国的40mm榴弹系列，是采用高-低压发射原理，它的药筒是用铝合金制造的，这就大大减轻了药筒的质量。

表11-1-1 几种药筒钢的化学成分

序号	牌号	化 学 成 分 (%)					
		碳	锰	硅	磷	硫	铜
1	S10A	0.06~0.12	0.25~0.50	≤0.06	≤0.030	≤0.035	0.03~0.08
2	S11A	0.11~0.17	0.25~0.50	≤0.6	≤0.03	≤0.035	0.03~0.08
3	S15A	0.12~0.18	0.25~0.50	≤0.6	≤0.03	≤0.035	0.03~0.08
4	S20A	0.16~0.22	0.25~0.50	≤0.6	≤0.03	≤0.035	0.03~0.08

表11-1-2 几种药筒钢的机械性能

牌 号	检 验 方 向	σ_b (MPa)		δ_5 (%)		a_k (J/cm ²)	
		调质	正火	调质	正火	调质	正火
S10A	纵 向	≥314	294~392	≥30	≥32		
	横 向	≥294	294~392	≥28	≥28		
S15A	纵 向	≥363	333~441	≥30	≥32	≥196	≥118
	横 向	≥363	333~441	≥27	≥30	≥59	≥39
S20A	纵 向	373~490	373~471	≥28	≥32	≥196	≥118
	横 向	373~490		≥26		≥59	

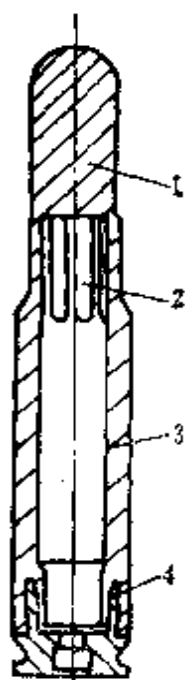


图11-1-1 联邦德国的塑料空包弹

1—弹头 (塑料); 2—预定新开位置;
3—塑料弹壳; 4—弹壳底部 (金属)。

(4) 代用材料 曾采用的代用材料有塑料、硝化纤维及硝

化甘油（可燃药筒）等。采用这些材料常不是制成整体药筒，而是组合式药筒，其底部常用金属制造，体部用代用材料。图 11-1-1 所示出的联邦德国的塑料空包弹即为一例。

二、药筒的瓶形系数

药筒的形状大致上有两种，即圆柱形和瓶形。手枪弹及分装式的药筒多采用圆柱形；大部分的轻武器药筒和火炮药筒是用瓶形的。

药筒采用瓶形有以下好处：

（1）当武器口径和药筒长度相同时，瓶形药筒可以比圆柱形药筒多装发射药；

（2）在药室容积相同的条件下，瓶形药筒的长度短，缩短了自动武器运动部分的行程长度，可以提高射速、减短武器长度；

（3）瓶形药筒较短，有利于抽壳。

但瓶形系数过大也带来以下缺点：

（1）过分地增加武器弹膛部分的横向尺寸，闭体、弹链等尺寸也加大，使武器质量增加；

（2）使药筒斜肩角过大，易引起进弹故障；

（3）药筒底部质量增加；

（4）加工时要增加收口次数，否则易产生皱折。

上述前两项缺点直接影响武器性能。射击实践表明，步兵自动武器的故障，大部分是由供弹机构工作不可靠所引起的，而弹壳形状的选取，对供弹可靠性是有一定影响的，同时药筒的形状也影响武器的结构和武器的质量。所以在新弹药的设计过程中，药筒的瓶形系数应在内弹道设计时，由弹药设计人员与武器设计人员共同协商确定。

所谓瓶形药筒就是将药筒做成口部缩小的形状，类似于瓶子。口部缩小的程度一般用瓶形系数 ψ 表示（图 11-1-2）。

$$\psi = \frac{d_{\text{口}}}{d} \sqrt{\frac{l_0}{l_w}}$$

式中 d_{pf} ——药筒的平均内径,

$$d_{pf} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \cdots + d_n}{n}$$

d ——武器口径;

l_0 ——药室缩径长;

l_{ω_0} ——药室长度。

在实际计算时, 为测量方便, 求 d_{pf} 时常以药筒外径尺寸来计算, 这 and 实际相差不大。可以看出, 瓶形药筒 ψ 值大于 1, 圆柱形药筒 ψ 值等于 1。

在实际设计时, 瓶形系数的选取, 常参考现有武器的弹膛或所用药筒的瓶形系数。表 11-1-3 列出了几种枪弹弹壳的瓶形系数。

对于中口径火炮药筒, 瓶形系数一般为 $\psi = 1.05 \sim 1.25$; 对于小口径火炮药筒, 瓶形系数一般为 $\psi = 1.2 \sim 1.5$ 左右。

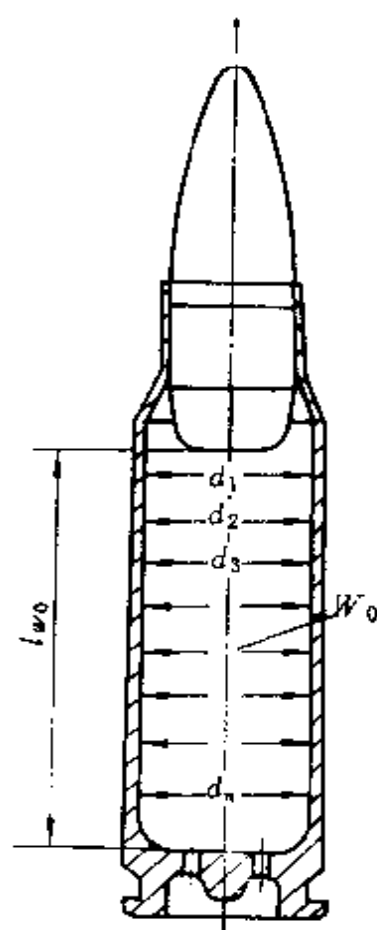


图 11-1-2 瓶形药筒

表 11-1-3 几种枪弹弹壳的瓶形系数

弹壳种类	56式7.62	53式7.62	54式12.7	56式14.5	美M193式5.56	美M59式7.62
ψ	1.29	1.36	1.47	1.69	1.32	1.33

枪弹药筒的瓶形系数通常可用下列经验公式初步估算,

$$\psi = \sqrt{0.2 \left(1 + \frac{W_0}{d^3} \right)}$$

式中 W_0 为药室容积, d 为口径。计算结果若 $\psi < 1$, 则取 $\psi = 1$ 。用此式计算几种枪弹药筒的瓶形系数, 结果如下:

弹种	56式7.62	53式7.62	54式12.7	56式14.5	美M193式5.56	美M59式7.62
ψ	1.02	1.36	1.48	1.63	1.52	1.30

三、药筒各部分尺寸的确定

前面已谈到设计药筒时的两种情况，对于武器已定要求改进药筒的情况，这时弹膛尺寸已知，则药筒外部尺寸与弹膛的配合关系成为主要的，而后确定药筒各部位的壁厚；对于整个武器系统都重新设计的情况，这时对药筒设计者来说已知的数据主要是药室容积和武器口径。本节介绍的药筒各部分尺寸的确定属于后一种情况。

药筒各部分的尺寸，壁厚、直径、长度等。这些尺寸是在分析所设计药筒的要求、参考现有各种药筒的已有数据的基础上进行理论分析确定的。

1. 药筒壁厚

药筒的壁厚直接影响着它的使用性能、勤务处理和经济性。当药筒可能达到的机械性能一定时，正确选择药筒壁厚，可以保证：

- (1) 射击时可靠地密闭火药气体；
- (2) 射击后退壳性能良好，药筒不发生横向或纵向裂纹；
- (3) 勤务处理和使用时有必要的刚度（即保证药筒本身不变形，弹丸和药筒结合牢固）；
- (4) 对炮弹药筒来说，还应保证多次使用性能。

显然，上述要求是互相矛盾的。如为保证闭气性能，希望药筒越薄越好，但这与必要的刚度有矛盾。为解决此矛盾，通常是采用变壁厚，即使药筒由口部到底部逐渐增厚。

药筒壁厚一般用相对壁厚 m 表示：

$$m = \frac{2t}{d}$$

式中 t ——某断面的壁厚，

d ——该断面的直径。

大多数药筒的相对壁厚在 $m = 0.009 \sim 0.1$ 的范围内，口径小的，相对壁厚的取值常接近于上限，自动武器的取值常大于一般武器。相对壁厚值取得过大，会使药筒质量增加，减少战士的弹药携带

量,原材料消耗也增多了,所以在设计时应尽量采用较小的壁厚,但应保证药筒有足够的强度,以满足射击和勤务处理的要求。

2. 筒口

药筒口部主要用来固定弹丸(定装式),并使其具有一定的拔弹力,同时又要求它在较低的膛压下膨胀,从而封闭弹膛,达到密闭火药气体的目的。为此,通常将筒口设计得较薄,以便提高闭气性;而提高拔弹力是靠筒口与弹丸间的过盈配合来达到的,但过盈量不宜过大,过大的过盈值在装配时会使药筒口部产生很大的变形,损害药筒的防腐层,并使口部产生较大的拉应力。为保证药筒与弹丸的牢固结合,除它们间的过盈配合外,还采用滚沟的办法(图 11-1-3),这可增大拔弹力。口部机械性能的变化对拔弹力和闭气性也有一定的影响。



图11-1-3 药筒与弹丸间的滚沟结合

(1) 壁厚 (t_k) 筒口处的壁厚是根据它和弹丸联接的牢固性、闭气性来确定的。对于枪弹药筒来说,它与斜肩处的壁厚有一定的关系,而斜肩处的壁厚又与整个药筒的刚度有关。药筒各部分尺寸的符号示于图 11-1-4。

枪弹药筒的口部壁厚一般为

$$t_k = (0.03 \sim 0.05) d_k$$

整装式火炮药筒的口部壁厚一般为

$$t_k = (0.013 \sim 0.025) d_k$$

(2) 筒口长度 (l_k) 药筒口部长度主要影响其与弹丸结合的强度,显然药筒筒口和弹丸的接触面愈大,弹丸和药筒联接就愈牢固。但它受到弹丸联接部位(圆柱部分)长度的限制,一般

$$l_k = (0.4 \sim 1.25) d$$

式中 d 为口径。

(3) 筒口内径 (d_{k0}) 为了获得拔弹力,筒口内径须比弹

丸圆柱部分的直径小。因此，只要给出它们之间的过盈量，就可确定筒口内径。

对现有枪弹的大量统计结果表明：筒口内径的名义值比弹丸圆柱部名义直径小 $0.1 \sim 0.15 \text{ mm}$ 。小口径枪弹由于药筒较薄、圆柱部较短等原因，过盈量取上限，大口径枪弹则取下限。因此

$$d_{k0} = d_y - (0.1 \sim 0.15) \text{ mm}$$

式中 d_y 为弹丸圆柱部的名义直径。

但是在枪弹制造时，弹丸和药筒在该处都有制造公差 $-\delta d_y$ 和 $+\delta d_{k0}$ 。在生产中一般是控制在中公差，即控制在 $-\frac{1}{2}\delta d_y$ 和 $+\frac{1}{2}\delta d_{k0}$ ，而一般

$$|\delta d_y| = |\delta d_{k0}|$$

因此，实际上过盈量是在 $(0.1 \sim 0.15) - \delta d_y$ 上下。为了防止产生间隙，在确定公差时应使下式成立，即

$$d_y - \delta d_y \geq d_{k0} + \delta d_{k0}$$

例如 56 式 14.5 枪弹弹丸直径为 $14.93_{-0.05}^{} \text{ mm}$ ，筒口内径为 $14.82_{+0.05}^{} \text{ mm}$ ，其过盈量为 $14.93 - 14.82 = 0.11 \text{ mm}$ ，代入不等式中得， $14.93 - 0.05 > 14.82 + 0.05$ ，故不会产生间隙。

有时用相对过盈量来确定筒口内径，即

$$q = \frac{d_y - d_{k0} - \delta d_y}{d_{k0}}$$

式中 q 为口部的相对过盈量，一般 $q = 0.004 \sim 0.012$ ，对于小口径枪弹取上限，大口径枪弹取下限，例如 56 式 14.5 枪弹的相对

过盈量为 $q = \frac{14.93 - 14.82 - 0.05}{14.82} = 0.0042$ 。

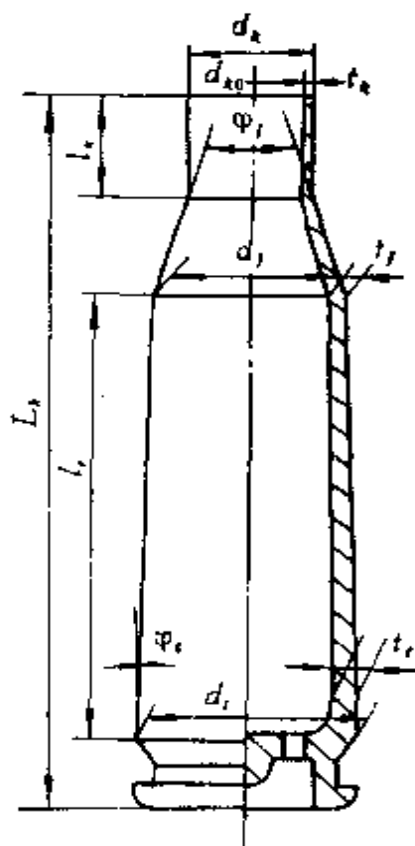


图11-1-4 药筒各部位的尺寸

对火炮药筒而言,其最小公盈的绝对值 Δ_H 一般为 $0.18 \sim 0.5$ mm。这样筒口内径可由下式确定:

$$d_{p_1} = d_y - \delta d_y - \Delta_H - \delta d_{k_0}$$

通常 $\delta d_1 = \delta d_{k_0}$, 所以

$$d_{k_0} = d_y - \Delta_H - 2\delta d_y$$

对于小口径炮弹,其相对过盈量的最大值,不应超过弹尾圆柱部直径的 3%,对于中、大口径炮弹,此值不应超过 1%。

(4) 筒口外径 (d_k)

$$d_k = d_{k_0} + 2t_k$$

3. 斜肩

(1) 斜肩壁厚 (t_j)

对于枪弹药筒

$$t_j = (0.03 \sim 0.04)d_j$$

式中 d_j ——药筒斜肩外径,由于 $\frac{d_j}{d_k} \approx \psi$, 故 $d_j \approx \psi \cdot d_k$ 。

对于整装式火炮药筒

$$t_j = t_k + (0.05 \sim 0.5) \text{ mm}$$

(2) 斜肩角 (φ_j) 斜肩角的大小与武器性能、定位方式等有关,用斜肩定位的药筒,一般

$$\varphi_j = 20^\circ \sim 50^\circ$$

用底缘定位的药筒, φ_j 值可取小些。斜肩角过大则入膛困难,收口复杂;斜肩角过小则制造误差对斜肩定位误差影响较大,并且在药室容积相同的情况下使药筒长度增加。

(3) 斜肩长 (l_j)

$$l_j = \frac{1}{2} (d_j - d_k) \operatorname{ctg} \frac{\varphi_j}{2}$$

4. 筒体

药筒体的尺寸是根据药室容积、瓶形系数、药筒强度、抽壳性能等因素确定的,同时还应考虑到质量小,刚度好的要求。因此一般将药筒设计成锥形,其壁部由上至下逐渐增厚,并利用加

工硬化的方法，使各部分的材料强度有不同程度的提高。

(1) 筒体半锥角 (φ_r) 为了便于进膛和抽壳，可将药筒体部制成锥形。

对于弹匣供弹的自动武器，药筒体部的锥度不宜太大，否则弹匣需做成弧形，而弧形弹匣制造、携带和使用都不方便。

手枪弹由于膛压低、药筒短（这些都有利于抽壳），所以常采用圆柱形或锥角极小的筒形药筒。

在自由枪机式和半自由枪机式武器中，由于发射后即开始抽壳，锥形药筒在抽壳过程中将形成较大的缝隙，为了使火药气体不致由后面喷出，药筒在抽壳过程中不致由于过分膨胀而破裂，故采用圆柱形药筒较为有利。

一般

$$\varphi_r = 0.5^\circ \sim 1.5^\circ$$

而手枪弹的 φ_r 可以小至 $5'$ 。

(2) 筒体长度 (l_r) 筒体长度可根据瓶形系数 ψ 和药室容积 W_0 来确定。如果忽略斜肩和筒口在弹丸插入后剩余的一部分容积，则可近似认为药室长度即为筒体长度，即

$$l_r = l_{w_0}$$

式中 l_{w_0} 为药室长度。

根据瓶形系数的定义，可得

$$l_r = \frac{l_0}{\psi^2}$$

(3) 筒体下部直径 (d_r)

$$d_r = d_f + 2l_r \tan \varphi_r$$

(4) 筒体下部壁厚 (t_r)

对于火炮药筒

$$t_r = (0.022 \sim 0.036) d_r$$

对于枪弹药筒

$$t_r = (0.068 \sim 0.076) d_r$$

表 11-1-4 给出了一些枪弹药筒的相对壁厚。

表11-1-4 一些枪弹药筒的相对壁厚

序号	尺寸名称 枪弹名称	筒			口		斜			筒体下部 壁厚 $\frac{t_e}{d_e}$
		壁厚 $\frac{t_k}{d_y}$	长度 $\frac{l_k}{d_y}$	相对过盈量	绝对过盈 (mm)	拔弹力 (N)	壁厚 $\frac{t_f}{d_f}$	长度 $\frac{l_f}{d_f}$	斜肩角	
1	51式7.62手枪弹	0.036	0.446	0.017	0.14	150~700	0.0318	0.24	31°11'	0.069
2	59式9.0手枪弹	0.035	0.445	0.011	0.15	200~600	—	—	—	0.068
3	英7.62转轮手枪弹	0.031	—	0.0102	0.13	—	—	—	—	0.082
4	53式7.62步枪弹	0.043	1.24	0.0116	0.14	350~1000	0.035	0.827	29°40'	0.072
5	56式7.62步枪弹	0.043	0.75	0.0116	0.12	350~1000	0.040	0.328	32°45'	0.07
6	英M193式5.56步枪弹	0.048	0.87	—	—	350	0.034	0.521	40°46'	0.101
7	美M59式7.62步枪弹	0.056	1.10	0.0078	0.11	300~1000	0.041	0.505	36°37'	0.10
8	54式12.7高机枪弹	0.036	1.21	0.0047	0.11	3000~5000	0.039	0.496	37°53'	0.078
9	56式14.5高机枪弹	0.055	1.0	0.0042	0.11	1500~4000	0.030	0.762	40°4'	0.076
10	美M2式12.7机枪弹	0.044	1.31	0.0032	0.08	—	0.043	0.78	21°28'	0.072
11	意12.7机枪弹	0.031	1.03	0.004	0.10	—	0.037	0.3	34°24'	0.078
12	比12.7机枪弹	0.046	1.32	0.0071	0.14	—	0.04	0.481	33°16'	—
13	英12.7机枪弹	0.039	1.16	0.0063	0.13	—	0.039	0.96	22°24'	0.072
14	日九三式13.2机枪弹	0.037	1.05	0.004	0.05	—	—	0.553	28°40'	0.07
15	法13.2机枪弹	0.037	1.04	0.004	0.04	—	—	0.553	28°40'	0.074

5. 底部

底部设计主要确定药筒的底部厚度，以及筒体壁与底部内表面的联接形状。

(1) 底部与体部联接处的内形 药筒内底与筒体内壁联接处的形状直接影响体部强度、退壳性能和工艺性。

枪弹药筒内底处的联接形状如图11-1-5所示，一般是以圆弧与内底平面连接(图11-1-5a)，也有用两个或三个相切的圆弧与内底相接(图11-1-5b)，以便使下部壁厚逐渐增厚。对有突出底缘的枪弹药筒，为了使底缘易于成型，药简体部与底部交接处可做成图11-1-5c所示的形状。内底连接处由于工艺的原因，常易产生皱折，影响该处强度及抽壳性能。因此在设计连接处形状时，应采取适当措施以消除皱折。一般认为，增大联接处的圆弧可以使皱折减小。

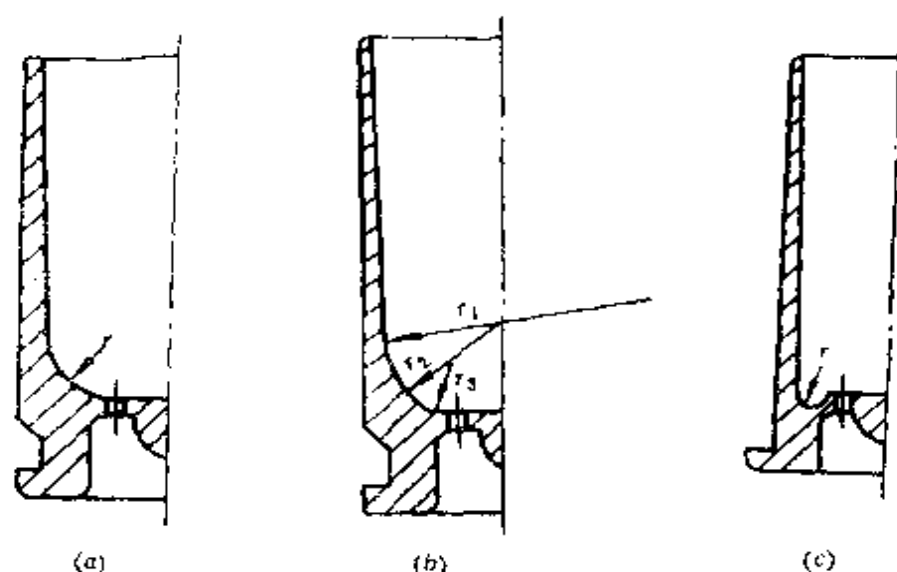


图11-1-5 枪弹药筒内底部的圆弧

火炮药筒内底处的联接形状如图11-1-6所示，它是用两个圆弧联接，这可使筒壁根部逐渐增厚，增加其承载能力。底缘根和外体部相接触处为一圆弧 r 过渡，对于钢药筒 r 一般应不小于 0.8mm ，对于黄铜药筒则不小于 0.5mm 。

(2) 底部厚度 (h_d) 药筒底部厚度应保证药筒在工作过程

中有足够的强度，以保证武器系统的可靠工作。另外，筒底内表面（A-A面）应在身管尾端面以内，如图 11-1-7 所示，否则火药气体从体下部薄弱处冲出，是很危险的。

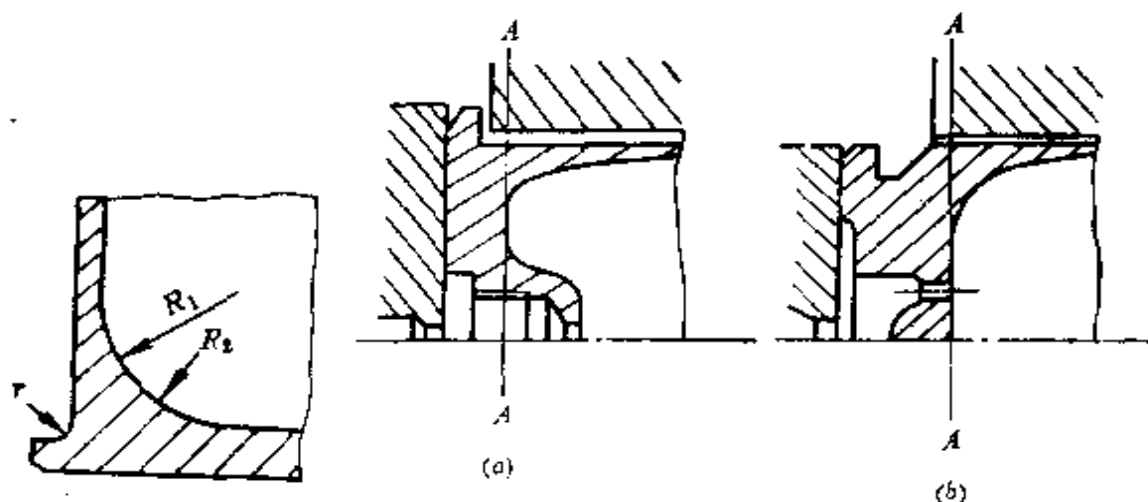


图11-1-6 火炮药筒内
底处的联接形状

图11-1-7 筒底内表面在内腔中的位置

枪弹药筒的底部厚度通常用下列经验式确定：

底缘不突出的药筒

$$h_d = (0.40 \sim 0.45)d_d$$

底缘突出的药筒

$$h_d = (0.32 \sim 0.37)d_d$$

式中 d_d 为底缘直径。

几种火炮药筒的壁厚及筒底厚度见表11-1-5。

表11-1-5 几种火炮药筒的壁厚及筒底厚度

尺寸名称 药筒名称	筒口壁厚 $\frac{t_k}{d_k}$	斜肩下部 壁厚 t_j/d_j	筒体下部壁厚 $\frac{t_c}{d_r}$	筒底厚度 h_d (mm)
37mm高射炮钢药筒	0.0235	0.0298	0.0359	11-1.8
57mm高射炮黄铜药筒	0.0237	0.0197	0.024	15.2-1.8
57mm高射炮钢药筒	0.0237	0.0197	0.0251	15-1.8
85mm加农炮钢药筒	0.0151	0.0158	0.028	8-1.6
85mm加农炮黄铜药筒	0.0151	0.0158	0.0221~0.028	7.5-1.8

6. 底火室

枪弹药筒的底火室一般有两种形状，即带底火台的不带底火台的(图11-1-8)。不带火台的底火室需另外装配火台(图11-1-9b)或采用带火台的火帽(图11-1-9a)。设计底火室时需确定以下尺寸。

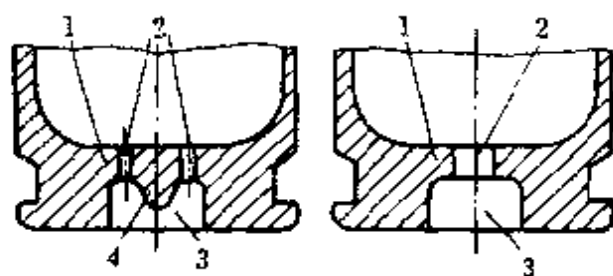


图11-1-8 枪弹药筒底火室的形状

1—隔板；2—传火孔；3—底火室；4—火台。

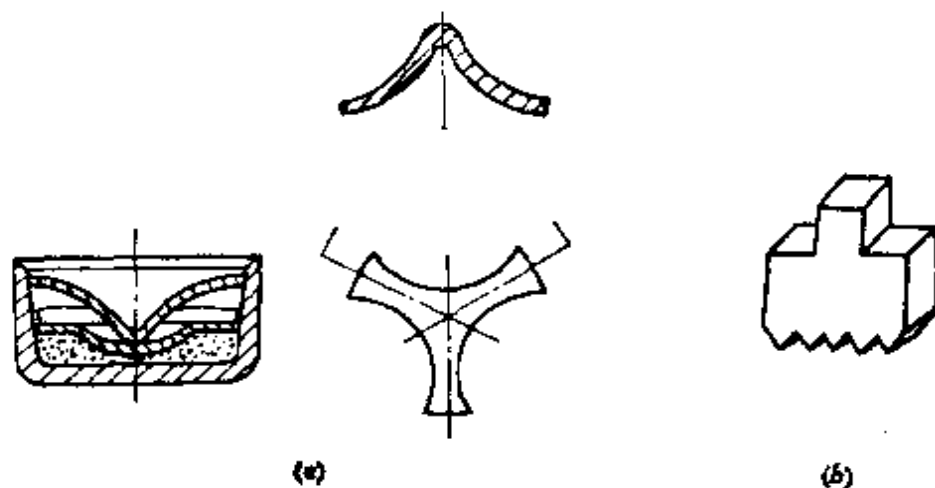


图11-1-9 活动火台和带火台的底火

(a) 带火台的底火；(b) 活动火台。

(1) 底火室直径 (d_r) 枪弹底火(火帽)是靠公盈配合装于底火室内,这样底火室的直径就根据底火的直径和公盈值来确定。根据实际资料统计,通常底火的名义直径比底火室名义直径大0.12~0.14mm,因此底火室直径可用下式确定,

$$d_r = d_{dh} - (0.12 \sim 0.14)$$

式中 d_r ——底火室名义直径 (mm);

d_{dh} ——底火的名义直径 (mm)。

如果过盈量太小,则底火易脱落;过盈量太大,则装配时底

火变形大，易使击发药松散，影响底火可靠作用。

也可用相对过盈量来确定底火室尺寸，即

$$d_r = \frac{d_{dh}}{1 + q}$$

式中 q 为相对过盈量，一般 $q = 0.015 \sim 0.026$ 。

考虑到底火室和底火的公差，可取最小相对公盈 $q_{\min} = 0.002 \sim 0.004$ 。用 δd_r 和 δd_{dh} 分别表示底火室直径公差和底火直径公差，则

$$d_r + \delta d_r = \frac{d_{dh} - \delta d_{dh}}{1 + q_{\min}}$$

略去 $q_{\min} \cdot \delta d_r$ 一项，可得

$$\delta d_r = d_{dh} - d_r(1 + q_{\min}) - \delta d_{dh}$$

已知 δd_{dh} ，给出 $q_{\min}$ 值，即可确定 δd_r 。

例如已知 53 式 7.62 枪弹 $d_{dh} = 6.53\text{mm}$ ， $\delta d_{dh} = 0.05\text{mm}$ ， $d_r = 6.4\text{mm}$ ，求 δd_r 。取 $q_{\min} = 0.004$ ，则

$$\delta d_r = 6.53 - 6.4(1 + 0.004) - 0.05 = 0.054\text{mm}$$

(2) 底火室深度(h_r) 确定底火室深度应与火台、底火尺寸同时考虑，以保证满足下述要求：底火装入深度 $l_2 > 0$ ，以确保使用安全；药面与火台顶之间的距离 $l_3 > 0$ ，使生产操作时安全；底火装入后，底火的口部与底火室之间应有一定间隙 l_1 ，防止装配时底火口部被压卷，产生漏烟。但上述尺寸都不能过大，以免影响发火性和结构尺寸。根据底火室和底火的装配关系，可得下列计算式（图11-1-10），

$$h_{r\min} = h_{dh\max} + l_{1\min} + l_{2\max}$$

式中 $h_{r\min}$ ——底火室最小深度；

$h_{dh\max}$ ——底火最大高度；

$l_{1\min}$ ——底火口部到隔板的最小距离，一般取 $l_1 \geq 0.1\text{mm}$ （大口径枪弹可取至 0.6mm ）；

$l_{2\max}$ ——底火装入底火室的最大深度，一般取 $l_2 = 0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 。

