

实用两相流内弹道学

周原雄 王升展 著

流内弹道学

王升展 著

兵器工业出版社

兵器工业出版社

TJ012
06

实用两相流内弹道学

周彦煌 王升晨 著

HK32/13



C0457351

兵器工业出版社



-30137902-

内 容 提 要

本书采用现代两相燃烧理论的观点与方法,从工程应用的角度,全面而系统地论述了火炮膛内高压瞬态点火与燃烧过程,并涉及了有关的多个领域。

本书第一章到第四章主要介绍两相流内弹道理论基础、数值计算、点火理论、挤进过程、气-固相间作用及其特殊流动和燃烧现象。第五、六两章结合十种工程问题,给出了具体理论模型与应用方法。

本书可供枪炮、火药、火药火箭、内弹道及装药设计专业及其与两相燃烧有关的专业的高年级学生、研究生、教师、科研工作者及工程技术人员使用与参考。

实 用 两 相 流 内 弹 道 学

周彦煌 王升展 著

*

兵器工业出版社 出版发行

(北京市海淀区车道沟10号)

各地新华书店经销

国营五三一印刷厂印装

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 22 字数: 540千字

1990年3月第1版 1990年3月第1次印装

印数: 1~1200 定价: 15.40元

ISBN 7-80038-164-1/TJ·21

序

在我国当前的内弹道学领域中，这是一本比较难得的书。之所以难得，表现在以下三个方面。

首先，它的出版标志着现代内弹道学在我国的崛起。为了说明这一点，有必要简述一下内弹道学的发展历史。以固体发射药为能源的内弹道学，随着枪炮、火药火箭等常规武器的发展，随着热力学、气体动力学、传热学等基础学科的发展，随着电子计算机的发展，也随着测试手段的发展，而大大发展起来。内弹道学成为一门独立的应用技术性学科，总的历史也不过二百多年的时间。本世纪50年代以前，内弹道学还只是以工程热力学为基础，以手工计算（包括机械式计算机）为手段，以测最大膛压和初速为主要测试内容，再加上一系列不完善但基本可用的假设，建立起一整套内弹道学的理论和计算方法，我们不妨称为经典内弹道学，它有效地解决了初速在1000m/s左右以内的实际内弹道问题。世界上许多有名的学者在这方面做出过贡献。经典内弹道学在解决实际问题时大致可分为先验式方法和后验式方法两类：先验式方法是以理论为指导（当然这种理论是从无数实践与基础性试验中提炼与抽象出来的），而实验只是作为检验理论是否有效的手段；反之，后验式方法是以某些型号的武器的弹道实验曲线或数据作为基础，用拟合系数的方法求出适宜的经验式，然后再应用于解类似武器的内弹道问题上，所以这种方法较直感和原始，虽有一定准确性，但其应用的局限性也可想而知，同时它对新武器的弹道设计缺乏预见性。先验式方法又可称理论解法，后验式方法则称为半经验或经验解法。从应用的普遍性和预见性来讲，应是追求先验式方法为主，但后验式方法由于其简便也被人所采用；不过有时有人把自己的后验式方法挂上理论解法的头衔，则并非一定妥当。

第二次世界大战结束后，特别是六十年代以来，由于三高（高装填密度、高膛压、高初速）火炮的出现，经典内弹道解法已难应付局面；人们开始把气体动力学应用在内弹道学中，同时由于高速电子计算机的使用，弹道测试手段也比以前大有进展，内弹道学的面貌逐渐改观，我们不妨称之为现代内弹道学的雏形已经形成，它把经典内弹道学难以解决的问题，逐步提到日程上加以探索或深入研究，其中两相流理论是最有代表性的。经典内弹道学对膛内的气体流动问题，只是简单地利用拉格朗日假设来考虑；对膛内的装药（固相）流动问题，只近似地考虑装药运动所消耗的能量。现代内弹道学放弃了这些简单的处理方法，不但把气体动力学引用进来研究膛内气流问题，而且把燃烧期间粒状装药（固相）也当作连续介质来考虑，它在膛内的运动情况也用流体力学的方法来处理。用这样的办法研究膛内的气固两相问题，应该说比经典方法是较接近于膛内的实际情况的。所以七十年代初美国出现许多有关两相流理论的文章，决不是偶然的。两相流理论，至少在目前，可以说是现代内弹道学的核心。因此我们说这本“实用两相流内弹道学”的出版标志着现代内弹道学在我国的兴起。

