

TJ01  
02

31400902

4-52/14

# 现代内弹道学

金志明  
袁亚雄 著  
宋 明

北京理工大学出版社

## 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、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、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、建立质量标准、明确岗位责任,建立了由主审审查、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,成立了九个专业教学指导委员会和两个教材编审小组。以加强对兵工类专业教材建设的规划、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,力争系统配套,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为兵工专业教材的系列配套,为教学质量的提高、培养国防现代化人才,为促进兵工类专业科学技术的发展,都将起到积极的作用。

本教材由张志杰同志主审,张守中同志担任责任编委,经中国兵器工业总公司弹道专业教学指导委员会复查,兵总教材编审室审定。

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

1992年8月

# 序 言

内弹道学是武器系统设计的重要基础学科。一个多世纪以来,随着内弹道学研究的不断深入,人们对复杂的膛内射击现象有了更全面的认识。然而,近十多年,无论在理论研究或实验技术方面,是内弹道学发展最快的一个时期。这种新的发展,反映了未来战争对常规武器提出更高的要求,特别在反坦克、反导弹和防空方面,火炮武器将面临着极大的挑战。不仅要求新一代常规火炮的内弹道性能明显地优于目前的火炮,而且要求在新的发射原理研究方面有所突破,研制出新的发射武器。另一方面,现代科学技术的进步也促进了内弹道学理论的完善和更新。如多相流体力学、燃烧学、数值仿真、电子技术、光学技术及电子计算机技术等现代科学的注入,使内弹道学的面貌焕然一新。

在理论研究方面,内弹道学已不再停留在着眼于膛内平均参量变化规律的经典研究方法,而是深入到包括气相和固相的多维多相非定常内弹道理论的研究。在时间和空间上揭示内弹道参量的变化规律,给设计者提供膛内射击过程的更多信息。与此相应的数值模拟方面,已完成了一维两相、二维两相计算软件,并在武器系统设计和检验中获得了成功的应用。三维的数值模拟目前也在进行中。在实验方面,过去一些难以测试的膛内现象及其参数,如膛内药粒和燃气的运动、燃气温度、压力波现象、弹丸的挤进过程等方面的测试,现在已能够从定性和定量上完成其规律或数值的测定。膛内多维多参数的测试也取得一定的进展,这为内弹道学研究奠定了强有力的物质基础。一些采用新发射原理的火炮,如液体发射药火炮(LPG)、电热炮(ETG)和电磁炮(EMG)等,也开始进入原理性实验阶段或工程设计阶段。这些新概念武器的关键技术之一,就是内弹道循环的研究。

为了能反映当前内弹道学发展的新成果,需要有一本能适合于高等教育的教科书,比较系统地介绍这门学科的主要研究内容、研究方法及其在武器系统设计中的应用。本书共分十二章,前两章的内容属于经典内弹道学范畴,我们认为把它放在本书的前面是非常必要的,也是合乎逻辑的。尽管经典内弹道学的研究内容已经比较成熟,但它所阐述的基本概念、研究方法对于一个初学者是必需具备的。在内容选取方面,我们概括了谢列伯梁可夫(M. E. Серебряков)和贝尔(P. G. Bear)模型的优点,扼要地介绍经典内弹道学的主要研究内容及电子计算机解法。第三章介绍内弹道气动力模型的近似解法,这部分内容既是经典内弹道学的基础,又是现代内弹道学的萌芽。早在18世纪末,法国的数学家和力学家拉格朗日(J. L. Lagrange)首先用流体力学的观点研究膛内射击现象,并提出著名的拉格朗日假设,解决了平均压力、膛底压力和弹底压力之间的换算关系问题。他的研究作为现代内弹道学研究奠定了基础。第四和第五章详细地阐述现代内弹道学的核心部分,即内弹道两相流体力学理论。将近代的气固两相流理论引入内弹道学中,把膛内射击现象归结为伴随化学反应的非定常可压缩的两相流体力学问题,研究膛内弹道参量随时间和空间的变化规律。第六和第七章讨论现代内弹道学在装药设计中的应用,着重讨论与点火和装药结构有密切关系的膛内压力波问题。这种膛内压力波现象在19世纪后期由维也里(P. Vielle)所发现,但对其产生机理和定量的描述是在

