

“十二五”国家重点出版物出版规划项目
新概念动能武器系列丛书

电热化学炮发射原理

张明安 李 兵 狄加伟 著



兵器工业出版社

内 容 简 介

本书概要介绍了电热化学炮国内外技术研究状况,重点描述了电热化学炮脉冲电源技术、等离子体发生器技术、电热化学炮内弹道理论、电热化学炮装药结构技术,以及电热化学炮试验、测试与控制技术,详细介绍了电热化学炮等离子体发生器理论、电热化学炮常规内弹道与现代内弹道理论以及电热化学炮装药结构理论等。

本书可供从事火炮发射科研、生产的工程技术人员阅读,也可作为相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电热化学炮发射原理 / 张明安, 李兵, 狄加伟著

— 北京: 兵器工业出版社, 2015. 12

(新概念动能武器系列丛书 / 李治源主编)

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5181-0191-7

I. ①电… II. ①张… ②李… ③狄… III. ①舰炮—
发射—军事技术 IV. ①TJ391

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第319072号

出版发行: 兵器工业出版社

发行电话: 010-68962596, 68962591

邮 编: 100089

社 址: 北京市海淀区车道沟10号

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京圣夫亚美印刷有限公司

版 次: 2015年12月第1版第1次印刷

责任编辑: 林利红

封面设计: 揽胜视觉

责任校对: 郭 芳

责任印制: 王京华

开 本: 710×1000 1/16

印 张: 8.75

字 数: 157千字

定 价: 48.00元

《新概念动能武器系列丛书》

编审委员会

主 编：李治源

副主编：胡金锁

顾 问：王 莹

编 委：李小鹏 向红军 赵科义 张明安
张 倩 张亚东 周国印 陈庆昌
褚庆国 胡森哲 雷 彬 李 兵
李 超 李惠元 林秀梅 吕庆敖
王育维 杨 帆 俞海燕 辛建国
石志彬 王晓方 卢志刚 李金胜
樊向武 金 灿 王志刚

丛书序言

人类的军事科技发展历史几乎与人类的历史一样漫长，在漫长的发展过程中，人们总是将最先进、最前沿的科学技术首先应用到军事领域，创造出各种各样的武器。从最早的石头、标枪、弓箭开始，直到如今门类齐全、类型众多的新概念武器。

武器的最终目的是杀伤敌人、毁伤目标。从目前的毁伤技术来说，尽管定向能（高功率微波武器和强激光武器）、声能（次声和噪声武器）、生物能（基因武器）、化学能（化学武器）和核能（核武器）等新型毁伤技术不断发展，但受到国际政治、战场环境、作战对象和毁伤效能等各方面的影响，尚难以广泛应用于军事行动；而动能毁伤以其针对目标广泛、毁伤范围可控、毁伤时效快速等特点，使得动能武器成为武器装备发展的主流。因此，以动能毁伤为目标的各类新概念动能武器受到了世界各国的重视也成为了目前新概念武器研究领域的热点，特别是以电能为发射能源的电磁发射动能武器技术方兴未艾。20 世纪 80 年代，电磁轨道炮首次实现了超高速发射，经过不懈努力，电磁轨道炮的最大炮口动能已超越现役的大口径火炮，高功率脉冲电源、轨道烧蚀和创削等关键技术也已基本突破，随着高功率脉冲电源小型化技术、一体化弹药技术和系统集成与热管理技术的不断进步，新概念动能武器将在不久的将来率先实现军事应用。

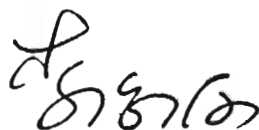
在新概念动能武器发展过程中，我国紧跟世界兵器科学发展动态，从最开始的动态跟踪、理论探索、验证试验，到今天成为国际电磁发射技术委员会中的重要成员，前后经历了 30 多年的漫长过程。多年来，几代人本着“科技强军”的理想，自力更生，艰苦奋斗，为发展我国新概念动能武器技术，增强我国国防力量做出了无私的奉献，也培育、锻炼了一支成熟的高素质队伍。同时，也可以预见，要实现新概念动能武器的军事应用，还需要继续坚持不懈的努力，克服一系列的科学难关，同时也需要一大批年轻的、杰出的人才投入这个领域，为发展我国的兵器科学而奋斗。

本丛书的编写，既是系统总结 30 多年来积累的宝贵财富，为从事新概

念动能武器研究的专业技术人员提供借鉴和参考，也可为刚进入这一领域的科学工作者提供帮助以尽快熟悉本领域的情况，在较高的起点上开展工作，也能作为与本专业有关的院校、研究所和部队的教学参考材料。

本丛书主要涵盖了电热化学发射技术、电磁轨道发射技术、电磁线圈发射（弹射）技术、电磁装甲防护技术的概述、原理、应用及相关理论与关键技术。

在本丛书的编写过程中，得到了有关单位和领导的大力帮助和支持。主要拟稿者都是本领域各单位具有扎实理论功底和丰富实践经验的学术带头人和技术骨干。经过反复审校、修改补充，本丛书终于编印出版，对参与本丛书编写、出版的所有人员在此一并表示衷心的感谢。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely representing the author or a reviewer.

前 言

2000年8月以来,在各级领导机关的支持与关心下,笔者率领科研团队开始电热化学炮发射技术研究工作,至今已有15个年头。在过去的岁月里,项目团队先后得到了共用技术类预研项目、先进发射技术类项目、集团开发类项目及重大背景类预研项目等方面的支持,使得电热化学炮技术研究得以持续推进。期间,既有首次实现大口径电热化学炮发射原理射击试验的喜悦,也有长期处于相对低迷状态时的忧郁,更有获得重点项目支持并取得关键技术突破与项目重要进展的欢庆。

电热化学炮发射技术与常规发射技术相比,直观上,一是增加了脉冲电源系统;二是等离子体发生器取代了常规点传火系统。但在本质上,则一是改变了火炮内弹道过程性能特征,使其受控性和可调控性得到了有效提升;二是改变了弹药总体方案和装药结构方案设计思路;三是为新型发射药的研究提供了新的研究方向;四是改变了火炮武器系统总体布局与设计;五是大幅提升了火炮武器系统作战威力和弹药性能。总之,电热化学炮发射技术的引入,为火炮内弹道及装药技术研究开辟了新的研究方向和领域,拓宽了学科研究范围。

电热化学炮发射技术主要涉及脉冲电源技术、等离子体发生器技术、内弹道及装药技术、火炮系统技术及弹药系统技术、发射控制与测试技术等。本书旨在介绍电热化学炮发射技术国内外研究情况,脉冲电源技术、等离子体发生器技术、内弹道及装药技术、测试与控制技术等基础理论,以及对火炮武器系统和弹药系统所带来的影响等基本情况,以有助于继续鼓励、支持热心从事该项研究工作的后来者。本书在编写过程中先后得到了电磁发射技术委员会主任李军,名誉主任王莹,南京理工大学董健年教授,以及西北机电工程研究所王育维、郭全旺、聂奎、张薇薇、赵娜等同事的热情帮助,在此一并表示感谢。由于时间仓促、学识水平有限,无论从理论上、实践上,还是从深度上,书中谬误和不足在所难免,望读者批评指正。

本书第1章、第2章由张明安编写;第3章由李媛、周文编写;第4

章由狄加伟、张洪海、张明安编写；第5章由张明安、李兵、狄加伟、王育维编写；第6章由李兵、聂奎、魏宁波编写；第7章由胡晓红、屈洁、张梦军、张敏华编写；第8章由张明安、狄加伟、李兵编写。

张明安

2015年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 国外电热化学炮技术研究概况	1
1.1.1 总体研究概况	1
1.1.2 火炮结构技术研究概况	5
1.1.3 脉冲电源技术研究概况	7
1.1.4 等离子体发生器技术研究概况	10
1.1.5 内弹道及装药技术研究概况	13
1.1.6 弹药技术研究概况	18
1.2 国内电热化学炮技术研究概况	19
1.2.1 概述	19
1.2.2 国内电热化学炮关键技术研究	20
第 2 章 电热化学炮基本概念与原理	27
2.1 电热化学炮基本概念	27
2.2 电热化学炮基本分类	27
2.3 电热化学炮基本原理	28
2.4 电热化学炮基本组成	29
第 3 章 电热化学炮脉冲电源技术	31
3.1 脉冲电容器储能式脉冲电源技术	31
3.2 电感储能式脉冲电源技术	32
3.2.1 基本概念	32
3.2.2 发展背景	33
3.2.3 电感储能式脉冲电源组成与基本原理	33
3.3 脉冲发电机式脉冲电源技术	34
3.3.1 基本概念	34
3.3.2 发展背景	34

3.3.3 脉冲发电机式脉冲电源组成与基本原理	36
第4章 电热化学炮等离子体发生器技术	38
4.1 等离子体技术简介	38
4.1.1 等离子体基本概念	38
4.1.2 等离子体各类性质	39
4.1.3 等离子体分类	39
4.1.4 等离子体技术应用	39
4.2 等离子体发生器	39
4.3 等离子体发生器点传火系统	41
4.4 炮用等离子体发生器理论	44
4.4.1 底喷式等离子体发生器一维物理数学模型	44
4.4.2 底喷式等离子体发生器一维数学物理模型计算分析	49
第5章 电热化学炮内弹道理论	57
5.1 电热化学炮经典内弹道计算分析	57
5.1.1 装药方案	57
5.1.2 多层发射药装药方案	57
5.1.3 堆积装药方案	58
5.1.4 电热化学发射温度补偿技术方案	59
5.1.5 电热化学发射高能高密度装药方案	59
5.1.6 研究结果	59
5.1.7 结果分析	65
5.1.8 结论	66
5.2 电热化学炮两相流内弹道理论与计算分析	67
5.2.1 引言	67
5.2.2 物理模型	67
5.2.3 数学模型	68
5.2.4 等离子体发生器数学模型	73
5.2.5 等离子体点火条件下一维两相流内弹道数值模拟	83
第6章 电热化学炮装药结构设计	87
6.1 电热化学炮高装填密度装药结构技术	88
6.1.1 钝感装药结构技术	88
6.1.2 序列装药结构技术	88

6.1.3 密实装药结构技术	89
6.2 电热化学炮高装填密度装药关键技术	91
6.2.1 高装填密度装药配方、工艺、力学性能、燃烧机理研究	91
6.2.2 高装填密度装药点传火技术研究	91
6.2.3 高装填密度装药结构与辅助装药元件研究	91
6.2.4 高装填密度装药弹道稳定性、使用安全性评估技术研究	91
第7章 电热化学炮试验与测控技术	92
7.1 电热化学炮试验技术	92
7.1.1 概述	92
7.1.2 电热化学密闭爆发器试验技术	93
7.1.3 高效高能等离子体释控试验技术	94
7.1.4 模拟药室试验技术	96
7.1.5 装药终止燃烧试验技术	97
7.1.6 内弹道综合试验装置试验技术	99
7.2 电热化学炮测控技术	101
7.2.1 电热化学炮多点 $P-t$ 测试与控制技术	101
7.2.2 高速电参数(电流、电压)测试与控制技术	103
7.2.3 等离子体温度测量与控制技术	104
第8章 电热化学炮技术应用前景与展望	108
8.1 电热化学炮与常规火炮技术比较	108
8.1.1 电热炮、电磁炮及常规火炮发射过程基本原理	109
8.1.2 电热炮、电磁炮及常规火炮基本组成	109
8.1.3 电热炮、电磁炮及常规火炮弹道性能基本特点	111
8.1.4 电热炮、电磁炮及常规火炮弹道过程技术问题	114
8.1.5 电热炮、电磁炮及常规火炮发射技术发展的意义	115
8.2 前景与展望	115
8.2.1 脉冲电源技术	116
8.2.2 内弹道技术	117
8.2.3 装药结构技术	118
8.2.4 等离子体发生器技术	119
8.2.5 结论与建议	121
参考文献	122

第1章 绪 论

1.1 国外电热化学炮技术研究概况

1.1.1 总体研究概况

在国外,电热化学炮发射技术研究起始于第二次世界大战末,先后经历了概念研究、基础试验研究和原理试验研究,目前已进入工程化应用研究阶段。国外先后在 14mm、16mm、20mm、30mm、35mm、45mm、60mm、105mm、120mm、127mm 和 155mm 等不同口径火炮试验装置上进行了试验研究,取得了较好的试验结果,尤其是近二十年来,美国、俄罗斯、德国、以色列、法国和英国等在中大口径电热化学炮发射技术方面的研究,取得了显著的进展,具体如下:

1. 美国

美国发展电热化学炮大致可分为 3 个阶段:第一阶段始于 20 世纪 80 年代,开展多种原理的探索性、基础性研究工作^[1];第二阶段,1989—1996 年,开展电热化学炮系统集成及关键技术研究工作;第三阶段,1997 年至今,开展了包括改造武器作战平台在内的电热化学炮工程化研制^[4]。

其中,从公开发表的报道看,美国发展电热化学炮开展的研究工作如表 1-1 所示。

表 1-1 美国发展电热化学炮开展的研究工作

时间/年	研究内容	效果
1993	完成 60mm 电热化学炮系统速射演示试验,并移交道尔格兰海军水面中心	完成速射演示。以 200 发/min 的射速,射击 10 发,使 75kg 的弹丸初速达 1200m/s
1996	120mm 火炮精确定时点火技术提高火炮精度及命中概率演示	重复性良好
1997	120mm 弹丸全天候温度补偿效能试验	重复性良好
1998	采用新型发射药,验证了 120mm 坦克炮性能的可行性;在保证精度的前提下,杆状穿甲弹,初速为 2km/s 以上	具有可行性

续表

时间/年	研究内容	效果
1999	在 120mm 坦克炮上演示新研发发射药弹道性能可重复性	具有可重复性
2000	完成 120mm 火炮弹道温度补偿试验	具有明显效果
2001	在 35mm 电热化学炮上演示炮口能量增加 30% 的试验；在装备研发与工程中心的坦克炮上成功演示 ETC 技术，性能优异	可重复性良好
2002	完成美—德 ETC 试验项目，采用研发的极低温度敏感度的发射药，演示了多任务武器与弹药系统中 105mm 坦克炮远程侦察弹的 ETC 发射	结果良好
2003	美国多用途武器和弹丸系统（MRAAS）采用电热化学能 ETC 点火技术，点燃高能、高密度发射药，并将原来采用的 105mm 口径改为 120mm	可将火炮的杀伤威力和射程都提高 30%
2004	在加利福尼亚的罗伯茨靶场，进行了 120mm 电热化学炮系统在战车上的集成发射试验，并可兼容发射常规炮弹（图 1-1）。试验共发射炮弹 25 发，其中“电热弹”12 发、常规弹 13 发、射速 12 发/min	验证了脉冲电源、弹丸、电热等离子体点火及系统集成等关键技术
2005	采用 M256 120mm 坦克炮对电热化学点火概念与现役火炮系统的兼容性进行了试验演示。试验采用了底喷式大面积辐射发射器（FLARE）、三同轴等离子体点火器（图 1-2）和紧凑型电热化学点火器。此外，还采用层状结构发射药对 FLARE 设计进行了进一步试验。此外，美国联合防务工业公司研制完成了一门 120mm 电热炮，并装在混合型电驱动战车上，成功地进行了实弹射击试验。试验证明 100kJ 脉冲电源系统可安全地组装在战车上	演示取得较大的进展。验证了脉冲电源与武器系统的适配性
2006	陆军轻型 120mm XM-291 火炮发射试验取得成功，炮口能量接近 17MJ，相当于 140mm 火炮炮口能量的下限值	ETC 技术切实可行，可集成到现有的火炮系统中



图 1-1 美国 120mm 电热化学坦克炮

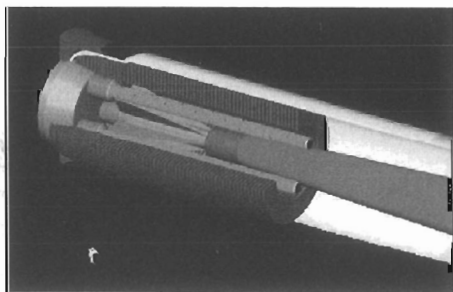


图 1-2 等离子体点火装药结构图

目前美国 ETC (Electro-Thermal Chemical) 发射技术主要的研究机构有美国陆军研究实验室 (ARL) 以及若干私营公司。电热化学发射技术研究包含在美军电炮技术研究和研制项目中, 另外与电磁轨道发射技术和电磁线圈炮技术相比而言, ETC 发射技术在三项技术中最成熟并最具实现可能, 预计电热化学炮将在未来成为目前固体推进剂火炮的替代者。多年来的试验结果表明, 电热化学炮将可能最先应用于美国陆军地面作战系统。除了与系统总装有关的问题尚待解决外, 电热化学推进技术的主要技术挑战是研制新型高能低易损性发射药。

电热化学炮采用等离子体触发和控制弹药推进剂, 将电能作为弹丸推进的初始能量。尽管 ETC 发射技术的研究还没有达到所期望的要求, 但它的研究是有价值的。ETC 发射可以在提高常规固体推进剂性能的同时减少温度对推进剂膨胀过程的影响, 因此可以采用更先进的、密度更高的推进剂。与其他可选技术相比, ETC 发射技术还可以减少炮管内的压力, 并提供相同的炮口能量, 在点火期间可以使推进剂的气体平稳地扩散。

XM-291 是电热化学炮的最好范例, 虽然它的成功并不意味着 ETC 发射技术在现在的时间点已经成熟了, 但它却证明, 继续进行 ETC 发射技术的研究并将 ETC 炮成功地集成到现代坦克上是非常可行的。

ETC 发射技术在未来将不只应用于固体推进剂。为了进一步提高炮弹的初速, 科研人员将对电热化学炮点火进一步探索, 使其应用于液体推进剂。另外, ETC 发射技术还应与现有的系统相兼容, 以减少在火炮发射时传递给车辆的后坐力, 这对于 ETC 炮与战车的集成是至关重要的, 图 1-3 所示为未来作战车辆构想图。

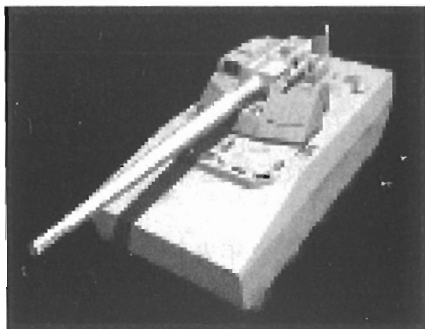


图 1-3 未来作战车辆构想图

2. 德国

德国是欧洲电热化学炮研究最积极、成果最多的国家, 与美国、法国、瑞典等国合作进行了多个电热化学炮研究项目, 主要由莱茵金属 (Rheinmetal) 公司承担^[1,5]。德国电热化学炮研究进行了数百次的发射试验, 口径有 70mm、90mm 和 120mm, 希望将初速提高 15%, 炮口动能提高 30%。在 70mm ETC 炮上, 对高能发射药以及“喷射点火”与“沟道点火”两种点火方式的技术进行了比较研究^{2,61}。近期研究目标为系统集成

演示的主要关键技术,主要包括:高能量密度发射药;高能量注入密度充电装置;单发等离子体点火药筒技术;单发发射技术;单发脉冲电源技术。图 1-4 所示为德国电热化学炮系统试验装置。

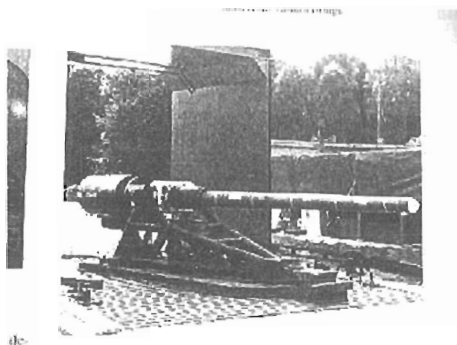


图 1-4 德国 120mm 电热化学炮系统试验装置

3. 以色列

以色列从 1986 年开始,侧重对电热基础技术、电热方法物理过程、电热化学炮输能系统和武器系统设计 4 个方面开展了研究工作,并与美国合作进行 60mm 和 105mm 电热化学炮试验研究,取得了较快进步,其中,105mm 电热化学炮进行的 49 发试验结果表明,野战条件下,105mm 电热化学炮性能具有可控、可靠和可重复性,炮口速度变化小于 1%。同时以色列自己计划研制和试验 25mm 口径、输入储能 1.6MJ、身管长 4m、弹丸质量 100g、最大初速为 2500m/s 的电热化学炮试验装置^[1,7,8]。

4. 法国

法国从 1998 年末至今以坦克炮为目标进行了 4~5 年的电热化学炮推进技术研究^[9],主要研究内容是:通过采用低电能,在不增加最大膛压条件下,改变火药气体压力曲线形状,进而提高火炮性能的可行性研究;内弹道性能改善参数影响研究;与常规技术的比较分析。

法国主要研究分为五个阶段:

第一阶段:基础研究与实验室试验。

第二阶段:内弹道模拟。

第三阶段:点火器试验和发射药点火模拟试验。

第四阶段:45mm 电热化学炮试验(2001 年 6 月—2002 年 6 月)。

第五阶段:120mm 电热化学炮演示试验。

5. 英国

英国电热化学炮研究起步于 20 世纪 90 年代初,主要研究点火及燃烧

控制技术,其目的是深入研究能量转换过程,降低军事应用对所需电能总量的要求,并以 0.5MJ 脉冲动力源在 10mm 电热化学炮上进行了初步试验,于 1993 年采用 3MJ 电能发射 0.5kg 弹丸,初速达 2000m/s。此外,英国于 1998—1999 年进行了 50 发 155mm 电热化学炮试验。图 1-5 所示为 155mm 口径药室模拟试验装置。



图 1-5 155mm 口径药室模拟试验装置

英国还提出“智能炮”(Smart Gun)概念:在电热化学炮发射过程中,对弹丸在膛内的运动和速度进行监测,并预测其出口速度;根据需要,采用二次电热点火技术补偿弹丸初速的负偏移量,以保持初速的一致性,从而达到提高精度的目的。并在 35mm 和 155mm 口径电热化学炮上进行了有效的试验^[10]。

6. 俄罗斯

俄罗斯电热化学炮发射技术研究,自 20 世纪 80 年代以来,已有 30 多年时间,先后从事了电热液体发射药火炮技术研究、电热轻气炮发射技术研究、电热固体发射药火炮技术研究以及相应的基础实验研究。俄罗斯在电热轻气炮超高速发射技术的研究方面,先后完成了 12.7mm、16mm、30mm 和 57mm 电热轻气发射试验装置及其脉冲电源系统的研制,实现了轻质弹丸的超高速发射,初速达到 $3 \sim 7\text{km/s}$ ^[11]。为小口径防空高炮提高初速,提供了新的研究方向。此外,俄罗斯正在研制的新型坦克 FST-2 主炮为 135mm 电热化学炮,预计弹丸初速可达 2500m/s ^[12]。

除以上国家着力开展电热化学炮研究外,荷兰、韩国、日本等国也积极响应进行电热化学炮及相关原理的研究。

1.1.2 火炮结构技术研究概况

电热化学炮技术的优势之一是与传统火炮具有较好的继承性,不同之处主要表现在三个方面。一是由于电热化学炮采用等离子体点火方式和新型装药结构形式,使得其内弹道过程与常规火炮相比具有一定变化,进而使火炮药室与身管承受的压力分布有所变化,如图 1-6 所示。因此,在身管结构设计中应予以考虑。二是击发方式由机械或低电压击发变为适应高电压与强电流的输电结构与特殊击发,如图 1-7、图 1-8 所示^[13,14]。三是电热化学炮增加了脉冲电源系统,特别对于自行火炮需重点考虑电源的总体布局、适装性及与底盘动力系统的适应和匹配性,图 1-9 和图 1-10

所示分别为美国轮式 120mm 电热化学炮与法国履带式 120mm 电热化学炮炮塔布局图^[15,16]。

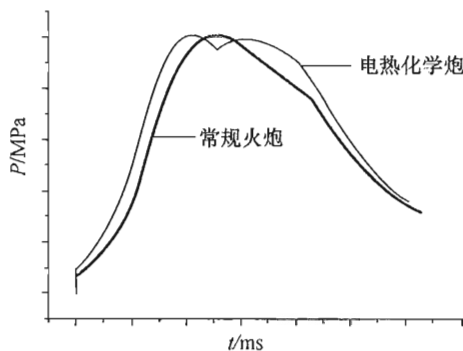


图 1-6 常规火炮与电热化学炮膛内 $P-t$ 曲线比较

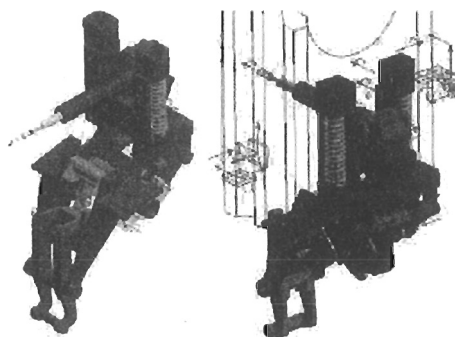


图 1-7 电热化学炮击发与输电机构

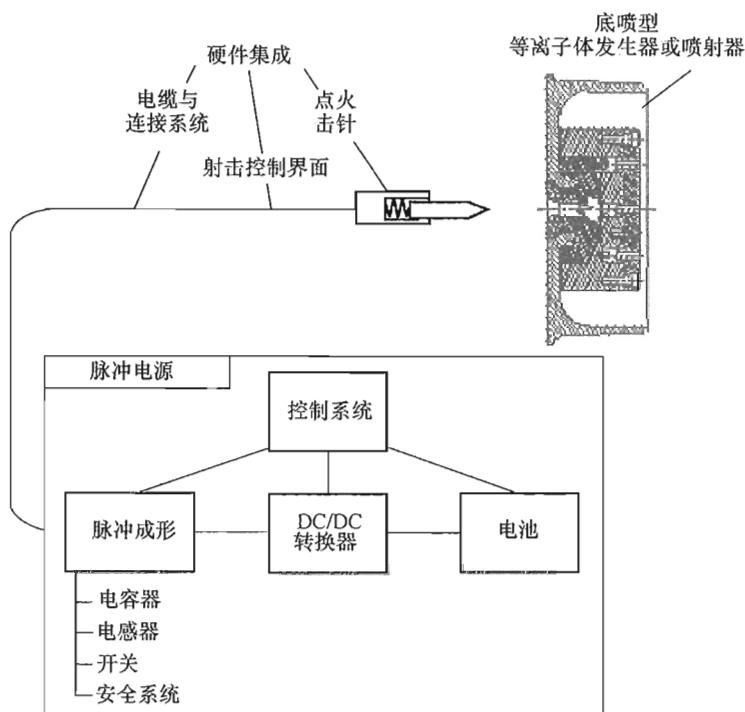


图 1-8 电热化学炮电源组成与输电击发结构

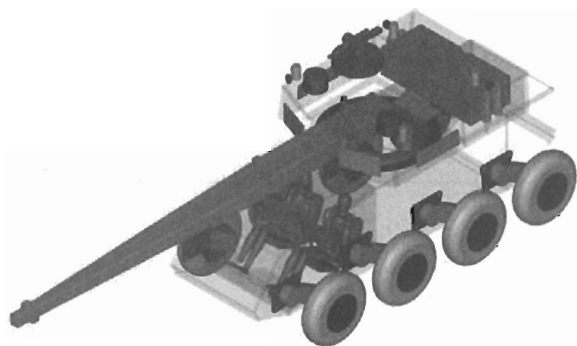


图 1-9 美国轮式 120mm 电热化学炮
总体布局概念图

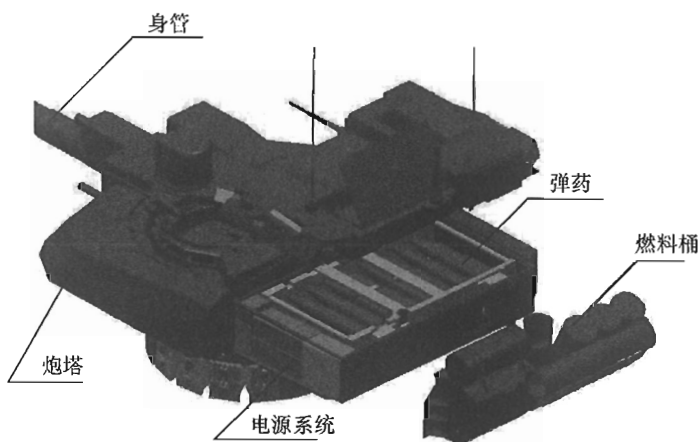


图 1-10 法国履带式 120mm 电热化学炮总体概念布局图

1.1.3 脉冲电源技术研究概况

脉冲电源是电热化学炮的重要组成部分之一，是击发等离子体发生器产生高温等离子体，进而实现电热化学炮发射过程的起始能源，一般由初级储能电源系统、高压高频充电系统、储能系统、脉冲成形控制系统、安全监控与泄放系统、控制电源系统及其附件等部分组成。其发展阶段大致可分为：低储能密度阶段，储能器件采用油浸式脉冲型电容器，储能密度在 $1\text{MJ}/\text{m}^3$ 以下；中储能密度阶段，储能器件采用金属化膜电容器，储能密度在 $1\sim 2\text{MJ}/\text{m}^3$ ；高储能密度阶段，储能器件采用新型金属化膜电容器，

储能密度在 $2\text{MJ}/\text{m}^3$ 以上。目前国外大多数国家电热化学炮脉冲电源均采用储能密度为 $2\text{MJ}/\text{m}^3$ 以下电容器技术，涉及的大功率放电开关已由当初的空气隙开关，历经真空开关发展到大功率半导体开关。初级储能电源系统达到一次充电可确保发射 20 ~ 30 发弹丸。总之，随着脉冲电源各项技术的进步，脉冲电源已由最初仅适应电热化学炮实验室研究发展到适应自行火炮野外试验要求。图 1-11 所示为英国电热化学炮实验室脉冲电源系统^[17]；图 1-12 ~ 图 1-15 分别所示为美国 120mm 自行电热化学炮用 100kJ 脉冲电源系统组成、三维模型布局、实物结构布局及高压充电器^[4]。



图 1-11 英国电热化学炮实验室脉冲电源系统

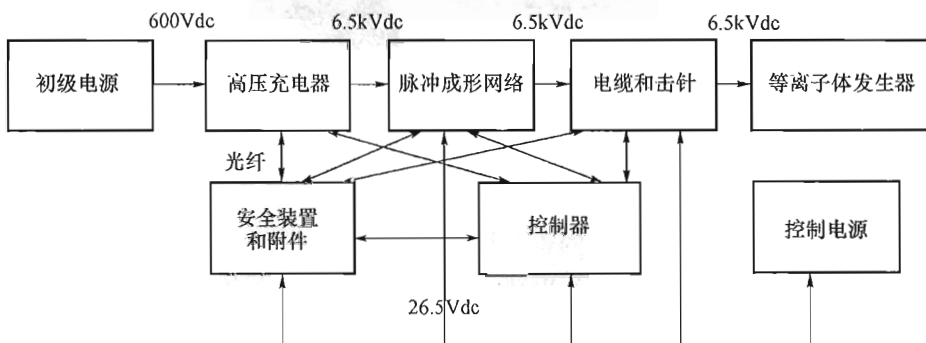


图 1-12 美国 120mm 自行电热化学炮用 100kJ 脉冲电源系统组成

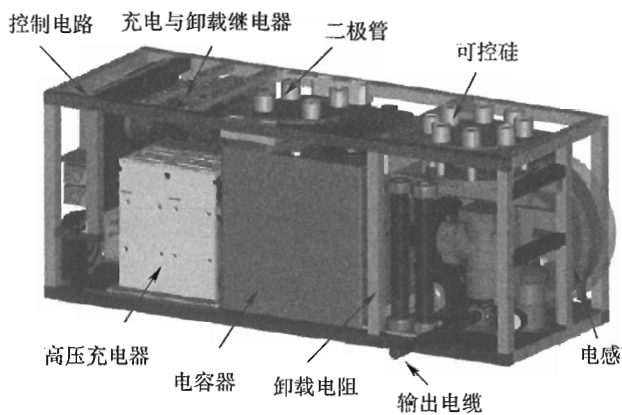


图 1-13 美国 120mm 自行电热化学炮用 100kJ 脉冲电源系统三维模型布局

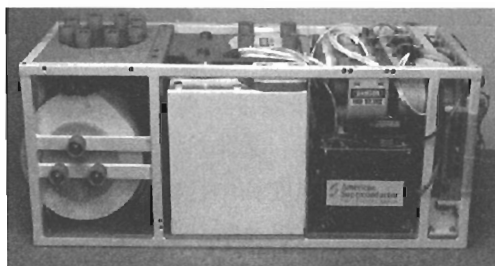


图 1-14 美国 120mm 自行电热化学炮用 ETIPPS I 型脉冲电源模块

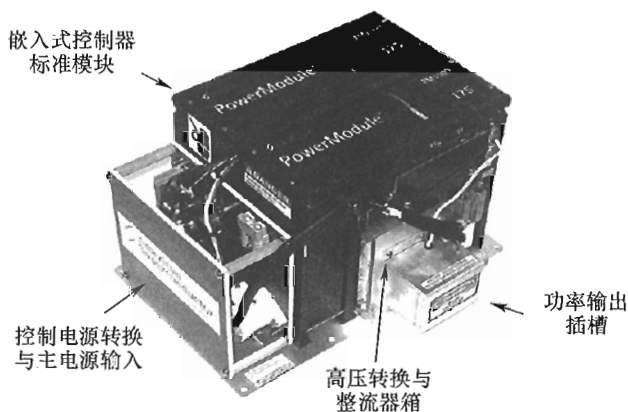


图 1-15 美国 120mm 自行电热化学炮用充电模块

1.1.4 等离子体发生器技术研究概况

1. 等离子体概念与分类

一般来讲,当自然界的物质因加热、电离、高速运动与撞击及强光照射等作用时,如物质变化成为由自由运动并相互作用的正离子、电子及中性粒子组成的混合物时,即把物质的这种存在状态称为物质的第四态,即等离子体。

等离子体作为物质第四态于1923年由美国化学家郎缪尔发现,宇宙中99.9%的物质处于等离子体状态。按存在类型可分为两种:①天然等离子体,如太阳、恒星、星子、星云等,自发产生闪光、极光等;②人工等离子体,如日光灯、霓虹灯。按电离度也分为两种:弱等离子体(电离度小于1%)或低温等离子体和完全电离等离子体,也称为高温等离子体(电离度大于1%)。而按粒子密度分为:①致密等离子体(或高压等离子体),粒子密度通常大于 $10^{15} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;②稀薄等离子体(或低压等离子体),粒子密度小于 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。按热力学平衡分为三类:①完全热平衡等离子体,也称为高温等离子体,其中的电子温度、离子温度及中性离子温度均相等,如太阳内部、核聚变和激光聚变等;②非热力学平衡等离子体,也称冷等离子体,其中电子温度远远大于离子温度和中性粒子温度,该等离子体主要包括电晕放电、辉光放电、介质阻挡放电及滑动弧光放电等;③局部热力学平衡等离子体,也称热等离子体,其温度范围为 $3000 \sim 30000 \text{ K}$,如电弧等离子体、高频等离子体等^[18,19]。

2. 放电等离子体形成方法与应用

放电条件下等离子体形成方式主要有直流放电和交流放电两种形成方法。其中:直流放电分为电晕放电、直流辉光放电及电弧放电方法;交流放电分为电容耦合法、感应耦合法、微波法、介质阻挡放电法等。该种方法产生的等离子体主要应用于:金属切割与融合;室内外照明;金属表面改性 with 喷涂;静电除尘;城市垃圾处理及医用诊断等。

3. 电热化学炮用等离子体发生器技术研究情况

电热化学炮技术的核心是等离子体发生器取代了常规点传火系统。该等离子体发生器在脉冲电源放电作用下,瞬间形成高温电弧等离子体,其主要过程特点是:形成时间短,一致性好,通常为微秒级;等离子体温度高,一般为 $8000 \sim 10000 \text{ K}$;与装药作用,由于等离子体自身质量轻,其点火穿透性强;与发射药作用,能改变发射药表面与深层结构特点,更加有利于发射药燃烧增强^[20,21]。鉴于这些特点,等离子体发生器作为新的一种点传火方式,对于提高火炮内弹道技术性能与装药技术研究与发展,提供

了更好的技术空间与潜力。

各国在开展电热化学炮研究过程中，先后设计和试验应用了各种各样的等离子体发生器，其中最基本的包括三种形式：一是底喷型等离子体发生器，如图 1-16、图 1-17 所示^[4,5]。二是金属起爆丝型等离子体发生器，主要有中心起爆丝型、底喷起爆丝型及与装药结合起爆丝型，如图 1-18 ~ 图 1-20 所示^[5]。三是中心沿面镀膜型等离子体发生器，如图 1-21 所示^[22]。

