

内弹道气动力原理

金志明 袁亚雄 编著

533247

国防工业出版社

533247

TJ012
02

内弹道气动力原理

金志明
袁亚雄 编著

内 容 简 介

本书主要讲述内弹道气动力原理的一般理论、计算方法及其在武器-弹药系统设计中的应用。全书共分十章：第一和第二章叙述内弹道气动力原理的基础知识及颗粒动力学问题。第三和第四章叙述内弹道两相流体力学的数学模型及计算方法。第五章介绍内弹道气动力模型的近似解。第六章介绍了膛内压力波现象及装药结构对压力波的影响。第七章阐述了点火过程及其点火管的数学模型。第八和第九章分别介绍了膛内后效作用和后效期膛口流场及对弹丸的后效作用。第十章则是对高速火炮内弹道理论作了一般性的讨论。最后附有各种单位制的换算表。

本书可作为内弹道专业的教科书，也可作为武器弹药设计专业及流体力学专业的参考书，并可供从事武器弹药生产、试验的工程技术人员参考。

内弹道气动力原理

金志明 编著
袁亚雄

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印张11 $1/4$ 283千字

1983年11月第一版 1983年11月第一次印刷 印数：0,001—1,700册

统一书号：15034·2650 定价：1.70元

序 言

内弹道学是研究膛内射击现象及其规律的一门科学。所谓射击现象是指从击发底火开始到弹丸获得最大速度为止这一过程中所发生物理化学变化的各种现象。在这些射击现象当中,不仅存在由于火药燃烧而引起的剧烈的化学反应,释放出大量的能量和燃气,而且还伴随着气体、药粒及弹丸的高速运动和质量、动量及能量的输运现象。然而,完成这一射击过程所经历的时间却只有几个至十几个毫秒。因此,从一般力学的范围来看,膛内的各种相互作用具有瞬态的冲击载荷的特性,它属于瞬态力学的范畴。从热力学范围来看,膛内射击过程是一个非平衡态的不可逆过程。而从流体力学的范围来看,膛内射击过程又是一个典型的非定常反应两相流体力学问题。对于这样一个复杂的射击现象,内弹道学家曾在各种的简化模型的基础上建立起内弹道学的理论,解决了武器设计中的一系列实践问题。最具有代表性的有以下两种内弹道理论:

(1) 经典内弹道学 (Classical Interior Ballistics), 这种内弹道理论是在平衡态热力学的基础上, 研究膛内弹道参量平均值变化规律的理论。实践证明: 在膛压和初速不太高, 或相对装药量 $\omega/q < 1$ 的情况下, 弹后空间混合气体的密度、流速及压力梯度都比较小, 纵向压力波的影响可以忽略, 这时膛内混合气体的流速也近似于线性分布。因此, 采用弹后空间每一瞬间的平均值来代替分布值的变化将不会产生明显的偏差。在此条件下, 经典理论还是能够比较准确地描述膛内的射击过程。由于经典内弹道的基本方程是常微分方程和代数方程的组合, 因而计算简单, 应用也比较方便, 所以它是目前被广泛采用的一种内弹道理论。

● 某些资料给出 $\omega/q < 2$ 。

(2) 近代内弹道学 (Recent Interior Ballistics), 这种内弹道理论是以流体力学为基础的, 研究膛内弹道参量分布值变化规律的一种内弹道学理论。实践证明: 对于那些膛压、初速都比较高, 或 $\omega/q > 1$ 的高性能武器, 在射击过程中膛内混合气体的密度、流速和压力将形成很大的梯度, 纵向压力波的影响也比较显著, 从而又加剧了弹后空间气流参量的不均匀性。在这种情况下, 如果我们仍然采用平均值来描述膛内射击过程, 这显然是不适当的。除此以外, 对点火过程, 瞬变燃烧及膛内压力波的研究, 以及诸如胀膛、膛炸等反常弹道的研究, 也已超出了经典内弹道理论的范畴, 而必须采用近代内弹道理论加以解决。但是, 近代内弹道理论所涉及到的物理参数比较多, 描述这些物理参数之间关系的基本方程是偏微分方程和代数方程的组合。因此计算相当复杂, 通常要借助电子计算机才能得到弹道参量之间的数值结果。它是目前正在发展当中的一种内弹道理论。