本世纪 70 年代和 80 年代完成的。压力波已成为当前大口径火炮装药设计中的一个十分关心的问题。由于点火和装药结构的原因,可能产生大振幅的危险压力波,影响到武器射击安全性。第八章阐述射击的初始阶段点火和传火问题,这是现代内弹道学研究的另一个重要内容,它涉及到在高颗粒密度条件下,两相间传热和燃烧所引起的火焰波和压力波的传递以及由药床挤压而产生的应力波的传播。点火过程是整个射击过程中最复杂的一个阶段,是装药设计所要考虑的一个重要因素。第九章讨论液体发射药火炮的内弹道理论,液体发射药火炮存在某些潜在的优点而引起很多国家的重视。它虽然类似于固体发射药火炮同属于化学推进装置,但其发射原理有别于常规的固体发射药火炮,是一种新型的发射装置。液体发射药火炮的内弹道问题是属于带化学反应的气液两相非定常可压缩流体力学范畴。第十章介绍当前正在研究中的一些新型发射装置的内弹道现象,包括轻气炮、电热炮和电磁炮。著名的内弹道学家康纳(J. Corner)曾经指出,寻求新型发射原理是内弹道未来研究的重要课题之一。轻气炮和电磁炮的研究虽有长久的历史,但真正有突破性进展的还是近期的事情。这些发射装置已将弹丸加速到每秒几公里到十几公里的惊人速度。电热炮是利用电能和化学能推进弹丸的一种新型发射装置,它一问世即引起人们的普遍关注。可以预言,火炮弹道性能有质的飞跃,还有待于新型发射原理的研究成功。第十一章简要地介绍随机模拟在内弹道学中的应用。膛内射击过程实际上是一个随机过程,将随机理论引入内弹道学中也是今后研究的一个重要课题,以揭示膛内射击现象的统计规律。第十二章还介绍了炮膛的烧蚀和磨损现象。

纵观全书的内容,我们认为已基本涉及到当前内弹道学所研究的范围,给读者提供一个比较完整的现代内弹道理论的全貌。然而由于内弹道学研究的领域相当广泛,还有一些读者所关心的问题,如弹丸挤进过程与阻力、燃气的热化学计算等,还没有开展讨论。至于内弹道测试技术将在内弹道系列教材中另有专著进行详细介绍。本书在编写过程中,广泛地吸取了国内外的内弹道学家论著中最精华部分。从本书引用的参考文献的数量也足以说明集众之长是本书编写的宗旨。当然更多的内容还是作者近十多年来教学和科研的成果。后人总是站在前人的肩上开拓出新的研究领域,一代接着一代将内弹道学研究推向更高的水平。由于作者水平有限,缺点甚至错误也在所难免,望读者指正。

著 者

1990 年于华东工学院

# 目 录

主要符号表	(1)
第一章 经典内弹道学基础	(4)
§ 1.1 火炮内弹道系统	(4)
§ 1.2 火炮火药燃烧规律	(6)
§ 1.3 火药燃气状态方程	(9)
§ 1.4 弹丸运动方程	(10)
§ 1.5 能量方程及火炮系统效率	(11)
§ 1.6 内弹道基本方程的气体动力学推导	(14)
§ 1.7 内弹道零维模型——空间平均参数方程组	(17)
§ 1.8 内弹道解法及实践	(19)
§ 1.9 内弹道设计	(22)
参考文献	(24)
第二章 内弹道零维模型计算编码	(25)
§ 2.1 无量纲化的内弹道方程组	(25)
§ 2.2 龙格—库塔法在解内弹道方程中的应用	(26)
§ 2.3 特殊点的计算	(29)
§ 2.4 框图及源程序	(30)
§ 2.5 例题计算	(37)
参考文献	(38)
第三章 内弹道气动力模型的近似解	(39)
§ 3.1 引言	(39)
§ 3.2 比例膨胀假设	(39)
§ 3.3 不考虑后坐情况下弹后空间的压力分布	(42)
§ 3.4 拉格朗日假设下的弹后空间压力分布	(47)
§ 3.5 毕杜克极限解	(49)
§ 3.6 有气流流出情况下膛内压力分布	(57)
§ 3.7 考虑膛内面积变化的膛内压力换算关系	(60)
§ 3.8 分析与讨论	(65)
参考文献	(68)
第四章 内弹道准两相流体力学模型	(69)
§ 4.1 引言	(69)
§ 4.2 内弹道准两相流体力学模型	(70)
§ 4.3 $\beta=1$ 条件下内弹道气动力数学模型	(76)
§ 4.4 拉格朗日坐标下的内弹道气动力数学模型	(78)

