

普通高等教育
兵工类规划教材

火箭与火炮 内弹道原理

张柏生 李云娥 编著



北京理工大学出版社

火炮与火箭内弹道原理

张柏生 李云娥 编著

北京理工大学出版社

内 容 简 介

本书是同时涉及火炮和火箭发动机的内弹道学简明教程,包括绪论、武器概论、火炮内弹道和固体火箭发动机内弹道等四部分。书中首先简要地叙述了武器系统各组成部分(火炮、弹药、火箭弹、火药等)的基本知识,在此基础上着重阐明发射时武器和火药装药的工作原理,介绍内弹道性能参数的计算方法,讨论内弹道性能的影响因素和有关的射击现象,指明内弹道学的发展动向和武器研制中出现的一些实际内弹道问题。

本书理论联系实际,注意阐明物理实质,重要的工程计算都附有例题。它是火药专业主要的专业基础课教材之一,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

火炮与火箭内弹道原理/张柏生,李云娥编著. —北京:北京理工大学出版社,1996
ISBN 7-81045-121-9

I. 火… II. ①张… ②李… III. ①火炮-内弹道学 ②火箭弹道-内弹道学 IV.
①TJ012.1 ②TJ013.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 05312 号

北京理工大学出版社出版发行
(北京市海淀区白石桥路 7 号)
邮政编码 100081 电话 68422683
各地新华书店经售
北京地质印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 17 印张 398 千字
1996 年 8 月第 1 版 1996 年 8 月第 1 次印刷
印数:1—800 册 定价:17.50 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

出 版 说 明

遵照国务院国发〔1978〕23号文件精神，中国兵器工业总公司承担全国高等学校兵工类专业教材的规划、编审、出版的组织工作。自1983年兵总教材编审室成立以来，在广大教师的积极支持和努力下，在国防工业出版社、兵器工业出版社和北京理工大学出版社的积极配合下，已完成两轮兵工类专业教材的规划、编审、出版任务，共出版教材211种。这批教材的出版对解决兵工专业教材有无问题、稳定教学秩序、促进教学改革及提高教学质量都起到了积极作用。

为了使兵工类专业教材更好地适应社会主义现代化建设需要，特别是国防现代化培养人才的需要，反映国防科技的先进水平，达到打好基础、精选内容、逐步更新及利于提高教学质量的要求；我们以提高教材质量为主线，完善编审制度、制定质量标准及明确岗位职责，制定了由主审人审查、责任编委复审和教编室审定等5个文件。并根据兵工类专业的特点，成立了十个专业教学指导委员会，以更好地编制兵工类专业教材建设规划，加强对教材的评审和研究工作。

为贯彻国家教委提出的“抓好重点教材，全面提高质量，适当发展品种，力争系列配套，完善管理制度，加强组织领导”的“八五”教材建设方针，兵总教材编审室在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1991年制订了1991~1995年兵工类专业教材编写出版规划，共列入教材220种。这些教材都是从学校使用两遍以上、实践证明是比较好的讲义中遴选的，专业教学指导委员会从兵工专业教材建设的整体考虑对编写大纲进行了审查，认为符合兵工专业培养人才要求，符合国家出版方针。这批教材的出版必将对兵工专业教材的系列配套，对提高教学质量和培养国防现代化人才，对促进兵工类专业科学技术的发展，起到积极的作用。

本教材由黄人骏教授主审，经中国兵器工业总公司火炸药专业教学指导委员会复查，兵总教材编审室孙业斌教授审定。

限于水平和经验，这批教材的编审出版难免有缺点和不足之处，希望使用本教材的单位和广大读者批评指正。

中国兵器工业总公司教材编审室

1995年5月

火药系列教材

火炮与火箭内弹道原理

火药系列教材编审委员会

主任委员：王泽山

常务副主任委员：孙业斌

副主任委员：牛秉彝 戴健吾 刘继华

委员：（按姓氏笔划）

王泽山	牛秉彝	白木兰	刘继华	孙业斌
肖学忠	罗秉和	陆安舫	赵子立	张端庆
徐复铭	徐德平	谭惠民	戴健吾	

火药系列教材目录

序号	教材名称	主编人
1	火炮与火箭内弹道原理	张柏生
2	火药应用技术及装药设计	王泽山
3	火药用原材料性能与制备	张端庆
4	火药实验方法	王泽山
5	火药设计	黄人骏
6	火药物理化学性能	刘继华
7	单基与三基火药	牛秉彝
8	双基火药	张续柱
9	复合火药	马庆云
10	火药燃烧理论	王伯羲