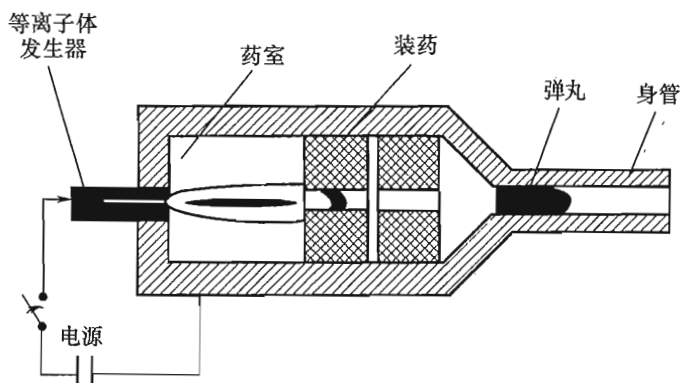


图 1-16 底喷型等离子体发生器应用示意图

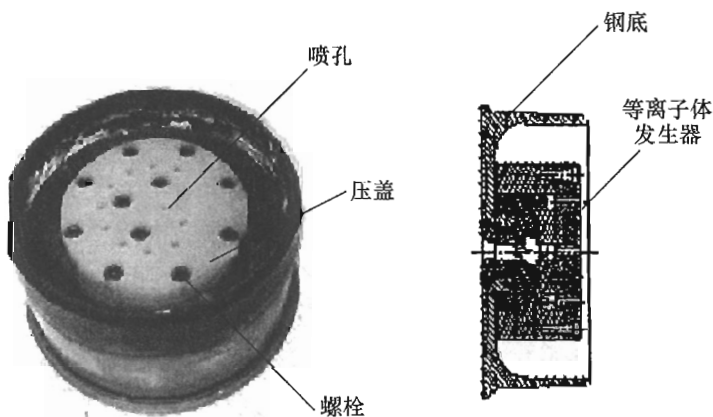


图 1-17 美国 120mm 电热化学炮底喷型等离子体发生器

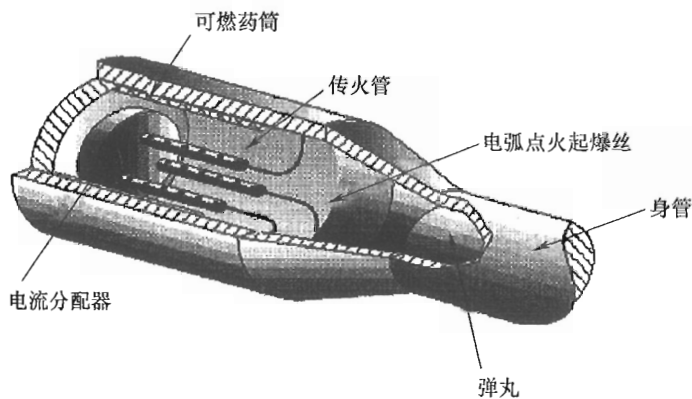


图 1-18 中心起爆丝型等离子体发生器

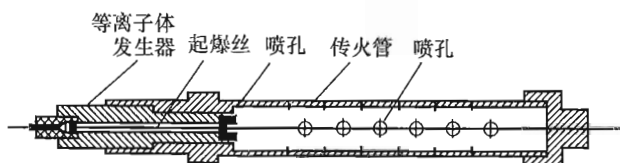


图 1-19 底喷起爆丝型等离子体发生器

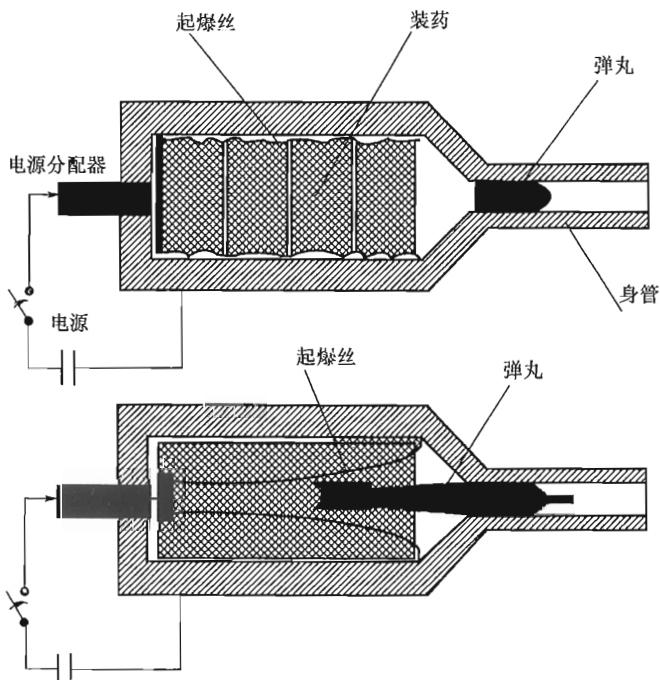


图 1-20 与装药结合起爆丝型等离子体发生器

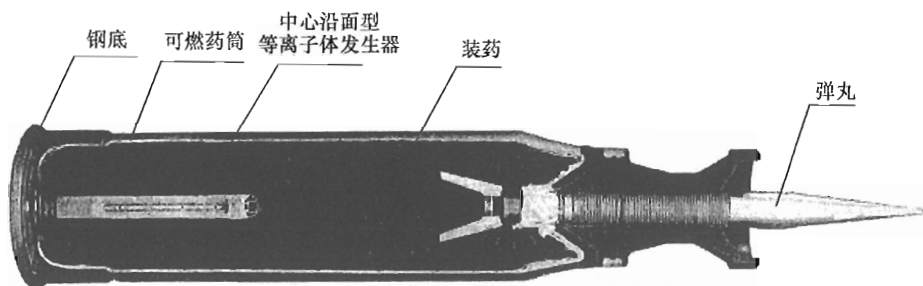


图 1-21 美国 105mm 电热化学炮穿甲弹中心沿面型等离子体发生器

1.1.5 内弹道及装药技术研究概况

利用等离子体发生器点传火方式取代常规点传火方式，并结合弹药技术与发射装药技术发展，使得提高和改善常规火炮内弹道性能成为可能。目前国外技术情报报道与研究资料结果，表明电热化学炮在精确点火、内弹道一致性、内弹道温度补偿性能以及获得较高炮口动能等优势 and 潜力方面，具有明显的效果。为了获得上述效果研究，国外从基础与基本机理、基本原理以及内弹道性能等研究方面，深入广泛开展了各项研究。具体如下：

(1) 基础与基本机理研究方面。先后开展了等离子体发生器性能研究，着重研究其放电特性及其形成的等离子体压力与温度，其试验装置如图 1-22 所示^[1]；等离子体与发射药相互作用研究，着重研究等离子体喷射对发射药表面及其深层结构影响，研究等离子体发生器对发射药燃烧规律的影响等，试验装置分别如图 1-23、图 1-24 所示，试验结果如图 1-25、图 1-26 所示^[1]。

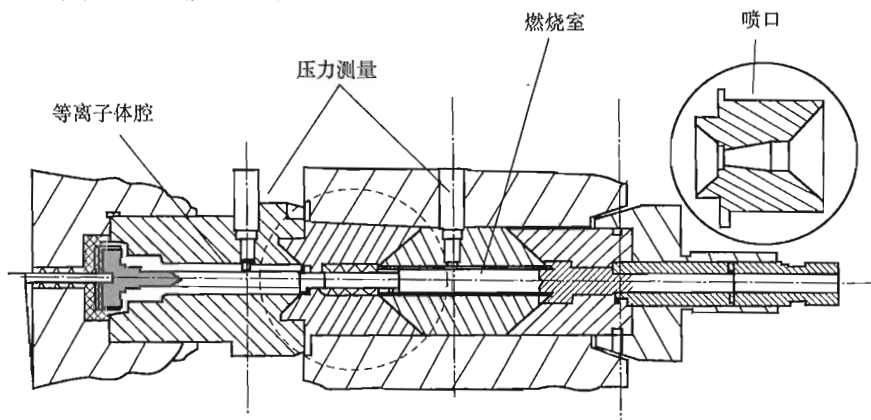


图 1-22 以色列电热化学炮等离子体发生器性能试验装置

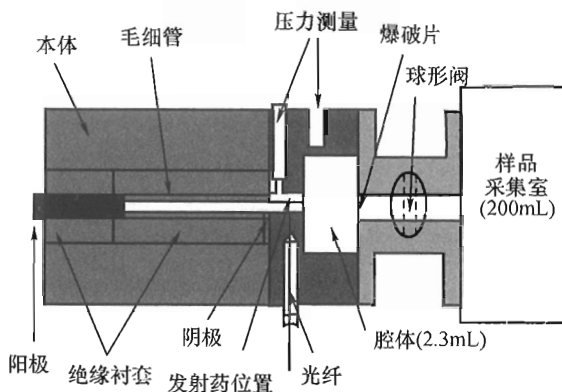


图 1-23 美国 200mL 等离子体发生器与发射药化学相互作用试验装置

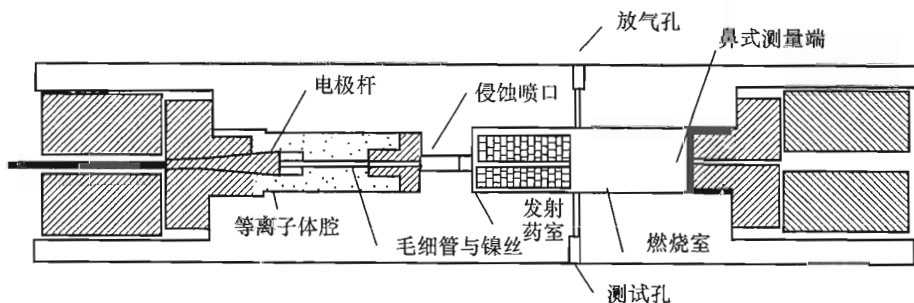


图 1-24 美国 120mL 等离子体发生器与发射药燃烧相互作用密闭试验装置

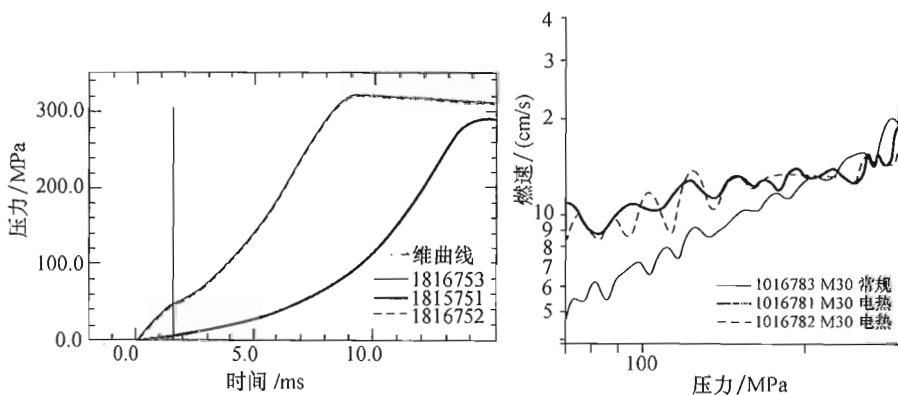


图 1-25 等离子体对美国 M30 发射药燃烧影响试验结果

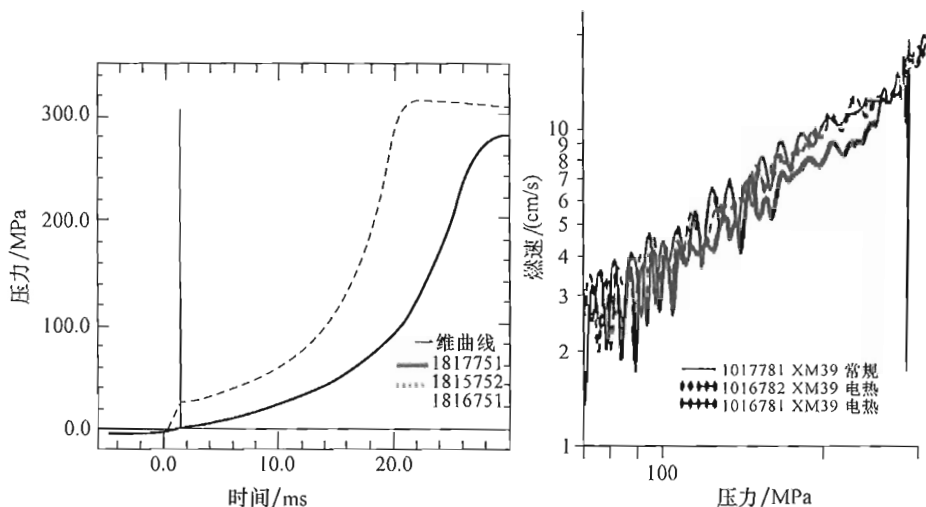


图 1-26 等离子体对美国 XM39 发射药燃烧影响试验结果

(2) 基本原理研究方面。重点开展了等离子体点传火对发射装药结构的影响以及等离子体在装药结构限制条件下的输出性能研究, 其试验装置如图 1-27、图 1-28 所示^[23]。同时开展了等离子体与高装填密度装药结合的技术研究, 如图 1-29、图 1-30 所示。

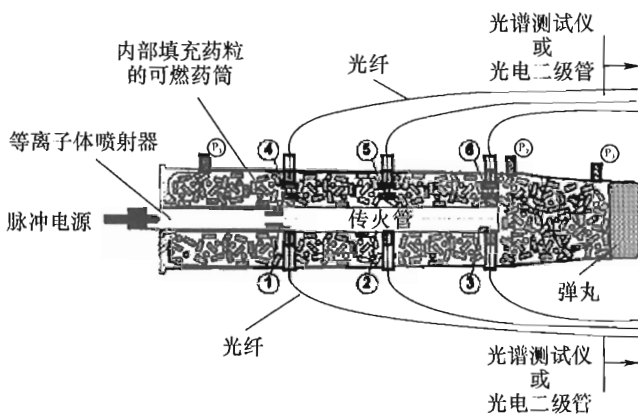


图 1-27 以色列电热化学炮模拟药室试验装置

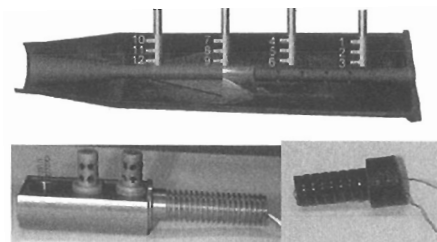


图 1-28 传感器形状与位置示意图

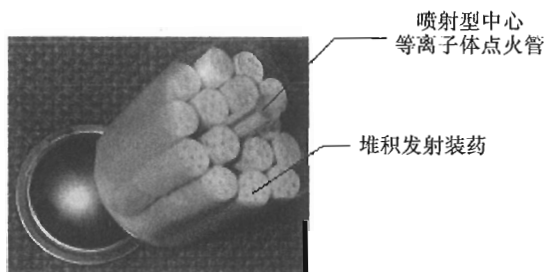


图 1-29 等离子体于堆积型发射装药相互作用研究示意图

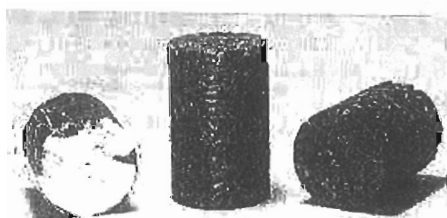


图 1-30 以色列电热化学炮密实装药样品

(3) 内弹道性能研究方面。德国从 1987 年开始分别采用 20mm、45mm、70mm、105mm 及 120mm 火炮进行了电热化学炮内弹道性能研究，其主要结果如表 1-2、图 1-31、图 1-32 所示^[1]。

表 1-2 德国不同口径的电热化学炮试验装置试验结果

口径/mm	身管长/m	弹丸质量/kg	初速/(m/s)	炮口动能/MJ
20	2.5	—	2374	—
45	2.5	—	2540	—
105	6	3.2	1915	5.71
120	6	8.4	1826	14

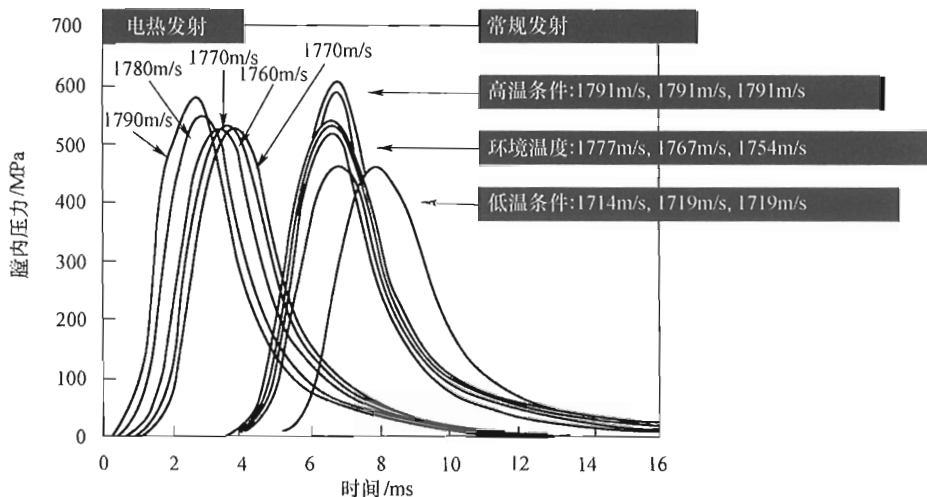


图 1-31 德国 120mm DM13 穿甲弹电热化学炮温度补偿性能试验结果

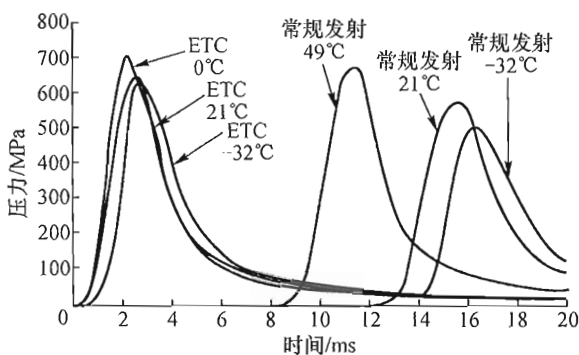


图 1-32 美国 120mm M829A2 穿甲弹温度补偿性能试验结果

美国针对不同口径电热化学炮采用不同装药结构进行了弹道性能试验,其试验结果如表1-3和图1-32、图1-33所示。120mm 穿甲弹装药结构如图1-34^[1]所示。

表 1-3 美国电热化学炮内弹道试验结果

时 间 /年	口 径 /mm	弹丸质量 /kg	初 速 /(m/s)	炮口动能 /MJ
1981	10	0.0005	4000	0.004
1982—1985	20	0.0005	5200	0.007
1993	60	2.75	1200	1.98

续表

时 间 /年	口 径 /mm	弹丸质量 /kg	初 速 /(m/s)	炮口动能 /MJ
1993	105	4.9	1850	8.385
1989—1990	120	5.8	2500	18.125
1992	127	25	1160	16.82
2001	120	10.2	1825	17.0

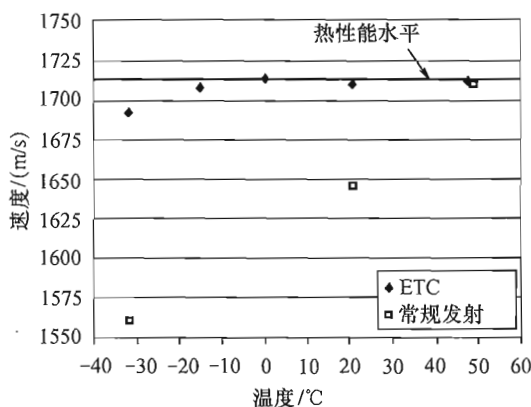


图 1-33 120mm 电热化学炮温度补偿性能与常规火炮比较

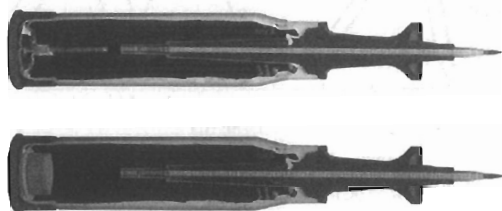


图 1-34 美国 120mm 电热化学炮穿甲弹装药结构

此外，以色列、法国、英国等也开展了不同程度的研究。

1.1.6 弹药技术研究概况

由于电热化学炮与常规火炮具有很好的继承性，主要的区别在于等离子体点火取代常规点传火，其点火过程伴随有较强的放电过程，但其膛内压力曲线仍与常规发射过程基本相似，因此，对于弹体过载能力仍然适应。所不同的是对于带有电子时间引信的弹药需进一步研究其电磁兼容适应性。此外，基于等离子体本身具有的点火优势，使得穿甲弹弹芯长度进一步增加，大幅度提高穿甲威力成为可能，同时也使等离子体点火系统与

发射装药的适配性增强,进一步适应高装填密度装药技术得到可靠保障。

1.2 国内电热化学炮技术研究概况

1.2.1 概述

国内对电热化学发射技术的研究,着手于“八五”后期,经过“九五”较为系统的研究,在电热化学炮发射机理、大容量电容器研制、脉冲网络成形系统设计和布局及测试技术等方面,具备了基本认识,初步掌握了电能与化学工质相互作用的基本规律,并在5.2mm、23mm、30mm电热化学试验装置上,进行了电热化学炮发射技术的机理和可行性研究。其中,在5.2mm发射装置上将0.5g弹丸加速到2677m/s;在23mm发射装置上将59g弹丸加速到1820m/s;在30mm发射装置上将100g弹丸加速到2200m/s。理论和试验研究表明,电热化学炮发射技术对于小口径火炮,在大幅度提高火炮初速和炮口动能方面具有巨大的潜力。

“十五”期间,国内以中大口径电热化学炮为主,相继开展了电热化学炮脉冲电源技术、等离子体精确点火技术、温度补偿技术、高装填密度装药等技术研究工作。其中,在某口径弹道炮试验装置上,将7.0kg弹丸加速到1745m/s,验证了等离子体点火内弹道一致性,并将8.0kg弹丸加速到1720m/s,炮口动能比常规火炮提高8.8%。在某中口径弹道炮上,也进行了广泛的电热化学炮技术试验研究。图1-35、图1-36分别为国内研制的某小口径和某大口径电热化学炮试验装置。



图1-35 某小口径电热化学炮试验装置



图1-36 某大口径电热化学炮发射装置

“十一五”期间,国内以某大口径弹道炮试验装置为手段,重点开展了电热化学炮温度补偿性能与电调控增速技术研究,在优化等离子体发生器设计的基础上,验证了电热化学炮低温初速补偿性能与电调控增速性能,与常规发射技术相比,比最新定型的制式弹药初速提高50m/s以上。

总之,国内电热化学炮技术研究历经近多年计划研究,初步具备了进

一步开展技术集成演示验证的条件。此外,由于与常规火炮技术相比,电热化学炮技术增加了脉冲电源,并利用等离子体发生器取代了常规点传火系统,对电热化学炮自行武器系统研制带来许多新的研究课题,如火炮总体布局技术、脉冲电源适应性技术、弹药适应性技术以及装药结构技术等。这些新的课题有待于在今后的工作中予以解决。

1.2.2 国内电热化学炮关键技术研究

电热化学炮技术研究涉及总体技术、火炮结构技术、弹药技术、内弹道及装药技术、脉冲电源技术、等离子体发生器技术等方面的研究。在国内开展电热化学炮技术研究的历程中,重点对脉冲电源技术、等离子体发生器技术及其内弹道与装药技术开展了深入研究,而对于总体技术、火炮结构技术及弹药技术等方面仅开展了初步论证工作。因此,这里仅就脉冲电源技术、等离子体发生器技术、内弹道与装药技术及测控技术研究情况予以简要介绍。

1. 脉冲电源技术

脉冲电源技术既是电热化学炮的重要基础技术,也是电热化学炮的关键技术之一,对于确保按火炮指标要求完成发射过程发挥着重要作用。电热化学炮脉冲电源与火炮电站电源具有明显的不同,主要表现在:①工作电压高,一般在几千伏到上万伏;②电流强,一般为几十千安到上百千安;③放电时间短,一般为几个毫秒;④电源放电功率大约为几十亿瓦;⑤初始储能为几十千焦耳到兆焦耳级等。而一般自行火炮工作电源电压为28V,电流为300A左右。

电热化学炮脉冲电源作为一种专用技术,国内在油浸式电容器的基础上,开展了基础与原理研究,研制了某小型移动式脉冲电源,配合某小口径电热化学炮试验装置完成了发射试验,首次实现了初速达2000m/s以上;另外,国内利用引进的俄罗斯脉冲电源技术,建立了以油浸式电容器、真空开关及其触发器为核心的1MJ脉冲电源,结合某小口径试验装置,实现了初速达2200m/s以上;随着电热化学炮发射技术研究向着大口径火炮应用研究的转变,以及脉冲电源关键器件技术进步,国内先后建成了以金属化膜自愈式电容器、球隙空气开关及大功率续流晶体二极管为核心的移动型脉冲电源、固定式脉冲电源及车载式脉冲电源,分别如图1-37~图1-39所示。这一期间,为了在电热化学炮技术深入研究的基础上,尽快使脉冲电源达到电热化学炮技术演示验证项目要求,以及深入考察脉冲电源与自行火炮总体适应性,国内有关单位研制了紧凑型模块化程控式脉冲电源,如图1-40所示。



图 1-37 小型移动型脉冲电源

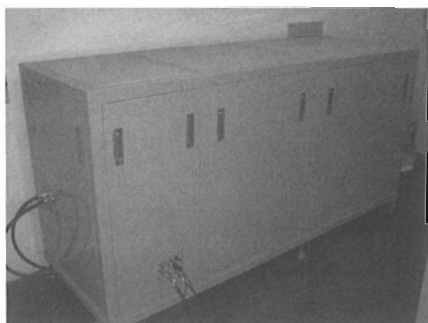


图 1-38 小型固定式脉冲电源

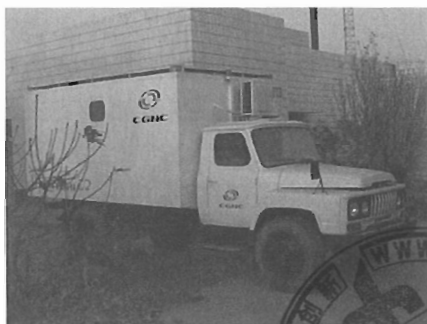


图 1-39 小型车载脉冲电源



图 1-40 紧凑型模块化程控式脉冲电源

2. 等离子体发生器技术

自从 1923 年物质第四态——等离子体被正式命名以来，随着研究的深入，等离子体技术在工业、国防、照明等领域获得了广泛应用，例如高速战斗机隐身，金属切割与焊接，材料表面用于耐磨、耐腐蚀、耐高温等方面的改进，室内外照明等。等离子体的产生主要以等离子体发生器为手段，主要方法有电离解法、热离解法、核爆炸法及光照离解法等^[8,25]。电热化学炮采用取代常规点传火系统的等离子体发生器，可分为底喷式、金属丝起爆式、中心沿面式、双电极同轴沿面式等结构类型，其产生等离子体的主要原理为瞬间（一般为几个毫秒），针对等离子体发生器施加高电压（5~10kV）和强电流（几十千安），促使其低电阻负载产生爆炸，形成金属等离子体，同时消融其周围高分子聚合物也形成部分等离子体，最终形成温度达 5000~10000K 的混合等离子体，点燃位于火炮药室内的装药，并释放火药气体推动弹丸加速运动。基于放电可控性与时序调节性以及等离子体的特点，进而可使等离子体与发射药、发射装药的相互作用得到有效控制，实现提高和改善火炮内弹道性能的目的。图 1-41 所示为等离子体发生器应用于火炮射击过程示意图。

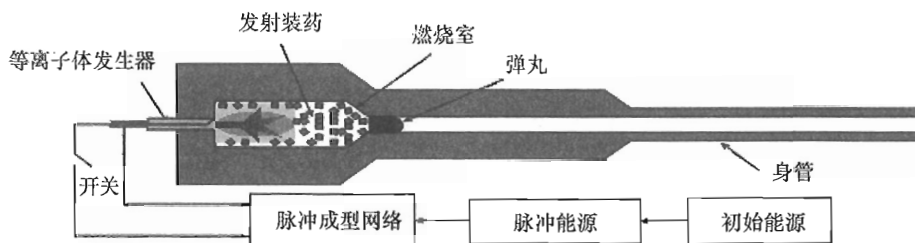


图 1-41 等离子体发生器应用于火炮射击过程示意图

等离子体发生器取代火炮常规点传火系统，其主要优势表现在：①点火的高温性，其点火温度范围一般在 $5000 \sim 10000\text{K}$ ；②瞬时性与一致性，传火速度为微秒级，能够有效解决膛内压力波；③可控性（输入电能可调），能够有效调节初始弹道过程；④适应性，能够对高装填密度装药与燃速可控发射药的燃烧实施有效点火与控制；⑤通过电能调节能够解决常规弹道性能温度敏感性。

基于等离子体发生器的重要性，国内在电热化学炮技术研究过程中，重点分五个阶段开展了等离子体发生器技术研究。

第一阶段：等离子体发生器理论与结构研究。

第二阶段：等离子体发生器性能研究。

第三阶段：等离子体发生器模拟试验应用研究。

第四阶段：等离子体发生器弹道性能试验研究。

第五阶段：等离子体发生器性能优化研究。

通过上述五个阶段研究，先后突破和掌握的关键技术有高电压强电流绝缘技术、耐高温高压强度技术、环境高低温适应性技术、电能转换效率技术、起爆稳定性技术等。重点研究的等离子体发生器形式有：中心底喷式等离子体发生器、中心沿面式等离子体发生器及中心金属爆炸丝式等离子体发生器。先后开展了等离子体发生器放电特性、点传火一致性、等离子体温度测试、放电效率性能、发射药燃烧特性、发射装药适配性及内弹道性能等试验。试验中所采用的等离子体发生器分别如图 1-42 和图 1-43 所示。

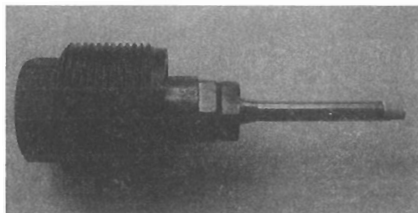


图 1-42 密闭爆发器用等离子体发生器

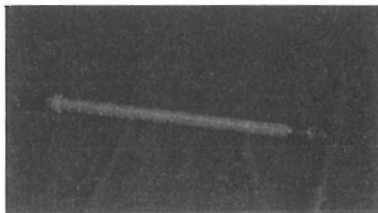


图 1-43 炮用等离子体发生器

3. 内弹道及装药技术

在脉冲电源系统研制、等离子体发生器研究以及各种测试技术研究的基础上,国内开展电热化学炮内弹道及装药技术研究大致可分为4个阶段:

第一阶段:等离子体点火与固体发射药、火炮发射装药相互作用单项试验与模拟试验研究。重点研究等离子体点火对固体发射药燃烧规律的影响与控制效果,研究其对发射装药的点传火性能及装药药床运动规律的影响,为电热化学炮内弹道及装药设计与试验提供可靠基础数据和技术参考^[26]。

第二阶段:常规制式装药条件下等离子体点火内弹道性能研究。重点研究等离子体点火与常规发射装药的适应性、内弹道一致性。

第三阶段:常规制式装药条件下等离子体点火温度补偿性能研究。重点研究了等离子体发生器高低温适应性与电能调节对高温、低温装药条件下内弹道性能的调控性,验证了电热化学炮温度补偿性能潜力。

第四阶段:新型发射药与装药技术条件下等离子体点火电调控增速与提高炮口动能技术研究。该阶段国内以中大口径弹道炮试验装置为手段,重点开展了等离子体点火对钝感发射药、包覆发射药及密实发射装药燃烧规律的研究,完成了电能调控下,等离子体点火钝感发射装药与包覆发射装药内弹道性能试验,实现了同弹丸质量初速获得提高3%以上的弹道效果,为增加火炮有效射程,提高火炮作战威力奠定了良好基础。

在完成上述4个阶段研究工作中,先后建立了各式等离子体发生器数学物理模型,并使常规内弹道模型与现代内弹道模型结合,完成了多种内弹道及装药方案计算,为试验装置设计和试验效果获取提供了重要理论依据^[27~30]。图1-44~图1-47所示为内弹道及装药技术研究过程中部分试验装置图及试验测试压力曲线。

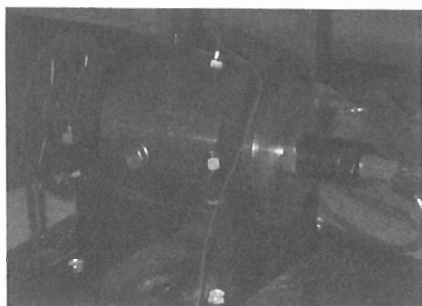


图 1-44 密闭爆发器试验装置

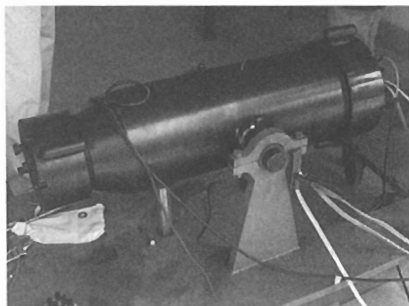


图 1-45 模拟药室试验装置



图 1-46 某大口径弹道炮试验装置

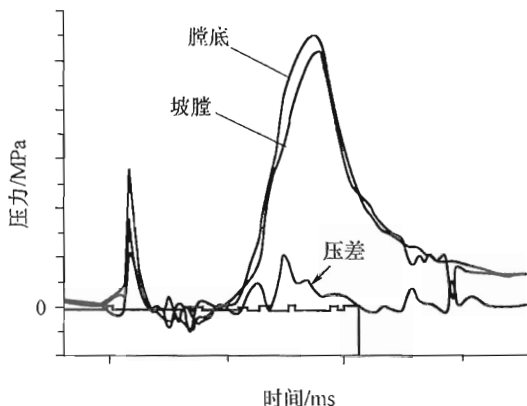


图 1-47 试验所测压力曲线

总之，经过多年计划研究，国内在电热化学炮技术研究方面，建立了较完善和较系统的试验与测试手段，建立了较全面的电热化学炮内弹道数学物理理论，基本掌握了等离子体点火对发射药与发射装药燃烧规律的影响，掌握了等离子体发生器设计与工程应用适应性技术，初步验证了电热化学炮精确点火、内弹道一致性及炮口增速等技术，为进一步深入开展电热化学炮技术集成演示与高性能电热化学炮技术研究奠定了良好的基础。

4. 测控技术研究概况

(1) 基本概况。在电热发射系统中，由于存在高电压、大电流的脉冲放电过程，输出的脉冲具有极高的能量密度，因此，发射系统犹如一个大型的电磁干扰源，脉冲功率越高，电磁干扰越严重，测试环境越恶劣。大功率的脉冲放电过程使电磁发射环境下弹道参数的测量工作复杂化，特别是在负载金属丝猛烈电爆炸时，由于电流变化率 (di/dt) 极高，电磁干扰尤其严重。一般来说，接地技术是常用的抑制电磁干扰，提高电子仪器电磁兼容性的措施之一，正确的接地能有效抑制电磁干扰的影响。但是大地不同于金属体，它的电导率介于导体与绝缘体之间，在冲击电流流经接地回路时，其接地阻抗完全不同于工频环境下的接地阻抗，接地体的分布

电感及电阻使接地阻抗增大，其作用大小取决于接地体结构、土质的电特性及冲击电流的频率和幅度，同时由于发射系统、测试系统装置、传输线存在自感和互感，在脉冲电流很高时，脉冲功率源、发射体及放大采集系统之间将出现较大的电位差，很难做到等电位传输。因此，在进行电热发射技术参量测试中，若不采取一定的抗干扰措施及隔离技术，而用传统测试系统测量火炮的膛压或密闭爆发器及模拟装置内的火药燃气压力，则在高压放电时，由于产生的电磁干扰和电位浮动等现象而影响测试的正常进行，甚至波及仪器和人身安全，这是 ETC 环境下的测量与常规弹道测试环境测量的根本不同之处。因此，在实施电热化学发射技术参量测试时，采取电位隔离放大或光电隔离传输测试技术是十分必要的，其主要传输线为同轴屏蔽测试线^[24]。试验表明这两种方法均能有效应用于电热化学炮压力测试。而初速测试则通常采用天幕靶、光幕靶及通断靶等方法，而雷达由于受放电干扰较强则应用较少。电流与电压测试大多分别采用茹可夫斯基线圈与分压电阻法，能获得良好的测试结果。

(2) 电位隔离放大或光电隔离传输测试基本原理。针对以上问题，为实现等离子工作条件下的火炮和模拟装置的膛压测试及大功率脉冲源的工作状态检测，采取了宽频带高精度差分直流放大及中和脉冲变压器隔离与传输放大技术和前置放大及光电隔离与放大传输技术两种基本方案。

其技术原理是：满足一定带宽的小信号工作环境、具有高精度的传输放大特性、能够克服公共端浮动电位而设置一个全新的组合测试系统，使其能有高质量的隔离屏障作用，从而有效抑制干扰源产生的有负面影响的高电压通过及使输入、输出不共地，并从本质上消除电磁干扰和共模干扰，达到保护有用信号的理想传递，实现各检测对象的正常测量记录。图 1-48、图 1-49 所示为电位隔离放大与光电隔离放大测试系统原理图，对

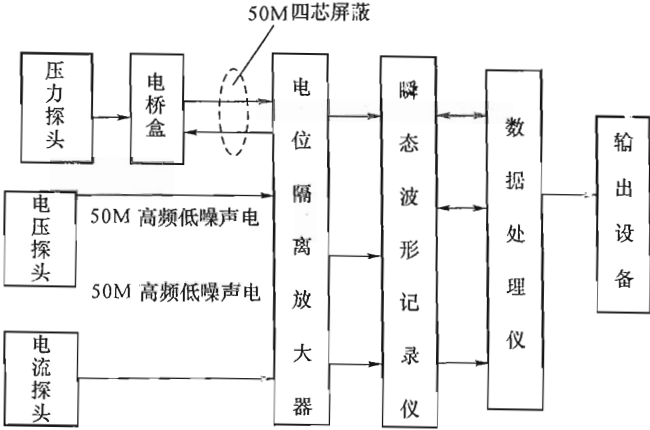
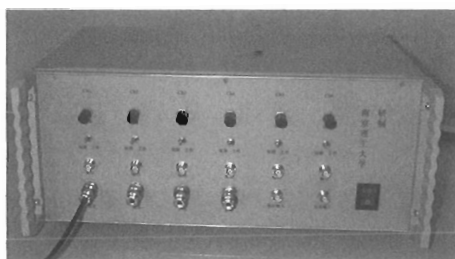
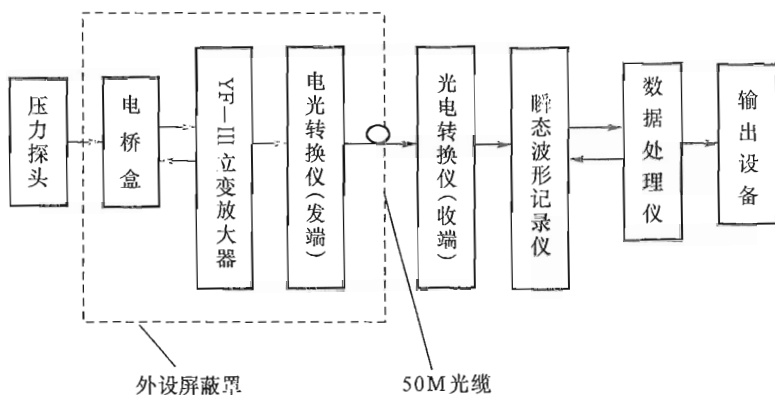


图 1-48 电位隔离放大测试系统原理图

应的仪器设备分别如图 1-50、图 1-51 所示。



第2章 电热化学炮基本概念与原理

2.1 电热化学炮基本概念

电热化学炮的基本概念是利用电能与化学能相互结合,来实现火炮内弹道性能及其诸如火炮有效射程、火炮射击精度等方面综合性能的进一步提高,进而推动火炮武器系统作战性能的进一步较大幅度提高,满足新一代火炮武器系统战术技术指标需求。电热化学炮技术与常规火炮技术相比,主要区别在于:①增加了外接能源——电能的输入和调节,为火炮弹道性能的可调控性提供了执行空间;②利用电能释放产生等离子体热能的等离子体发生器点传火系统取代了常规点传火系统,使得火炮发射装药的点火一致性、弹道安全性及燃烧可控性,得到显著改善;③适应等离子体点火的高能新型发射药与发射装药技术取代了常规高能发射药与发射装药,使得火炮弹道性能得到较大提高与改善^[31-33]。

2.2 电热化学炮基本分类

电热化学炮发射过程做功工质包含有两种:其一是脉冲电源放电作用于等离子体发生器产生的高温等离子体工质;其二是弹后空间含能物质在等离子体作用下自主释放的气体工质。根据弹后空间含能物质的形态电热化学炮一般分为电热化学固体发射药火炮(ETCSPG)与电热化学液体发射药火炮(ETCLPG)。图2-1与图2-2分别所示为电热化学固体发射药火炮和电热化学液体发射药火炮内膛装药结构示意图^[34]。

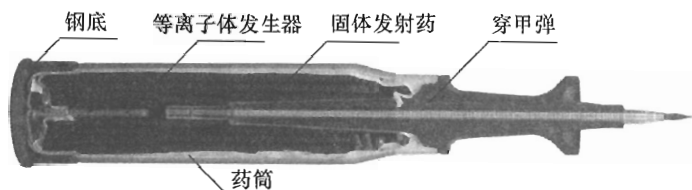


图2-1 电热化学固体发射药火炮内膛装药结构示意图

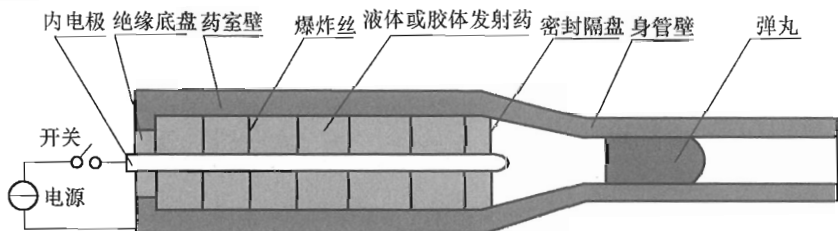


图 2-2 电热化学液体发射药火炮内膛装药结构示意图

2.3 电热化学炮基本原理

对于现有常规火炮来说，其发射过程首先由底火引燃点传火药，然后由点传火药引燃火炮主装药（或称为主含能工质）及其装药附件（如可燃药筒、药筒紧塞盖、消焰剂及除铜剂等），主装药及其装药附件按一定规律燃烧，并在火炮弹后容积约束下形成高温高压火药气体，推动弹丸沿火炮身管加速运动，直至弹丸飞出炮口。其典型的膛内 $P-t$ 曲线与 $V-t$ 曲线如图 2-3 和图 2-4 所示。

