

挤进时期内弹道学 与挤进压力计算

〔俄〕E. B. 丘尔巴诺夫 著

杨敬荣 译

周彦煌 薛晓中 校

国防工业出版社

32970302

TJ012
09

HK42/24

挤进时期内弹道学与 挤进压力计算

(俄)E. B. 丘尔巴诺夫 著

杨敬荣 译

周彦恒



国防工业出版社



C0343637

著作权合同登记 图字:军-1997-003

图书在版编目(CIP)数据

挤进时期内弹道学与挤进压力计算/(俄) E. B. 丘尔巴诺夫著;杨敬荣译. —北京:国防工业出版社,1997. 4

ISBN 7-118-01684-5

I. 挤… I. ①丘… ②杨… III. ①枪炮内弹道学②枪炮内弹道学-内弹道方程-方程解 IV. TJ012.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 25079 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 5 128 千字

1997 年 4 月第 1 版 1997 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:8.40 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

译 序

本书系原苏联高等教育部列宁格勒机械学院(现改名为波罗的海大学)教科书。该书全面系统地论述了挤进时期内弹道学问题,涉及弹丸嵌入过程中的瞬态动力学、发射装药瞬态着火与燃烧、弹带材料动态性能及火炮与弹丸的几何性能。在科研与生产过程中,有大量问题与挤进内弹道学相关,如弹丸初速误差、射击密集度、弹丸卡膛可靠性及火炮身管寿命等。到目前为止,我国出版的内弹道、火炮及弹丸设计等专业教科书及专著,虽对发射挤进过程有所涉及,但都不够深入、系统,更谈不上全面。至于以往经典内弹道著作,一般都对挤进作了非常简化的处理。该书用比较简洁的文字,在介绍求解瞬态接触应力基础上,给出了弹丸嵌入阻力计算方法及其与实验数据的比较,阐述了求解挤进内弹道学问题的数值解法和分析方法,对火炮系统的科研与生产具有重要的实用价值。

本书不仅是内弹道学的一个重要分支,同时也是火炮及弹丸发动动力学不可缺少的组成部分。

周彦煌、薛晓中、叶发青等三位弹道专家也参加了本书翻译工作。同时,还得到了中国白城兵器试验中心、南京理工大学弹道研究所领导和国防工业出版社的热情关心与大力支持,在此一并致以谢意。

由于译者水平有限,书中疏漏差错在所难免,因此,热忱希望广大读者和同行专家予以指正。

译 者

一九九六年八月

关于单位制的说明

本书所采用的单位与我国现行采用的法定工程单位制不同，为了便于读者使用，给出几个主要物理量的换算关系。

一、力： $1 \text{ 千克力(kgf)} = 9.80665 \text{ 牛顿(N)}$

$1 \text{ 牛顿(N)} = 10^5 \text{ 达因(dyn)}$

二、压力： $1 \text{ 千克力/厘米}^2(\text{kgf/cm}^2) = 9.80665 \times 10^4 \text{ 牛顿/米}^2(\text{N/m}^2)$

$1 \text{ 千克力/分米}^2(\text{kgf/dm}^2) = 9.80665 \times 10^2 \text{ 牛顿/米}^2(\text{N/m}^2)$

$1 \text{ 千克力/毫米}^2(\text{kgf/mm}^2) = 9.80665 \times 10^6 \text{ 牛顿/米}^2(\text{N/m}^2)$

$1 \text{ 帕斯卡(Pa)} = 1 \text{ 牛顿/米}^2(\text{N/m}^2)$
 $= 10^{-6} \text{ 兆帕(MPa)}$

三、热功当量： $1 \text{ 卡}^*(\text{cal}) = 4.1840 \text{ 焦耳(J)}$

(卡*：为热力学卡)

四、长度： $1 \text{ 英寸(in)} = 25.4 \text{ 毫米(mm)}$

内 容 提 要

挤进时期的内弹道学是内弹道学里一个新的分支。本书论述了射击现象中挤进时期的作用；在解决弹带接触应力基础上引入了嵌入阻力的计算方法；列举了嵌入阻力的实验数据；阐述了解决挤进时期内弹道学基本问题的数值法和分析法。