其次，这本书可以说是这个课题组十一年的工作总结。课题组的同志在这方面下了很大功夫，始终努力不懈；在条件相当困难的情况下做出很大成绩，是十分难得的。有一件事始

终使我记忆犹新：大约在1975年春末，我那时的处境还十分狼狈；在十年浩劫刚开始的时候，我一家被勒令连夜搬到一间没有厨房的平房中，以后受尽了各种生死折磨，生活已毫无意义，随时听候无法预料的命运的降临。一天，突然有个年青的陌生人闯入这间凌乱拥挤的小屋来找我，真使我一家惊惶不定，由于来人自我介绍，态度和蔼，我们的心神才稍稍安定下来。此人便是202研究所的殷鹤宝同志，原来他是来向我谈内弹道气体动力学原理中一些问题，介绍他们的工作打算来征求意见的。其实当时我已荒学多年，更无心思，他等于问道于盲。不过他的光临也的确令我触景生情，就好像看到在学术的废墟上已有新苗在成长，这的确减轻了我当时的悲观绝望情绪。此后，课题组的周彦煌同志、王升晨等同志也和我有过多次接触，几年来多少了解一些他们课题组的情况。这里有一点必须说明：虽然我的年岁比他们大得多，虽然我也情不自禁地鼓励他们的工作，但在科研的前进道路上，我是无能力置喙的，因为他们早已走在前面，我反而从他们那里得到有关的科学信息，学习到一些东西。他们的研究开始是吸收国外的一些先进内容，加以消化，在部和所的支持下逐步开展工作，以后所取得的成果主要是他们自己努力的结果。因为他们的课题在国内可以说是首创，在当时也得不到同行们的重视；正是由于他们不畏艰辛，更乘十一届三中全会以后的东风，使他们在科研上有机会发挥了作用。本书的出版充分说明他们已初步闯出我国现代内弹道学的路子来。从一开始，他们可以说是白手起家，所以是十分难得的。

第三，结合我国的具体情况，走创新和实际应用的道路，是本书之所以难得的最重要方面。这个课题组的整个工作是围绕建立两相流理论模型、数值计算、基础试验和实际应用四个方面进行的。他们的工作按时间虽分两个阶段进行，但内容也无法截然分开，不过作为第二阶段的近四年来的工作，进展速度加快了，这主要因为已累积了第一阶段工作的经验，同时也明确了这阶段的工作目标：“尽快使两相流内弹道理论付之于工程应用”所致。为此，他们对实际应用时所必需解决的下列专题，做了大量的实验研究和理论研究，如火药点火理论、弹丸挤进阻力、膛内压力波动规律、火药热物性参量、气固两相的相间阻力、小孔流量系数、两相流的边界条件、药粒碰撞破裂后对燃烧规律的影响等。其中前三项在经典内弹道学中是老大难问题，但在弹丸速度较低时，一般用简单的假设可以把困难掩盖过去。两相流理论为了要解决高速弹丸的内弹道问题，便不能用简单假设来回避实际情况。虽然课题组对此等问题的研究尚有待深入，但他们敢于碰硬，表现了创新精神。其他大部分专题是两相流理论所特有的，他们的创造性研究成果，和我看到的有关国际弹道文献相比，有的可以说水平是相当的。

在应用方面，本书举出十个例证。其中，装药结构问题在内弹道学中是多变和不易处理的问题，而例子说明对最常用的中心点火装药结构和底部点火装药结构，应用两相流理论都得到一定程度满意的结果；有的例子讨论了压力波问题；有一例子甚至对身管烧蚀及寿命估算问题也触及到了；一句话，凡内弹道学领域中较麻烦的问题他们都有挑战精神，敢于突破，这种精神是难得和可贵的。当然，新的有实际意义的例证，在今后的实践中还会不断地得到充实的。

总之，本书的出版为我国内弹道学界展现出一幅崭新的、既有理论又有应用的可喜景象，它是我国中青年科学工作者经过十一年的辛勤劳动的结果。它的丰富内容将提供给决策者和同行们极有价值的参考，同时我也希望读者指出它的不足或不完善之处（例如作者本人亦认识到，本书只考虑一维两相流理论，而未涉及两维和三维问题的计算，这点是落后于国际水

平的),可使作者明确今后的努力方向;读者对书中有的问题有不同看法,也可以通过争鸣加以完善和补充。可以肯定:无论做为参考还是争鸣,本书都具有社会效益,它将大大有助于我国兵器科学的发展。

谢 庚

1986年9月

作者序言

枪炮是以火药为发射能源的古老武器。由于其发射装置种类繁多，加上膛内特殊的燃烧环境和抛射式做功方式，使得它的设计理论的复杂性不亚于其他类型的热机。就内弹道过程来说，这种瞬变高压条件下的点火燃烧现象，其实验技术、理论分析和数学描述，确实不是一件易事。

因此，我们不难理解，直到20世纪60年代，描述火炮膛内燃烧及做功过程的内弹道理论，仍停留在对弹后整个空间采用热力学准平衡态假定的简化模型基础上，而且只限于几种典型枪炮内弹道问题的应用。大约到了70年代，航空和空间技术领域内的燃烧理论及燃烧技术取得了重大发展，激起了兵器技术领域内弹道及发射药专家们对火炮膛内点火和燃烧研究的兴趣。近十几年来，枪炮膛内两相流动及装药点火和燃烧问题成了流体力学及燃烧理论与技术领域极其活跃的园地，每年都有大量的论文和报告发表。涉及的范围很广：从各类火药(推进剂)性能及燃烧机理的研究到点火器、火炮发射药装药及火箭发动机内的两相燃烧流动；从高压状态方程、高压实验技术，到弹丸挤进理论及内弹道优化设计；从气-固两相间的相互作用到膛内气流及弹带对身管的传热和摩擦作用；从初始内弹道问题、压力波形成原因研究，到弹丸出炮口的扰动；从步枪空包弹发射枪榴弹，到密实装药中的燃烧转爆轰问题；几乎应有尽有。