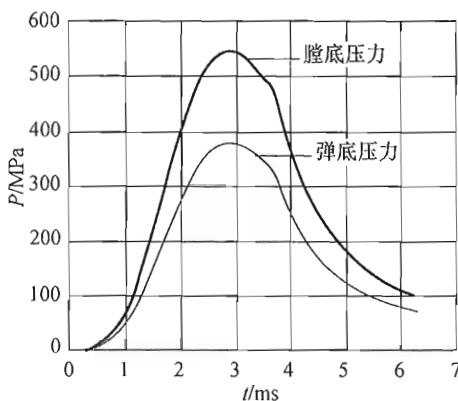


图 2-3 典型某口径火炮膛底压力与弹底压力曲线

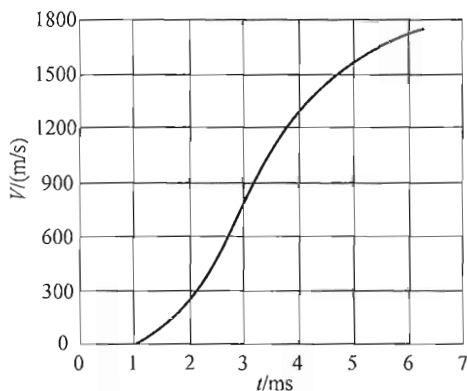


图 2-4 典型某口径火炮弹丸速度曲线

对于电热化学炮来说，其初始点传火过程由等离子体发生器来实现，等离子体发生器作为脉冲电源的负载，在脉冲电源高电压（5000 ~ 10000V）、强电流（10 ~ 50KA）放电作用下，形成较高温度的等离子体，进而引燃火炮主含能工质及其可燃附件来实现火炮发射过程。其典型的 $I-t$ 、 $V-t$ 及 $P-t$ （功率）放电曲线， $P-t$ 及 $V-t$ 曲线如图 2-5、图 2-6 所示。

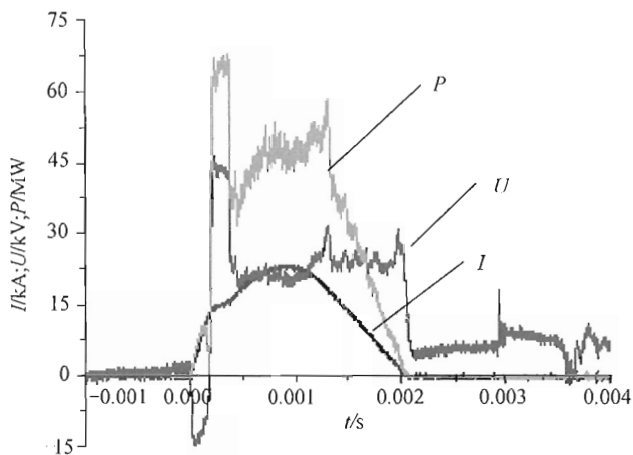


图 2-5 某口径电热化学炮放电曲线

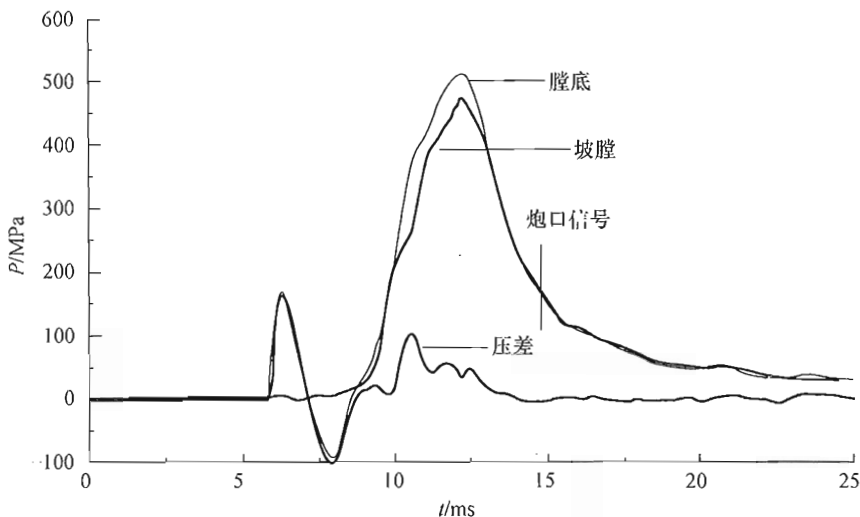


图 2-6 某11径电热化学炮膛底与坡膛压力变化曲线

2.4 电热化学炮基本组成

电热化学炮通常由脉冲电源系统、等离子体发生器、身管、弹丸、含能工质（固体发射药、液体发射药或轻质气体）等组成，如图 2-7 所示^[35]。

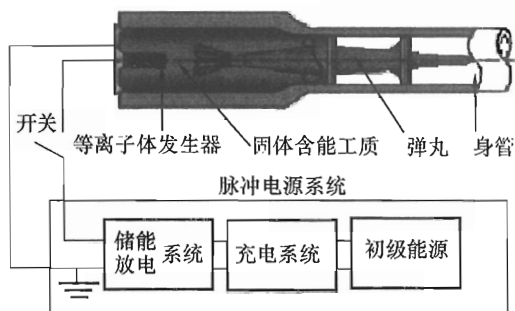


图 2-7 电热化学炮基本组成示意图

第3章 电热化学炮脉冲电源技术

大功率脉冲电源系统是电热化学炮技术研究的主要组成部分，它通过等离子体发生器输入电能的同时，也对等离子体发生器的点传火作用具有重要的影响。电热化学炮技术通过合理优化电能需求，发挥等离子体发生器点火一致性、瞬时性及燃烧增强性好的优点，同时充分利用成熟发射药技术，在内弹道性能受控状态下较大幅度地提高火炮初始化学能，进而达到提高炮口动能的目的。试验结果表明，美国已使 120mm 坦克炮穿甲弹炮口动能增加到 17MJ 左右，德国已使 120mm 坦克炮穿甲弹炮口动能增加到 14MJ。在这些试验中，采用实验室电源系统最大储能为 3MJ 左右。

脉冲电源根据储能方式不同，通常划分为：脉冲电容器储能式、脉冲电感储能式、脉冲飞轮发电式等脉冲电源型式。

3.1 脉冲电容器储能式脉冲电源技术

脉冲电容器储能式脉冲功率源系统主要由储能电池组、高频充电装置、脉冲成形网络模块、电位隔离测控装置、光纤时序触发控制系统、PFN 母线及汇流器、供电装置 8 部分组成。脉冲电源模块组如图 3-1 所示。

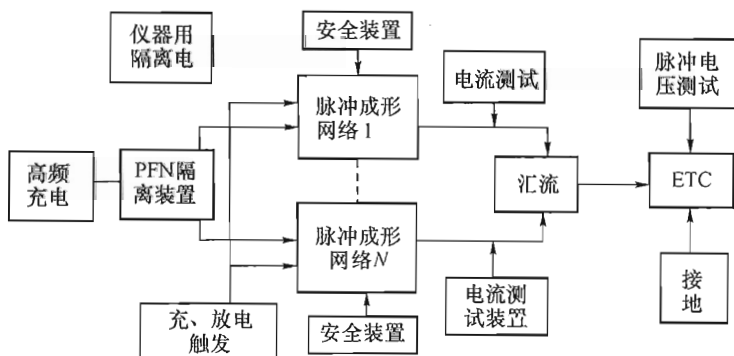


图 3-1 脉冲电源模块组

脉冲成形网络模块由脉冲电容器组、脉冲成形电抗器、高压大功率续流硅堆、主放电开关及触发装置、高压大功率同轴传输线、汇流器装置及安全泻放装置组成。

脉冲成形网络模块分别安装在独立的箱体内，通过专用高压大功率同轴电缆与负载相连；采用多模块共用一台高频高压充电器充电，各模块充电电压相同，模块通过高压隔离开关分离。为了提高电源系统的抗电磁干扰能力，通过光纤时序放电控制系统，控制多模块电源系统同时或时序触发向负载放电，达到调整负载电流波形的目的。布局尽可能采用模块化安装结构，并考虑电磁兼容问题。

初级电源由多套电池组和多台电池充电器组成，可提供多发实验的电能。

脉冲电源由多路脉冲成形网络模块、多路光纤时序触发及控制系统、多台高压充电器及测试装置组成。各模块额定电压为十几千伏、输出电流峰值几十千安、电流脉宽 $1\sim 3\text{ms}$ （具体工作参数应结合实际ETCG而定）。

一般移动式脉冲电源系统需要车载，如图3-2所示。车厢可分为仪器间和操作间，车厢五面可以方便打开，以备维修，车厢应具备防雨防潮功能。鉴于野外可能缺乏电力资源，需配备蓄电池组作为初级电源，并用蓄电池的电能通过高频充电器对电容器进行充电，高频充电器的输入电压与固定式所配的不同。

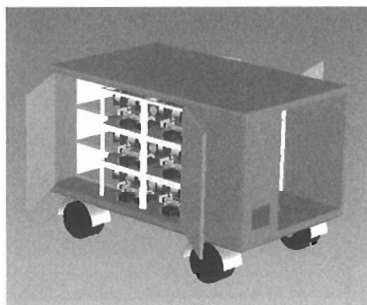


图3-2 车载型脉冲电源系统

3.2 电感储能式脉冲电源技术

3.2.1 基本概念

基于电感器本身储能的脉冲电源技术，称为电感储能式脉冲电源技

术。电感器—磁场方式储能，其储存的电能与自身的电感和流过它本身的电流平方成正比，即 $E = L \cdot I \cdot I/2$ 。

3.2.2 发展背景

20 世纪 60 年代，电感储能技术由于其体积小、储能密度大、价廉，较之电容器储能占有优势。但是进入 70 年代后，由于微秒脉冲功率技术的迅猛发展，而且这些领域在进入实际应用研究阶段中大都需要重复频率，诸如惯性约束聚变、激光及粒子束武器、大功率微波等都要 10Hz 或几百赫兹的重复脉冲；加之脉冲电容器的储能密度及寿命研究得到了突破性进展。因而，70 年代后，电容器储能占有了优势。目前有名的大型装置，如 PBFA、NOVA、BLACKJACK 等都用电容器储能。进入 80 年代后，由于重复频率开关研究取得进展，特别是用于电感储能系统断路开关得到突破，所以电感储能在脉冲功率技术上的应用研究又有所发展。

总之，电感储能作为众多储能技术的一种，在现代科学技术领域中，诸如等离子体物理、受控核聚变、电磁推进、重复脉冲的大功率激光器、高功率雷达、强流带电粒子束的产生及强脉冲电磁辐射等领域，都有着极为重要的应用。

3.2.3 电感储能式脉冲电源组成与基本原理

电感储能式脉冲电源包括充电电源 E （采用铅酸蓄电池），电感储能线圈 L 转换装置，其中包括主开关（充电开关）、辅助开关（放电开关）、换流熔丝 F 、负载 Z （如脉冲氙灯或金属起爆丝），如图 3-3 所示。

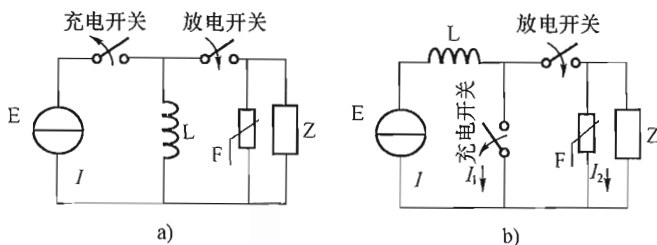


图 3-3 电感储能式脉冲电源线路图

a) 线路图一；b) 线路图二

充电过程：合上主开关，蓄电池向电感储能线圈 L 充电，电流按指数曲线上升，在此过程中，电源提供的电能除回路欧姆损耗外，以磁场能量的形式存能于电感储能线圈内；当充电电流（亦即磁场能量）达到给定值时，合上辅助开关，再切断主开关，迫使电流由主开关电路转入熔断器 F

回路。熔断器 F 中的熔丝受到所转入的电流加热, 根据电流密度的不同, 经过几个到十几毫秒的延时即行熔断; 熔丝熔断过程中形成多级电弧产生较高的电压, 供给点燃氙灯 Z 使用。

由主开关打开起到电流全部转入氙灯回路止的整个过程是电流由充电回路转入放电回路的换流过程, 此处应用熔断器来进行二次换流的目的在于提供点燃氙灯所需要的电压, 以及减轻主开关在开断时的灭弧负担。当电流转入氙灯回路后在氙灯中产生放电, 在放电过程中电流迅速下降至零, 而电感线圈所储存的磁场能量即转化为激励工作物质所需的光能。

3.3 脉冲发电机式脉冲电源技术

3.3.1 基本概念

基于脉冲型如飞轮储能方式的脉冲电源技术, 能够短时产生高电压、大电流或大功率脉冲, 包括冲击电压发生器、冲击电流发生器和高功率脉冲发生器。

3.3.2 发展背景

脉冲发电机式脉冲电源技术, 即惯性储能技术, 其基本原理就是借助驱动飞轮储存起来的机械能进行脉冲发电的功率技术。机械能分静态和动态两种。动态机械能又分为直线的和旋转的, 储存在旋转机械或飞轮中的动能是旋转机械能, 不仅储能密度高, 而且提取也较为方便。一般来说, 使用较小功率的拖动机构, 以相对长的时间把一定大质量的转子或飞轮慢慢地加速, 使其转动起来, 利用转动惯性储存足够的动能; 然后以此动能驱动合适的发电设备, 利用其转动惯性把机械能转变成强电磁能脉冲能量。

根据高功率脉冲电源使用的旋转机械可以将脉冲发电机分为以下两类: 一类是直流发电机, 它包括换向直流脉冲发电机和单极发电机; 另一类是交流发电机, 它包括同步发电机和补偿脉冲交流发电机 (Compulsator)。这些旋转机械的发电原理都是基于法拉第电磁感应定律。脉冲功率发电机的分类和性能如表 3-1 所示^[36]。

单极发电机 (HPG) 是法拉第根据电磁感应定律于 1931 年制成的, 所以有时也称法拉第发电机。HPG 的主要缺点是电压过低, 而同步发电机虽能产生较高电压, 但需要增大激磁磁场, 或提高转速, 或增加电枢绕组

匝数 N 。前两个因素受所用材料的物理性能限制，而增加 N 将使绕组线圈电感随之增加，这将导致同步发电机电压上升时间过长。

表 3-1 脉冲功率用旋转发电机的典型分类和性能

类型	机器名称	储能密度 /(kJ/kg)	功率密度 /(kW/kg)	典型脉宽 /s	典型 电压 /V	电源 阻抗 / Ω	短路 电流 /kA	储能 时间 /s	体比能 密度 /(MJ/m ³)	成本 /(美分/J)
直流	直流发电机	0.32	0.3	1	1800	0.0142	1	100	20	
	单极发电机	8.5	70	0.1~0.5	100	10~5	2000	415	150	鼓型 11 圆盘 15
交流	同步发电机	1.3	0.7	71	6900	1.12	6	3000	30	
	补偿交流 发电机	3.8	250	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	6000	0.084	71	254	100	33

为了克服上述诸缺点，美国德克萨斯大学奥斯汀分校机电中心（CEM-UT）在 1978 年发明了补偿式脉冲交流发电机（Compensated Pulsed Alternator, CPA）。补偿式脉冲交流发电机是利用补偿电枢反应原理和磁通压缩原理产生高压脉冲的脉冲功率电源，集储能、机电能量转换和功率调节于一体，具有单元件的综合优势，大大减少了从原动机到负载的功率输出环节，被认为是未来最有潜力应用于电炮的小型化电源，是未来实战化电炮武器系统的首选脉冲电源^[37]。

由于补偿脉冲发电机具有其他脉冲电源无可比拟的优越性，自 20 世纪 70 年代起，美、英、法、德、俄罗斯等世界主要军事强国陆续制定了专门研究计划，投入大量资金进行 CPA 关键技术研究^[38-40]。其中，以 CEM-UT 的投资最大，研究水平最高。UT-CEM 从 20 世纪 80 年代至今一直受到美国军方资助，为其电炮计划研制了一系列的 CPA 工程样机。

在国内，脉冲发电机的研究始于 20 世纪 80 年代初，以理论研究和跟踪仿制 UT-CEM 的模型样机为主要研究活动。中科院合肥等离子物理研究所自 1980 年率先开展 CPA 的研究工作，经过几代模型样机的探索，提出了 CPA 串级运行概念^[41,42]，该所目前拥有一台 25MW 的 PCPA^[43]。中科院电工所于 80 年代末研制了一台压缩比为 55 的小型 ACPA 样机。华中科技大学自 90 年代初开始 CPA 的研究工作，先后设计制造了一系列 CPA 样机，在电枢电感计算、脉冲波形调节、转子力学性能等理论研究领域取得了令人瞩目的成绩^[43-46]。哈尔滨工业大学电磁与电子技术研究所，自 2006 年开始，相继完成了一台铁心 PCPA 样机、一台混合励磁 CPA 和一台全空心 CPA 模型样机的研制^[47,48]。

为了追求更高的储能密度和功率密度，新一代的脉冲发电机广泛采用

空心结构,即用较高强度与密度比的复合材料替代传统的硅钢片,作为电机的储能元件和结构受力元件。由于电机内不含铁磁性材料,电机可以不受磁路饱和限制,磁通密度一般设计得很高,电枢绕组匝数较少,电机的内阻抗也随之显著减小。因此,空心结构 CPA 更加适合作为轨道炮的脉冲电源。然而,新的空心结构也带来了新的问题。首先,复合材料的磁导率与空气近似,空心 CPA 建立主磁场所需的励磁电流很大,绕组的发热现象十分严重;其次,复合材料导热性能较差,导致电机整体的散热性能不佳。因此,空心 CPA 连续放电运行时的绕组发热问题十分严重,成了制约其提高功率密度和连续负载运行的最大障碍。

3.3.3 脉冲发电机式脉冲电源组成与基本原理

脉冲发电机式脉冲电源一般由惯性储能、机电能量转换及脉冲成型等系统构成,具体由脉冲发电机本体、放电控制开关模块、初励超级电容器组、励磁控制开关模块、励磁整流模块、励磁与放电控制系统、原动机及控制器、离合器及其控制系统、总控制与显示系统、冷却系统、试验平台、减振器、屏蔽罩等组成,其系统组成图如图 3-4 所示。

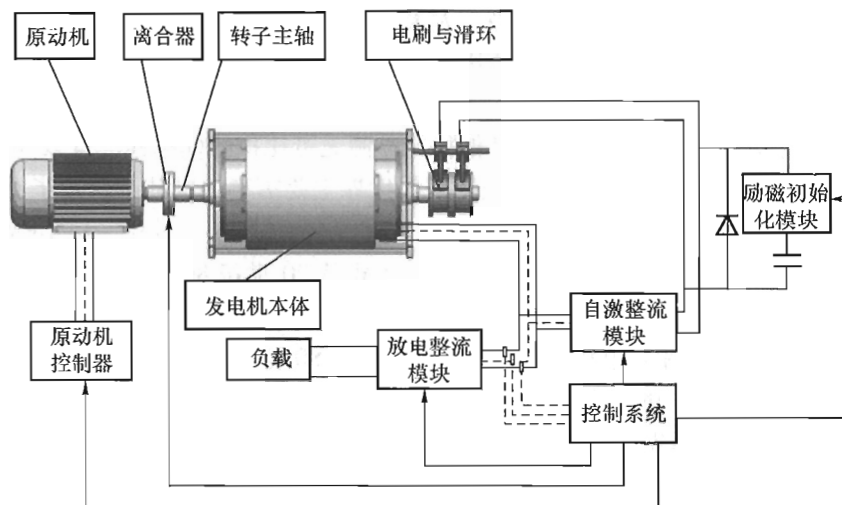


图 3-4 脉冲发电机系统组成图

其基本原理是利用原动机拖动脉冲发电机主轴至额定转速后,控制系统给离合器控制信号将原动机与转子主轴脱开,电机转子依靠惯性继续旋转。控制系统输出信号控制初始励磁模块导通,初始励磁储能电容通过电刷滑环向转子励磁绕组提供种子电流,产生初始主励磁场,多相电枢绕组切割磁力线感应电压,通过自激整流模块并联至电刷的输入端,向转子励

磁绕组提供直流励磁电流。利用电压电流互感器采集电枢绕组电压和励磁绕组电流，达到额定值时，控制系统停止向自激整流器输出门极控制信号，整流桥停止，励磁电流经续流二极管续流，同时，开启放电整流器，并对触发角进行控制，向负载放电。放电时，由二极管续流短路的励磁绕组与电枢绕组耦合感应电流，为电枢绕组提供补偿，降低电枢绕组的等效电感，从而输出幅值更大的脉冲电流。达到所需的电流脉宽后，控制系统停止给放电整流器门极控制信号，电枢绕组电流过零后放电过程结束，进入能量回收过程，控制系统控制自激整流器使其工作在逆变状态，脉冲发电机此时电动运行，电机转速升高，励磁绕组储存的电能转化为电机的动能，为下一次放电做准备。

第4章 电热化学炮等离子体发生器技术

等离子体发生器是电热化学炮的关键器件，借助于等离子体发生器的等离子体点火系统具有点火温度高（10000 ~ 20000K）、点传火时间瞬时性与一致性好（ μs 级）、对火药燃烧具有显著的增强效应等特点，在火炮内弹道过程中主要承担对发射装药实施有效点火和将尽可能多的电能加入到火炮膛内过程，因此，对于确保发射装药安全性和正常燃烧及提高弹道效率具有重要的影响。

4.1 等离子体技术简介

4.1.1 等离子体基本概念

等离子体（Plasma）又叫做电浆，是由部分电子被剥夺后的原子及原子团被电离后产生的正负离子组成的离子化气体状物质，尺度大于德拜长度的宏观电中性电离气体，其运动主要受电磁力支配，并表现出显著的集体行为。它广泛存在于宇宙中，常被视为是除去固、液、气外物质存在的第四态。等离子体是一种很好的导体，利用经过巧妙设计的磁场可以捕捉、移动和加速等离子体。等离子体物理的发展为材料、能源、信息、环境空间、空间物理、地球物理等科学的进一步发展提供了新的技术和工艺。

等离子体是不同于固体、液体和气体的物质第四态。物质由分子构成，分子由原子构成，原子由带正电的原子核和围绕它的带负电的电子构成。当被加热到足够高的温度或其他原因，外层电子摆脱原子核的束缚成为自由电子。电子离开原子核，这个过程就叫做“电离”。这时，物质就变成了由带正电的原子核和带负电的电子组成的、一团均匀的“浆糊”，因此人们戏称它为离子浆，这些离子浆中正负电荷总量相等，因此它是近似电中性的，所以就叫等离子体。

4.1.2 等离子体各类性质

物质第四态等离子体具有许多独特的物理、化学性质。主要有：

- (1) 温度高、粒子动能大。
- (2) 作为带电粒子的集合体，具有导电性能。
- (3) 化学性质活泼，容易发生化学反应。
- (4) 具有发光性能，可以作为光源。

4.1.3 等离子体分类

等离子体一般由离子、电子以及未电离的中性粒子的集合组成，整体呈中性的物质状态。等离子体可分为两种：高温和低温等离子体。等离子体温度分别用电子温度和离子温度表示，两者相等称为高温等离子体；不相等则称为低温等离子体。

4.1.4 等离子体技术应用

低温等离子体广泛运用于多种等离子体发生器生产领域，如：等离子电视、婴儿尿布表面防水涂层、增加啤酒瓶阻隔性等。更重要的是在电脑芯片中的运用，让网络时代成为现实。

高温等离子体只有在温度足够高时才发生。低温等离子体是在常温下发生的等离子体（虽然电子的温度很高）。低温等离子体可以被用于氧化、变性等表面处理或者在有机物和无机物上进行沉淀涂层处理。

4.2 等离子体发生器

用人工方法获得等离子体的装置，称为等离子体发生器。等离子体由自然产生的称为自然等离子体（如北极光和闪电），由人工产生的称为实验室等离子体。实验室等离子体是在有限容积的等离子体发生器中产生的。如果环境温度较低，等离子体能够通过辐射和热传导等方式向壁面传递能量，因此，要在实验室内保持等离子体状态，发生器供给的能量必须大于等离子体损失的能量。

不少人工产生等离子体的方法（如爆炸法、激波法等）产生的等离子体状态只能持续很短时间（ $10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}$ ），而有工业应用价值的等离子体状态则要维持较长时间（几分钟至几十小时）。能产生后一种等离子体的方法主要有：直流弧光放电法、交流工频放电法、高频感应放电法、低气压放电法（例如辉光放电法）和燃烧法。前四种放电都用电学手段获得，

而燃烧法则利用化学手段获得。等离子体发生器的放电原理是利用外加电场或高频感应电场使气体导电，称为气体放电。气体放电是产生等离子体的重要手段之一。被外加电场加速的部分电离气体中的电子与中性分子碰撞，把从电场得到的能量传给气体。电子与中性分子的弹性碰撞导致分子动能增加，表现为温度升高；而非弹性碰撞则导致激发（分子或原子中的电子由低能级跃迁到高能级）、离解（分子分解为原子）或电离（分子或原子的外层电子由束缚态变为自由电子）。高温气体通过传导、对流和辐射把能量传给周围环境，在定常条件下，给定容积中的输入能量和损失能量相等。电子和重粒子（离子、分子和原子）间能量传递的速率与碰撞频率（单位时间内碰撞的次数）成正比。在稠密气体中，碰撞频繁，两类粒子的平均动能（即温度）很容易达到平衡，因此电子温度和气体温度大致相等，这是气压在一个大气压以上时的通常情况，一般称为热等离子体或平衡等离子体。在低气压条件下，碰撞很少，电子从电场得到的能量不容易传给重粒子，此时电子温度高于气体温度，通常称为冷等离子体或非平衡等离子体。两类等离子体各有特点和用途（见等离子体的工业应用）。气体放电分为直流放电和交流放电。

目前，在科学技术和工业领域应用较多的发生器有电弧等离子体发生器（又称等离子体喷枪、电弧加热器）、工频电弧等离子体发生器、高频感应等离子体发生器、低气压等离子体发生器、燃烧等离子体发生器五类。最典型的为电弧、高频感应、低气压等离子体发生器三类。它们的放电特性分别属于弧光放电、高频感应弧光放电和辉光放电等类型。

电弧等离子体发生器又称电弧等离子体炬，或称等离子体喷枪，有时也称电弧加热器。它是一种能够产生定向“低温”（2000~20000K）等离子体射流的放电装置，已在等离子体化工、冶金、喷涂、喷焊、机械加工和气动热模拟实验等领域中得到广泛应用。通过阴、阳极之间的弧光放电，可产生自由燃烧、不受约束的电弧，称为自由电弧，它的温度较低（5000~6000K），弧柱较粗。当电极间的电弧受到外界气流、发生器器壁、外磁场或水流的压缩，分别造成气稳定弧、壁稳定弧、磁稳定弧或水稳定弧，这时弧柱变细，温度增高（约10000K），这类电弧称为压缩电弧。无论哪种压缩方式，其物理本质都是设法冷却弧柱边界，使被冷却部分导电性降低，迫使电弧只能通过中心狭窄通道，形成压缩弧。电弧等离子体炬主要由一个阴极（阳极用工件代替）或阴、阳两极，一个放电室以及等离子体工作气供给系统三部分组成。等离子体炬按电弧等离子体的形式可分成非转移弧炬和转移弧炬。非转移弧炬中，阳极兼作炬的喷嘴；而在转移弧炬中，阳极是指电弧离开炬转移到的被加工工件。当然也有兼备转移弧和非转移弧的联合式等离

子体炬。电弧等离子体炬由于阴极损耗，必然使等离子体中混入阴极材料。根据不同的工程需要，可选用损耗程度不同的材料作阴极。如要阴极损耗尽可能小，一般采用难融材料，但具体选择材料时应考虑到所使用的工作气种类。如工作气为氩、氮、氢-氮、氢-氩时，常用铈-钨或钍-钨作阴极；工作气为空气或纯氧时，可用锆或水冷铜作阴极。

4.3 等离子体发生器点传火系统

等离子体发生器点传火系统通常分为金属起爆丝型、高分子材料表面金属镀膜型、金属起爆丝与高分子材料超细粉组合型等形式。具体形式如下：

(1) 聚氯乙烯高分子管 + 金属丝 + 绝缘点传火管 + 孔型开孔方式，如图 4-1 所示。

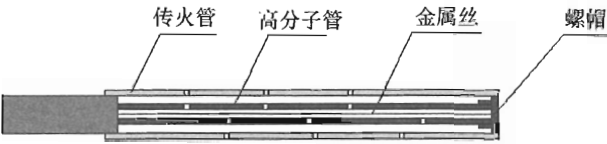


图 4-1 等离子体点传火管结构示意图一

(2) 聚氯乙烯高分子管 + 内外镀铜膜 + 绝缘点传火管 + 孔型开孔方式，如图 4-2 所示。

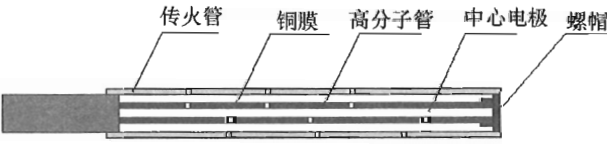


图 4-2 等离子体点传火管结构示意图二

(3) 中心电极 + 聚氯乙烯高分子管 + 外镀铜膜 + 绝缘点传火管 + 孔型开孔方式，如图 4-3 所示。

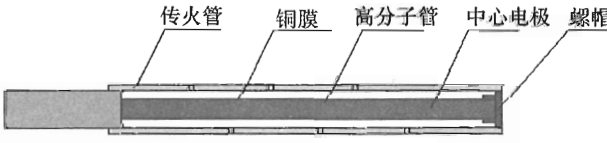


图 4-3 等离子体点传火管结构示意图三

电热化学炮技术的核心是等离子体发生器取代了常规点传火系统。该等离子体发生器在脉冲电源放电作用下，瞬间形成高温电弧等离子体，其主要过程特点是：形成时间短，一致性好，通常为微秒级；等离子体温度高，一般为 $8000 \sim 10000\text{K}$ ；与装药作用，由于等离子体自身质量轻，其点火穿透性强；与发射药作用，能改变发射药表面与深层结构特点，更加有利于发射药燃烧增强^[49,50]。鉴于这些特点，等离子体发生器作为新的一种点传火方式，对于提高火炮内弹道技术性能与装药技术研究与发展，提供了更好的技术空间与潜力。

各国在开展电热化学炮研究过程中，先后设计和试验应用了各种各样的等离子体发生器，其中最基本的包括三种形式：一是底喷型等离子体发生器，如图 4-4、图 4-5 所示^[51,52]；二是金属起爆丝型等离子体发生器，主要有中心起爆丝型、底喷起爆丝型及与装药结合起爆丝型，如图 4-6 ~ 图 4-8 所示^[52]；三是中心沿面镀膜型等离子体发生器，如图 4-9 所示^[5]。

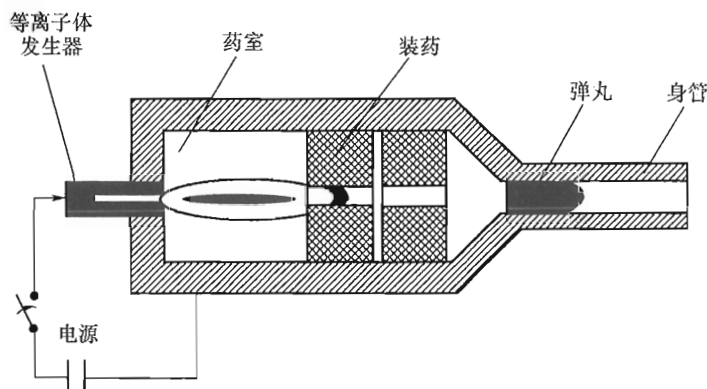


图 4-4 底喷型等离子体发生器应用示意图

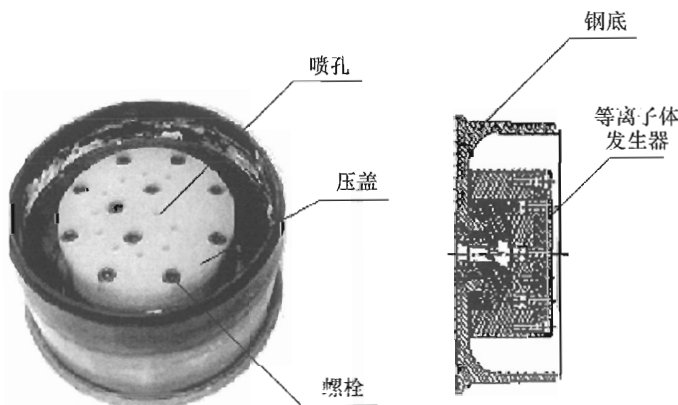


图 4-5 美国 120mm 电热化学炮底喷型等离子体发生器

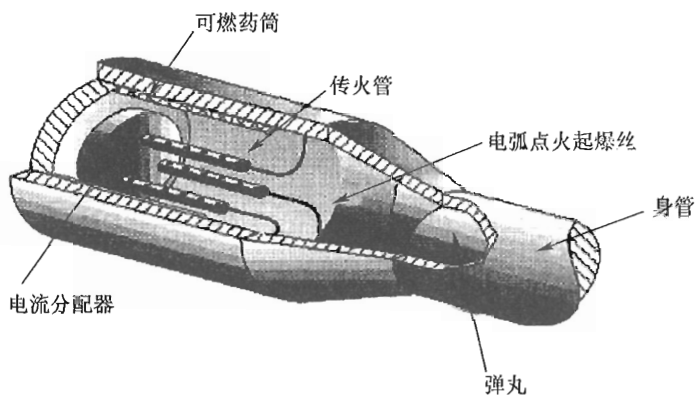


图 4-6 中心起爆丝型等离子体发生器

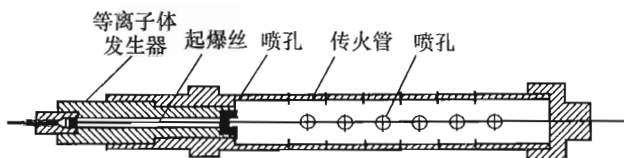


图 4-7 底喷起爆丝型等离子体发生器

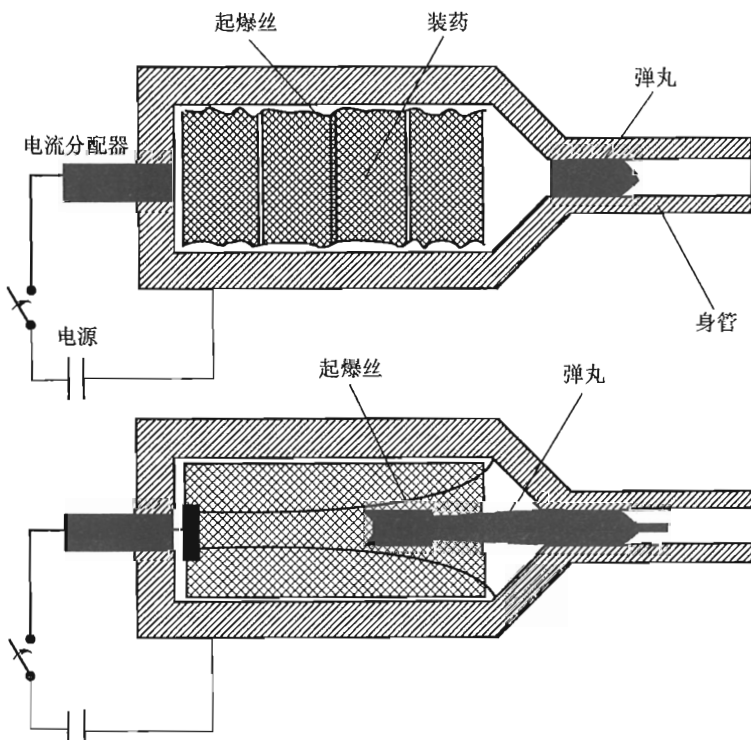


图 4-8 与装药结合起爆丝型等离子体发生器

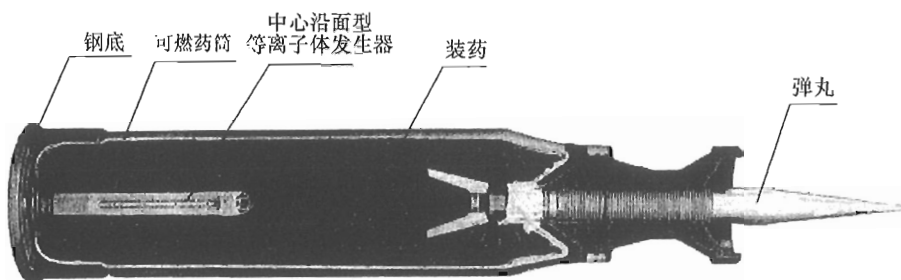


图 4-9 美国 105mm 电热化学炮穿甲弹中心沿面型等离子体发生器

4.4 炮用等离子体发生器理论

4.4.1 底喷式等离子体发生器一维物理数学模型

1. 物理模型

等离子体发生器是电热化学炮系统中的电热转换环节，目前各国对等离子体发生器实验研究和理论研究工作发展得十分迅速，许多模型被相继开发出来并得到应用。发生器内的等离子体是一种消融控制电弧等离子体（ACA），发生器内的电弧通过不断消融管壁所产生的等离子体来维持，当等离子体从喷嘴喷出时释放能量，点燃发射药。从而实现电能向热能的转化。等离子体发生器如图 4-10 所示。

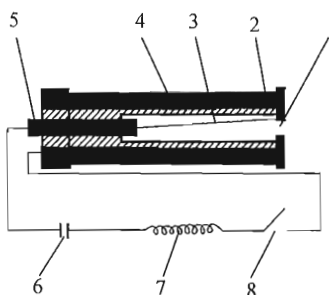


图 4-10 底喷型等离子体发生器

- 1—喷嘴；2—阴极；3—金属爆丝；
4—聚乙烯消融管；5—阳极；6—电容；7—电感；8—开关

等离子体形成机理可以用以下两个过程描述：一是放电开始后，消融管内金属丝在强电流作用下迅速升温并爆炸，生成金属等离子体，此时第一过程结束；二是

爆炸生成的金属等离子体将进一步烧蚀聚乙烯消融管，并在电流的作用下使一部分碳元素和氢元素发生电离，此时发生器内的压力迅速升高，当压力超过破孔压力时，喷嘴打开，等离子体开始向外喷射，期间，等离子体发生器内的电弧可以通过不断消融聚乙烯材料来维持，当电源能量下降到一定程度电弧熄灭时，第二过程结束。

根据以上描述，作如下假设：

- (1) 毛细管内等离子体的流动考虑为一维问题；
- (2) 爆丝迅速爆炸，忽略爆丝熔化过程并认为爆丝一价电离；
- (3) 忽略电极蒸发；
- (4) 忽略流体黏性及质量力和电磁力的影响；
- (5) 所有电气元件为理想元件；
- (6) 等离子混合物各成分具有相同的速度；
- (7) 喷口处符合临界流条件。