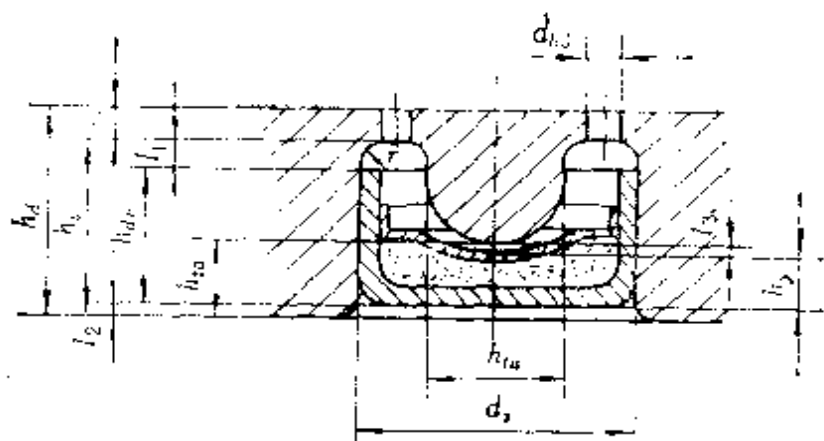


图11-1-10 底火室与底火的装配关系

(3) 底火室圆弧(r) r 不能过小, 否则射击时隔板易被剪断。此外, 底火装配后其口部不应超过 r 的切点过多, 否则底火口部向内弯曲过多, 射击时底火周围易漏烟。

小口径枪弹药筒 $r = (0.2 \sim 0.4) \text{ mm}$;

大口径枪弹药筒 $r = 1 \text{ mm}$ 。

(4) 火台深度(h_{ts}) 根据装配关系, 火台深度可按下式确定:

$$h_{ts, \min} = h_{y0} + l_{2, \max} + l_{3, \min}$$

式中 $h_{ts, \min}$ —— 火台最小深度;

h_{y0} —— 击发药面高度(包括锡箔厚);

$l_{2, \min}$ —— 药面到火台的最小距离, 一般根据武器结构而定, 通常 $l_2 = (0.02 \sim 0.2) \text{ mm}$ 。

(5) 火台尺寸(图 11-1-11)

$$d_{ts} = (0.35 \sim 0.5) d_s;$$

$$r_1 = (0.25 \sim 0.4) \text{ mm};$$

$$r_2 = (0.35 \sim 0.5) d_{ts}.$$

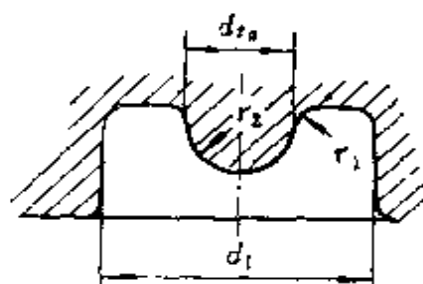


图11-1-11 火台尺寸

(6) 传火孔 传火孔数目视火台种类而定。带火台药筒的传火孔一般为两个, 不带火台药筒仅中间有一个传火孔(图11-1-8)。传火孔面积的大小(或传火孔数目)对初速膛压有一定的影响。从试验中发现, 传火孔数目增多(带火台药筒的传火孔直径受底火室尺寸限制, 不能过分增大, 要增加传

火孔面积常采用增加传火孔数目的方法), 初速和膛压反而降低(表11-1-6)。传火孔直径(d_{h0})常根据以下经验关系确定:

$$\text{两孔} \quad d_{h0} = (0.15 \sim 0.2) d_r$$

$$\text{单孔} \quad d_{h0} = (0.26 \sim 0.4) d_r$$

将药筒的药室和底火室隔开的那部分金属板称为隔板。在击发底火后, 隔板承受着击发药气体的压力; 点燃发射药以后, 它承受药室和底火室之间的压力差。因此, 隔板须有一定的厚度, 它与底火的连接采用圆弧过渡。从冲传火孔的工艺来考虑, 隔板不能太厚。从试验可知, 若将56式14.5和54式12.7钢药筒的隔板厚度大大减薄, 对射击影响甚小。这种枪弹的隔板之所以较厚, 主要是为了使药筒内底面位于枪管尾端面以内, 以保证枪械使用安全。根据经验, 隔板厚度(t_g)可按式确定:

$$t_g = (0.16 \sim 0.3) d_r$$

表11-1-6 传火孔数目对初速和最大膛压的影响

枪弹名称	弹道性能	传火孔数目				初速、膛压降低值
		1	2	3	4	
51式7.62手枪弹	最大膛压 (MPa)	198	187	184	180	18
	初速 (m/s)	448	442	437	436	12
56式7.62步枪弹	最大膛压 (MPa)	257	—	—	251	1
	初速 (m/s)	727	720	719	714	13
56式14.5高机枪弹	最大膛压 (MPa)	285	—	—	283	2
	初速 (m/s)	969	—	—	966	3

火炮药筒底火室的形状如图11-1-12所示。它的凸起部的高度和底火室尺寸, 主要由配用底火结构所决定。为保证其强度要求凸起部肩厚 t 一般应大于2mm, 有一过渡圆弧半径 r , 其值应大于1mm。底火底缘槽深度 h_1 , 应保证底火旋入底火室内不

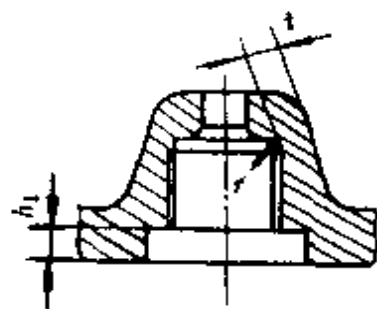


图11-1-12 火炮药筒的底火室形状

突出，其凹下量不大于 0.5mm，以保证击发可靠和勤务使用安全。

7. 底缘尺寸

在确定底缘尺寸时，应考虑药筒的强度，不致在抽壳时拉缺底缘，并保证抓壳钩定位确实，不致滑脱，另外也不应过多地增加药筒底部体积。药筒底缘各部分的尺寸见图 11-1-13。

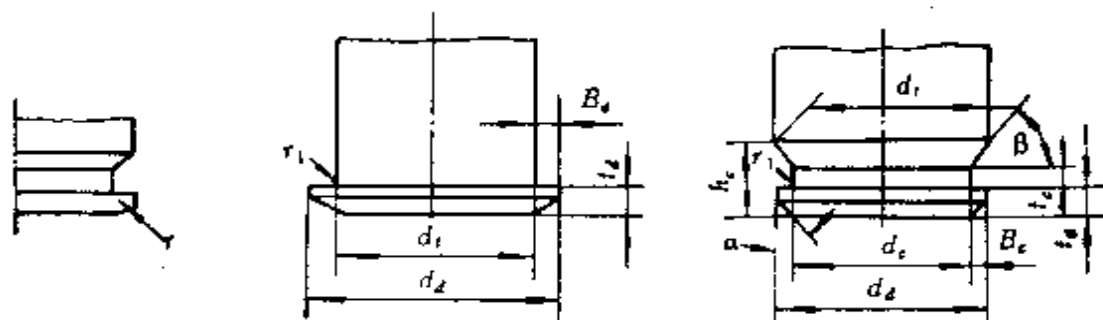


图11-1-13 底缘尺寸

枪弹药筒的底槽深度 (B_s) 和底缘厚度 (t_s) 可根据以下经验关系选取：

$$B_s = (0.6 \sim 2) \text{mm}$$

通常手枪弹取下限，步枪弹取中间值，大口径枪弹取上限。

$$t_s = (0.09 \sim 0.13) d_i$$

大口径枪弹取下限，小口径枪弹取上限。或

$$t_s = (1.1 \sim 1.25) B_s \quad (\text{用于大口径枪弹})$$

$$t_s = (1.6 \sim 1.9) B_s \quad (\text{用于小口径枪弹})$$

火炮药筒的底缘尺寸，应根据对药筒提出的要求，在分析、参考现有各种药筒底缘尺寸的基础上确定。表11-1-7给出了几个国家药筒底缘的尺寸。

药筒底缘直径 (d_s) 可用下式确定：

$$\text{底缘突出的药筒} \quad d_s = d_i + 2 B_s$$

$$\text{底缘不突出的药筒} \quad d_s = d_i$$

底缘倒角 α 和底槽的倒角 β (β 与抓壳钩齿的斜角有关) 一般为 45° 。

表11-1-7 几个国家药筒底缘的尺寸

口径 (mm)		50~60		75~77		85~95	
尺寸 (mm)							
国别		t_d	B_c	t_d	B_c	t_d	B_c
中 国		5~5.5	2.1	3.7	5.65	4	5.15
苏 联		3.46	3.15	3.46	3.15	4~5	5
美 国		5.1	3.2	5.7	3.2	6	—
英 国		—	3	5~6	5.8	6.3	3.6
德 国		3.6	3.9	3.6~4	5.5	5~6	5

底缘的连接半径 r_1 ：火炮药筒一般取 $(0.5\sim1.5)\text{mm}$ ；枪弹药筒一般为 $(0.2\sim0.3)\text{mm}$ ，很少超过 0.5mm ，圆弧过大，抽壳时易滑脱。

底缘不凸出药筒的底槽厚度 (t_c) 用下式确定，

$$t_c = (1\sim1.8)t_d$$

表11-1-8给出了一些枪弹药筒的底部尺寸。

8. 药筒全长(L_K)

药筒的全长应根据药室容积最后确定，即所设计药筒最后的实际药室容积应与内弹道所要求的一致。

当为旧武器系统设计药筒时，应考虑现有武器的弹膛尺寸，同时还必须满足战术技术要求。

底缘定位的药筒，其筒体和斜肩长度，一般与弹膛相同，为使弹药能顺利地放入弹膛，而不产生嵌紧现象（射击前弹丸就嵌入膛线中），以致闭体不易关闭，故整装式底缘定位的药筒筒体长度必须保证弹丸与膛线起始处有一缝隙 K （图 11-1-14）。当 K 给定后，在已知弹膛尺寸的情况下，药筒全长即可定出。斜肩定位的药筒也应考虑相应的 K 值。当整个武器系统都是新设计时，则 K 值将在确定弹膛尺寸时作相应的考虑。某些口径炮弹的 K 值见表11-1-9。

在确定火炮药筒全长时，还应考虑到装药的尺寸以及护膛具、消焰剂、除铜剂，紧塞具等。

表11-1-8 一些枪弹药筒的底部尺寸

尺寸名称 枪弹名称	底 厚 $\frac{h_d}{d_d}$	底火室相 对过盈量 q	火台直径 $\frac{d_{ra}}{d_s}$	传 火 孔		底			缘 斜 度 α (°)	圆 弧 r (mm)
				直 径 $\frac{d_{h0}}{d_s}$	隔板厚度 $\frac{t_g}{d_s}$	宽 度 B_c (mm)	厚 度 $\frac{t_d}{d_d}$			
51式7.62手枪弹	0.41	0.024	0.49	0.2	0.23	0.7	0.127			0.5
59式9.0手枪弹	0.4	0.024	0.49	0.2	0.2	0.7	0.126			≤ 0.5
美7.62转轮手枪弹	0.42		0.49	0.2	0.23	0.35	0.148			
53式7.62步枪弹	0.35	0.02	0.53	0.16	0.16	1.03	0.131			
56式7.62步枪弹	0.37	0.026	0.45	0.19	0.22	0.9	0.132			0.5
美M193式5.56步枪弹	0.53		—	0.44	0.44	0.54	0.121			0.5
美M59式7.62步枪弹	0.37	0.015	0.45	0.19	0.26	0.75	0.117			0.5
54式12.7高机枪弹	0.42	0.015	0.43	0.15	0.46	1.8	0.093	45		
56式14.5高机枪弹	0.35		0.43	0.15	0.51	2	0.074	45		
美M2式12.7机枪弹	0.41		—	0.38	0.36	1.6	0.1			
意12.7机枪弹	0.32			0.16	0.36	1.25	0.119			
比12.7机枪弹	0.45		—	0.31	0.38	1.58	0.1			
英12.7机枪弹	0.33			0.15	0.38	1.7	0.081			
日九三式13.2机枪弹	0.44		—	0.26	0.38	1.6	0.09	45		
法13.2机枪弹	0.45		—	0.26	0.38	1.65	0.09			

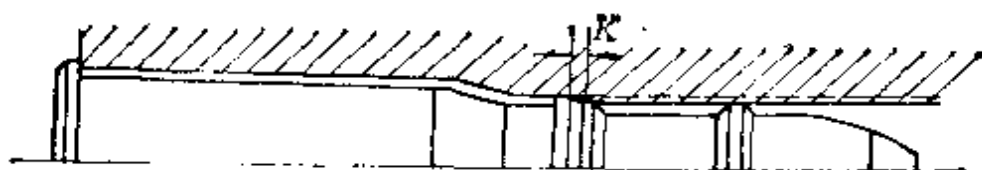


图 1-1-14 弹丸与膛线起始间的K值

表11-1-9 某些口径炮弹的K值

口径 (mm)		20	37	45	75	76	83
K	最大	3.0	6.0	7.0	8.0	8.0	8.0
(mm)	最小	0.8	1.8	1.8	2.5	2.5	3.0

第二节 初始间隙的选择

为保证弹药能顺利进膛和抽壳，药筒与膛壁之间有一定的径向间隙，一般称为初始间隙。通常通过初始间隙值可将药筒与弹膛这两个尺寸联系起来，用其中的一个尺寸来确定另一个尺寸。

初始间隙是弹膛名义尺寸（内径）与药筒的相应名义尺寸（外径）之差的一半，即

$$u_0 = \frac{1}{2}(D - d)$$

式中 u_0 ——初始间隙；
 D ——弹膛内径；
 d ——药筒外径。

在选定初始间隙时，要考虑到初始间隙对最终间隙的影响，以及药筒的强度与闭气作用等。

由于药筒和弹膛有制造公差，所以初始间隙是在某一个范围内变化的，通常所称的初始间隙是它的最小值，或称为“保证间隙”，实际上的间隙应比它大。

保证间隙应能保证药筒顺利入膛，可靠闭气和退壳，另外也应考虑到药筒的强度。这些要求彼此之间是有矛盾的。为使闭气性好和保证药筒的强度，希望初始间隙小，这样发射时药筒贴膛迅

速, 变形量小; 为了保证药筒顺利入膛和可靠退壳, 就希望有较大的初始间隙, 这样药筒入膛容易, 射击后药筒的恢复变形量增加。

由材料的应力-应变曲线 (图11-2-1) 可以看出, 当药筒内的应力超过弹性极限后, 材料开始强化, 其中有一段强化得最快。增大初始间隙会使药筒材料的强化增加, 有利于形成最终间隙。若初始间隙过大, 药筒的切向变形增加, 易破裂。材料的变形一般可以分为三个区域 (图11-2-2): 弹性区 (I 区), 小变形区 (II 区), 此区域材料的变形量不大, 但强化作用较显著, 初始间隙选在此范围内较为合适; 大塑性变形区 (III 区), 此区材料的变形量大, 但强化作用已不显著, 变形量过大易使药筒产生破裂。

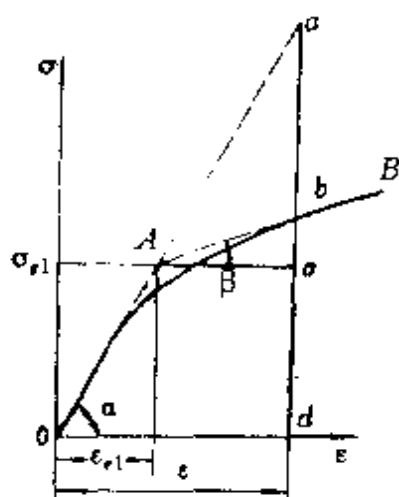


图11-2-1 应力-应变曲线

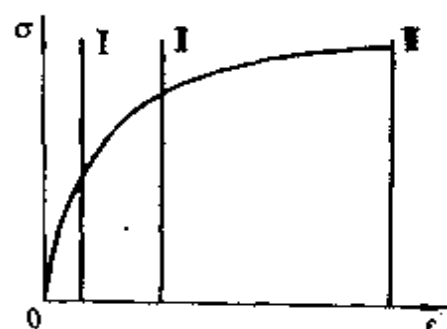


图11-2-2 材料变形的三个区域

显然, 初始间隙选在 II 区对药筒强度和可靠退壳是有利的。初始间隙的最大值和最小值分别为

$$u_{0\max} = \frac{1}{2}(D_{\max} - d_{\min})$$

$$u_{0\min} = \frac{1}{2}(D_{\min} - d_{\max})$$

式中 $u_{0\max}, u_{0\min}$ —— 初始间隙的最大值和最小值;
 $D_{\max}, D_{\min}$ —— 弹膛内径的最大值和最小值;
 $d_{\max}, d_{\min}$ —— 药筒外径的最大值和最小值。

有时也用相对间隙来表示初始间隙, 即

$$\delta_0 = \frac{D-d}{d} = \frac{2u_0}{d}$$

式中 δ_0 为相对初始间隙。

枪弹药筒与弹膛间初始间隙的一般范围见表11-2-1。几种火炮与药筒间的初始间隙见表11-2-2。现有一些枪和弹的初始间隙见表11-2-3。

表11-2-1 枪弹初始间隙的一般范围

部位 \ 初始间隙	$u_{0\max}$ (mm)	$\delta_{0\max}$	$u_{0\min}$ (mm)	$\delta_{0\min}$
体下部	0.1~0.15	0.02	0.025~0.05	0.005
斜肩下部	0.1~0.18	0.02	0.025~0.1	0.005
斜肩上部	0.1~0.2	0.03	0.025~0.1	0.01

初始间隙一般沿药筒长度上是相等的, 或在筒口处间隙稍大些。这是因为弹丸装入药筒后, 药筒口部内径公差、壁厚公差和弹丸直径公差都影响药筒口部外径, 加之弹丸和药筒在装配时轴线不可能完全重合, 为了消除它们给进膛带来的影响, 所以药筒口部的初始间隙要大一些。

必须指出, 在弹药进膛闭锁后, 药筒底面与闭体内平面 (或枪机弹底窝平面) 之间也应有一定的间隙, 此间隙称为弹底间隙 (闭锁间隙), 用符号 Δ 表示。

弹底间隙是满足武器闭锁机构作用确实所需要的, 在使用过程中会随着闭锁零件的磨损及射击过程中各零件的弹性变形和温度变形而增大。弹底间隙应选择合适, 不应过大或过小。如果过小, 会影响武器动作灵活性, 甚至发生不闭锁发火事故; 如果过大, 易引起药筒横断或底部炸裂。另外, 由于药筒外表面通常为锥体, 发射时若药筒后移量过多, 会使药筒与弹膛的间隙增大, 容易产生纵裂或火药气体泄出。

由表11-2-4中可以看出, 新枪出厂时, 闭锁间隙数值的下偏差允许出现负值, 也就是说允许有公盈。对于口径较大射速较高的

表11-2-2 几种火炮与药筒间的初始间隙值

火炮名称	部 位				斜 肩 下 部			
	药室直径 (mm)	药筒直径 (mm)	μ_{0max} (mm)	μ_{0min} (mm)	药室直径 (mm)	药筒直径 (mm)	μ_{0max} (mm)	μ_{0min} (mm)
37mm高射炮	46.35 ^{+0.15}	46.0 ^{0.5}	1.0	0.35	42.2 ^{+0.15}	42-n.62	0.97	0.20
57mm高射炮	92.4 ^{+0.15}	91.8-0.45	1.20	0.60	86.9 ^{+0.15}	86.5-0.87	1.42	0.40
76.2mm加农炮	99.1 ^{+0.2}	98.7-0.2	0.80	0.40	94.1 ^{+0.2}	93.4-0.87	1.77	0.50
85mm加农炮	102.4 ^{+0.15}	101.7-0.25	1.08	0.70	95.5 ^{+0.15}	94.7-0.87	1.82	0.80

表11-2-3 现有一些枪和弹的初始间隙值

部 位	枪 名	54式7.62手枪	54式7.62冲锋枪	53式7.62重机枪	56式7.62冲锋枪	54式12.7高射机枪	56式14.5高射机枪	比利时FN7.62自动步枪	美M147.62自动步枪
体 下 部	$2\mu_{0max}$ (mm)	0.22	0.19	0.26	0.176	0.23	0.255	0.35	0.252
	δ_{0max} (mm)	0.022	0.019	0.021	0.016	0.011	0.0095	0.029	0.021
	$2\mu_{0min}$ (mm)	0.11	0.08	0.06	0.006	0.04	0.065	0.18	0.08
	δ_{0min} (mm)	0.011	0.008	0.005	0.0005	0.0018	0.0024	0.15	0.007
斜 肩 下 部	$2\mu_{0max}$ (mm)	0.18	0.59	0.255	0.15	0.37	0.29	0.24	0.554
	δ_{0max} (mm)	0.019	0.063	0.022	0.015	0.0194	0.011	0.021	0.048
	$2\mu_{0min}$ (mm)	0.08	0.48	0.074	0.05	0.18	0.10	0.09	0.404
	δ_{0min} (mm)	0.009	0.651	0.006	0.005	0.009	0.004	0.008	0.035
斜 肩 上 部	$2\mu_{0max}$ (mm)	0.24	0.18	0.26	0.44	0.32	0.39	0.43	0.397
	δ_{0max} (mm)	0.028	0.021	0.03	0.051	0.023	0.024	0.05	0.046
	$2\mu_{0min}$ (mm)	0.10	0.03	0.08	0.17	0.03	0.20	0.21	0.177
	δ_{0min} (mm)	0.012	0.004	0.009	0.02	0.002	0.012	0.024	0.02

表11-2-4 几种枪和弹药的弹底间隙值

武器名称	斜面至底面距 离或底缘厚度 (mm)	应闭锁样板 (mm)	出厂不闭 锁样板 (mm)	寿命前不 闭锁样板 (mm)	制造间隙(最 大及最小) (mm)	磨损许可量 (mm)	最大弹底 间隙 (mm)
56式7.62冲锋枪	33-0.2	32.85	32.95	33.15	0.15 - 0.15	0.2	0.35
56式7.62半自动步枪	33-0.2	32.85	32.95	33.15	0.15 - 0.15	0.2	0.35
56式7.62轻机枪	33-0.2	32.85	32.95	33.15	0.15 - 0.15	0.2	0.35
58式7.62轻机枪	1.63-0.13	1.625	1.676	1.828	0.176 - 0.005	0.152	0.328
57式7.62重机枪	1.63-0.13	1.625	1.676	1.828	0.176 - 0.005	0.152	0.328
54式12.7高射机枪	92.6-0.3	91.92	92.04	92.34	0.26 - 0.68	0.3	0.56
56式14.5高射机枪	99.3-0.2	99.15	99.3		0.2 - 0.15		

枪械，则公盈较大，甚至在整个使用期间保持一定的公盈。斜肩定位的枪弹，当推弹突笋以较大的速度将它推进弹膛后，枪机到位停止运动，而枪弹因惯性继续向前运动，药筒被压缩，长度略微减短，使闭锁间隙增加。这就有可能在发射时产生瞎火或断壳。为避免发生这种故障，故将弹底间隙取为公盈。另一方面，这也可以缓冲枪机复进到位的冲击。

对于采用刚性拉壳钩的枪械（如56式14.5高射机枪），在枪机停止运动后，弹壳借惯性向前冲时，底缘有可能被拉弯。为了解决这个问题，在设计闭锁机构时，常用压缩弹壳的办法，即将弹膛尺寸缩短，每次推弹入膛时，使弹壳产生压缩量。这样就保证了枪弹底平面紧贴在枪机弹底窝平面上，以防止发射时弹壳横断、拉弯底缘和瞎火等故障。此外，还能缓冲枪机到位的撞击。

火炮药筒的弹底间隙值，一般为 $0.05\sim 0.5\text{mm}$ 。几种枪和弹的弹底间隙值见表11-2-4。

第三节 抽壳理论

抽壳理论是描述射击过程中药筒与膛壁间形成最终间隙过程的理论。影响最终间隙的因素很多，如初始间隙，药筒材料、尺寸和机械性能，弹膛的结构尺寸和机械性能，火药气体压力，膛内温度等等。哪一个是主要因素，应如何来考虑最终间隙的形成过程呢，曾经有过许多种抽壳理论，从不同的角度出发来建立最终间隙形成的物理模型。有的是从药筒和弹膛的切向变形出发来建立模型的，也有的从药筒壁和弹膛壁的振动出发来建立模型。现在采用的是前一种模型。

一、射击过程中药筒的移动和变形

射击时根据火药气体压力的变化情况，可将药筒的移动和变形分为以下四个阶段来研究：

第一阶段 从药筒开始膨胀到与膛壁接触为止。

在这时期一开始, 火药气体压力迅速增加, 药筒与弹头(丸)同受火药气体压力的作用, 同时分别向前和向后移动, 消除弹底间隙, 同时药筒特别是口部产生径向膨胀, 引起切向变形。药筒口部的径向膨胀会使它与弹丸之间出现缝隙, 这样火药气体就会从缝隙中溢出, 冲入到药筒外壁与膛壁之间, 有时甚至到达斜肩处。这可由药筒口部被熏黑来证实。熏黑的长短是与药筒的结构尺寸(口部壁厚、机械性能等)和火药的燃速等有关的。

随着火药气体压力的升高, 药筒的膨胀量也增大, 以致使初始间隙消失, 药筒壁与膛壁接触。与此同时, 闭锁构件也开始产生压缩变形, 药筒也沿轴向移动和伸长。因为药筒的机械性能和尺寸(壁厚与直径)沿长度是变化的, 所以各部位与膛壁接触的先后就不同, 一般是斜肩或筒口先贴膛。

药筒壁在弹性变形范围内所能承受的最大火药气体压力可近似地用下式计算:

$$p = \frac{2t}{d_0} \sigma_s$$

式中 p ——药筒壁在弹性变形范围内所能承受的最大火药气体压力;

t ——所研究断面处药筒的壁厚;

d_0 ——所研究断面处药筒的内径;

σ_s ——所研究断面处药筒材料的弹性极限。

以 56 式 7.62 枪弹的钢弹壳为例, 它的口部 $t_k = 0.29 \text{ mm}$, $\sigma_{sk} = 441 \text{ MPa}$, $d_{k0} = 7.8 \text{ mm}$, 则

$$p = \frac{2t_k}{d_{k0}} \sigma_{sk} = 32.7 \text{ MPa}$$

即在膛压大于 32.7 MPa 时, 口部即开始产生塑性变形。

又如 100 mm 口径炮弹钢药筒, 其筒口处 $t_k = 1.4 \text{ mm}$, $d_{k0} = 102.5 \text{ mm}$, $\sigma_{sk} = 417 \text{ MPa}$, 则

$$p = \frac{2t_k}{d_{k0}} \sigma_{sk} = 11.4 \text{ MPa}$$

即在膛压大于 11.4 MPa 时, 该药筒的口部即开始产生塑性

变形。

药筒的弹性相对切向变形量 ε_{e1} 和弹性径向位移量 u_e 可用下式求出,

$$\varepsilon_{e1} = \frac{\sigma_e}{E_1}$$

$$u_e = \frac{\sigma_e d}{2E_1}$$

式中 d ——所研究断面药筒的外径;

E_1 ——药筒材料的弹性模量。

以 56 式 7.62 枪弹的钢弹壳为例, $E_1 = 216 \text{ GPa}$, 口部 $d_k = 8.4 \text{ mm}$, $\sigma_{ek} = 441 \text{ MPa}$, 体下部 $d_t = 11.35 \text{ mm}$, $\sigma_{et} = 540 \text{ MPa}$, 则

$$\text{口部弹性径向位移量 } u_{ek} = \frac{\sigma_{ek} d_k}{2E_1} = 0.0086 \text{ mm}$$

$$\text{体下部弹性径向位移量 } u_{et} = \frac{\sigma_{et} d_t}{2E_1} = 0.0141 \text{ mm}$$

实际上它的口部间隙为 $0.085 \sim 0.22 \text{ mm}$, 体下部间隙为 $0.003 \sim 0.088 \text{ mm}$ 。由计算结果可以看出, 弹壳口部在贴膛以前已开始产生塑性变形, 从而使材料产生强化。

膛内高温火药气体对药筒壁加热, 使药筒产生温度变形。

第二阶段 从药筒壁与膛壁接触到最大膛压

在该阶段中, 药筒与膛壁一起产生径向变形, 药筒大部分部位产生塑性变形, 弹膛仅为弹性变形。与此同时, 在药筒壁紧贴弹膛壁的情况下, 作用在药筒底部的火药气体压力, 使药筒随闭锁构件的继续压缩而继续产生纵向拉伸。与此同时, 药筒与膛壁、药体紧密接触, 在火药气体压力作用下, 产生压缩变形; 底火室内也受火药气体作用, 使底部处于复杂应力状态。火药气体继续对药筒壁加热, 药筒和弹膛温度都不断提高, 继续产生热变形。

在这个阶段末, 药筒的变形量达到最大值。这时如果切向变形超过允许值, 则药筒产生纵裂; 如果轴向变形超过允许值, 则药筒产生横裂甚至横断。

第三阶段 从最大膛压到膛内压力降至大气压力

膛压开始下降后，弹膛产生弹性恢复，恢复到它的初始位置。药筒也产生弹性恢复，但它不能恢复到原来的位置。这时药筒与弹膛间可能产生间隙，也可能产生公盈。此时药筒与弹膛仍处于热变形中。

随着膛压下降，药筒也沿轴向作弹性恢复。如果药筒的弹性恢复量比药体的小，则药体不能自由地恢复原位，药体将压药筒向前，使药筒楔紧在膛内，影响抽壳。另外，药筒温度一般比弹膛高，它的热变形不利于抽壳。

第四阶段 从膛内压力降到大气压起到抽壳完毕

在单发射击时，膛壁温度一般低于药筒温度，这时药筒向膛壁传递热量，温度下降，产生恢复变形（冷缩）。对于自动武器来说，若是在有一定压力下抽壳，就没有第四阶段。自动武器的射速高，膛壁温度也高，不利于药筒冷却。

二、几种抽壳理论

为了计算射击后药筒与弹膛间的最终间隙，需建立药筒与膛壁间形成最终间隙的物理模型——抽壳理论。下面介绍几种主要的抽壳理论。

1. 马秋宁理论

马秋宁认为在射击后药筒的弹性恢复变形大于弹膛内壁的变形，这个变形差就得到了最终间隙。用公式表示则为

$$\delta_1 = \frac{\sigma_{s1}}{E_1} - \varepsilon_k \quad (11-3-1)$$

式中 δ_1 ——相对最终间隙；

σ_{s1} ——药筒材料的弹性极限；

E_1 ——药筒材料的弹性模量；

ε_k ——弹膛内表面的切向变形，

$$\varepsilon_k = \frac{2}{3} \times \frac{p_1}{E_2} \times \frac{2R_2^2 + R_1^2}{R_2^2 - R_1^2}$$

p_1 ——弹膛内表面的压力，

R_1, R_2 ——弹膛内、外半径;