对于这些新近发展起来的、以涉及装药点火和燃烧全过程为主要标志的两相流内弹道理论及装药燃烧技术，虽在有关的教科书及专著中作了归纳和介绍，但由于种种原因，有的将全书的中心放在膛内流动问题上，涉及装药点火和燃烧的内容较少；有的缺乏系统性和连续性。因此，在一定意义上说，全面系统地论述近十几年两相流内弹道理论及其工程应用的专著，至今仍是空白。此外，对于一些内弹道实践中经常遇到的问题，如弹丸初期挤进问题，密闭容器中的压力波动问题，弹丸在膛内遇到异物(如炮油等)引起胀膛问题，空包弹发射枪榴弹问题，密实装药中燃烧转爆轰的问题等等，尚还缺少全面阐述。

我们撰写本书的目的，主要是结合我们从事枪炮膛内两相流内弹道理论研究及应用中所作的工作，配合当前和未来近期内有关项目研制的需要，为同行的工程技术人员提供一本运用现代内弹道理论的实用参考书。对于内弹道及装药点火和燃烧过程中出现的各种疑难问题，尽可能作了深入浅出的解释，并且尽可能详尽地提供各类计算实例，尽可能地做到理论联系各种身管武器研制的需要。我们希望这本书能为现有枪炮内弹道学及装药性能改进和新研制的火炮火力系统中疑难问题的解决贡献一份力量，为缩短有关武器的研制周期、节省研制费用、提高弹药安全性能及防范膛炸事故等方面收到成效。

我们认为，我们和国内的内弹道和装药结构专业的同行们一起，已经把我国的两相流内弹道理论研究推进到一个新的阶段。我们已经初步建立起具有自己特色的一整套两相流内弹道理论与方法，基本掌握了处理各种主要类型内弹道和装药结构问题的技能与技术。现代内弹道理论与经典内弹道理论现在已平行存在。它们是互有特点、相互补充、相互促进的关系。我们相信，随着两相流内弹道理论和装药结构处理技术的推广和应用，它的经济效益和社会效益，将在火炮的火力系统论证和研制中体现出来。这就是我们希望本书与读者见面的原

因。但是，由于我们水平不高，组稿仓促，缺点和错误一定不少。此外，作为我们课题研究的最后一部份工作，还来不及整理出来，不便收入本书。

本书基本上是我们课题组十一年研究工作的总结，是研究成果的概括和系统化。在我们完成本书初稿的时候，我们谨向给予我们课题研究作过指导和帮助的周光炯教授、谢庚教授，向鲍廷钰教授以及他所领导下的弹道研究所的同行们表示衷心地感谢，向支持我们工作的上级部门及有关领导表示感谢，向同我们一起工作给予我们支持的内弹道同行及计算站的同志们表示感谢。

参加本课题研究的人员除作者以外，还有孙兴长、李开荣、刘千里、魏建国等同志。在该课题的前期工作中，殷鹤宝同志起了很大作用。

1986年5月 作者 于咸阳

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 内弹道及装药设计工作者面临的主要任务.....	(1)
§ 1.2 “两相流内弹道学”产生的条件、基本功能和应用前景.....	(1)
§ 1.3 内弹道问题的分类.....	(3)
§ 1.3.1 概述.....	(3)
§ 1.3.2 几种典型的装药结构.....	(3)
§ 1.3.3 几种典型的点火模型.....	(4)
§ 1.4 内弹道理论的发展.....	(5)
§ 1.4.1 经典内弹道理论的要点.....	(5)
§ 1.4.2 常规内弹道基本方程及定解条件.....	(6)
§ 1.4.3 内弹道理论发展的评述.....	(7)
§ 1.5 本书的宗旨.....	(10)
第二章 膛内两相流体动力学基础	(11)
§ 2.1 基本知识.....	(11)
§ 2.1.1 概述.....	(11)
§ 2.1.2 几个基本概念(规定).....	(12)
§ 2.1.3 管内两相流流型分类.....	(15)
§ 2.2 两相流体动力学基本方程.....	(17)
§ 2.2.1 连续性方程的推导.....	(17)
§ 2.2.2 动量方程的推导.....	(21)
§ 2.2.3 能量方程的推导.....	(25)
§ 2.2.4 关于两相流基本方程组求解的讨论.....	(28)
§ 2.3 变截面管内一维两相流基本方程.....	(29)
§ 2.3.1 气体质量守恒.....	(29)
§ 2.3.2 固相连续方程.....	(30)
§ 2.3.3 气体动量平衡方程.....	(31)
§ 2.3.4 固相动量平衡方程.....	(31)
§ 2.3.5 气体能量平衡方程.....	(32)
§ 2.3.6 固相能量平衡方程.....	(33)
§ 2.3.7 关于两相流基本方程的争论.....	(34)
§ 2.4 气-固两相流中的相间作用力.....	(36)
§ 2.4.1 单一刚性球形颗粒的受力.....	(37)
§ 2.4.2 单一刚性球的粘性阻力及其阻力系数.....	(37)
§ 2.4.3 颗粒群阻力.....	(39)
§ 2.4.4 郭冠云推荐的颗粒群阻力系数.....	(40)