火药系列教材总序

“火药系列教材”就要问世了,我们谨以这套教材献给我国火药行业的全体同仁,希望它能为发展我国火药科学技术、为培养火药专业后继人才做出贡献。

长期以来,火药不仅在军事上用于枪炮弹丸的发射和火箭导弹的推进,而且在民用方面也有着广泛的用途。火药(后来叫黑火药)是我国古代四大发明之一,公元3世纪我国古代劳动人民就发现了火药的燃烧性质,公元10世纪火药用于军事,此后中国出现了多种火药兵器。公元13世纪,火药才传入阿拉伯国家,进而传入欧洲,得到了广泛的应用。恩格斯曾提到中国的黑火药打破了欧洲16世纪的城堡。直到19世纪末,黑火药一直是各种枪炮和火箭的唯一发射能源,它对军事技术、人类文明及社会进步都产生了深远的影响。近代火药的制造始于19世纪初,1833年法国人布拉科诺(Braconnot)首先制出了硝化纤维素,为火药的革新打开了大门。1865年英国化学家阿贝尔(Abel F A)用细断法制得了安定的硝化纤维素,直到1884年法国化学家维也里(Vieille P)用醇醚混合溶剂处理硝化纤维素,解决了它的密实成型问题,发明了单基火药。由于它燃烧时无烟且威力比黑火药大,从而取代了黑火药作为发射药的地位。1847年意大利人索布雷罗(Sobrero)制造出硝化甘油。1862年瑞典化学家诺贝尔(Nobel A B)开设了第一个硝化甘油工厂,1888年他用低氮量硝化纤维素和硝化甘油发明了巴力斯太型双基火药,为近代火药增加了新品种。第二次世界大战期间,为了满足大口径炮弹、大型火箭及形状复杂的发射装药要求,1937年在德国出现了三基药。1942年美国又研制出了一系列的复合火药,本世纪60年代又出现了高能量、高燃速以及力学性能和工艺性能良好的火药,明显地提高了推进火箭用的火药性能,与此同时,又加强了用于推进弹丸的装药研究。近年来,世界各国继续进行新火药和火药装药研究,也开展了改善单项性能指标的研究,研制适应不同武器要求的特种性能火药。例如,研制高能低烧蚀发射药、高能高强度发射药、高能无烟推进剂、高能平台推进剂、高燃速推进剂及低燃速推进剂等,并以提高火药生存能力为重点,发展低易损性火药。

解放前,我国的火药工业发展缓慢,自1895年上海建立第一所单基无烟药厂后,到1945年才建立第一所双基火药厂。

建国以来,我国的火药工业与火药科学技术随着国民经济的迅猛发展,从仿制到自行设计,有了长足的发展。我国研制的火药已有很多品种接近或赶上世界先进水平。但就火药学科总体而言,我国还落后于经济发达国家。为了使我国火药科学技术进一步发展,尽快缩小与先进国家的差距,达到国际水平,我们非常需要培养一支掌握现代火药知识且结构合理的技术队伍。这是振兴我国火炸药行业的百年大计,这套火药系列教材就是为了实现这一目的而编写的。另外,我国有一大批在火药园地上辛勤耕耘了几十年的专家,他们在长期的教学、科研和生产中,取得了丰硕的成果并积累了极其丰富的经验,这是我国火药行业非常宝贵的财富。现在这些专家大多年事已高,非常希望把他们多年积累的知识传给后人,进而发扬光大。这套“火药系列教材”也是为了实现专家们的这一心愿及为祖国留下这一宝贵财富而编写的。

“火药系列教材”共10本,包括火药原材料、设计理论、燃烧理论、生产工艺、应用技术、实

验与性能以及安全技术等各个方面内容,取材适当、重点突出、符合专业教学大纲要求。既反映现代火药科学技术水平及最新成果,又结合我国火药科研、生产现状及编著者本人多年积累的教学、科研经验。与国内已出版的同类专著和教材相比,内容有较大幅度的翻新,有一部分教材则系国内首次公开出版。本系列教材全面采用国家法定计量单位,贯彻执行国家现行标准,读后将令人有耳目一新之感。

本系列各门教材均聘请实际经验丰富、学术造诣较深的教授和副教授担任主编,编写大纲于1988年5月经专家审定后,教材的初稿又通过火药系列教材编审委员会初审和专家主审,最后由“兵总”教材编审室审定定稿。

“火药系列教材”的出版,归功于各编者数年来锲而不舍的辛勤劳动,归功于编审委员会各位专家的热情指导,归功于“兵总”教材编审室的积极倡导与卓有成效的努力工作,归功于中国兵器工业总公司教育局及有关领导的关心和支持,还归功于北京理工大学出版社和有关院校印刷厂的鼎力协助,我们对此深表感谢!

为了国防科学技术的现代化,我们期待所有的火药工作者,努力贡献自己的劳动和智慧,攀登火药科学的新高峰!