E_2 ——弹膛材料的弹性模量。

可以看出, 马秋宁没有考虑材料的强化, 即将药筒材料视为理想塑性体。

形成的最终间隙有三种情况, 即,

$$\delta_1 > 0$$

$$\delta_1 = 0$$

$$\delta_1 < 0$$

由(11-3-1)式可知, 只有当 $\frac{\sigma_{s1}}{E_2} > \varepsilon_k$ 时才能形成正的最终间隙。

下面用图解来说明马秋宁理论 (图 11-3-1)。

图 11-3-1 中纵坐标表示应力, 横坐标表示切向应变。I-I 为射击前药筒外壁的位置,

I'-I' 为发射前弹膛内壁的位置, 二者之间有初始间隙 δ_0 。射击时药筒先产生弹性变形, 而后产生塑性变形, 变形到 I-I 位置时就与弹膛相贴, 然后一起变形达到膨胀的极限位置 I'-I'。膛压下降后, 弹膛壁按加载线 AB 恢复到原始位置 I-I。药筒在卸载后不能按加载线

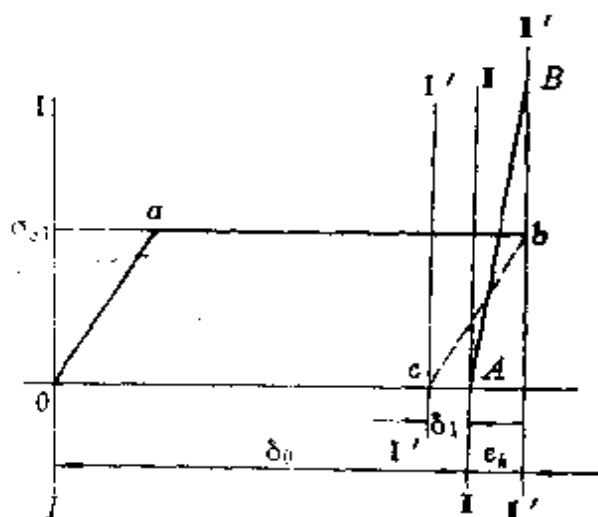


图 11-3-1 马秋宁理论图解表示

0ab 恢复, 而是沿与加载线 0a 相平行的 bc 线恢复, 变形结束后形成最终间隙 δ_1 。当 c 点位于 A 点以左则最终间隙为正值, 当 c 点位于 A 点右边则最终间隙为负值, 即出现“卡壳”。

用图解可明显看出药筒口部形成负间隙, 下部形成正间隙。其原因是二处材料的弹性极限不同和卸载后弹性恢复量不同 (图 11-3-2)。图中 0a'bc' 为药筒口部的变形线, 0a'b'c' 为筒体下部的变形线, AB 为弹膛壁的变形线。

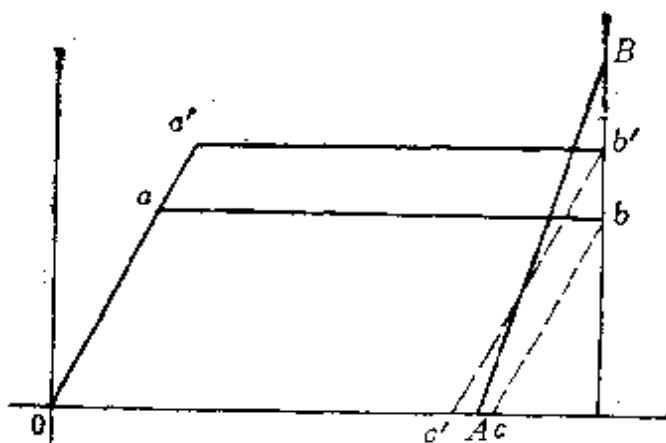


图11-3-2 筒口和筒体下部
变形图解

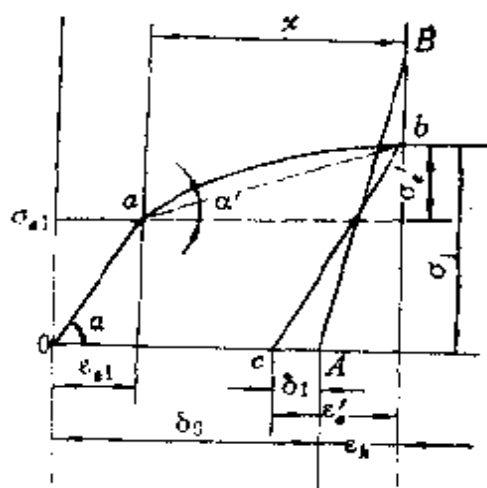


图11-3-3 格拉基林理论的
图解表示

马秋宁理论没有考虑材料的强化、温度变形和变形速度等许多重要因素的影响，所以计算结果与试验结果有较大的出入。

2. 格拉基林理论

格拉基林理论的特点是考虑了材料的强化，这样药筒和弹膛壁的变形关系如图 11-3-3 所示。

发射时药筒壁内的应力起初在弹性区内变化，当应力超过 σ_{s1} 后药筒即发生塑性变形，同时材料产生强化，应力沿曲线 ab 变化。膛压下降时，药筒壁内的切向应力沿直线 bc 变化。

在实际计算中，为了简便，经常用直线 ab 代替曲线 ab ， $E'_1 = \tan \alpha'$ 称为药筒材料的强化模数。

由图 11-3-3 可以看出，为了计算最终间隙，需知道弹膛壁的变形 ε_k 和药筒的弹性恢复变形 ε'_e ，即：

$$\delta_1 = \varepsilon'_e - \varepsilon_k$$

其中

$$\varepsilon'_e = \frac{\sigma_1}{E_1}$$

而

$$\sigma_1 = \sigma_{s1} + \sigma'_e = \sigma_{s1} + (\delta_0 + \varepsilon_k - \varepsilon_{s1})E'_1$$

所以

$$\varepsilon'_e = \frac{\sigma_{e1}}{E_1} + (\delta_0 + \varepsilon_k - \varepsilon_{e1}) \cdot \frac{E'_1}{E_1}$$

取

$$n = \frac{E'_1}{E_1}$$

$$x = \delta_0 + \varepsilon_k - \varepsilon_{e1}$$

则

$$\varepsilon'_e = \frac{\sigma_{e1}}{E_1} + nx$$

最后

$$\delta_1 = \left(\frac{\sigma_{e1}}{E_1} - \varepsilon_k \right) + nx$$

式中 ε'_e ——卸载后药筒的切向弹性恢复变形；

σ_{e1} ——膨胀到极限位置时，药筒壁内的切向应力；

σ'_e ——药筒因塑性变形强化而引起的应力增量；

x ——药筒的塑性变形量。

对于变形的某一截面来说 $\frac{\sigma_{e1}}{E_1}$ 和 ε_k 均为常数，故最终间隙是 nx 的函数。又知 x 是 δ_0 的函数，所以最终间隙是初始间隙的函数。

根据材料试验可求出 $n = f(x)$ 的关系图表。

因为药筒各部位的机械性能不同，所以在具体计算最终间隙时应分段进行。

3. 普罗托波波夫原理

普罗托波波夫原理除了考虑材料的强化外，还考虑了温度对形成最终间隙的影响（图 11-3-4）。

设 0-0 为药筒外壁的初始位置（图 11-3-4），A-A 为弹膛内壁的初始位置，B-B 为最大膛压时药筒和弹膛壁的位置。

在膛压上升过程中，药筒在火药气体压力作用下开始径向膨胀，药筒壁的应力-应变关系按曲线 $0ab$ 变化。在塑性变形过程中材料产生强化。当药筒变形到 A-A 位置，药筒与弹膛接触，然后与弹膛一起变形到 B-B 位置。在此过程中弹膛壁内的应力-应

变关系沿 hi 线变化。

在膛压下降过程中, 如果不考虑热变形, 则弹膛将沿 ih 线向 $A-A$ 位置恢复, 药筒则应沿 bc 线进行弹性恢复。但这时药筒还受火药气体加热产生热膨胀,

故药筒将沿 bc' 曲线进行恢复。当膛压降至大气压时, 药筒到达 c' 点, 此时弹膛壁的应力相当于 k 点应力的值。以后弹膛继续恢复, 压缩药筒, 使其先产生弹性压缩 (沿 $c'd$ 线), 进而产生塑性压缩 (沿 de 线), 到达 e 点 (实际是 e' 点)。这时如进行抽壳, 则因药筒被弹膛紧箍 (以过盈量 $c'h$ 表示), 所以抽壳力较大; 如果药筒温度下降, 而产生收缩量 ϵ_t , 当 $\epsilon_t > c'h$ 时就形成最终间隙 δ_1 , 反之就将产生过盈量。亦即

$$\delta_1 = \epsilon_t - \frac{\sigma_{e1}}{E_1}$$

为了研究各种不同因素对最终间隙的影响, 普罗托波波夫曾作了一系列试验。下面是他的三组试验的结果, 这三组试验是静压试验、射击试验和隔热试验。

试验是采用口径为 20 mm 的铜药筒, 用同一批产品, 尺寸和机械性能尽量选取一致, 药筒形状几乎为圆柱形。

(1) 静压试验 取 12 发药筒, 其壁厚为 0.7 mm, 将其装入钢模内作静压试验 (在 20°C 条件下), 初始间隙为 0.58 mm (图 11-3-5)。

测量加压前后药筒的直径, 求出差值 (测量误差不超过 1 μm), 其结果见图 11-3-6。

由图 11-3-6 中可以看出, 最终间隙随压力 (静压) 的增加逐渐减小, 当压力大于 235 MPa 后, 最终间隙由正值变为负值。

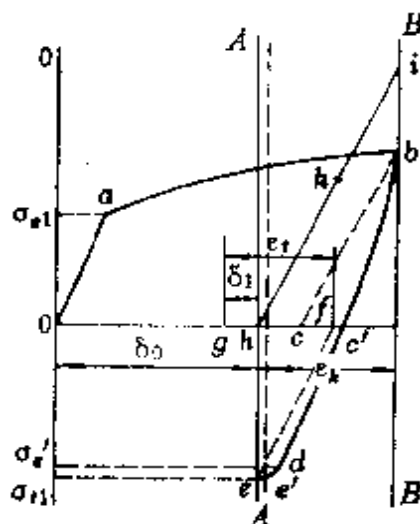


图11-3-4 普罗托波波夫原理的图解表示

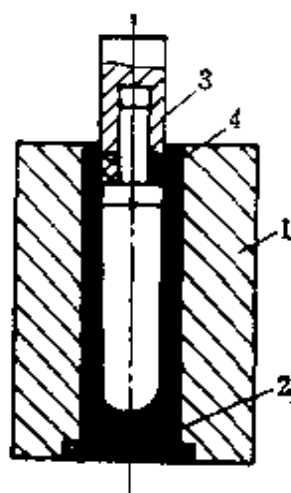


图11-3-5 药筒静压试验装置

1—钢模；2—药筒；3—活塞；4—密封环。

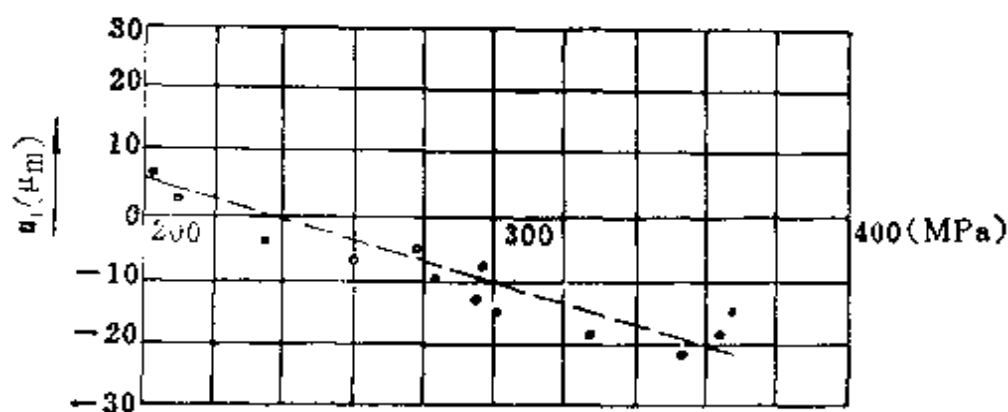


图11-3-6 静压试验结果

(2) 射击试验 为了减小轴向应力的影响，采用刚性固定措施，所用药筒及弹膛尺寸与静压试验时的相同，并在同一断面上测量，测量结果见图 11-3-7 中“×”号者。

由图 11-3-7 中可以看出，射击时（动载荷）的最终间隙比静载荷（见图 11-3-6）时所获得的最终间隙要大很多。这是由于材料在承受动载荷时的应力-应变曲线比静载荷时的高，另外还有温度的影响。

(3) 隔热试验 在药筒内表面贴上一层厚纸，这层厚纸在射击时来不及烧尽，可起隔热的作用。试验条件和测量情况与射击试验时的相同。其结果见图 11-3-7 中“△”号者。

由图中可以看出，射击时受高温加热的药筒在冷却时所产生的

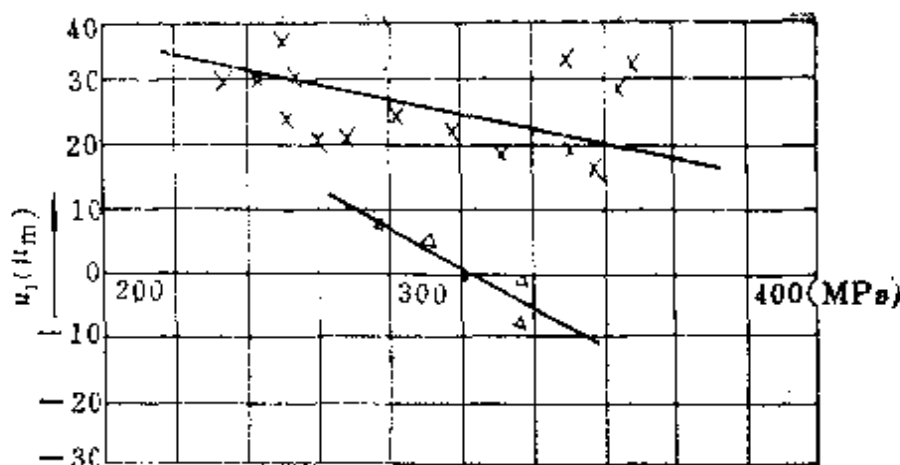


图11-3-7 射击和隔热试验结果

的冷缩变形能使最终间隙增大。

普罗托波波夫还研究了射击时药筒壁内的温度分布情况。图 11-3-8 表示药筒壁厚不同时，温度与时间的关系曲线。横坐标为由火药点燃时算起的时间，纵坐标为药筒外表面的温度。由图中可以看出，药筒壁越薄，加热温度也越高。

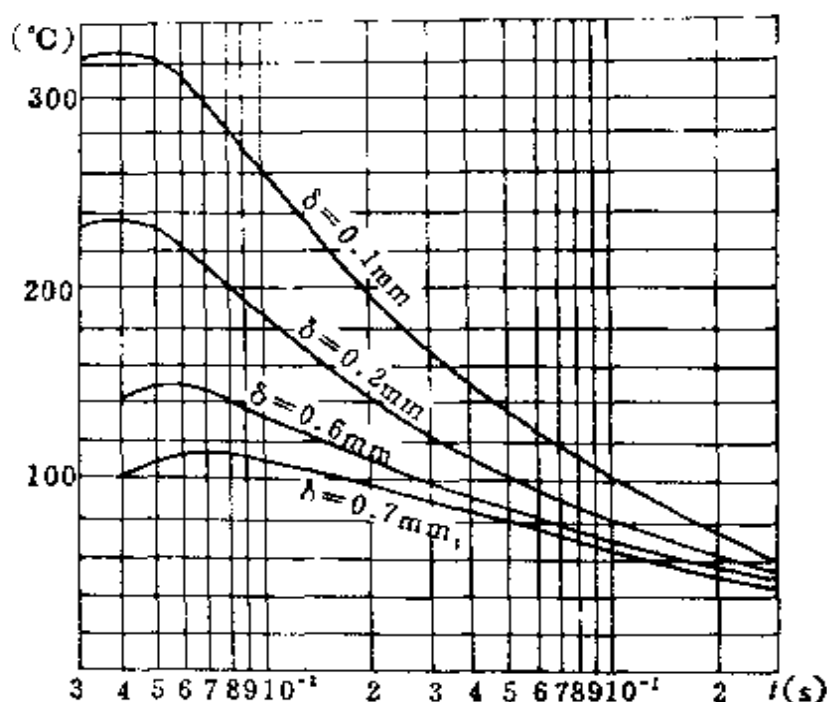


图11-3-8 药筒壁内温度分布情况

利用图 11-3-8 ($t = 6 \times 10^{-2} s$) 作出了一条温度与药筒壁厚间的关系曲线 (图 11-3-9)。

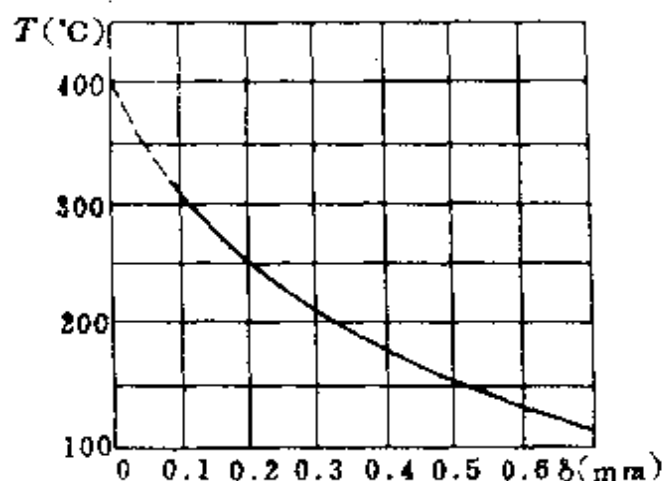


图11-3-9 温度与药筒壁厚的关系曲线

第四节 最终间隙计算

从理论上准确地计算最终间隙，目前还有较大的困难。因为药筒的变形情况复杂，它是变强度、不等截面、带底的锥形壳体，受冲击变载荷的作用，有高温的影响，是一个冲击变载荷作用下有温度影响的复杂弹塑性动力学问题。

在抽壳理论一节中曾提到了一些计算最终间隙的公式，它们的共同缺点是不便于直接用来计算。下面介绍实用的计算最终间隙的方法。

一、第一种计算方法

前提条件

- (1) 不考虑药筒的锥度；
- (2) 认为药筒材料完全进入塑性状态；
- (3) 药筒与膛壁接触时，其内表面受火药气体压力，外表面受膛壁的反作用力；
- (4) 药筒没与膛壁接触前，药筒的轴向变形仅仅是切向变形所引起的；
- (5) 药筒壁与膛壁接触后，它们之间不产生相对的轴向移动，轴向变形可忽略。

从抽壳理论知道, 相对最终间隙应等于

$$\delta_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon_k$$

式中 ε_1 ——膛压下降后药筒外壁的弹性恢复变形,

ε_k ——膛压下降后弹膛内壁的弹性恢复变形。

ε_1 可用广义虎克定律求出, 即

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} [\sigma_r - \mu(\sigma_r + \sigma_z)]$$

所以

$$\delta_1 = \frac{1}{E_1} [\sigma_r - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] - \varepsilon_k \quad (11-4-1)$$

根据平衡方程和塑性区的应力应变关系等, 可求出三向应力 σ_r 、 σ_t 、 σ_z 值, 从而求出最终间隙。

自药筒壁上取一个单元体(图11-4-1), 向径向投影, 取 $\sin \frac{d\varphi}{2} \approx d\varphi$, 略去高阶项, 最后可得:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0 \quad (11-4-2)$$

由塑性力学中知下列关系:

$$\sigma_z - \sigma_r = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_z - \varepsilon_r) \quad (11-4-3)$$

$$\sigma_r - \sigma_t = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (11-4-4)$$

为从上述三式中解出 σ_r 、 σ_t 和 σ_z , 必先求出 ε_r 、 ε_t 、 ε_z 以及 σ_i 和 ε_i 。下面建立几何方程来求变形:

$$\varepsilon_r = \frac{w}{r} \quad (11-4-5)$$

$$\varepsilon_r = \frac{dw}{dr} \quad (11-4-6)$$

对圆管来说, 轴向变形沿管子长度不变并与半径无关, 即

$$\varepsilon_z = \text{常数}$$

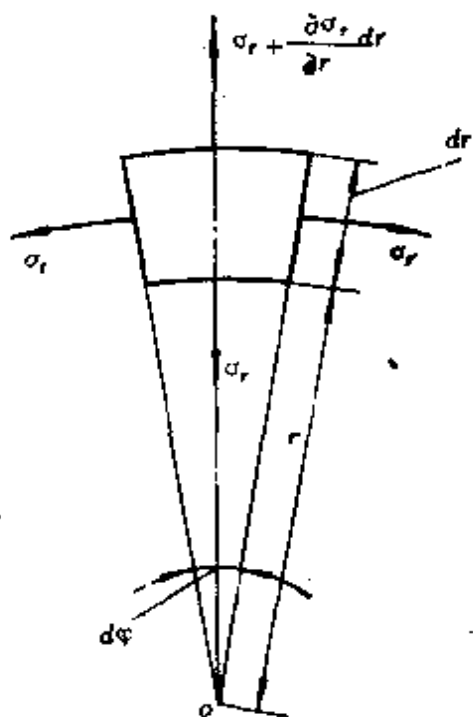


图11-4-1 药筒壁上的单元体

对药筒来说

$$w = u_0 + \Delta R$$

所以

$$\varepsilon_r = \frac{u_0 + \Delta R}{r} \quad (11-4-7)$$

式中 u_0 ——初始间隙(mm);

ΔR ——在火药气体压力作用下, 膛壁内表面的径向移动量(mm);

r ——所研究截面药筒的半径(mm)。

由前提条件(4)和(5)知, 药筒的轴向变形仅取决于未与弹膛接触前药筒的切向变形。药筒未与膛壁接触前的径向位移为 u_0 , 故切向变形应取:

$$\varepsilon_t = -\frac{u_0}{r} \quad (11-4-8)$$

于是轴向变形为

$$\varepsilon_z = -\frac{u_0(a\mu + b\mu')}{r} \quad (11-4-9)$$

式中 a ——贴膛前径向位移中的弹性部分, $a = \frac{\sigma_{s1} r_1}{E_1 u_0}$,

r_1 ——药筒外径;

b ——贴膛前径向位移中的塑性部分, $b = 1 - a$,

μ ——弹性变形的泊松系数;

μ' ——塑性变形的泊松系数。

取

$$a\mu + b\mu' = \nu \quad (11-4-10)$$

所以

$$\varepsilon_z = -\nu \frac{u_0}{r} \quad (11-4-11)$$

由体积不变定律有

$$\varepsilon_t + \varepsilon_r + \varepsilon_z = 0$$

则

$$\varepsilon_r = -\varepsilon_t - \varepsilon_z = \frac{u_0(1 - \nu) + \Delta R}{r} \quad (11-4-12)$$

应力强度 σ_i 与应变强度 ε_i 之间的关系可用简单拉伸时的应力应变关系(真实应力图)来描述(图11-2-1)。由图中可以看出, 曲线上任意点 b 处的应力应等于:

$$\sigma = \sigma_{e1} + (\varepsilon - \varepsilon_{e1}) \operatorname{tg} \beta$$

通过变换后可得:

$$\sigma = E_1 \varepsilon \left[1 - \lambda \left(1 - \frac{\varepsilon_{e1}}{\varepsilon} \right) \right]$$

式中 $\lambda = \frac{E_1 - E'_1}{E_1},$

$$E'_1 = \operatorname{tg} \beta.$$

这就得到塑性变形范围内应力强度与应变强度之间的关系:

$$\sigma_i = E_1 \varepsilon_i \left[1 - \lambda \left(1 - \frac{\varepsilon_{e1}}{\varepsilon_i} \right) \right] \quad (11-4-13)$$

由塑性力学知道应变强度等于:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_r - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2}$$

将(11-4-7)、(11-4-11)和(11-4-12)式代入则得:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\frac{6(u_0^2(v^2 - v + 1) + u_0 \Delta R(2 - v) + \Delta R^2)}{r^2}}$$

令

$$A = u_0^2(v^2 - v + 1) + u_0 \Delta R(2 - v) + \Delta R^2$$

则

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{12}{9} \times \frac{A}{r^2}}$$

令

$$B = \sqrt{\frac{12}{9} A}$$

最后

$$\varepsilon_i = \frac{B}{r} \quad (11-4-14)$$

将 ε_i 代入(11-4-13)式就可求出 σ_i 。

根据已求得的 ε_r 、 ε_θ 、 ε_z 和 ε_i 、 σ_i , 把它们代入式(11-4-2),

(11-4-3)和(11-4-4)中联立求解,便可求出 σ_r 、 σ_t 和 σ_z 。从式(11-4-3)和(11-4-4)中可得出:

$$\sigma_r - \sigma_t = -\frac{2\sigma_z}{3\varepsilon_t} \times \frac{u_0(1+\nu)+\Delta R}{r} \quad (11-4-15)$$

$$\sigma_r - \sigma_t = -\frac{2\sigma_z}{3\varepsilon_t} \times \frac{u_0(2-\nu)+2\Delta R}{r} \quad (11-4-16)$$

把 σ_z 和 ε_t 值代入(11-4-16)式得:

$$\begin{aligned} \sigma_r - \sigma_t = & -\left[\frac{2}{3} E_1(1-\lambda) + \frac{2}{3} \times \frac{\sigma_{e1}\lambda r}{B} \right] \\ & \times \left[\frac{u_0(2-\nu)+2\Delta R}{r} \right] \end{aligned}$$

令 $u_0(2-\nu)+2\Delta R=C$, 则

$$\sigma_r - \sigma_t = -\frac{2E_1C}{3r}(1-\lambda) - \frac{2}{3} \times \frac{\sigma_{e1}\lambda C}{B} \quad (11-4-17)$$

从(11-4-2)式可得:

$$d\sigma_r = -(\sigma_r - \sigma_t) \frac{dr}{r}$$

把(11-4-17)式代入上式得:

$$d\sigma_r = \frac{2E_1C}{3} (1-\lambda) \frac{dr}{r^2} + \frac{2}{3} \times \frac{\sigma_{e1}\lambda C}{B} \times \frac{dr}{r}$$

对上式积分,积分限为:当 $r=r_0$ 时, $\sigma_r=-p$;当 $r=r$ 时, $\sigma_r=\sigma_r$ 。则得

$$\sigma_r = -p + \frac{2E_1C}{3} (1-\lambda) \left(\frac{r-r_0}{rr_0} \right) + \frac{2}{3} \times \frac{\sigma_{e1}\lambda C}{B} \ln \frac{r}{r_0} \quad (11-4-18)$$

σ_r 值由内壁向外壁逐渐减小,壁厚不大,内外表面的应力值相差不大,可近似认为

$$\sigma_r = -p = \text{常数} \quad (11-4-19)$$

将 $\sigma_r = -p$ 代入(11-4-17)式可解出 σ_t :

$$\sigma_t = -p + \frac{2E_1C}{3r}(1-\lambda) + \frac{2}{3} \times \frac{\sigma_{e1}\lambda C}{B}$$

药筒的内外径相差不大,可近似认为 σ_t 沿整个壁厚相等,将 $r=$

r_1 代入可得:

$$\sigma_r = -p + \frac{3E_1 C}{3r_1} (1 - \lambda) + \frac{2}{3} \times \frac{\sigma_{e1} \lambda C}{B} \quad (11-4-20)$$

根据(11-4-15)式可求出轴向应力 σ_z :

$$\sigma_z = \sigma_r - \frac{2\sigma_r}{3\varepsilon_r} \times \frac{u_0(1 + \nu) + \Delta R}{r}$$

令 $u_0(1 + \nu) + \Delta R = d$, 则

$$\sigma_z = \sigma_r - \frac{2\sigma_r}{3\varepsilon_r} \times \frac{d}{r}$$

将 σ_r 和 ε_r 值代入上式得:

$$\sigma_z = \sigma_r - \frac{2}{3} \times \frac{E_1 d}{r} (1 - \lambda) - \frac{2}{3} \times \frac{\sigma_{e1} \lambda d}{B}$$

将 σ_r 代入, 最后得

$$\sigma_z = -p + \frac{2E_1(1 - \lambda)}{3r_1} (C - d) + \frac{2\sigma_{e1}\lambda}{3B} (C - d) \quad (11-4-21)$$

将 σ_r 、 σ_r 和 σ_z 值代入(11-4-1)式, 得最终间隙的表达式为

$$\begin{aligned} \delta_1 = & \frac{1}{E_1} \left\{ p(2\mu - 1) + \frac{2}{3} [C(1 - \mu) + \mu d] \right. \\ & \times \left[\frac{E_1(1 - \lambda)}{r_1} + \frac{\sigma_{e1}\lambda}{B} \right] \left. \right\} - \varepsilon_k \end{aligned} \quad (11-4-22)$$

若考虑变形速度对最终间隙的影响, 只须将弹性极限提高 K_v 倍, k_v 是考虑变形速度的速度系数。所以

$$\begin{aligned} \delta_1 = & \frac{1}{E_1} \left\{ p(2\mu - 1) + \frac{2}{3} [C(1 - \mu) + \mu d] \right. \\ & \times \left[\frac{E_1(1 - \lambda)}{r_1} + \frac{K_v \sigma_{e1} \lambda}{B} \right] \left. \right\} - \varepsilon_k \end{aligned} \quad (11-4-23)$$

在通常情况下 K_v 可取 1.15。

下面讨论温度的影响。

在受热时药筒内外表面的温度是不同的。为讨论方便, 用平均温度来考虑它的温度变形, 误差不会太大。

在讨论时我们认为药筒总的径向位移不超过 $u_0 + \Delta R$, 即 $\varepsilon_{e1} +$

$\varepsilon_{rp} + \varepsilon_{r1} = \varepsilon_{rp} + \varepsilon_{r0}$ 。热变形 ε_T 减小了塑性变形 ε_{rp} ，不影响 ε_{r1} 。药筒整个温度变形可以分为四个时期来讨论。