§ 4.5	均相流内弹道气动力基本方程的特征线和特征方程	(81)
§ 4.6	混合装药内弹道气动力模型及计算	(86)
§ 4.7	空包弹发射枪榴弹内弹道气动力模型的计算	(95)
	<b>参考文献</b>	(100)
<b>第五章</b>	<b>内弹道两相流体力学模型</b>	(101)
§ 5.1	引言	(101)
§ 5.2	运动控制体及其平衡方程	(102)
§ 5.3	内弹道两相流平衡方程	(104)
§ 5.4	混合装药内弹道多相流数学模型	(116)
§ 5.5	辅助方程	(118)
§ 5.6	平衡方程的特征线及相容性方程	(130)
§ 5.7	定解条件	(136)
§ 5.8	多维两相内弹道数学模型	(137)
§ 5.9	内弹道两相流模型的数值计算	(140)
	<b>参考文献</b>	(146)
<b>第六章</b>	<b>膛内压力波现象及机理</b>	(149)
§ 6.1	引言	(149)
§ 6.2	膛内压力波形成的机理	(150)
§ 6.3	压力波实验结果的定量研究	(154)
§ 6.4	压力波动力学模拟	(159)
§ 6.5	脉冲 X 光技术探测膛内药床运动及压缩现象	(163)
§ 6.6	颗粒床应力波的一维理论	(164)
§ 6.7	影响压力波因素分析	(166)
§ 6.8	抑制压力波的技术措施	(174)
	<b>参考文献</b>	(175)
<b>第七章</b>	<b>膛内压力波的数值模拟</b>	(177)
§ 7.1	引言	(177)
§ 7.2	拟合坐标系下内弹道两相流方程组	(178)
§ 7.3	多孔介质模型	(181)
§ 7.4	压力波的数值计算方法	(188)
§ 7.5	海 30mm 火炮压力波模拟结果及分析	(194)
§ 7.6	100mm 滑膛炮压力波模拟结果	(196)
§ 7.7	小颗粒高密实装药床中压力波的数值模拟	(197)
	<b>参考文献</b>	(200)
<b>第八章</b>	<b>火炮火药的点火理论</b>	(201)
§ 8.1	点火问题概述	(201)
§ 8.2	点火模型及判据	(205)
§ 8.3	综合点火模型数值分析	(210)
§ 8.4	黑火药的点火性能	(217)

§ 8.5 中心点火管数学物理模型及计算 .....	(219)
参考文献 .....	(224)
<b>第九章 液体发射药火炮内弹道理论 .....</b>	<b>(225)</b>
§ 9.1 引言 .....	(225)
§ 9.2 液体燃料的物理化学性能 .....	(226)
§ 9.3 液体发射药火炮的内弹道循环 .....	(230)
§ 9.4 再生式液体发射药火炮内弹道零维模型 .....	(235)
§ 9.5 再生式液体发射药火炮内弹道拉格朗日问题 .....	(243)
§ 9.6 计算倒题 .....	(246)
§ 9.7 再生式液体发射药火炮气液两相流内弹道数学模型 .....	(248)
§ 9.8 液体发射药火炮的点火 .....	(253)
参考文献 .....	(256)
<b>第十章 超高速火炮内弹道理论 .....</b>	<b>(257)</b>
§ 10.1 影响弹丸初速的因素分析 .....	(257)
§ 10.2 弹丸最大可能速度 .....	(258)
§ 10.3 膛内气体压力扰动的传播 .....	(261)
§ 10.4 超高速火炮的理想工质 .....	(264)
§ 10.5 二级轻气炮工作原理及数学模型 .....	(267)
§ 10.6 电热炮的内弹道循环 .....	(272)
§ 10.7 电磁炮的发射原理 .....	(277)
§ 10.8 恒压炮内弹道理论 .....	(283)
参考文献 .....	(288)
<b>第十一章 内弹道循环随机模拟 .....</b>	<b>(290)</b>
§ 11.1 膛内射击过程的随机现象 .....	(290)
§ 11.2 蒙特卡罗法在内弹道随机模拟中的应用 .....	(295)
§ 11.3 计算举例 .....	(298)
参考文献 .....	(299)
<b>第十二章 炮膛的烧蚀与磨损 .....</b>	<b>(301)</b>
§ 12.1 历史回顾 .....	(301)
§ 12.2 评定身管寿命的弹道指标 .....	(302)
§ 12.3 炮膛烧蚀的现象与特征 .....	(302)
§ 12.4 对火炮内膛烧蚀机理的分析 .....	(305)
§ 12.5 研究身管烧蚀的实验技术 .....	(307)
§ 12.6 减小火炮烧蚀的方法 .....	(308)
参考文献 .....	(314)

## 主要符号表

$A$	膛膛截面积,控制体外边界面积
$A_g, A_p$	分别为气相、固相所占据的控制体外边界面积
$a$	固相音速,拉格朗日变数
$B$	装填参量
$b$	药宽的一半,燃速系数
$c$	比热容,音速
$c_v$	定容比热容
$c_p$	定压比热容
$c^*$	弹性多孔介质中气体中的音速
$D$	扩散系数
$d$	火炮口径,药粒孔径,球形颗粒直径
$E$	燃气内能
$e, e_g$	气体比内能
$e_p$	固相比内能
$E_p$	火药潜能
$F_r$	阻力合力
$f$	火药力,单位体积相间阻力
$f_B$	点火药火药力
$h$	比焓,放热系数
$I_k$	压力全冲量
$k$	比热比,等熵指数
$k_t$	气体导热系数
$k_p$	多孔介质渗透率,火药导热系数
$L$	从膛底算起的弹丸位置
$l$	弹丸行程,药粒长的一半
$l_g$	弹丸全行程长
$l_o$	药室容积缩径长
$l_\phi$	药室自由容积缩径长
$M$	活塞质量,弹丸虚拟质量
$m$	弹丸质量,多方指教
$N_u$	努塞尔数
$n$	燃速指数,多孔火药孔数
$Pe$	贝克莱特数