2. 数学模型

(1) 爆丝升温过程。爆丝爆炸前可以看作一个变电阻的 $R-L-C$ 电路问题，方程如下：

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{q}{LC} \quad (4-1)$$

$$\frac{dq}{dt} = i \quad (4-2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \alpha R_0 \frac{dT}{dt} \quad (4-3)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{R}{c_1 m} i^2 \quad (4-4)$$

式中 i ——回路电流；

q ——电容电量；

R ——爆丝电阻；

T ——爆丝温度；

L ——回路电感；

C ——回路电容；

α ——阻温系数；

R_0 ——起始爆丝电阻；

c_1 ——爆丝比热容；

m ——爆丝质量。

(2) 一维流动过程。

①守恒方程。一维守恒方程组如下：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = \dot{\rho}_a - \dot{\rho}_o \quad (4-5)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} - u \dot{\rho}_o \quad (4-6)$$

$$\frac{\partial [\rho(e + u^2/2)]}{\partial t} + \frac{\partial [\rho u(e + p/\rho + u^2/2)]}{\partial x} = -\frac{J^2}{\sigma} - \dot{\rho}_o E_o \quad (4-7)$$

式中 t ——时间；

x ——轴向坐标；

$\dot{\rho}_a$ ——消融管内碳氢元素的生成速率；

J ——发生器内的电流密度；

$\dot{\rho}_o$ ——由于喷射造成的质量降低。

式(4-6)和式(4-7)中右侧第二项为由于喷射造成的动量和能量损失。

其中：

$$\dot{\rho}_a = \frac{2\rho\sigma T^4}{r_b(p + \rho E)} \quad (4-8)$$

式中 E ——等离子混合物的内能；

r_b ——发生器内径；

σ ——斯蒂芬-玻耳兹曼常数。

以上方程构成了描述发生器内等离子体一维流动的守恒方程组。为了求解该方程组还需要补充等离子体的状态方程及其他辅助关系式。

②状态方程及辅助关系式。

a. 状态方程。

$$p = [n_H(1 + x_{1H}) + n_C(1 + x_{1C} + 2x_{2C}) + n_{Cu}(1 + x_{Cu})]kT \quad (4-9)$$

式中 n_C , n_H ——等离子体混合物中碳和氢元素的粒子数密度；

$x_{j\alpha}$ —— α 元素第 j 次电离产生的离子的相对密度。

由于聚乙烯的原子结构组成可知发生器内存在以下关系： $n_H = 2n_C$ ，则碳粒子数密度可由下式确定：

$$n_C = \frac{\rho - n_{Cu}m_{0Cu}}{m_{0C} + 2m_{0H}} \quad (4-10)$$

式中 m_{0C} ——碳元素的原子质量， $m_{0C} = 12.011 \times 1.6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ；

m_{0H} ——氢元素的原子质量， $m_{0H} = 1.008 \times 1.6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ；

m_{0Cu} ——铜元素的原子质量， $m_{0Cu} = 63.541.008 \times 1.6725 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

b. 等离子体混合物组分的确定。混合物中各组分粒子的相对密度可以由 Saha 方程给出：

$$\frac{n_e n_{j\alpha}}{n_{j-1, \alpha}} = 2 \frac{u_{j\alpha}}{u_{j-1, \alpha}} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h_p^2} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{I_{j\alpha} - \Delta I_{j\alpha}}{kT} \right) \quad (4-11)$$

$$u_{j\alpha} = \sum_i g_{j\alpha i} \exp \left(- \frac{W_{j\alpha i}}{kT} \right) \quad (4-12)$$

式中 $u_{j\alpha}$ ——相应的电子配份函数；

m_e , n_e ——电子的质量和密度；

h_p ——普朗克常数， $6.62620 \times 10^{-34} \text{ J/s}$ ；

$I_{j\alpha} - \Delta I_{j\alpha}$ ——考虑了非理想效应的 α 元素的第 j 价电离能；

W_{jai} ——元素 α 的 j 价粒子的第 i 个电子状态的能级；

g_{jai} ——相应能级的简并度。

其中：

$$\Delta I_{j\alpha} = \frac{j e^2}{4 \pi \epsilon_0 (\lambda_D + \Lambda/8)} \quad (4-13)$$

式中 Λ ——deBroglie 波长。

λ_D ——标准德拜半径。

$$\Lambda = \frac{h}{(2 \pi m_e k T)^{1/2}} \quad (4-14)$$

$$\lambda_D = \left[\frac{\epsilon_0 k T}{n_e e^2 (1 + Z)} \right]^{1/2} \quad (4-15)$$

式中 Z ——离子的有效电荷数；

n_e ——电子数密度， $n_e = n_{1H} + n_{1C} + 2n_{2C}$ 。

c. 内能关系式。等离子体的内能由下式给出：

$$\begin{aligned} E_p = & \frac{3}{2} k T N_C (1 + x_{1C} + 2x_{2C}) + \frac{3}{2} k T N_H (1 + x_{1C}) + (I_{1C} - \Delta I_{1C}) N_C x_{1C} + \\ & (I_{1H} - \Delta I_{1H}) N_H x_{1H} + (I_{1C} + I_{2C} - \Delta I_{1C} - \Delta I_{2C}) N_C x_{2C} + \rho_{HC} E_v + \\ & \rho_{HC} E_D + N_C (1 - x_{1C} - x_{2C}) W_{oC} + N_C x_{1C} W_{1C} + N_C x_{2C} W_{2C} + \\ & N_H (1 - x_{1H}) W_{oH} + \frac{3}{2} k T N_{Cu} (1 + x_{1Cu}) \end{aligned} \quad (4-16)$$

式中 E_D ， E_p ——聚乙烯的裂解能和汽化能；

$W_{j\alpha}$ ——元素 α 第 j 次电离产生电子的电子激发能。

d. 等离子体电导率的确定。理想等离子体的电导率可由 Spitzer 公式给出。对于毛细管内电弧放电产生的离子浓度很高、温度较低的非理想等离子体，电导率可以由以下公式给出：

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e (v_{en} + v_{ei})} \quad (4-17)$$

式中 m_e ——电子的质量；

v_{en} ——电子与中性粒子的碰撞频率；

v_{ei} ——电子与离子的碰撞频率。

$$v_{en} = \sum n_j Q_{ej} \cdot v_e \quad (4-18)$$

式中 n_j ——碳或氢原子的数密度；

Q_{ej} ——电子与碳原子或氢原子碰撞截面积，可由原子的玻耳半径求出 $Q_{eC} = 30 \pi a_0^2$ ， $Q_{eH} = 17 \pi a_0^2$ ，其中玻尔半径 $a_0 = 4 \pi \epsilon_0 \hbar^2 / (m_e e^2) = 5.29 \times 10^{-11} m_e$ ；

v_e ——电子的平均运动速度, $v_e = [8kT/(\pi m_e)]^{1/2}$ 。

电子与离子的碰撞频率可以通过如下的 $Z&L$ 模型来确定:

$$v_{ei} = \frac{38Zn_e e^2 \ln(1 + 1.4\Lambda_m)^{1/2}}{\gamma_e m_e T^{3/2}} \quad (4-19)$$

式中 Z ——离子的有效电荷数, 对于本等离子体发生器来说, $Z \approx 1$;

γ_e ——考虑电子与电子的扩散引入的修正系数, 在 $Z \approx 1$ 的条件下
 $\gamma_e = 0.58$ 。

修正的库仑参数 Λ_m 为:

$$\Lambda_m = \frac{\sqrt{\lambda_D^2 + \lambda_+^2}}{b_0} \quad (4-20)$$

式中 λ_D ——等离子体的德拜半径;

λ_+ ——平均离子间距离;

b_0 ——碰撞电子以 90° 扩散情况下的碰撞参数。

以上参数的表达式如下:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{n_e e^2}}; \lambda_+ = \left(\frac{3}{4\pi n_+}\right)^{1/3}; b_0 = \frac{Ze^2}{12\pi\epsilon_0 kT} \quad (4-21)$$

e. 电流密度的确定。在整个放电过程中, 回路电流由以下两式确定:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R_p}{L}i - \frac{q}{LC} \quad (4-22)$$

$$\frac{dq}{dt} = i \quad (4-23)$$

式中 R_p ——等离子体发生器的电阻, 由等离子体的电导率(电阻率)决定。

则电流密度为:

$$J = \frac{i}{A} \quad (4-24)$$

式中 A ——等离子体发生器的横截面积。

至此, 上述守恒方程组和辅助方程封闭, 在给出初始条件和边界条件后, 就可以通过一定的数值方法来求解该方程组。

③初始条件和边界条件。

a. 初始条件。在金属丝爆炸升温过程中, 初始条件可通过各结构部件在常温下的状态来确定。第二阶段的初始条件就是前一过程的结束状态, 可以假设金属丝在某一温度下完全汽化并一价电离, 在此瞬间, 前一阶段所吸收的能量即为第二阶段开始时金属等离子体所具有的能量, 在获得金属等离子体的温度之后, 即可给出第二阶段的初始条件。

b. 边界条件。由图 3-4 给出的等离子体发生器结构可知, 喷口处破孔之前, 左右两端边界为固定壁面, 可采用镜面反射法处理。当等离子混

合物开始向外喷射时，则右侧边界流速可由临界流公式确定：

$$v = \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma+1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{2}{\gamma-1}} \right\}^{\frac{1}{2}} \sqrt{p/\rho} \quad (4-25)$$

式中 ρ ——等离子体密度；

γ ——等离子混合物的比热比；

p ——等离子体混合物压力。

在获得流速之后即可用物理量守恒的方法导出其他的边界状态。

4.4.2 底喷式等离子发生器一维数学物理模型计算分析

1. 计算方法

可以采用 MacCormack 方法来求解上述模型。MacCormack 方法的基本内容如下：

(1) 求解方法。一维流动方程组可以写成如下的向量形式：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{H} \quad (4-26)$$

对于《底喷式等离子发生器一维物理数学模型报告》中所提到的模型来说：

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho(e + u^2/2) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho u^2 \\ \rho u(e + P/\rho + u^2/2) \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \dot{\rho}_a - \dot{\rho}_o \\ -\frac{\partial P}{\partial x} - u \dot{\rho}_o \\ -\sigma/J^2 - \dot{\rho}_o E_o \end{pmatrix}$$

第一步计算估计值：

$$U_j^{n+1} = U_j^n - \Delta t / \Delta x (F_{j+1}^n - F_j^n) + \Delta t H_j^n \quad (4-27)$$

第二步计算校正值：

$$U_j^{m+1} = U_j^{n+1} - \Delta t / \Delta x (F_{j+1}^{n+1} - F_j^{n+1}) + \Delta t H_j^{n+1} \quad (4-28)$$

第三步计算当前值：

$$U_j^{n+1} = (U_j^n + U_j^{m+1}) / 2 \quad (4-29)$$

采用 CFL 稳定条件，可得到计算时间步长为：

$$\Delta t \leq \frac{C_0 \Delta x}{|u| + c} \quad (4-30)$$

式中 C_0 ——小于 1 的给定系数，一般在 0.8 ~ 0.95 之间；

c ——等离子体的当地音速。

(2) 数值黏性和数字滤波。

①数值黏性。为了避免在计算中出现与加速度方向相反的压力梯度，可以采用给压力添加黏性项的方法来处理，表达式如下：

$$q = \begin{cases} \rho \Delta x^2 b^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 & \left(\frac{\partial u}{\partial x} < 0 \right) \\ 0 & \left(\frac{\partial u}{\partial x} > 0 \right) \end{cases} \quad (4-31)$$

式中 b ——在 1 ~ 10 之间的任意常数。

②数字滤波。为了能够使计算稳定的进行，有时需要对数据进行平滑处理，对于任意的二维离散变量 w ，滤波方式如下：

$$w_j = \frac{1}{k+2} (w_{j-1} + kw_j + w_{j+1}) \quad (4-32)$$

式中 k ——给定的滤波系数。

2. 计算结果

利用以上给出的数值方法，对消融管长度分别为 40mm 和 70mm 的两种等离子发生器的工作情况进行了数值模拟，在以下数值模拟过程中，没有给出的初始条件均由该结构在常温下的性质决定。

(1) 第一种等离子体发生器模拟结果（消融管长度为 40mm）。此等离子体发生器的相关试验由兄弟单位完成，试验时采用的基本数值如表 4-1 所示。

表 4-1 消融管长度为 40mm 的等离子体发生器试验初始参数

长度 L/cm	电感 $L/\mu\text{H}$	电容 C/mF	半径 R/mm	喷嘴半径 R_p/mm	破孔压力 P_p/MPa	起始电压 U/V	爆丝半径 R_s/mm
4.0	8.6	0.1375	2.0	2.0	10	10000	0.1

应用给出的数学模型和计算方法和以上的初始条件，计算结果如图 4-11 ~ 图 4-16 所示。

由图 4-17 给出的电流和时间曲线看，电流的变化规律与文献 [53] 中给出的数值吻合得很好。

(2) 第二种等离子体发生器模拟结果（消融管长度为 70mm）。本次试验由某所等离子体点火技术项目组和五部测试组、炮研所、南理工等有关人员共同参加，并于 2003 年 9 月完成，试验所采用的有关初始数据如表 4-2 所示。

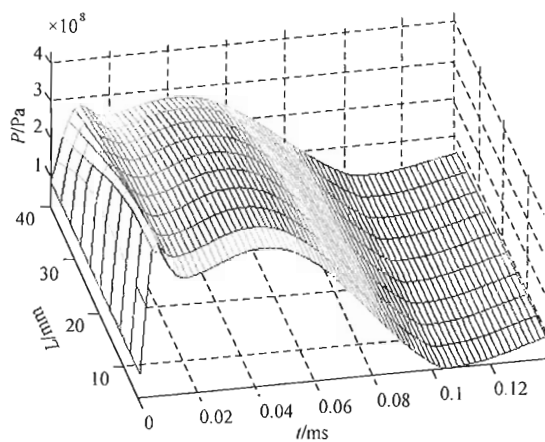


图 4-11 压力分布曲线

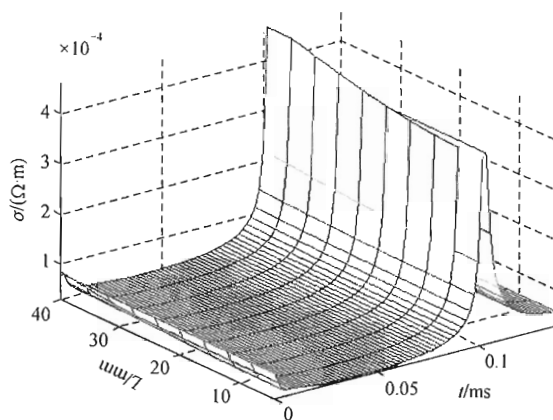


图 4-12 电阻率分布曲线

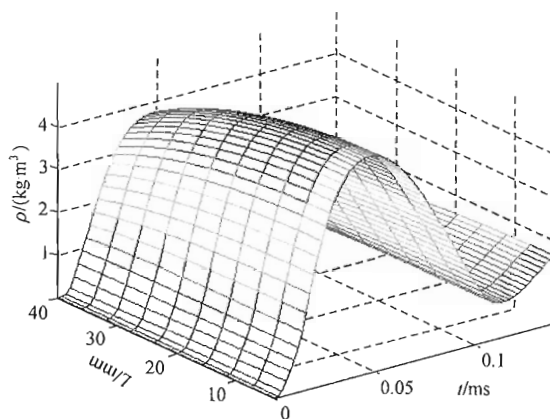


图 4-13 碳氢元素密度分布曲线

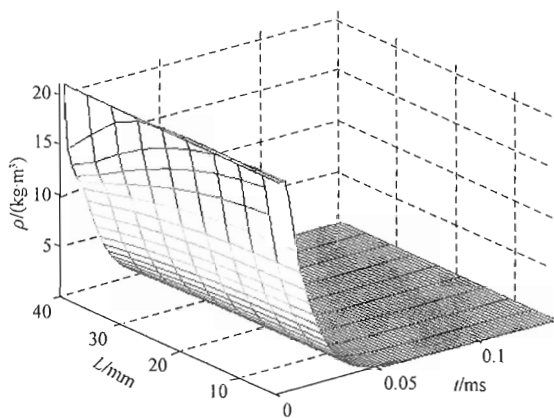


图 4-14 铜元素密度分布曲线

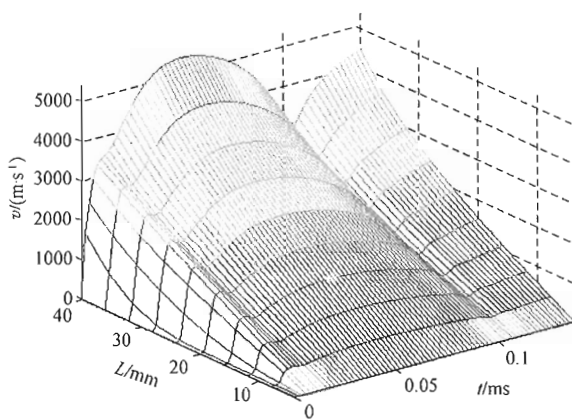


图 4-15 速度分布曲线

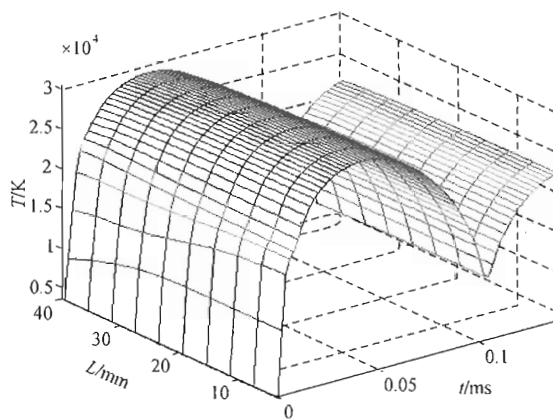


图 4-16 温度分布曲线

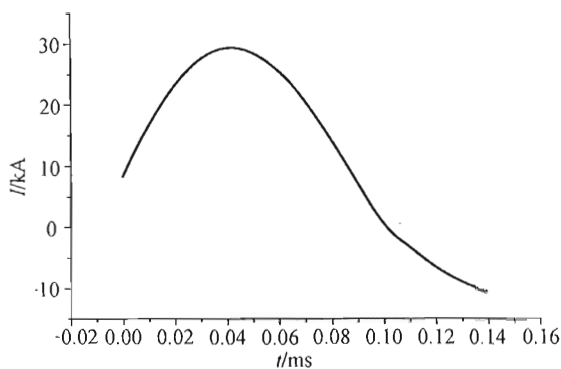


图 4-17 电流-时间曲线

表 4-2 70mm 长等离子体发生器试验条件

长度 l/cm	电感 $L/\mu\text{H}$	电容 C/mF	半径 R/mm	靶半径 R_0/mm	靶面压力 P_0/MPa	起始电压 U/V	爆丝半径 R_s/mm
7.0	120	1.234	2.50	2.50	10	5000	0.2

根据以上给出的初始条件，数值模拟的结果如图 4-18 ~ 图 4-23 所示，图 4-24 所示为试验电流曲线与模拟电流曲线的对比情况。

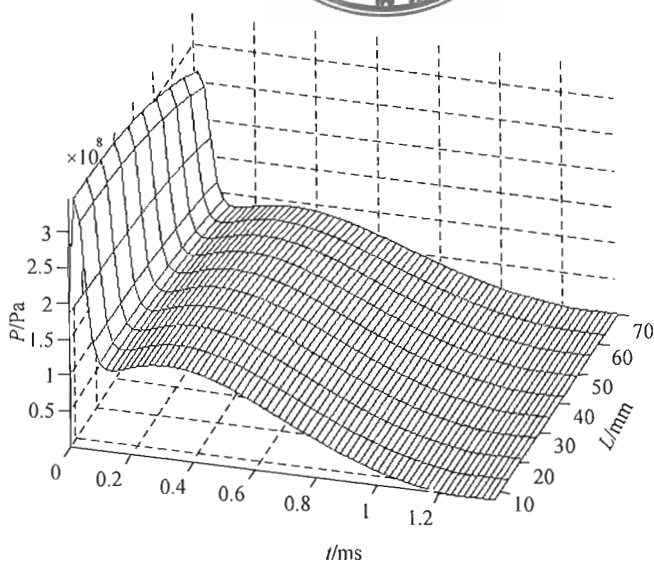


图 4-18 压力分布曲线

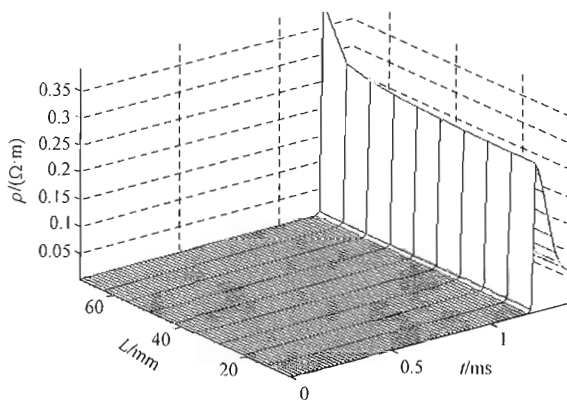


图 4-19 电阻率分布曲线

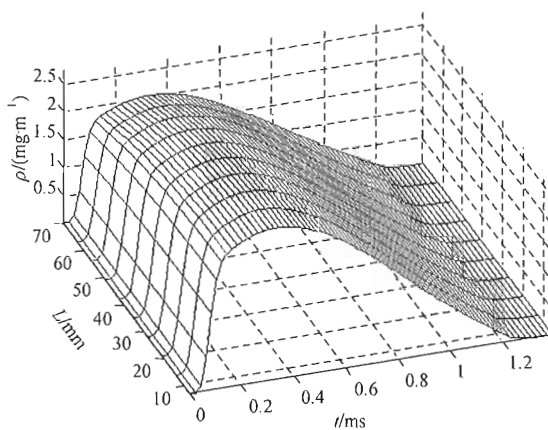


图 4-20 碳氢元素密度分布曲线

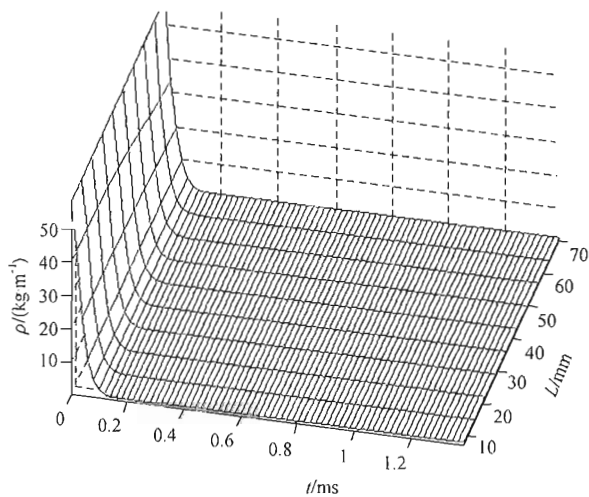


图 4-21 铜元素密度分布曲线

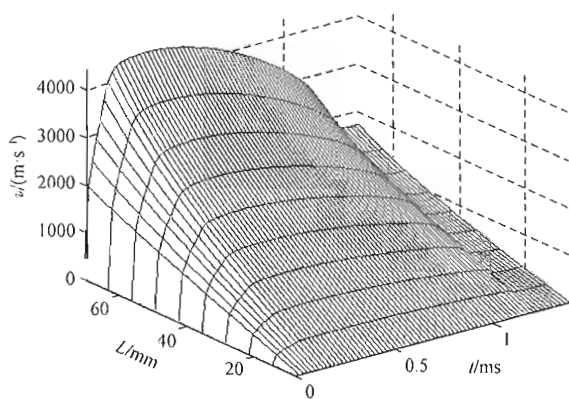


图 4-22 速度分布曲线

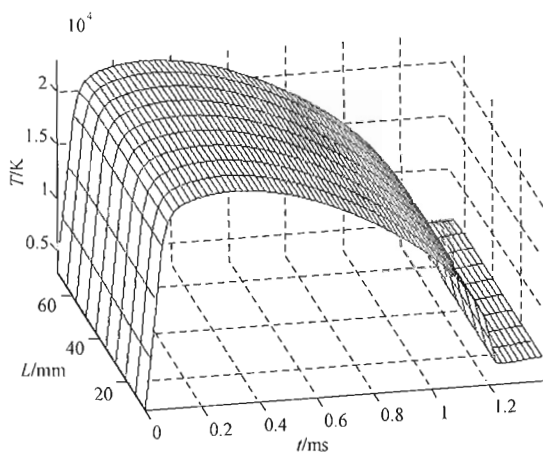


图 4-23 温度分布曲线

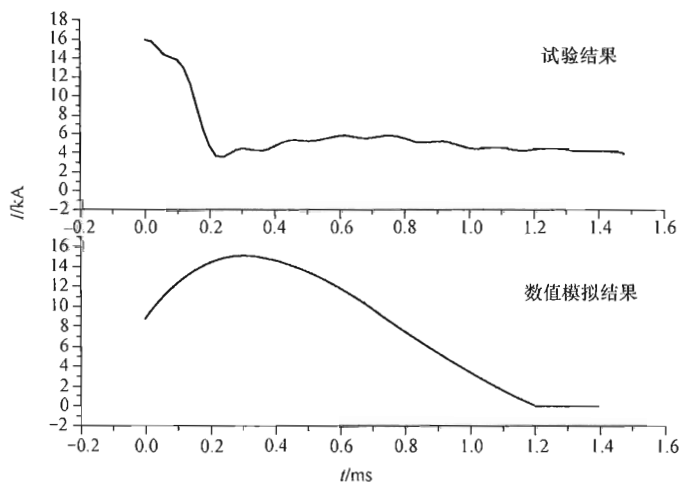


图 4-24 数值模拟结果与试验曲线比较

3. 模拟结果分析

从模拟结果看,在压力分布曲线的初始时刻,存在一个压力迅速上升的阶段,这主要是由于在物理模型的假设中,认为金属爆丝迅速爆炸的结果。根据这个假设,起始阶段管内金属粒子数密度过大,并在高电流下迅速升温、电离,进而导致了压力的迅速上升。但是由于爆炸后的金属粒子在高压作用下迅速流出,因而,在此之后,管内的密度分布与实际情况较为接近,这一点也与其他文献上公布的结果相符。

图4-22中所示电流幅值符合的较好,二者曲线的差异主要是由于以下三点原因:

(1) 在建立的物理模型还不是很精确,比如,简化了金属爆丝的爆炸过程以及蒸汽层对消融管消融速率的影响。

(2) 由于测试时存在强电磁干扰,使得测试曲线不够准确,比如实测的曲线中,出现了明显的电压与电流反向的情况。

(3) 由于本模型所采用的电路部分为简单的 $R-L-C$ 电路,与实际电路有差异,另外计算中也没有考虑线路中其他电阻的损耗。

从计算结果看,本模型需要继续完善以下几个部分的内容:

(1) 实际的复杂电路与等离子发生器的耦合。

(2) 金属丝爆炸过程的完整合理描述。

(3) 确定金属蒸气对金属爆丝汽化、聚乙烯蒸汽对消融管材料消融状况的影响,及其对电导率的影响。

4. 结论

本模型基本可以用来解释、预测等离子发生器内流体运动的趋势,并用来确定流体的状态。

此模型的建立和相应算法的确定为下一步的理论研究工作打下了一定的基础。相对于国内公布的其他模型,它的优点在于考虑了金属爆丝对等离子体发生器的影响,尽管这种考虑过于简单,但更深入的工作一定能够使得我们的模型更加合理。

第5章 电热化学炮内弹道理论

5.1 电热化学炮经典内弹道计算分析

5.1.1 装药方案

在现有常规火药密度 $1.6\text{g}/\text{cm}^3$ 左右条件下, 根据装药经验, 现制式装药方案药室已无多余装药空间可用, 以增加装药量的方法来提高炮口初速是不可行的。因此可以考虑在膛压允许增加的范围内, 通过增大发射药火药力来增加发射能量以此提高炮口初速。

方案: 装药量不变, 考虑发射药火药力从 $1127\text{kJ}/\text{kg}$ 提高至 $1147\text{kJ}/\text{kg}$ 、 $1176\text{kJ}/\text{kg}$ 、 $1225\text{kJ}/\text{kg}$, 通过调节火药弧厚, 考查弹道性能变化情况。常规装药结构示意图如图 5-1 所示。

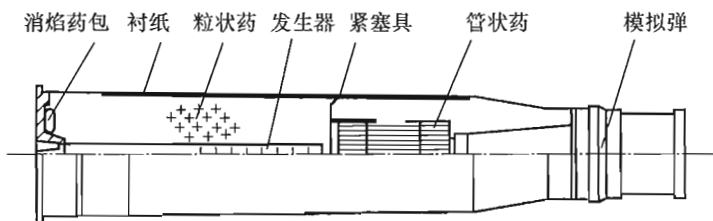


图 5-1 常规装药结构示意图

5.1.2 多层发射药装药方案

多层发射药的特点是从发射药的燃烧特性和控制出发, 融合高能量发射药的配方、高装填密度几何形状和高燃烧渐增性表层结构, 通过预先设定的发射药燃烧程序, 实现高能量密度发射装药的可控燃烧; 不同层间黏结可靠, 燃烧稳定; 装药结构装填密度高, 能够提高药室总装药能量, 在膛压允许范围内能够提高火炮初速。

方案 1: 改变装药量, 多层药内外层弧厚比定为 $4:1$, 考查增加多层药对弹道性能的影响。

方案 2：假定内层发射药燃速最大能达主装药燃速的 2 倍，调节内外层弧厚比和外层燃速，使外层燃烧完后压力达到规定最大压力，内层在最大压力后燃烧，出现最大压力二次峰。

多层发射药结构示意图如图 5-2 所示，装药结构示意图如图 5-3 所示。

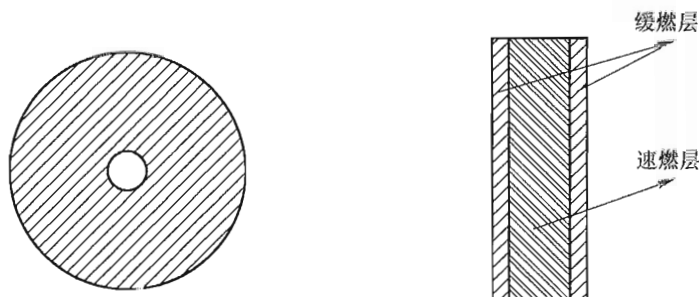


图 5-2 多层发射药结构示意图

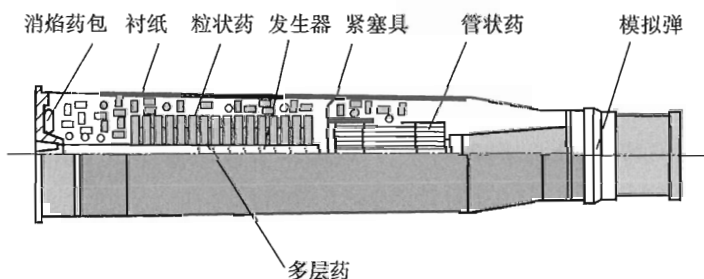


图 5-3 多层发射药装药结构示意图

5.1.3 堆积装药方案

堆积装药是将多孔药的药粒长度加长，在药室内进行有序的排列，这样可以有效利用装药空间，增加装药量。

按在制式装药量基础上增加 0.5kg 装药量进行计算，装药结构示意图如图 5-4 所示。

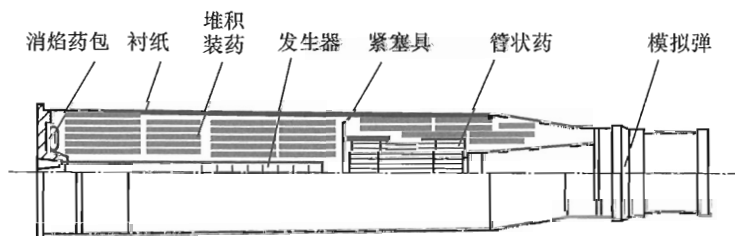


图 5-4 堆积装药结构示意图

5.1.4 电热化学发射温度补偿技术方案

生成电热化学发射技术的工作原理是将功率电能转变为消融控制等离子体，利用等离子体点燃发射药从而增强火药的点火与燃烧性能。等离子体不仅可以显著减小点火延迟时间、提高点火一致性，还能减弱或消除装药对温度的敏感性。通过控制输入等离子体的能量、功率和脉宽等参数来调节等离子体的释放规律，进而调节装药对温度的敏感程度，改善发射药燃烧释能过程，达到温度补偿效果。

方案1：通过等离子体能量调节一次放电，减弱或消除装药温度敏感性，提高常温膛压，进而提高炮口初速。

方案2：时序放电。常温最大膛压后，在不同的时刻控制等离子体释放，使发射药燃速加倍，在不提高常温膛压的情况下，考查不同时刻加载电能的弹道性能。

5.1.5 电热化学发射高能高密度装药方案

目前火药的密度为 $1.55 \sim 1.67\text{kg}/\text{dm}^3$ ，因此当装药接近最大装填密度时，在有限的装药空间中通过增加装药量来提高弹丸初速的方法是不可行的。目前国内外均在研制新型高能高密度火药。由于点火药气体穿透力的限制，常规的点传火方式在这种新型的高密度火药前显得无能为力，它会导致点传火困难、迟发火及点火的不稳定乃至内弹道性能的不稳定。而高温高速的等离子体具有极强的火药穿透性，能够很容易地引燃这种更高密度的发射药。

方案：将发射药密度从 $1.6\text{kg}/\text{dm}^3$ 逐步提高至 $2.2\text{kg}/\text{dm}^3$ ，在保持最大压力不变的情况下，考查弹道性能变化规律。

5.1.6 研究结果

1. 常规装药内弹道变化规律

内弹道计算结果如表5-1所示，不同火药力各膛压下的初速曲线如图5-5所示。

表5-1 常规装药条件弹道性能变化规律

火药力/(kJ/kg)	1127	1147			1176			1225		
P_m/MPa	451	451	470	490	451	470	490	451	470	490
$v_0/(\text{m/s})$	1558	1563	1585	1605	1571	1593	1615	1580	1605	1628
η_k	0.66	0.68	0.62	0.60	0.72	0.625	0.60	0.78	0.70	0.638

续表

火药力/(kJ/kg)	1127		1147			1176			1225		
P_0/MPa	89	92	91	90	94	93	92	99	98	97	
t_0/ms	6.31	6.33	6.22	6.11	6.32	6.19	6.11	6.31	6.20	6.09	
初速提高 (%)	0	0.3	1.7	3	0.8	2.2	3.66	1.4	3	4.5	

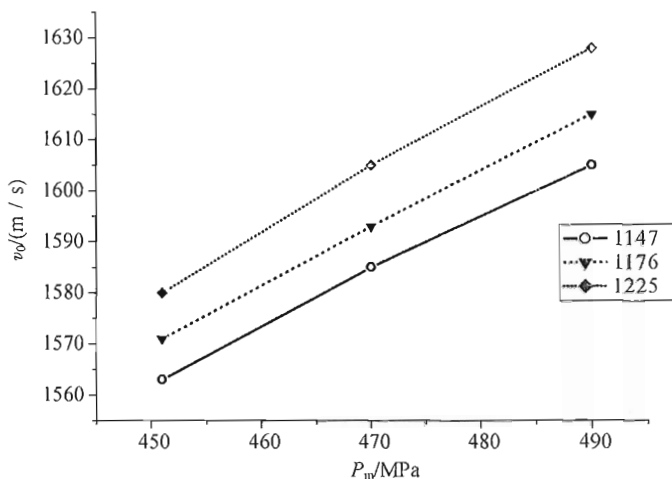


图 5-5 各膛压下不同火药力对应初速变化

火药力增大,初速随之提高。在膛压490MPa 火药力1176kJ/kg 时,初速较常规制式提高3.66%;火药力1225kJ/kg 时,初速提高4.5%。

2. 多层发射药装药内弹道变化规律

(1) 方案1。主装药和多层药装药量按5.3kg+1.5kg 和4.3kg+2.8kg 考虑,多层药内外层弧厚比定为4:1,外层燃速为主装药燃速1/2,调节内层燃速与主装药燃速比值。计算结果如表5-2 所示。

表 5-2 多层药装药弹道性能变化规律

装药量	主装药 5.3kg + 多层药 1.5kg				主装药 4.3kg + 多层药 2.8kg			
燃速比	1.2	1.4	1.6	1.8	1.2	1.4	1.6	1.8
P_m/MPa	475	475	475	475	477	477	477	477
$v_0/(\text{m/s})$	1586	1597	1604	1611	1591	1609	1624	1635
η_k	0.79	0.70	0.63	0.62	0.84	0.69	0.61	0.60
P_0/MPa	97	96	96	95	101	100	100	99
t_0/ms	6.21	6.20	6.18	6.17	6.20	6.17	6.14	6.11
初速提高 (%)	1.8	2.5	2.95	3.4	2.1	3.3	4.2	4.9

图5-6、图5-7 所示为4.3kg+2.8kg 装药方案燃速比1.8 时的 $P-t$ 、 $P-t$ 曲线,并与常规制式装药方案进行了对比。图5-8 所示为最大压力、初速随燃速比变化规律曲线。

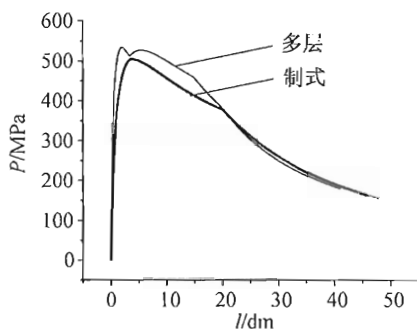
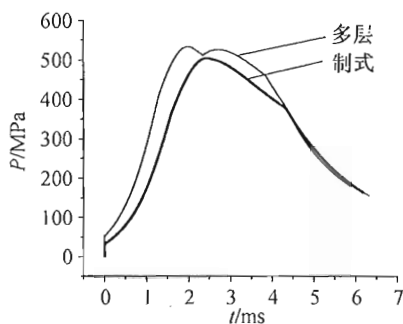


图 5-6 制式与多层药方案 $P-t$ 曲线对比

图 5-7 制式与多层药方案 $P-l$ 曲线

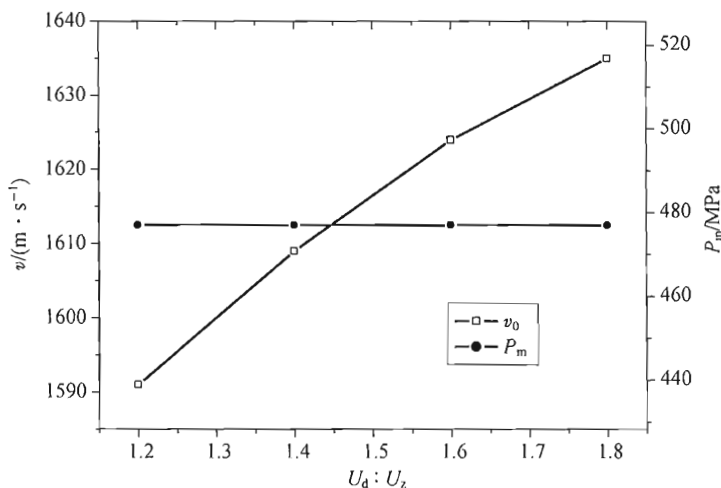


图 5-8 多层药方案 (4.3+2.8) v_0 、 P_m 随燃速比变化曲线

由图 5-6 ~ 图 5-8 可以看出, 在较制式膛压增大 26MPa 的条件下, 初速最大可提高接近 5%。因为内层药开始燃烧是在最大压力点之后进行的。在一定的燃速比范围内, 最大压力不变, 依靠内层药的高燃速, 能够增大 $P-l$ 曲线做功面积, 从而提高炮口初速。