在我国编写“火药系列教材”尚属首次,限于水平,教材中的缺点、错误或不尽人意之处在所难免,我们热切希望读者不吝赐教。

“火药系列教材”编审委员会

王泽山 孙业斌

1993年2月

前 言

本书是根据兵器工业总公司火药专业系列教材编审委员会制定的大纲编写的，是火药专业重要的专业基础课教材。内容涉及兵器知识、身管武器内弹道学和固体火箭发动机原理各有关部分。这些内容过去都是单独设课的，需时较多，重复割裂，已不能适应新的教学计划的要求。实际上，武器是一个系统工程，它包括枪、炮、弹药或火箭弹、火药装药等组成部分，是根据武器整体的战术技术要求，采用内弹道原理所提供的设计方法，有机地联系起来和优化地组合起来，其中火药装药是完成射击过程的动力。身管武器（枪、炮）与火箭武器的发射原理和结构不同。射击时，身管武器内的火药装药是在变压下燃烧，燃气膨胀做功；火箭武器的火药装药是在恒压下燃烧，燃气经喷管流出产生反作用力而做功。但是，两种武器又有着共同的基础，即火药装药都遵循由几何燃烧定律、燃烧速度定律决定的能量释放和转换规律。因此，内弹道学是研究枪炮膛内和火箭发动机内射击现象的科学，主要是研究火药装药在武器射击过程中的工作特性。现在统一起来编写成《内弹道原理》能更加清楚地阐明它们之间的联系和区别，能更加紧密地结合火药专业的需要，并给学生的学习带来很大方便。为此，在选材、安排及提法上都作了一些新的尝试。

全书分绪论和一、二、三篇。绪论说明射击中的功能转换及内弹道学的地位和作用；第一篇是武器概论，简明地介绍火炮、弹丸、火箭弹及火药的构成和作用，并将火药的稳态燃烧定律、弹丸运动定律、火炮内膛结构等内弹道学的部分内容一并移此，作为学习第二、三篇的基础知识；第二、三篇分别阐述火炮和火箭内弹道原理：武器及其火药装药的工作特性，主要性能参数的工程计算，各种射击现象的讨论和分析。

本书注重阐释基本原理、基本概念和物理实质，有重点地叙述目前广泛使用的比较成熟的内弹道理论，同时指明现代内弹道学的发展状况，介绍实际出现的各种内弹道问题及有关的新知识新技术。力求使学生通过本课程的学习对内弹道学的基本问题能够深刻理解，学会应用，开拓思路。

根据确定的课程分工，有关内弹道测试技术、装药设计知识、燃烧理论模型等本书一概从略。

本书的单位采用国际标准制，但第七、十章及第九章的经验公式因为应用原苏联编制的计算表册，所以仍然沿用工程制；关于名词术语符号也尽量采用国家标准，但是很多地方国家标准和国家军用标准的规定不一致，所以就与国家军用标准及专业习惯有一定的差别。

本书是参照了多种版本的内弹道学专著和有关文献后编写的，第一、二、六~十章由李云娥编写，绪论、三~五、十一~十六章由张柏生执笔，张柏生任主编，全书由黄人骏教授主审，火药系列教材编审委员会主任王泽山教授、北京理工大学戴健吾教授、刘继华副教授、华北工学院牛秉彝教授、兵器工业总公司兵工教材编审室孙业斌教授都进行了审阅，提出了宝贵的意见，在此一并致谢。

由于编者水平和经验所限，错误和不足之处在所难免，恳请批评指正。

编 者

目 录

绪论	(1)
0.1 武器的射击过程及其特点	(1)
0.2 内弹道学的研究对象和任务	(3)
0.3 内弹道学的发展过程和趋势	(3)

第一篇 武器概论

第一章 火炮	(9)
1.1 火炮的任务和要求	(9)
1.2 火炮的分类	(11)
1.3 火炮的一般构造与作用原理	(13)
1.4 各类典型火炮的特性简介	(18)
第二章 弹药	(22)
2.1 炮弹的任务和要求	(22)
2.2 炮弹的分类	(22)
2.3 炮弹的一般构造和作用	(24)
2.4 各种弹丸的基本结构和作用	(25)
2.5 药筒	(30)
2.6 点火具	(32)
第三章 固体火箭弹	(34)
3.1 对固体火箭弹的要求	(34)
3.2 火箭弹的分类	(35)
3.3 火箭弹的构造和作用	(36)
第四章 火药	(39)
4.1 概述	(39)
4.2 火药与装药对武器诸性能特别是弹道性能的影响	(40)
4.3 火药的能量性质及其标志量	(41)
4.4 火药的几何燃烧定律	(44)
4.5 火药的燃烧速度定律	(45)
4.6 火药燃烧的物理化学过程	(49)