$P_r$	普朗特数
$p$	压力
$p_b$	弹底压力
$p_m$	最大压力
$p_t$	膛底压力
$p_0$	启动压力平均压力
$\bar{p}$	平均压力
$Q$	火药燃烧释放的能量
$q$	热流密度, 对流换热量
$R$	气体常数, 颗粒间应力
$\bar{R}$	通用气体常数
$R_e$	雷诺数
$r$	径向坐标
$\dot{r}$	燃烧线速度
$S$	药粒燃烧表面积, 枪膛截面积
$S_1$	药粒初始表面积
$T$	气体温度
$T_1$	定容燃烧温度
$t$	时间
$u$	气流速度
$u_g, u_p$	分别为气相、固相速度
$u_{\max}$	逃逸速度
$\bar{u}_1$	燃速系数
$V$	药粒已燃体积, 控制体体积
$V_0$	药室容积
$V_1$	药粒初始体积
$v$	弹丸平移速度, 比容
$v_g$	膛口速度
$v_j$	弹丸极限速度
$w_1$	弹丸平移运动功
$x$	空间坐标
$Z$	相对坐标
$z$	相对已燃厚度, 相对坐标 $x/L$
$\alpha$	余容
$\gamma_g$	有效弹道效率
$\gamma'_g$	弹道效率
$\Delta$	装填密度
$\delta$	药粒已燃厚度

$\delta_1$	药厚的一半
$\theta$	比热比减 1
$\eta_s$	示压效率
$\eta_r$	火药相对燃烧结束点位置
$\eta_w$	装药利用系数
$\Delta$	相对行程长
$\lambda, \lambda_s$	火药形状特征量
$\mu$	火药形状特征量, 气体分子量
$\mu, \mu_t$	动力粘性系数
$\rho$	混合流体密度, 燃气密度
$\rho_g, \rho_p$	分别为气相、固相分密度
$\hat{\rho}_g, \hat{\rho}_p$	分别为气相、固相物质密度
$\Sigma$	两相交界面面积
$\sigma$	火药相对燃烧表面积
$\tau$	温度比 $T/T_1$
$\varphi$	空隙率, 次要功系数
$\varphi_1$	阻力系数
$\chi, \chi_s$	火药形状特征量
$\psi$	火药相对已燃体积
$\omega$	装药量
$\omega_B$	点火药装药量
$\omega_{yR}$	已燃火药量

# 第一章 经典内弹道学基础

枪炮内弹道学是研究射击过程中弹丸在膛内运动阶段所产生的各种现象的科学。它的产生,以 1740 年鲁宾士(Robins)采用弹道摆测速为标志,至今已有 200 多年历史。19 世纪 60 年代后,诺贝尔(Noble)发明的铜柱测压技术、列萨尔(Resal)发表的弹丸火药气体的能量方程以及维也里(Vielle)提出的火药平行层几何燃烧模型奠定了经典理论的基础。近半个世纪以来,数学、力学、物理学、化学、计算机技术、高速瞬态测试技术等领域的成就,大大促进了内弹道学的发展,使它日趋成熟,为火炮和弹药的研究和发展,提供了理论和实践的基础,成为现代兵器学科体系中一门必不可少的应用科学。

## § 1.1 火炮内弹道系统

### 1.1.1 身管武器主要部件介绍

本节以最典型的线膛火炮为例来介绍身管武器的几个主要部件。

#### 一、身管

火炮身管是一根能承受极高压力的厚壁金属管,通常在接收发射药点火的一端密闭。它的大致结构如图 1-1 所示。在射击过程中,身管为弹丸提供了支撑和导向作用。受身管限制的高压燃气,膨胀作功,给弹丸以推进作用。

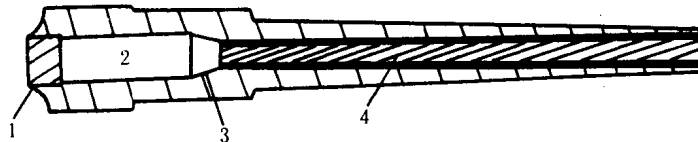


图 1-1 典型身管

1—炮闩; 2—药室; 3—坡膛; 4—线膛

身管中炮闩前端容纳装药及其元件的部分称为药室。药室前端呈锥形部分区域称为坡膛,向前接合于膛线起始部。内弹道学中,通常所说的药室容积是指弹丸装填到位后,弹后部药室中放置装药的空间容积。