(2) 方案 2。装药量为主装药量 4.3kg + 多层药量 2.8kg。计算结果如表 5-3 所示。

表 5-3 多层药方案 2 内弹道性能

P_m/MPa	451	470	490
外燃速比	0.39	0.475	0.56
内燃速比	2	2	2
内外厚比	5:1	4.17:1	3.5:1
$v_0/(\text{m/s})$	1618	1636	1654
η_k	0.61	0.6	0.6

续表

P_m/MPa	451	470	490
P_0/MPa	100	99	98
t_0/ms	6.23	6.12	6.03
初速提高 (%)	3.85	5.0	6.16

图 5-9 所示为多层药方案 2 在 451MPa 时与制式装药方案的 $P-t$ 、 $P-l$ 曲线对比。

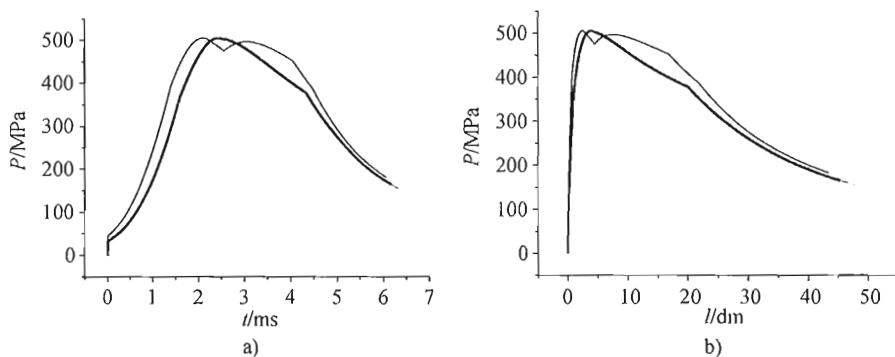


图 5-9 多层药方案 2 最大压力 451MPa 时与制式装药 $P-t$ 、 $P-l$ 曲线对比
a) $P-t$ 曲线; b) $P-l$ 曲线

3. 堆积装药内弹道变化规律

主装药 6.8kg, 发射药长度取 30mm、60mm、90mm, 通过调节弧厚, 分析各压力下的弹道规律。

各种火药长度, 不同压力下初速变化规律如图 5-10 所示。

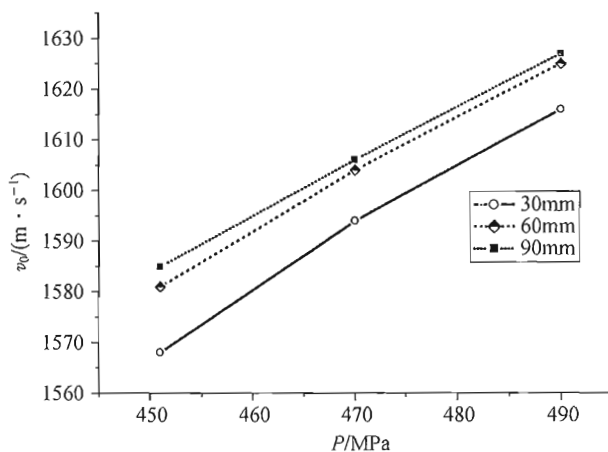


图 5-10 不同火药长度各膛压下的初速变化曲线

堆积装药内弹道计算如表 5-4 所示。

表 5-4 堆积装药内弹道性能

发射药长度/mm	30			60			90		
P_m/MPa	451	470	490	451	470	490	451	470	490
$v_0/(\text{m/s})$	1568	1594	1616	1581	1604	1625	1585	1606	1627
η_k	0.76	0.69	0.63	0.70	0.64	0.59	0.68	0.62	0.58
P_0/MPa	97	96	95	97	96	95	96	96	94
t_0/ms	6.36	6.25	6.14	6.35	6.25	6.14	6.35	6.24	6.15
初速提高 (%)	0.6	2.3	3.7	1.5	2.9	4.3	1.7	3.1	4.4

4. 电热化学发射温度补偿内弹道变化规律

(1) 一次放电方案。电热化学发射温度补偿性能方案 1 内弹道性能(常温条件下初速提高量)如表 5-5 所示。

一次放电温度补偿内弹道 $P-t$ 曲线如图 5-11 所示。

表 5-5 温度补偿方案 1 内弹道性能

P_m/MPa	451 (制式)	470	490
$v_0/(\text{m/s})$	1558	1579	1598
η_k	0.66	0.60	0.55
P_0/MPa	89	89	88
t_0/ms	6.31	6.23	6.13
初速提高 (%)	0	1.35	2.57

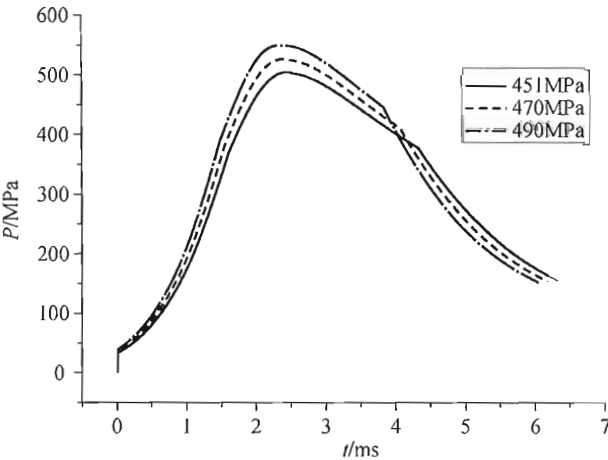


图 5-11 一次放电温度补偿内弹道 $P-t$ 曲线

(2) 时序放电方案。电热化学发射温度补偿时序放电方案内弹道性能如表 5-6 所示。 $P-t$ 、 $P-l$ 曲线如图 5-12、图 5-13 所示。

表 5-6 时序放电内弹道性能

状态	制式	电能加载 1	电能加载 2	电能加载 3
电能加载时间/ms	—	2.85	3.35	3.85
P_m /MPa	451	451	451	451
$v_0/(m/s)$	1558	1598	1574	1562
η_k	0.66	0.395	0.47	0.548
P_0 /MPa	89	116	117	118
t_0/ms	6.31	5.89	5.95	5.97
初速提高 (%)	0	2.57	1.0	0.26

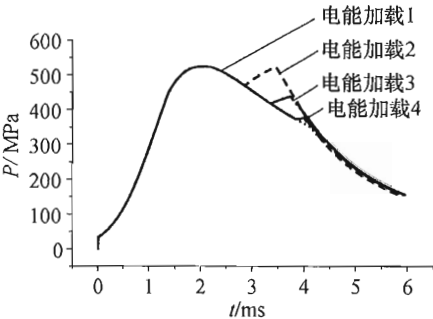


图 5-12 时序放电 $P-t$ 曲线

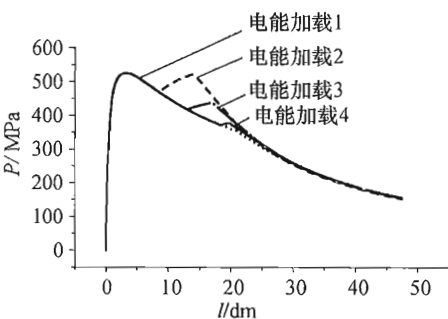


图 5-13 时序放电 $P-l$ 曲线

5. 电热化学发射高能高密度装药方案

保持最大膛压 451MPa 不变条件下，不同密度发射药内弹道性能如表 5-7 所示，初速随发射药密度变化如图 5-14 所示。

表 5-7 不同密度发射药内弹道性能表

δ /(kg/dm^3)	ω /kg	$2el$ /mm	η_k	v_0 /(m/s)	提高初速 (%)	备注
1.6	6.3	2.12	0.65	1558	0	已达最大装药量 及极限装药量
1.8	6.3	2.04	0.58	1570	0.77	极限装药量 7.14kg
	6.45	2.12	0.64	1572	0.90	
2.0	6.3	2.00	0.55	1574	1.0	极限装药量 7.94kg
	6.45	2.06	0.58	1580	1.4	
	7.00	2.27	0.73	1588	1.9	
	7.50	2.54	0.92	1581	1.5	

δ /(kg/dm^3)	ω /kg	$2el$ /mm	η_k	v_0	提高初速 (%)	备注
2.2	6.35	1.97	0.52	1576	1.2	极限装药量 8.73kg
	7.00	2.24	0.68	1598	2.6	
	7.50	2.47	0.83	1599	2.6	

从表 5-7 可以看出, 火药密度 $1.6\text{kg}/\text{dm}^3$ 、 $1.8\text{kg}/\text{dm}^3$ 、 $2.0\text{kg}/\text{dm}^3$ 、 $2.2\text{kg}/\text{dm}^3$ 分别对应的最有利装药量为 6.3kg 、 6.45kg 、 7.0kg 、 7.0kg , 分别对应的初速为 1558m/s 、 1572m/s 、 1588m/s 、 1598m/s 。

图 5-14 所示为火药密度与最有利装药量时的火炮初速对应关系。

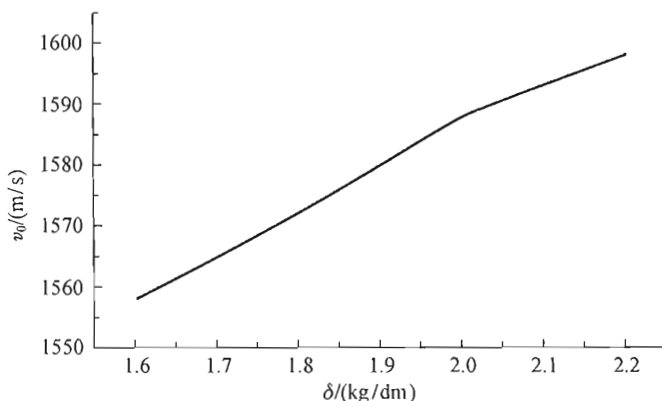


图 5-14 火药密度与最有利装药量时的火炮初速对应关系

5.1.7 结果分析

1. 常规装药方案

现有常规装药密度条件下, 可以通过提高发射药的火药力的方法提高炮口初速。膛压不变时 $1147\text{kJ}/\text{kg}$ 、 $1176\text{kJ}/\text{kg}$ 、 $1225\text{kJ}/\text{kg}$ 的火药力分别能够较初速 1558m/s 提高 0.3% 、 0.8% 、 1.4% 。膛压放宽至 490MPa 时初速能够提高 3% 、 3.66% 、 4.5% 。

2. 多层发射药装药方案

(1) 方案 1。

①通过对主装药、多层药 ($5.3\text{kg} + 1.5\text{kg}$ 、 $4.3\text{kg} + 2.8\text{kg}$) 两种发射药装药量配比的弹道性能进行分析, 可以看出, 两种装药配比均较原制式装药结构初速大幅提高。

②4.3kg + 2.8kg 装药配比装药量比 5.3kg + 1.5kg 配比增加 0.3kg, 但最大膛压相当, 只增大 2MPa, 而初速却提高非常大。内层药与主装药燃速比为 1.8 时, 初速提高 24m/s。这说明发射装药的对比对弹道性能影响很大。

(2) 方案 2。通过调节多层药内外弧厚比、内外层燃速等参数, 对 4.3kg + 2.8kg 装药配比方案在 451MPa、470MPa 和 490MPa 各膛压下的弹道性能进行了分析。外层缓燃层控制在最大压力前燃烧完, 内能速燃层在最大压力后速燃, 使火炮在最大压力后产生两次相当幅值的最大压力。最大限度增大了 $P-l$ 曲线下的做功面积, 能够大幅度提高初速。计算表明, 在 451MPa、470MPa 和 490MPa 下, 炮口初速分别较制式 1558m/s 提高 3.85%、5.0% 和 6.16%。

3. 堆积装药方案

堆积装药方案增加装药量 0.5kg, 通过对发射药长度 30mm、60mm 和 90mm 三个方案进行对比, 可以看出堆积装药能够提高火炮初速, 90mm 火药长度 451MPa 膛压时初速提高 1.7%, 490MPa 时能够提高 4.4%。

4. 电热化学发射温度补偿性能方案

高温等离子体能够减弱或消除发射药的温度敏感性, 通过控制等离子体的释放提高炮口初速。

(1) 一次放电时, 通过等离子体能量调节减弱或消除发射药的温度敏感性, 提高常温膛压, 可以在 470MPa 膛压时提高初速 1.57%, 在 490MPa 膛压时提高初速 2.57%。

(2) 时序放电时, 通过控制等离子体的二次释放时间, 在最大压力点后二次释放等离子体, 使 $P-t$ 曲线产生二次峰, 能够在最大膛压 451MPa 不变时有效提高炮口初速 2.57%。二次释放等离子体的时刻选取不同, 对弹道性能影响很大。在最大压力点后某时刻即刻释放等离子体, 能够最大幅度提高炮口初速; 反之, 在等离子体释放较晚, 对初速提高无助。

5. 电热化学发射高能高密度装药方案

高温高速的等离子体具有极强的火药穿透性, 能够很容易地引燃更高密度的发射药。计算表明, 火炮最大膛压 451MPa 条件下, 通过使用高能高密度发射药, 能够提高炮口初速。火药密度 $2.0\text{kg}/\text{dm}^3$ 时, 炮口初速提高 1.9%, 火药密度 $2.2\text{kg}/\text{dm}^3$ 时, 炮口初速提高 2.6%。

5.1.8 结论

常规增大火药力装药方案、多层发射药装药方案、堆积装药方案、电

热化学发射温度补偿性能方案和电热化学发射高能高密度装药方案均能不同程度的提高炮口初速，其中多层发射药装药方案提高初速幅度较大，应用前景较好；电热化学发射温度补偿性能方案利用等离子体减弱或消除发射药温度敏感性的特性，能够大幅提高火炮低温和常温下的初速，亦有十分广阔的应用前景。

5.2 电热化学炮两相流内弹道理论与计算分析

5.2.1 引言

固体发射药电热化学炮（以下称 SPETCG）内弹道过程是电热化学发射技术的关键技术之一。本节以等离子体中心点火条件下的电热化学发射内弹道过程为背景，在等离子体点火研究基础上，建立一维两相流内弹道模型，目的在于对等离子体点火过程、等离子体电增强燃烧效应及电能对火炮内弹道性能的影响进行合理描述，构建合适的理论模型，以期指导工程实践^[54]。

5.2.2 物理模型

SPETCG 内弹道过程基本上可分成三个阶段：①等离子体的产生及喷射过程；②等离子体射流点燃火炮发射装药过程；③发射药燃烧产生大量燃气推动弹丸运动过程。发射装药结构示意图如图 5-15 所示。

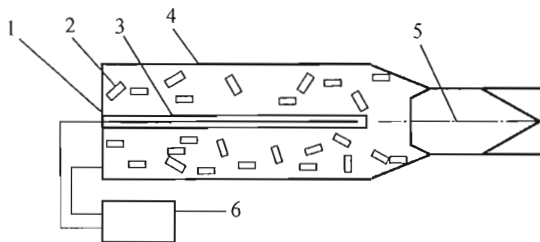


图 5-15 SPETCG 发射装药结构示意图

- 1—等离子体点火机构；2—发射药；3—点火管；
4—可燃药筒；5—弹丸；6—脉冲电源系统

SPETCG 发射过程可以描述为：当脉冲电源系统放电后在等离子体点火机构中形成等离子体，并且随着放电过程的进行，等离子体在传火管内的压力不断升高，当压力达到一定值时在传火管喷嘴处形成等离子体射流并进入主装药中，使发射药床点燃，发射药燃烧产生大量燃气推动弹丸运

动,实现弹丸的发射过程。SPETCG 发射过程流程图如图 5-16 所示。

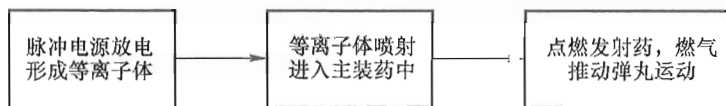


图 5-16 SPETCG 发射过程流程图

为了建立膛内两相流动的数学模型,首先应进行基本假设^[60,61]:

(1) 膛内的流动是一维的,即膛内气体压力、温度、密度和速度仅存在轴向变化。

(2) 不考虑点火管体积的影响。

(3) 点火管内点火药的点燃、燃烧及燃气流出过程服从一维两相流动,并作为线源与主发射药区的一维两相流计算构成双-一维两相流耦合过程。

(4) 固体发射药的燃烧满足几何燃烧规律,燃烧速率为指数规律,发射药的物性参数视为常数,但考虑到等离子体增强燃烧效应,燃烧速率作适当修正。

(5) 假设点火管和可燃药筒固定不动,并且可燃药筒与当地主装药同时点火;可燃药筒的燃烧规律由试验确定。可燃药筒燃烧产生的气体及能量立即全部均匀充满所在微元体的整个空间,和当地火药气体均匀混合。

(6) 气体状态符合阿贝尔状态方程。

(7) 固体发射药着火由表面温度确定,以 $T_{ps} \geq T_{着火}$ 为判据。

(8) 入射等离子体流以质量、动量、能量源项形式加入气相平衡方程。

(9) 假设弹丸是平底弹,不考虑弹丸尾翼的影响。

5.2.3 数学模型

1. 方程的建立

(1) 主装药燃气连续性方程。

$$\frac{\partial A \rho_1 \phi}{\partial t} + \frac{\partial A \rho_1 \phi u}{\partial x} = A I_1 + A_1 \dot{m}_0 \quad (5-1)$$

式中 I_1 ——单位体积、单位时间内主装药燃烧所生成气体的质量;

$\dot{m}_0$ ——点传火管在单位时间内为单位容积提供的质量;

u ——气流速度;

A ——炮膛截面积;

A_1 ——点火管的截面积;

ϕ ——空隙率。

等式的右端分别是主装药燃烧质量源以及等离子体的质量源。

(2) 可燃药筒燃气质量守恒方程。

$$\frac{\partial A\rho_2\phi}{\partial t} + \frac{\partial A\rho_2\phi u}{\partial x} = AI_2 \quad (5-2)$$

式中 I_2 ——单位体积、单位时间可燃药筒燃烧所生成气体的质量。

(3) ρ 气体密度及热力参数。

$$\rho = \rho_1 + \rho_2$$

用质量加权法求得：

$$R = \frac{\sum \rho_i R_i}{\rho}; \quad \alpha = \frac{\sum \rho_i \alpha_i}{\rho} \quad (5-3)$$

式中 ρ ——混合气体密度；

α ——混合气体余容。

(4) 气相动量守恒方程。

$$\frac{\partial A\rho\phi u}{\partial t} + \frac{\partial A\rho\phi u^2}{\partial x} + A\phi \frac{\partial p}{\partial x} = AI_1 u_p + AI_2 u - AD + A_1 \dot{m}_0 \cdot u_0 \quad (5-4)$$

式中 P —— ρ 气体压强；

D ——单位长度上相间阻力引起的压力降。

(5) 气相能量守恒方程。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial A\rho\phi(e + u^2/2)}{\partial t} + \frac{\partial A\rho\phi u(e + u^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial A\phi u p}{\partial x} + A p \frac{\partial \phi}{\partial t} \\ & = AI_1 H_{p1} + AI_2 H_{p2} + A_1 \dot{m}_0 H_0 - A \dot{q} - Au_p D \end{aligned} \quad (5-5)$$

式中 H_{p1} ——主装药；

H_{p2} ——可燃容器；

H_0 ——等离子体相变转换总焓；

e ——单位质量气体的内能；

$\dot{q}$ ——相间换热。

该式右端的前三项分别为：主装药、可燃药筒以及等离子体从传火管流出的能量贡献，第四项为火药着火前气体传给火药表面的热量，最后一项为气体对固相所做的功。

(6) 固相连续性方程。

$$\frac{\partial A\rho_{p1}\sigma_1}{\partial t} + \frac{\partial A\rho_{p1}\sigma_1 u_p}{\partial x} = -AI_1 \quad (5-6)$$

式中 u_p ——装药颗粒的运动速度；

σ_1 ——主装药的体积比，即在单位体积内主装药体积的多少；

ρ_{p1} ——火药的真密度（一般为常数）。

(7) 可燃药筒连续性方程。由假设（4），因为可燃药筒固定不动，所以 $u_{p2} \equiv 0$ ，于是有：

$$\frac{d(\rho_{p2}\sigma_2)}{dt} = -I_2 \quad (5-7)$$

(8) 空隙率与火药体积比关系式。

$$\phi = 1 - \sigma_1 - \sigma_2 \quad (5-8)$$

(9) 固相动量方程（未考虑颗粒间应力）。

$$\frac{\partial A\rho_{p1}\sigma_1 u_p}{\partial t} + \frac{\partial A\rho_{p1}\sigma_1 u_p^2}{\partial x} + A\sigma_1 \frac{\partial p}{\partial x} = -AI_1 u_p + AD \quad (5-9)$$

(10) 燃烧速度定律（主装药）。

$$\frac{dz}{dt} = \frac{u_1}{e_1} p^\gamma \quad (5-10)$$

燃烧速度定律（可燃药筒）为：

$$\frac{dz_2}{dt} = \frac{d\psi_2}{dt} = M_1 P (1 - M_2 P) \quad (5-11)$$

(11) 几何燃烧定律（主装药）。

$$\psi_1 = \begin{cases} \chi Z (1 + \lambda Z + \mu Z^2) & Z \leq 1 \\ \chi_1 Z (1 + \lambda_1 Z) & Z > 1 \end{cases} \quad (5-12)$$

对式（5-12）两边求导得：

$$\frac{d\psi_1}{dt} = \begin{cases} \chi (1 + 2\lambda Z + 3\mu Z) \frac{dZ}{dt} & Z \leq 1 \\ \chi_1 (1 + 2\lambda_1 Z) \frac{dZ}{dt} & Z > 1 \end{cases} \quad (5-13)$$

式中

ψ_1 ——主装药相对体积燃烧量；

u_1 ——燃速系数；

e_1 ——弧厚的一半；

$\chi, \mu, \lambda, \chi_1, \lambda_1$ ——药型系数；

Z ——火药的相对弧厚。

几何燃烧定律（可燃药筒）为：

$$\psi_2 = Z_2 \quad (5-14)$$

(12) 气体状态方程。

$$p \left(\frac{1}{\rho} - \alpha \right) = RT \quad (5-15)$$

式中 R ——燃烧气体混合常数；

R, α, ρ ——由式（5-3）用质量加权法求得。

(13) 气体内能方程。

$$e = c_v T = \frac{RT}{\gamma - 1} = \frac{P(1 - \alpha p)}{(\gamma - 1)\rho} \quad (5-16)$$

式中 c_v ——等容比热容；

α ——余容；

γ ——比热比（此式在 600MPa 以下可满足要求）。

以上方程构成封闭方程组，未知参数为 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ 、 ϕ 、 u 、 p 、 e 、 σ_1 、 σ_2 、 u_p 、 T 、 z 、 ψ 。

2. 辅助关系式

所需确定的辅助关系式有可燃容器的燃烧规律、主装药气体生成速率、燃烧焓、相间传热、相间阻力、表面温度等关系式。以下为主要辅助方程：

(1) 单位体积单位时间内主装药燃烧生成气体的质量。

$$I_1 = \frac{\sigma_1}{1 - \psi_1} \rho_{p1} \frac{d\psi_1}{dt} \quad (5-17)$$

(2) 单位体积单位时间内可燃药筒燃烧生成气体的质量。

$$I_2 = \frac{\sigma_2 \rho_{p2}}{1 - \psi_2} \cdot \frac{d\psi_2}{dt}$$
$$\frac{d\psi_2}{dt} = M_1 \cdot (1 + M_2 p) p$$
$$M_1 = 3.03 \times 10^{-6}; M_2 = -2.36 \times 10^{-9} \quad (5-18)$$

(3) 药粒表面温度微分方程。

$$\frac{\partial T_{ps}}{\partial t} + u_p \frac{\partial T_{ps}}{\partial x} = \frac{2 \sqrt{a_1}}{\lambda \sqrt{\pi}} \dot{q} \cdot [(t + \delta t)^{1/2} - t^{1/2}] / \delta t \quad (5-19)$$

(4) 相间热传导。

$$\dot{q} = \frac{A(1 - \phi)}{V_{p0}} S_{p0} h_t (T - T_{ps}) \quad (5-20)$$

式中 A ——药室截面积；

V_{p0} ——药粒初始体积；

S_{p0} ——药粒初始表面积。

$$h_t = h_c + h_r = Nup \cdot \lambda_g / d_p + \sigma_0 (T + T_{ps}) (T^2 + T_{ps}^2)$$

式中 Nup ——努谢尔数， $Nup = 0.4 Pr^{1/3} Re^{2/3}$ ；

Pr ——普朗特数（一般取 0.7）， $Pr = 4\gamma / (9\gamma - 5)$ ；

λ_g ——火药^g气体导热系数， $\lambda_g = [131.034 + 0.26268 (T - 400)] \times 10^{-3}$ ；

d_p ——药粒当量直径；

Re ——以颗粒为当量直径计算的雷诺数；

σ_0 ——玻耳兹曼常数。

其中等式右端两项分别为对流、辐射换热系数。

(5) 相间阻力 D 。在两相流动过程中, 相间阻力与伴随质量传递的动量传递, 构成了两相间的动量传递过程。

①方法 1。

$$D = \frac{1-\phi}{\phi^3 d_p} (u - u_p) |u - u_p| \rho \cdot C_f \quad (5-21)$$

式中 d_p ——药粒当量直径。

$$d_p = \left(\frac{6}{\pi} V_p \right)^{1/3}$$

式中 V_p ——药粒外观体积。

系数 C_f 为:

$$C_f = \begin{cases} C_{f2}, & \phi \leq \phi_0 \\ C_{f2} \cdot \left(\frac{1-\phi}{1-\phi_0} \cdot \frac{\phi_0}{\phi} \right)^{0.21}, & \phi \leq 0.97 \\ 0.45, & 1 \geq \phi > 0.97 \end{cases}$$

$$C_{f2} = \begin{cases} 0.31 (\lg Re)^2 - 2.55 (\lg Re) + 6.33, & Re < 2 \times 10^4 \\ 1.10, & Re > 2 \times 10^4 \end{cases}$$

式中 Re ——雷诺数, $Re = \frac{\rho |u - u_p| d_p}{\mu_g}$;

μ_g ——火药气体黏性系数 (量纲为 $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$, 即 $\text{Pa}\cdot\text{s}$), $\mu_g = [20.0 + 0.0228(T - 200)] \times 10^{-6}$ 。

②方法 2: 采用 Robbins 与 Gough 给出的相间阻力公式。该公式给出的阻力系数的表达式为:

$$C_D = 2.51 Re \lambda^{2.55} (1 + d_p/D_r)^{0.789} \quad (5-22)$$

式中 $\lambda = \left(\frac{l}{2} + \frac{L}{D_0} \right) / \left(\frac{3L}{2D_0} \right)^{2/3}$;

$d_p = 3D_0 L / (2L + D_0)$;

Re ——雷诺数, $Re = \frac{\rho |u - u_p| d_p}{\mu_g}$;

μ_g ——火药气体黏性系数 (量纲为 $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$, 即 $\text{Pa}\cdot\text{s}$), $\mu_g = [20.0 + 0.0228(T - 200)] \times 10^{-6}$ 。

(6) 单位体积内固体火药的颗粒数。

$$n_p = \sigma_1 / V_p \quad (5-23)$$

(7) 主装药燃烧焓。

$$H_{p1} = \frac{f_1}{\gamma - 1} + \frac{u_p^2}{2} \quad (5-24)$$

式中 $\frac{f_1}{\gamma - 1}$ ——主装药燃烧热；

f_1 ——火药力；

γ ——比热比。

(8) 可燃容器燃烧焓。

$$H_{p2} = \frac{f_2}{\gamma - 1} \quad (5-25)$$

式中 f_2 ——可燃药筒的火药力。

(9) 等离子体相变转换总焓。

$$H_0 = e_c + u_c^2 + P_c / \rho_c \quad (5-26)$$

式中 e_c ——点火管流出的等离子体内能；

u_c ——点火管流出的等离子体速度；

P_c ——点火管流出的等离子体压力；

ρ_c ——点火管流出的等离子体密度。

(10) 主装药 (19 孔) 颗粒体积、表面积和当量直径计算公式：

①分裂前：

体积为：

$$V_p = \frac{\pi}{4} [0.827(12e_1 + 5d_0 + 2e_1 Z)^2 - 19(d_0 + 2e_1 Z)^2] (2c - 2e_1 Z)$$

表面积为：

$$S_p = [6(6e_1 + 2.5d_0 - e_1 Z) + 19\pi(d_0 + 2e_1 Z)] (2c - 2e_1 Z) \\ 3\sqrt{3}(6e_1 + 2.5d_0 - e_1 Z)^2 - \frac{19\pi}{2}(d_0 + 2e_1 Z)^2 \quad (5-27)$$

当量直径为：

$$d_p = \left(\frac{6}{\pi} V_p \right)^{\frac{1}{3}}$$

②分裂后：

体积为：

$$V'_p = 28\pi [0.2956(d_0/2 + e_1)]^2 (c - e_1)$$

表面积为：

$$s'_p = 0.2956 \times 56\pi (d_0/2 + e_1) (c - e_1) \quad (5-28)$$

当量直径为：

$$d'_p = \left(\frac{6}{\pi} V'_p \right)^{\frac{1}{3}}$$

5.2.4 等离子体发生器数学模型

1. 引言

电热化学发射技术中, 关键的一个环节就是等离子体发生器的点火过程。在研究过程中, 笔者非常重视等离子体发生器的点火机理及基础试验研究。首先开展了等离子体发生器在密闭爆发器条件下的点火试验研究; 在此基础上, 针对密闭爆发器条件下的等离子体点火特性及试验结果开展了数值模拟; 通过数值模拟结果与试验结果的对比来优化等离子体点火数学模型, 为该模型进一步应用于电热化学炮数值模拟奠定基础。密闭爆发器试验装置的简图如图 5-17 所示。装置主要由点火具、发射药、本体组成。其中点火具为圆柱棒, 表面电镀了一层铜。在放电过程中, 铜电镀层电离产生等离子体, 高温等离子体点燃爆发器内的发射药, 使其燃烧, 生成气体, 在爆发器内形成一定压力。

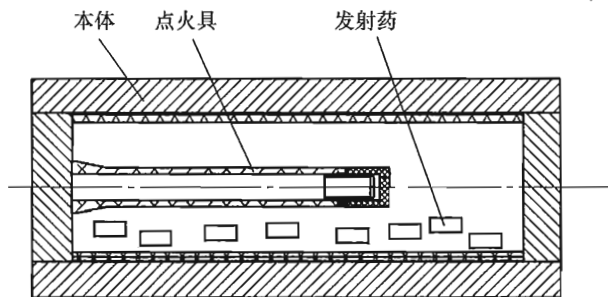


图 5-17 等离子体点火密闭爆发器试验装置简图

2. 模型假设

等离子体发生器在密闭爆发器中的应用, 考虑点火具沿轴向均匀产生等离子体。为了建立爆发器内一维非稳态流动的数学模型, 给出以下物理假设:

- (1) 传火管内等离子体的流动是一维的。
- (2) 等离子体混合物由金属电镀层产生的金属离子、电子组成, 并且认为点火具组成之一——酚醛玻璃布棒不发生电离。
- (3) 忽略等离子体的轴向热传导、等离子体视为灰体。
- (4) 毛细管内金属电镀层的爆炸由电流的欧姆加热引起, 当其温度超过临界点时认为金属电镀层完全电离且密度均匀分布。
- (5) 等离子体的热辐射损失以壁面烧蚀掉的材料的总焓形式返回等离子体。

3. 方程的建立

点火管内等离子体的参量在径向上取平均值, 从而得到一维守恒方

程组:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial x} = \dot{\rho}_a = \frac{2\sigma_0 T_1^4}{r_1(e_1 + p_1/\rho_1 + u_1^2/2)} \quad (5-29)$$

$$\frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1^2}{\partial x} = -\frac{\partial p_1}{\partial x} \quad (5-30)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_1 u_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) \right] = \frac{J^2}{\sigma} \quad (5-31)$$

$$p_1 = kT_1 \sum n_i - P_d \quad (5-32)$$

式中 t ——时间;

x ——轴向坐标;

$\dot{\rho}_a$ ——标示材料烧蚀速率;

r_1 ——点火管半径;

J ——点火管内电流密度;

σ ——等离子体的电导率;

σ_0 ——史帝芬-玻耳兹曼常数;

k ——玻耳兹曼常数;

T_1 ——等离子体热力学温度;

n_i ——等离子体混合物各粒子密度;

P_d ——考虑了粒子间相互作用引入的与等离子体温度、密度有关的压力修正项。

$$P_d = \frac{kT_1}{24\pi\lambda_D^3}$$

式中 λ_D ——德拜长度。

以上方程构成了点火管内等离子体一维非定常流动的守恒方程组。为了求解该方程组尚需给出等离子体的状态方程、能量方程以及右端源项涉及的等离子体电导率及电流密度关系式。

4. 状态方程及辅助关系式

(1) 状态方程。根据热力学理论可以写出以粒子数密度和热力学温度表示的等离子体混合物的状态方程:

$$p = (n_e + \sum_{i=0}^{i_{\max}} n_i) kT \quad (5-33)$$

式中 下标 e ——电子数密度;

下标 i ——重粒子种类 (当 $i=0$ 代表中性粒子)。

由于点火具的酚醛玻璃棒材料不发生电离, 只有铜金属层电离, 则利用该状态方程并结合假设 (2) 可写出产生等离子体状态方程为:

$$p = n_{Cu} (1 + x_{1Cu} + 2x_{2Cu}) kT \quad (5-34)$$

式中 n_{Cu} ——等离子体混合物中铜的重粒子（包括原子和离子）的数密度；

$x_{j\alpha}$ ——元素 α 第 j 次电离产生的离子的相对密度。

由于等离子体气体中只有铜金属离子，因此可知爆发器内的等离子体粒子数密度可以由等离子体混合物的密度求出：

$$n_{\text{Cu}} = \frac{\rho_1}{m_{\text{oCu}}} \quad (5-35)$$

式中 m_{oCu} ——铜的原子量。

混合物中各组分粒子的相对密度可以由 Saha 方程给出：

$$\frac{n_e n_{j\alpha}}{n_{j-1,\alpha}} = 2 \frac{u_{j\alpha}}{u_{j-1,\alpha}} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h_p^2} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{I_{j\alpha} - \Delta I_{j\alpha}}{kT} \right) \quad (5-36)$$

$$u_{j\alpha} = \sum_i g_{jai} \exp \left(-\frac{W_{jai}}{kT} \right) \quad (5-37)$$

式中 $u_{j\alpha}$ ——相应的电子配份函数；

m_e , n_e ——电子的质量和密度；

h_p ——普朗克常数 $6.62620 \times 10^{-34} \text{ J/s}$ ；

$I_{j\alpha}$ ——元素 α 第 j 次电离的电离势；

$\Delta I_{j\alpha}$ ——等离子体非理想效应引起的电离势的降低；

W_{jai} ——元素 α 的 j 种离子的第 i 个电子状态的能级；

g_{jai} ——相应能级的兼并度。

考虑等离子体的非理想效应从修正德拜半径来计算电离势的降低：

$$\Delta I_{j\alpha} = \frac{je^2}{4\pi\epsilon_0(\lambda_D + \Lambda/8)} \quad (5-38)$$

式中 Λ ——deBroglie 波长。

$$\Lambda = \frac{h}{(2\pi m_e kT)^{1/2}} \quad (5-39)$$

式中 λ_D ——标准德拜半径，考虑了电子和离子的电荷壳的影响。

(2) 内能关系式。等离子体的状态方程中压力的求解过程是先利用内能关系式求出温度，再由状态方程确定压力。因此内能关系式对压力的求解影响很大。考虑等离子体混合物的汽化能、裂解能和电子激活能情况下的内能关系式：

$$\begin{aligned} e = \frac{1}{\rho} \left[\frac{3}{2} kT n_{\text{Cu}} (1 + x_{1\text{Cu}} + x_{2\text{Cu}}) + (I_{1\text{Cu}} - \Delta I_{1\text{Cu}}) n_{\text{Cu}} x_{1\text{Cu}} + \right. \\ \left. (I_{1\text{Cu}} + I_{2\text{Cu}} - \Delta I_{1\text{Cu}} - \Delta I_{2\text{Cu}}) n_{\text{Cu}} x_{2\text{Cu}} + \rho E_D + \right. \\ \left. \rho E_v n_{\text{Cu}} (1 - x_{1\text{Cu}} - x_{2\text{Cu}}) W_{0\text{Cu}} + n_{\text{Cu}} x_{2\text{Cu}} W_{2\text{Cu}} \right] \quad (5-40) \end{aligned}$$

式中 E_D, E_v ——铜的裂解能和汽化能；

$W_{j\alpha}$ ——元素 α 第 j 次电离产生电子的电子激活能，可由电子配份函数的关系式求得。

$$W_{j\alpha} = -kT^2 \frac{\partial Z_{j\alpha}}{\partial T} \quad (5-41)$$

(3) 等离子体电导率的求解。正确计算等离子体的电导率非常重要，因为它决定着传递到等离子体的能量。既考虑电子与离子的碰撞，也考虑电子与中性粒子碰撞的电导率公式为：

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e (v_{en} + v_{ei})} \quad (5-42)$$

式中 m_e ——电子的质量；

v_{en} ——电子与中性粒子的碰撞频率；

v_{ei} ——电子与离子的碰撞频率。

$$v_{en} = n_{Cu} Q_{ej} v_e \quad (5-43)$$

式中 n_{Cu} ——铜原子的数密度，可根据各离子的相对密度求出；

Q_{ej} ——电子与铜原子碰撞截面积，可由原子的玻尔半径求出。

$$Q_{eCu} = 30\pi a_0^2, \quad Q_{eH} = 17\pi a_0^2$$

式中 a_0 ——玻尔半径， $a_0 = 4\pi\epsilon_0 \hbar^2 / (m_e e^2) = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$ ；

v_e ——电子的平均运动速度， $v_e = [8kT / (\pi m_e)]^{1/2}$ 。

电子与离子的碰撞频率为：

$$v_{ei} = \frac{38Zn_e e^2 \ln(1 + 1.4\Lambda_m)^{1/2}}{\gamma_e m_e T^{3/2}} \quad (5-44)$$

式中 Z ——离子的有效电荷数，由离子的电离阶数决定，对于二次电离度远小于一次电离度的铜离子体 $Z \approx 1$ ；

γ_e ——考虑电子与电子的扩散引入的修正系数，在 $Z \approx 1$ 的条件下 $\gamma_e = 0.58$ 。

修正的库仑参数为：

$$\Lambda_m = \frac{\sqrt{\lambda_D^2 + \lambda_+^2}}{b_0} \quad (5-45)$$

式中 λ_D ——等离子体的德拜半径；

λ_+ ——平均离子间距离；

b_0 ——碰撞电子以 90° 扩散情况下的碰撞参数。

以上参数的表达式如下：

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{n_e e^2}}; \lambda_+ = \left(\frac{3}{4\pi n_+} \right)^{1/3}; b_0 = \frac{Ze^2}{12\pi\epsilon_0 kT} \quad (5-46)$$

在求出等离子体电导率的前提下，通过对放电方程 $Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = u_c$ 的离散化求解放电回路的电流密度，并认为放电过程均匀加热等离子体，放电回路杂散电阻的影响通过附加一个常量电阻加以修正。

