

《近代兵器力学》丛书

中间弹道学

Intermediate Ballistics

尤国钊 许厚谦 杨启仁 编著

国防工业出版社

《近代兵器力学》丛书

中间弹道学

Intermediate Ballistics

尤国钊 许厚谦 杨启仁 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

中间弹道学/尤国钊等编著. —北京:国防工业出版社, 2003. 1

ISBN 7-118-02970-X

I. 中... II. 尤... III. 中间弹道学 IV. 0315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 078319 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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 $\frac{3}{4}$ 259 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 殷鹤龄

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 崔士义 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序)

刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 彭华良 韩祖南 舒长胜

《近代兵器力学》丛书组织结构 编辑委员会

主 任 委 员 蓝祖佑

副 主 任 委 员 陈鹏飞 杨葆新 李魁武

委 员 马春茂 王玉林 王光华 朵英贤
(按姓氏笔划为序)

刘 铭 杨楚泉 来渝生 吴三灵

邱晓华 胡国强 恽寿榕 徐明友

崔士义

编 辑 部

主 编 朵英贤 马春茂

副 主 编 吴三灵 杨楚泉 恽寿榕 徐明友

责 任 编 辑 康新中

序

力学作为一门工程技术的重要基础学科,在各行各业得到了广泛应用,现已发展成为多种类别的应用力学,兵器力学就是其中之一。建国以来尤其是近二十年来,兵器工业在基础研究、预先研究以及型号研制等方面取得了突破性进展,很多科研成果达到了国内外先进水平,也积累了不少经验和教训。为了总结、升华已有的科研成果,使之形成新的、系统的兵器力学理论体系,推动今后兵器科研和设计理论的发展,跟踪国际先进水平,我们编纂出版了这套《近代兵器力学》丛书。

《近代兵器力学》丛书,从力学角度覆盖了兵器系统的典型力学问题,总结了国内外装甲车辆、火炮与自动武器、弹道、爆炸与冲击等力学方面的成就。每一册都是由各专业领域内具有丰富实践经验和较高学术水平的专家学者进行撰著。本套丛书不仅包含了理论研究还有试验研究,重点突出了相关专业领域内的新理论、新原理和新技术的发展,基本反映了当前国内外兵器发展中应用工程力学的广度和水平,具有较高的理论水平和工程应用价值。

1998年冬,中国工程院院士朵英贤倡议编纂本套丛书,首先得到国防科技图书出版基金委员会办公室的支持,也得到中国兵器工业等二〇二研究所的积极响应并承担组织工作。经过专家学者们两年来的辛勤劳动,《近代兵器力学》丛书正式开始出版,这是一件很有意义的事情,得到了各级领导的重视和支持,受到了广大兵器科技工作者的欢迎;这一套丛书的出版必将从力学理论基础

到工程实践应用都给现代兵器的研制提供理论的指导方向,必将对兵器研制的现代化起到积极的推动作用。

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '董', '世', and '钟'.

2001 年元月

序

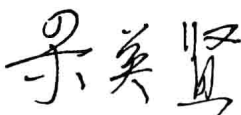
自从戈矛进化到火器,兵器(不论是枪械、火炮、坦克、战术火箭和导弹)便以发射抛射物来毁伤目标。发射动力主要来源于火药,毁伤能量主要依靠抛射物的动能或是炸药含能(直接爆炸或抛出毁伤元)。能量的转换便以内弹道、外弹道、终点弹道递次进行,兵器的载体可以不同,如运动体、战车、飞机、舰船等,这种能量转换模式却不改变。发射抛射物直到对目标的毁伤是一种大功率高瞬态的能量转换。弹丸对目标的撞击、炸药爆炸、内弹道,外弹道等则是纳秒、微秒、毫秒级的过程。发射时兵器本身也受到高强度的激励。自从经典内弹道学建立的 100 多年来,随着火药力和炸药能量的提高,这种特征日益明显,并以高瞬态的力学过程映射出来,也就日益有别于其它工程领域。有人说,兵器领域是“瞬态力学大户”此言不虚!本套《丛书》归纳了 20 世纪后叶兵器力学的主要成果,其中不乏我国学者的贡献。每个分册的作者都是该领域中的卓有成效者。

工程实践和理论基础是兵器发展的两个巨轮,而理论基础则依赖于对工程实践的认识和提高,并用以指导后期的工程实践。20 世纪 60 年代,我国兵器已进入自行研制,那是鄙薄技术最严重的时期,漫长的岁月,理论工作被荒芜,很多在工程中已成功的经验不能总结升华,这给兵器力学的发展带来严重后果,也给兵器发展带来不利影响。所幸的是改革开放以来,已有很大的弥补,《丛书》中相当的篇幅是这一时期的结晶。毕竟,研究瞬态力学有其很大的难度,过程短暂、幅值很高、频域很宽,非线性问题多、信号采集困难、费用消耗大等因素制约着发展。即使这样,经过 20 多年