根据弹丸飞行稳定的不同方法,炮膛结构也完全不同。对于弹丸旋转稳定的火炮,炮膛内刻有膛线,这是多条螺旋形的凹槽,导引弹丸在特定的速度下产生旋转。对于弹丸用尾翼稳定的火炮,炮膛内没有膛线,在弹丸挤进和运动的过程中,它的受力情况与线膛火炮的情况也稍有不同。

#### 二、火药

火药是火炮射击的能源,它是具有一定形状尺寸的固体物质(如图 1-2 所示),当给予适

当的外界作用时,它便能在没有任何助燃剂参与下,急速地发生化学变化,有规律地放出大量气体和热能。

火药通常被分为两大类:一类是混合火药,一类是溶塑火药。混合火药是将氧化剂、可燃物、粘合剂和其它附加物先机械混合再压制成一定形状而制成。火炮中最常用到的混合火药是黑火药,它的主要成分是硝酸钾、硫和碳。这是历史上最早使用的火炮发射药,后来由于溶塑火药发明而被取代,但目前仍被广泛用于点火系统中。

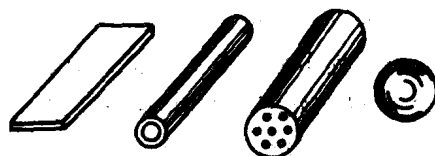


图 1-2 几种典型药形示意图

溶塑火药的基本成分是硝化纤维素,它被溶解在某些溶剂中,变成可塑性材料后压制加工成所需的形状。根据所用的溶剂不同,溶塑火药还分为单基药、双基药和三基药。在单基药中唯一存在的能量基是硝化棉,其它的成分是用来保持安定和控制燃烧率的。这种火药,在生产过程中需要将溶剂排除,因此它的厚度就不能太厚,目前仅用于中小口径的武器中。

双基药用硝化甘油作为溶剂,硝化甘油是一种高能的爆炸物,因此双基药燃烧的火焰温度较高,能产生更多的热能,保留较高的热力效率。由于双基药制造过程中不需要把溶剂排除,它的生产周期较短,并可以做得较厚,可用于较大口径的火炮中。双基药的成分配比可在较大范围内调整,在能量上能满足多种弹道性能的要求。它的缺点是对膛内壁的烧蚀作用比较厉害,在储存过程中硝化甘油容易析出,影响安定性。

为了努力维持双基药易制造的优点又限制其高烧蚀性的缺点,故加入第三种成分硝基胍,这就是三基药。因为硝基胍是一种“冷燃”火药,它使三基药的燃烧温度基本上与单基药相似,但仍保持较大的推进潜能。

典型的火药能量特征量是定容燃烧温度,它是火药在绝热、定容条件下燃烧,其生成物气体所具有的最高温度。在内弹道学中还常用到火药力的概念,它是火药燃气的气体常数与定容燃烧温度的乘积,即

$$f = RT_1 \quad (1-1)$$

其中  $f$  表示火药力,  $R$  是火药燃气的气体常数,而  $T_1$  是定容燃烧温度。火药力的大小与单位质量火药的全储能量成比例,它标志了火药作功能力的大小。

### 三、 弹丸

弹丸是射击中用于直接完成战斗任务的弹药部件。典型的弹丸结构如图 1-3 所示。通常,滑膛炮的弹丸装有尾翼以保持飞行稳定。线膛炮弹丸的弹体上则嵌压有软金属或非金属的弹带,它在膛内起定心作用,并使弹丸同炮膛紧密配合以防燃气泄漏,弹带嵌入膛线后,使弹丸产生旋转。为了适应现代战争的需要,现在已出现了用线膛火炮发射尾翼稳定脱壳穿甲弹的新型弹种。

#### 1.1.2 膛内射击过程

射击过程从击发开始,通常火炮上采用机械或电的作用将底火或火帽引发。底火引发后,它迅速点燃点火药(黑火药),点火药燃烧释放出夹有灼热固体粒子的高温气体,先点燃临近的发射药,继而点燃全部发射药。