上述守恒方程组和辅助方程构成了描述等离子体一维流动过程中各参量变化的封闭方程组。结合初始条件和边界条件，选择合理的离散化方法即可求解该方程组。

5. 脉冲电源放电电路分析

脉冲功率技术及脉冲功率源是电热发射技术的重要组成部分。目前较为实用、可靠的脉冲功率源是采用电容器组储能。笔者利用电容器组脉冲功率源来完成实验研究。

最简单和常用的电容器储能脉冲功率源控制电能释放的技术是由 R - L - C 放电电路来完成的，有关这种脉冲放电技术的研究已经较为成熟。简单的 R - L 电路就可以实现电能向热能的转化，但针对电热发射过程中内弹道过程的特点，脉冲功率源要求有一定规律的脉冲输出。通常在不影响脉冲功率转化效率的前提下，调整电能释放速率最简单的方法是在放电电路中串联一定的电感器。由电感器对脉冲电流的感抗效应控制电流的幅值和变化速率。最简单的储能电容器 R - L - C 放电电路原理如图 5 - 18 所示。图中 R 为放电电路的负载，L 为脉冲波形调整电感，C 为储能电容器组，K 为闭合开关，其中忽略了导线和开关杂散电阻及杂散电容。

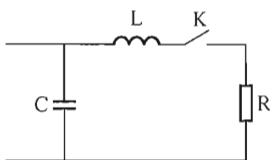


图 5 - 18 R - L - C 放电电路原理图

由图 5 - 18 可见，开关 K 闭合后上述回路构成 R - L - C 串联放电电路，由基尔霍夫定律可以写出放电电路的守恒方程为：

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = u_c \quad (5 - 47)$$

当放电电路参数为常量或线性变量时，结合 $t = 0$ 时 $i = 0$ 的初始条件，可以得到不同电路参数条件下放电电流随时间变化规律的解析解，进而可求出电流最大值和电流达到最大值的时间等参数。

(1) $R^2 > 4L/C$ 时，构成过阻尼放电电路：

$$i(t) = \frac{u_c}{\beta L} e^{-\alpha t} \operatorname{sh} \beta t \quad (5 - 48)$$

由上式可得，电流峰值时间和峰值电流分别为：

$$t_m = \frac{1}{\beta} \operatorname{th}^{-1} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right) \quad (5 - 49)$$

$$I_m = u_c \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{\alpha}{\beta} \text{th}^{-1}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)} \quad (5-50)$$

(2) $R^2 < 4L/C$ 时, 构成欠阻尼放电电路:

$$i(t) = \frac{u_c}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (5-51)$$

$$t_m = \frac{1}{\omega} \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\alpha}\right) \quad (5-52)$$

$$I_m = u_c \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{\alpha}{\omega} \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\alpha}\right)} \quad (5-53)$$

(3) $R^2 = 4L/C$ 时, 为临界阻尼放电电路:

$$i(t) = \frac{u_c}{L} t e^{-\alpha t} \quad (5-54)$$

$$t_m = \frac{1}{\alpha} \quad (5-55)$$

$$I_m = \frac{u_c}{\alpha L} e^{-1} \quad (5-56)$$

式 (5-48) 或式 (5-56) 中, $\alpha = \frac{R}{2L}$, $\beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$, $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ 。可以看到在上述三种参数条件下, 放电电流的幅值与储能电

容器的充电电压成正比, 与放电电路的电感值成反比。放电电流的导数即电流上升速率的最大值为 $\frac{u_c}{L}$ 。因此在储能电容器充电电压和回路电阻固定的条件下, 电感器起到调整脉冲电流波形、控制电能释放速率的作用。由放电电流、负载阻值与输出功率的关系可知, 若负载电阻在放电过程中为常量, 则脉冲功率的输出过程正比于放电电流的平方; 而对于非线性负载电阻, 脉冲功率的输出过程还将受到负载阻值的影响。

在电热发射应用中, 放电回路的负载电阻是脉冲功率源对毛细管内壁电弧放电产生的等离子体。等离子体的电阻值是毛细管内压力、温度和电离度的函数, 是一种典型的非线性负载, 其阻值通常都比较小。由此可知, 以电弧等离子体为负载的放电电路往往构成欠阻尼电路。对欠阻尼放电过程的分析可知放电电流为按指数规律衰减的正弦波, 当储能电容器两端的电压为零时, 放电电流达到最大值, 随后电流将对电容器反向充电。为防止放电电流对电容器反向充电而损坏电容器及增加电能的损耗, 须考虑对电容器保护或采用大功率无极性电容。

6. 等离子体点火密闭爆发器试验数值模拟

电热化学发射技术中关键的一个环节就是高电压条件下等离子体点火

过程。等离子体点火过程涉及多个复杂的物理过程。如前期的金属电爆炸过程、等离子体生成过程以及后期的等离子体与含能材料相互作用过程等。这些过程往往都是强瞬态过程并且涉及物质存在的第四态——等离子体态，其特征量的检测、定量难度又很大。正是由于电热化学发射中的等离子体点火过程极其复杂，因此开展理论数值仿真的必要性尤为突出。通过理论数值仿真并结合较为可靠的常规测试可以间接掌握等离子体点火过程各关键参数的特性。从而为优化点火机构及点火参数选择提供有力的技术指导。

笔者首先在建立等离子体点火密闭爆发器数学模型的基础上，开展了密闭爆发器的一维等离子体点火数值模拟。通过与试验测试结果的对比，对数学模型进行了优化改进，使数值模拟结果与测试结果有较好的一致性。优化的数学模型可以较准确地描述等离子体点火过程的基本特性，为下一步等离子体点火机构应用于火炮射击试验平台上提供理论参考。

(1) 密闭爆发器的等离子体点火试验基本参数。数学模型的原型为等离子体点火密闭爆发器，其装药容积为 230mL。

等离子体产生的放电回路参数：放电电压为 10000 ~ 11500V；电感为 140 μ H；电容量为 2200 μ F。

笔者在对密闭爆发器等离子体点火数学模型进行分析的基础上，开展了等离子体生成及一维流动的数值编程，利用装填参数及放电回路参数，作为初始参数，对密闭爆发器等离子体点火过程进行数值模拟。

(2) 无发射药条件下爆发器等离子体点火试验及仿真。首先模拟了等离子体点火条件下爆发器内没有发射药时的状态。图 5-19 所示为当放电电压为 11500V 试验过程中放电电流曲线的测试值与计算值的对比。从图中可以看出，计算电流曲线与测试结果有较好的一致性。

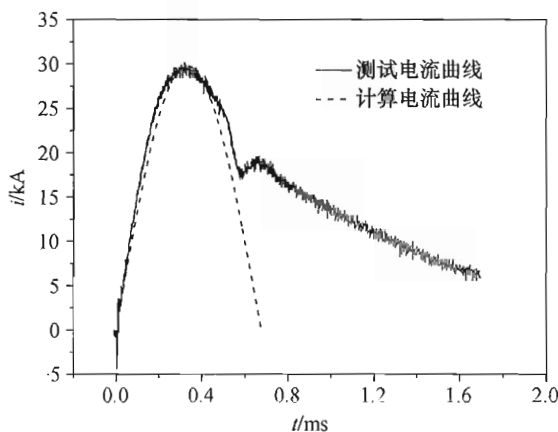


图 5-19 放电电流与时间关系曲线

爆发器内在没有发射药时，压力主要是由等离子体气体产生，其产生的速率直接受放电电流的影响。从计算结果看，在爆发器内没有装发射药时，等离子体产生的最大压力为 26.9MPa。试验过程中，虽然也测试了压力，但由于高电流放电对测压系统干扰较大，最大膛压只能粗略读数为 25MPa 左右。从计算结果看，压力的上升时间与电容器放电过程的时间几乎同步，这主要是在没有发射药的条件下，爆发器内的压力只有靠等离子体气体来产生。图 5-20 所示为爆发器内压力与时间的关系曲线。

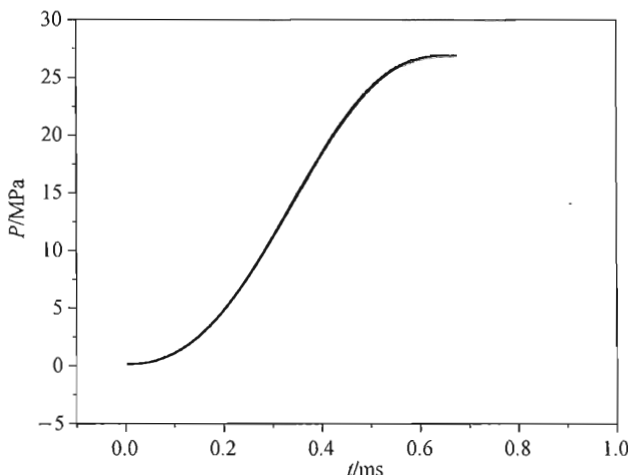


图 5-20 无发射药条件下的密闭爆发器内压力与时间的关系曲线

(3) 有发射药条件下爆发器等离子体点火试验及仿真。在密闭爆发器内装填发射药后进行等离子体点火试验。试验过程的主要参数有：发射药装填密度为 0.35kg/dm^3 、放电电压为 11500V。发射药主要尺寸为： $D = 17.22\text{mm}$ 、 $2e_1 = 2.53\text{mm}$ 、 $d_0 = 0.40\text{mm}$ 、 $L = 17.06\text{mm}$ 。火药力为 1170000J/kg 。

在爆发器等离子体点火仿真计算中，考虑到由于等离子体温度比常规点火药的点火气体温度高出许多，因此认为等离子体点火的点火延迟可忽略不计。计算过程中等离子体产生过程同时也是发射药开始燃烧过程，只是等离子体产生过程的时间相对发射药整个燃烧过程很短，不影响发射药的整个燃烧过程。图 5-21 所示为计算等离子体点火条件下爆发器压力曲线过程及试验测试结果的对比如。从图中可以看出，计算压力曲线与测试结果吻合较好，特别是在膛压初始上升阶段压力变化过程与测试结果一致。

从计算结果可以看出，在压力的最初阶段有一个压力快速上升的台阶，这主要是因为等离子体产生的时间很短，等离子体形成压力上升较

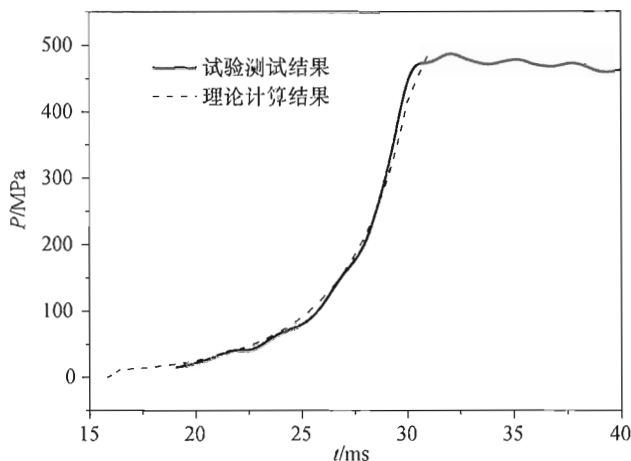


图 5-21 有发射药条件下的爆发器压力曲线计算结果与测试结果的对比

快，形成了压力台阶。在此压力台阶下，发射药开始燃烧。从计算结果与测试结果的对比可以看出，两者反映的发射药燃烧过程一致性好。

图 5-22 所示为等离子体产生时期爆发器内的压力上升过程。从图中可以看出，计算结果表明等离子体点火条件下等离子体气体能够形成的初始点火压力在 10 ~ 15 MPa 的范围内。

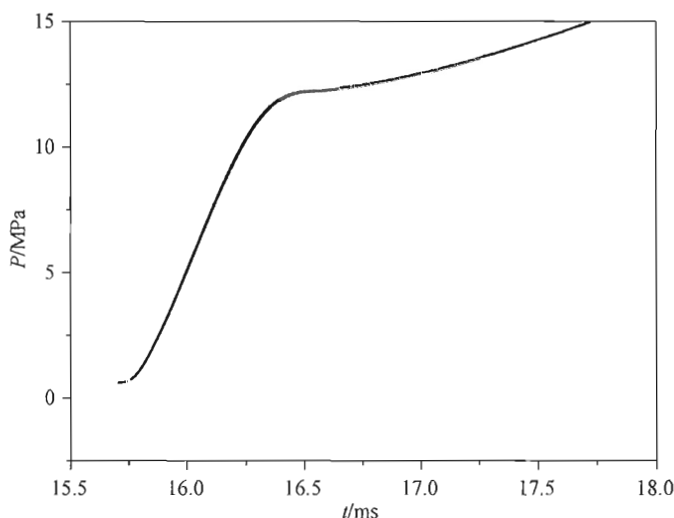


图 5-22 等离子体产生时期爆发器内的压力上升过程

图 5-23 所示为爆发器内气体温度的变化过程，可以看出前期由于等离子体的存在，气体温度在很短的时间内达到很高的值，随着火药气体的

大量产生气体温度快速下降,并保持在火药的爆温 3000℃ 左右。

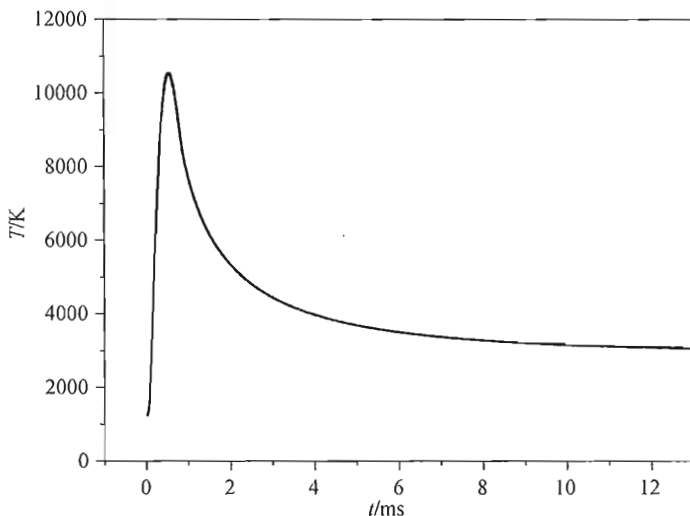


图 5-23 爆发器内气体温度的变化过程

5.2.5 等离子体点火条件下一维两相流内弹道数值模拟

1. 一维两相流内弹道数值模拟初始条件

数值模拟的物理模型在前文已经描述过,这里为了求解两相流控制方程给出了物理模型的初边界条件。主要的参数有:

(1) 某大口徑火炮参数。药室容积为 14.90dm^3 ; 点火管长为 360mm。

(2) 发射药参数。主要参数为: $D = 16.2\text{mm}$ 、 $2e_1 = 2.35\text{mm}$ 、 $d_0 = 0.39\text{mm}$ 、 $L = 15.9\text{mm}$ 。火药力为 1040000J/kg 。装药量为 11.5kg。

可燃药筒性能: 药筒质量为 1.6kg。

(3) 放电参数。电容器电量为 $C = 1.1 \times 10^{-3}\text{F}$ 、放电电压为 17000V、电感为 $1.7 \times 10^{-4}\text{H}$ 。

2. 一维两相流内弹道数值模拟结果及分析

在建立数学模型、确定数值方法及初边界的基础上,开展了等离子体点火条件下的火炮一维两相流内弹道数值模拟。通过数值模拟结果与试验测试结果的对比,可以看出所建立的数学模型能够用于描述等离子体点火条件下的火炮发射过程。以下是主要的模拟结果。

图 5-24 所示为火炮射击过程中膛底压力测试曲线与模拟计算曲线的对比。

从图 5-24 中的试验测试曲线可以看出,膛底压力曲线在前期有一个较强的压力脉冲,这是等离子体点火的作用过程。从图中可以看出,这一

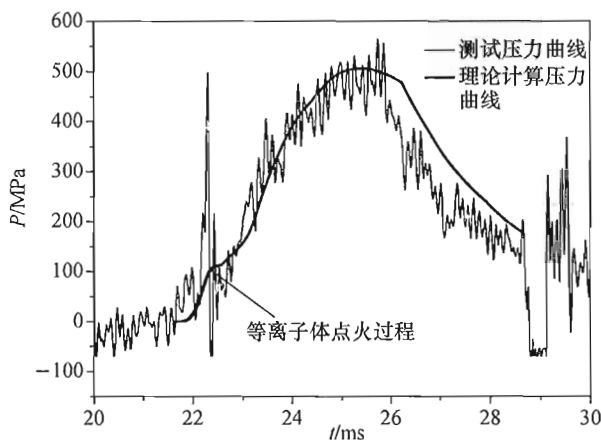


图 5-24 膛底压力测试曲线与模拟计算曲线的对比

过程中压力上升较快，并且达到了 100MPa 左右。同时从理论计算曲线上也可以明显看出等离子体点火过程中压力快速上升的过程，并且从试验曲线与计算曲线的对比可以看出，理论计算的等离子体点火过程时间范围与试验曲线结果相符，大致在 0.5ms 左右。图 5-24 说明理论计算过程可以用于描述等离子体点火的火炮发射过程。

图 5-25 所示为坡膛压力曲线的测试值与理论分析值的对比。从图中可以看出在前期没有像膛底曲线那样有明显的压力脉冲或压力上升阶段。分析其原因主要是因为等离子体放电时间较短，在底部形成的压力几乎影响不到坡膛处。从坡膛的测试曲线与计算曲线的对比可以看出两者一致性较好。

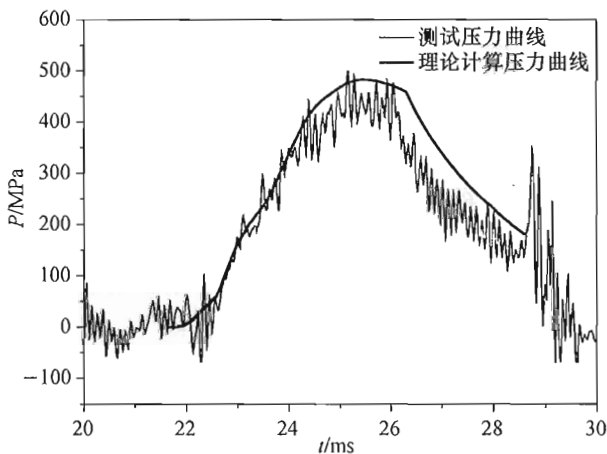


图 5-25 坡膛压力曲线的测试值与理论分析值的对比

图 5-26 所示为膛底与坡膛两处压力差的测试曲线与计算曲线。从曲线上可以较明显地算出等离子体点火过程存在第一正压差。从两个曲线的对比可以看出, 计算压差波动曲线与试验结果一致性好, 反映出压力差波动的基本规律。

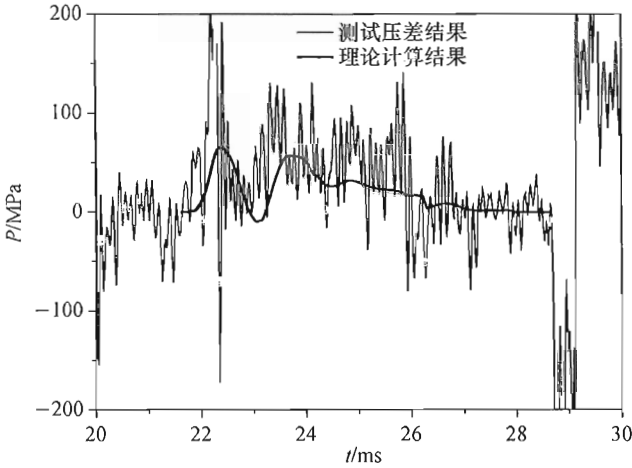


图 5-26 膛底与坡膛两处压力差的测试曲线与计算曲线

图 5-27 所示为等离子体点火过程膛底与坡膛的压力上升过程的计算结果。从图中可以明显看出膛底压力上升较快, 这主要是因为膛底受等离子体点火作用强烈的结果。

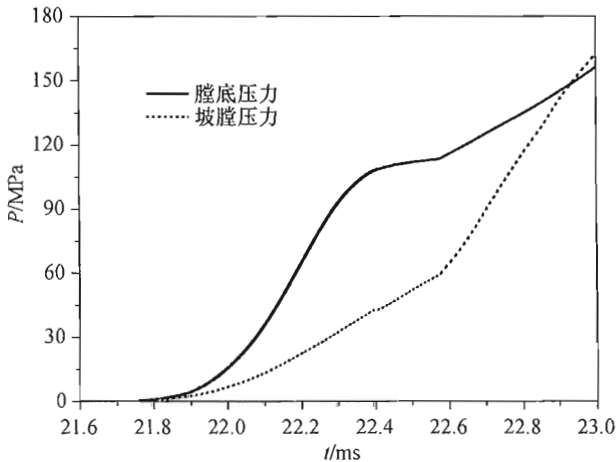


图 5-27 等离子体点火过程膛压曲线

图 5-28 所示为弹丸的运动速度与时间的关系曲线。从曲线中可以看

出, 等离子体点火过程弹丸基本没有运动。主要是由于弹底压力较低, 没有达到弹丸的起动压力, 而从曲线中看出速度上升最快的时间是在 25ms 处, 与最大压力出现时刻相一致。

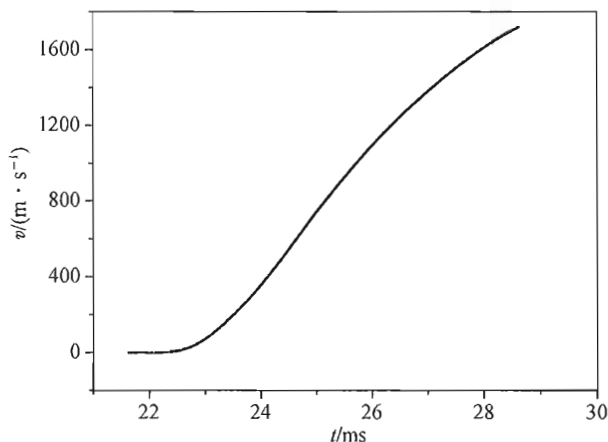


图 5-28 弹丸在膛内速度与时间关系曲线

3. 分析结论

通过开展等离子体点火数值模拟, 建立了等离子体点火条件下的密闭爆发器数学模型以及火炮射击过程的一维两相流内弹道数学模型。利用基础试验和火炮综合试验分别对上述两个数学模型进行了修正。通过优化数学模型及参数的合理匹配, 确保了数值模拟结果与试验结果有较好的一致性。使数学模型能较好地反映等离子体点火的工程实际过程。

等离子体点火过程的理论数值模拟为电热化学发射过程的工程设计提供了良好的理论指导工具。该理论研究既是深入掌握等离子体点火技术的重要环节, 也是设计、优化等离子体点火的重要手段。

第6章 电热化学炮装药结构设计

提高火炮弹丸的炮口动能,从装药角度来说,无非是提高装药总能量和提高装药能量利用率或者是这二者的结合。

提高装药量和使用高能量发射药是提高装药总能量的最直接方法。使用高能发射药往往要承受燃气对炮膛更为严重烧蚀的代价。提高装药量由于受到药室(药筒)容积和最大膛压的限制,采用常规的方法提高装药量潜力不大。通常药筒自由装填的装填密度为 $0.6 \sim 0.9 \text{ kg/dm}^3$ 。实验证明,对于大多数药型采用常规办法,装填密度最高也不会超过 $0.95 \sim 1.0 \text{ kg/dm}^3$ 。因此,要更大幅度提高装药量,必须采取高装填密度装药技术。

提高装药量对提高火炮弹丸的初速,效果是显著的。理论上讲,由射击时弹丸出炮口的能量平衡方程:

$$\frac{1}{2} \varphi m v_g^2 = \frac{f \omega}{K-1} \dot{\gamma}_g$$

对于给定的火炮和一定性质的火药而言, $v \propto \sqrt{\omega}$, 提高装药量是提高初速的根本条件。若装药量提高 $5\% \sim 20\%$, 弹丸初速可相应提高 $2.5\% \sim 9.5\%$ 。高装填密度装药技术的装填密度可达到 1.2 kg/dm^3 或更高一些。因此,对给定的火炮药室尺寸,采用高装填密度装药技术无疑是提高火炮性能的一个有效途径。

国外报道的实现高装填密度装药的技术途径有:

- (1) 研制高能、高密度新型发射药;
- (2) 多元(复合)装药技术;
- (3) 模块装药技术(药筒外密实);
- (4) 药筒内直接密实技术;
- (5) 多层“快心”结构式密实装药;
- (6) 程序控制—开裂棒状(PSS)发射药。

根据国外资料分析,国外在电热化学炮装药技术研究方面,主要分为5个阶段:等离子体点燃火炮制式装药阶段、可控等离子体点燃高装填密度装药阶段、高装填密度装药等离子体可控燃烧阶段、附加有添加剂的高装填密度装药等离子体可控燃烧阶段及惰性发射药电汽化阶段。根据以上

分析,结合国内研究现状,在电热化学炮内弹道与装药技术研究方面处于第二个阶段,在这一阶段计划采取三种方案开展研究:一是开展高能包覆火药技术研究;二是开展大装填密度堆积型装药技术研究;三是开展高装填密度发射装药技术研究。重点解决等离子体点火效率问题,研究等离子体点火与高装填密度发射装药的适配性及其实现内弹道性能指标的技术途径。

新型高装填密度装药技术研究着重用于等离子体点传火性能、等离子体点火条件下高装填密度装药静态燃烧规律、等离子体点传火结构与高装填密度装药结构的适配性能及电热化学炮内弹道性能试验研究;重点分析各起始参数对点传火性能和电热化学炮内弹道性能的影响,提出实现内弹道性能的途径和高装填密度装药技术方案。

不同口径、不同战技指标的火炮,实现高装填密实装药的技术方案可能不完全相同。因此,在内弹道理论的指导下,研究适合不同口径火炮的高装填密实装药技术方案与相应装药施工工艺是首先要解决的问题。

6.1 电热化学炮高装填密度装药结构技术

一般来讲,获得比传统粒状药为主的装药结构更高的装填密度,大致有三种装药结构方式:①通过对较小颗粒发射药表面实施钝感工艺或包覆工艺处理,以达到发射药增面燃烧与对温度不敏感性燃烧特点效果,同时实现较高装药密度装药;②采用有序密排多孔杆状药结构形式,即序列装药技术,实现提高单位容积下装药量的目的;③利用含能黏合剂将较小颗粒的发射药黏结在一起,并装配于一定形状的模具内施一定压力促其紧密结合成整体模块状,进而获得更高的装填密度装药。具体分述如下:

6.1.1 钝感装药结构技术

采用包覆钝感药与无包覆粒状药混合装填火炮药筒方案,使装填密度尽可能提高(图6-1)。其装填密度可达到 $0.8\text{kg}/\text{dm}^3$ 及以上,其燃烧性能稳定,技术成熟度高。

6.1.2 序列装药结构技术

采用40~60mm长度的杆状药在药筒内有序排列紧密堆积的方案,也可使装填密度大幅度提高(图6-2)。19孔杆状药+管状药+粒状药其装填密度可达到 $0.9\text{kg}/\text{dm}^3$,燃烧性能稳定,技术成熟度较高。

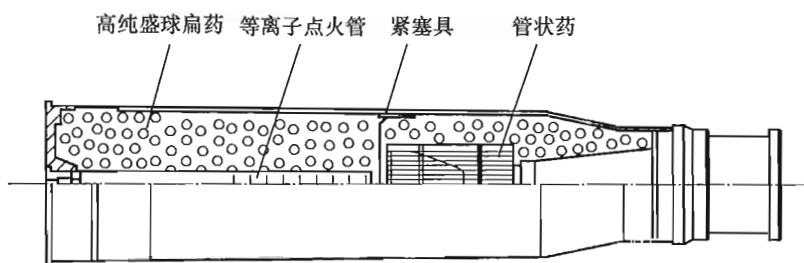


图 6-1 球扁药自由装填方案

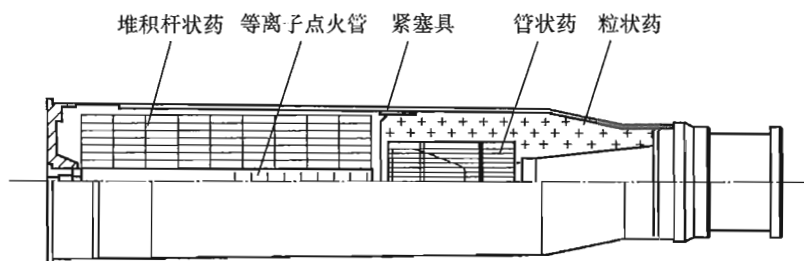


图 6-2 序列杆状药堆积方案

6.1.3 密实装药结构技术

将球形/球扁药或多孔小粒药借助于溶剂或黏合剂在专用模具内预先压制成密实模块，再将若干个预制模块以一定方式装入药筒内，此方案能大幅度提高装填密度（图 6-3）。密实药形状如图 6-4 所示。其装填密度可达到 $1.0\text{kg}/\text{dm}^3$ ，在大口径火炮上燃烧性能难以控制，技术成熟度不高。图 6-5 和表 6-1 分别为以色列在 20mm、60mm 和 120mm 电热化学炮试验装置上进行试验的装填密度为 $1.3\text{kg}/\text{dm}^3$ 的密实装药和所需的最小电能。

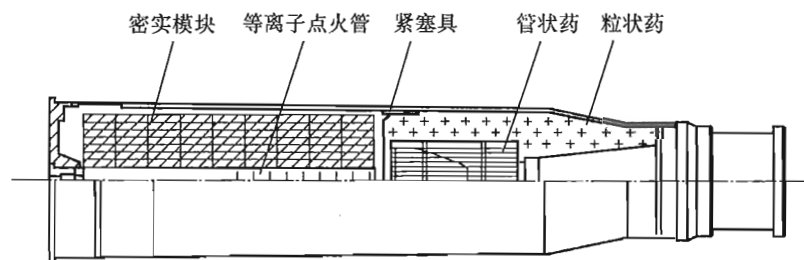


图 6-3 压实模块装药方案

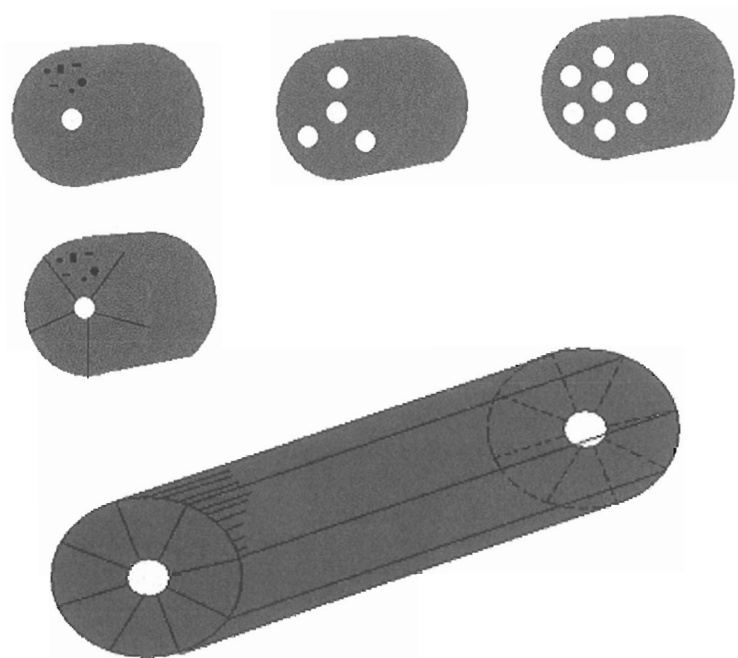


图 6-4 密实药形状

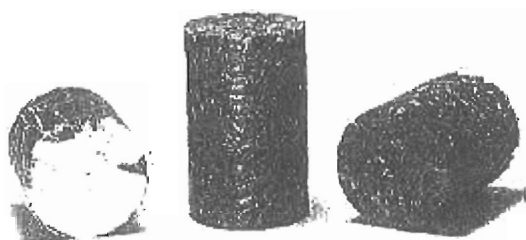


图 6-5 以色列电热化学炮所用密实装药图片

随着火炮口径增大和装药装填密度的提高，火炮初始装药量增大，对等离子体点火性能也提出了相应的要求，表 6-1 所示为不同口径等离子体点火所需最小电能。而针对同一口径火炮采用不同装药装填密度，其等离子体点火电能需求还处于研究探索阶段。

表 6-1 不同口径电热化学炮等离子体点火所需的最小电能

口径/mm	电能/kJ	口径/mm	电能/kJ
20	2	120	80
60	25		

6.2 电热化学炮高装填密度装药关键技术

6.2.1 高装填密度装药配方、工艺、力学性能、燃烧机理研究

高装填密度装药配方、工艺、力学性能、燃烧机理研究是高装填密实装药技术最基础的工作，必须投入大量的人力和物力，并需要长期坚持不懈的努力。

6.2.2 高装填密度装药点传火技术研究

重点解决等离子体点火效率问题，研究等离子体点火与高装填密度发射装药的适配性及其实现内弹道性能指标的技术途径。

6.2.3 高装填密度装药结构与辅助装药元件研究

根据所提出的高装填密实装药技术和点传火技术方案，可采用装药中心点传火结构或底部点火形式。其他辅助装药元件可参照相类似的常规火炮进行。

6.2.4 高装填密度装药弹道稳定性、使用安全性评估技术研究

高装填密实装药的弹道稳定性和使用安全性，都与装药的点火与燃烧及其起始弹道过程中形成的 $P-t$ 曲线规律有极为密切的关系。以等离子体点火与高装填密度发射装药的相互作用为核心，建立相应的高压燃烧模拟装置，通过实测模拟药室多位置的 $P-t$ 曲线，计算出各自的能量输出率及在模拟药室中的压力（或压力波阵面）的传递规律。从而提出弹道稳定性的评价，并可给装药使用安全性提供依据。

第7章 电热化学炮试验与测控技术

7.1 电热化学炮试验技术

7.1.1 概述

电热化学炮发射技术在机理上与常规火炮发射的机理有较大区别,主要表现在:①等离子体点传火技术取代了常规火炮的点传火方式;②发射装药结构趋于向采用高能量、高装填密度和燃烧可控的方向发展;③发射过程伴随有强电流高电压放电过程;④等离子体与发射装药的相互作用呈现一种新的复杂的物理化学变化过程;⑤在电能调节控制等离子体形成条件下,弹后火药气体和等离子体组成的混合工质的压力分布呈现一种新的分布规律。由此可见,电热化学炮发射的整个内弹道过程是一种强瞬态、高温、高压、多相态的非常复杂的过程,这其中涉及极其复杂的流体动力学问题、气体动力学问题、传热学问题、燃烧化学反应动力学问题、脉冲高电压强电流超微量负载电工学问题及等离子体化学动力学问题等。为了尽快掌握处理这一复杂弹道过程的能力,并应用于电热化学炮发射技术工程研究中,最大限度地发挥其提高火炮炮口动能的优势,可采用理论与实验研究相结合的方法,通过高效高能等离子体点火优化设计与单项试验、等离子体点传火与装药结构适配性模拟药室试验、高效高能等离子体点火条件下高能高装填密度火药燃烧规律试验以及内弹道综合试验等相互配合的技术途径,重点突破脉冲功率源电能释放控制技术、高压等离子体发生器点传火技术以及新型高装填密度装药的作用机理等关键技术,最终实现电热化学炮初速和炮口动能的显著提高。

电热化学炮试验技术大致分为以下几种:

- (1) 电热化学密闭爆发器试验技术;
- (2) 高效高能等离子体释控试验技术;
- (3) 模拟药室试验技术;
- (4) 装药终止燃烧试验技术;

(5) 电热化学炮综合模拟试验技术。

7.1.2 电热化学密闭爆发器试验技术

1. 功能

密闭爆发器是一种能够灵活的拆装操作并可承受瞬态高压燃气的密闭容器,是用来研究火药在“定容”条件下静态燃烧规律的专用装置,是内弹道试验研究及装药性能考察的重要手段。它对于完成电热化学炮弹道及装药设计以及火炮弹道性能试验具有重要的作用。通过密闭爆发器试验可测定出高能火药燃烧时燃烧室内的压力与时间关系,经数值处理计算得到火药的弹道特征量 f 、 a 及 $dP/dt-t$ 、 $dP/dt-P$ 、 $\Gamma-\psi$ 、 $u-P$ 、 $I-\psi$ 、火药的燃速系数和压力指数等,以帮助专业人员去研究分析与考察火药(尤其是新研制生产的火药或长期储存的火药)的理化性能、燃烧时的力学特性及其实际燃烧规律等。

电热化学炮由于其点火实现与发射药燃烧控制由等离子体与发射药相互作用完成,因此,开展等离子体作用条件下一般炮用发射药的燃烧性能和规律的研究,以及各种高能发射药燃烧性能和规律试验研究,对于电热化学炮内弹道及装药设计与研制,具有重要的意义。

常规密闭爆发器是通过常规点火技术即 24V 直流电源加在 $\phi 0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 的镍铬电阻丝上点燃硝化棉或黑火药,从而引燃发射药,使其在密闭爆发器内燃烧。电热化学密闭爆发器是靠强电(高电压、大电流)激发等离子体发生器产生高温等离子体来点燃新型、燃烧可控、高装填密度的化学工质。

2. 基本组成

该装置系统是由大容积密闭爆发器、电位隔离测压系统、多通道数据采集系统、试验台架等多个子系统和装置组成。组成示意图如图 7-1 所示。

3. 基本原理

试验时,将一定量的被试火药装入爆发器当中,通过脉冲电源控制系统点燃高能发射装药,发射药燃烧将产生一定压力的高压气体,其燃烧时压力随时间而变换,形成压力时间变化曲线,利用这条压力时间曲线以及样品的其他参数即可分析出高能发射药的燃速变化规律。

4. 主要技术指标

- (1) 容积: 700mL。
- (2) 最大承压: 600MPa。
- (3) 长径比: $<3:1$ 。

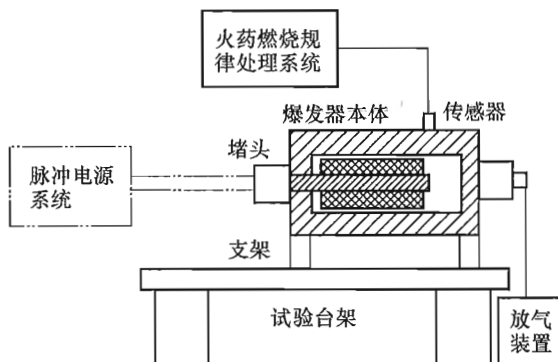


图 7-1 系统组成示意图

7.1.3 高效高能等离子体释控试验技术

1. 功能

电热化学炮发射技术内弹道过程主要包括四个方面，即脉冲电源放电过程、等离子体形成过程、等离子体与发射装药的相互作用过程及等离子体与火药气体混合工质的膨胀过程，其中的等离子体形成过程和等离子体与发射装药的相互作用过程是两个新的非常重要的过程，也是最为复杂的两个过程。等离子体点火技术作为电热化学炮重要关键技术之一，起着承上启下和桥梁纽带作用，对该技术的研究涉及电源放电控制、等离子体与固体发射药的相互作用以及等离子体发生器本身结构参量变化等方面。因为在总储能不变时，相同电压不同能量以及相同能量不同电压（3~14kV）的脉冲电能，对同一离子体发生器结构，等离子体电爆炸的形成过程和机理也不尽相同。其产生的等离子体温度、压力分布是不一样的，而等离子体温度和压力是离子体点燃装药的两个最重要的参数。

高效高能等离子体释控试验装置用于高效高能等离子体发生器结构研究，以及等离子体点传火与脉冲电源储能之间的适配性研究。

高效高能等离子体释控试验装置通过电流与电压测试、等离子体的温度测试、等离子体负载电阻测试、压力测试等各种标志点传火性能的参数，判定其点传火性能的优劣性，筛选出适用的等离子体点传火结构。所以，为满足电能参数对等离子体发生器效率及形成的等离子体性能的影响规律研究需求。