初期 即由火药点燃到火药气体压力达到最大。药筒的平均温度在此期间是增长的，这样药筒壁因火药气体压力而产生的切向变形和因加热产生的温度变形，方向是一致的。

在此期间，由温度变形而产生的变形应等于：

$$(\delta_r)_1 = \alpha (\Delta T)_1$$

式中 α 为药筒材料的线膨胀系数，对于黄铜 $\alpha = 1.84 \times 10^{-5} (1/^\circ\text{C})$ ，对于钢 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} (1/^\circ\text{C})$ 。 $(\Delta T)_1$ 为在这一时期中药筒增加的温度，

$$(\Delta T)_1 = T_1 - T_0$$

式中 T_0 ——射击前药筒的温度；

T_1 ——最大膛压时药筒的温度。

此时期药筒热变形的方向和火药气体使药筒产生膨胀变形的方向一致，故热变形减小了弹塑性变形之和。

第二时期 从最大膛压到药筒温度达到最大值。由于最高温度滞后于最大膛压，这样在膛压刚开始下降时药筒仍继续加热，药筒仍产生温度变形，它与药筒壁恢复变形的方向相反，变形很复杂。

此时增加的温度为

$$(\Delta T)_2 = T_m - T_1$$

式中 T_m ——药筒壁的最高平均温度。

加热产生的变形为

$$(\delta_r)_2 = \alpha (\Delta T)_2$$

第三时期 从最高温度到膛压完全下降。在此期间，药筒壁的温度开始下降，变形也减小。温度下降为

$$(\Delta T)_3 = T_m - T_3$$

温度产生的变形为

$$(\delta_r)_3 = \alpha (\Delta T)_3$$

第四时期 从膛压完全下降到开始退壳，药筒温度继续降低。

此时期的温度下降为

$$(\Delta T)_4 = T_3 - T_4$$

式中 T_4 ——抽壳时的温度。

温度产生的变形为

$$(\delta_r)_4 = \alpha (\Delta T)_4$$

我们认为使最终间隙减小的变形为负，使最终间隙增加的变形为正。因此加热时药筒的变形为负，冷却时药筒的恢复变形为正。

在四个时期中药筒总的温度变形等于：

$$(\delta_r)' = (\delta_r)_1 + (\delta_r)_2 + (\delta_r)_3 + (\delta_r)_4$$

其中 $(\delta_r)_1$ 和 $(\delta_r)_2$ 为负值。

实际影响最终间隙的温度变形为

$$\delta_r = (\delta_r)' - (\delta_r)_1 = -\alpha (T_4 - T_1)$$

将 δ_r 代入(11-4-23)式，得出求最终间隙的最后公式：

$$\begin{aligned} \delta_1 = & \frac{1}{E_1} \left\{ p(2\mu - 1) + \frac{2}{3} [C(1 - \mu) + \mu d] \right. \\ & \times \left[\frac{E_1(1 - \lambda)}{r_1} + \frac{K_p \sigma_p \lambda}{B} \right] \left. \right\} - \alpha (T_4 - T_1) - \varepsilon_k \end{aligned} \quad (11-4-24)$$

这种计算方法没有考虑筒底的影响。下面再介绍一种计算方法，考虑了靠近筒底处变形的一些特点。该方法将药筒材料作为理想塑性体处理，在相对变形量较小时，是可取的，这样可以简化计算。

二、第二种计算方法

前提条件

- (1) 不考虑药筒的锥度；
- (2) 药筒的变形量较小，将药筒材料视为理想塑性体；
- (3) 药筒壁与弹膛壁接触后，其内表面受火药气体压力，外表面受膛壁反作用力的作用；

(4) 近底部药筒的轴向应力是由筒壁内应力和筒壁外表面的摩擦力所引起。

与第一种计算方法相同, 药筒的最终间隙可用下式求出:

$$\delta_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon_k$$

若考虑温度的影响, 则

$$\delta_1 = \varepsilon_1 + \alpha (T_1 - T_c) - \varepsilon_k$$

根据广义虎克定律

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} [\sigma_r - \mu (\sigma_r + \sigma_z)]$$

所以

$$\delta_1 = \frac{\sigma_r}{E_1} - \frac{\mu}{E_1} (\sigma_r + \sigma_z) + \alpha (T_1 - T_c) - \varepsilon_k \quad (11-4-25)$$

射击时药筒的受力情况各部分是不同的。由于筒底的影响, 射击时近筒底处所受的轴向应力与筒体处不同(图11-4-2)。近筒底处受筒底的牵制作用, 切向变形减小, 与弹膛间的作用力也较低, 该处的轴向应力主要是由筒底的火药气体压力及筒壁与膛壁间的摩擦力引起的。距筒底较远部分, 受筒底的影响较小, 可按照一般的圆管变形来考虑。下面分别求近筒底处和距筒底较远部位所受的三向应力 σ_r 、 σ_r 和 σ_z 。求得的三向应力代入(11-4-25)式, 即可求出该部位的最终间隙。

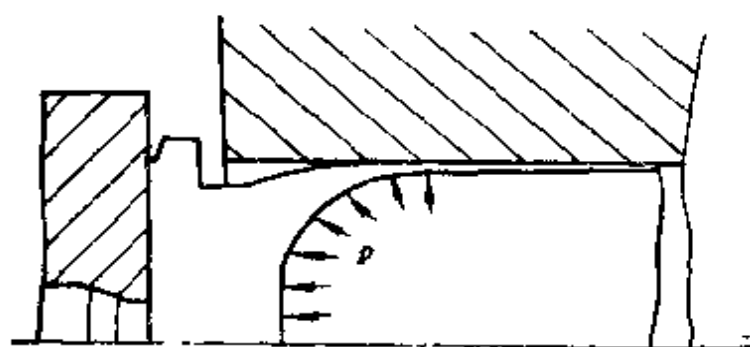


图11-4-2 药筒底部附近的变形

1. 近筒底处的三向应力

径向应力 σ_r 由抽壳理论的讨论中可以看出, 当火药气体压力达到最大值时, 药筒材料已完全进入塑性变形, 弹膛为弹性变

形。为求药筒壁内的径向应力，可将药筒与弹膛统一视为一厚壁筒，在内压（火药气体压力）作用下产生变形。厚壁筒首先为弹性变形，然后内表面产生塑性变形，随着变形的增加，塑性区逐渐扩大。当压力达到 p_m （最大膛压）时，它的塑性区已经扩大到 r_1 （药筒的外半径），现求此极限应力（图11-4-3）。

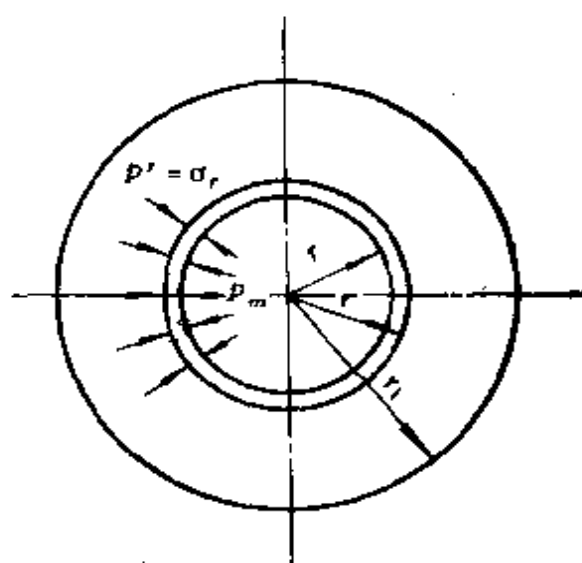


图11-4-3 药筒与膛壁间的作用力

为计算简便，现认为它的轴向变形为零。平面变形的平衡方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} = 0$$

米塞斯的屈服条件为

$$\sigma_t - \sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s1} \quad (11-4-26)$$

将屈服条件代入平衡方程则得

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{\sigma_{s1}}{r} = 0$$

即

$$d\sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s1} \frac{dr}{r}$$

积分上式，并将边界条件： $r = r_0$ 时， $\sigma_r = -p_m$ ； $r = r_1$ 时， $\sigma_r = -p'$ 代入，则得

$$-p' + p_m = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s1} \ln \frac{r_1}{r_0}$$

即

$$\sigma_r = -p' = -\left(p_m - \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s1} \ln \frac{r_1}{r_0}\right)$$

令 $p_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s1} \ln \frac{r_1}{r_0}$ ，则

$$\sigma_r = -p' = -(p_m - p_T) \quad (11-4-27)$$

考虑到变形速度的影响, 最后得

$$p_T = 1.15 K_s \sigma_{sj} \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (11-4-28)$$

轴向应力 σ_z 在近筒底附近取一微环 i (图11-4-4), 它的外表面受摩擦力 Δp_{Tpi} 的作用。认为药筒材料为理想塑性体, 筒底内表面受火药气体压力的作用, 则壁内受应力 σ_{epi} 。壁内所受的总力

$$Q_0 = \pi d_{0pi} t_0 \sigma_{epi}$$

式中 t_0 ——微环 i 的平均壁厚;

σ_{epi} ——微环 i 的平均弹性限;

d_{0pi} ——微环 i 的平均直径。

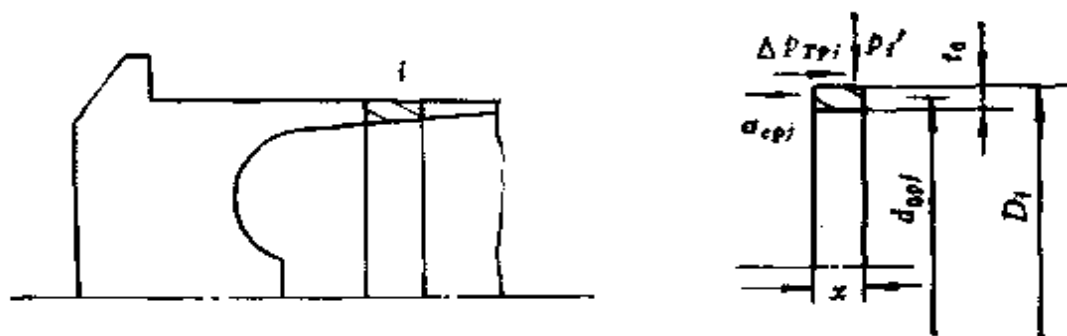


图11-4-4 药筒近底处的微元体

微环 i 外表面所受的摩擦力

$$\Delta p_{Tpi} = \pi D_i x f p'_i$$

式中 p'_i ——弹膛与药筒壁间的作用力;

f ——摩擦系数;

x ——微环 i 的宽度;

D_i ——微环 i 的外径。

微环 i 除受本段摩擦力的牵制外, 还受其它段的牵制, 总摩擦力为

$$p_{Tp} = \sum_{i=1}^{i=K} \Delta p_{Tpi}$$

轴向应力 σ_{z1} 等于;

$$\sigma_{z1} = \frac{Q_0 - p_{T,p}}{F_i} \quad (11-4-29)$$

其中

$$F_i = \pi d_{0,p}^2 l_0$$

切向应力 σ_r 由能量塑性条件可解出切应力的表达式, 能量塑性条件,

$$(\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_t - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 = 2\sigma_{s1}^2$$

可解出 σ_{r1}

$$\sigma_r = \frac{\sigma_r + \sigma_z + \sqrt{[-(\sigma_r + \sigma_z)]^2 - 4(\sigma_z^2 + \sigma_r^2 - \sigma_z \sigma_r - \sigma_{s1}^2)}}{2}$$

化简, 并考虑变形速度的影响, 最后得:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_r + \sigma_z}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{4(K_p \sigma_{s1})^2 - 3(\sigma_z - \sigma_r)^2} \quad (11-4-30)$$

将前面求出的 σ_r 和 σ_z 代入(11-4-30)式即可求出 σ_{r1} 。

2. 距筒底较远部位药筒壁内的三向应力

径向应力 σ_r 径向应力的计算公式与近筒底处相同, 即

$$\sigma_r = -p' = -(p_m - p_T) \quad (11-4-27)$$

$$p_T = 1.15 K_p \sigma_{s1} \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (11-4-28)$$

切向应力 σ_t 由塑性条件(11-4-26式)可求出药筒壁的切向应力

$$\sigma_t - \sigma_r = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s1}$$

知

$$\sigma_r = -p'$$

所以

$$\sigma_t = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{s1} - p'$$

考虑到变形速度的影响, 则

$$\sigma_t = \frac{2}{\sqrt{3}} K_p \sigma_{s1} - p' \quad (11-4-31)$$

轴向应力 σ_z 由塑性区的应力应变关系

$$\sigma_z - \sigma_r = \frac{2}{3} \times \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\varepsilon_z - \varepsilon_r)$$

将 $\sigma_r = -p'$ 代入, 则得:

$$\sigma_z = \frac{2}{3} \times \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} (\varepsilon_z - \varepsilon_r) - p' \quad (11-4-32)$$

式中 σ_i ——应力强度, $\sigma_i = K_n \sigma_{ei}$;

ε_i ——应变强度,

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_t - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_t)^2}$$

ε_t ——药筒壁的切向变形,

$$\varepsilon_t = \delta_0 + \varepsilon_z - K_n \frac{\sigma_{ei}}{E_1}$$

ε_z ——药筒壁的轴向变形, 贴膛前是由切向变形引起的,

考虑到 $\mu = \frac{1}{2}$, 则

$$\varepsilon_z = \frac{1}{2} \left(\delta_0 - K_n \frac{\sigma_{ei}}{E_1} \right)$$

ε_r ——药筒壁的径向变形, 根据体积不变定律知

$$\varepsilon_r = -(\varepsilon_t + \varepsilon_z)$$

求出药筒壁各处的三向应力 σ_r 、 σ_z 和 σ_t 后, 将各值代入最终间隙计算公式(11-4-25)中, 即可求出最终间隙 δ_f 。

由于药筒各部位的强度、壁厚不同, 故最终间隙要分段求。近筒底处壁厚变化较大, 则应力变化也较显著, 故段应分小些。距筒底较远处, 段可分得大些。

第五节 抽壳力的计算

求出药筒与弹膛间的最终间隙以后即可求抽壳力, 容易看出最终间隙值直接影响到抽壳力的大小。

武器的抽壳情况与武器的性能有关, 有的在膛压完全下降

后 ($p = 0$) 抽壳, 有的在一定膛压下抽壳。一般武器是在膛压完全下降后抽壳, 自动武器一般是在有一定膛压下抽壳。下面介绍这两种情况的抽壳力计算。

一、在一定膛压下抽壳时抽壳力的计算

计算在一定膛压下抽壳时的抽壳力, 首先应确定抽壳时膛内的压力。一般有两种情况: 弹丸在膛内即开始抽壳、弹丸飞出膛口后开始抽壳。

若弹丸在膛内即开始抽壳, 则此时膛内的火药气体压力可根据 $p-t$ 曲线求出。

若弹丸飞出膛口后才开始抽壳, 则此时的火药气体压力可根据下式计算

$$p_c = p_g e^{-\frac{t}{b}}$$

式中 p_c ——抽壳时火药气体的压力;

p_g ——膛口压力;

t ——弹丸飞离膛口至开始抽壳的时间。

根据实验知后效期的时间 $\tau = (4 \sim 5)b$, 下面确定 b 。

后效期中, 火药气体的总冲量 J 与后坐部分的动量相等, 即

$$J = M(V_{\max} - V_g)$$

式中 M ——后坐部分的质量;

$V_{\max}$ ——后坐部分的最大速度;

V_g ——弹丸刚出膛口时后坐部分的速度。

由图 11-5-1 可以看出, 后效期火药气体的冲量等于,

$$J = \int_0^{\infty} S p_g e^{-\frac{t}{b}} dt = S p_g b$$

式中 S ——膛口的内截面积。

由内弹道学知

$$\begin{aligned} M(V_{\max} - V_g) &= M \left(\frac{m + \beta \omega}{M} v_g - \frac{m + 0.5 \omega}{M} v_g \right) \\ &= \omega v_g (\beta - 0.5) \end{aligned}$$

式中 v_g ——弹丸出膛口的速度 (m/s);

ω ——发射药的质量 (kg);

m ——弹丸的质量 (kg)。

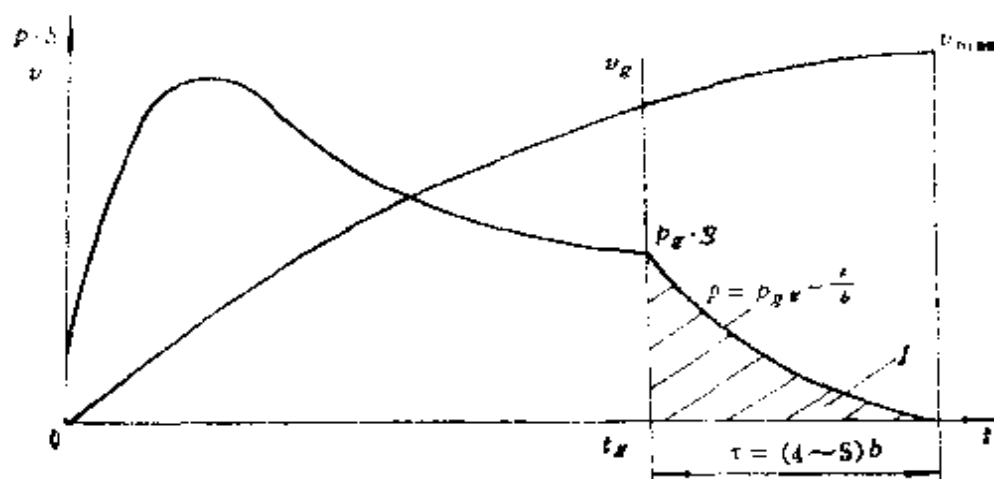


图11-5-1 后效期的压力变化

最后得

$$b = \frac{\omega v_g}{S p_g} (\beta - 0.5)$$

β 称为后效作用系数, 通常可根据经验式确定:

$$\beta = \frac{1300}{v_g} \quad (11-5-1)$$

对于具体的武器和弹药, β 的经验关系式可根据实验测定。表 11-5-1 给出几种枪弹的 β 实测结果。

表 11-5-1 几种枪弹的后效作用系数

枪弹名称	51式7.62手枪弹	56式7.62步枪弹	53式7.62步枪弹	NATO 7.62枪弹
β	$\frac{1170}{v_g}$	$\frac{1070}{v_g}$	$\frac{1290}{v_g}$	$\frac{1110}{v_g}$

为了确定抽壳力, 需求出药筒与弹膛之间的作用力。药筒与弹膛之间的作用力, 除与抽壳时火药气体的压力有关外, 还与最大膛压、弹膛与药筒的结构尺寸和材料性能等有关, 这些因素综合表现为最终间隙的性质 (间隙或公盈) 和大小。因此, 在确定药筒与弹膛的作用力之前, 除了求出抽壳时的火药气体压力外, 还

应知道药筒的最终间隙。

由于药筒的壁厚和机械性能在整个长度上是变化的, 所以计算药筒与弹膛间的作用力需将药筒分段, 将每段视为等厚圆筒, 逐段计算 (图 11-5-2)。计算步骤如下:

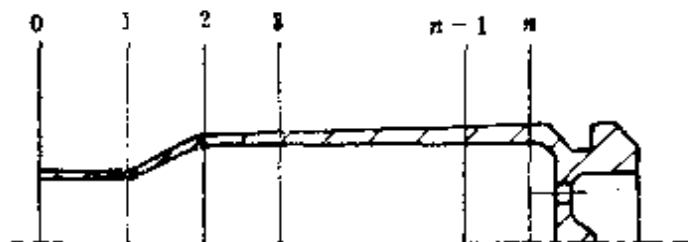


图11-5-2 药筒分段图

(1) 计算最大膛压时药筒所承受的内压 p_0 , 根据薄壁筒公式

$$p_0 = \frac{t}{r_0} \sigma_1$$

式中 t 为药筒壁厚, r_0 为药筒内半径, σ_1 为药筒壁内的切向应力。

(2) 最大膛压时药筒壁与膛壁间的压强 p_1

$$p_1 = p_0 - p_2$$

(3) 弹膛的变形 ε_K

$$\varepsilon_K = \frac{2}{3} \times \frac{p_1}{E_2} \times \frac{2a^2 + 1}{a^2 - 1}$$

式中 a 为弹膛外径和内径之比, $a = \frac{R_2}{R_1}$ 。

(4) 根据 p_1 、 p_2 、 ε_K 和 δ_1 作曲线图 (图 11-5-3)。

(5) 根据抽壳时膛内火药气体压力 p_0 , 由图 11-5-3 求出抽壳时药筒与弹膛内壁间的压强 p_2 。

图 11-5-3 是这样作出的: 以横坐标表示变形量, 纵坐标表示压强。AA线为弹膛变形的起始位置, BB线为最大膛压时药筒和弹膛的位置, 故 00_1 为弹膛的变形量 ε_K 。若最终间隙为正则 α 点在 0 点的左方, 若最终间隙为负 (过盈) 则 α 点在 0 点的右方。

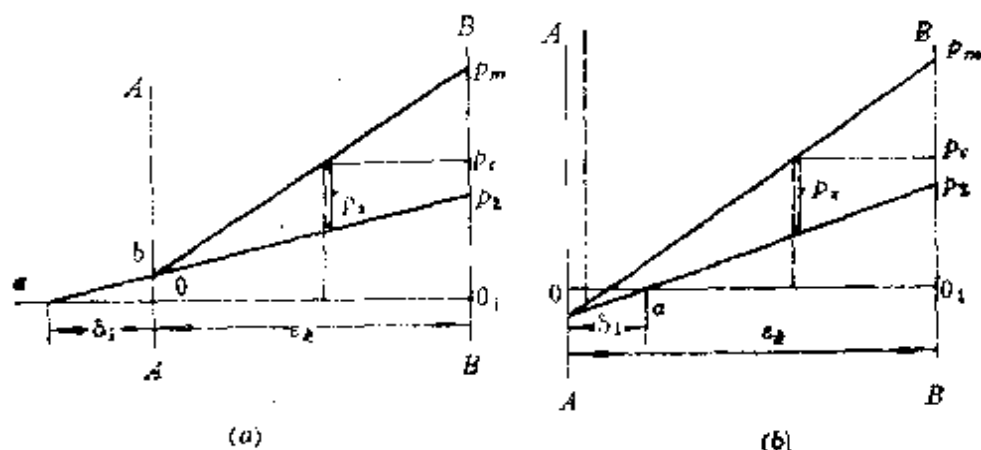


图11-5-3 药筒壁与膛壁间的压强

线段 ap_2 是药筒承载的变化，直线 bp_m 与 ap_2 的纵坐标之差表示药筒与弹膛内壁间的压强。

若抽壳时膛内压力为 p_c ，则由图可得某截面上药筒与弹膛壁间的比压 p_x ，由 p_x 即可求出抽壳时药筒与膛壁间的摩擦力 ΔR_i 。药筒各段摩擦力相加得总摩擦力。总摩擦力减去火药气体推药筒向后的作用力即可得到药筒的抽壳力。

计算摩擦力时，药筒口部外表面可按圆柱形考虑，瓶形系数小的药筒（即收口量较小的药筒），可不考虑斜肩对抽壳力的影响。

求药筒体部的摩擦力有两种方法，即考虑体部外表面的锥度和不考虑锥度。不考虑体部外表面锥度时，药筒体（包括口部）摩擦力可用下式求出：

$$\Delta R_i = \pi d_i l_i f p_{xi}$$

式中 ΔR_i ——所取段的摩擦力；

d_i ——所取段的外径；

l_i ——所取段的长度；

f ——摩擦系数；

p_{xi} ——所取段药筒外表面与弹膛壁间的比压。

总摩擦力 R 等于

$$R = \pi f \sum_{i=1}^n d_i l_i p_{st}$$

火药气体对药筒底部和口部的作用力为

$$R' = \frac{\pi}{4} (d_k^2 - d_{k0}^2) p_e$$

$$R'' = \frac{\pi}{4} d_{d0}^2 p_e$$

式中 R' ——火药气体对药筒口部端面的作用力，

R'' ——火药气体对药筒底部的作用力，

d_{k0} ——药筒口部内径，

d_k ——药筒口部外径，

d_{d0} ——药筒底部内径。

抽壳力 Q_e 等于

$$Q_e = R - (R' + R'')$$

当考虑药筒外表面锥度时 (图 11-5-4)，认为药筒内表面为圆柱形，外表面的锥度是由药筒壁厚度变化形成的，故 p_e 是径向力。各力向母线方向投影则得：

$$\Delta R_i = \pi d_i l_i (f p'_i - p''_i) \frac{1}{\cos \varphi_i}$$

其中

$$p'_i = p_e \cos \varphi_i$$

$$p''_i = p_e \sin \varphi_i$$

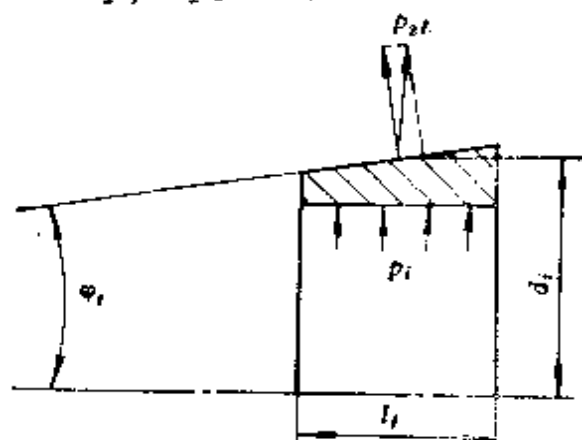


图 11-5-4 药筒外表面有锥度时的摩擦力

将 p'_i 和 p''_i 代入上式则得

$$\Delta R_i = \pi d_i l_i f p_{zi} \left(1 - \frac{1}{f} \operatorname{tg} \varphi_i \right)$$

药筒体部的总摩擦力 R 等于

$$R = \pi f \left(1 - \frac{1}{f} \operatorname{tg} \varphi_i \right) \sum_{i=1}^n d_i l_i p_{zi}$$

考虑斜肩对抽壳力的影响时, 斜肩处的作用力 $\Delta R'$ 可用下式求出 (图 11-5-5):

$$\Delta R' = \frac{\pi}{2} (d_k + d_j) l_j \left(f p_z - p_z \operatorname{tg} \frac{\varphi_j}{2} + p_c \operatorname{tg} \frac{\varphi_j}{2} \right)$$

式中 d_k ——药筒口部外径;

d_j ——药筒下斜肩外径;

φ_j ——斜肩角。

则抽壳力 Q_s 为

$$Q_s = R + \Delta R' + \Delta R_k - (R' + R'')$$

式中 ΔR_k 为药筒口部的摩擦力。

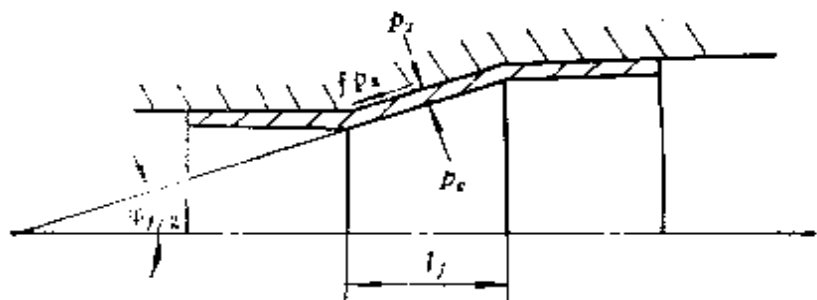


图11-5-5 药筒斜肩处的作用力

二、膛压降至大气压时抽壳力的计算

膛压降至大气压后, 若药筒与弹膛存在间隙 (正的最终间隙), 则抽壳时只需克服药筒的惯性力就可以了。若药筒与弹膛间存在公盈 (负的最终间隙), 则公盈值可由最终间隙的计算公式求得。药筒与弹膛壁间的作用力可由下式计算, 即

$$p_x = u_1 \frac{E_1}{r_1 \left(\frac{r_1^2 + r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} + \mu \right)}$$

式中 p_x ——药筒与弹膛间单位面积上的作用力；

u_1 ——药筒与弹膛间的公盈。

由于药筒与弹膛都为锥形，在抽壳过程中公盈值 u_1 是逐渐减小的（图 11-5-6）。在位置 I 时公盈等于 u_1 ，到位置 II 时 $u_1 = 0$ ，则 $p_x = 0$ 。

抽壳过程中的公盈值 $(u_1)_x$ 等于

$$(u_1)_x = u_1 - x \tan \varphi_1$$

因此，在抽壳过程中药筒与弹膛间的作用力按下式变化

$$p_x = (u_1 - x \tan \varphi_1) \frac{E_1}{r_1 \left(\frac{r_1^2 + r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} + \mu \right)}$$

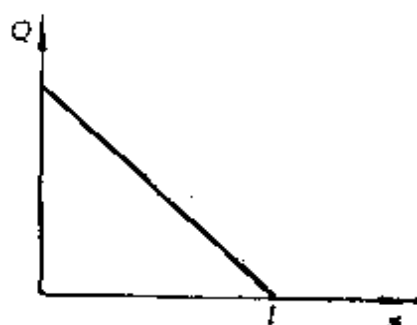
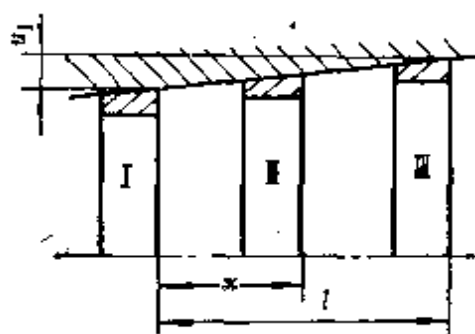


图11-5-6 抽壳过程中公盈值的变化 图11-5-7 抽壳力与行程 x 的关系

接触面上的总压力 N 为

$$N = p_x \cdot F$$

式中 F 为接触面积。

某瞬间的抽壳力为

$$Q_i = fN$$

在抽壳过程中 Q_i 与 x 的变化关系见图 11-5-7，直线下面的面积表示抽壳所需的能量，可用下式求出：

$$A = \frac{Ql}{2}$$

式中 Q ——最大抽壳力，即 $x = 0$ 时的抽壳力；

l —— $(u_1)_x = 0$ 时所需的抽出量。

因为药筒的强度和壁厚沿整个长度上是变化的，所以公盈值 u_1 和作用力 p_x 都是分段求出，假设每段的强度和壁厚是相同的。验算药筒强度时采用最大抽壳力，即将各段 $x = 0$ 时的抽壳力相加。总的抽壳能量是各段的抽壳能量之和。

第六节 影响抽壳力的因素

抽壳力的大小是影响武器退壳机构的工作可靠性和药筒工作正常的一个重要因素，抽壳力过大会把底缘拉缺，严重影响武器的工作。影响抽壳力的因素很多，下面对几种主要因素进行分析说明。