第二篇 火炮内弹道原理

第五章 火炮射击中火药装药的工作特性	(55)
5.1 火炮射击过程中膛内的功能转换	(55)
5.2 火炮膛内的压力变化规律	(61)
5.3 药粒的形状函数——几何燃烧定律的应用	(63)
5.4 火药燃速定律的内弹道特性分析	(69)
5.5 几何燃烧定律的内弹道特性分析	(73)

5.6	膛内压力分布	(78)
第六章	考虑弹丸挤进压力时膛内弹道特性的 l_ϕ 分析解	(81)
6.1	概述	(81)
6.2	假设和内弹道方程组	(81)
6.3	解法	(83)
第七章	TAY 表解法	(95)
7.1	TAY 表的编制	(95)
7.2	TAY 表的结构及其应用	(98)
7.3	表解法实践中的有关问题	(102)
第八章	内弹道特性的数值解法概述	(105)
8.1	射击过程的数学模型	(105)
8.2	内弹道模型求解的数值方法	(107)
8.3	内弹道模型求解的基本步骤	(110)
8.4	弹道解主程序框图	(112)
第九章	各种装填条件的变化对弹道性能的影响	(113)
9.1	概述	(113)
9.2	装填条件对弹道性能的影响	(114)
9.3	膛内压力波对弹道性能的影响	(121)
第十章	火炮内弹道设计原理	(127)
10.1	概述	(127)
10.2	内弹道设计基本方程	(127)
10.3	内弹道设计表	(129)
10.4	内弹道设计方案的评价标准	(130)
10.5	起始参量的选择	(133)
10.6	内弹道设计的计算步骤	(137)
10.7	加农炮的内弹道设计	(139)
10.8	榴弹炮的内弹道设计	(141)
10.9	其它火炮的内弹道特点	(148)

第三篇 固体火箭发动机内弹道原理

第十一章	火药燃气在喷管中的流动特性	(159)
11.1	概述	(159)
11.2	燃气流动的基本方程	(159)
11.3	喷管形状和气流特性的关系	(163)
11.4	外界压力对燃气流动的影响	(165)
11.5	喷管中的燃气流速和排气速度	(167)
11.6	燃气的质量流率	(169)
第十二章	固体火箭发动机的主要性能参数	(171)
12.1	推力和比推力	(171)
12.2	等效排气速度	(173)
12.3	特征速度	(173)
12.4	总冲量和比冲量	(174)
12.5	火箭发动机性能对火箭飞行性能的影响	(175)

第十三章 影响固体火箭发动机性能的因素	(178)
13.1 火箭发动机的效率	(178)
13.2 火箭发动机各性能参数之间的关系	(179)
13.3 火箭发动机性能参数偏离理想状态的原因	(183)
第十四章 火药装药在火箭发动机燃烧室内的有害燃烧现象	(185)
14.1 侵蚀燃烧	(185)
14.2 高频不稳定燃烧	(189)
14.3 不完全燃烧和低频不稳定燃烧	(192)
14.4 燃烧转爆轰	(194)
第十五章 固体火箭发动机的点火	(197)
15.1 概述	(197)
15.2 点火过程中火药的物理化学变化	(198)
15.3 点火过程的物理数学模型	(199)
15.4 加热层点火理论	(201)
15.5 影响点火的主要因素	(204)
第十六章 固体火箭发动机的内弹道计算	(206)
16.1 燃烧室工作过程中的压力变化	(206)
16.2 压力 - 时间曲线的微分方程	(207)
16.3 平衡压力	(209)
16.4 火药装药燃烧面的变化规律	(212)
16.5 燃烧室压力 - 时间曲线的计算	(215)
16.6 燃烧室内压力的稳定性	(223)
16.7 初始压力峰和二次压力峰	(224)

第四篇 附 录

附录 1 气体动力学函数表	(229)
附录 2 $Q(\Pi, \nu) = \int_0^\Pi \frac{d\Pi}{1 - \Pi^{1-\nu}}$ 表	(248)
主要符号	(251)
参考文献	(256)

绪 论

内弹道学是研究身管武器（枪炮）膛内和火箭发动机内的射击现象及其变化规律的科学，是炮兵技术的基础学科和武器系统的重要设计理论，和火炮、弹丸（含火箭弹）、火药装药等学科密切相关。因此，学习和研究内弹道学首先应该了解武器的射击过程、内弹道学的研究对象和内弹道学的发展过程与趋势。

0.1 武器的射击过程及其特点

武器的射击过程就是由发射装置将战斗部推送到目标上去的过程，因为武器的类型不同，发射的原理和发生的物理化学现象也各不相同。

身管武器是依靠火药装药燃烧产生的高温高压气体膨胀推动弹丸完成射击过程的。从击针击发底火开始至弹丸飞出炮口为止的阶段称为内弹道阶段，弹丸的运动受到火药燃气的作用和身管壁的约束；从弹丸飞出炮口开始至飞达目标为止的阶段称为外弹道阶段，弹丸的飞行摆脱了膛内因素的影响，但是受到空气阻力和重力的作用；然而弹丸在出炮口后一段时间内实际上还受到相继流出膛的火药燃气的作用而被加速，所以又将弹丸出炮口至达到最大速度为止的阶段专称为中间弹道阶段。内弹道学只研究膛内的射击现象。对于射击中的内弹道过程可以进一步作如下分析。