2. 设备组成

该系统主要由等离子体试验装置、脉冲电源系统、等离子体射流温度测试系统、测压系统、等离子体点火管压力测试、高速分辨率摄像机等

组成。

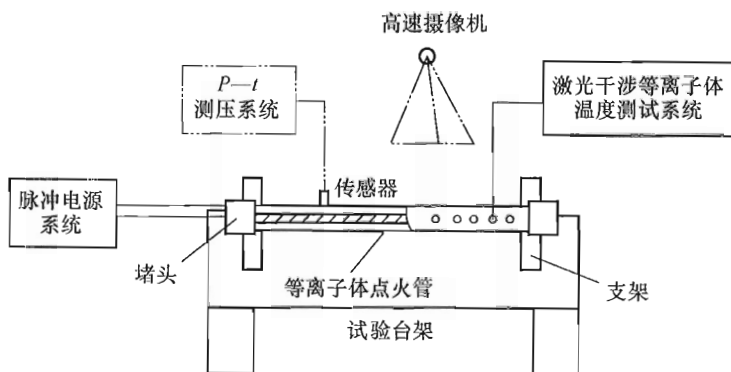


图 7-2 高效高能等离子体释控试验原理图

等离子体试验装置主要包括等离子体点火管、堵头、支架、实验台架。

(1) Phantom V9.0 型数字高速摄像机可适合于拍摄等离子体电爆炸的过程和形成机理要求。

(2) $P-t$ 测压系统包括压力传感器、压力标定机、电位隔离传输测压系统三部分。电位隔离传输测压系统是为满足高效高能等离子体释控试验中强电压、强电流的隔离，防止对电子仪器设备的破坏性，安全可靠地完成高效高能等离子体释控试验压力测试而配备的试验设备。

(3) 等离子体的温度测试系统采用激光干涉诊断出等离子体电子密度，通过计算获得等离子体电离度，再通过求解等离子体电离平衡 Saha 方程得到等离子体温度。

(4) 脉冲功率源系统主要由高频充电装置、脉冲成形网络模块、测试和控制装置、光纤时序触发控制系统、供电装置等组成。

3. 基本原理

工作时先把等离子体点传火管可靠固定在支架上，拧紧两端的堵头，再在后端堵头接入高功率脉冲电源。当脉冲电源放电时，等离子体点传火管内即产生高压、高温等离子体，等离子体从点传火管小孔流出。通过电流与电压测试、等离子体的温度测试、等离子体负载电阻测试、压力测试等各种标志点传火性能的参数，判定其点传火性能优劣性，筛选出适用的等离子体点传火结构。

4. 主要技术指标

(1) 等离子体点传火管耐压 $\geq 100\text{MPa}$ 。

(2) 试验台架结构紧凑，安全可靠。

7.1.4 模拟药室试验技术

1. 功能

模拟药室试验装置主要用于研究模拟火炮药室条件下起始弹道阶段的电热化学炮等离子体点传火结构与发射装药结构的适配性以及高装填密度装药情况下电热化学炮的装药安全性。

电热化学炮等离子体点传火结构与发射装药的适配性直接关系到装药结构的合理性和过程的安全性。理论和实验表明,装药结构的不合理会导致发射过程中膛压的骤然升高,甚至发生灾难性事故。而出现的现象往往发生在点火初期,即起始弹道阶段,对于高装填密度装药情况下的电热化学炮这个问题尤为重要。装药点燃的一致性和均匀性是装药结构合理安全的首要保证。电热化学炮模拟药室试验装置可对起始弹道阶段药床的点燃情况及运动状况进行详细的研究,从而为等离子体点火结构适配性以及装药结构的合理安全性问题提供技术依据。解决电热化学发射过程中点火阶段等离子体点火与装药结构适配性及点燃发射药效果等共性和通用技术问题。

2. 设备的设计原理

该装置通过以下技术途径来实现对电热化学炮起始弹道阶段的等离子体点传火结构与发射装药结构的适配性以及高装填情况下电热化学炮的装药安全性发射环境的模拟:

(1) 等离子体点传火结构与装药结构的适配性模拟。在高效高能等离子体点传火结构研究与等离子体点火条件下高能高装填密度装药燃烧规律的基础上,以模拟药室为手段,针对选定的等离子体发生器与高能高装填密度装药,采用真、假药混装方法,考虑不同脉冲电源储能方案,模拟电热化学炮火炮起始弹道过程中等离子体发生器与发射装药结构之间的相互作用规律。

(2) 装药安全性模拟。采用不同脉冲电源储能方案,当模拟药室内的发射装药被等离子体发生器点燃后,通过测试模拟药室内轴向和径向不同位置处的压力分布情况($P-t$ 曲线),根据压力的起始时间和幅值大小来判断点火的一致性和均匀性。

通过测量药室内药床轴向和径向不同位置处火药气体压力变化情况,并根据幅值大小与变化判断药床运动状况和挤压受力情况,为等离子点火结构与装药结构的合理性和安全性提供技术依据。

3. 设备组成及功能

该装置主要由模拟药室、底座、测压系统三大部分组成,如图7-3

所示。

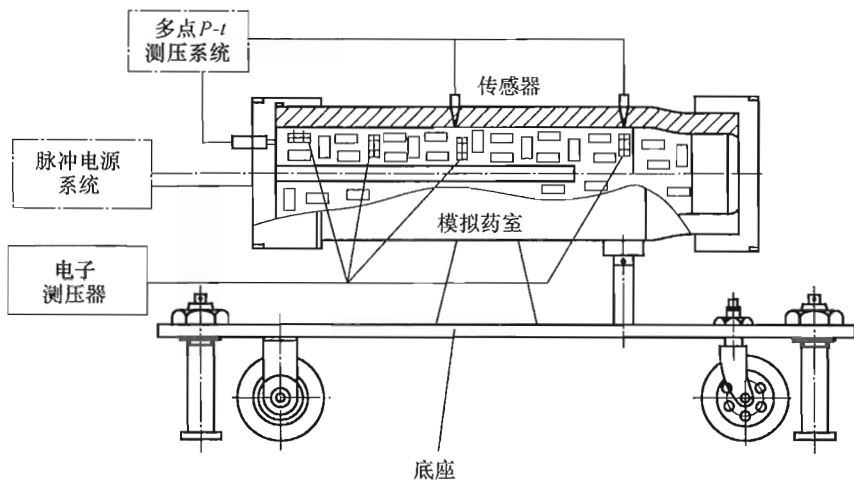


图 7-3 模拟药室试验装置原理图

- (1) 模拟药室主要包括药室本体和螺堵两部分，均由炮钢材料制成。
- (2) 底座主要包括钢板、支架、支撑轴、转轮。
- (3) 测压系统由传感器和电子测压器及数据采集系统三大部分组成。

4. 主要技术指标

- (1) 最大承压： $P_m \leq 120\text{MPa}$ 。
- (2) 容积： 16dm^3 模拟药室。
- (3) 测压孔：5 个。
- (4) 有过压保护机构。

7.1.5 装药终止燃烧试验技术

1. 功能

由于受到坦克炮总体性能和结构的限制，目前的制式装药在提高坦克炮威力方面已相当困难；同样，电源储能密度和体积的限制又使得在大口径火炮上实现电增强从而提高火炮威力方面面临困境。基于较小电能（0.1~3MJ）的等离子体点传火燃烧增强技术，其原理是将等离子体的点传火优势与超高装填密度的可控发射装药技术相结合，来达到较大幅度降低脉冲电源体积和提高火炮炮口动能的目的。这也是美国、德国和以色列等国近年来在大口径电热化学炮发射技术方面的主要研究方向。因此，世界各国均把研制新型高能高装填密度装药作为电热化学炮大幅度提高火炮威力的主要关键技术之一。而高能高装填密度装药的燃烧规律体现了新型装药在火炮中的能量释放规律，它直接影响到火炮的威力。因此可以看

出, 研究新型高能高装填密度装药的燃烧规律是电热化学炮内弹道研究的关键技术之一, 而大容积的装药终止燃烧装置则是研究新型高能高装填密度装药的燃烧规律和性能的主要手段。

新型高能高装填密度装药燃烧规律的研究一方面要通过加强系统设计、控制加工来保证; 另一方面必须通过大量的试验来检验和验证。靠实弹试验来验证和考核新型高能高装填密度装药的燃烧规律是不现实的, 也是不安全的。因此为满足研制需要, 建立新型高能高装填密度装药的燃烧规律终止燃烧装置, 采用模拟试验方式对大口径火炮密实装药燃烧的中间状态参量进行定量分析。研究高能高装填密度装药的燃烧性能与规律, 其研究结果为新型高能高装填密度装药内弹道设计与研究提供技术参考, 并为电热化学炮高能高装填密度装药结构设计提供技术支撑。

2. 设备的设计原理

试验时, 装药在主体内经等离子体点燃后进行燃烧, 当压力达到所选定的剪切片强度时, 剪切片破裂, 主体内压力骤降, 燃烧中止, 装药经剪切口外喷进入回收器, 通过对终止燃烧后火药的质量、外型分析, 确定装药在 $10 \sim 100\text{MPa}$ 不同压力下的燃烧中间状态及燃烧规律。

在设计中, 通过以下方法来解决这个问题: 终止燃烧压力的控制可根据剪切片的强度来控制终止燃烧压力。装药的回收其技术难点在装药回收的完整性和真实性, 可采用防火型软纤维填充材料的回收装置来完成。

3. 设备组成及功能

装置主要由本体、回收器、液压缓冲器、试验台架等组成, 如图 7-4 所示。

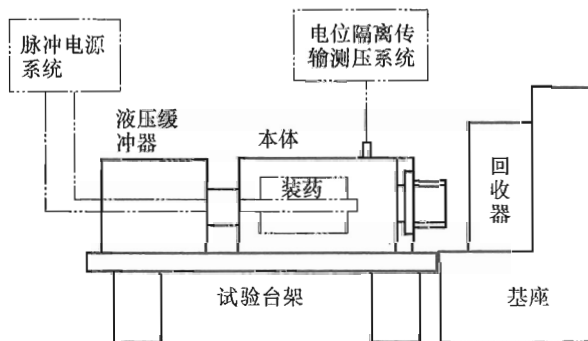


图 7-4 终止燃烧装置系统原理图

本体为终止燃烧的核心部位, 其功能为研究控制装药的燃烧进程, 包

括钢质药室和堵头、铝剪切片。回收器为终止燃烧后外喷装药的收集器，由钢质框板和水泥基座组成。液压缓冲器主要用于减小后坐力。试验台架又主要起支承作用，由钢质滑轨和水泥基座组成。

4. 主要技术指标

- (1) 本体内径：70mm。
- (2) 容积：700mL。
- (3) 终止压力：10 ~ 100MPa。
- (4) 剪切压力由非点火端面剪切片强度来控制。
- (5) 本体侧面有测量 $P-t$ 的测压孔。

7.1.6 内弹道综合试验装置试验技术

1. 功能

电热化学炮是利用脉冲电源放电产生高温等离子体与固体发射药相互作用，来达到控制固体发射药能量释放和弥补固体发射药能量不足，进而达到提高弹丸炮口初速的目的。在实验室突破高效高能等离子体点火释控技术、高能高装填密度火药燃烧控制技术、等离子体点传火与装药结构适配性技术的基础上，需要在野外靶场实际射击状态下对电热化学炮的内弹道性能进行综合试验验证。内弹道综合试验装置正是为检验电热化学炮内弹道和装药结构方案设计及提高等离子体点火效率和点火性能，为电热化学炮的发射过程等离子体点传火结构与装药结构的适配性和安全性以及检测电热化学炮在提高火炮威力的优势方面提供的的一个试验和检测平台，它是电热化学炮技术内弹道综合性能试验研究的必备手段。

由于电热化学炮的等离子体点火方式取代了常规点火方式，使火炮门体结构增加了适应高电压强电流的电能输入结构，同时，由于电热化学弹道炮炮口动能的提高，还需对火炮身管、反后坐结构及复进机构提出新的设计要求，以适应电热化学炮内弹道性能试验的需要。

把提高火炮威力作为其主要优势的电热化学炮将采用高密实装药和时序放电的等离子点传火形式。因此，电热化学炮的火炮结构、点传火过程、火药装填状态、火药能量释放规律、膛内气体压力生成和分布规律以及火炮弹丸受力状态等方面均有别于传统的火炮发射装置和内弹道过程。

2. 设备的设计原理

内弹道综合试验装置其原理是用脉冲电源的强电产生的高温等离子点燃药室内的发射药，发射药燃烧产生火药气体，并推动弹丸运动。通过测量电热化学炮发射过程中膛内不同位置处的压力、弹带挤进阻力、后坐阻

力、弹丸加速度、身管应力、弹丸初速等参数，检验和验证电热化学炮等离子体点火与装药结构设计的合理性，以及内弹道性能的稳定性。内弹道试验装置原理如图 7-5 所示。

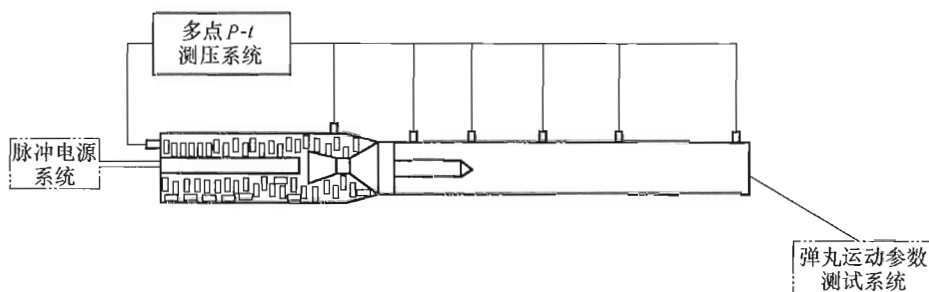


图 7-5 内弹道综合试验原理图

3. 设备组成及功能

该套装置主要由发射装置、反后坐装置、炮尾炮门、下架四大部分组成，如图 7-6 所示。

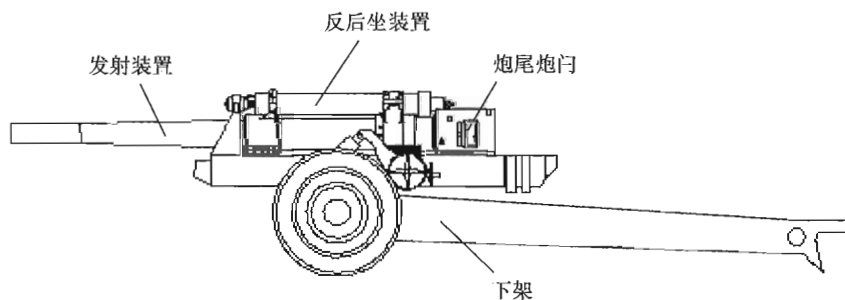


图 7-6 内弹道综合试验装置组成

(1) 炮架可承受 670MPa 的膛压及 15MJ 炮口动能的发射要求。

(2) 发射装置用于完成电热化学炮发射循环过程及检测等离子体点火结构与装药结构的适配性和安全性以及内弹道性能。

(3) 炮尾和门体结构能够适应内弹道试验装置自动开关门和电能输入的要求。

4. 主要技术指标

(1) 发射装置：

- ①口径为 125mm；
- ②长度为 7m 的身管；
- ③最大承压为 670MPa；
- ④身管上有 7~10 个 $P-t$ 测压孔。

(2) 炮尾、炮门:

①最大承受力为 670MPa;

②实现电源和身管的衔接。

(3) 反后坐装置:最大承受后坐力 120t。

7.2 电热化学炮测控技术

由于电热化学炮发射过程的复杂性、瞬态性和特殊性,其发射过程中所需的大量参数只能依靠实验手段获取,有些内弹道参数只有通过一定的实验手段才能得到。这就为电热化学炮实验测控技术提出了新的要求,就目前来说电热化学炮测试技术主要包括电热化学炮多点 $P-t$ 测试与控制技术、高速电参数(电流、电压)测试与控制技术、等离子体温度测量与控制技术。

7.2.1 电热化学炮多点 $P-t$ 测试与控制技术

1. 概述

在电热发射系统中,火药气体压力变化规律是研究火炮内弹道性能、发射装药燃烧规律及弹丸运动规律的重要技术依据。试验中测试得到的不同位置处的 $P-t$ 曲线是分析火炮内弹道性能变化规律的重要参考依据之一。火药气体压力与装药燃烧的变化过程是研究火炮内弹道性能、火药装药合理性及发射药性能的重要参考,它对装药结构的研究起着重要的指导作用,并直接影响着不同弹种的弹道各项性能指标,也是不同温度条件下弹道性能试验中的一个重要安全性指标。

电热发射实验系统主要包括脉冲功率源(ETC)、火炮、数据采集系统、接地系统、电源、放大器及传输线等。由于存在高电压、大电流的脉冲放电过程,输出脉冲具有极高的能量密度,发射系统形成了大型电磁干扰源。脉冲功率越高,电磁干扰越严重,测试环境越恶劣。大功率脉冲放电过程使电磁发射环境下弹道参数的测量工作复杂化,特别是在负载金属丝猛烈电爆炸时,由于 di/dt 极高,电磁干扰尤其严重。由于发射系统、测试系统装置庞大,传输线存在自感和互感,在脉冲电流很高时,脉冲功率源、火炮及数据采集系统之间会出现较大的电位差。在火炮和测试系统之间,测试信号很难做到等电位传输,若不采取一定的抗干扰措施及隔离措施,用传统测压系统测量火炮膛内火药气体压力,高压放电时的电磁干扰和电位浮动会影响测试的正常进行,甚至危及仪器和人身安全。这是大

功率脉冲源环境下的测量与常规弹道测试环境的根本不同之处。针对以上问题，必须采用电位隔离或光电隔离系统才能达到不同电位之间的物理隔离。通过隔离电路、信号放大及滤波电路，实现同步测量负载的脉冲电压、脉冲电流及火炮多点 $P-t$ 曲线。其测试原理如图 7-7 所示。

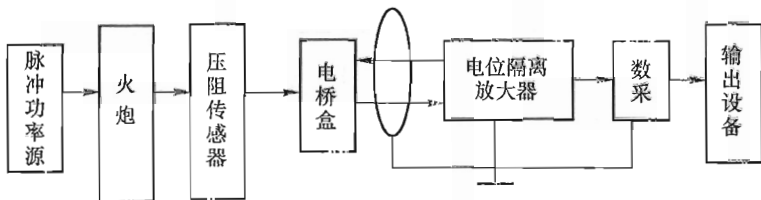


图 7-7 $P-t$ 测试原理图

2. 电热化学炮 $P-t$ 测试的关键技术

电位隔离放大器是实现电热化学炮 $P-t$ 测试的关键所在，它必须满足对电热化学炮负载的脉冲电压、脉冲电流及多点膛压曲线同步测量。

(1) 电位隔离放大器技术要求。

- ①与测量负载电压和电流探头、压力传感器适配。
- ②放大器的线性误差： $\leq 3\%$ 。
- ③稳定性误差： $\leq 5\%$ 。
- ④信噪比： $\geq 70\text{dB}$ 。
- ⑤电压隔离度： $\geq 3000\text{V}$ 。

(2) 电位隔离放大器的设计原理。

①压力测试放大器原理如图 7-8 所示。该测试放大器主要由压力—电信号转换电路、前置级电路及后置级放大电路组成。

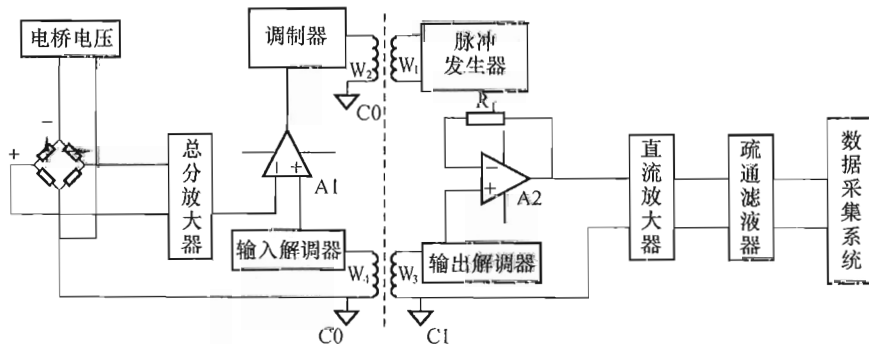


图 7-8 压力测试电路

②采用电桥和宽频带直流放大器的总体方案可以改善动态和静态特性，同时满足宽频带测试和静态标定的双重要求。

③前置级采用差动输入放大电路与隔离传输电路方案,既可高精度地传输信号,又能实现测试对象与测试系统电气上的隔离。

④后置级由增益可调的直流放大电路、滤波器组成。

⑤测压放大器的总增益由前置级和后置级相乘实现。由于前置级的性能指标对整体至关重要,因此,前置级应比后置级具有更高的增益。

⑥测压放大器的各级均采用功率带宽指标较高的集成电路。因此,放大器整体的最大通频带主要取决于前置级的传递函数和低通滤波器的截止频率。

(3) 电位隔离放大器组成及功能。

①压力信号转换电路。压力—电信号转换电路包括压力传感器和电桥。当火药气体压力作用于压力传感器时,其电阻值将随着压力的变化而变化,测试电桥的作用是将电阻的变化转换为电压(或电流)的变化。该桥源由三端稳压器构成,其值可根据所选压阻元件的灵敏度需求进行调节。

②前置放大电路。前置放大电路由高性能的差分放大器和隔离传输电路组成。考虑到前置级的公共端处于浮动电位,前置放大器选用特殊的具有高共模输入电压、高共模抑制比和低噪声的运算放大器。

③后置放大电路。增益可调直流放大电路,由放大电路对前级电路的信号进行放大。

低通滤波器,信号调理电路在满足被测信号高频分量的前提下,应尽量减小带宽,以提高测试系统的信噪比。为获得较平坦的幅频特性和较高的衰减特性,选用集成化电容滤波器件。该芯片内含八阶巴特沃斯低通滤波器,在时钟脉冲的控制下,可方便地实现对低通滤波器截止频率的设置。

7.2.2 高速电参数(电流、电压)测试与控制技术

1. 功能

高速电参数综合测试系统主要用于放电过程中对负载电参数变化过程的测试。

2. 高速电参数测试放大电路设计

测试系统主要由脉冲高压分压器、脉冲电流互感器、前级放大电路、隔离传输电路及低通滤波器组成。

由于在脉冲电压、电流的测试电路中,会产生较高的共模电压,因此,前级放大电路选用具有高共模抑制比、高工作电压的集成运放电路。

变压器耦合的隔离传输电路及巴特沃斯低通滤波器的性能与压力测试放大器的性能相同。

3. 测试系统组成

高速电参数综合测试系统包括高压探头、自积分 Rogowski 线圈、电位隔离放大器、高速记录仪等。其中，高速记录仪主要用于负载放电参数采集、处理，高压探头主要用于负载放电电压测量，自积分 Rogowski 线圈主要用于负载放电电流测量。测试原理如图 7-9 所示。

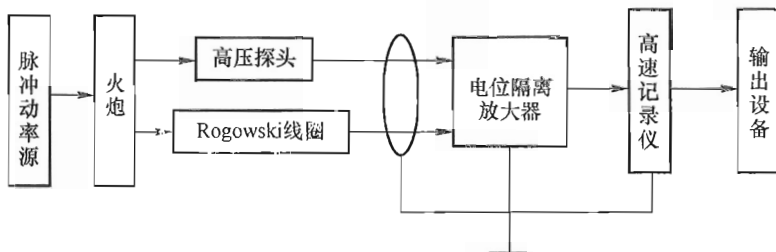


图 7-9 测试原理图

7.2.3 等离子体温度测量与控制技术

等离子体点火技术作为电热化学炮的关键技术之一，起着承上启下和桥梁纽带作用，对该技术的研究涉及电源放电控制、等离子体与固体发射药的相互作用以及等离子体发生器本身结构参量变化等方面。因为在总储能不变时，相同电压不同能量以及相同能量不同电压（3~14kV）的脉冲电能，对同一离子体发生器结构、等离子体电爆炸的形成过程和机理也不尽相同，产生的等离子体密度及压力分布都是不一样的。而等离子体的温度是等离子体点燃装药的重要性能参数。试验发现等离子体电增强存在放电电增强和放电后效期电增强两种模式，并且发现放电电增强幅度直接受控于输入电能的功率波形；而放电后效期电增强效应、幅度与被测火药呈现出明显的选择性依赖关系，且与前期的放电功率有关。研究表明，合理的电能注入可使增加装药的弹道效率在超高速条件下超过 25%，远高于超高速条件下弹道效率预计值 15%。所以在研究过程中需要建立必要的模拟试验装置，通过对各种标志点传火性能参数（电流与电压、等离子体温度、等离子体负载电阻、压力等）的测试，摸清在相同电压不同能量、相同能量不同电压的情况下等离子体的释放情况，以研究和掌握电能参数对等离子体发生器的效率及性能影响规律，判定其点传火性能的优劣性，筛选出适用的等离子体点传火结构。

高效高能等离子体释控试验装置的试验原理如图 7-10 所示。等离子体温度测试系统如图 7-11 所示，整个六通道瞬态光学高温计系统由高温计主体、特制传光光纤、采光光纤、示波器和校准系统组成。

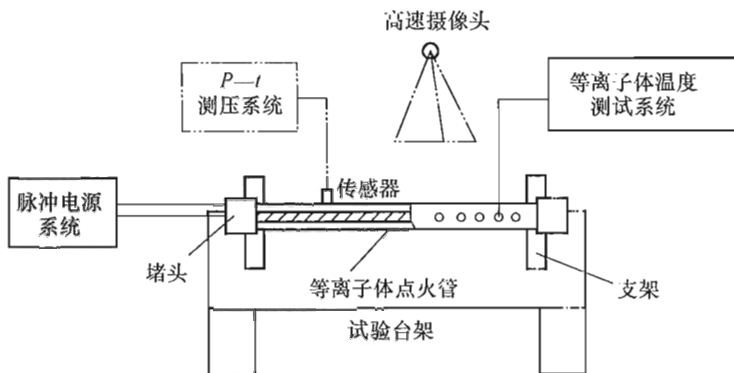


图 7-10 高效高能等离子体释控试验原理图

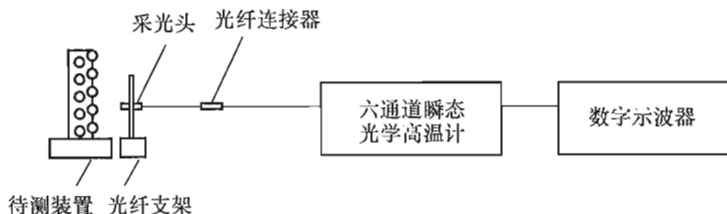


图 7-11 等离子体温度测量系统

该套装置拟通过以下技术途径来实现对高效高能等离子体释控技术模拟。其原理为先把等离子体点传火管可靠固定在支架上，放入等离子体发生器后，拧紧两端的堵头，再在后端堵头接入高功率脉冲电源。当脉冲电源放电时，等离子体点传火管内即产生高压、高温等离子体，等离子体从点传火管小孔流出。通过电流与电压测试、等离子体的温度测试、等离子体负载电阻测试，得到各种标志等离子体点传火性参数的参数，判定其点传火性能优劣性。

六通道光学高温计是以普朗克热辐射理论为基础，将待测光源的辐亮度与标准光源的辐亮度进行比较，从而测得待测光源的温度。

图 7-12 和图 7-13 分别为等离子体温度测试系统相应的仪器设备。

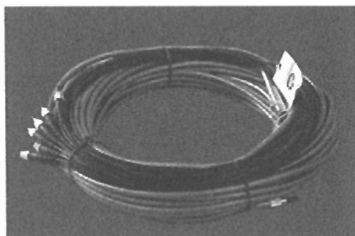
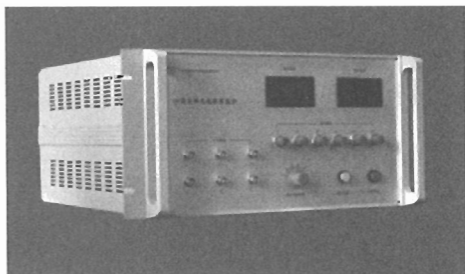


图 7-12 高温计及配套光纤照片

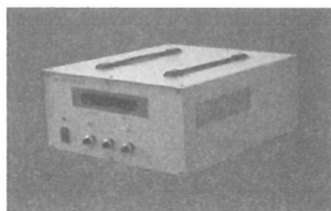
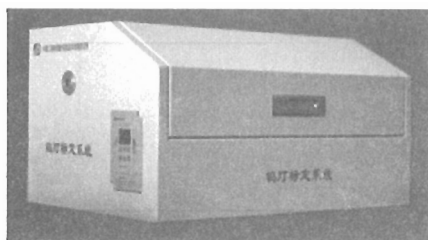


图 7-13 钨灯标定系统及高稳定度恒流源照片

对于发射率为 ε 的灰体光源，其辐亮度由普朗克公式给出：

$$j(\lambda, T) = \varepsilon J(\lambda, T) \quad (7-1)$$

式中 $J(\lambda, T)$ —— $\varepsilon = 1$ 、温度为 T 时的绝对黑体辐射亮度。

$$J(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} [e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1]^{-1} \quad (7-2)$$

对于实际测量而言，测量量是 λ_i 和 $j_i(\lambda_i)$ ，考虑到实验测量误差 v_i ，则式 (7-1) 为：

$$v_i = \varepsilon J(\lambda_i, T) - j_i(\lambda_i) \quad (7-3)$$

$$v^2 = \sum_{i=1}^6 [\varepsilon J(\lambda_i, T) - j_i(\lambda_i)]^2 \quad (7-4)$$

根据最小二乘法原理，就是从式 (7-4) 求出满足满足 v^2 取最小值的 ε 和 T 。

不难推导出，满足条件的 ε 和 T 可由下式求出：

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon(T) = \frac{\sum_{i=1}^6 j_i(\lambda_i, T) J(\lambda_i, T)}{\sum_{i=1}^6 J^2(\lambda_i, T)} \\ \frac{\sum_{i=1}^6 j_i(\lambda_i, T) J(\lambda_i, T)}{\sum_{i=1}^6 J^2(\lambda_i, T)} = \frac{\sum_{i=1}^6 j_i(\lambda_i, T) J^2(\lambda_i, T) \lambda_i^4 e^{\frac{C_2}{\lambda_i T}}}{\sum_{i=1}^6 J^3(\lambda_i, T) \lambda_i^4 e^{\frac{C_2}{\lambda_i T}}} \end{array} \right. \quad (7-5)$$

六通道光学高温计各通道实测的辐亮度与示波器给出的信号幅度成正比，可由下式给出：

$$j_i(\lambda_i, T) = \alpha(\lambda_i) V_i \quad (7-6)$$

式中 $\alpha(\lambda_i)$ —— 波长为 λ_i 的通道的系统常数，它由标定给出；

V_i —— 示波器记录的信号幅度值。

通过式 (7-6) 计算出通道实测的辐亮度后代入式 (7-5)，可以借

助计算机求出 ε 和 T 。

试验测试的等离子体放电温度变化曲线如图 7-14 所示。

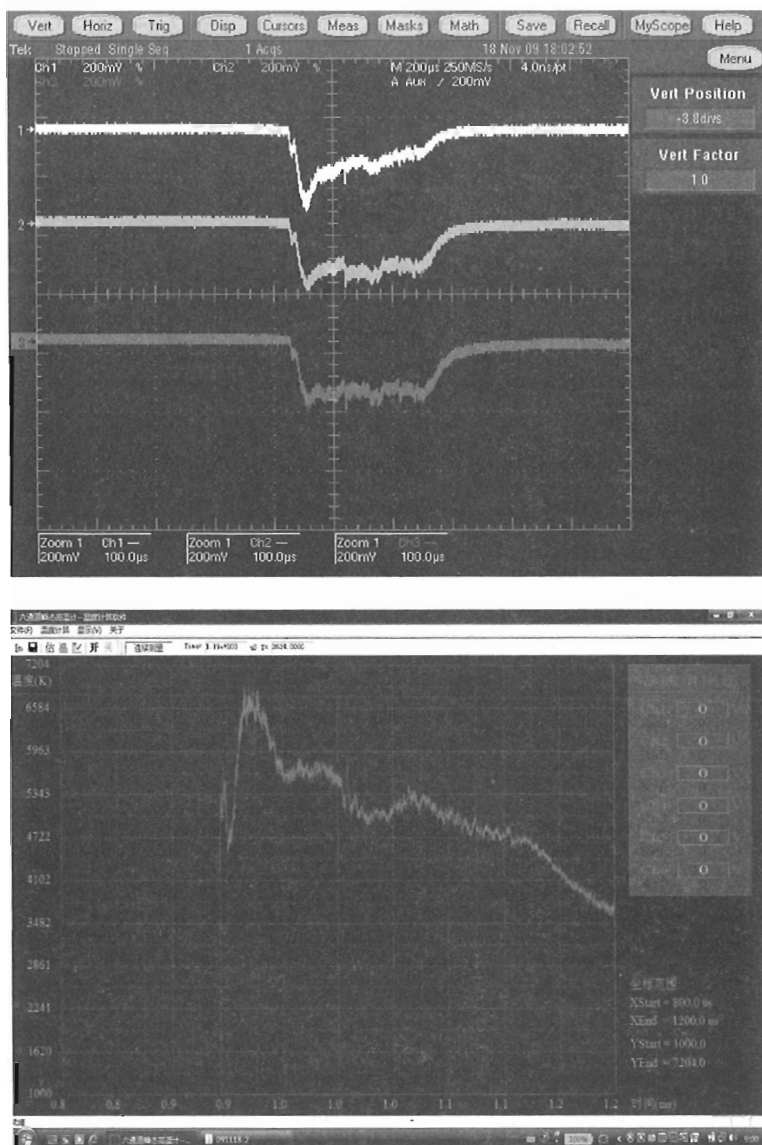


图 7-14 等离子体放电温度变化曲线

第8章 电热化学炮技术 应用前景与展望

8.1 电热化学炮与常规火炮技术比较

电热电磁炮以其新的原理与能够获得良好而诱人的弹道性能,得到了发达国家军方与科研机构的重视和青睐,是西方发达国家国防技术近20年来重点发展和投资的重点领域,从正常发表和公布的科技文献资料来看,西方发达国家在电热电磁发射技术方面已取得非常突出而有明显的进步和研究成果^[67-71]。国内受此牵引和影响下,也开展了大量研究工作,取得了较快进步,获得了一批阶段性科研成果^[72-74]。常规发射技术作为具有600多年发展历史的技术,而今仍然是火炮武器系统平台发射的核心技术和发射源泉,是现代火炮武器系统研制的重要依托与支撑,是对敌方实施打击与部队有效完成作战任务的重要依赖,在武器系统发展与研制中占有十分重要的地位。笔者致在从技术角度对比分析电热电磁炮与常规火炮发射技术的优与劣、长与短、难与易,存在的技术问题,拟采取的措施,进而分析发展电热电磁炮与常规火炮的辩证关系,基本理清各自的界面与定位,最终为科学开展各项研究提供基本思路与参考。

常规火炮至今已有600多年的发展历史,这期间随着火药能量与火炮身管材料性能的不断提高以及弹道与弹药技术的不断进步,使得常规火炮的弹道性能取得了非常显著的提高。例如:火炮射程由早先的几百米到现在的50km左右;火炮初速由每秒几十米提高到1800m/s左右;火炮可承受的膛压由几十兆帕提高到五六百兆帕。此外,火炮的射速、射击精度与准确度也达到了很高的水平。尽管常规火炮取得了非常突出的进步,但是由于自身存在的难以克服的诸如火药气体分子量比较大、身管寿命及其材料强度具有一定限制等技术难题,使得进一步提高火炮初速与射程存在明显的障碍。

近二三十年来,为了获得更高的初速与更远的射程,世界发达国家纷纷针对基于电热与电磁发射原理的火炮发射技术进行了广泛深入的研究,

取得了较快的进步与引人入胜的科研成就,例如采用电热轻气炮技术实现了轻质弹丸(弹丸质量几克到几十克)的超高速发射,初速达到 7km/s 以上;采用电热化学炮技术使得小口径火炮弹丸质量 100g 左右实现初速 2300m/s 以上;采用电磁轨道发射技术使得 3.15kg 弹丸质量初速达到 2520m/s ,等等。尽管电热电磁发射技术与常规火炮相比在实现高初速方面具有明显的优势,但是由于各自发射原理的不同以及新概念发射技术现状存在急需解决的技术问题,需要进一步分析常规火炮发射原理与电热电磁发射原理特点与不同,界定各自存在的关键技术,为科学制定各自的研究思路与方向,提供一定借鉴与帮助。

8.1.1 电热炮、电磁炮及常规火炮发射过程基本原理

常规火炮发射过程主要以火炮身管为约束条件,依靠发射装药燃烧释放高温高压火药气体,推动弹丸加速运动,并最终在火炮炮口实现最大速度。

电热发射原理通常分为纯电热炮、电热轻气炮及电热化学炮。其中纯电热炮与电热轻气炮发射主要依靠释放大功率电能,激发高分子材料与轻质气体,形成高温高压等离子体,进而推动小质量弹丸实现超高速发射。而电热化学炮主要依靠释放电能,借助于等离子体发生器产生高温等离子体,进而点燃固体发射装药或液体发射装药,形成高温高压火药气体与部分等离子体混合,实现弹丸沿身管加速运动。

电磁炮发射技术可分为电磁轨道炮与电磁线圈炮。电磁轨道炮发射原理主要依靠轨道上的大电流产生的磁场与通过位于轨道之间电枢上的电流相互作用产生的洛伦兹力,推动电枢与弹丸加速运动。电磁线圈炮发射主要靠驱动线圈产生强磁场,该磁场在被动线圈上产生感生电流,并产生相应的磁场,两个磁场相互作用加速弹丸运动。

上述叙述可以看出,常规火炮依靠火药化学能完成发射,电热炮依靠电能转化的等离子体能或等离子体能与火药化学能相结合实现发射,而电磁炮则依靠纯电能转化的电磁能实现弹丸加速。因此三者之间发射原理存在本质区别。