火药着火后,它会不断释放出高温的燃气,这时膛内已有了一定的高温高压环境,气体要

膨胀,就要推着弹丸向前运动。由于弹带尺寸过盈,它首先使弹带挤刻成与膛线吻合的沟槽,这个过程就称为挤进过程。在经典内弹道理论中,常常把这个过程看作是瞬时完成的。

从弹丸挤进膛线开始一直到出膛口为止的过程是内弹道循环的主要过程。这个过程中相伴着火药的燃烧、弹丸运动、弹带与膛壁间摩擦、燃气及未燃完火药的运动、炮身后坐、燃气对身管的传热等各种复杂的现象。一方面火药的燃烧使弹后气体压力不断升高,另一方面弹丸运动使弹后空间增大,又起了降低压力的作用。这两种对立过程的净效应,使膛内的压力开始上升,达到一个峰值之后,又呈下降趋势。这个规律可以从图 1-4 和 1-5 所表示的压力随时间和弹丸行程的变化曲线中看出。弹丸到达膛口后,由于燃气的继续作用,使弹丸继续加速,这个过程通常被称为后效时期。后效时期结束时,弹丸才达到最大速度。

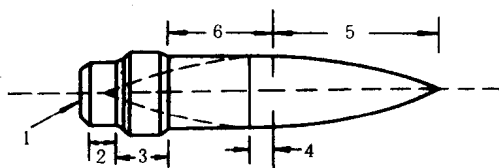


图 1-3 典型弹丸  
1-弹底; 2-弹底部; 3-弹带;  
4-定心部; 5-蛋形部; 6-本体

膛内的压力开始上升,达到一个峰值之后,又呈下降趋势。这个规律可以从图 1-4 和 1-5 所表示的压力随时间和弹丸行程的变化曲线中看出。弹丸到达膛口后,由于燃气的继续作用,使弹丸继续加速,这个过程通常被称为后效时期。后效时期结束时,弹丸才达到最大速度。

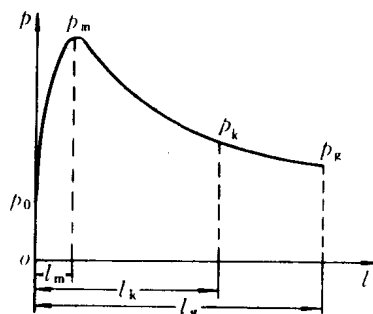
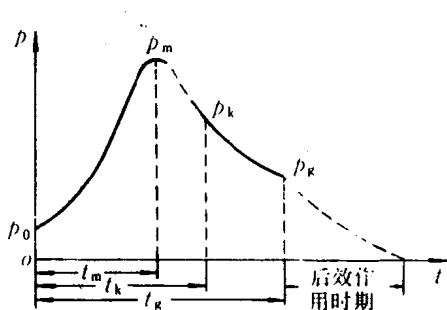


图 1-4 射击过程中压力随时间的变化曲线 图 1-5 膛内压力-行程曲线

## § 1.2 火炮火药燃烧规律

### 1.2.1 几何燃烧规律

法国弹道学家维也里最早对高压条件下火药燃烧规律作了深入研究,提出了一种火药的几何燃烧模型。这个模型认为:单一装药的每颗药粒都有相同的几何尺寸和理化性能;所有药粒表面同时着火,燃烧中同一瞬时,各燃烧表面的燃烧线速度都相同;从而所有药粒都按平行层或圆心层的规律逐层燃烧。以上假设的成立,才有可能用对一颗药粒的研究来代替对膛内相同条件下所有药粒的研究。它是经典理论中研究火药燃烧规律的基础,被称为几何燃烧定律。

应该指出,炮膛中火药的实际燃烧情况跟上面的模型是有差异的。例如:在点火压力为 2~5MPa 时,火药引燃过程不是瞬时的;火药成分、表面粗糙度的差异,使点燃的难易程度也不一样;在燃烧过程中,具有窄长孔道的多孔火药,在孔内、外的燃烧速度不一样;由于制造工艺的限制,火药均匀性及形状尺寸的一致性也不能得到充分的保证。在用理论模型预测内弹道过

程时,应考虑模型假设所带来的误差。

### 1.2.2 形状函数

按照几何燃烧定律,不同形状的火药在燃烧过程中,它的相对已燃体积、相对燃烧表面积与相对已燃厚度之间都存在着一一定的函数关系。从分析简单形状火药的几何关系着手,可推得通常情况下的这些函数关系式为

$$\psi = \chi z(1 + \lambda z + \mu z^2) \quad (1-2)$$

$$\sigma = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2 \quad (1-3)$$

这里  $z$ 、 $\sigma$ 、 $\psi$  分别为火药的相对已燃厚度、相对燃烧表面积和相对已燃体积,它们的定义式分别为

$$z = \frac{\delta}{\delta_1} \quad (1-4)$$

$$\sigma = \frac{S}{S_1} \quad (1-5)$$

$$\psi = \frac{V}{V_1} \quad (1-6)$$

其中  $\delta_1$  表示药粒初始厚度的一半,  $\delta$  为药粒已燃厚度,  $S_1$  为药粒初始表面积,  $S$  为药粒燃烧表面积,  $V_1$  为药粒初始体积,  $V$  为药粒已燃体积。  $\chi$ 、 $\lambda$ 、 $\mu$  被称为火药的形状特征量。公式(1-2)、(1-3)称为形状函数。