研究射击过程中的流体力学问题是由来已久了。早在十八世纪末 (1798年), 著名的数学家和力学家拉格朗日 (Lagrange) 提出了一个内弹道流体力学问题, 即在一个等截面的身管中, 火药瞬时燃完, 并且不考虑弹丸与膛壁之间的摩擦及热损失的条件下, 研究膛内气体流动的规律。这就是在内弹道学中被称为的拉格朗日问题。类似这种问题, 黎曼 (Riemann) 和尤果纽 (Hugoniot) 也曾经做过详细的研究。为了便于应用, 拉格朗日自己提出了一个简化假设, 即弹后混合气体的密度沿炮膛均匀分布。这就是经典内弹道中经常使用的拉格朗日近似假设。对于拉格朗日问题最早获得分析解的是洛夫 (Love) 和毕杜克 (Pidduck), 并且给出了 155 毫米火炮的内弹道计算。继而康纳 (Corner) 对于洛夫和毕杜克解应用于火炮的问题进行了一般的讨论。拉格朗日问题的解给出弹后空间稀疏波传播的细节以及膛底和弹底压力比值 p_i/p_a 随时间波动变化的规律。但这种计算相当繁杂, 实际应用也不方便, 所以对拉格朗日问题的研究长期来进展很慢。尽管如此, 一些著名的弹道学家仍然致力于这个问题的研究。康纳

曾经预言：内弹道学中的流体力学问题可能有很大的发展。

然而，拉格朗日问题得到进一步发展是本世纪五十年代以后的事。这时由于计算数学和电子计算机技术迅速发展，不仅解决了拉格朗日问题的计算繁杂问题，而且还可以进一步考虑那些被忽略的因素，使数学物理模型更加精确地反映膛内实际的射击过程。到本世纪六十年代，开始提出了内弹道准两相流体力学的数学模型。在模型中根据几何燃烧定律考虑火药逐次燃烧过程，并且考虑正在燃烧的固相药粒的运动，但不涉及气固两相之间的相互作用。两相之间的作用利用气固两相速度比的经验公式联系起来。这个模型通过电子计算机的数值计算，得到了一些很有意义的结果。它比较好地解决了膛内压力分布的计算问题。另外，计算表明：膛底压力和弹底压力不在同一时刻达到最大值，这一计算结果已被实验所证实。由此可见，内弹道准两相流体力学问题的提出无疑是对拉格朗日问题的一个重大发展。

从本世纪六十年代以来，坦克和飞机的性能都有很大的提高。对坦克来说，不仅是装甲厚度在不断的增加，而且在装甲的结构方面也发生很大的变化。采用夹层的复合装甲大大提高了抗御破甲弹的能力。再就飞机而言，它的航速可达 $2.5 \sim 3$ 马赫数。在这样快的飞行速度下，原来初速的高射炮的命中率也将显著的下降。这都说明要求火炮的弹道性能有一个很大的提高，特别是要要求较大幅度的提高初速。为了改善火炮的弹道性能，于是采用高装填密度、高膛压的措施，以期获得高初速的火炮开始出现了。然而，新的严重问题也随之而来，极危险的膛炸现象不断的发生，对炮手的安全产生很大的威胁。这些现象引起了许多弹道学家的注意，并通过大量的实验和理论计算，对膛内的射击现象做更精细的研究。约在七十年代中期，郭 (K.K.Kuo)、萨默菲尔德 (M.Summerfield)、克里尔 (H.Krier)、高夫 (P.Gough) 等内弹道学家先后提出了内弹道两相流体力学的数学模型。这种模型进而考虑了气固两相之间的质量、能量和动量的输运过程，并且还考虑到固相药粒之间的相互作用和装药元件对射击过程

的影响,使内弹道的数学模型在精确化方面推进了一步。利用这种内弹道准一维的两相流数学模型计算所得的纵向压力波变化规律,对于药筒装填条件下,与实验结果取得相当好的一致性。表明新的理论得到实验的支持,这对理论工作是一个很大的鼓舞。然而在药包装填条件下,理论和实验的一致性仍然不很理想。这是由于药包装填存在着环形间隙,装药结构也比较复杂。因此,至少在射击的开始阶段采用准一维模型是不够准确的。目前,二维两相流数学模型对药包装填条件的模拟已取得一定的进展。

必须指出:内弹道学的两相流理论不单是为了解决有关反常弹道问题,而更重要的是研究点火、传火及瞬变燃烧的一种崭新的理论。本书所介绍的中心点火管数学模型就是两相流理论在这方面的一个典型的应用。只有准确地了解点火、传火过程,才能精细描述膛内的整个射击过程。一般情况下,膛内的纵向压力波的形成以至发生膛炸现象,往往与点火过程很有关系。只有获得一个稳定的点火过程,才能得到一个稳定的弹道性能。因此,研究点火、传火的机理及其作用已成为弹道学领域中的一个非常重要的问题。由于它的重要性,近来把点火、传火和弹丸起动阶段的内弹道问题又称为起始弹道学 (Initial Ballistics),形成弹道学的一个新分支。