本书的内容是挤进时期弹道计算的基础，也是制定挤进压力计算方法的基础。

本书可供高等院校机械系学生使用，也可供从事弹道计算的工程技术人员参考。

目 录

第一篇 挤进时期内弹道学

绪论	1
引言	3
第一章 挤进时期的一般概念	8
§ 1. 1. 1 挤进时期经历的过程	8
§ 1. 1. 2 挤进时期弹道效应	13
§ 1. 1. 3 挤进系统的结构特性	20
第二章 弹丸的弹带嵌入阻力	30
§ 1. 2. 1 弹带接触应力问题	30
§ 1. 2. 2 嵌入阻力计算	36
§ 1. 2. 3 嵌入阻力的实验数据	48
第三章 挤进时期内弹道学主要问题	54
§ 1. 3. 1 问题的提出	54
§ 1. 3. 2 解决问题的数值法	59
§ 1. 3. 3 解决问题的分析法	66
参考文献	77
附表 1 函数表 $\varphi(\Lambda_{cb}) \cdot 10^3$	78
附表 2 函数表 $\theta(\Lambda_H, \Lambda_{BP}, a) \cdot 10^3$	79

第二篇 挤进压力计算

前言	88
绪论	90
第一章 挤进参数的计算方法	94

§ 2.1.1 挤进参数的选择	94
§ 2.1.2 计算挤进参数的分析法	100
§ 2.1.3 计算挤进压力的工程法	107
第二章 挤进压力数值的计算	115
§ 2.2.1 计算嵌入曲线	115
§ 2.2.2 用分析法计算挤进压力	121
§ 2.2.3 用简化法计算挤进压力	126
§ 2.2.4 根据专门射击试验结果确定挤进压力值	130
参考文献	133
附表 1 简化函数表 $\theta(\Lambda_H, \Lambda_{BP}, a) \cdot 10^3$	134
附表 2 修正系数 $m_{P_0} \cdot 10^3$ 和 $l_{P_0} \cdot 10^3$	139

第一篇 挤进时期内弹道学

绪 论

内弹道学是研究枪炮射击时膛内所发生的力学、气体动力学、热力学和热化学过程的科学。其主要研究的是这些过程对弹丸直线运动的重要影响,这些过程的总和就是射击现象。尽管射击现象时间很短(百分之一秒),但应分为五个连续发生的时期:火药静态燃烧时期、挤进时期、火药动态燃烧时期、绝热膨胀时期和后效时期。

挤进时期定义为从弹丸运动开始到弹带嵌入膛线结束时为止。“挤进”(форсирование)这个术语来自法语词“forcer”,即加力、加速、鼓劲的意思。它起初用于军事是表示部队具有很强的战斗力(战斗中克服水的障碍、加速前进等)。在火炮中,这个术语则表示弹丸直径超出炮膛直径,也可以说,这个术语与弹带嵌入膛线过程或挤压弹带过程有关。

还是在射击武器发展初期,人们就发现了弹丸的挤进对射击密集度具有重要的影响。在上个世纪中期,线膛炮进入武器行列后,才开始经常讨论与挤进有关的问题。法国学者沙尔波尼耶为了计算内弹道学中的弹丸挤进对弹丸运动的影响,于1908年引入了专门参数——挤进压力^[1]。在这种情况下,认为弹带的嵌入过程是瞬间发生的。后来,仔细研究发现弹带的嵌入是逐渐的,并认为挤进是个过程。Г. В. 奥波科夫(Г. В. Опкоков)^[2]教授是我们这儿首批

从事这方面研究的人员之一。但到目前为止,无论在^①我国还是在
国外弹道学文献中都还没有形成关于挤进时期的完整理论。至今
尚无明显的迹象表明,人们对挤进压力数值的物理意义,取得一致
的观点。对众多的解释可归结为下列三种提法:

1) 挤进压力——是指弹带全部宽嵌入膛线时刻膛内火药气体
压力〔Н. Ф. 德罗兹多夫(Н. Ф. Дроздов)、Г. В. 奥波科夫(Г. В.
Оппоков)、А. А. 塔斯金(А. А. Таскин)、克兰茨(Кранц)〕;

2) 挤进压力——是指弹带嵌入膛线的最大阻力〔И. П. 格拉韦
(И. П. Граве)、М. Е. 谢列伯梁科夫(М. Е. Серебряков)、Д. А. 文策尔
(Д. А. Вентцель)、Л. Г. 德拉普金(Л. Г. Драпкин)、沙尔波尼耶
(Шарбонье)〕;

3) 挤进压力——是指与弹带的结构特性和炮膛的膛线部有关
的经验理论的一致性参数〔Б. Н. 奥库涅夫(Б. Н. Окунев)、М. С. 戈
罗霍夫(М. С. Горохов)、С. А. 别捷赫金(С. А. Бетехтин)、奥特金海
梅尔(Оттенхеймер)、科尔涅尔(Корнер)〕。

总之,到目前为止还没有令人满意的挤进压力计算方法。

然而,火炮实际应用中有许多问题都与挤进时期有关:确定炮
管磨损的弹道特性;解释“弹道峰”(раскупорки)、炮管加热时弹道
性能下降,首发射击时弹丸落点偏近;研究炮管磨损、弹丸做旋转
运动时其初速散布;选择参数并计算弹丸的导引部、炮管的线膛
部;设计发射装药和火炮射击诸元;拟定枪炮弹道试验的方法;组
织火炮射击的弹道准备及其他。

该教科书中作者介绍了与挤进时期内弹道学有关的系统化的
主要研究成果。作者利用有限篇幅强调了所述问题,并描述了解决
问题的方法,所解决问题结果的讨论具有例证特点。

该参考书是作者对内弹道学^[3]教科书的补充。

① 指原苏联。——译者

引 言

弹道学中的物体(炮弹、火箭弹)挤进,涉及整个设施的结构与功能,其目的是在瞬态力的作用下,使弹丸获得增益和加速。挤进是为了能获得性能良好(快捷、经济和一致性)的预期速度和射程。当物体的速度小,而且其进行的是瞬变过程时,其物体运动的初始,挤进具有特别意义。比如:发射带导轨的无制导火箭时,喷气式发动机的推力超出它本身重量几十倍,要经过某一时间间隔进入续航状态。假如火箭随便放置在导轨上,那么只要发动机的推力超过其本身质量和摩擦力,则接通发动机后运动立刻开始,但这种运动开始是“缓慢的”,而为了保证火箭运行所需达到的速度,必须有较长的导轨。为了缩短导轨长度,就要用放置在导轨上的卡锁锁紧火箭的传动部件。直至发动机的推力增加到充分大数值。在这种情况下,火箭的初始运动是较快的,并且在较短的行程里就得到了其运行所需的速度。除此之外,其运行速度的减小,还与火箭发动机的参数变化有关,类似的结果在飞机助推滑行中也存在。经仔细观察发现,发动机的驱动牵引力并非取决于其运动特性,而挤进的方法在于火箭运动的延迟。在这种情况下要有一定数量的燃料消耗在开始运动前,实际上是损失掉了。显而易见,挤进时期也就是延迟的时间不应超过规定的发动机起动时间,因为时间的持续会在没有什么效益的情况下,增加燃料的消耗。

弹丸在炮膛内运动时的所受的推力(火药气体的压力)确实与弹丸运动特性有关。因此,弹丸挤进的调节可能性越大,则它的结构方式和实施过程就越复杂。对于火炮要想延迟弹丸的运动,就要借助专门的卡锁装置,或要想延迟火药气体对弹丸的作用就要借助于诸如隔板,将弹丸与发射装药分开,打开时提供一定压力的火