一、药筒的材料和机械性能

药筒材料对抽壳力的影响，可用 σ_{s1} 、 E_1 和 E'_1 三个量来分析。这三个量都直接影响着药筒的塑性变形量、弹性恢复量和抽壳力。

对某一种材料来说 E_1 值的变化不大，不同材料的 E_1 值变化较大。 E_1 小， σ_{s1} 大则药筒的弹性恢复量大，对形成最终间隙有利，可减小抽壳力。

由应力应变曲线可以容易地看出 E_1 和 σ_{s1} 对弹性恢复量的影响。为了便于讨论不考虑它们的强化（图 11-6-1）。

由图 11-6-1 可以看出：当改变药筒材料的弹性模数 E_1 时，若 E_1 增加（即 α_1 增加），则公盈量（负最终间隙）加大，抽壳力增加。当改变药筒材料的弹性极限 σ_{s1} 时，若 σ_{s1} 增加，则公盈量减小，抽壳力减小。

黄铜的 E_1 比钢小一半，所以由黄铜药筒改为钢药筒，克服抽壳困难是主要关键。当材料 E_1 大时，要增大最终间隙，可利用材料冲压时的加工硬化或改变材料的化学成分（如提高含碳

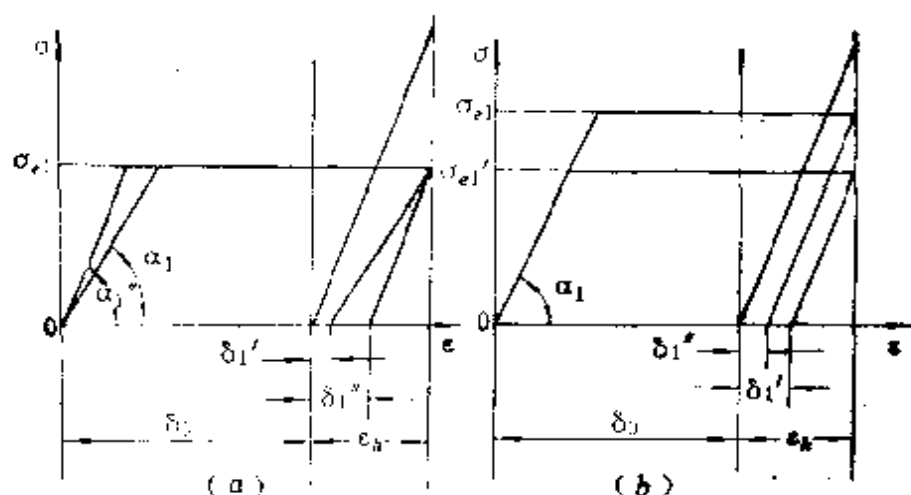


图11-6-1 不同材料药筒的应力应变图

(a) 改变弹性模数; (b) 改变弹性极限。

量), 或用热处理的办法来提高 σ_{e1} 。

图 11-6-2 所示为弹性模数 E_1 (不同材料) 对最终间隙 u_1 的影响 (σ_{e1} 一定)。

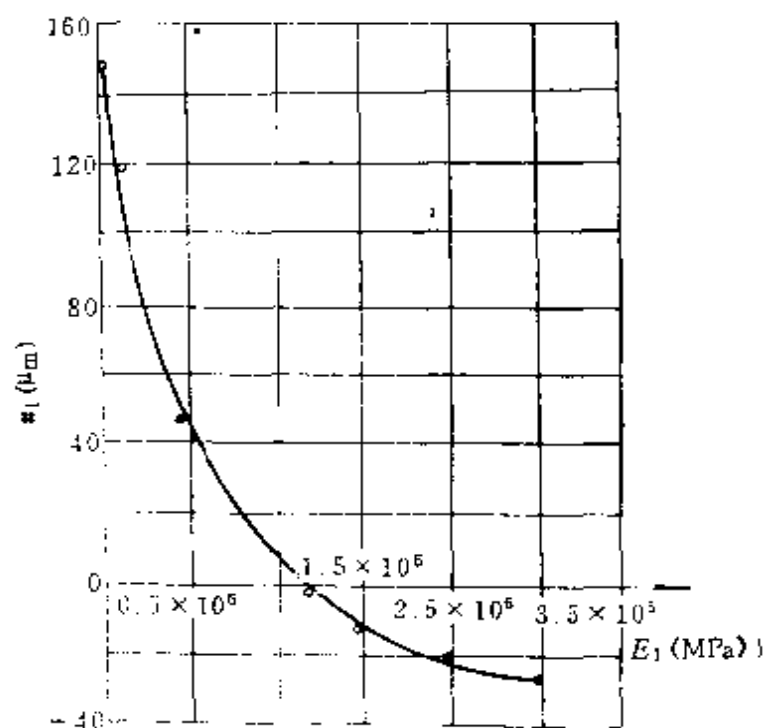


图11-6-2 弹性模数 E_1 对最终间隙 u_1 的影响

材料的强化对抽壳是有利的, 因为强化后弹性恢复量加大, 对形成最终间隙有利, 抽壳力有所降低。材料的强化性能通常用强化模数 E'_1 表示, E'_1 大, 说明材料的强度可以提高的多, 对形成

最终间隙有利。钢和黄铜材料在塑性变形量达到一定值后，弹性极限和强度极限提高得很慢（图 11-6-3），因此用加工硬化来提高强度是有限的。

药筒各部分的机械性能应满足以下几个要求：退壳性能的要求，闭气性的要求，与弹丸牢固结合的要求等。故药筒的机械性能由口部向筒体下部逐渐增加。

药筒材料的强度愈高，则愈易保证退壳性能，即易形成最终间隙。药筒所允许的最低强度可通过试验确定，低于此强度将产生难退壳现象。

保证药筒退壳性能的主要部位是筒体下部，只要那里的机械性能满足一定的要求，就能保证退壳质量。这一区域（高强度区）的长度主要取决于火药气体压力，火药气体压力愈高该区域应愈长。对于火药气体压力超过 280MPa 的药筒，这个区域的长度应不小于药筒全长的一半；对于火药气体压力较低的药筒，该长度应不小于药筒全长的 $1/3$ 。

筒底的机械性能对药筒的退壳质量亦影响很大，它直接影响底缘附近 10~15mm 处最终间隙的大小。若药筒筒底的强度不足，则发射时变形较大，就会使药筒产生卡紧现象，使之不易抽出。

黄铜、钢、铝的物理机械性能见表 11-6-1。表 11-6-2 给出了不同材料制成的 56 式 14.5 药筒的静止抽壳力值（用重锤通过滑轮测出）。从表中可以看出，黄铜药筒抽壳力最小，钢药筒以

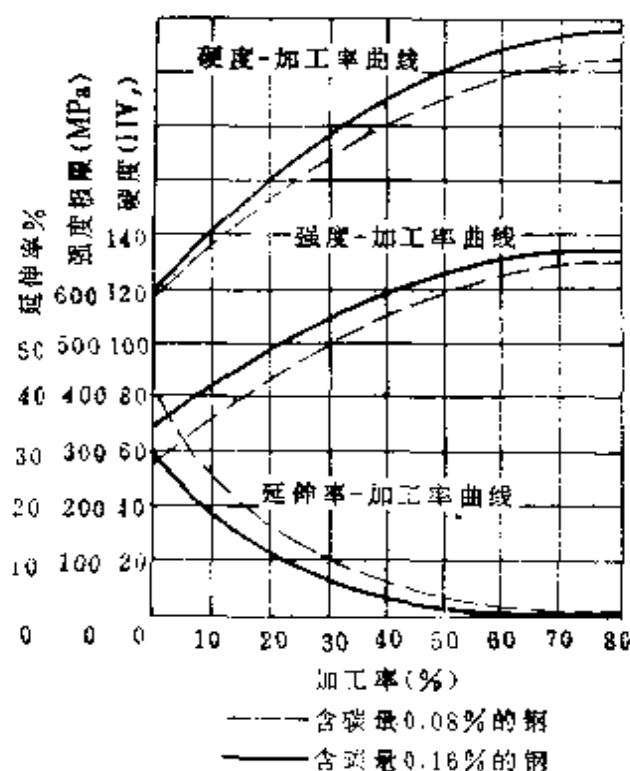


图11-6-3 含碳量为0.08%和0.16%钢的 σ_s 、 HV_s 、 δ （延伸率）与加工率的关系

含碳量较高的钢材为佳。因含碳量高的钢，其弹性极限和强度极限高。但含碳量高的钢，在冲压加工时较困难。

表11-6-1 黄铜、钢、铝的物理机械性能

材 料 \ 性 能	弹性模数 (MPa)	弹性极限 (MPa)	导热系数 $\left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}\right)$	20~300°C 线膨胀系数 (1/°C)	质量密度 (g/cm ³)	比 热 $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$
H-70黄铜	(1.1~1.2)10 ⁵	100	93	2.9×10^{-6}	8.53	0.394
F-18钢	(2.15~2.2)10 ⁵	250	46.5	(12.1~13.5)10 ⁻⁶	7.85	0.502
LY12退火硬铝	0.72×10^5	110	188.4	24.8×10^{-6}	2.8	0.904

表11-6-2 56式14.5药筒的静止抽壳力值

药 筒 材 料	静止抽壳力 (N)	
	最 大	最 小
H-70黄铜	0	0
F11(0.08%C)沸腾钢	4900	1494.5
F18(0.18%C)镇静钢	136.2	4.9

二、药筒尺寸

影响抽壳力的药筒尺寸主要是壁厚、药筒的锥度和长度等。

药筒壁厚增大，能够替弹膛多承受一部分火药气体压力，使弹膛弹性变形量减小，对形成最终间隙有利。但壁厚过大，冲压加工的总加工率减小，降低了药筒的强度，反面对形成最终间隙不利。从已经形成负间隙的情况来看，在同一负间隙的条件下，薄壁药筒的卡紧力要小。实践证明，在药筒强度允许条件下减小体部壁厚，是降低抽壳力的措施之一。

锥形药筒较圆注形药筒的抽壳阻力小。锥形药筒在向后抽出的过程中，药筒与弹膛间的公盈值逐渐减小，因而抽壳力由一个最大值逐渐减小。药筒体部锥度越大，公盈值变化也越快，可能在药筒被拉出一个不大的距离之后，抽壳力就降至零了。但药筒

锥度不能太大，要考虑它的外形对供弹机构等的影响。

药筒全长长，抽壳力大；全长短，抽壳力小。

三、初始间隙

从抽壳理论的分析讨论和最终间隙的计算公式中可以看出，药筒与弹膛间必须有一定的初始间隙，射击后才能形成最终间隙。若初始间隙增大，药筒的塑性变形量增加，强化程度提高，有利于抽壳。但是用增大初始间隙来改进抽壳性能是有一定限度的，因为材料的强化率随加工量的增大而减小（图 11-6-3）。初始间隙增大过多，特别是在低温试验时，会引起药筒纵裂。56 式 14.5 钢药筒初始间隙对最终间隙的影响见表 11-6-3 和图 11-6-4。

表 11-6-3 56 式 14.5 钢药筒初始间隙对最终间隙的影响

距底面 25mm 处	初始间隙 (mm)	0.081	0.105	0.107	0.111	0.183	0.215
	最终间隙 (mm)	-0.079	-0.077	-0.075	-0.069	-0.058	-0.053
距底面 50mm 处	初始间隙 (mm)	0.078	0.086	0.096	0.100	0.212	0.252
	最终间隙 (mm)	-0.062	-0.061	-0.056	-0.056	-0.051	-0.050
距底面 80mm 处	初始间隙 (mm)	0.094	0.102	0.136	0.172	0.244	0.270
	最终间隙 (mm)	-0.062	-0.060	-0.058	-0.057	-0.056	-0.054

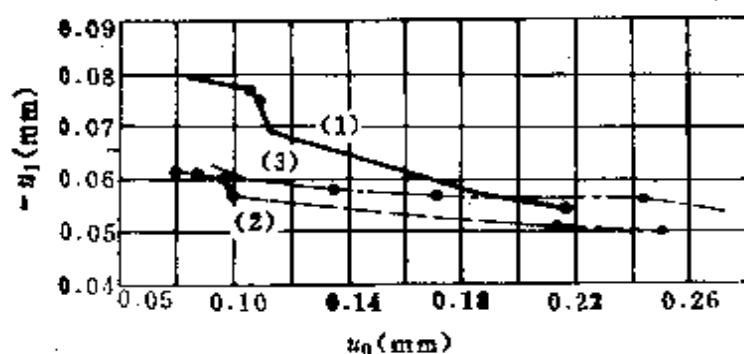


图 11-6-4 56 式 14.5 钢药筒初始间隙 u_0 对最终间隙 u_1 的影响

1—距底面 25mm 处，2—距底面 50mm 处，3—距底面 80mm 处。

由图 11-6-4 可以看出, 初始间隙增大, 最终间隙也增大; 最终间隙的增长率随初始间隙的增大而减小。另外还可以看出 (图 11-6-5), 药筒强度越高, 弹性恢复量越大, 对形成最终间隙有利。因此, 在易卡壳的部位, 适当地利用加工硬化来提高材料的强度会有利于抽壳。但强度过大, 延伸率低, 药筒易破裂。图 11-6-5 示出了 56 式 14.5 钢药筒硬度与最终间隙的关系。

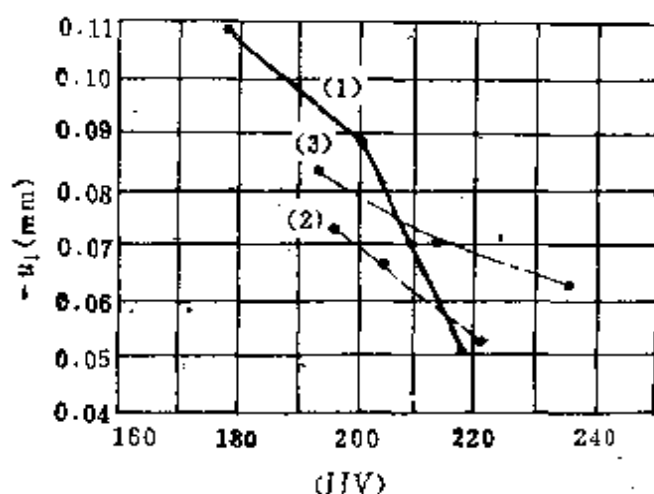


图 11-6-5 56 式 14.5 钢药筒各点硬度对最终间隙的影响

1—距底面 25mm 处; 2—距底面 50mm 处; 3—距底面 80mm 处。

四、最大膛压

最大膛压对抽壳力的影响可由药筒与弹膛的应力应变图 (图 11-6-6) 看出, 在最大膛压比较大的情况, 弹膛的弹性变形量也较大。若最大膛压由 p'_m 变为 p''_m , 则弹性变形量由 ϵ'_k 变为 ϵ''_k 。若使用同一种药筒, 则后一种情况药筒的塑性变形量比较大, 虽然塑性变形量增加会使它因强化而提高弹性恢复量, 但它在数量上不能抵消残余变形的影响, 所以药筒的最终间隙减小 (由 δ'_1 变为 δ''_1), 结果使抽壳力增大。因此, 膛压升高会使最终间隙减小, 对抽壳不利。对自动武器来说, 抽壳困难易引起射击故障。

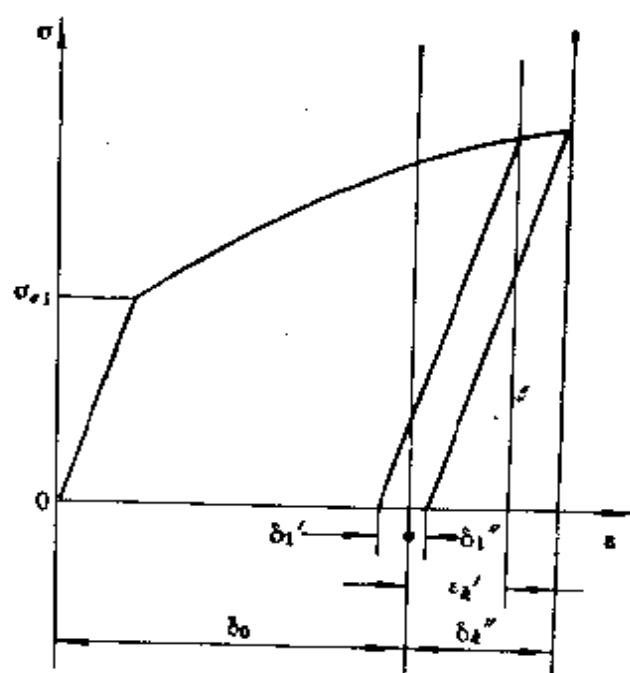


图11-6-6 最大膛压对最终间隙的影响

五、弹膛的壁厚

适当地增加弹膛的壁厚，可以减小弹膛的弹性变形量，对降低抽壳力是有利的。表 11-6-4 和表 11-6-5 给出了 56 式 14.5 黄铜药筒在不同膛壁厚度和火药气体压力下各部位的最终间隙和抽壳力。

表11-6-4 弹膛壁厚度和火药气体压力对56式14.5黄铜药筒最终间隙(mm)的影响

距底缘 距离 (mm)	弹膛 外径 (mm)	火药气体 压力 (MPa)	100	200	270	325	400
20	42		0.042	- 0.028	- 0.072	- 0.089	—
	50		0.044	- 0.020	- 0.028	- 0.036	- 0.070
	70		0.062	- 0.008	- 0.008	- 0.020	- 0.046
50	42		0.050	0.017	- 0.006	- 0.017	—
	50		0.051	0.032	0.019	0.007	- 0.016
	70		0.054	0.039	0.024	0.014	0.003
80	42		0.056	0.030	0.014	0.002	—
	50		0.065	0.044	0.030	0.021	0.007
	70		0.065	0.051	0.037	0.026	0.014

表11-6-5 56式14.5黄铜药筒在不同弹膛厚度和火药气体压力下的抽壳力 (N)

火药气体压力 (MPa) \ 弹膛外径 (mm)	42	50	70
100	0	0	0
200	470	157	29
270	2313	500	147
325	2773	2421	412
400	—	4635	2029

弹膛的弹性变形量可用下式求出:

$$\varepsilon_K = \frac{2}{3} \times \frac{p_1}{E_s} \times \frac{2a^2 + 1}{a^2 - 1}$$

当 $a > 2.5 \sim 3$ 时, ε_K 的减小就不显著了 (图 11-6-7)。同时, a 过大, 会使武器质量增加。因此, 增加弹膛壁厚是有限的。采用热套等方法使弹膛产生压缩预应力, 也可使 ε_K 减小。

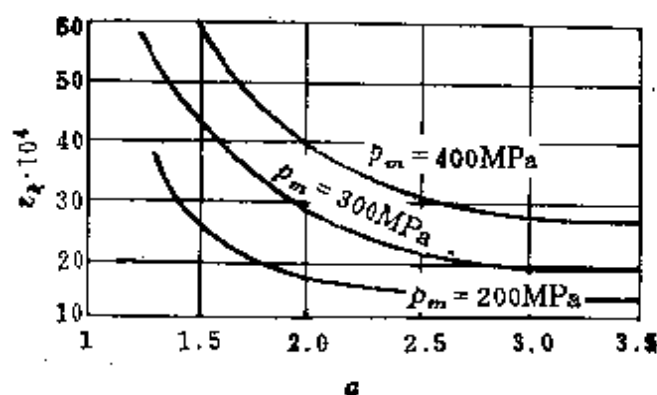


图11-6-7 圆壁筒厚度与弹性变形量的关系

六、药筒与弹膛的表面状态

药筒与弹膛的表面状态（干净或污秽、干与湿、有润滑或无润滑、弹膛镀铬或不镀铬）对抽壳力影响较大，因为它直接影响摩擦系数。同样药筒外表面的粗糙度或弹膛内表面的加工质量，都会对退壳性能有影响，特别是对自动武器。钢药筒表面的防腐层对摩擦系数也有一定的影响。

七、闭锁机构的刚度

在射击过程中，火药气体压力通过药筒传给闭锁机构，使闭锁机构有关零件产生弹性变形，同时药筒也后移伸长。在膛压下降后，闭锁机构和药筒开始弹性恢复。如果闭锁机构刚度较差，后移量必然大，由于药筒有锥度，则药筒的径向塑性变形就大。在闭锁机构恢复过程中，就会将药筒推向膛内，使药筒在膛内卡紧的程度增加，抽壳力增加。

八、抽壳时机

自动武器通常是在一定的膛压下抽壳的，射击频率越高，则抽壳越早，这时膛内火药气体压力较高，抽壳力就大。所以，对射速要求不高的武器，适当的延迟开锁和抽壳时间，降低抽壳时的膛压是减小抽壳力的主要措施。

九、弹膛温度

弹膛温度越高，则药筒的散热条件越差，抽壳越困难，因此连续射击对抽壳是不利的。

上述各项影响抽壳力的因素和改善抽壳条件的措施，都是就单一因素分别进行讨论的。容易看出，实际上它们之间有些是互相制约的，有的还与整个武器的性能要求有矛盾。因此，对抽壳问题要全面分析和考虑，并进行大量试验，以便得到合理解决。

第七节 药筒的强度校核

药筒的强度验算是校核药筒在射击过程中和抽壳时的强度，它是根据射击的各个阶段药筒所承受的载荷、变形来进行验算的。

射击时药筒壁在火药气体压力作用下主要是切向变形，此变形量不能过大，否则药筒会产生纵向破裂。另外，由于火药气体

对药筒底部的作用使药筒产生轴向伸长，此量过大会使药筒产生局部变形或横断。抽壳时药筒壁和底缘应能承受抽壳力的作用，使之不致破坏。对于要求多次使用的火炮药筒，其底部射击后不应产生永久变形。

一、药筒的轴向变形

从射击实践中知道，射击后，药筒体部的局部拉薄，裂纹或断裂，常是由于药筒的轴向变形量过大所引起的。

射击前，药筒在膛内有初始间隙和弹底间隙。

射击时，膛内火药气体压力迅速增加，当对弹丸底部的作用力大于药筒口部对弹丸的箍紧力（拔弹力）时弹丸开始向前运动。与此同时，作用在药筒底部的火药气体压力使药筒向后移动。药筒壁受火药气体压力的作用产生切向变形，使直径胀大。随着压力的升高，胀大量增大，迅速消除了初始间隙，而与弹膛壁紧贴。这将产生摩擦而阻止药筒向后运动。由于药筒的壁厚和强度沿长度是变化的，故药筒与膛壁的接触长度是逐渐增加的。当接触表面的摩擦力总和大于作用在药筒上的轴向力时，药筒就不能移动。这时药筒将在其底部压力的作用下产生轴向拉伸变形。如果药筒底部的闭锁间隙加上闭锁系统的弹性变形量，超过药筒允许的拉伸变形量（横断前的最大拉伸变形），药筒就发生横断。另一方面，作用在斜肩上的火药气体压力也会使药筒产生轴向变形。对于底缘定位的药筒，若斜肩处的空隙不大，则药筒轴向仅为弹性变形或小量塑性变形；若空隙过大，就可能使药筒壁拉薄或拉断。

药筒的壁厚和机械性能沿长度变化，而摩擦系数受接触表面状态的影响较大，所以轴向变形的计算就比较繁杂，同时计算结果也不精确。下面分析药筒的轴向变形。

由于药筒的直径、壁厚和机械性能沿其长度是变化的，为研究方便起见，在药筒上取一小段 Δl （图11-7-1），认为该段的直径、壁厚和机械性能是不变的。作用在药筒底部的总压力 P' 为

$$P' = p \frac{\pi}{4} d_{i0}^2$$

式中 p —— 药筒内火药气体压力;

d_{i0} —— 药筒内底直径。

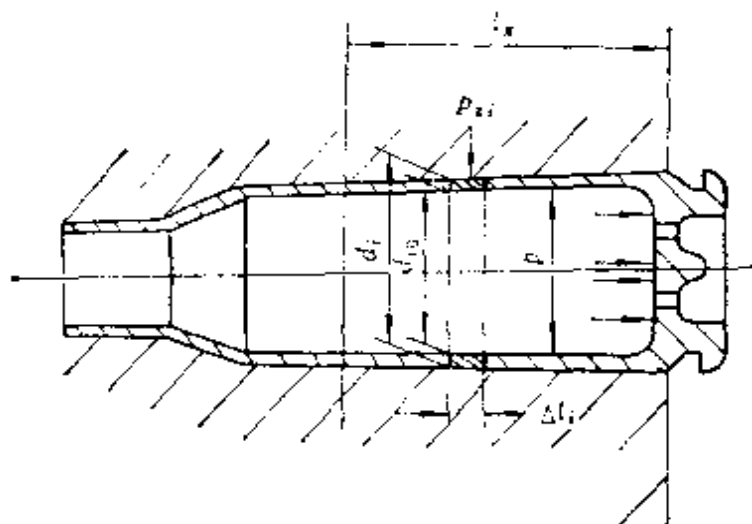


图11-7-1 药筒发射时的轴向变形

在某段 l_i 长度上所承受的摩擦力为

$$R = \pi f \sum_{i=1}^x d_i \cdot \Delta l_i \cdot p_{xi}$$

式中 d_i —— 第 i 段药筒的外径;

p_{xi} —— 第 i 段药筒外表面与弹膛壁间的作用力;

f —— 摩擦系数。

若不考虑惯性力, 则在 Δl_i 段右端断面上所受的轴向应力为

$$\sigma_{xi} = \frac{4P' - 4\pi f \sum_{i=1}^x d_i \cdot \Delta l_i \cdot p_{xi}}{\pi (d_i^2 - d_{i0}^2)}$$

式中 d_{i0} 为第 i 段药筒的内径。

在上式中若

$$P' = \pi f \sum_{i=1}^x d_i \Delta l_i p_{xi}$$

则说明在 $l_x = \sum_{i=1}^x \Delta l_i$ 段上的摩擦阻力与火药气体向后的推力

平衡, 此段以左的外表面就只存在阻止药筒向后移动的静摩擦, l_x 左端面及其左方各断面内都没有轴向应力。 l_x 段以右各部分将产生大小不等的变形。在膛压增长过程中, 某一断面的应力达到该断面的极限强度时, 药筒就横断, 此时的总伸长量为极限伸长量。某断面的伸长量可用下式求出:

$$\delta \Delta l_i = \sigma_{ei} \frac{\Delta l_i}{E_i} \quad (\text{弹性变形})$$

$$\delta \Delta l_i = \sigma_{ei} \frac{\Delta l_i}{E_i} + \frac{\sigma_{xi} - \sigma_{ei}}{E'_{xi}} \Delta l_i \quad (\text{弹塑性变形})$$

式中 $\delta \Delta l_i$ ——第 i 段 Δl_i 的伸长量;

σ_{ei} ——第 i 段的弹性极限;

E'_{xi} ——第 i 段的强化模数 (图 11-7-2)。

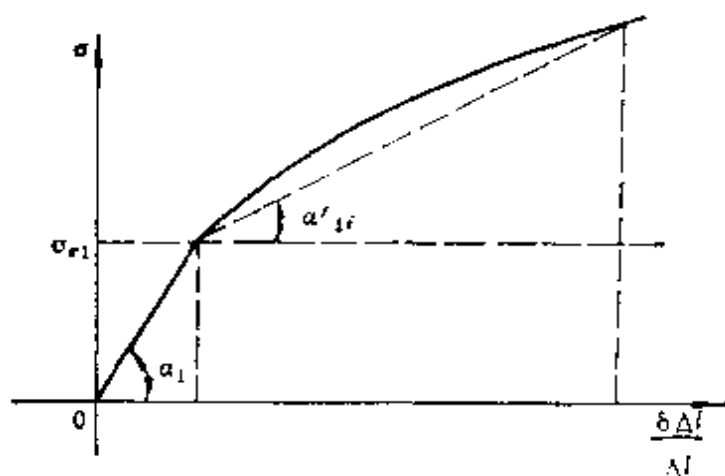


图11-7-2 应力应变曲线

取各小段圆筒体伸长量 $\delta \Delta l_i$ 的总合, 便得到药筒的轴向伸长量

$$\delta l_x = \sum_{i=1}^x \delta \Delta l_i$$

为使药筒在发射时不产生横断, 应使其在发射时可能发生的轴向伸长量小于药筒的极限伸长量, 故其不横断的条件是:

$$\delta l_{\text{max}} > \Delta_{\text{制}} + \Delta_{\text{磨}} + \Delta_{\text{弹}}$$

式中 δl_{max} ——药筒的极限伸长量；

$\Delta_{\text{制}}$ ——制造间隙；

$\Delta_{\text{磨}}$ ——磨损间隙；

$\Delta_{\text{弹}}$ ——弹性间隙。

对于有斜肩的药筒，火药气体作用于斜肩内表面，会增大药筒壁的内应力，这有可能使危险断面产生在靠近斜肩附近的地方。

上面在讨论药筒轴向变形时，未考虑药筒切向变形对轴向变形的影响，药筒与闭锁系统接触后，对药筒轴向变形的影响，以及闭锁系统弹性恢复时对药筒的轴向压缩等等。

一般地说，药筒轴向变形的大小（伸长或缩短）与药筒直径、初始间隙和弹底间隙的大小、药筒材料的强度（加工硬化）以及武器闭锁机构的刚度等有关。若初始间隙大，弹底间隙偏小，药筒材料强度偏高，都会使药筒贴膛时间稍迟，这样就不易产生轴向变形，轴向变形也较小，此时药筒以切向变形为主。反之，若初始间隙小，弹底间隙偏大，药筒材料强度偏低，则药筒贴膛较快较紧，这样药筒的轴向变形就大。实际上，当弹底间隙大到一定程度时，容易使药筒产生横断或炸壳。

二、药筒壁的强度

抽壳时药筒壁的承载情况与药筒的抽壳情况有关。前面曾讨论了两种抽壳情况，即在一定膛压下抽壳和膛压降至大气压时抽壳。抽壳的情况不同，药筒的承载情况也不同。一般说，在一定膛压下抽壳药筒的承载要大些。不论哪种抽壳情况，药筒壁的强度都依它所承受的抽壳阻力来确定。

在一定膛压下抽壳，这时虽然作用在药筒底部内表面的火药气体压力将有助于抽壳，但仍需克服药筒与膛壁间作用力所产生的较大的摩擦阻力。膛压降至大气压后抽壳，若药筒与膛壁间存在公盈，则药筒壁承受的抽壳阻力为此公盈值使药筒与膛壁间产生的摩擦阻力。