§ 2.4.5 我们的实验研究结果	(41)
§ 2.4.6 管状药相间阻力	(43)
§ 2.4.7 密实装药床中的相间阻力讨论	(43)
§ 2.5 两相临界流动	(45)
§ 2.5.1 缝隙流动的流量系数	(45)
§ 2.5.2 喷管临界流动及其流量系数	(47)
§ 2.5.3 小孔流量系数	(49)
§ 2.5.4 均质两相流临界流动	(51)
§ 2.5.5 分层流(两速度)临界流动	(53)
§ 2.5.6 气-固两相混合流通过小孔的流量系数实验研究	(55)
§ 2.6 两相流内弹道问题的边界条件	(59)
§ 2.6.1 均相流固定截面条件	(59)
§ 2.6.2 移动边界	(61)
§ 2.6.3 粒状发射药床中瞬态两相燃烧问题的边界条件	(65)
§ 2.6.4 两相区和纯气相区之间的交界面	(69)
第三章 膛内燃烧的条件与环境	(70)
§ 3.1 火药点火理论简介	(70)
§ 3.1.1 着火概念及着火判据	(71)
§ 3.1.2 热点火基本理论	(73)
§ 3.1.3 计算分析	(75)
§ 3.1.4 火药热物性参量及其对点火性能的影响	(79)
§ 3.1.5 底火射流特性测定	(81)
§ 3.1.6 黑火药燃烧实验研究现状	(83)
§ 3.2 装药点火装置的设计及点火管的理论模拟	(85)
§ 3.2.1 概述	(85)
§ 3.2.2 金属点火管内装药床点火燃烧模型及计算	(87)
§ 3.2.3 可燃点火管点火燃烧过程的数值预测	(94)
§ 3.2.4 点火装置的设计步骤	(103)
§ 3.3 弹丸挤进过程研究	(109)
§ 3.3.1 研究的目的、意义及方法	(109)
§ 3.3.2 一些实验结果	(110)
§ 3.3.3 弹丸受力分析	(112)
§ 3.3.4 准静态挤进模型	(113)
§ 3.3.5 动态挤进(刻槽)模型	(117)
§ 3.3.6 挤进模型的验证与应用	(120)
§ 3.3.7 弹性变形对弹带摩擦阻力和身管第二烧蚀峰值的影响	(124)
§ 3.4 特殊燃烧现象	(127)
§ 3.4.1 可燃药筒燃烧规律的实验研究	(127)
§ 3.4.2 火药撞击破裂规律及其对燃烧速度影响的实验研究	(128)

§ 3.5 弹前阻力问题.....	(134)
§ 3.5.1 某些火炮身管胀膛现象分析.....	(134)
§ 3.5.2 弹前激波阻力.....	(140)
§ 3.6 气体状态方程.....	(142)
§ 3.6.1 内弹道中通用的状态方程.....	(142)
§ 3.6.2 高压下的气体状态方程.....	(142)
第四章 两相流内弹道数值方法简介	(144)
§ 4.1 偏微分方程的一些定义.....	(144)
§ 4.2 一阶拟线性双曲型方程组的特征线法.....	(150)
§ 4.2.1 拟线性双曲型方程组的正规形式.....	(150)
§ 4.2.2 特征线法.....	(154)
§ 4.2.3 指定步长的特征线法.....	(158)
§ 4.3 离散化方法.....	(159)
§ 4.3.1 解域的离散化.....	(159)
§ 4.3.2 基本方程的离散化.....	(161)
§ 4.4 对离散化方程进行稳定性分析的一些概念.....	(165)
§ 4.4.1 相容性.....	(165)
§ 4.4.2 稳定性.....	(166)
§ 4.4.3 收敛性.....	(167)
§ 4.4.4 耗散性.....	(167)
§ 4.5 差分方程的稳定性分析.....	(169)
§ 4.5.1 ϵ -图法.....	(169)
§ 4.5.2 傅里叶方法.....	(172)
§ 4.5.3 Courant 条件.....	(183)
§ 4.6 人工粘性法和Shumann滤波法.....	(184)
§ 4.6.1 人工粘性法.....	(184)
§ 4.6.2 Shumann滤波法.....	(189)
§ 4.7 结论和问题.....	(190)
第五章 准两相流内弹道理论的应用	(197)
§ 5.1 考虑弹后工质一维不定常运动的内弹道模型.....	(197)
§ 5.1.1 基本模型.....	(198)
§ 5.1.2 基本假设.....	(199)
§ 5.1.3 单一装药两相速度相同时的方程(欧拉坐标和拉格朗日坐标).....	(206)
§ 5.2 一维不定常运动内弹道问题应用实例 I ——拉格朗日坐标下方程组的计算.....	(210)
§ 5.2.1 前期方程系.....	(210)
§ 5.2.2 在拉格朗日坐标下的基本方程组.....	(210)
§ 5.2.3 差分格式.....	(212)
§ 5.2.4 间断处理.....	(214)