研究射击过程中气流问题的另一个重要方面是后效期的气流现象。当弹丸射出膛口以后,膛内的火药气体和未燃尽药粒以极高的速度向膛外流出。这种高速的气流将对武器系统产生两种后效作用:一种是对身管的后效作用,由于火药气体高速流出而产生反作用推力,使身管继续后座;另一种是对弹丸的后效作用,这时弹丸虽然已离开炮膛,但由火药气体所形成的膛口流场对弹丸仍然产生作用,将弹丸由炮口速度加速到最大速度。与此同时,由于膛口流场的非对称性,对弹丸出炮口时的航向产生扰动,影响弹丸正确的飞行。气体流出膛口后,与膛外的空气接触而产生冲击波场、噪音及炮口焰,这对炮手的安全和阵地的隐蔽都将发

生影响。由此可见，研究后效期的气流问题是十分重要的，而且形成了弹道学中的另一个分支——中间弹道学 (Intermediate Ballistics)。在中间弹道学的领域内所要研究的问题主要有三个方面：(1) 后效期膛内气流排空特性，着重研究排空过程中对身管的后效作用，以及为研究膛口流场提供准确的起始条件；(2) 近膛口气体动力学问题，主要研究膛口流场形成的机理及对弹丸的后效作用，膛口装置对膛口流场和冲击波演变的影响，为膛口装置设计提供理论基础；(3) 中远场冲击波及对环境作用的研究，通过冲击波传播规律的研究合理地确定炮手的位置。

近几年来，高速炮理论的发展也非常迅速，在实验方面也有很大的突破。目前，弹丸的最大速度已达 11,000 米/秒这样惊人的程度。这表明内弹道学的理论正在不断的创新。作为高速炮内弹道学的理论基础仍然是气体动力学。根据气体动力学原理，为了提高弹丸的炮口速度，必须采用那些高爆温低分子量的气体作为工质，也就是要求工质具有声惯性小或逃逸速度大的特性。目前正在广泛开展研究的轻质气体火炮就是采用氢 (H_2) 或氦 (He) 作为它的工质。这种轻质气体火炮可得到与第二宇宙速度相比拟的炮口速度，成为研究高速碰撞的有效发射装置。

本书虽然比较详细地介绍气体动力学原理在内弹道学中的一些主要方面的应用，但可以预料，内弹道学中的气动力问题将会有有一个更大的发展，并成为内弹道学理论中最活跃的因素之一，然而，对射击过程产生显著影响的膛内燃烧现象，本书没有作深入的讨论。有关这方面的问题，读者可参阅燃烧学方面的专著。由于编著者水平有限，目前一些新的研究成果未能编入本书之内。被编入的内容中，缺点甚至错误也在所难免，望读者批评指正。本书只能起一个抛砖引玉的作用。

华东工程学院弹道研究所主任鲍廷钰教授为本书做了详细的审阅，并提出许多宝贵的意见。曲作家，李鸿志，朱之震，周彦煌等同志也为本书提出很多有益的建议。梁世超同志为本书计算

例题。张莺，杨新民等同志及华东工程学院绘图室为本书的出版给予热情的帮助，对此表示深切的谢意。

编著者

目 录

主要符号一览表	1
第一章 内弹道气体动力原理的基础知识	7
§ 1.1 引言	7
§ 1.2 热力学基本知识	7
§ 1.3 气体输运现象	18
§ 1.4 气体动力学基本知识	21
§ 1.5 传热学基本定律	32
第二章 颗粒的输运特性	35
§ 2.1 引言	35
§ 2.2 刚性颗粒的输运特性	36
一、阻力和阻力系数	36
二、非均匀流体中的动量输运	37
三、流体与颗粒间的热量传递	41
§ 2.3 颗粒群的输运特性	42
一、颗粒群的阻力和阻力系数	43
二、稠密颗粒群的音速和颗粒间应力	47
三、颗粒群的相间热量传递	57
第三章 内弹道准两相流体力学	58
§ 3.1 引言	58
§ 3.2 准两相流的内弹道数学模型	59
§ 3.3 $\beta = 1$ 条件下内弹道气动力数学模型	69
§ 3.4 拉格朗日坐标下内弹道气动力数学模型	71
§ 3.5 $\beta = 1$ 条件下内弹道气动力基本方程的特征线和特征方程	75
§ 3.6 内弹道气动力数学模型的计算方法	83
第四章 内弹道两相流体力学	94
§ 4.1 引言	94
§ 4.2 基本假设	97
§ 4.3 平衡方程的推导	98