下面讨论在一定膛压下抽壳时药筒壁的强度。

计算前先将药筒分段，并假定每段药筒的壁厚和机械性能相等（图 11-7-3），然后计算药筒各段的抽壳阻力，根据抽壳阻力来验算药筒各段壁厚的强度。

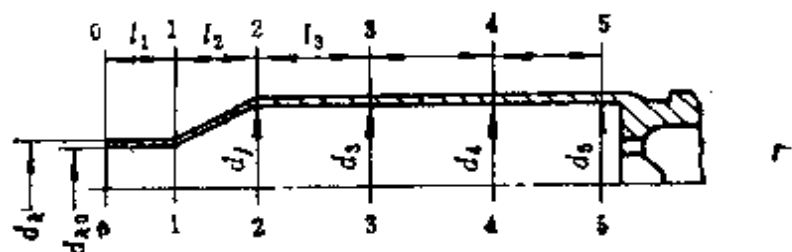


图 11-7-3 药筒壁分段

第一段——口部，此段的摩擦力 R_1 按下式确定，

$$R_1 = \pi d_k l_1 f p_{x1}$$

式中 p_{x1} ——抽壳时药筒口部与弹膛之间的作用力，

d_k ——药筒口部外径。

火药气体对药筒口部端面的作用力 R_0 为

$$R_0 = \frac{\pi}{4} d_k^2 (1 - b_1^2) p_s$$

式中 b_1 ——药筒口部内外径之比 $\left(b_1 = \frac{d_{k0}}{d_k}\right)$ ，

p_s ——抽壳时火药气体压力。

因此，抽壳时第一段的阻力为

$$R = R_1 - R_0$$

断面 1-1 上药筒壁的强度条件是

$$Q_{b1} \geq R$$

Q_{b1} 为断面 1-1 上药筒壁所能承受的轴向力，即

$$Q_{b1} = \frac{\pi}{4} d_k^2 (1 - b_1^2) \sigma_{b1}$$

式中 σ_{b1} 为 1-1 断面上药筒壁的强度极限。

第二段——斜肩，这时应考虑本段的锥度（图 11-7-4）。图中 p_1 是药筒与弹膛间的作用力， p_s 为抽壳时火药气体压力。

上述各力在轴向的投影 p_2 为

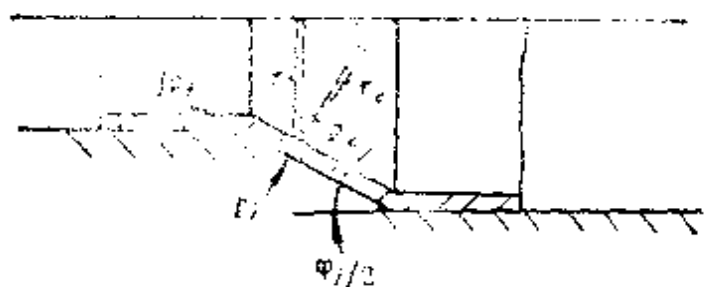


图11-7-4 斜肩处药筒与弹膛间的作用力

$$p_2 = p_i f \cos \frac{\varphi_f}{2} - p_i \sin \frac{\varphi_f}{2} + p_e \sin \frac{\varphi_f}{2}$$

斜肩上总的抽壳阻力为

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{\pi}{2} (d_k + d_f) \frac{l_2}{\cos \frac{\varphi_f}{2}} p_2 \\ &= \frac{\pi}{2} (d_k + d_f) l_2 \left[f p_i - p_i \operatorname{tg} \frac{\varphi_f}{2} + p_e \operatorname{tg} \frac{\varphi_f}{2} \right] \end{aligned}$$

抽壳时断面 2-2 所受拉力为第一段和第二段抽壳阻力的总和，即

$$R_{12} = R_1 - R_0 + R_2$$

断面 2-2 上药筒壁的强度条件是

$$Q_{b_2} = \frac{\pi}{4} d_f^2 (1 - b_2^2) \sigma_{b_2}$$

式中 b_2 ——直径比, $b_2 = \frac{d_{f0}}{d_f}$,

d_{f0} ——斜肩处药筒的内径;

σ_{b_2} ——斜肩处药筒的强度极限。

同理可验算药筒壁其它各段的强度。

对自动武器来说，随着抽壳过程的进行，膛压不断下降，则摩擦力也不断减小，所以沿筒体长度上壁厚应变化，以适应受力情况的改变。

三、药筒底缘的强度

抽壳时武器的抽壳力是通过底缘传递给药筒的，故药筒的底

缘应能承受抽壳力的作用，在抽壳力的作用下，底缘主要承受剪切应力，它的强度可根据下式校核：

$$\tau = \frac{Q}{F} \leq [\tau]$$

式中 τ ——底缘承受的剪切应力；

Q ——抽壳力；

F ——底缘承受剪切的面积；

$[\tau]$ ——底缘允许的剪应力。

四、药筒底部的强度

射击前药筒与膛壁间有初始间隙 u_0 ，射击后药筒壁与膛壁紧贴，但筒底附近由于筒底的牵制和壁厚的影响使变形受阻，而产生不接触段 l_1 (图 11-7-5)。

l_1 可用实验或经验关系式确定，图 11-7-5 中的 l_0 可用如下经验式求出：

$$l_0 = 1.6r$$

式中 r 为筒底与筒壁连接处的半径。

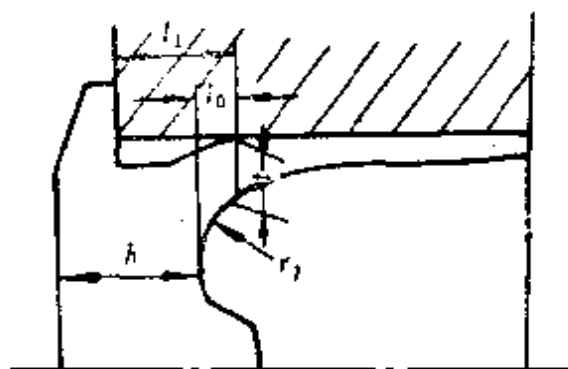


图11-7-5 筒底附近的不接触段

由于药筒根部不能紧贴弹膛，火药气体对药筒内壁作用的结果，会使底缘附近产生剪切应力和弯矩(图 11-7-6)。另外由于弯矩的作用，在药筒壁上还产生了拉伸和压缩应力，如图 11-7-7 所示。

药筒底部的受力较复杂，除了受火药气体压力外，由于火药气体对不接触段 l_0 的作用，而使筒底产生了许多附加力和力矩(图 11-7-8)。

(1) 作用于药筒底部半径方向上的力 R_1

力 R_1 是由火药气体作用于不接触段 l_0 所引起的。作用于不接触段上的总力为

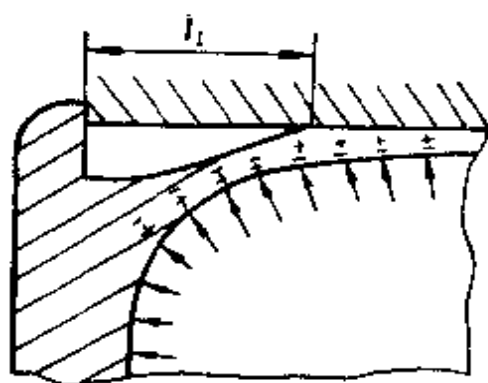
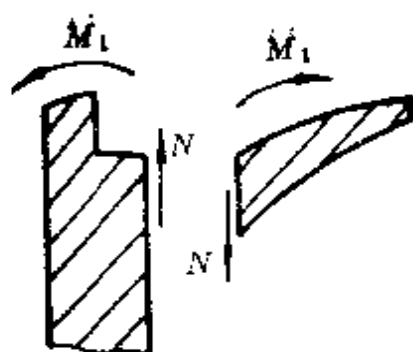


图11-7-6 筒底附近的切应力和弯矩 图11-7-7 筒底附近筒壁上的应力

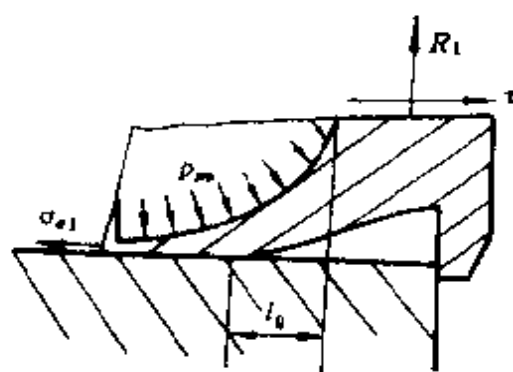
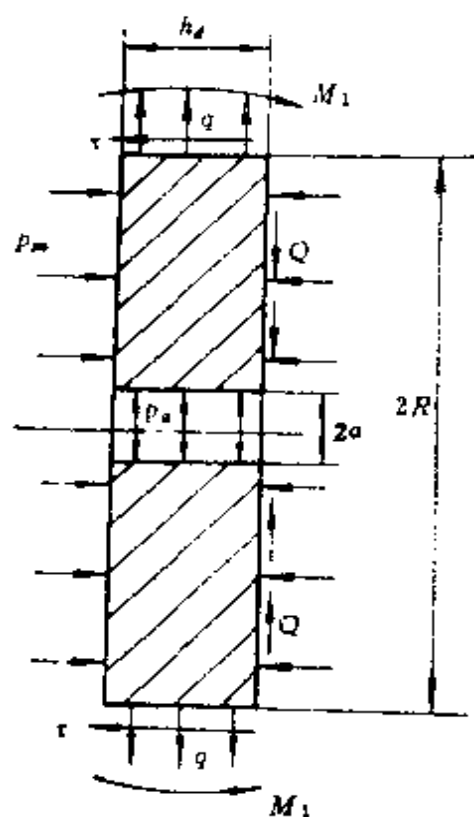


图11-7-8 药筒底部的受力

$$F_0 = 2\pi R l_0 p_m$$

将此力视为均匀作用于筒底外缘厚度上的力，即

$$\frac{F_0}{2\pi R h_d} = \frac{p_m l_0}{h_d} = q$$

(2) 弯矩 M_1 ，它是因火药气体作用于不接触段 l_0 所造成，由筒体传给筒底。

(3) 底火室内作用的压力 p_a ，它是由火药气体进入底火或底火室所引起的，它的大小与底火的结构有关，应小于火药气体压力。

(4) 作用于筒底内表面的力 F_{11}

$$F_{11} = p_m \pi (R^2 - a^2)$$

(5) 筒底外表面与臼体镜面间摩擦力产生的切应力 Q ，取其平均值则

$$Q = \frac{p_m f}{2}$$

(6) 筒体牵制筒底轴向变形的力 τ ，它是由于火药气体对筒底内表面的作用，使筒底随臼体闭锁件一块产生轴向位移时，筒底与筒底附近的筒体壁相平衡的力。

由于火炮药筒有多次使用的要求，故药筒底部不允许产生永久变形，它的强度校核可按以下方法进行。

自筒底取出一扇形微元体，其应力作用情况如图 11-7-9 所示。根据微元体上作用的应力，可建立径向的平衡微分方程式：

$$\begin{aligned} \sigma_r h_d r d\varphi - (\sigma_r + d\sigma_r) h_d (r + dr) d\varphi \\ + 2\sigma_t h_d dr \sin \frac{d\varphi}{2} + 2Qr d\varphi dr = 0 \end{aligned}$$

因为 $\sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$ ，并略去高阶微量，则上式可化简成

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} - \frac{2Q}{h_d} = 0$$

由前面知道 $Q = \frac{p_m f}{2}$ ，则

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_t}{r} - \frac{p_m f}{h_d} = 0 \quad (11-7-1)$$

上式也可写成：

$$\frac{d}{dr} (r\sigma_r) - \sigma_t - \frac{p_m f}{h_d} r = 0 \quad (11-7-2)$$

令 $F = r\sigma_r$ ，则 $\sigma_r = \frac{F}{r}$ ，代入 (11-7-2) 式得：

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_1} \left[\frac{F}{r} - \mu \frac{dF}{dr} + \mu \frac{p_m f}{h_a} r - \mu \sigma_z \right] \quad (11-7-5)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_1} \left[\frac{dF}{dr} - \frac{p_m f}{h_a} r - \mu \frac{F}{r} - \mu \sigma_z \right] \quad (11-7-6)$$

将 (11-7-5) 式微分得 (因 $\sigma_z = \text{常数}$, 故 $\frac{d\sigma_z}{dr} = 0$),

$$\frac{d\varepsilon_r}{dr} = \frac{1}{E_1} \left[\frac{d^2 F}{dr^2} - \frac{p_m f}{h_a} - \mu \left(\frac{dF}{dr} \times \frac{1}{r} - F \frac{1}{r^2} \right) \right]$$

即

$$\frac{d\varepsilon_r}{dr} = \frac{1}{E_1} \left[\frac{d^2 F}{dr^2} - \frac{p_m f}{h_a} - \mu \frac{dF}{dr} \times \frac{1}{r} + \mu \frac{F}{r^2} \right] \quad (11-7-7)$$

将 (11-7-7)、(11-7-6) 和 (11-7-5) 式代入 (11-7-4) 式得,

$$\begin{aligned} & \frac{1}{E_1} \left[\frac{dF}{dr} - \frac{p_m f}{h_a} r + \mu \frac{F}{r} - \mu \sigma_z \right] \\ & - \frac{1}{E_1} \left[\frac{F}{r} - \mu \frac{dF}{dr} + \mu \frac{p_m f}{h_a} r - \mu \sigma_z \right] \\ & + \frac{r}{E_1} \left[\frac{d^2 F}{dr^2} - \frac{p_m f}{h_a} - \mu \frac{dF}{dr} \times \frac{1}{r} + \mu \frac{F}{r^2} \right] = 0 \end{aligned}$$

化简后得,

$$r^2 \frac{d^2 F}{dr^2} + r \frac{dF}{dr} - F - \frac{p_m f}{h_a} r^2 (2 + \mu) = 0 \quad (11-7-8)$$

上式为二阶非齐次方程, 它的全解由齐次方程

$$r^2 \frac{d^2 F}{dr^2} + r \frac{dF}{dr} - F = 0 \quad (11-7-9)$$

的通解和非齐次方程 (11-7-8) 的特解相加而得。

方程式 (11-7-9) 的通解为

$$F_1 = C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (11-7-10)$$

方程式 (11-7-8) 的特解为

$$F_2 = -\frac{1}{3} \frac{p_m f}{h_a} r^2 (2 + \mu) \quad (11-7-11)$$

因此方程式 (11-7-8) 的全解为

$$F = F_1 + F_2 = C_1 r + \frac{C_2}{r} + \frac{1}{3} \frac{p_m f}{h_d} r^2 (2 + \mu)$$

將 $F = r\sigma_r$ 代入則得

$$\sigma_r = C_1 + \frac{C_2}{r^2} + \frac{1}{3} \frac{p_m f}{h_d} r (2 + \mu) \quad (11-7-12)$$

將边界条件 $r = 0$ 时, $\sigma_r = 0$; $r = R$ 时 $\sigma_r = q$ 代入(11-7-12) 式得:

$$0 = C_1 + \frac{C_2}{a^2} + \frac{1}{3} \times \frac{p_m f}{h_d} a (2 + \mu)$$

$$q = C_1 + \frac{C_2}{R^2} + \frac{1}{3} \times \frac{p_m f}{h_d} R (2 + \mu)$$

由以上两式可解出 C_1 、 C_2

$$C_1 = \frac{R^2 q}{R^2 - a^2} - \frac{1}{3} \times \frac{p_m f}{h_d} (2 + \mu) \frac{(R - a) R^2}{R^2 - a^2} \\ - \frac{1}{3} \times \frac{p_m f}{h_d} a (2 + \mu)$$

$$C_2 = -\frac{R^2 a^2 q}{R^2 - a^2} + \frac{1}{3} \times \frac{p_m f}{h_d} (2 + \mu) \frac{(R - a) R^2 a^2}{R^2 - a^2}$$

將 C_1 、 C_2 代入式 (11-7-12) 得:

$$\sigma_r = \frac{R^2}{R^2 - a^2} q \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{p_m f}{3 h_d} (2 + \mu) \\ \times \left[\frac{R^2}{R + a} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (r - a) \right] \quad (11-7-13)$$

由平衡方式 (11-7-1) 可得:

$$\sigma_t = \sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{p_m f}{h_d} r \quad (11-7-14)$$

將(11-7-13)式微分可求出 $\frac{d\sigma_r}{dr}$:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{R^2}{R^2 - a^2} q \frac{2a^2}{r^3} - \frac{p_m f}{3 h_d} (2 + \mu) \left[\frac{R^2}{R + a} \times \frac{2a^2}{r^3} - 1 \right] \quad (11-7-15)$$

將 (11-7-15) 式代入 (11-7-14) 式得

$$\sigma_r = \frac{R^2}{R^2 - a^2} q \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{p_m f}{3h_d} (2 + \mu) \frac{R^2}{R + a} \\ \times \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{p_m f}{3h_d} \{ r(2 + \mu) - (2 + \mu)a \} \quad (11-7-16)$$

筒底的轴向应力可根据其受力的平衡关系求出,

$$\sigma_z = -p_m + \tau = -\left(p_m - \frac{2t_0 \sigma_{e1}}{R} \right) \quad (11-7-17)$$

式中 R ——筒底内半径;

t_0 ——筒体与筒底连接处的壁厚;

σ_{e1} ——筒体与筒底连接处药筒的弹性极限;

τ ——受筒体牵制引起的应力。

筒底的强度可根据下列条件验算,

$$\sigma_i < \sigma_{ed} \quad (11-7-18)$$

式中 σ_i ——应力强度,

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_t)^2} \quad (11-7-19)$$

σ_{ed} ——药筒底部的弹性限。

附录

附表1 α 值表

P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.00	3.1416									
0.99	3.1103	3.1134	3.1165	3.1197	3.1228	3.1259	3.1291	3.1322	3.1358	3.1385
0.98	3.0792	3.0823	3.0854	3.0885	3.0919	3.0947	3.0979	3.1010	3.1041	3.3072
0.97	3.0483	3.0514	3.0545	3.0576	3.0607	3.0633	3.0668	3.0699	3.0730	3.0761
0.96	3.0176	3.0207	3.0238	3.0268	3.0299	3.0330	3.0360	3.0391	3.0421	3.0452
0.95	2.9871	2.9902	2.9932	2.9963	2.9993	3.0024	3.0054	3.0084	3.0115	3.0145
0.94	2.9563	2.9598	2.9629	2.9659	2.9689	2.9720	2.9750	2.9780	2.9811	2.9841
0.93	2.9267	2.9297	2.9327	2.9357	2.9387	2.9417	2.9448	2.9471	2.9508	2.9538
0.92	2.8969	2.8999	2.9029	2.9058	2.9088	2.9118	2.9148	2.9177	2.9207	2.9237
0.91	2.8673	2.8703	2.8732	2.8762	2.8791	2.8821	2.8850	2.8880	2.8909	2.8939
0.90	2.8379	2.8408	2.8438	2.8467	2.8497	2.8526	2.8556	2.8585	2.8615	2.8644
0.89	2.8087	2.8116	2.8145	2.8175	2.8204	2.8233	2.8262	2.8292	2.8321	2.8350
0.88	2.7797	2.7826	2.7855	2.7884	2.7913	2.7942	2.7971	2.8000	2.8029	2.8058
0.87	2.7509	2.7538	2.7567	2.7595	2.7624	2.7653	2.7682	2.7710	2.7739	2.7768
0.86	2.7223	2.7252	2.7280	2.7309	2.7337	2.7366	2.7394	2.7423	2.7451	2.7480
0.85	2.6939	2.6967	2.6996	2.7024	2.7053	2.7081	2.7110	2.7138	2.7167	2.7195
0.84	2.6657	2.6685	2.6713	2.6742	2.6770	2.6798	2.6826	2.6855	2.6883	2.6911
0.83	2.6378	2.6406	2.6434	2.6462	2.6490	2.6518	2.6545	2.6573	2.6601	2.6629
0.82	2.6101	2.6129	2.6156	2.6184	2.6212	2.6239	2.6267	2.6295	2.6322	2.6350
0.81	2.5826	2.5853	2.5881	2.5908	2.5936	2.5963	2.5991	2.6018	2.6046	2.6073
0.80	2.5552	2.5579	2.5607	2.5634	2.5662	2.5689	2.5717	2.5744	2.5772	2.5799
0.79	2.5281	2.5308	2.5335	2.5362	2.5389	2.5416	2.5444	2.5471	2.5498	2.5525
0.78	2.5012	2.5039	2.5066	2.5093	2.5120	2.5147	2.5173	2.5200	2.5227	2.5254
0.77	2.4745	2.4772	2.4798	2.4825	2.4852	2.4878	2.4905	2.4931	2.4958	2.4985
0.76	2.4480	2.4506	2.4533	2.4559	2.4586	2.4612	2.4639	2.4665	2.4692	2.4718
0.75	2.4217	2.4243	2.4270	2.4296	2.4322	2.4349	2.4275	2.4401	2.4428	2.4454
0.74	2.3956	2.3982	2.4008	2.4034	2.4060	2.4086	2.4113	2.4139	2.4165	2.4191
0.73	2.3697	2.3723	2.3749	2.3775	2.3801	2.3827	2.3852	2.3878	2.3904	2.3930
0.72	2.3440	2.3466	2.3491	2.3517	2.3543	2.3568	2.3594	2.3620	2.3645	2.3671
0.71	2.3186	2.3211	2.3237	2.3262	2.3288	2.3313	2.3339	2.3364	2.3390	2.3415
0.70	2.2934	2.2959	2.2984	2.3010	2.3035	2.3060	2.3085	2.3111	2.3136	2.3161
0.69	2.2684	2.2709	2.2734	2.2759	2.2784	2.2809	2.2834	2.2859	2.2884	2.2909
0.68	2.2435	2.2460	2.2485	2.2510	2.2535	2.2560	2.2584	2.2609	2.2634	2.2659
0.67	2.2189	2.2214	2.2238	2.2263	2.2287	2.2312	2.2336	2.2361	2.2385	2.2410
0.66	2.1945	2.1969	2.1994	2.2018	2.2043	2.2067	2.2092	2.2116	2.2140	2.2165

(续)

ρ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.65	2.1703	2.1727	2.1751	2.1776	2.1800	2.1824	2.1848	2.1873	2.1897	2.1921
0.64	2.1463	2.1487	2.1511	2.1535	2.1559	2.1583	2.1607	2.1631	2.1655	2.1679
0.63	2.1225	2.1249	2.1273	2.1296	2.1320	2.1344	2.1368	2.1391	2.1415	2.1439
0.62	2.0990	2.1013	2.1037	2.1060	2.1084	2.1107	2.1131	2.1154	2.1178	2.1201
0.61	2.0756	2.0770	2.0808	2.0826	2.0850	2.0873	2.0897	2.0920	2.0944	2.0967
0.60	2.0525	2.0548	2.0571	2.0594	2.0617	2.0640	2.0668	2.0687	2.0710	2.0733
0.59	2.0296	2.0319	2.0342	2.0365	2.0388	2.0411	2.0438	2.0456	2.0479	2.0502
0.58	2.0069	2.0092	2.0114	2.0137	2.0160	2.0182	2.0205	2.0228	2.0250	2.0275
0.57	1.9844	1.9866	1.9889	1.9911	1.9934	1.9956	1.9979	2.0001	2.0024	2.0046
0.56	1.9621	1.9643	1.9666	1.9688	1.9710	1.9733	1.9755	1.9777	1.9800	1.9822
0.55	1.9400	1.9422	1.9444	1.9466	1.9488	1.9510	1.9533	1.9555	1.9577	1.9599
0.54	1.9180	1.9202	1.9224	1.9246	1.9268	1.9290	1.9312	1.9334	1.9356	1.9378
0.53	1.8963	1.8985	1.9006	1.9028	1.9050	1.9071	1.9093	1.9115	1.9136	1.9155
0.52	1.8749	1.8776	1.8792	1.8813	1.8835	1.8856	1.8878	1.8899	1.8921	1.8942
0.51	1.8537	1.8556	1.8579	1.8601	1.8622	1.8643	1.8664	1.8686	1.8707	1.8726
0.50	1.8326	1.8347	1.8368	1.8389	1.8410	1.8431	1.8453	1.8474	1.8495	1.8516
0.49	1.8118	1.8139	1.8160	1.8180	1.8201	1.8222	1.8242	1.8263	1.8284	1.8305
0.48	1.7911	1.7932	1.7952	1.7973	1.7994	1.8014	1.8035	1.8056	1.8076	1.8097
0.47	1.7707	1.7727	1.7748	1.7768	1.7789	1.7809	1.7830	1.7850	1.7871	1.7891
0.46	1.7505	1.7525	1.7546	1.7566	1.7586	1.7606	1.7626	1.7647	1.7667	1.7687
0.45	1.7305	1.7325	1.7345	1.7365	1.7385	1.7405	1.7425	1.7445	1.7465	1.7485
0.44	1.7107	1.7127	1.7147	1.7166	1.7186	1.7206	1.7226	1.7245	1.7265	1.7285
0.43	1.6911	1.6931	1.6950	1.6970	1.6989	1.7009	1.7028	1.7048	1.7067	1.7087
0.42	1.6717	1.6736	1.6756	1.6776	1.6795	1.6814	1.6834	1.6853	1.6873	1.6892
0.41	1.6526	1.6545	1.6564	1.6583	1.6602	1.6621	1.6641	1.6660	1.6679	1.6698
0.40	1.6336	1.6355	1.6374	1.6393	1.6412	1.6431	1.6450	1.6469	1.6488	1.6507
0.39	1.6149	1.6168	1.6186	1.6205	1.6224	1.6242	1.6261	1.6280	1.6298	1.6317
0.38	1.5964	1.5982	1.6001	1.6019	1.6038	1.6056	1.6075	1.6093	1.6112	1.6130
0.37	1.5780	1.5798	1.5817	1.5835	1.5854	1.5872	1.5891	1.5909	1.5928	1.5946
0.36	1.5599	1.5617	1.5635	1.5653	1.5671	1.5689	1.5707	1.5726	1.5744	1.5762
0.35	1.5420	1.5438	1.5456	1.5474	1.5492	1.5510	1.5527	1.5545	1.5563	1.5581
0.34	1.5243	1.5261	1.5278	1.5296	1.5314	1.5331	1.5349	1.5367	1.5384	1.5402
0.33	1.5068	1.5085	1.5103	1.5120	1.5138	1.5155	1.5173	1.5190	1.5208	1.5225
0.32	1.4895	1.4912	1.4930	1.4947	1.4964	1.4982	1.4999	1.5016	1.5034	1.5051
0.31	1.4725	1.4742	1.4759	1.4776	1.4793	1.4810	1.4827	1.4844	1.4861	1.4876
0.30	1.4556	1.4573	1.4590	1.4607	1.4624	1.4641	1.4657	1.4674	1.4691	1.4708
0.29	1.4390	1.4407	1.4423	1.4440	1.4456	1.4473	1.4489	1.4506	1.4522	1.4539
0.28	1.4225	1.4241	1.4258	1.4274	1.4291	1.4307	1.4323	1.4340	1.4356	1.4373
0.27	1.4063	1.4079	1.4095	1.4111	1.4128	1.4144	1.4160	1.4177	1.4193	1.4209
0.26	1.3903	1.3919	1.3935	1.3951	1.3967	1.3983	1.3999	1.4015	1.4031	1.4047
0.25	1.3745	1.3761	1.3777	1.3792	1.3808	1.3824	1.3840	1.3855	1.3871	1.3887
0.24	1.3589	1.3605	1.3620	1.3636	1.3651	1.3667	1.3682	1.3698	1.3713	1.3729
0.23	1.3435	1.3450	1.3466	1.3481	1.3497	1.3512	1.3528	1.3543	1.3559	1.3574
0.22	1.3283	1.3298	1.3313	1.3329	1.3344	1.3359	1.3374	1.3390	1.3405	1.3420
0.21	1.3133	1.3148	1.3163	1.3178	1.3193	1.3208	1.3223	1.3238	1.3253	1.3268

(续)

p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.20	1.2985	1.3000	1.3015	1.3029	1.3044	1.3059	1.3074	1.3088	1.3101	1.3118
0.19	1.2840	1.2854	1.2869	1.2883	1.2868	1.2912	1.2927	1.2941	1.2956	1.2970
0.18	1.2697	1.2711	1.2726	1.2740	1.2754	1.2769	1.2783	1.2797	1.2812	1.2826
0.17	1.2556	1.2570	1.2584	1.2598	1.2612	1.2626	1.2641	1.2655	1.2669	1.2683
0.16	1.2417	1.2431	1.2445	1.2459	1.2473	1.2487	1.2500	1.2514	1.2528	1.2542
0.15	1.2280	1.2294	1.2307	1.2321	1.2335	1.2348	1.2362	1.2376	1.2389	1.2403
0.14	1.2145	1.2158	1.2172	1.2185	1.2199	1.2212	1.2226	1.2239	1.2253	1.2266
0.13	1.2013	1.2025	1.2039	1.2052	1.2065	1.2079	1.2092	1.2105	1.2119	1.2132
0.12	1.1881	1.1894	1.1907	1.1920	1.1933	1.1946	1.1960	1.1973	1.1986	1.1999
0.11	1.1752	1.1765	1.1778	1.1791	1.1804	1.1817	1.1829	1.1842	1.1855	1.1868
0.10	1.1625	1.1638	1.1650	1.1663	1.1675	1.1688	1.1701	1.1714	1.1726	1.1736
0.09	1.1500	1.1512	1.1525	1.1537	1.1550	1.1562	1.1575	1.1587	1.1600	1.1612
0.08	1.1377	1.1389	1.1402	1.1414	1.1420	1.1439	1.1451	1.1463	1.1476	1.1488
0.07	1.1256	1.1268	1.1280	1.1292	1.1303	1.1316	1.1329	1.1340	1.1353	1.1365
0.06	1.1138	1.1150	1.1162	1.1173	1.1185	1.1197	1.1209	1.1220	1.1232	1.1244
0.05	1.1022	1.1034	1.1045	1.1057	1.1068	1.1080	1.1091	1.1103	1.1114	1.1126
0.04	1.0908	1.0919	1.0931	1.0942	1.0954	1.0965	1.0977	1.0988	1.1000	1.1011
0.03	1.0796	1.0807	1.0818	1.0830	1.0841	1.0852	1.0863	1.0875	1.0886	1.0897
0.02	1.0685	1.0697	1.0708	1.0719	1.0730	1.0741	1.0752	1.0763	1.0774	1.0785
0.01	1.0578	1.0589	1.0600	1.0610	1.0621	1.0632	1.0643	1.0653	1.0664	1.0675
0.00	1.0472	1.0483	1.0493	1.0504	1.0515	1.0525	1.0535	1.0546	1.0556	1.0567