§ 5.2.5	计算结果的检查	(215)
§ 5.2.6	初步计算结果	(216)
§ 5.3	一维不定常运动内弹道问题应用	
	实例 I ——欧拉坐标下方程组的计算	(224)
§ 5.3.1	基本方程组的数学处理	(224)
§ 5.3.2	差分格式	(226)
§ 5.3.3	边界点和边界点相邻点的计算	(229)
§ 5.3.4	间断处理	(231)
§ 5.3.5	结论	(232)
§ 5.4	一维不定常运动内弹道问题应用实例 II ——海双30火炮身管传热、 烧蚀及寿命的计算	(232)
§ 5.4.1	概述	(232)
§ 5.4.2	有热散失的气体动力学内弹道方程组	(234)
§ 5.4.3	火药气体对身管的传热分析	(237)
§ 5.4.4	身管热传导及连续射击时壁温的计算	(238)
§ 5.5	一维不定常运动内弹道问题应用	
	实例 IV ——某滑膛炮轴向压力波的计算	(244)
§ 5.5.1	问题的提出	(244)
§ 5.5.2	计算结果	(247)
§ 5.6	一维不定常运动内弹道问题应用	
	实例 V ——空包弹发射榴弹的内弹道模型及计算	(247)
§ 5.6.1	问题的由来	(247)
§ 5.6.2	目前的研究状况	(248)
§ 5.6.3	物理模型的数学描述	(249)
§ 5.6.4	计算与实验结果比较	(250)
§ 5.6.5	结论	(251)
第六章	气-固两相速度不等的内弹道问题	(252)
§ 6.1	混合装药两相流内弹道一般理论模型	(252)
§ 6.1.1	底部点火混合装药的物理模型	(252)
§ 6.1.2	基本假设	(253)
§ 6.1.3	基本方程	(253)
§ 6.1.4	基本方程的简化	(258)
§ 6.1.5	辅助方程(实验关系式)	(259)
§ 6.1.6	定解条件	(261)
§ 6.1.7	不同流动区域之间的连接条件	(262)
§ 6.1.8	几个需要说明的问题	(263)
§ 6.2	火炮膛内两相燃烧流体动力学模型的计算	(267)
§ 6.2.1	只有一种固相条件下的基本方程	(267)
§ 6.2.2	差分格式	(271)

§ 6.2.3	交界面的计算	(274)
§ 6.2.4	计算结果	(274)
§ 6.3	中心点火装药结构两相流内弹道模型及计算	(277)
§ 6.3.1	目的和意义	(277)
§ 6.3.2	基本内容及功能	(278)
§ 6.3.3	基本模型(方程)	(278)
§ 6.3.4	差分格式及计算顺序	(283)
§ 6.3.5	计算结果	(292)
§ 6.4	底部点火装药结构两相流内弹道模型及计算	(298)
§ 6.4.1	整体设想	(298)
§ 6.4.2	基本方程	(299)
§ 6.4.3	辅助方程	(300)
§ 6.4.4	右边界(弹底处)控制体方程组	(301)
§ 6.4.5	求解步骤	(305)
§ 6.4.6	计算分析及其与试验的比较	(305)
§ 6.5	密闭容器内压力波动问题	(308)
§ 6.5.1	问题的提出	(308)
§ 6.5.2	实验研究	(308)
§ 6.5.3	物理模型和数值模拟	(311)
§ 6.5.4	理论与实验的比较	(315)
§ 6.5.5	几点看法	(318)
§ 6.6	压力波、膛炸和装药的安全考核	(318)
§ 6.6.1	膛内波动及其与膛炸的关系	(319)
§ 6.6.2	压力波与弹药安全考核的关系	(321)
§ 6.6.3	确定装药安全考核的步骤	(322)
§ 6.7	密实装药中的燃烧转爆轰问题	(323)
§ 6.7.1	问题的提出	(323)
§ 6.7.2	基本概念及研究现状	(324)
§ 6.7.3	密实填充床模型及举例	(325)
§ 6.7.4	火箭推进剂裂缝中的火焰传播	(329)