药气体。目前,这些复杂的挤进方法是适用的。在火炮发展初期,火炮装药是从炮口装填的,装填通过药筒来控制,确保形成大量的气体使弹丸移动。用弹带(紧塞带)强制量控制弹丸启动是火炮中最方便和统一的挤进方法,其弹带的直径要超出炮管的口径,从而形成嵌入过程和嵌入阻力,嵌入阻力就是在这个不太大的地段内阻止弹丸运动的力。方法很简单,不需要辅助装置,只要弹带能独立起到这几种作用:确保弹丸旋转、堵住火药气体、装弹时使弹丸卡膛。与此同时,还要考虑嵌入过程,弹带的设计、挤进弹道效应的评估中出现的各种复杂问题。

因此,炮兵科学研究关系到挤进时期,关系到掌握大量的、各种各样的相关资料。就其从内弹道学应用角度可分为三个研究方向:

- 研究弹丸与炮膛相互作用原理和特性;
- 研究相互作用力对弹丸在膛内运动和射击现象的过程影响;
- 研究火炮系统的生产和应用中,挤进的运用方法、计算方法和技术途径。

由于苏联科学家〔А. А. 伊柳申(А. А. Ильшин)、С. И. 古布金(С. И. Губукин)、А. И. 采利科夫(А. И. Целиков)、Г. А. 斯米尔诺夫—阿利亚耶夫(Г. А. Смирнов-Аляев)等〕在塑性理论研究中取得了一定的成绩,使弹带嵌入膛线的原理得到科学的解释。但是,实验是研究嵌入过程的主要方法,其实验即采用炮管或模拟装置来挤压弹丸或模拟弹。在19世纪末,А. Г. 马秋宁(А. Г. Матюнин)^[4]和М. Ф. 罗森贝尔(М. Ф. Розенберг)^[5]给出了第一批实验结果。这一结果提供了相当可靠的关于弹丸挤进时作用于弹丸的阻力的数值和几种参量之间的关系。后来,П. И. 莫尔恰诺夫(П. И. Молчанов)、Л. Г. 德拉普金(Л. Г. Драпкин)、А. А. 伊柳申(А. А. Ильшшин)、С. А. 巴尔坎(С. А. Баркан)、П. С. 索洛明(П. С. Соломин)、Ю. П. 科捷利尼科夫(Ю. П. Котельников)和许多其他人员在静态和动态条件下又进行了实验研究,得到了一些有价值的

实验资料,尤其是在运用静态实验方面。1882年谢别罗姆(Себером)和久戈尼欧(Гюгнио)用普通炮弹和带凸缘的弹带的炮弹,在10cm火炮上进行射击试验,首次肯定了嵌入过程对膛内弹丸运动的影响。发现在没有嵌入情况下,火药气体最大压力减少了7.1%,而弹丸的炮口速度减少了8.8%。1901年A. Ф.布林克(A. Ф. Бринк)^[7]写到:“嵌入的直接影响是增长了初始压力,或更准确地说,增加了作用于弹底的气体压力的增长速度。”沙尔波尼耶提出的挤进压力概论为嵌入过程对弹丸运动的影响的理论研究开辟了一条途径。在这种情况下,可以分为两个研究方向:一方面,挤进压力与嵌入过程特性和条件的关系;另一方面,挤进压力大小对膛内弹丸运动的影响。为了定量地评估这一影响,深入研究了修正系数^[8]。

为了解决应用问题,挤进时期的计算是第三个研究方向:深入研究弹道的计算方法,炮管和弹丸本身强度的计算、炮管寿命的研究和保障、射击时炮管的弹道保障。在弹道计算时,嵌入过程的计算通常都要借助挤进压力数值。而通常情况下,嵌入过程的计算又要用到火药的燃烧速度(卡尔涅尔^[9])。因而,不同的作者得到的挤进压力数值不同,其范围在230~1000kgf/cm²。按H. Ф.德罗兹多夫(H. Ф. Дроздова)教授的建议,我们在本书中一直沿用的火炮挤进压力数值是300kgf/cm²。