附表 2 β 值 表

p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.00	0.5000									
0.99	0.4983	0.4985	0.4986	0.4988	0.4990	0.4991	0.4993	0.4995	0.4996	0.4998
0.98	0.4966	0.4968	0.4969	0.4971	0.4973	0.4974	0.4976	0.4978	0.4979	0.4981
0.97	0.4949	0.4951	0.4952	0.4954	0.4956	0.4957	0.4959	0.4961	0.4962	0.4964
0.96	0.4932	0.4934	0.4935	0.4937	0.4939	0.4940	0.4942	0.4944	0.4945	0.4947
0.95	0.4915	0.4917	0.4918	0.4920	0.4922	0.4923	0.4925	0.4927	0.4928	0.4930
0.94	0.4897	0.4899	0.4901	0.4902	0.4904	0.4906	0.4908	0.4909	0.4911	0.4913
0.93	0.4879	0.4881	0.4883	0.4884	0.4886	0.4888	0.4890	0.4891	0.4893	0.4895
0.92	0.4861	0.4863	0.4865	0.4866	0.4868	0.4870	0.4872	0.4873	0.4875	0.4877
0.91	0.4843	0.4845	0.4847	0.4848	0.4850	0.4852	0.4854	0.4855	0.4857	0.4859
0.90	0.4825	0.4827	0.4829	0.4830	0.4832	0.4834	0.4836	0.4837	0.4839	0.4841
0.89	0.4806	0.4808	0.4810	0.4812	0.4814	0.4816	0.4817	0.4819	0.4821	0.4823
0.88	0.4787	0.4789	0.4791	0.4793	0.4795	0.4797	0.4798	0.4800	0.4802	0.4804
0.87	0.4768	0.4770	0.4772	0.4774	0.4776	0.4778	0.4779	0.4781	0.4783	0.4785
0.86	0.4749	0.4751	0.4753	0.4755	0.4757	0.4759	0.4760	0.4762	0.4764	0.4766

(续)

p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.85	0.4730	0.4732	0.4734	0.4736	0.4738	0.4740	0.4741	0.4743	0.4745	0.4747
0.84	0.4713	0.4715	0.4717	0.4719	0.4721	0.4723	0.4725	0.4727	0.4729	0.4731
0.83	0.4697	0.4699	0.4701	0.4703	0.4705	0.4707	0.4709	0.4711	0.4713	0.4715
0.82	0.4671	0.4673	0.4675	0.4677	0.4679	0.4681	0.4683	0.4685	0.4687	0.4689
0.81	0.4655	0.4657	0.4659	0.4661	0.4663	0.4665	0.4667	0.4669	0.4671	0.4673
0.80	0.4631	0.4633	0.4635	0.4637	0.4639	0.4641	0.4643	0.4645	0.4647	0.4649
0.79	0.4611	0.4613	0.4615	0.4617	0.4619	0.4621	0.4623	0.4625	0.4627	0.4629
0.78	0.4590	0.4592	0.4594	0.4596	0.4598	0.4600	0.4603	0.4605	0.4607	0.4609
0.77	0.4569	0.4571	0.4573	0.4575	0.4577	0.4579	0.4582	0.4584	0.4586	0.4588
0.76	0.4548	0.4550	0.4552	0.4554	0.4556	0.4558	0.4561	0.4563	0.4565	0.4567
0.75	0.4527	0.4529	0.4531	0.4533	0.4535	0.4537	0.4540	0.4542	0.4544	0.4546
0.74	0.4506	0.4508	0.4510	0.4512	0.4514	0.4516	0.4519	0.4521	0.4523	0.4525
0.73	0.4484	0.4486	0.4488	0.4491	0.4493	0.4495	0.4497	0.4500	0.4502	0.4504
0.72	0.4462	0.4464	0.4466	0.4469	0.4471	0.4473	0.4475	0.4478	0.4480	0.4482
0.71	0.4440	0.4442	0.4444	0.4447	0.4449	0.4451	0.4453	0.4456	0.4458	0.4460
0.70	0.4418	0.4420	0.4422	0.4425	0.4427	0.4429	0.4431	0.4434	0.4436	0.4438
0.69	0.4396	0.4398	0.4400	0.4403	0.4405	0.4407	0.4409	0.4412	0.4414	0.4416
0.68	0.4374	0.4376	0.4378	0.4381	0.4383	0.4385	0.4387	0.4390	0.4392	0.4394
0.67	0.4351	0.4353	0.4356	0.4358	0.4360	0.4363	0.4365	0.4367	0.4370	0.4372
0.66	0.4328	0.4330	0.4333	0.4335	0.4337	0.4340	0.4342	0.4344	0.4347	0.4349
0.65	0.4304	0.4306	0.4309	0.4311	0.4314	0.4316	0.4319	0.4321	0.4324	0.4326
0.64	0.4280	0.4282	0.4285	0.4287	0.4290	0.4292	0.4295	0.4297	0.4300	0.4302
0.63	0.4256	0.4258	0.4261	0.4263	0.4266	0.4268	0.4271	0.4273	0.4276	0.4278
0.62	0.4232	0.4234	0.4237	0.4239	0.4242	0.4244	0.4247	0.4249	0.4252	0.4254
0.61	0.4208	0.4210	0.4213	0.4215	0.4218	0.4220	0.4223	0.4225	0.4228	0.4230
0.60	0.4184	0.4186	0.4189	0.4191	0.4194	0.4196	0.4199	0.4201	0.4204	0.4206
0.59	0.4159	0.4161	0.4164	0.4166	0.4169	0.4171	0.4174	0.4176	0.4179	0.4181
0.58	0.4134	0.4136	0.4139	0.4141	0.4144	0.4146	0.4149	0.4151	0.4154	0.4156
0.57	0.4109	0.4111	0.4114	0.4116	0.4119	0.4121	0.4124	0.4126	0.4129	0.4131
0.56	0.4084	0.4086	0.4089	0.4091	0.4094	0.4096	0.4099	0.4101	0.4104	0.4106
0.55	0.4059	0.4061	0.4064	0.4066	0.4069	0.4071	0.4074	0.4076	0.4079	0.4081
0.54	0.4033	0.4036	0.4038	0.4041	0.4043	0.4046	0.4048	0.4051	0.4053	0.4056
0.53	0.4007	0.4010	0.4012	0.4015	0.4017	0.4020	0.4022	0.4025	0.4027	0.4030
0.52	0.3981	0.3984	0.3986	0.3989	0.3991	0.3994	0.3996	0.3999	0.4001	0.4004
0.51	0.3955	0.3958	0.3960	0.3963	0.3965	0.3968	0.3970	0.3973	0.3975	0.3978
0.50	0.3929	0.3932	0.3934	0.3937	0.3939	0.3942	0.3944	0.3947	0.3949	0.3952
0.49	0.3902	0.3905	0.3907	0.3910	0.3913	0.3915	0.3918	0.3921	0.3923	0.3926
0.48	0.3875	0.3878	0.3880	0.3883	0.3886	0.3888	0.3891	0.3894	0.3896	0.3899
0.47	0.3848	0.3851	0.3853	0.3856	0.3859	0.3861	0.3864	0.3867	0.3869	0.3872
0.46	0.3821	0.3824	0.3826	0.3829	0.3832	0.3834	0.3837	0.3840	0.3842	0.3845
0.45	0.3794	0.3797	0.3799	0.3802	0.3805	0.3807	0.3810	0.3813	0.3815	0.3818
0.44	0.3766	0.3769	0.3772	0.3774	0.3777	0.3780	0.3783	0.3785	0.3788	0.3791
0.43	0.3738	0.3741	0.3744	0.3746	0.3749	0.3752	0.3755	0.3757	0.3760	0.3763
0.42	0.3710	0.3713	0.3716	0.3718	0.3721	0.3724	0.3727	0.3729	0.3732	0.3735
0.41	0.3682	0.3685	0.3688	0.3690	0.3693	0.3696	0.3699	0.3701	0.3704	0.3707

(续)

P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.40	0.3654	0.3657	0.3660	0.3662	0.3665	0.3668	0.3671	0.3673	0.3676	0.3679
0.39	0.3625	0.3629	0.3632	0.3634	0.3637	0.3640	0.3643	0.3645	0.3648	0.3651
0.38	0.3597	0.3600	0.3603	0.3606	0.3609	0.3612	0.3614	0.3614	0.3620	0.3623
0.37	0.3568	0.3571	0.3574	0.3577	0.3580	0.3583	0.3585	0.3588	0.3591	0.3594
0.36	0.3539	0.3542	0.3545	0.3548	0.3551	0.3554	0.3556	0.3559	0.3562	0.3565
0.35	0.3510	0.3513	0.3516	0.3519	0.3522	0.3525	0.3527	0.3530	0.3533	0.3536
0.34	0.3481	0.3484	0.3487	0.3490	0.3493	0.3496	0.3498	0.3501	0.3504	0.3507
0.33	0.3452	0.3455	0.3458	0.3461	0.3464	0.3467	0.3469	0.3472	0.3475	0.3478
0.32	0.3423	0.3426	0.3429	0.3432	0.3435	0.3438	0.3440	0.3443	0.3446	0.3449
0.31	0.3393	0.3396	0.3399	0.3402	0.3405	0.3408	0.3411	0.3414	0.3417	0.3420
0.30	0.3363	0.3366	0.3369	0.3372	0.3375	0.3378	0.3381	0.3384	0.3387	0.3390
0.29	0.3334	0.3337	0.3340	0.3343	0.3346	0.3349	0.3351	0.3354	0.3357	0.3360
0.28	0.3304	0.3307	0.3310	0.3313	0.3316	0.3319	0.3322	0.3325	0.3328	0.3331
0.27	0.3274	0.3277	0.3280	0.3283	0.3286	0.3289	0.3292	0.3295	0.3298	0.3301
0.26	0.3244	0.3247	0.3250	0.3253	0.3256	0.3259	0.3262	0.3265	0.3268	0.3271
0.25	0.3214	0.3217	0.3220	0.3223	0.3226	0.3229	0.3232	0.3235	0.3238	0.3241
0.24	0.3184	0.3187	0.3190	0.3193	0.3196	0.3199	0.3202	0.3205	0.3208	0.3211
0.23	0.3154	0.3157	0.3160	0.3163	0.3166	0.3169	0.3172	0.3175	0.3178	0.3181
0.22	0.3125	0.3128	0.3131	0.3134	0.3137	0.3140	0.3142	0.3145	0.3148	0.3151
0.21	0.3095	0.3098	0.3101	0.3104	0.3107	0.3110	0.3113	0.3116	0.3119	0.3122
0.20	0.3065	0.3068	0.3071	0.3074	0.3077	0.3080	0.3083	0.3086	0.3089	0.3092
0.19	0.3035	0.3038	0.3041	0.3044	0.3047	0.3050	0.3053	0.3056	0.3059	0.3062
0.18	0.3005	0.3008	0.3011	0.3014	0.3017	0.3020	0.3023	0.3026	0.3029	0.3032
0.17	0.2976	0.2979	0.2982	0.2985	0.2988	0.2991	0.2994	0.2996	0.2999	0.3002
0.16	0.2946	0.2949	0.2952	0.2955	0.2958	0.2961	0.2964	0.2967	0.2970	0.2973
0.15	0.2916	0.2919	0.2922	0.2925	0.2928	0.2931	0.2934	0.2937	0.2940	0.2943
0.14	0.2887	0.2890	0.2893	0.2896	0.2899	0.2902	0.2904	0.2907	0.2910	0.2913
0.13	0.2857	0.2860	0.2863	0.2866	0.2869	0.2872	0.2875	0.2878	0.2881	0.2884
0.12	0.2828	0.2831	0.2834	0.2837	0.2840	0.2843	0.2845	0.2848	0.2851	0.2854
0.11	0.2799	0.2802	0.2805	0.2808	0.2811	0.2814	0.2816	0.2819	0.2822	0.2825
0.10	0.2770	0.2773	0.2776	0.2779	0.2782	0.2785	0.2787	0.2790	0.2793	0.2796
0.09	0.2742	0.2745	0.2748	0.2750	0.2753	0.2756	0.2759	0.2761	0.2764	0.2767
0.08	0.2714	0.2717	0.2720	0.2722	0.2725	0.2728	0.2731	0.2733	0.2736	0.2739
0.07	0.2686	0.2689	0.2692	0.2694	0.2697	0.2700	0.2703	0.2705	0.2708	0.2711
0.06	0.2659	0.2662	0.2664	0.2667	0.2670	0.2673	0.2675	0.2678	0.2680	0.2683
0.05	0.2631	0.2634	0.2637	0.2639	0.2642	0.2645	0.2648	0.2650	0.2653	0.2656
0.04	0.2604	0.2607	0.2609	0.2612	0.2615	0.2617	0.2620	0.2623	0.2625	0.2628
0.03	0.2578	0.2581	0.2583	0.2586	0.2588	0.2591	0.2593	0.2596	0.2598	0.2601
0.02	0.2552	0.2555	0.2558	0.2560	0.2563	0.2565	0.2568	0.2570	0.2573	0.2575
0.01	0.2526	0.2529	0.2531	0.2534	0.2536	0.2539	0.2541	0.2544	0.2546	0.2549
0.00	0.2500	0.2502	0.2505	0.2508	0.2510	0.2513	0.2515	0.2518	0.2520	0.2523

附表 3 μ 值 表

P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.0	0.5000									
0.99	0.4955	0.4955	0.4960	0.4965	0.4970	0.4975	0.4980	0.4985	0.4990	0.4995
0.98	0.4901	0.4906	0.4911	0.4916	0.4921	0.4926	0.4931	0.4935	0.4940	0.4945
0.97	0.4852	0.4857	0.4862	0.4867	0.4872	0.4877	0.4881	0.4886	0.4891	0.4896
0.96	0.4804	0.4809	0.4814	0.4819	0.4823	0.4828	0.4833	0.4837	0.4842	0.4847
0.95	0.4757	0.4762	0.4767	0.4771	0.4776	0.4781	0.4785	0.4790	0.4794	0.4799
0.94	0.4711	0.4716	0.4720	0.4725	0.4729	0.4734	0.4738	0.4743	0.4747	0.4752
0.93	0.4665	0.4670	0.4674	0.4679	0.4683	0.4688	0.4692	0.4697	0.4701	0.4706
0.92	0.4620	0.4625	0.4629	0.4634	0.4638	0.4643	0.4647	0.4652	0.4656	0.4660
0.91	0.4576	0.4580	0.4585	0.4589	0.4594	0.4598	0.4603	0.4607	0.4612	0.4616
0.90	0.4533	0.4537	0.4542	0.4546	0.4550	0.4555	0.4559	0.4563	0.4568	0.4572
0.89	0.4491	0.4495	0.4499	0.4504	0.4508	0.4512	0.4516	0.4521	0.4525	0.4529
0.88	0.4449	0.4453	0.4457	0.4462	0.4466	0.4470	0.4474	0.4479	0.4483	0.4487
0.87	0.4407	0.4411	0.4415	0.4420	0.4424	0.4428	0.4432	0.4437	0.4441	0.4445
0.86	0.4366	0.4370	0.4374	0.4378	0.4382	0.4386	0.4391	0.4395	0.4399	0.4403
0.85	0.4325	0.4329	0.4332	0.4337	0.4341	0.4345	0.4350	0.4354	0.4358	0.4362
0.84	0.4285	0.4289	0.4293	0.4297	0.4301	0.4305	0.4309	0.4313	0.4317	0.4321
0.83	0.4246	0.4250	0.4254	0.4258	0.4262	0.4266	0.4269	0.4273	0.4277	0.4281
0.82	0.4208	0.4212	0.4216	0.4219	0.4223	0.4227	0.4231	0.4234	0.4238	0.4242
0.81	0.4170	0.4174	0.4178	0.4181	0.4185	0.4189	0.4192	0.4196	0.4200	0.4204
0.80	0.4133	0.4137	0.4140	0.4144	0.4148	0.4151	0.4155	0.4159	0.4162	0.4166
0.79	0.4097	0.4101	0.4104	0.4108	0.4111	0.4115	0.4118	0.4122	0.4125	0.4129
0.78	0.4061	0.4065	0.4068	0.4072	0.4075	0.4079	0.4082	0.4086	0.4089	0.4093
0.77	0.4026	0.4030	0.4033	0.4037	0.4040	0.4043	0.4047	0.4050	0.4054	0.4057
0.76	0.3992	0.3995	0.3999	0.4002	0.4006	0.4009	0.4013	0.4016	0.4020	0.4023
0.75	0.3958	0.3961	0.3965	0.3968	0.3972	0.3975	0.3979	0.3982	0.3985	0.3989
0.74	0.3925	0.3928	0.3932	0.3935	0.3938	0.3942	0.3945	0.3948	0.3952	0.3955
0.73	0.3892	0.3895	0.3899	0.3902	0.3905	0.3909	0.3912	0.3915	0.3919	0.3922
0.72	0.3860	0.3863	0.3866	0.3870	0.3873	0.3876	0.3879	0.3883	0.3886	0.3889
0.71	0.3829	0.3832	0.3835	0.3838	0.3841	0.3844	0.3848	0.3851	0.3854	0.3857
0.70	0.3798	0.3801	0.3804	0.3807	0.3810	0.3813	0.3817	0.3820	0.3823	0.3826
0.69	0.3768	0.3771	0.3774	0.3777	0.3780	0.3783	0.3786	0.3789	0.3792	0.3795
0.68	0.3739	0.3742	0.3745	0.3748	0.3751	0.3754	0.3756	0.3759	0.3762	0.3766
0.67	0.3710	0.3713	0.3716	0.3719	0.3722	0.3725	0.3727	0.3730	0.3733	0.3736
0.66	0.3682	0.3685	0.3688	0.3690	0.3693	0.3696	0.3699	0.3701	0.3704	0.3707
0.65	0.3655	0.3658	0.3661	0.3663	0.3666	0.3668	0.3671	0.3674	0.3676	0.3679
0.64	0.3629	0.3632	0.3634	0.3637	0.3639	0.3642	0.3644	0.3647	0.3649	0.3652
0.63	0.3603	0.3606	0.3608	0.3611	0.3613	0.3616	0.3618	0.3621	0.3623	0.3626
0.62	0.3579	0.3581	0.3583	0.3586	0.3588	0.3591	0.3593	0.3596	0.3598	0.3601
0.61	0.3553	0.3556	0.3558	0.3561	0.3563	0.3566	0.3568	0.3571	0.3573	0.3576
0.60	0.3529	0.3531	0.3534	0.3536	0.3539	0.3541	0.3544	0.3546	0.3549	0.3551
0.59	0.3505	0.3507	0.3510	0.3512	0.3515	0.3517	0.3520	0.3522	0.3525	0.3527
0.58	0.3482	0.3484	0.3487	0.3489	0.3491	0.3494	0.3496	0.3498	0.3501	0.3503
0.57	0.3460	0.3462	0.3464	0.3467	0.3469	0.3471	0.3473	0.3476	0.3478	0.3480
0.56	0.3438	0.3440	0.3442	0.3445	0.3447	0.3449	0.3451	0.3454	0.3456	0.3458

(续)

p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.55	0.3417	0.3419	0.3421	0.3423	0.3425	0.3427	0.3430	0.3432	0.3434	0.3436
0.54	0.3397	0.3399	0.3401	0.3403	0.3405	0.3407	0.3409	0.3411	0.3413	0.3415
0.53	0.3377	0.3379	0.3381	0.3383	0.3385	0.3387	0.3389	0.3391	0.3393	0.3395
0.52	0.3358	0.3360	0.3362	0.3364	0.3366	0.3368	0.3369	0.3371	0.3373	0.3375
0.51	0.3339	0.3341	0.3343	0.3345	0.3347	0.3349	0.3350	0.3352	0.3354	0.3356
0.50	0.3321	0.3323	0.3325	0.3326	0.3328	0.3330	0.3332	0.3333	0.3335	0.3337
0.49	0.3304	0.3305	0.3307	0.3309	0.3311	0.3312	0.3314	0.3316	0.3317	0.3319
0.48	0.3287	0.3288	0.3290	0.3291	0.3293	0.3295	0.3297	0.3299	0.3300	0.3302
0.47	0.3271	0.3272	0.3274	0.3275	0.3277	0.3278	0.3280	0.3281	0.3283	0.3285
0.46	0.3255	0.3256	0.3258	0.3259	0.3261	0.3262	0.3264	0.3265	0.3267	0.3269
0.45	0.3240	0.3241	0.3242	0.3244	0.3246	0.3247	0.3249	0.3250	0.3252	0.3253
0.44	0.3225	0.3226	0.3228	0.3229	0.3231	0.3232	0.3234	0.3235	0.3237	0.3238
0.43	0.3211	0.3212	0.3214	0.3215	0.3217	0.3218	0.3220	0.3221	0.3223	0.3224
0.42	0.3197	0.3198	0.3200	0.3201	0.3203	0.3204	0.3206	0.3207	0.3209	0.3210
0.41	0.3184	0.3185	0.3187	0.3188	0.3189	0.3191	0.3192	0.3193	0.3195	0.3196
0.40	0.3172	0.3173	0.3174	0.3176	0.3177	0.3178	0.3179	0.3181	0.3182	0.3183
0.39	0.3161	0.3162	0.3163	0.3164	0.3165	0.3166	0.3168	0.3169	0.3170	0.3171
0.38	0.3150	0.3151	0.3152	0.3153	0.3154	0.3155	0.3157	0.3158	0.3159	0.3160
0.37	0.3139	0.3140	0.3141	0.3142	0.3143	0.3144	0.3146	0.3147	0.3148	0.3149
0.36	0.3128	0.3129	0.3130	0.3131	0.3132	0.3133	0.3134	0.3135	0.3136	0.3138
0.35	0.3118	0.3119	0.3120	0.3121	0.3122	0.3123	0.3124	0.3125	0.3126	0.3127
0.34	0.3109	0.3110	0.3111	0.3112	0.3113	0.3114	0.3114	0.3115	0.3116	0.3117
0.33	0.3100	0.3101	0.3102	0.3103	0.3104	0.3105	0.3105	0.3106	0.3107	0.3108
0.32	0.3091	0.3092	0.3093	0.3094	0.3095	0.3096	0.3096	0.3097	0.3098	0.3099
0.31	0.3083	0.3084	0.3085	0.3085	0.3086	0.3087	0.3088	0.3088	0.3089	0.3090
0.30	0.3075	0.3076	0.3077	0.3077	0.3078	0.3079	0.3080	0.3080	0.3081	0.3082
0.29	0.3068	0.3069	0.3069	0.3070	0.3071	0.3071	0.3072	0.3073	0.3073	0.3074
0.28	0.3062	0.3063	0.3063	0.3064	0.3064	0.3065	0.3065	0.3066	0.3066	0.3067
0.27	0.3056	0.3057	0.3057	0.3058	0.3058	0.3059	0.3059	0.3060	0.3060	0.3061
0.26	0.3050	0.3051	0.3051	0.3052	0.3052	0.3053	0.3053	0.3054	0.3054	0.3055
0.25	0.3045	0.3045	0.3046	0.3046	0.3047	0.3047	0.3048	0.3048	0.3049	0.3049
0.24	0.3040	0.3040	0.3041	0.3041	0.3042	0.3042	0.3043	0.3043	0.3044	0.3044
0.23	0.3035	0.3035	0.3036	0.3036	0.3037	0.3037	0.3038	0.3038	0.3039	0.3039
0.22	0.3031	0.3031	0.3032	0.3032	0.3033	0.3033	0.3034	0.3034	0.3035	0.3035
0.21	0.3027	0.3027	0.3028	0.3028	0.3029	0.3029	0.3030	0.3030	0.3031	0.3031
0.20	0.3023	0.3023	0.3024	0.3024	0.3025	0.3025	0.3026	0.3026	0.3027	0.3027
0.19	0.3020	0.3020	0.3021	0.3021	0.3021	0.3022	0.3022	0.3022	0.3023	0.3023
0.18	0.3017	0.3017	0.3018	0.3018	0.3018	0.3019	0.3019	0.3019	0.3020	0.3020
0.17	0.3014	0.3014	0.3015	0.3015	0.3015	0.3016	0.3016	0.3016	0.3017	0.3017
0.16	0.3012	0.3012	0.3012	0.3013	0.3013	0.3013	0.3013	0.3014	0.3014	0.3014
0.15	0.3010	0.3010	0.3010	0.3011	0.3011	0.3011	0.3011	0.3012	0.3012	0.3012
0.14	0.3008	0.3008	0.3008	0.3009	0.3009	0.3009	0.3009	0.3010	0.3010	0.3010
0.13	0.3006	0.3006	0.3006	0.3007	0.3007	0.3007	0.3007	0.3008	0.3008	0.3008
0.12	0.3005	0.3005	0.3005	0.3005	0.3005	0.3005	0.3006	0.3006	0.3006	0.3006
0.11	0.3004	0.3004	0.3004	0.3004	0.3004	0.3004	0.3005	0.3005	0.3005	0.3005

(续)

ρ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.10	0.3003	0.3003	0.3003	0.3003	0.3003	0.3003	0.3004	0.3004	0.3004	0.3004
0.09	0.3002	0.3002	0.3002	0.3002	0.3002	0.3002	0.3003	0.3003	0.3003	0.3003
0.08	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3002	0.3002	0.3002	0.3002
0.07	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001
0.06	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001
0.05	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3001	0.3001	0.3001	0.3001
0.04	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
0.03	0.3000									
0.02	0.3000									
0.01	0.3000									
0.00	0.3000									

附表4 v 值表

ρ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.0	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833
0.99	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833
0.98	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833
0.97	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833
0.96	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833
0.95	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833
0.94	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833
0.93	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832	0.0833	0.0833	0.0833	0.0833
0.92	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832
0.91	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0832	0.0832	0.0832	0.0832
0.90	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831
0.89	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831	0.0831
0.88	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830
0.87	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0830	0.0830	0.0830	0.0830
0.86	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829
0.85	0.0828	0.0828	0.0828	0.0828	0.0828	0.0828	0.0829	0.0829	0.0829	0.0829
0.84	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827	0.0828	0.0828	0.0828	0.0828
0.83	0.0826	0.0826	0.0826	0.0826	0.0826	0.0826	0.0827	0.0827	0.0827	0.0827
0.82	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825	0.0826	0.0826	0.0826	0.0826
0.81	0.0824	0.0824	0.0824	0.0824	0.0824	0.0824	0.0825	0.0825	0.0825	0.0825
0.80	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0823	0.0824	0.0824	0.0824	0.0824
0.79	0.0821	0.0821	0.0821	0.0822	0.0822	0.0822	0.0822	0.0823	0.0823	0.0823
0.78	0.0820	0.0820	0.0820	0.0820	0.0820	0.0820	0.0821	0.0821	0.0821	0.0821
0.77	0.0819	0.0819	0.0819	0.0819	0.0819	0.0819	0.0820	0.0820	0.0820	0.0820
0.76	0.0817	0.0817	0.0817	0.0818	0.0818	0.0818	0.0818	0.0819	0.0819	0.0819

杜

(续)

P	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.75	0.0815	0.0815	0.0815	0.0816	0.0816	0.0816	0.0816	0.0817	0.0817	0.0817
0.74	0.0813	0.0813	0.0813	0.0814	0.0814	0.0814	0.0814	0.0815	0.0815	0.0815
0.73	0.0812	0.0812	0.0812	0.0812	0.0812	0.0812	0.0813	0.0813	0.0813	0.0813
0.72	0.0810	0.0810	0.0810	0.0811	0.0811	0.0811	0.0811	0.0812	0.0812	0.0812
0.71	0.0808	0.0808	0.0808	0.0809	0.0809	0.0809	0.0809	0.0810	0.0810	0.0810
0.70	0.0806	0.0806	0.0806	0.0807	0.0807	0.0807	0.0807	0.0808	0.0808	0.0808
0.69	0.0804	0.0804	0.0804	0.0805	0.0805	0.0805	0.0805	0.0806	0.0806	0.0806
0.68	0.0802	0.0802	0.0802	0.0803	0.0803	0.0803	0.0803	0.0804	0.0804	0.0804
0.67	0.0800	0.0800	0.0800	0.0801	0.0801	0.0801	0.0801	0.0802	0.0802	0.0802
0.66	0.0797	0.0797	0.0798	0.0798	0.0799	0.0799	0.0799	0.0799	0.0800	0.0800
0.65	0.0794	0.0794	0.0795	0.0795	0.0795	0.0796	0.0796	0.0796	0.0797	0.0797
0.64	0.0792	0.0792	0.0792	0.0793	0.0793	0.0793	0.0793	0.0794	0.0794	0.0794
0.63	0.0789	0.0789	0.0790	0.0790	0.0790	0.0791	0.0791	0.0791	0.0792	0.0792
0.62	0.0786	0.0786	0.0787	0.0787	0.0787	0.0788	0.0788	0.0788	0.0789	0.0789
0.61	0.0783	0.0783	0.0784	0.0784	0.0784	0.0785	0.0785	0.0785	0.0786	0.0786
0.60	0.0780	0.0780	0.0781	0.0781	0.0781	0.0782	0.0782	0.0782	0.0783	0.0783
0.59	0.0777	0.0777	0.0778	0.0778	0.0778	0.0779	0.0779	0.0779	0.0780	0.0780
0.58	0.0774	0.0774	0.0775	0.0775	0.0775	0.0776	0.0776	0.0776	0.0777	0.0777
0.57	0.0771	0.0771	0.0772	0.0772	0.0772	0.0773	0.0773	0.0773	0.0774	0.0774
0.56	0.0767	0.0767	0.0768	0.0768	0.0769	0.0769	0.0770	0.0770	0.0771	0.0771
0.55	0.0763	0.0763	0.0764	0.0764	0.0765	0.0765	0.0766	0.0766	0.0767	0.0767
0.54	0.0759	0.0759	0.0760	0.0760	0.0761	0.0761	0.0762	0.0762	0.0763	0.0763
0.53	0.0755	0.0755	0.0756	0.0756	0.0757	0.0757	0.0758	0.0758	0.0759	0.0759
0.52	0.0751	0.0751	0.0752	0.0752	0.0753	0.0753	0.0754	0.0754	0.0755	0.0755
0.51	0.0747	0.0747	0.0748	0.0748	0.0749	0.0749	0.0750	0.0750	0.0751	0.0751
0.50	0.0742	0.0742	0.0743	0.0743	0.0744	0.0744	0.0745	0.0745	0.0746	0.0746
0.49	0.0738	0.0738	0.0739	0.0739	0.0740	0.0740	0.0741	0.0741	0.0742	0.0742
0.48	0.0733	0.0733	0.0734	0.0734	0.0735	0.0735	0.0736	0.0736	0.0737	0.0737
0.47	0.0728	0.0728	0.0729	0.0729	0.0730	0.0730	0.0731	0.0731	0.0732	0.0732
0.46	0.0723	0.0723	0.0724	0.0724	0.0725	0.0725	0.0726	0.0726	0.0727	0.0727
0.45	0.0718	0.0718	0.0719	0.0719	0.0720	0.0720	0.0721	0.0721	0.0722	0.0722
0.44	0.0713	0.0713	0.0714	0.0714	0.0715	0.0715	0.0716	0.0716	0.0717	0.0717
0.43	0.0708	0.0708	0.0709	0.0709	0.0710	0.0710	0.0711	0.0711	0.0712	0.0712
0.42	0.0702	0.0702	0.0703	0.0703	0.0704	0.0705	0.0706	0.0706	0.0707	0.0707
0.41	0.0697	0.0697	0.0698	0.0698	0.0699	0.0699	0.0700	0.0700	0.0701	0.0701
0.40	0.0691	0.0691	0.0692	0.0692	0.0693	0.0694	0.0695	0.0695	0.0696	0.0696
0.39	0.0685	0.0685	0.0686	0.0687	0.0687	0.0688	0.0688	0.0689	0.0689	0.0690
0.38	0.0679	0.0680	0.0680	0.0681	0.0681	0.0682	0.0682	0.0683	0.0683	0.0684
0.37	0.0673	0.0674	0.0674	0.0675	0.0675	0.0676	0.0676	0.0677	0.0677	0.0678
0.36	0.0666	0.0667	0.0667	0.0668	0.0669	0.0669	0.0670	0.0671	0.0671	0.0672
0.35	0.0659	0.0660	0.0660	0.0661	0.0662	0.0662	0.0663	0.0664	0.0664	0.0665
0.34	0.0653	0.0654	0.0654	0.0655	0.0655	0.0656	0.0656	0.0657	0.0657	0.0658
0.33	0.0646	0.0647	0.0647	0.0648	0.0649	0.0649	0.0650	0.0651	0.0651	0.0652
0.32	0.0639	0.0640	0.0640	0.0641	0.0642	0.0642	0.0643	0.0644	0.0644	0.0645
0.31	0.0632	0.0633	0.0633	0.0634	0.0635	0.0635	0.0636	0.0637	0.0637	0.0638