第一章 绪 论

§ 1.1 内弹道及装药设计工作者面临的主要任务

和其他任何科学技术一样,社会实践的需要同样是推动火炮内弹道学及装药设计理论发展的动力。第二次大战以来,坦克、飞机和水上舰艇的性能都有很大的提高。由于火箭和导弹的出现,人们对火炮重要地位的认识曾有短暂的迟疑时期。但随后不久,特别是70年代以来,火炮及其弹药的发展经久不衰。

我国幅员辽阔,在我国的防御体系中,火炮始终是主要武器之一。现代战争对火炮提出的远射程、大威力、高初速、高射速以及机动性等方面的要求,迫使内弹道及装药设计工作者不得不采用高装填密度、高膛压、可燃药筒等一系列措施。当然,近年来人们也在努力探索液体发射药火炮、电磁炮以及激光炮等新型发射能源的火炮。虽然这些新型火炮有可能部分地取代固体发射药火炮,然而,在可以预见的10—20年以内,还不至于出现“异军突起”的局面。所以在世界各国常规武器发展的过程中,固体发射药火炮及其相应的内弹道和装药问题,始终是兵器工作者的重要课题。从反坦克炮(含坦克炮)、大威力压制性火炮和无坐力炮三类火炮角度来看,内弹道及装药设计工作者现在面临的主要任务和中心课题,就是解决由于高初速、高装填密度、特殊点火方式、可燃药筒、勤务处理以及高射速等要求所引起的问题。具体地说,如高装填密度引起的点火困难,甚至引起膛内压力严重波动而造成膛炸。又如新火药(包含可燃药筒)及点火元件(底火、传火管等)的点火及燃烧性能在没有被充分认识之前,由于盲目或由于缺乏应有措施而引起的内弹道不稳定性问题。此外,如某些变装药的榴弹炮内弹道问题,带后喷或漏泄现象的迫无炮内弹道问题,可以说长期以来一直潜伏着一些令人棘手的难题。再例如,火药的点火性能,点火管的内弹道规律,弹带挤进阻力问题,初期内弹道学,弹丸与身管的动态摩擦力,装药在膛内的撞击破裂及对燃烧的影响,膛压波动对身管及弹丸安全性能的影响等,我们目前的研究只能说是刚刚开始。同样,内弹道设计的优化问题,装药设计的理论准则问题等,我们所做的工作还甚少。此外小口径炮烧蚀问题较严重。所有这些,都是我们应该解决的问题,都是我们面临的任务。当然,这些都是就固体发射药火炮而言的。

§ 1.2 “两相流内弹道学”产生的条件、基本功能和应用前景

如上所述,由于火炮及弹药的发展,给内弹道及装药设计工作者提出了一系列新课题。同时由于建立在准平衡态热力学基础上的经典内弹道理论的若干局限性,不能解释诸如装药点火与燃烧反常现象,不能解释膛内压力波动及其膛炸等现象,迫使人们从临近学科猎取成果和营养。两相流体动力学、计算流体力学以及电子计算机的广泛运用,现代弹道测试技术的发展,从理论上和实验上为火炮内弹道理论的发展准备了条件,为装药设计理论的发展(装药的点火与燃烧理论)提供了前提。于是两相流内弹道理论应运而生了。

两相流内弹道理论的基本功能有两条：一是可以描述火炮发射药的装药中的点火及其火焰传播，即膛内压力上升的早期现象，习惯上叫初始内弹道。二是描述了由于燃气运动引起的装药的运动及其装药分布。基于这两种功能，它能模拟和预测膛内压力波的产生、发展以及可能造成的危害，能模拟和预测点火和装药结构对内弹道参量的影响，从而指导装药设计。

“两相流内弹道学”投入工程应用，有三个基本要求。第一是要有合适的模型。所谓“合适”或“实用”，就是能正确地描述膛内燃烧的基本过程。膛内装药及点火结构是多种多样的，不能用统一的模式，更不能一成不变地套用某种模型去解决不属同一类的点火燃烧问题。如果说建立两相流内弹道模型是理论水平的体现，还不如说是一种技术和技巧能力的发挥。因此，建立火炮膛内两相燃烧流动模型，不能一味讲究“理论”水平的高深和数学推演的“严谨”。第二是要提供大量的输入参量。如与点火有关的火药“着火点”及热物性参量，火药气体参量等；如与装药运动有关的相间阻力等；如与燃烧有关的药粒撞击碎裂、管状药胀裂规律、点火管强度等；如与初始弹道有关的弹丸挤进阻力、弹底填充块作用等；以及与小孔流量有关的小孔流量系数等。所有这些参量的获得，最基本的方法和途径是实验研究。一个两相流内弹道模型用于工程问题，如果不是为了模拟和预测跟装药点火与燃烧有关的波动问题，或者计算的结果不能达到这个目的，可以说失去了它的基本价值。而能否达到这个目的，很大程度上取决于这些输入参量。多年来，我们花费了将近一半的精力于这部分工作，目的就在于使两相流内弹道理论付之于应用。第三是要进行“正确”的数值计算。所谓“正确”，有两层意思。第一层意思是你对所采用的“数值”手段要有准确地理解和进行自我检验，如用某一差分格式计算内弹道问题时，若空间步长取得不合适，可能不满足相容条件，即使“凑合”出一个计算曲线，但算例将失去代表性和推广的价值。第二层意思是对边界和间断的处理要进行“合理”模化。如果为数值处理方便任意简化，一般说“符合”最大膛压和初速是可能的，但得到的物理量分布，可能面目皆非。