8.1.2 电热炮、电磁炮及常规火炮基本组成

根据上述基本原理,电热炮一般由脉冲电源、等离子体发生器、装药结构或高分子材料、火炮身管结构及弹丸等组成,具体如图8-1所示。

电磁炮主要由脉冲电源、轨道或线圈、电枢与弹丸等组成,如图8-2、图8-3所示。

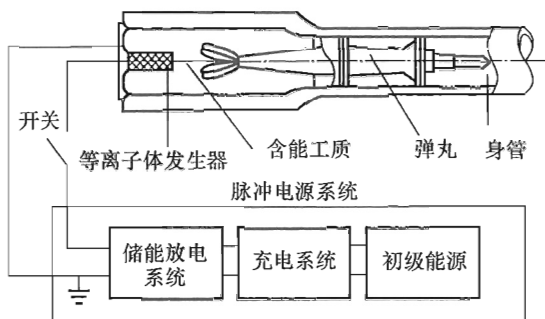


图 8-1 电热炮基本组成示意图

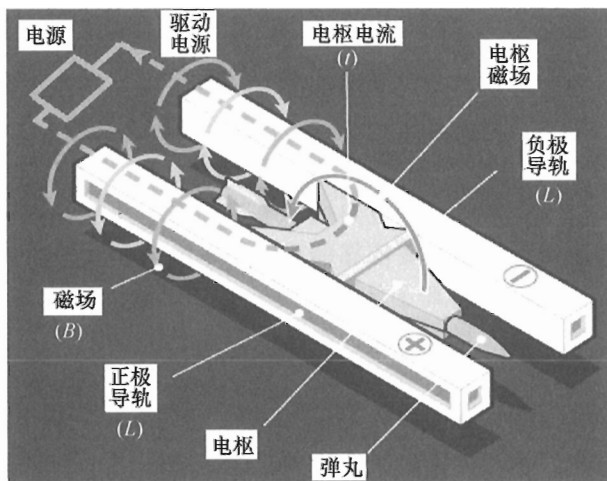


图 8-2 电磁轨道炮组成示意图

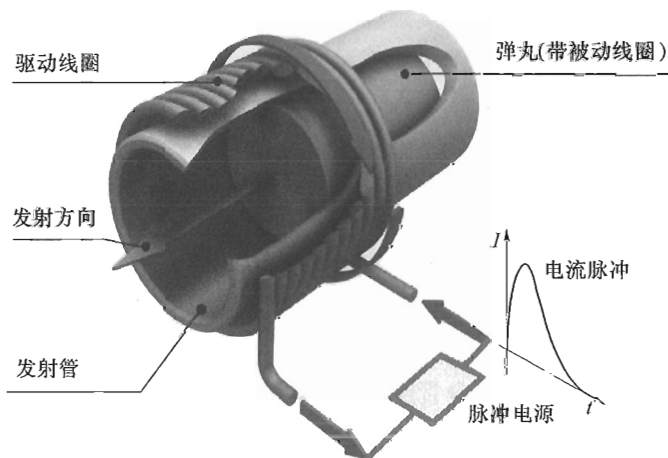


图 8-3 电磁线圈炮组成示意图

常规火炮主要由火炮身管、发射装药、点传火系统、弹丸等组成，如图 8-4 所示。

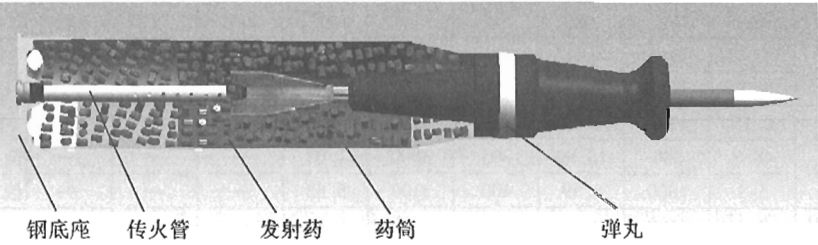


图 8-4 常规火炮基本组成示意图

由基本组成来看，电热炮、电磁炮与常规火炮主要区别如表 8-1 所示。

表 8-1 常规火炮与电热炮、电磁炮组成比较

火炮种类	身管	弹丸	发射能源	点火方式
常规火炮	材料为炮钢	金属弹体 (带弹带)	发射装药 化学能	底火 底火 + 点火药包 底火 + 中心传火管
电热炮	材料为炮钢	金属弹体 (带弹带)	高分子材料 轻质气体 固体发射装药 液体发射装药 膏体发射装药 电能 + 化学能	等离子体发生器
电磁炮	轨道或线圈 材料为金属铜	铝制或铝合金 电枢 + 弹丸	纯电能	无

8.1.3 电热炮、电磁炮及常规火炮弹道性能基本特点

由表 8-1 可以看出，常规火炮以化学能为主，电热炮在化学能的基础上利用部分电能，而电磁炮则利用纯电能。从发射平台上来说，电热炮与常规火炮基本一致，只是增加了脉冲电源系统和等离子体点火系统取代了常规点传火系统，而电磁炮由于发射原理的不同则与常规火炮具有明显的区别，炮钢为材料的身管变为金属铜为主要材料的轨道或线圈，脉冲电源能量取代了化学能。弹丸发射过程中所呈现的弹道性能对比如表 8-2 所示^[75-77]。

表 8-2 电热炮、电磁炮与常规火炮弹道性能对比

项目	弹丸质量/kg	初速/(m/s)	炮口动能/MJ	膛压/MPa	温度/K	最大加速度/ 10^4g	最大电流/kA	最大电压/kV	所需电源能量/MJ	国别
电热炮	0.072	2166	0.242	456	3000	21.2	82	2~3.5	0.16	中国
	8.4	1822	13.94	670	3100	7.5	12.5	5~15	0.11	德国
常规火炮	0.55	1175	0.38	330	3100	5.1	—	—	—	中国
	48.8	880	18.90	303	3000	1.03	—	—	—	俄罗斯
	5.3	1800	8.59	400	3100	5.62	—	—	—	俄罗斯
电磁轨道炮	2.4	2600	8.11	—	—	—	—	—	5~100	美国
	1.85	3300	10.1	—	—	—	—	—		
电磁线圈炮	5.0	1000	2.5	—	—	—	—	—	10~50	美国
	1.125	4000	9.0	—	—	—	—	—		

从炮口动能对比来看,电磁炮已达到与常规火炮相当的水平,且炮口初速实现超高速发射,此外从原理上讲电磁炮弹丸过载可以控制在较低的范围,这样有利于弹体其他零部件设计。但是由于电磁炮电能转换效率目前只能达到 10% 左右,同样炮口动能条件下所需的初始电能非常大,可能达到 100MJ 以上,且当前脉冲电源整体储能密度仅为 $2 \sim 3\text{MJ/m}^3$,远远小于固体发射药含能密度 9000MJ/m^3 。因此,利用纯电能的电磁炮技术应用于陆军自行火炮与牵引火炮,有脉冲电源体积和质量带来的问题,将直接影响武器系统作战机动性。另外,为满足火炮射速要求尚需要 GW 级以上的发电设备以及相应的高频充电设备等。可能的话电磁炮将优先应用于大型水面舰艇与陆上要地或固定防御阵地。

电热炮与电磁炮相比所需电能要小得多,近几年的研究表明对于大口径火炮(100mm 以上),为实现良好的弹道性能所需的初始电能可在 $0.3 \sim 0.5\text{MJ}$ 范围即可。试验证明,电热化学炮在内弹道一致性、温度补偿性能、显著提高火炮初速(针对小口径火炮)及提高炮口动能、确保装药安全性等方面与常规火炮相比具有明显的优势。其中内弹道一致性主要意义表现在:①能够提高武器系统射击精度;②有利于提高武器系统首发命中率,特别是对于歼灭运动目标;③有利于火控系统弹道解算。例如,对于敌方运动目标速度在 $10 \sim 100\text{km/h}$ 变化,我方火炮内弹道一致性在 $10 \sim 30\text{ms}$ 间跳动变化,则敌方目标位移量在 $27.78 \sim 833.4\text{mm}$ 间变化,如图 8-5 所示。因此,内弹道一致性对于歼灭目标具有重要影响。

常规火炮尽管发展历史悠久,火炮初速进步提高几乎已到极限,但是随着近年来新的高能高密度发射药与变燃速发射药研制以及密实装药与新型高强度炮钢材料的研究,为进一步提高常规火炮弹道性能提供一定的前景。

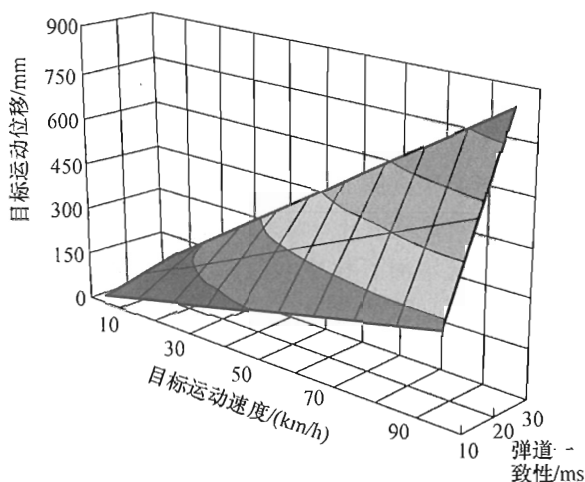


图 8-5 目标运动位移、速度与弹道·致性关系

由表 8-3 可以看出,美国近年来,为了进一步提高常规火炮弹道性能,适应电热化学炮技术发展需求,相继开发研究了超高能量发射药与低分子量发射药,对于进一步提高火炮弹道性能奠定了基本基础。此外,法国与德国分别开展了基于 NENA 基的高能层状发射药与 EI、EI+、EI++ 发射药研制工作,现有火炮弹道性能得到进一步改善与提高。

表 8-3 美国新型发射药性能参数

发射药名称	火药力 /(J/g)	爆温 /K	气体 分子量	备注
高能层状发射药 (快燃速)	1314	3432		燃速比 2.7 : 1
高能层状发射药 (慢燃速)	1254	3224		
乙基 NENA (15%) + DADNH (85%)	1452	3484	19.95	
TNAZ (40%) + DANPE (60%)	1439	3490	20.16	火药力大 于 1400J/g
RDX (55%) + DANPE (45%)	1425	3497	20.40	
CL-20 (40%) + DANPE (60)	1419	3525	20.67	
甲基 NENA (20%) + AND (22%) + TAGAZ (58%)	1273	2746	17.04	分子量 小于 18
AND (33%) + TAGAZ (67%)	1298	2707	17.02	
黏合剂 (25%) DADNH (50%) + DATH (25%)	1452	3667		超高能量 发射药
黏合剂 (25%) + DADNH (40%) + DATN (35%)	1498	3908		

8.1.4 电热炮、电磁炮及常规火炮弹道过程技术问题

电热炮与常规火炮相比对于小口径火炮与轻质弹丸,基于工质低分子量与相对于炮口动能大幅度增加电能的发射原理能够实现高速和超高速发射,其弹道过程除仍然产生高膛压、高温气态或等离子态工质及弹丸需承受很大的高过载外,具有伴随几十千安强电流与几千伏到十几千伏高电压放电过程发生,火炮系统增加了脉冲电源系统。对武器系统的电磁兼容性能将带来一定影响,此外,脉冲电源对武器系统的总体质量与体积带来了一定影响。但与电磁炮相比该脉冲电源储能是电磁炮的几百倍到上千倍分之一。其主要技术问题有:

- (1) 脉冲电源小型化;
- (2) 等离子体发生器电能转换效率;
- (3) 等离子体点传火与新型发射装药适配性;
- (4) 炮尾快速大功率输电结构;
- (5) 脉冲电源与火炮总体适配性与适应性等。

电磁炮由于其电流与电压波形的控制与火药燃烧相比更具有可控性和可实现性,使得弹丸加速运动更为均衡,直观与实践上弹丸能够获得超高速发射,但与常规火炮相比,尽管没有了高压高温火药气体的恶劣做功环境,但其做功条件转化为高电压(十千伏到几十千伏)与超高电流(几百千安到兆安级),加之电枢与弹丸的高速运动,使得轨道炮与线圈炮产生如下技术问题:

- (1) 轨道与高速运动电枢的紧密接触;
- (2) 轨道烧蚀的可控性与可预测性(与常规火炮相比);
- (3) 轨道结构与放电机构优化设计;
- (4) 轨道与电枢结构、材料技术;
- (5) 线圈布置与放电机构优化设计;
- (6) 主动线圈与被动线圈结构优化设计;
- (7) 脉冲电源技术等。

常规火炮已发展了600多年,发展至今其弹道过程特点呈现高温高压脉冲型特点,进一步提高火炮弹道性能,对于内弹道与装药技术来讲,面临着提高发射药能量、控制火药燃速、增加火药气体做功面积,最终实现火炮初速与射程、射高的增加。其主要技术问题如下:

- (1) 进一步提高火炮初速;
- (2) 降低火炮烧蚀,提高身管寿命;
- (3) 降低火炮弹道温度敏感性;

- (4) 提高装药安全性与工作可靠性;
- (5) 新型高能燃速可控型发射药等。

8.1.5 电热炮、电磁炮及常规火炮发射技术发展的意义

电热炮与电磁炮发射原理同常规火炮相比具有很大的区别,是大幅度提高火炮初速、实现火炮炮口动能提高的重要技术途径,是常规火炮发射技术创新的重点方向与领域。通过发展与研究电热化学炮与电磁炮技术,首先能够实现火炮武器系统的整体作战性能提高,即扩大高炮防空区域,增加压制火炮纵深防御与打击火力,提高直射武器穿甲威力与有效射程。再此能够为进一步推动常规火炮发射技术创新发展提供思路、方向及借鉴。第三能够引领诸如电源、材料、控制、电磁兼容及弹药等相关技术的创新与发展。

8.2 前景与展望

近年来,基于电热化学炮技术在提高火炮弹道性能方面以其自身明显的优势,受到了军方和科技工作者的青睐。但是电热化学炮由于自身增加了脉冲电源系统及其弹道过程中高电压强电流放电过程的特殊性,使其应用于自行火炮,必须解决其相关技术难题。本节根据这一思路旨在结合技术现状和发展趋势,分析脉冲电源、内弹道、装药结构及等离子体发生器等技术研究情况,为电热化学炮技术应用于自行火炮提供了技术参考。

电热化学炮技术历经几十年的研究,取得了非常显著的成绩,先后在各类口径弹道炮上实现了弹道发射过程,提高和改善了火炮弹道性能,推动了脉冲电源、等离子体发生器、高能发射药、内弹道及装药结构、测试与控制等方面技术的进步和发展。电热化学炮的主要优势在于:电热化学炮能够针对高装填密度发射药提供可靠点火,其精确一致点火能够改善火炮火力控制,具有温度补偿能力以及对难以点火的发射药具备强点火性能。这些技术特点应用于不同火炮,一方面可以提高火炮初速,另一方面有利于提高火炮射击精度,其中提高火炮初速无论在小口径,还是中口径和大口径火炮均得到了验证^[68-72]。鉴于电热化学炮技术研究取得的可喜进展,近十多年来,世界发达国家为将电热化学炮技术应用于自行火炮进行了大量的研究^[73,74]。电热化学炮与常规火炮相比,在带来增加炮口速度和提高自行火炮射击精度益处的同时,也带来了复杂因素的影响,尤其对自行火炮来说更为突出,主要体现在:①增加了脉冲电源,无论质量还是

体积均为主要影响因素；②等离子体发生器专用击发电极既要满足电热发射需要，也要满足常规弹药发射需求；③电热发射的强电流高电压放电过程引起的强磁场效应，将对自行火炮内部空间内电磁兼容带来新的干扰因素；④脉冲电源工作可靠性对自行火炮系统工作综合可靠性带来一定影响；⑤脉冲电源工作接地特性要求，也为自行火炮作战环境提出一定要求，等等。基于这些因素，为确保电热化学炮技术满足自行火炮技术要求并疏理影响因素，非常有必要针对电热化学炮技术应用于自行火炮的关键技术进行深入分析和探讨。

8.2.1 脉冲电源技术

脉冲电源既是电热化学炮发射技术原理中的关键技术，也是电热化学炮技术应用于自行火炮的核心要素。单从能量平衡观点来看，似乎电能的引入，可以无限制地增加火炮发射过程的炮口动能。但实际火炮发射过程中，由于首先受到最大膛压、炮口压力、发射药燃烧结束点相对位置，以及弹丸膛内运动时间等因素限制，而使得针对某一口径火炮内弹道过程存在一个电能实际加入的最佳值，一般应控制在炮口动能的3%以内。其次由于电热化学炮电能加入火炮内弹道过程，主要借助于等离子体发生器，电能加入量越多，等离子体发生器的结构将越庞大，所占火炮药室容积将越多，进而导致初始装药量下降，损失药室化学能初始总能。一方面，电能加入量越多，等离子体发生器形成高温等离子体电爆炸过程强度将更强，又将导致发射装药力学强度能否承受的问题，特别是低温条件下。最后，为适应自行火炮内部空间体积和质量承载要求，脉冲电源体积和质量均受到约束。综合上述物理宏观约束，应用于自行火炮的脉冲电源在能量、体积、质量各方面，必将是一个综合的优化和分析，并最终选择确定。通常其初始最大电能应控制在炮口动能的6%以内。（相当于电能实际加入量占炮口动能约3%，等离子体发生器效率按50%考虑。）电热发射与常规发射弹道性能比较如表8-4所示。

表8-4 电热发射与常规发射弹道性能比较

项目	装填 密度 Δ	装药量 ω	初始 总能 E_0	最大 膛压 P_m	弹丸 初速 v_0	弹丸 质量 q	炮口 动能 E_a	弹道 效率 η
单位	kg/dm ³	kg	MJ	MPa	m/s	kg	MJ	%
常规发射	0.72	9	46.1	470	1725	7.4	11.0	23.86
电热发射： 初始电能0.33MJ； 加入电能0.165MJ	0.8	10	51.22	470	1817.3	7.4	12.21	23.86

为了适应上述能量、质量、体积要求，从脉冲电源的技术要求发展来看，需从储能密度上重点考虑，当前主要储能形式有脉冲电源器、电感及飞轮三种形式，其主要性能对比如表 8-5 所示。

表 8-5 储能器件性能比较

器件形式	最大放电电压/V	最大放电电流/A	放电脉宽/s	质量比能/(J/g)	体积比能/(J/cm ³)	能量转化效率(%)
脉冲电容器 (金属化膜)	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁻¹ ~ 10 ⁻⁷	1 ~ 2	2 ~ 3	20 ~ 25
电感	10 ⁵	4 × 10 ⁷	1 ~ 10 ⁻³	2 ~ 10	30 ~ 40	8 ~ 14
飞轮	10 ⁴ ~ 10 ⁵	10 ⁴ ~ 10 ⁵	10 ⁻² ~ 10 ⁻³	14 ~ 15	30 ~ 40	10 ~ 20

考虑到工作可靠性、机构复杂性及工作可控性，目前电热化学炮大多采用金属化膜电容器储能为主，该技术的发展将直接影响脉冲电源体积和质量的大幅度降低，例如金属化膜电容器储能密度由 1MJ/m³ 提高到 3MJ/m³，同样储能条件下将导致脉冲电源整体体积下降 30% 左右。其变化如表 8-6 所示。

表 8-6 脉冲电源体积

类 别	电容器储能密度对应电容器体积	
初始储能需求，0.33MJ 对应电容器所占体积	1MJ/m ³	3MJ/m ³
	0.33m ³	0.11m ³
脉冲电源体积 (电容器占电源体积按 50% 考虑)	0.66m ³	0.22m ³

文献 [74] 中分析了电热化学炮放电过程中所产生的电磁场参数变化情况，对于电热化学炮技术应用与自行火炮将具有十分重要的参考。其中涉及等离子体发生器电爆炸过程中产生的内部磁场、电源放电电极与等离子体发生器对接区域在放电过程所产生的磁场、脉冲电源放电系统连接件部位产生的磁场等，均需进行仿真分析、测试相关参数及评估测试结果，然后采取相应措施消除或隔离存在的电磁场干扰问题，最终确保 ETCG 安全用于自行火炮。

8.2.2 内弹道技术

作为常规火炮内弹道技术研究通常包含三方面任务：①针对某一口径弹丸质量与初速要求，论证所需膛压条件下的火炮身管长、火炮药室容积、所选发射药类型与基本药型等参数不同组合方案，进行内弹道性能计算，并给出计算结果，以诸如最大膛压、炮口压力、发射药相对燃烧结束点、装药利用系统、示压效率等参数评估弹道方案的优和劣，得出最终的火炮药室容积、身管长、发射药种类与药形、装药量等组合方案，并进行常、高、低温

内弹道计算，绘制相应的身管包络线。②针对装药结构方案，利用两相流内弹道理论进行装药结构合理性和安全性分析，给出初步的装药结构方案。③进行诸如发射药能量测试、燃烧规律测试、点传火与装药结构匹配性测试等基础实验，以及弹道性能试验。而电热化学炮技术从对内弹道性能的影响来看，主要优点是从内弹道过程开始，即可加入一定电能对弹丸运动做功有一定贡献，另一方面由于等离子体发生器的优秀点火品质可以与更高装填密度发射药相结合，在确保装药安全的前提下，更易实现弹丸初速与炮口动能的提高，但一定膛压下，随之带来的不利影响是炮口压力的增高和弹丸初速的稳定性下降。其主要缺点：一是脉冲电源将占据自行炮内一定空间；二是脉冲电源工作期间容易带来电磁干扰和兼容问题；三是等离子体发生器将占据一定火炮药室容积。前两项与火炮总体相关，后一项与内弹道方案和火炮结构总体相关。

总之，单从内弹道技术来看，需综合分析电热化学炮技术带来的内弹道性能优势如点火与内弹道循环一致性、炮口初速与动能提高，与等离子体发生器所占药室容积影响，具体对比如表 8-7 所示。

表 8-7 ETCG 与 SPG 内弹道性能对比

弹丸质量, 9.0kg; 火炮药室容积, 16L		固体发射药火炮, SPG			电热化学炮, ETCG			
		最大膛压	弹丸初速	炮口动能	初始电能	最大膛压	弹丸初速	炮口动能
		P_m	v_0	E_d	E_{dn}	P_m	v_0	E_d
		MPa	m/s	MJ	MJ	MPa	m/s	MJ
装填密度	0.72	600	1844.4	15.31	0.5	594.9	1847.3	15.36
Δ	0.80	600	1892.4	16.12	0.5	595.7	1893.8	16.14
$/(\text{kg}/\text{dm}^3)$	0.90	—	—	—	0.5	596.3	1909.5	16.41

8.2.3 装药结构技术

通常来说，提高火炮弹丸初速在一定身管条件下，本质上主要有三种途径：一是提高发射药含能；二是提高发射药总装药量；三是改变发射药能量释放规律。其中第三种途径需与前两项结合，才能发挥出更大作用效果。就高膛压火炮，当前应用的发射药含能其火药力已达到 1225kJ/kg，穿甲弹装药密度已达 0.7kg/dm³ 左右，为改变能量释放规律，提高弹道性能，发射药均采用了钝感或包覆技术。为了充分利用电热化学炮等离子体点火温度高与点火一致性好的技术优势，世界发达国家发展了许多高含能发射药，新能量释放规律及高装填密度装药技术研究。分别详见文献 [68]、[71]、[73]、[73] ~ [75]。

表 8-8 所示为 $\Delta = 0.8\text{kg}/\text{dm}^3$ 条件下，不同发射药种类对弹道性能影响对比。

表 8-8 不同发射药种类对弹道性能影响对比

火药力 f	弹丸初速 v_0	最大膛压 P_m	炮口压力 P_d	火药相对燃烧结束点 η_k
kJ/dm^3	m/s	MPa	MPa	
1175	1897.0	600	84.8	0.442
1225	1917.7	600	88.5	0.462
1300	1947.8	600	94.4	0.505
1400	1983.4	600	102.5	0.565

从表 8-8 可以看出,随发射药火药力提高,发射药燃速系数必须是下降趋势,表明发射药点火初期必须呈现不易点火特性,恰恰逐渐能够适应等离子体点火特性,以达到期望的弹道性能。

表 8-9 所示为不同装填密度条件下,同一种类发射药弹道性能对比。

表 8-9 同一种发射药不同装填密度对弹道性能影响对比

装填密度 Δ	弹丸初速 v_0	最大膛压 P_m	炮口压力 P_d	火药相对燃烧结束点 η_k
kg/dm^3	m/s	MPa	MPa	
0.72	1850.4	600	77.4	0.288
0.75	1870.2	600	80.1	0.366
0.8	1897.0	600	84.8	0.442
0.9	1912.6	600	95.9	0.678

从表 8-9 可以看出,随着 Δ 的增加,使用同一类发射药,其弧厚将不断增加,初始装药量增加,一方面因药室内初始自由容积减小,要求减小点火药量,另一方面因发射药初始面积增加又要求增加点火药量,两者之间相互矛盾,所以从装药结构上必须保障增加装药量的同时,减小装药初始面积,这也就是多孔粒状药向多孔管状药或多孔粒状药向颗粒模压压实装药技术转化的必然结果,而电热化学炮由于电能输入可调控性,更加适应了这一调节过程。因此,必然得到较好的应用。

8.2.4 等离子体发生器技术

等离子体发生器技术对电热化学炮技术来讲,是核心关键技术,既发挥着脉冲电源电能转化为等离子体热能加入到内弹道过程,又发挥着对火炮弹后空间发射装药实施瞬态均匀一致点火功能。一方面,发生器工作效率的高低对于脉冲电源储能需求具有重要影响;另一方面,发生器本体所占药室容积影响弹后空间装药量增加。此外,由于发生器要承载高电压强电流放电要求,从结构上还必须满足绝缘与耐高温高压气体等技术要求。因此,等离子体发生器技术在电热化学炮技术中占有重要地位。目前,在电热化学炮中应用的等离子体发生器主要有电阻丝与金属薄膜两种类型,

在装药结构中发生器主要呈现底喷型、中心轴向型及装药内壁嵌入型等形式，具体分别如图 8-6 ~ 图 8-8 所示。

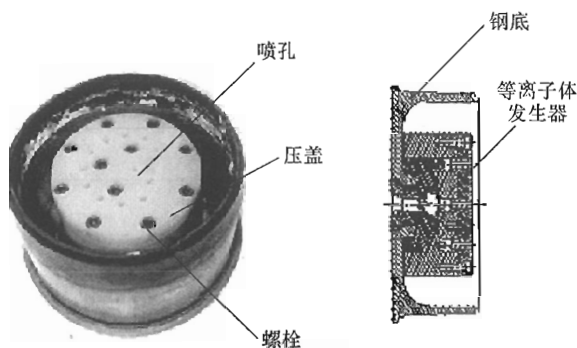


图 8-6 底喷型发生器结构

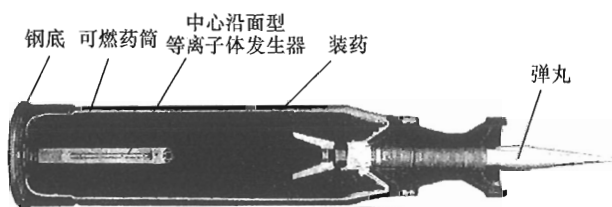


图 8-7 中心轴向型发生器结构

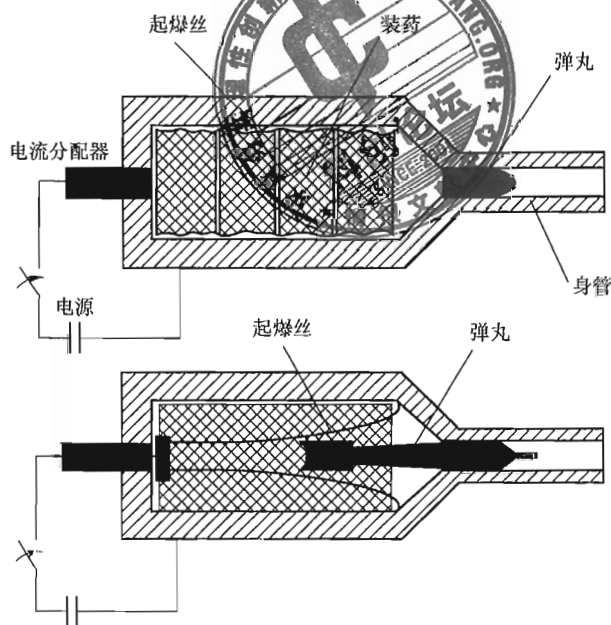


图 8-8 装药内壁嵌入型发生器结构

影响等离子体发生器性能的参数主要包括：放电负载电阻、金属离子含量、绝缘性能、耐高温高压性能及与火炮装药结构匹配性能等。

8.2.5 结论与建议

综合上述几项关键技术分析，电热化学炮应用于自行火炮必须首先在如下几方面取得主要成绩和进展：

- (1) 获得常、高、低温条件下稳定的弹道性能。
- (2) 脉冲电源在体积、质量、电能参数及电磁兼容等方面与自行火炮车内空间及其配电系统与其他控制系统具有很好的适配性、适装性及相容性。
- (3) 电热发射过程中对车内其他智能弹药无影响。
- (4) 电热发射击发机构与常规发射通用。
- (5) 电热发射弹药威力和射击精度明显优于相同弹药常规发射技术。

参考文献

- [1] William Oberle, et al. DEA - G - 1060 Geman/U. S Workshop on Electrothermal - Chemical Gun Propulsion. ADA 353364; 294
- [2] Weise Th H GG, Schaffers P. ETC - Investigation the upper medium calibre range [C] //13th Electromagnetic Launch Technology Symposium. May 22 - 25, 2006, Potsdam, Brandenburg - Germany.
- [3] Roger Alimi, Lior Bakshi, Eran Kort, et al. Temperature compensation and improved ballistic performance in a solid - propellant electro - thermal chemical (SPETC) 40mm gun [C] //13th Electromagnetic Launch Technology Symposium, May 22 - 25, 2006, Potsdam, Brandenburg - Germany.
- [4] Jahn Dyvik, Juleigh Herbig, Randall appleton. Recent activities in electro - thermal chemical launcher technologies at bae systes [C] //13th Electromagnetic Launch Technology Symposium. May 22 - 25, 2006, Potsdam, Brandenburg - Germany.
- [5] Thomas H G G Weise, Joseph Kruse, Paul Schaffers, et al. Status and results of the German R&D program on ETC technologies [J]. IEEE Transactions on Magnetic, Vol. 37, No. 1, 2001, 37 (1): 50.
- [6] Hans K Haak, Paul Schaffers, Thomas H G G Weise, et al. Basic investigation in a 70mm firing simulator [J] . IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (1) .
- [7] Melnik D, Sudai M, et al. ETC technology development at soreq NRC. israel [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35 (1) .
- [8] Alimi R, Borenstein A, Goldenberg C, et al. ETC technology development at soreq NRC. israel [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (1) .
- [9] Pascale Lehmann. Overview of the electric launch activities at the french - german research institute of saint - louis (ISL) [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (1) .
- [10] David C Haugh, Michael A Fith. UK electric gun national overview [J] . IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (1): 34.
- [11] Philip G Rutberg, Victor A Kolikov, Gennady A. Shvetsov. Problems, results and prospects of electric launch in russia [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (1): 42 - 45.
- [12] 李竞, 宋航, 解伊娜. 国外新型坦克发展情报专题研究 [R]. 西安: 中国兵器工业集团第二〇二研究所, 2009.
- [13] 杨艺, 华菊仙, 李军. 炮兵新贵跨进现实 [J]. 军事技术, 2006 (11): 19.
- [14] Jonathan D Shin, John J. O' Reilly, et al. Large caliber firing with electrothermal -

- chemical ignition (ETI) [R]. Report, U. S. Army Research, Development and Engineering Center – TACOM, Picatinny Arsenal, NJ 07806 – 5000.
- [15] Haugh D. EM GUNS FOR FUTURE AECVs – a current view. Harbor Island in San Diego Californi¹, August 12, 2002.
- [16] Philippe Bidorini. ETC 120mm weapon integration constrains in a heavy tank [C] // 13th Electromagnetic Launch Technology Symposium. Potsdam, Brandenburg – Germany, 2006.
- [17] Haugh D. Kirkcud bright EML Facility. Harbor Island in San Diego Californi¹, August 12, 2002.
- [18] 赵青, 刘述章, 童洪辉. 等离子体技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 4 – 6.
- [19] В. Е. ФОРТОВА. ЭНЦИКЛОПЕДИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ. МОСКВА НАУКА, 2000, ВВОДНЫЙ ТОМ II, Ст. 280.
- [20] Avi Birk, Miguel Del Guercio, et al. Electrothermal – chemical (ETC) closed – chamber interrupted – burning tests with JA2 and M30 solid propellants. November, 2000, ADA386414.
- [21] Pamela J Kaste, Amy E Kinkennon, et al. Surface phenomena of solid propellants ignited by plasma. May 2001, ADA 391551.
- [22] Chaboki A, Zelenak S, Isle B. Recent advances in electrothermal – chemical gun propulsion at united defense, L. P. [J]. IEEE Transctions on Magnetics, Vol. 33, No. 1, January 1997, 33 (1) .
- [23] Zoler D, Shafir N, Forte D, et al. Study of plasma jet capabilities to produce unifirm ignition of propellants, ballistic gain and significant decrease of the “Temperature Gradient” Effect [C] // 13th Electromagnetic Launch Technology Symposium. Potsdam, Brandenburg – Germany, 2006.
- [24] Katulks G I. Measurment techniques for electrothermal – hemical gun disgnostics. ADA273 925, 1993.
- [25] 张光华, 李云奇, 等. 等离子体与成膜基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994: 56 – 79.
- [26] Zhang Mingan, Li Jun, et al. The experimental research of the plasma – propellant charge interaction [C] // 13th Electromagnetic Launch Technology Symposium. Potsdam, Brandenburg – Germany, 2006.
- [27] 张洪海, 张明安, 魏建国, 等. 底喷式等离子体发生器结构参量模拟计算研究 [C] // 弹道学术交流会论文集. 太原: 弹道学术委员会, 2004: 30.
- [28] 张洪海, 张明安, 龚海刚, 等. 结构参数变化对等离子体发生器性能的影响 [J]. 火炮发射与控制学报, 2004 (3): 1 – 4.
- [29] 狄加伟. 等离子体发生器电爆炸数值模拟 [C] // 弹道学术交流会论文集. 长沙: 弹道学术委员会, 2007: 38 – 41.
- [30] 李兵, 王育维. SPETCG 内弹道数值模拟 [C] // 《创新型国家中的公共安全与国家安全》论文集. 北京: 中国兵工学会, 2006: 542.
- [31] 王莹, 肖峰. 电炮原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

- [32] 金志明. 高速推进内弹道学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [33] 陆欣. 新概念武器发射原理 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [34] Jahn Dyvik, Juleigh Herbig, Randall Appleton. Recent activities in electro – thermal chemical launcher technologies at BAE systes [C] //13th Electromagnetic Launch Technology Symposium. May 22 – 25, 2006, Potsdam; Brandenburg – Germany, 2006: 22 – 25.
- [35] 杨艺, 华菊仙, 李军. 炮兵新贵跨进现实 [J]. 现代兵器, 2006.
- [36] 王莹. 脉冲功率科学技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [37] McNab I R. Pulsed power for electric guns [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33 (1): 453 – 460.
- [38] Techniques Applied to a model iron – cored compulsator [J] . IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31 (1): 587 – 592.
- [39] Lomonova E A, Miziurin S R. The theoretical investigations and mathematical models of the compulsators [C] //7th International Conference on Electrical Machines and Drives. Durham, UK, 1995: 131 – 135.
- [40] Jaewon J, Younhyun L, Kyungseung Y, et al. Overview of ETC program in korea [J] . IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (1): 39 – 41.
- [41] Yuan P, Baohua L, Wending Q, et al. Investigation of cascade compulsators for high power YAG laser [C] //9th IEEE International Pulsed Power Conference. Albuquerque, New Mexico, USA, 1993: 188 – 189.
- [42] Yuan P, Baohua L, He H, et al. Experimentnal investigation of cascade compulsators [C] //8th IEEE International Pulsed Power Conference. 1991: 711 – 714.
- [43] 李格, 刘保华, 秦文汀. 旋转磁通压缩脉冲发电机驱动电磁轨道炮实验 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2001 (1): 38 – 42.
- [44] 刘克富, 丁同海, 潘垣. 被动补偿脉冲发电机气隙磁场及电枢电感计算 [J]. 微特电机, 1996 (3): 14 – 16.
- [45] 刘克富, 潘垣. 用于 ETCG 脉冲电源的 CPA 波形调节策略 [J]. 华中理工大学学报, 2000 (6): 9 – 11.
- [46] 郑科. 永磁式被动补偿脉冲发电机研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [47] 罗成. 混合励磁补偿脉冲发电机的基础研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [48] Cui S, Wu S, Cheng S. Design and simulation of a self – excited all – air – core and fabrication of a separate – excited all – iron – core passive compulsator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (1): 261 – 265.
- [49] Avi Birk, Miguel Del Guercio, et al. Electrothermal – chemical (ETC) closed – chamber interrupted – burning tests with JA2 and M30 solid propellants [R]. November, 2000, ADA386414.
- [50] Pamela J Kaste, Amy E Kinkennon, et al. Surface phenomena of solid propellants ignited by plasma [R]. May 2001, ADA 391551.
- [51] Jahn Dyvik, Juleigh Herbig, Randall Appleton. Recent activities in electro – thermal chemical launcher technologies at BAE systes [C] //13th Electromagnetic Launch

- Technology Symposium. Potsdam: Brandenburg – Germany, 2006.
- [52] Thomas H. G. G. Weise, Joseph Kruse, Paul Schaffers, and Hans – karl Haak. Status and results of the german R&D program on ETC technologies [J]. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 37, No. 1, 2001, 37 (1): 50.
 - [53] A. Chaboki, S. Zelenak, B. Isle. Recent advances in electrothermal – chemical gun propulsion at united defense, I. P [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33 (1) .
 - [54] 张光华. 等离子体成膜基础 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
 - [55] 赵青, 刘述章, 童洪辉. 等离子体技术及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
 - [56] 张洪海, 张明安, 魏建国, 等. 底喷式等离子体发生器结构参量模拟计算研究 [C] //弹道学术交流会论文集. 太原: 弹道学术委员会, 2004: 30.
 - [57] 张洪海, 张明安, 龚海刚, 等. 结构参数变化对等离子体发生器性能的影响 [J]. 火炮发射与控制学报, 2004 (3): 1 – 4.
 - [58] 狄加伟. 等离子体发生器电爆炸数值模拟 [C] //弹道学术交流会论文集. 长沙: 弹道学术委员会, 2007: 38 – 41.
 - [59] 李兵, 王育维. SPETCG 内弹道数值模拟 [C] //《创新型国家中的公共安全与国家安全》论文集. 北京: 中国兵工学会, 2006: 542.
 - [60] 周彦煌, 王升晨. 实用两相流内弹道学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
 - [61] 王升晨, 周彦煌, 刘千里, 等. 膛内多相燃烧理论及应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994.
 - [62] 王泽山, 史先杨. 低温度感度发射装药 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
 - [63] 王泽山, 徐复铭, 张豪侠. 火药装药设计原理 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.
 - [64] 浦昭光, 王宝光. 测控仪器设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
 - [65] 孔德仁, 朱蕴璞, 狄长安. 工程测试技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 - [66] 柳春峰. 光纤通信技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
 - [67] William Oberle etc. DEA – G – 1060 geman/U. S workshop on electrothermal – chemical gun propusion. ADA 353364, P294.
 - [68] Jahn Dyvik, Juleigh Herbig, Randall Appleton. Recent activities in electro – thermal chemical launcher technologies at BAE systes [C] //13th Electromagnetic Launch Technology Symposium, May 22 – 25, 2006, Potsdam: Brandenburg – Germany, 2006.
 - [69] Pascale Lehmann. Overview of the electric launch activities at the french – german research institute of saint – Louis (ISL) [J] . IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (1) .
 - [70] 杨艺, 华菊仙, 李军. 炮兵新贵跨进现实 [J]. 军事技术, 2006 (11): 19.
 - [71] 杨艺, 李军. 美国陆军电磁发射技术发展研究 [J]. 外军炮兵, 2007 (2): 16 – 21.
 - [72] Di Jiawei, Gao Rui, Zhang Ming – an et al. Application Prospect Analysis of Electrothermal – Chemical Technology in Large Caliber Gun [C] //15th International EML

- Symposium, Royal Military Academy, Brussels, Belgium, 2010: 218.
- [73] Zhang Yadong, Ruan Jiangjun, Wang Ying. Performance improvement of a coil launcher [C] //15th International EML Symposium. Royal Military Academy, Brussels, Belgium, 2010: 143.
- [74] Li Jun, Li Shizhong, Liu Peizhu, et al. Design and testing of a 10MJ electromagnetic launch facility [C] //15th International EML Symposium, Royal Military Academy, Brussels, Belgium, 2010: 180.
- [75] 嵯法宥, 张蜀平, 王祖文, 等. 新概念武器与信息化战争 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 145 – 149.
- [76] 金志明. 高速推进内弹道学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 44.
- [77] А. А. Королев (чл. – кор. РАН), В. Г. Кучеров. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТРЕЛКОВО – ПУШЕЧНОГО, АРТИЛЛЕРИЙСКОГО И РАКЕТНОГО ОРУЖИЯ. часть 1, РПК, “Политехник”, Волгоград, 2002 г.