根据燃气生成猛度的不同,可以将火药分为渐减性燃烧火药、中性燃烧火药和渐增性燃烧火药。由它们的初始形状尺寸所决定的燃烧的几何特性都可在形状特征量中反映出来。

在渐减性燃烧火药中,若用  $b$  表示药宽的一半,  $l$  表示药长的一半,并定义

$$\alpha = \frac{\delta_1}{b}$$

$$\beta = \frac{\delta_1}{l}$$

它的形状特征量则可用下面式子表达

$$\begin{cases} \chi = 1 + \alpha + \beta \\ \lambda = -\frac{\alpha + \beta + \alpha\beta}{1 + \alpha + \beta} \\ \mu = \frac{\alpha\beta}{1 + \alpha + \beta} \end{cases} \quad (1-7)$$

在渐增性燃烧火药即多孔火药中,考虑多孔火药的孔数为  $n$ ,药粒孔径为  $d$ ,药粒外径为  $D$ 。若定义

$$Q_1 = \frac{D^2 - nd^2}{(2l)^2}$$

$$\Pi_1 = \frac{D + nd}{2l}$$

火药燃烧分裂前的形状特征量可以表达为

$$\begin{cases} \chi = \frac{2\Pi_1 + Q_1}{Q_1} \beta \\ \lambda = \frac{n-1-2\Pi_1}{Q_1 + 2\Pi_1} \beta \\ \mu = -\frac{n-1}{Q_1 + 2\Pi_1} \beta^2 \end{cases} \quad (1-8)$$

多孔火药在烧去它的名义厚度时,火药发生分裂,此后的燃烧呈渐减性的特点。如果定义  $\rho$  为分裂时刻药粒横截面内切圆半径的加权平均值,相对已燃厚度的定义式应表达为

$$\xi = \frac{\delta}{\delta_1 + \rho} \quad (1-9)$$

此时形状函数的表达式与前面稍有不同,可写成二项式的形式,即

$$\begin{cases} \psi = \chi_s \xi (1 + \lambda_s \xi) \\ \sigma = 1 + 2\lambda_s \xi \end{cases} \quad (1-10)$$

由简单的运算可求得形状特征量  $\chi_s, \lambda_s$  表达式为

$$\begin{cases} \chi_s = \frac{\psi_s - \xi_s}{\xi_s - \xi_s^2} \\ \lambda_s = \frac{1 - \chi_s}{\chi_s} \end{cases} \quad (1-11)$$

式中

$$\xi_s = \frac{\delta_1}{\delta_1 + \delta}; \psi_s = \chi(1 + \lambda + \mu).$$

在实际应用中,形状函数都可以写成简化的二项式形式

$$\psi = \chi z (1 + \lambda z) \quad (1-12)$$

$$\sigma = 1 + 2\lambda z \quad (1-13)$$

### 1.2.3 燃速公式

固体火药药粒的缩减速率由燃烧线速度给出。它代表单位时间内,药粒燃烧表面上任意一点沿其法线方向上所燃完的厚度。影响燃烧线速度的因素很多,如火药成分、初温、密度、环境气流速度、压力等都会对它产生影响。所以,要建立一个包括所有因素的燃速方程是十分困难的。对于某种确定的火药,在初温一定时,其燃烧线速度  $\dot{r}$  随压力  $p$  变化的关系式通常采用如下三种形式

$$\dot{r} = \bar{u}_1 p \quad (1-14)$$

$$\dot{r} = \bar{u}_1 p^n \quad (1-15)$$

$$\dot{r} = \bar{u}_1 p + b \quad (1-16)$$

其中  $\bar{u}_1, b$  称为燃速系数,它与火药性质及初温等因素有关; $n$  为压力指数,通常与火药性质以及压力范围等因素有关。可以看出式(1-14)是式(1-15)在  $n=1$  情况下的特例。有的文献中,将燃速公式表达成综合式

$$\dot{r} = \bar{u}_1 p^n + b \quad (1-17)$$

## § 1.3 火药燃气状态方程

### 1.3.1 关于状态方程的形式

理想气体状态方程几乎是所有被用于内弹道计算中的状态方程的出发点。这个方程可表达为

$$pv = RT \quad (1-18)$$

其中  $p$  为气体压力,  $v$  为比容,  $T$  为气体的温度,  $R$  称为气体常数。对于不同的气体,  $R$  值是不同的。

从物理学的观点看,理想气体状态方程描述了在热力学平衡条件下看作质点的气体分子对容器壁的宏观压力作用。它既没有考虑气体分子所占体积的影响,也没有考虑分子间的相互作用。如果考虑这两个因素的修正,实际气体状态方程可采用范德瓦耳(Van Der Waals)方程