目前经典内弹道方法主要建立在热力学理论基础之上，而两相流内弹道理论主要建立在两相流体动力学基础之上。经典内弹道学主要功能在于计算最大膛压和初速，同时进行弹道设计。两相流内弹道学主要功能在于计算燃烧场内各参量（包含压力 p 、温度 T 、速度 u 等的变化过程及装药的运动和分布，同时在分析基础上也能进行弹道设计。前者计算较为方便，并且在工程中已经积累了一整套方法。后者计算较复杂，但能给出人们关心的一系列参量。两相流内弹道学在理论上和实际应用上是对经典内弹道学的革新和补充，但在工程上不能取代经典内弹道学的特有作用和地位。同样，经典内弹道理论由于自身的局限，不能解释诸如膛内燃烧不稳定及压力波动等问题。因此，以上两种内弹道理论在工程中应该是相互补充的，而不是相互排斥的。

在这里，我们还要说明，两相流体动力学是两相流内弹道理论的基础，但这远不是它的全部内容。它还与其他很多邻近分支学科有关。其次它要涉及很多输入参量。在过去十年中，我们在理论模型、数值分析、实验研究及工程应用各个方面做了不少工作，国内外同行也有若干经验可以借鉴。十年来，我们针对各类不同形式的装药结构和点火方式，针对十几个工程实际问题，提出了不同形式的两相流内弹道模型，并进行了相应的计算分析。此外，在实验研究方面，如火药点火规律、弹丸挤进规律、火药撞击破裂规律以及对燃烧性能的影响、装药元件（含可燃药筒等）热物性测定、气-固相间阻力的实验研究以及两相流小孔临

界流动等若干方面进行了专题探索,取得了不同程度的进展。面对国内身管武器研制中对内弹道及装药工作者提出的日益增长的要求,我们可以满怀信心地说,尽管两相流内弹道理论与方法还在不断发展,还有很多不如人意之处,但它毕竟在国内已初具规模,已经通过若干个典型算例的考验,目前已经到了推广、应用和不断改进的阶段。我们相信,它有着很大的潜在经济价值和社会效益。随着这一理论的逐步运用和实践,对加速我国火炮研制的步伐,缩短研制周期,减少研制经费,改进现有某些火炮的内弹道及装药性能,都将产生很大的影响。然而,我们也要坦率地承认,两相流内弹道理论还不够成熟,本书中提供的若干分析方法和数学描述,在不同程度上是有局限性的。膛内燃烧现象非常复杂,不可能用数学方法把各种物理本质都刻画出来,只能抓住问题的主要矛盾,描写出各种膛内燃烧问题的主要规律。

§ 1.3 内弹道问题的分类

§1.3.1 概述

内弹道问题的分类与分类的方法有关。从装药角度说,可分为定装药、分装药及迫、无炮装药等三种类别。但从装药的点火和燃烧模型来说,起码可分为瞬时燃完简化模型、同时点火简化模型、渐进点火简化模型、底部点火模型和中心点火模型等五种类型。从装药运动方式的角度,内弹道又可分为颗粒均匀分布简化模型、装药不动模型、固相速度和气流速度定比值($u_p = ku_g$)模型和两相燃烧流体动力学模型四大类。从弹丸运动方程特点的角度,则内弹道问题又可分为考虑弹带挤进阻力的弹丸运动、弹前有异物(涂油、擦炮布等残留物)的弹丸运动、变质量弹丸运动(随行装药)等三种类型。因此,要对内弹道问题作系统深入的论述,首先有必要将典型的几种简化模型和几种典型装药及点火方式叙述如下。

§1.3.2 几种典型的装药结构

最常见的装药结构为定装式(药筒装药)底部点火结构(如图1.3-1所示)。几乎所有小口径火炮装药及大多数中等口径火炮装药都是这种形式。其中底部点火药包是为了弥补底火或火帽点火能量的不足。但就30毫米以下的小口径炮弹来说,通常不用底部点火药包,主装药全部由底火引燃。

对于中等及大口径整装弹而言,基本上采用两种装药结构。其一是主装药为粒状药的**中心点火结构(如图1.3-2所示),其二是管装药为主装药的底部点火结构(如图1.3-3所示)。其次还有相当数量的管状药和粒状药混合装药底部点火结构(如图1.3-4所示)。如图1.3-2所示的中心点火装药方法,相对可以获得高的装填密度。因此,目前高膛压火炮大多采用这种装药方法。对中等膛压的火