A. A. 伊柳辛(A. A. Ильюшина)、Л. Г. 德拉布金(Л. Г. Драпкина)、A. Д. 波斯佩洛夫(A. Д. Поспелова)、K. A. 别列津(K. A. Берзина)和其他作者的研究发现,在计算弹丸本身强度时要考虑到弹带的反作用。在计算炮管强度时A. A. 沃斯科尔先斯基(A. A. Воскресенским)制定了分析算法。

炮管的烧蚀、磨损和寿命问题在上个世纪就开始讨论了。在30年代,我们的许多机构获得了重要成果,这些成果也确实提高了卫国战争时期炮兵的威力。现在人们还在仔细地、不间断地研究着这些问题。

弹道准备中,通常用实弹射击试验来确定炮膛磨损对弹丸初

速的影响,确定装药温度、炮管和火药性能对弹丸初速的影响。在许多情况下,都要考虑到挤进时期。这需要在靶场或部队进行专门的射击试验。现在的问题是如何能减少射击数量或完全不用射击。

在科学研究、设计和试验部门中,进行过大量与挤进时期特性有关的研究,并单独研究过火炮系统具体模型的弹带和膛线的结构,或者包括列入装备的弹药和火炮。同时也考核试验过实验结果。

总之,这一切与挤进时期有关的因素还都处在实际观察之中,到目前为止还没有找到关于挤进时期下列现象的满意解释:

1)当用新炮管射击时出现的炮管的“弹道峰”现象。试验过程中,弹丸初速开始增长,而后下降。比如:用Д-44 85mm 炮发射 400 发全装药炮弹时,初速增加 1.35%,而减装药情况下增加 1.0%;

2)首发炮弹的初速偏低(短炮管炮平均减少 1%,而长炮管炮平均减少 0.5%);

3)弹丸初速变化与炮管磨损有关,而磨损又与装药温度、火药猛度及其他因素有关。M-46 130mm 炮在磨损情况下发射 1703 发炮弹后,装药温度为 $+15^{\circ}\text{C}$ 时其运动速度减小 6.61%,而当装药温度为 $+40^{\circ}\text{C}$ 和 -40°C 时,其速度分别增加 5.18%和减少 8.15%。

现有的详尽事实说明,现今关于挤进时期的概念还不完善,还要继续发展。

内弹道学的主要问题是研究弹丸前进运动。既然作用于弹丸的力与前进运动各诸元有关,那么我们就需要仔细研究一下这些关系。挤进时期火药气体压力与发射药点燃和燃烧过程,火药气体的形成和膨胀过程,以及热量和质量损失过程有关。挤进时期弹丸前进运动阻力与弹丸导引系统的装置有关。最重要的力就是弹带嵌入膛线的阻力,对嵌入阻力的研究也是挤进时期内弹道学的主要问题之一。除此之外,确定启动时弹丸的阻力数值和挤进期的开始也是很重要的。阻力与火炮系统设计条件的关系的研究具有现实意义:如现有的弹丸上和炮管里的润滑油,炮管的加热和冷却

等。

重要的问题是以后被称为挤进时期的挤进参数的选择。比如：挤进时期结束瞬间爆发动力学诸元的确定。假如要进行挤进时期的间接计算，那么用内弹道学的积分方程解这些曲线，就近似地得到虚拟的初始参数。其结果确定了挤进时期射击现象的挤进参数和火炮设计条件及导引系统的特性关系。

下一步的任务就是研究挤进时期对膛内弹丸运动的影响，以便确定爆发力学诸元及挤进参数。在这种情况下可以评定挤进所收到的弹道效应。最终目的是计算火炮系统的弹道时，能对挤进时期计算方法进行研究。