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v-a) = RT \quad (1-19)$$

其中  $a$  为气体分子间引力修正量,  $\alpha$  为气体分子体积修正量。在内弹道学中,  $\alpha$  被称为余容。

火药燃气是实际气体的一种,它同时具有高温和高压两个特点。高温气体即使在密度较大时,分子间的引力影响相对来说很小,所以(1-19)式中  $\frac{a}{v^2}$  项可以忽略。但在压力很高时,必须考虑余容的修正。这就引出方程

$$p(v-\alpha) = RT \quad (1-20)$$

这个方程叫做诺贝尔-阿贝尔(Noble-Abel)方程,是经典内弹道学中被普遍采用的火药燃气状态方程。

### 1.3.2 膛内火药燃气状态方程

射击过程中,膛内弹丸后部火药燃气所占的自由容积是在不断变化的,影响其大小的因素有初始的药室容积、弹丸运动导致的容积增长量、未燃完火药所占的容积及燃气余容,此时状态方程的形式应为

$$p\left[V_0 - \frac{\omega}{\rho_p}(1-\phi) - \alpha\omega\phi + Sl\right] = \omega\phi RT \quad (1-21)$$

其中  $V_0$  为药室容积,  $\omega$  为装药量即每发弹药所装填的发射药质量,  $\rho_p$  为火药的密度,  $S$  为炮膛断面积,  $l$  为弹丸行程即在所考虑瞬间弹丸在膛内移动的距离。

可以看出,在方程(1-21)式中,若令弹丸行程  $l$  为零,即可得到固定容积中的燃气状态方程

$$p\left[V_0 - \frac{\omega}{\rho_p}(1-\phi) - \alpha\omega\phi\right] = \omega\phi RT_1 \quad (1-22)$$

其中  $T_1$  是火药定容燃烧温度。在弹丸启动之前药室及密闭爆发器内的压力变化情况都可以用(1-22)式来描述。火药全部燃完时,密闭容积中的压强达到最大值。此时

$$p_m = \frac{\omega RT_1}{V_0 - \alpha\omega} \quad (1-23)$$



这里分别引进以下参量

$$\Delta = \frac{\omega}{V_0} \quad (1-24)$$

$$l_0 = \frac{V_0}{S} \quad (1-25)$$

$$l_\psi = l_0 \left[ 1 - \frac{\Delta}{\rho_p} - \left( \alpha - \frac{1}{\rho_p} \right) \Delta \psi \right] \quad (1-26)$$

其中  $\Delta$ 、 $l_0$ 、 $l_\psi$  分别为装填密度、药室容积缩径长和药室自由容积缩径长，考虑到  $RT_1$  即为火药力，则(1-21)式、(1-22)式、(1-23)式分别可写成

$$Sp(l_\psi + l) = \omega\psi RT \quad (1-21a)$$

$$Spl_\psi = f\omega\psi \quad (1-22a)$$

$$p_m = \frac{f\Delta}{1 - \alpha\Delta} \quad (1-23a)$$

## § 1.4 弹丸运动方程

弹丸运动是在火药气体的推动力和阻力的作用下进行的。它在膛内的受力情况如图 1-6 所示，其中  $p_b$  为作用于弹丸底部的燃气压力， $Sp_b$  为提供弹丸前进运动的推力， $F_N$  为垂直于膛线侧面的合力， $F_D$  为膛线与弹带间的摩擦阻力， $\alpha$  为膛线的缠角。设弹带与膛线间的滑动摩擦系数为  $\nu$ ，则有

$$F_D = F_N \nu$$

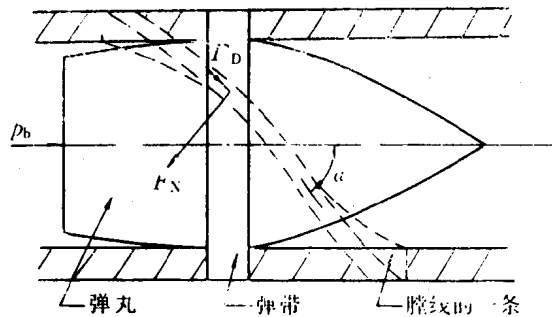


图 1-6 弹丸运动期间作用  
于弹丸上诸力的自由体图解

$F_N$  和  $F_D$  在轴向的分力分别为  $-F_N \sin\alpha$  和  $-\nu F_N \cos\alpha$ 。如果忽略弹丸前空气柱的阻力，则弹丸在前进运动中所受的阻力合力为

$$F_r = F_N (\sin\alpha + \nu \cos\alpha) \quad (1-27)$$

牛顿第二定律可以表述为

$$Sp_b - F_r = m \frac{dv}{dt}$$

其中  $m$  为弹丸质量， $v$  为弹丸的平移速度。上式可写成