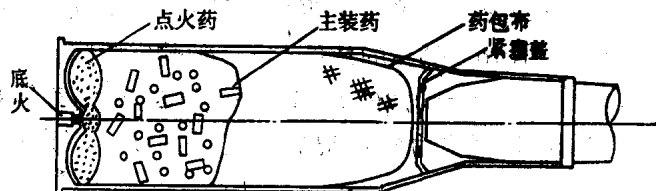


图1.3-1 底部点火药筒式装药结构

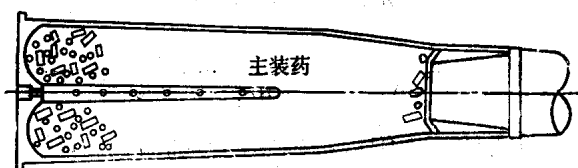


图1.3-2 中心点火药筒式装药结构

炮($p_m=300\sim400\text{MPa}$),特别是我国的仿苏武器,如1959年式100mm高射炮等,常常采用如图1.3-3所示的管状发射药加底部点火的装药结构。美120mm滑膛坦克炮榴弹,采用的就是管状药。如图1.3-4所示的装药结构,常见之于中、大口径加农炮,如1954年式85mm加农炮等。

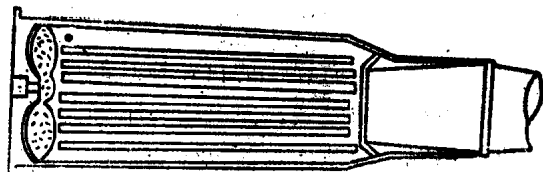


图1.3-3 管状药装药结构

除了定装式(药筒式)弹药之外,对大口径榴弹炮和加榴炮往往采用分装式装药结构,如美175mm加农炮等。此外,无坐力炮装药、迫击炮装药都相应有其特点,这里不一一介绍。

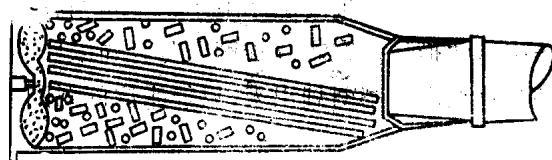


图1.3-4 混合装药底部点火装药结构

§1.3.3 几种典型的点火模型

(1) 目前经典内弹道中最常见的点火模型是点火药(器)瞬时燃完模型,或叫做主装药同时着火模型。该模型从什么时候开始采用的,现在不便考证。它也许是与主装药瞬时燃完的最粗略的内弹道模型同时提出的。该模型假定,点火药(器)能量瞬时释放完毕,且主装药同时全面着火。因此,在时刻 $t=t_0$,膛内点火药燃烧生成物的压强为

$$p_B = \frac{f_B \omega_B}{\bar{W}_0 - \frac{\omega}{\delta} - \alpha_B \omega_B} \quad (1.3-1)$$

式中 $\bar{W}_0$ 为药室容积, ω 、 ω_B 分别为主装药及点火药的质量, α_B 、 f_B 分别为点火药燃烧产物的余容和火药力, p_B 为点火药完全燃烧后在药室的有效空间内形成的压强。这种点火模型最多只能说它考虑了点火药的能量,而不能说明装药点火过程的任何特征。该模型的最大特点是简单,可以定性地估计主装药(若同时着火的话)是在什么样的起始压力下燃烧的。

(2) 渐进点火模型。该模型是在主装药点火实验研究基础上,或在药室上测定多点 $p-t$ 曲线基础上,给出点火波阵面的近似传播速度。假定在点火波阵面之后,发射药全部点燃,在点火波阵面之前,装药处于预热状态。对于小粒药高装填密度装药床,建议采用郭冠云(K.K.Kuo)教授的结果^[1]。他的实验装置为圆柱形燃烧室,直径0.951cm,长3.81cm,内装半径 $r_p=0.267\text{mm}$ 的球形药粒。该实验结果表明,点火波阵面通过3.81cm这段距离所经历的时间大约为0.565ms到0.682ms,即点火波阵面的平均传播速度为55.9m/s到67.4m/s。

对周围开孔的金属点火管,根据不同装药(2号大粒黑药和2号小粒黑药)、不同管径(内径从20mm到32mm)的试验结果,我们提出如下火焰传播时间经验公式:

$$t_B = \frac{\omega_{B1}}{\Delta_{B1} F_B} \cdot \frac{1}{u_{a1}} + \frac{\omega_{B2}}{\Delta_{B2} F_B} \cdot \frac{1}{u_{a1}} + nt_{B0} + \frac{l_a}{u_a} \quad (1.3-2)$$

式中 t_B 为点火阵面在管内沿轴向的传播时间, ω_{B1} 、 ω_{B2} 为小粒及大粒黑药的质量, Δ_B 为黑药的装填密度, F_B 为点火管横截面积, l_a 为管内自由空间长,即管内不装药部分的空气柱