在击针撞击底火或电流点燃底火后，底火中的药剂爆燃，其火焰、气体及固体灼热粒子进入药室，引燃点火药，点火药燃烧的同时点燃火药装药。这时，因为弹丸尚未运动，弹后空间容积未变，主要发生点火药及部分火药装药的定容燃烧、其燃烧产物和火焰沿主装药的传播以及主装药的着火等过程，称为定容点火阶段。

主要的火药装药燃烧后，产生的高温高压气体膨胀，推动弹丸，弹带逐步嵌入膛线。由于弹带发生激烈的塑性变形和摩擦，就产生了很大的阻力，弹带全宽进入膛线后，阻力达到最大值。该阶段称为弹带挤进阶段。由于弹带是强制挤进，所以保证了火药燃气的密闭和装药的全面同时着火。但是，滑膛炮和线膛炮发射尾翼弹时，没有弹带挤进阶段或挤进压力较小。

经典内弹道学常将上述两个阶段合称为弹道前期，认为它是瞬间完成的，弹丸前进弹带宽的距离可以忽略，火药装药可以看作是在定容情况下燃烧。但是，实际经验和深入研究表明，本时期发生的是有限速度的点传火过程，对弹道稳定性特别是对压力波动有重大影响。

弹丸启动后，一方面被火药燃气直线加速，一方面绕炮膛轴线旋转，直至炮口。此即所谓弹丸运动阶段。在此期间，燃烧着的火药及火药燃气随着弹丸一起向前运动，炮身则向后运动，并产生炮口光、炮口焰、冲击波和噪声，内膛壁也受到了损害，这些都是伴随射击发生的有害现象。本阶段，弹丸的运动速度单调递增，但是膛内压力却是先上升后下降，火药装药也在最大压力出现后不久结束燃烧。内弹道学上称装药燃烧前为第一时期，燃烧结束后

为第二时期。第二时期只发生燃气膨胀,没有新燃气产生。

由上看来,身管武器的射击过程是一个能量的释放和转换过程(图 0 - 1),并且具有以下的基本特点:

- (1)高温——膛内火药燃气最高温度可达 2500~3500K;
- (2)高压——膛内压力可高达 245~600MPa;
- (3)高速——弹丸出炮口的速度可达 300~1500m/s;
- (4)时间短——长身管火炮射击过程只有几毫秒至几十毫秒。

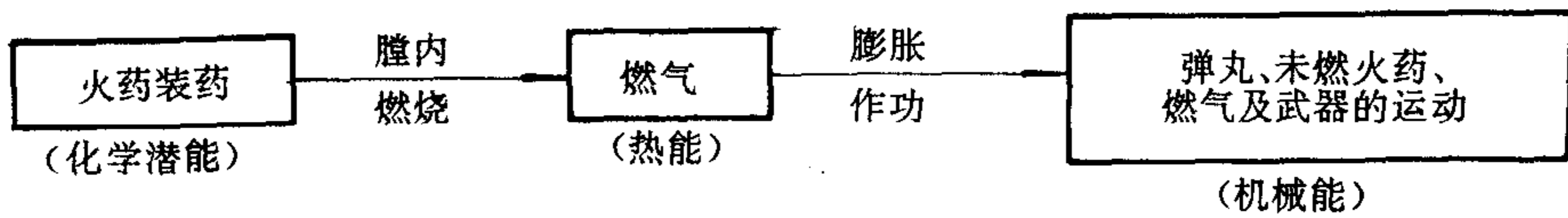


图 0 - 1 身管武器发射过程中的能量转换

另外,迫击炮和无后坐炮在射击时还存在着燃气流出现象,压力和初速也小得多,膛压约 30~70MPa,初速约 300m/s,其中无后坐炮的燃气流出量、流出方向与迫击炮又有显著差别。

火箭武器自身携带能源,通过发动机向后喷射高速气体质点,产生直接反作用力向前运动。普通固体火箭弹的能源是固体火药,直接置于燃烧室内,火箭发射时,先点燃点火具,其燃烧产物沿火药装药通道流动,引燃装药,装药燃气经由特殊形状的喷管膨胀,随着温度、压力、密度的下降,流速不断提高,最后以超音速排出,对火箭弹产生反作用推力而做功,完成发射过程。火药装药从点火到发动机工作完毕,使火箭弹达到最大飞行速度为止的阶段称为主动段。其后,火箭弹就进入了和身管武器发射的弹丸一样的飞行阶段,称为被动段。主动段相当于身管武器的内弹道时期,也是发动机进行能量转换的过程(图 0 - 2),包括装药在燃烧室中的燃烧和燃烧产物沿喷管流动两个阶段。燃烧产物的温度可达 2500~3500K,燃烧室的压力比火炮膛压小,但野战火箭弹也达 7~20MPa,反坦克火箭弹可达 40~60MPa,发动机工作时间比身管武器长,短的达 1~1.5s,续航发动机可达几十秒以上。