(续)

ρ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.30	0.0624	0.0625	0.0625	0.0626	0.0627	0.0628	0.0629	0.0629	0.0630	0.0631
0.29	0.0617	0.0618	0.0618	0.0619	0.0620	0.0620	0.0621	0.0622	0.0622	0.0623
0.28	0.0609	0.0610	0.0610	0.0611	0.0612	0.0613	0.0614	0.0614	0.0615	0.0616
0.27	0.0601	0.0602	0.0602	0.0603	0.0604	0.0605	0.0606	0.0607	0.0607	0.0608
0.26	0.0594	0.0595	0.0595	0.0596	0.0597	0.0597	0.0598	0.0599	0.0599	0.0600
0.25	0.0586	0.0587	0.0587	0.0588	0.0589	0.0590	0.0591	0.0591	0.0592	0.0593
0.24	0.0578	0.0579	0.0579	0.0580	0.0581	0.0582	0.0582	0.0583	0.0584	0.0585
0.23	0.0570	0.0571	0.0571	0.0572	0.0573	0.0574	0.0575	0.0575	0.0576	0.0577
0.22	0.0562	0.0563	0.0563	0.0564	0.0565	0.0566	0.0567	0.0567	0.0568	0.0569
0.21	0.0554	0.0555	0.0555	0.0556	0.0557	0.0558	0.0559	0.0559	0.0560	0.0561
0.20	0.0545	0.0546	0.0547	0.0548	0.0549	0.0550	0.0550	0.0551	0.0552	0.0553
0.19	0.0537	0.0538	0.0538	0.0539	0.0540	0.0541	0.0542	0.0542	0.0543	0.0544
0.18	0.0528	0.0529	0.0530	0.0531	0.0532	0.0533	0.0533	0.0534	0.0535	0.0536
0.17	0.0520	0.0521	0.0521	0.0522	0.0523	0.0524	0.0525	0.0525	0.0526	0.0527
0.16	0.0511	0.0512	0.0513	0.0514	0.0515	0.0516	0.0516	0.0517	0.0518	0.0519
0.15	0.0502	0.0503	0.0504	0.0505	0.0506	0.0507	0.0507	0.0508	0.0509	0.0510
0.14	0.0493	0.0494	0.0495	0.0495	0.0497	0.0498	0.0498	0.0499	0.0500	0.0501
0.13	0.0484	0.0485	0.0486	0.0487	0.0488	0.0489	0.0489	0.0490	0.0491	0.0492
0.12	0.0476	0.0477	0.0477	0.0478	0.0479	0.0480	0.0481	0.0481	0.0482	0.0483
0.11	0.0467	0.0468	0.0469	0.0470	0.0471	0.0472	0.0472	0.0473	0.0474	0.0475
0.10	0.0458	0.0459	0.0460	0.0461	0.0462	0.0463	0.0463	0.0464	0.0465	0.0466
0.09	0.0450	0.0451	0.0452	0.0453	0.0453	0.0454	0.0455	0.0455	0.0456	0.0457
0.08	0.0441	0.0442	0.0442	0.0444	0.0445	0.0446	0.0446	0.0447	0.0448	0.0449
0.07	0.0433	0.0434	0.0435	0.0436	0.0436	0.0437	0.0438	0.0438	0.0439	0.0440
0.06	0.0424	0.0425	0.0426	0.0427	0.0428	0.0429	0.0429	0.0430	0.0431	0.0432
0.05	0.0416	0.0417	0.0418	0.0419	0.0419	0.0420	0.0421	0.0421	0.0422	0.0423
0.04	0.0408	0.0409	0.0410	0.0411	0.0411	0.0412	0.0413	0.0413	0.0414	0.0415
0.03	0.0400	0.0401	0.0402	0.0403	0.0403	0.0404	0.0405	0.0406	0.0406	0.0407
0.02	0.0392	0.0393	0.0394	0.0394	0.0395	0.0396	0.0397	0.0397	0.0398	0.0399
0.01	0.0384	0.0385	0.0386	0.0387	0.0387	0.0388	0.0389	0.0389	0.0390	0.0391
0.00	0.0375	0.0376	0.0377	0.0378	0.0379	0.0380	0.0380	0.0381	0.0382	0.0383

附表5 α' 、 β' 、 μ' 及 ν' 值表

弧形回转 体高度 h (口径)	引入量 $\rho = \frac{h}{r}$	弧形回转 体半径 R (口径)	α'	β'	μ'	ν'
0.50	1.00	0.50	2.0945	0.3750	0.4000	0.0613
0.51	1.02	0.51	2.0874	0.3738	0.4000	0.0610
0.52	1.04	0.52	2.0804	0.3727	0.4000	0.0607
0.53	1.06	0.53	2.0733	0.3716	0.4000	0.0604
0.54	1.08	0.54	2.0662	0.3706	0.4000	0.0601

(续)

弧形回转 体高度 h (口径)	引入量 $\rho = \frac{h}{r}$	弧形回转 体半径 R (口径)	α'	β'	μ'	ν'
0.55	1.10	0.55	2.0591	0.3693	0.3999	0.0599
0.56	1.12	0.56	2.0521	0.3682	0.3999	0.0596
0.57	1.14	0.57	2.0450	0.3661	0.3999	0.0593
0.58	1.16	0.59	2.0380	0.3650	0.3999	0.0590
0.59	1.18	0.60	2.0309	0.3648	0.3999	0.0587
0.60	1.20	0.61	2.0238	0.3637	0.3998	0.0584
0.61	1.22	0.62	2.0168	0.3626	0.3998	0.0582
0.62	1.24	0.63	2.0097	0.3615	0.3998	0.0579
0.63	1.26	0.65	2.0026	0.3603	0.3998	0.0576
0.64	1.28	0.66	1.9956	0.3592	0.3998	0.0573
0.65	1.30	0.67	1.9885	0.3581	0.3998	0.0570
0.66	1.32	0.69	1.9814	0.3569	0.3997	0.0568
0.67	1.34	0.70	1.9744	0.3558	0.3997	0.0565
0.68	1.36	0.71	1.9673	0.3547	0.3997	0.0562
0.69	1.38	0.73	1.9602	0.3536	0.3997	0.0559
0.70	1.40	0.74	1.9532	0.3524	0.3997	0.0556
0.71	1.42	0.75	1.9461	0.3513	0.3996	0.0554
0.72	1.44	0.77	1.9390	0.3502	0.3996	0.0551
0.73	1.46	0.78	1.9320	0.3491	0.3996	0.0548
0.74	1.48	0.80	1.9249	0.3479	0.3996	0.0545
0.75	1.50	0.81	1.9178	0.3468	0.3996	0.0542
0.76	1.52	0.83	1.9107	0.3455	0.3995	0.0539
0.77	1.54	0.84	1.9037	0.3444	0.3995	0.0537
0.78	1.56	0.86	1.8966	0.3433	0.3995	0.0534
0.79	1.58	0.87	1.8895	0.3422	0.3995	0.0531
0.80	1.60	0.89	1.8824	0.3410	0.3995	0.0528
0.81	1.62	0.91	1.8753	0.3399	0.3994	0.0526
0.82	1.64	0.92	1.8682	0.3388	0.3994	0.0523
0.83	1.66	0.94	1.8611	0.3377	0.3994	0.0521
0.84	1.68	0.96	1.8540	0.3365	0.3994	0.0518
0.85	1.70	0.97	1.8468	0.3353	0.3993	0.0516
0.86	1.72	0.99	1.8395	0.3342	0.3993	0.0513
0.87	1.74	1.01	1.8322	0.3330	0.3993	0.0510
0.88	1.76	1.02	1.8279	0.3325	0.3993	0.0508
0.89	1.78	1.04	1.8250	0.3321	0.3992	0.0506
0.90	1.80	1.06	1.8222	0.3318	0.3991	0.0504
0.91	1.82	1.08	1.8193	0.3315	0.3990	0.0502
0.92	1.84	1.10	1.8164	0.3311	0.3989	0.0500
0.93	1.86	1.11	1.8136	0.3308	0.3988	0.0499
0.94	1.88	1.13	1.8107	0.3304	0.3987	0.0498

(续)

弧形回转 体高度 h (口径)	引入量 $p = \frac{h}{r}$	弧形回转 体半径 R (口径)	α'	β'	μ'	ν'
0.95	1.90	1.15	1.8078	0.3301	0.3986	0.0497
0.96	1.92	1.17	1.8050	0.3298	0.3985	0.0496
0.97	1.94	1.19	1.8021	0.3294	0.3984	0.0495
0.98	1.96	1.21	1.7992	0.3291	0.3983	0.0494
0.99	1.98	1.23	1.7964	0.3287	0.3982	0.0493
1.00	2.00	1.25	1.7935	0.3284	0.3982	0.0492
1.01	2.02	1.27	1.7918	0.3282	0.3981	0.0491
1.02	2.04	1.29	1.7910	0.3280	0.3980	0.0490
1.03	2.06	1.31	1.7882	0.3278	0.3980	0.0490
1.04	2.08	1.33	1.7864	0.3276	0.3979	0.0489
1.05	2.10	1.35	1.7846	0.3274	0.3978	0.0488
1.06	2.12	1.37	1.7828	0.3272	0.3978	0.0488
1.07	2.14	1.39	1.7810	0.3270	0.3977	0.0487
1.08	2.16	1.42	1.7792	0.3268	0.3977	0.0486
1.09	2.18	1.44	1.7774	0.3266	0.3976	0.0486
1.10	2.20	1.46	1.7756	0.3264	0.3975	0.0485
1.11	2.22	1.48	1.7738	0.3262	0.3975	0.0485
1.12	2.24	1.50	1.7720	0.3260	0.3974	0.0483
1.13	2.26	1.53	1.7702	0.3258	0.3974	0.0483
1.14	2.28	1.55	1.7684	0.3256	0.3974	0.0482
1.15	2.30	1.57	1.7666	0.3254	0.3973	0.0481
1.16	2.32	1.60	1.7648	0.3252	0.3972	0.0480
1.17	2.34	1.62	1.7631	0.3250	0.3972	0.0480
1.18	2.36	1.64	1.7612	0.3248	0.3971	0.0479
1.19	2.38	1.67	1.7594	0.3246	0.3971	0.0478
1.20	2.40	1.69	1.7576	0.3244	0.3970	0.0477
1.21	2.42	1.71	1.7558	0.3242	0.3969	0.0477
1.22	2.44	1.74	1.7540	0.3240	0.3969	0.0476
1.23	2.46	1.76	1.7522	0.3238	0.3968	0.0475
1.24	2.48	1.79	1.7504	0.3236	0.3968	0.0474
1.25	2.50	1.81	1.7486	0.3234	0.3967	0.0474
1.26	2.52	1.84	1.7479	0.3232	0.3966	0.0473
1.27	2.54	1.86	1.7472	0.3229	0.3964	0.0472
1.28	2.56	1.89	1.7465	0.3228	0.3963	0.0471
1.29	2.58	1.91	1.7458	0.3226	0.3962	0.0470
1.30	2.60	1.94	1.7451	0.3224	0.3960	0.0468
1.31	2.62	1.97	1.7445	0.3222	0.3959	0.0467
1.32	2.64	1.99	1.7439	0.3220	0.3958	0.0466
1.33	2.66	2.02	1.7433	0.3218	0.3957	0.0465
1.34	2.68	2.05	1.7426	0.3216	0.3957	0.0465

(续)

弧形回转 体高度 h (口径)	引入距 $p = \frac{h}{r}$	弧形回转 体半径 R (口径)	α'	β'	μ'	ν'
1.35	2.70	2.07	1.7411	0.3215	0.3957	0.0465
1.36	2.72	2.10	1.7402	0.3214	0.3957	0.0465
1.37	2.74	2.13	1.7393	0.3214	0.3957	0.0465
1.38	2.76	2.15	1.7384	0.3213	0.3957	0.0465
1.39	2.78	2.18	1.7375	0.3212	0.3957	0.0465
1.40	2.80	2.21	1.7366	0.3212	0.3956	0.0465
1.41	2.82	2.24	1.7357	0.3211	0.3956	0.0465
1.42	2.84	2.27	1.7348	0.3210	0.3956	0.0464
1.43	2.86	2.29	1.7339	0.3210	0.3956	0.0464
1.44	2.88	2.32	1.7330	0.3209	0.3956	0.0464
1.45	2.90	2.35	1.7321	0.3208	0.3956	0.0464
1.46	2.92	2.38	1.7312	0.3208	0.3955	0.0464
1.47	2.94	2.41	1.7303	0.3207	0.3955	0.0464
1.48	2.96	2.44	1.7294	0.3206	0.3955	0.0464
1.49	2.98	2.47	1.7285	0.3206	0.3955	0.0464
1.50	3.00	2.50	1.7276	0.3205	0.3955	0.0464
1.51	3.02	2.53	1.7270	0.3204	0.3955	0.0464
1.52	3.04	2.56	1.7264	0.3203	0.3955	0.0464
1.53	3.06	2.59	1.7258	0.3202	0.3955	0.0464
1.54	3.08	2.62	1.7252	0.3201	0.3955	0.0464
1.55	3.10	2.65	1.7246	0.3199	0.3955	0.0464
1.56	3.12	2.68	1.7242	0.3198	0.3954	0.0463
1.57	3.14	2.71	1.7236	0.3197	0.3954	0.0463
1.58	3.16	2.75	1.7230	0.3195	0.3954	0.0463
1.59	3.18	2.78	1.7224	0.3194	0.3954	0.0463
1.60	3.20	2.81	1.7218	0.3193	0.3954	0.0463
1.61	3.22	2.84	1.7212	0.3190	0.3954	0.0463
1.62	3.24	2.87	1.7206	0.3189	0.3953	0.0463
1.63	3.26	2.91	1.7200	0.3188	0.3953	0.0463
1.64	3.28	2.94	1.7195	0.3187	0.3953	0.0463
1.65	3.30	2.97	1.7190	0.3186	0.3953	0.0463
1.66	3.32	3.01	1.7184	0.3185	0.3953	0.0463
1.67	3.34	3.04	1.7180	0.3185	0.3953	0.0463
1.68	3.36	3.07	1.7175	0.3184	0.3953	0.0463
1.69	3.38	3.11	1.7171	0.3183	0.3952	0.0463
1.70	3.40	3.14	1.7166	0.3183	0.3951	0.0463
1.71	3.42	3.17	1.7162	0.3182	0.3950	0.0463
1.72	3.44	3.21	1.7157	0.3181	0.3949	0.0463
1.73	3.46	3.24	1.7153	0.3181	0.3948	0.0463
1.74	3.48	3.28	1.7148	0.3180	0.3947	0.0463

(续)

弧形回转 体高度 h (口径)	引入量 $\rho = \frac{h}{r}$	弧形回转 体半径 R (口径)	α'	β'	μ'	ν'
1.75	3.50	3.31	1.7144	0.3179	0.3946	0.0463
1.76	3.52	3.35	1.7133	0.3178	0.3945	0.0463
1.77	3.54	3.38	1.7124	0.3176	0.3945	0.0463
1.78	3.56	3.42	1.7115	0.3175	0.3944	0.0462
1.79	3.58	3.45	1.7106	0.3174	0.3943	0.0462
1.80	3.60	3.49	1.7097	0.3173	0.3942	0.0462
1.81	3.62	3.53	1.7095	0.3173	0.3942	0.0462
1.82	3.64	3.56	1.7093	0.3173	0.3941	0.0462
1.83	3.66	3.6	1.7091	0.3172	0.3941	0.0462
1.84	3.68	3.64	1.7090	0.3172	0.3940	0.0462
1.85	3.70	3.67	1.7089	0.3172	0.3939	0.0462
1.86	3.72	3.71	1.7087	0.3172	0.3939	0.0462
1.87	3.74	3.75	1.7085	0.3172	0.3939	0.0462
1.88	3.76	3.78	1.7083	0.3171	0.3938	0.0462
1.89	3.78	3.82	1.7081	0.3171	0.3938	0.0462
1.90	3.80	3.86	1.7079	0.3171	0.3937	0.0462
1.91	3.82	3.9	1.7077	0.3171	0.3937	0.0462
1.92	3.84	3.94	1.7075	0.3169	0.3936	0.0462
1.93	3.86	3.97	1.7073	0.3169	0.3936	0.0462
1.94	3.88	4.01	1.7071	0.3169	0.3935	0.0461
1.95	3.90	4.05	1.7068	0.3169	0.3935	0.0461
1.96	3.92	4.09	1.7065	0.3168	0.3934	0.0461
1.97	3.94	4.13	1.7062	0.3168	0.3933	0.0461
1.98	3.96	4.17	1.7059	0.3167	0.3932	0.0461
1.99	3.98	4.21	1.7056	0.3166	0.3931	0.0461
2.00	4.00	4.25	1.7053	0.3164	0.3930	0.0461
2.01	4.02	4.29	1.7050	0.3164	0.3929	0.0460
2.02	4.04	4.33	1.7048	0.3164	0.3928	0.0460
2.03	4.06	4.37	1.7045	0.3164	0.3928	0.0460
2.04	4.08	4.41	1.7042	0.3164	0.3927	0.0460
2.05	4.10	4.45	1.7039	0.3163	0.3926	0.0460
2.06	4.12	4.49	1.7036	0.3163	0.3926	0.0460
2.07	4.14	4.53	1.7033	0.3163	0.3925	0.0460
2.08	4.16	4.58	1.7030	0.3163	0.3924	0.0460
2.09	4.18	4.62	1.7027	0.3163	0.3924	0.0460
2.10	4.20	4.66	1.7024	0.3163	0.3923	0.0460
2.11	4.22	4.7	1.7021	0.3162	0.3922	0.0460
2.12	4.24	4.74	1.7018	0.3162	0.3922	0.0460
2.13	4.26	4.79	1.7016	0.3162	0.3921	0.0460
2.14	4.28	4.83	1.7014	0.3161	0.3920	0.0460

(续)

弧形回转 体高度 h (口径)	引入量 $\rho = \frac{h}{r}$	弧形回转 体半径 R (口径)	α'	β'	μ'	ν'
2.15	4.30	4.87	1.7012	0.3161	0.3920	0.0460
2.16	4.32	4.92	1.7010	0.3161	0.3919	0.0460
2.17	4.34	4.96	1.7008	0.3160	0.3918	0.0460
2.18	4.36	5	1.7006	0.3160	0.3917	0.0460
2.19	4.38	5.05	1.7004	0.3160	0.3917	0.0460
2.20	4.40	5.09	1.7002	0.3159	0.3916	0.0459
2.21	4.42	5.13	1.7000	0.3159	0.3915	0.0459
2.22	4.44	5.18	1.6998	0.3158	0.3914	0.0459
2.23	4.46	5.22	1.6996	0.3158	0.3913	0.0459
2.24	4.48	5.27	1.6994	0.3158	0.3912	0.0459
2.25	4.50	5.31	1.6991	0.3157	0.3911	0.0459
2.26	4.52	5.36	1.6989	0.3157	0.3910	0.0459
2.27	4.54	5.4	1.6987	0.3157	0.3909	0.0459
2.28	4.56	5.45	1.6984	0.3156	0.3908	0.0459
2.29	4.58	5.49	1.6982	0.3156	0.3907	0.0459
2.30	4.60	5.54	1.6980	0.3156	0.3906	0.0459
2.31	4.62	5.59	1.6978	0.3156	0.3906	0.0459
2.32	4.64	5.63	1.6976	0.3156	0.3906	0.0459
2.33	4.66	5.68	1.6975	0.3156	0.3906	0.0459
2.34	4.68	5.73	1.6973	0.3155	0.3905	0.0459
2.35	4.70	5.77	1.6971	0.3155	0.3905	0.0459
2.36	4.72	5.82	1.6969	0.3155	0.3904	0.0459
2.37	4.74	5.87	1.6967	0.3155	0.3904	0.0458
2.38	4.76	5.91	1.6965	0.3154	0.3903	0.0458
2.39	4.78	5.96	1.6963	0.3154	0.3903	0.0458
2.40	4.80	6.01	1.6961	0.3154	0.3902	0.0458
2.41	4.82	6.06	1.6959	0.3154	0.3902	0.0458
2.42	4.84	6.11	1.6958	0.3153	0.3901	0.0458
2.43	4.86	6.15	1.6956	0.3153	0.3900	0.0458
2.44	4.88	6.2	1.6955	0.3153	0.3899	0.0458
2.45	4.90	6.25	1.6953	0.3153	0.3898	0.0458
2.46	4.92	6.3	1.6952	0.3152	0.3898	0.0458
2.47	4.94	6.35	1.6950	0.3152	0.3897	0.0458
2.48	4.96	6.4	1.6949	0.3152	0.3896	0.0458
2.49	4.98	6.45	1.6947	0.3151	0.3895	0.0458
2.50	5.00	6.5	1.6946	0.3151	0.3894	0.0458
2.51	5.02	6.55	1.6944	0.3151	0.3894	0.0458
2.52	5.04	6.6	1.6942	0.3151	0.3893	0.0458
2.53	5.06	6.65	1.6941	0.3151	0.3893	0.0458
2.54	5.08	6.7	1.6939	0.3150	0.3892	0.0458

(续)

弧形回转 体高度 h (口径)	引入量 $\rho = \frac{h}{r}$	弧形回转 体半径 R (口径)	α'	β'	μ'	ν'
2.55	5.10	6.75	1.6938	0.3150	0.3892	0.0458
2.56	5.12	6.8	1.6936	0.3150	0.3891	0.0457
2.57	5.14	6.85	1.6935	0.3150	0.3891	0.0457
2.58	5.16	6.91	1.6933	0.3149	0.3890	0.0457
2.59	5.18	6.96	1.6932	0.3149	0.3890	0.0457
2.60	5.20	7.01	1.6930	0.3149	0.3889	0.0457
2.61	5.22	7.06	1.6930	0.3149	0.3889	0.0457
2.62	5.24	7.11	1.6929	0.3148	0.3888	0.0457
2.63	5.26	7.17	1.6928	0.3148	0.3888	0.0457
2.64	5.28	7.22	1.6928	0.3148	0.3887	0.0457
2.65	5.30	7.27	1.6927	0.3148	0.3888	0.0457
2.66	5.32	7.33	1.6927	0.3147	0.3885	0.0457
2.67	5.34	7.38	1.6926	0.3147	0.3884	0.0457
2.68	5.36	7.43	1.6925	0.3147	0.3883	0.0457
2.69	5.38	7.49	1.6925	0.3147	0.3882	0.0457
2.70	5.40	7.54	1.6924	0.3147	0.3881	0.0457
2.71	5.42	7.59	1.6922	0.3147	0.3880	0.0457
2.72	5.44	7.65	1.6920	0.3147	0.3879	0.0457
2.73	5.46	7.7	1.6918	0.3147	0.3879	0.0457
2.74	5.48	7.76	1.6917	0.3147	0.3878	0.0457
2.75	5.50	7.81	1.6915	0.3147	0.3878	0.0457
2.76	5.52	7.87	1.6914	0.3147	0.3877	0.0458
2.77	5.54	7.92	1.6912	0.3147	0.3877	0.0458
2.78	5.56	7.98	1.6911	0.3146	0.3876	0.0458
2.79	5.58	8.03	1.6909	0.3146	0.3876	0.0458
2.80	5.60	8.09	1.6908	0.3146	0.3875	0.0458
2.81	5.62	8.15	1.6908	0.3146	0.3874	0.0458
2.82	5.64	8.2	1.6907	0.3146	0.3873	0.0458
2.83	5.66	8.26	1.6906	0.3146	0.3872	0.0458
2.84	5.68	8.32	1.6905	0.3145	0.3871	0.0458
2.85	5.70	8.37	1.6904	0.3145	0.3870	0.0458
2.86	5.72	8.43	1.6903	0.3145	0.3869	0.0458
2.87	5.74	8.49	1.6902	0.3145	0.3869	0.0458
2.88	5.76	8.54	1.6901	0.3145	0.3867	0.0458
2.89	5.78	8.6	1.6900	0.3145	0.3866	0.0458
2.90	5.80	8.66	1.6899	0.3145	0.3865	0.0458
2.91	5.82	8.72	1.6898	0.3145	0.3864	0.0458
2.92	5.84	8.78	1.6896	0.3145	0.3864	0.0458
2.93	5.86	8.83	1.6895	0.3144	0.3863	0.0458
2.94	5.88	8.89	1.6894	0.3144	0.3862	0.0458

(续)

弧形回转 体高度 h (口径)	引入量 $\rho = \frac{h}{r}$	弧形回转 体半径 R (口径)	α'	β'	μ'	γ'
2.95	5.90	8.95	1.6893	0.3144	0.3861	0.0456
2.96	5.92	9.01	1.6892	0.3144	0.3860	0.0456
2.97	5.94	9.07	1.6891	0.3144	0.3858	0.0456
2.98	5.96	9.13	1.6890	0.3143	0.3856	0.0456
2.99	5.98	9.19	1.6890	0.3143	0.3854	0.0456
3.00	6.00	9.25	1.6889	0.3143	0.3852	0.0456
3.04	6.08	9.49	1.6886	0.3143	0.3843	0.0455
3.10	6.20	9.86	1.6880	0.3142	0.3836	0.0455
3.12	6.24	9.98	1.6877	0.3142	0.3831	0.0455
3.20	6.40	10.49	1.6870	0.3141	0.3823	0.0455
3.30	6.60	11.14	1.6864	0.3141	0.3813	0.0455
3.35	6.70	11.48	1.6861	0.3140	0.3810	0.0455
3.40	6.80	11.81	1.6858	0.3139	0.3804	0.0455
3.43	6.86	12.02	1.6855	0.3139	0.3799	0.0455
3.50	7.00	12.50	1.6852	0.3139	0.3790	0.0455
3.60	7.20	13.21	1.6845	0.3138	0.3783	0.0454
3.70	7.40	13.94	1.6842	0.3137	0.3777	0.0454
3.80	7.60	14.69	1.6836	0.3137	0.3769	0.0454
3.90	7.80	15.46	1.6833	0.3136	0.3764	0.0454
4.00	8.00	16.25	1.6830	0.3136	0.3760	0.0454
4.50	9.00	20.50	1.6814	0.3133	0.3755	0.0453
5.00	10.00	25.25	1.6801	0.3132	0.3750	0.0453

参 考 文 献

- [1] 《步兵自动武器及弹药设计手册》编写组编, 步兵自动武器及弹药设计手册(上册), 国防工业出版社, 1977年。
- [2] 高乃同编, 枪弹设计原理, 华东工程学院, 1981年。
- [3] 华东工程学院202教研室编, 炮弹的构造和作用, 1974年。
- [4] 兵器工业部轻武器研究所《国外轻型步兵武器》编辑组, 国外轻型步兵武器(上册), 国防工业出版社, 1983年。
- [5] 华东工程学院302教研室编, 炸药与炸药性能原理, 1978年。
- [6] 华东工程学院303教研室编, 火工品概论, 1976年。
- [7] 华东工程学院103教研室编, 内弹道学, 1973年。
- [8] 魏惠之等编著, 弹丸设计理论, 国防工业出版社, 1985年。
- [9] 北京工业学院一系831、811教研室合编, 爆炸物理基础, 1974年。
- [10] 华恭、欧林尔编, 弹丸作用和设计理论(榴弹和迫击炮弹), 国防工业出版社, 1975年。
- [11] 魏惠之编, 弹丸设计理论(上、下册), 1964年。
- [12] 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组, 爆炸及其作用(上、下册), 国防工业出版社, 1979年。
- [13] 蒋浩征等编, 火箭战斗部设计原理, 国防工业出版社, 1982年。
- [14] 李景云, 杀伤弹杀伤面积的工程计算方法, 《兵工学报》1984-3。
- [15] 于浩, 88200部队, 弹片威力计算与测试评定标准讨论, 1983年。
- [16] AMCP 706-245 Engineering Design Handbook, Ammunition Series, Section 2, Design for Terminal Effects.
- [17] 威往德, R, 贝森, 计算战斗部杀伤面积的基本方法。
- [18] 刘荫秋等著, 创伤弹道学概论, 新时代出版社, 1985年。
- [19] 钱伟长编著, 穿甲力学, 国防工业出版社, 1984年。
- [20] 华东工学院202教研室编, 弹丸作用和设计理论(榴弹及火箭增程技术), 华东工程学院, 1974年。
- [21] Баум Ф. А., "Физика Взрывов", 1975年。
- [22] 张雷顺, 关于弹带压力值的研究, 第一期。
- [23] S·铁摩辛柯著, 汪一麟译, 板壳理论, 科学出版社, 1975年。
- [24] S·铁摩辛柯、S·沃诺斯基著, 板壳理论, 科学出版社, 1975年。
- [25] 浦发, 外弹道学, 国防工业出版社, 1980年。
- [26] 杨为中译, 弹丸的飞行稳定性设计, 国防工业出版社, 1976年。
- [27] 李禄荫、高乃同编, 枪弹药筒设计原理, 1984年。
- [28] 华东工程学院105教研室编, 枪械设计原理(上、中册), 1979年。



C0190767