挤进时期的内弹道学理论可以解决实际问题，而这些问题与炮兵武器的设计、生产、试验和使用有关。

挤进时期的内弹道学与中间弹道学在许多方面都有相似之处。而在中间弹道学中又研究火药气体的后效期。中间弹道学是研究弹丸飞出后，从炮膛内流出的火药气体。确定弹丸运动的初始条件(初速、射角)，以便解决外弹道的主要问题。挤进时期的弹道学是研究弹带嵌入时弹丸运动阻力，确定弹丸运动初始条件(挤进参数)以便解决内弹道的主要问题。确定内弹道和外弹道的初始条件的方法是相同的。该方法包括计算开始时间前对弹丸运动的各种元的研究。

第一章 挤进时期的一般概念

§ 1.1.1 挤进时期经历的过程

对于研究来讲挤进时期是射击现象五个阶段中最复杂的一个阶段。这是由于：首先经历的是弹带嵌入膛线，其次是弹丸运动初始条件的形成。因此，在挤进时期的研究中不得不附带研究火药装药的点燃；火药气体对火药装药和药室壁面的热传递；流过弹丸和身管间缝隙的火药气体泄漏。大量试验证明，挤进时期发射装药的结构具有重要的意义。比如：当混合装药是由两个半截装药组成时（火药标记 12/7 和 18/1 管状火药），在前部配置 12/7 火药比在后部配置 12/7 火药，其火药气体最大压力和弹丸初速相对高 25% 和 5%。

在挤进时期的研究中，必须考虑火炮装药方法。实际上在分装药情况下弹丸用自己的弹带卡在炮管的坡膛上，避免了火药气体的泄漏。弹带的嵌入过程是从弹丸开始运动时刻立即开始的，并伴有不大的速度。在定装药情况下，弹丸固定在药筒口，因此，它的弹带通常还没挤进坡膛就要发生火药气体的泄漏。当弹丸开始运动时，首先经历的是拨弹过程，拨弹时弹丸要克服拨弹力的作用。而后弹丸经历自由飞行，直到弹带嵌入过程开始。该过程是在加快速度的动态条件下进行的。

我们认为挤进时期射击现象的主要过程如下：

- 1) 火药燃烧；
- 2) 火药气体的形成；
- 3) 弹丸的直线运动；
- 4) 弹带嵌入膛线。

其次是：

- 火药装药的点燃；
- 火药气体的热传递；
- 火药气体的流出(泄漏)；
- 拨弹；
- 火药气体的膨胀。

挤进时期的重要特性是，挤进时期结束前弹丸在新炮管内所经过的行程 L_{ϕ} 相当于弹带宽。可见，弹后空间的变化不明显，且火药气体的膨胀是次要因素。因此，用火药静态燃烧关系式 $P = P_{\phi} \cdot e^{t/\tau}$ 来计算火药气体压力数值是可行的。其中， P_{ϕ} ——弹丸开始运动时刻火药气体压力； τ ——装药的静态燃烧参数，

$$\tau = \frac{(1/\Delta - 1/\delta)I_{\kappa}}{f \mathcal{H} \sigma_{cp}};$$

σ_{cp} ——挤进时期渐增性系数平均值，

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{t_{\phi}} \int_0^{t_{\phi}} \sigma dt;$$

t_{ϕ} ——挤进时期持续时间。

表 1.1-1 中所列举的是几类模型武器在全装药射击情况下挤进期结束时所计算的静态燃烧诸元的数值。

表 1.1-1 挤进时期静态燃烧诸元

武器类型	口径 /mm	t_{ϕ} /dm	P_{ϕ} /(kgf/cm ²)	v_{ϕ} /(m/s)	t_{ϕ} /(m·s)	ψ_{ϕ}
AKM 卡拉什尼科夫自动武器	7.62	0.274	1702	159.1	0.56	0.23
ВЯ 航空炮	23	0.168	2572	102.8	1.45	0.13
БС-3 野战炮	100	0.830	1700	78.8	5.37	0.15
Д-30 榴弹炮	122	0.610	1469	67.8	16.79	0.17
М-46 加农炮	130	1.500	2220	103.2	14.95	0.20
Д-20 加农榴弹炮	152	0.840	1698	77.8	11.14	0.12