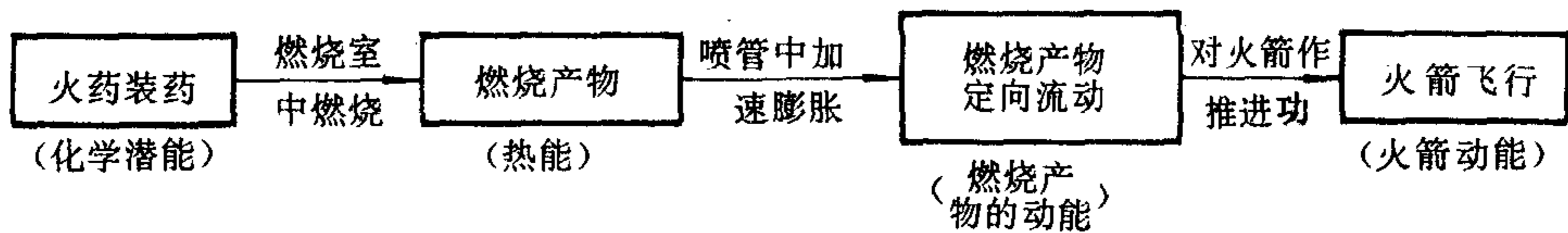


图 0 - 2 火箭武器发射过程中的能量转换

此外,还出现了炮 - 箭相结合的武器,如众所周知的火箭增程弹和无后坐炮,它们的射击过程和射击现象就更为复杂。

上述各种武器实质上都是不同型式的热机,它们以固体火药为能源,在特定结构的武器环境中,以燃烧形式释放能量,以燃气为工质转换能量,最终获得的有效动能则取决于燃烧效率和转换效率两个阶段的变化。如果工作条件适当,火药在膛内或燃烧室内能完全燃烧,放出全部能量;身管或喷管结构合理,燃气能充分膨胀,则都将有利于武器整体性能的提高。若火药本身的潜能较大,武器的威力就更高。

0.2 内弹道学的研究对象和任务

内弹道学的研究对象从本质来说,是指武器能源的能量释放和转换规律,具体说来是指射击过程中发生的各种物理化学现象。对身管武器而言,是指膛内火药装药燃烧、压力变化及弹丸运动的规律;对火箭武器而言,因袭身管武器的习惯,也常沿用内弹道学这个术语,但是,一般称为火箭发动机工作原理,具体是研究发动机内火药装药燃烧、燃气流动和压力变化的规律。身管武器和火箭武器的内弹道性质有共同的基础,那就是根据固体火药的几何燃烧定律和燃烧速度定律设计出特定形状和尺寸的装药,以控制燃气生成率来控制能量的释放和转换规律。但是,两类武器的发射原理和结构各不相同。身管武器如果具有膛线,火药装药在变压情况下燃烧时,燃气密闭膨胀;而火箭武器中,火药装药在恒压下燃烧,燃气高速流出。因而,两者有着不同的射击现象。不同结构的武器实际上给装药提供了不同的工作条件与环境,而火药装药和武器系统各部分间的匹配则是通过内弹道的理论和方法来完成的,由此给出设计整个武器系统的出发点和依据。例如,身管武器就是根据战术技术要求,通过内弹道设计,确定了内膛结构诸元(药室容积等)和装填条件(装药量、装药尺寸等),并计算出理论上的膛内压力和弹丸运动速度曲线,其后再分别进行火药装药、火炮、弹丸、药筒等的设计;固体火箭弹是在进行总体设计的同时,进行火药装药设计、内弹道计算,从而确定总冲、比冲、推力、工作压力、工作时间、火箭弹最大速度、弹径、弹长、燃烧室内径、装药的尺寸和质量等一系列基本参量,给出整个火箭弹的雏形,以后再分别进行发动机、战斗部等的结构设计。因此,内弹道原理是联系武器系统各部分的纽带,武器系统各部分是武器内弹道整体性能的物质体现。很明显,内弹道学的根本任务就是改进武器和创制武器。本教程则是阐明火炮内弹道学和固体火箭发动机工作的基本原理。