§ 4.4	辅助方程	108
§ 4.5	定解条件	117
§ 4.6	平衡方程系的特征值	119
§ 4.7	计及炮膛截面积变化的两相流内弹道数学模型	131
§ 4.8	内弹道两相连续混合模型的基本方程	138
第五章	内弹道气动力模型的近似解	144
§ 5.1	引言	144
§ 5.2	比例膨胀假设	145
§ 5.3	不考虑后坐情况下弹后空间的压力分布	149
§ 5.4	拉格朗日假设下的弹后空间压力分布	156
§ 5.5	两种近似假设的比较	159
§ 5.6	有气体流出情况下膛内压力分布的近似解	162
§ 5.7	毕杜克的极限解	167
§ 5.8	实验结果与理论研究的对比	177
第六章	膛内压力波	180
§ 6.1	引言	180
§ 6.2	压力波现象及实验研究	181
§ 6.3	影响压力波因素的分析	189
§ 6.4	减小压力波的措施	198
第七章	点火和点火管物理数学模型	200
§ 7.1	点火在武器射击过程中的作用	200
§ 7.2	影响点火过程的因素	204
§ 7.3	黑火药的点火性能	206
§ 7.4	点火管物理模型	209
§ 7.5	点火管的基本方程及定解条件	211
§ 7.6	计算结果及分析	214
第八章	膛内后效作用时期及弹前气流问题的计算	217
§ 8.1	引言	217
§ 8.2	一维非定常等熵流的基本方程组及其特征线	218
§ 8.3	后效期膛内气体流动参数的计算	224
一、特征线数值解法		224
二、平均参数法		233
三、后效时期膛内压力分布		236

§ 8.4 气体流出对身管的后效作用	240
§ 8.5 弹丸前端空气柱运动的计算及冲波阻力	245
一、特征线数值解法	247
二、简波法	255
三、弹丸前端冲波阻力的计算	258
第九章 后效期膛口流场及对弹丸的后效作用	260
§ 9.1 问题的意义和概况	260
§ 9.2 气体对弹丸后效作用的近似计算方法	265
一、奥可西计算方法	265
二、 $1/3$ 次方压力分布的计算方法	266
三、斯鲁哈茨基计算方法	268
§ 9.3 膛口流场形成及特性	272
一、初始流场的形成	272
二、火药气体主流场及炮口焰	273
三、膛口流场的基本特性	275
§ 9.4 膛口冲击波场	279
§ 9.5 球对称膛口流场的计算	290
一、两种气体接触时的流动计算	290
二、球对称气体动力学的基本方程及其特征线	294
三、利用特征线法计算膛口流场	297
§ 9.6 轴对称二维膛口流场的计算	305
第十章 高速火炮内弹道理论	312
§ 10.1 弹丸最大可能初速的讨论	312
§ 10.2 膛内气体压力扰动的传播, 声惯性	317
§ 10.3 高速火炮的理想工质	323
§ 10.4 二级轻气火炮工作原理及其数学模型	326
§ 10.5 化学反应加热和电弧加热火炮	331
§ 10.6 恒压炮理论	334
§ 10.7 非等熵效应的诸因素分析	339
附录 单位制的换算表	345
参考文献	346

主要符号一览表

A	炮膛截面积；控制体外边界面积；物体的吸收率
A_g, A_p	分别为气相、固相所占据的控制体外边界面积
A_s	球形颗粒表面积
$\bar{A}_p$	火药的比表面积（单位体积内固相火药的表面积）
a	固相扰动传播速度；颗粒半径
α_1	导热系数
B	第二维里系数
B'	后效期流空过程时间常数
C	第三维里系数
c	比热容；当地音速
$\bar{c}$	分子随机运动的平均速度
c_g	炮口音速
c_h	膛口外的空气所具有的音速
c_p	定压比热容
c_w	定容比热容
c_s	黑火药燃烧产物中固体粒子的热容量
c_*	临界音速
D	管流导管直径
D_f	扩散系数
d	颗粒有效直径；弹径
$\dot{d}$	火药燃烧线速度
E	总内能；总能量
e	比内能；火药已燃厚度
e_1	火药初始半厚度
e_g, e_p	分别为气相、固相比能量
F	阻力
F_i	作用在混合物上体积力的第 i 个分量
F_r	稳态条件下的相间阻力