0.3 内弹道学的发展过程和趋势

兵器技术的发展促成了弹道学的诞生,弹道学的建立又指导着兵器技术的发展。内弹道学本身包括实验弹道学、理论弹道学和兵器技术发展提出来的各种有实际应用价值的内弹道问题等方面。内弹道学的发展经过了一个从经验到科学化、由肤浅到深刻化的历程,不过,它更加依赖于实验和炮兵技术的发展。现代,因为对武器特别是对反坦克武器和防空武器的性能提出了更高的要求,加之新兴科学技术(如多相流体力学、火药燃烧理论、电子技术和计算机技术)的发展,使内弹道学出现了一个崭新的面貌。

0.3.1 身管武器内弹道学

身管武器内弹道学在18世纪中叶以前至19世纪中叶这段时期是由经验向科学化发展的探索阶段。17世纪末、18世纪初大多数国家最后地将炮兵作为一个特种兵种列入了军队编制,从此消失了中世纪炮兵的狭隘性质。但是,人们主要还是通过经验和试验来确定弹丸及火药的质量、火炮尺寸与初速、射程的关系,很多国家在减少口径、改善装填方式(如使用药包装药)和火炮结构、提高战斗性能方面作了大量试验,其结果是减少了口径的繁杂性及经验规则的不定性;1740年鲁宾斯(Robins)建立了测定弹丸速度的“弹道摆”,并且开始把弹道

学区分为内、外弹道学，明确了它们各自的研究任务；在炮兵科学方面，对弹丸飞行和空气阻力的研究取得了进展。

从 19 世纪中叶到 20 世纪中叶，人们对射击现象有了正确的认识，并进行了规律性研究，在此基础上建立了成熟的经典内弹道学。这一时期出现了线膛炮和无烟火药，火炮性能有了极大的提高，同时热力学、化学和气体动力学的发展促进了内弹道学的发展。在实验方面，发明了测定弹丸速度的布朗节测时仪 (Boulange chronograph, 它代替了老的弹道摆)；诺贝尔 (Noble) 发明了铜柱测压器，用以测定火药燃气的压力；维也里 (Vieille) 使用密闭爆发器研究火药的燃烧规律；从 1930 年左右又开始使用压电法测定射击时膛内的压力~时间曲线；从 50、60 年代开始使用微波干涉仪测定膛内的弹丸行程~时间曲线；……这些都为内弹道研究提供了有力的手段和大量的实际资料。在理论方面，研究了火药装药的燃烧特性、弹丸的运动规律，完成了各种弹道解法，并注意到了膛内反常压力现象，几何燃烧定律、燃烧速度定律和气体状态方程等都是这一时期得到的实验方程，构成了内弹道学的理论基础。基于火药的燃烧规律性的发现，对药粒的形状特性有了仔细的研究，使用的药形越来越复杂，从粉状、粒状黑药变为立方体、圆柱体等带孔或不带孔的成型黑药柱，并进而发展成为片状、管状、圆柱形或花边形多孔粒状无烟药，能够通过药形尺寸来调整气体的生成速率，满足不同口径和威力的火炮的需要。

这一时期的内弹道理论是建立在平衡态热力学基础上的，它利用拉格朗日假设 (弹后空间气体密度沿炮膛均匀分布) 研究膛内弹道参量的平均值的变化规律。因为中等威力火炮的膛压初速不太高，相对装药量较小，弹后空间火药燃气的密度、压力及流速的梯度不大，纵向压力波的影响也可以忽略，内弹道解法和实际情况还比较接近，而且是用常微分和代数方程组求解，也比较简单。所以这些方法直到目前仍然广泛应用着。

从 20 世纪中叶起，由于现代科学技术的发展促进了内弹道学的发展，开始进入了现代内弹道学时代。在实验方面，一些过去不能测定或难以测定的膛内现象和参量能够测定了，如燃气温度、压力波动、燃气和药粒的运动、点火和弹丸挤进等瞬态过程的特性；计算机技术的广泛应用，不仅可以处理实验数据和进行辅助计算，还可用来进行弹道仿真和模拟；传统的弹道装置 (爆发器、烧蚀管等) 和靶场设施也提高到了一个新的水平。现代内弹道理论则是建立在多相流体力学和燃烧学基础上，同时研究内弹道参量随空间和时间的变化规律，能够获得更多的膛内射击过程的信息；描述的方程是偏微分方程和代数方程的组合，比较复杂，但更近于实际。当火炮的膛压、初速较高、相对装药量较大时，空间燃气参量的梯度已经增大，纵向压力波的影响不能再预忽略，必须使用现代内弹道理论加以研究。目前已经运用多相 (包括气相和固相)、多维、非定常流体力学体系来研究高膛压火炮内弹道特性、点火传火过程、膛内压力波动、膛胀和膛炸反常弹道等射击现象，并取得了成功。