f	火药力; 单位体积相间阻力
f_B	点火药火药力
$f^{(n)}$	各组元之间单位体积的相间作用力
G	流量
$\vec{G}$	体积力
H	总焓; 速度比
h	比焓; 放热系数
$\bar{I}$	二阶单位张量
i	弹形系数
$\bar{i}$	x 方向单位向量
j	膛内全部火药气体重量
K	任意两单元内混合气体比重相对变化率; 应力衰减因子
k	比热比
k_f	气体导热系数
k_p	火药导热系数
L	外功; 弹底到膛底的距离
L_e	路易斯数
L_{ys}	药室长度
L_0	冲击波球心的位移
l	比外功; 活塞行程
l_g	弹丸全行程长
l_h	后效作用期弹丸行程
l_k	火药燃烧结束瞬间弹丸行程
l_ψ	药室自由容积缩径长
l'	体系容积变动功
M	马赫数; 活塞质量
M_g	炮口马赫数
M_p	一颗药粒的质量
M_s	运动激波前马赫数
m	弹丸质量

$\dot{m}$	气体的质量流量
Nu	努塞尔数
n	药粒数; 出口压力比 p_g/p_e
n_i	i 组分气体的摩尔数
$\vec{n}$	外法线向量
P	黎曼变数
Pr	普朗特数
$\vec{p}$	应力张量
p	压力
p_a	外界 (大气) 压力; 弹前空气柱压力; 波后区域压力
p_B	瞬时点火压力
p_d	弹 (丸) 底压力
p_e	膛外压力; 点火管外界压力
p_f	激波阻力
p_g	弹丸出炮口瞬间膛内压力
p_{hg}	后效期炮口断面压力
p_H	膛外空气所具有压力
p_t	膛底压力
p_0	挤进压力
Q	热量; 黎曼变数
Q_0	炮身重
q	比热量; 弹重; 热流密度; 单位质量火药在单位时间内 燃烧释放能量
$\vec{q}$	热流密度矢量
R	气体常数; 颗粒间应力
Re	雷诺数
$\tilde{R}$	通用气体常数
$\bar{R}$	颗粒应力张量
r	弹丸半径; 球坐标
Sc	施米特数

s	物质体积边界面积; 活塞断面积; 熵
s_p	一颗药粒的表面积
s^*	空间边界面积
T	温度
T_g	气体温度; 弹丸出炮口瞬时膛内温度
T_f	流体温度
T_{ps}	壁面温度(火药表面温度)
T_w	管壁温度
T_0	滞止温度; 火药初温
T_1	火药定容爆温
$\vec{T}$	表面力
t	时间
t_h	对身管的后效作用时间
t_0	初始时刻时间
U	气体流动速度
U_i	混合质量中心第 i 个速度分量
U_{ij}	炮口临界速度
U_n	径向流速
U_x	轴向流速
U_0	冲击波球心的运动速度
u	气流速度
$\vec{u}$	速度向量
u_A	出口断面气流速度
u_m	混合物质心速度
$u_{\max}$	逃逸速度
$\bar{u}_1$	火药燃速公式系数
V	控制体体积; 物质体积的体积
V_g	控制体中气相所占部分的体积; 弹丸出炮口瞬间身管后座速度
V_p	控制体中固相所占部分的体积

$V_{\max}$	身管最大后座速度
V^*	空间体积
v	弹丸速度
v_{ag}	弹丸炮口绝对速度
v_g	弹丸炮口速度
v_k	火药燃烧结束瞬间弹丸速度
v_j	弹丸极限初速
v_{jm}	弹丸最大极限速度
$v_{\max}$	弹丸速度的最大值
v_0	初速
W	总容积; 激波相对气流速度
W_0	药室容积
$\tilde{w}$	一莫尔完全气体的容积
w, w_x	比容
w_g	弹丸出炮口瞬间的比容
$\bar{w}$	边界局部运动速度
x	空间坐标
x^*	变截面控制体长度
Y	某瞬间总流量
y	空间坐标
Z	压缩因子; 火药相对已燃厚度 e/e_1 ; 相对坐标 x/L
z	空间坐标
α	火药气体的余容; 马赫角; 流场扩张角
α_B	点火药气体的余容
β	激波角; 火药气体对炮架后效作用系数
$\Gamma^{(n)}$	组元 (n) 单位体积的气体生成速率
γ	气体比重
γ_d	弹底处火药气体比重
Δ	装填密度
Δx	步长
ΔV_x	单元气体的容积
δ	单位体积火药的质量