此外，在实际应用方面，兵器技术的发展也提出了一系列新的内弹道问题。例如，可燃药筒是一种新型药筒，同时又是含能材料，它的不同于一般装药的特殊型体和不遵守平行层燃烧规律的疏松结构，显然会大大改变射击中的膛内弹道性能；使用密实装药可以在不增大药室容积的情况下，将装填密度由现在的不足 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 增至 $1.35\text{g}/\text{cm}^3$ ，因而大大增加装药量，但高膛压及压力波动问题也随之突出；使用随行装药和多孔粒状药能使膛压曲线平稳，提高炮膛工作容积利用系数，但炮口压力增大，装药能量利用效率下降。其它如高压火炮、中心传火管 (金属或可燃)、底排弹、火箭增程弹、冲压炮弹、低温度敏感度装药等一系列火炮、

弹丸和火药装药的发展都产生了新的内弹道问题。液体火药、电热炮、粒子炮、激光炮等新能源的应用是采用新的发射原理，因而它们的内弹道性质也就与固体火药完全不同。

0.3.2 火箭武器内弹道学

火箭武器内弹道学大体上也经历了和火炮内弹道学相类似的发展过程。

19世纪中叶之前属火箭内弹道的经验时期。火箭武器和管形火器并存（火箭约在10世纪首先在我国出现，管形火器约在12世纪出现），并且都是使用黑火药，主要依靠经验来确定药量、药形、压力和射程。火药的使用方式是以细粉、小粒状压装在燃烧室中、或压成药柱后再粘结起来，起初不带孔，后来为了增大燃烧面积制出了柱形或锥形孔。

19世纪中叶以后至20世纪30年代为火箭武器和火箭内弹道学的沉寂时期，实际上也是后来蓬勃发展的准备时期。由于线膛炮和无烟火药的出现，管形火器完全取代了火箭武器，火箭武器一度消失了。但是，仍有少数的先驱者从事火箭技术的改进（如设法提高射击密集度），并把火箭技术转移到宇宙航行上来。俄国的齐奥尔科夫斯基（Циолковский К. Э.）在20世纪初就阐明了火箭飞行的理论，指出火箭是进行宇宙航行的唯一工具，给出了最大理想飞行速度公式，并且基于当时固体火药能量较低，不能满足宇宙航行的需要，提出了液体火箭发动机的设想、原理图和多级火箭的思想。美国的戈达德（Goddard R. H.）于1915年在火箭中试用了无烟药，并采用了拉瓦尔（Laval）喷管，在1926年成功地发射了世界上第一枚液体火箭。这些工作都为近代火箭技术的发展奠定了基础。

20世纪30~50年代为火箭技术复兴并高速发展的时期。一方面，在30年代，双基药用于固体火箭获得了成功（如二次大战中苏联“喀秋莎”多管火箭炮用的M-13火箭弹装药），另一方面，在二战后期，出现了液体火箭（如德国的V-2远程火箭）和装有空气喷气发动机的无人驾驶飞弹（德国的V-1）。英国及美国也对火箭技术进行了很多研究。进入20世纪50年代后，高分子复合火药、改性双基火药等高能火药相继出现，能量级别大幅度提高。在装药技术方面也有了飞速的发展，例如，出现了贴壁浇铸内孔燃烧装药，使得固体火箭发动机向着尺寸大工作时间长的方向发展；能够制造大肉厚的管形、星形、车轮形等形状复杂的装药，以药形尺寸来控制压力和推力的变化规律。这样，固体火箭武器的内弹道性质就有了跃进。现在，固体火箭发动机在战略导弹和宇宙航行中已与液体火箭发动机展开了激烈的竞争，在常规火箭弹中则几乎完全使用固体火药。在理论方面，火药的正常燃烧、不稳定燃烧、燃气在发动机中的流动特性、内弹道性能计算方法、发动机设计理论等都获得了很大发展。但是，这些都是属于经典火箭内弹道理论范畴，它认为火药在发动机中发生完全燃烧，产生均质的理想气体，没有凝聚相产物，进行一维、定常、等熵流动，内弹道性能赖以存在的基础和火炮内弹道一样，仍然是几何燃烧定律、燃烧速度定律，模型相对较为简单而实用。

20世纪60年代以后，进入了现代火箭内弹道发展阶段。已从多相、粘性、非定常、三维流动这样一种更近于实际的复杂形态来研究发动机的性能。为了提高内弹道性能，人们在工程研究上也作了很大的努力。例如，继续研制具有很高的爆热、比冲和体积比冲的高能火药，发展缓燃和超速燃烧的特种火药；在燃烧性能方面，着重研究非线性声不稳定燃烧、点火、熄火、催化作用，同时利用不干扰流场的快速诊断技术测量燃烧区域的火焰结构和流场各点的特征参量，研究燃烧机理；在装药方面，大力发展高装填密度和变推力装药，对反坦克导弹和高速动能弹采用单药室双推力发动机。因为改进发动机结构和它的工作条件，提高能量释