的知识积淀及相邻学科的带动,给设计观念带来很大的变化,并运用于产品研制。但是,也要看到这套《丛书》只是反映了兵器力学中的一部分。譬如,动态强度篇幅较少,在高速碰撞下材料的特性如何变化尚处于假设。工程中存在的“应力腐蚀”、“氢脆”镀层强度等力学问题,须在更微观层次中进行研究。兵器中已大量应用非金属复合材料,但本构关系不甚清楚。至于用力学来描述高速破片对目标的创伤过程,目前远不成熟。等等。现在,纳米技术已进入社会,也逐步贴近兵器,那么兵器这种通过高爆能量转换和高动力发射的模式,会不会成为应用纳米技术使武器小型化的障碍?兵器力学中真有没完没了的事情,任重道远!

如此说来,这套《丛书》只是一个开头,希望这项工作能够获得延续。我更希望兵器力学研究的现状能够得到改进,使它发挥应有的推动作用。

中国工程院院士



2000 年 12 月

前 言

中间弹道学是第二次世界大战后兴起的弹道学的一个学科分支。它的研究环境极为复杂,难以采用严格的数学—力学研究手段来研究。国内外经过几十年的研究,已对它的各个研究领域都有了长足的规律性的认识,从专门实验手段和方法的研制到寻找工程计算的简化方法,进而到在一定简化条件下的数值模拟。随着计算机的发展,对三维复杂流场的数值模拟正在成为现实。用中间弹道学的研究方法来解决有关的实际问题已成为其当前的研究趋势。

迄今为止,国内外尚未发表过包括中间弹道学完整研究领域的专著。为避免重复研究,出版专著是十分必要的。

本书用六章来概括国内外中间弹道学的研究成果。第一章讨论膛口气流排出和膛口流场。介绍膛口流场的形成机理,激波或激波系的计算方法。第二章讨论光膛口的膛口冲击波场。介绍它的特性和相似律,简化条件下的膛口冲击波场工程简化解法和数值模拟结果以及实测结果。第三章讨论膛口焰。介绍膛口焰的空间结构和时变规律,二次焰的点燃和形成机理,膛口焰的预测计算和抑制方法。第四章讨论带膛口装置时的膛口冲击波场。介绍膛口装置的结构研究及对膛口冲击波场分布的影响,膛口冲击波场的实测结果和数值模拟,无后坐炮的膛口冲击波场和相似律。第五章讨论脱壳弹的脱壳过程。介绍脱壳过程、基本理论、数值模拟和实验研究。第六章讨论弹丸在后效期内的扰动。介绍扰动规律和基本参数的测定。

第一、二和四章由尤国钊编写,第三章由许厚谦编写,第五、六章由杨启仁编写。全书由尤国钊统稿。

由于中间弹道学未出版过专著,作者水平又有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请专家和读者批评指正。

作者

目 录

符号说明	1
第一章 膛口气流排出和膛口流场	3
1.1 引言	3
1.2 弹前气流及激波形成	4
1.2.1 分析法	4
1.2.2 特征线法	7
1.2.3 有限差分法	13
1.2.4 弹前激波及激波阻力	20
1.3 定常膨胀不足轴对称射流	21
1.3.1 射流激波系	21
1.3.2 喷管出口参数的影响	24
1.3.3 计算方法	28
1.4 膛口流场的形成及特性	52
1.4.1 膛口初始流场	52
1.4.2 膛口主流场及膛口焰	57
1.4.3 膛口流场的基本特性	62
1.4.4 膛口气流参数的测量	69
参考文献	76
第二章 光膛口冲击波场	79
2.1 引言	79
2.2 变能量冲击波	80
2.3 膛口冲击波场的方向性	83
2.4 膛口冲击波场的相似律	84
2.5 膛口冲击波场的简化解法	92

2.6 球对称膛口流场数值模拟	103
2.7 轴对称膛口流场数值模拟	110
2.8 考虑火药燃气组分膛口冲击波场数值模拟	121
2.9 实测膛口冲击波场	124
参考文献	130
第三章 膛口焰	132
3.1 引言	132
3.2 膛口焰的结构及其时空特征	134
3.3 膛口二次焰的点燃及传播过程	137
3.4 膛口二次焰点燃的化学动力学机理	139
3.5 膛口二次焰点燃的物理条件	142
3.6 膛口焰的预测	147
3.6.1 卡法格诺模型	147
3.6.2 梅—爱因斯坦模型	148
3.6.3 施密特模型	149
3.6.4 数值计算预测模型	152
3.6.5 马赫盘点火模型	152
3.7 膛口焰的抑制方法	153
3.7.1 抑制膛口焰的物理方法	153
3.7.2 抑制膛口焰的化学方法	156
参考文献	157
第四章 带膛口装置的膛口冲击波场	158
4.1 引言	158
4.2 膛口装置与射流结构	158
4.3 分析膛口装置的改进方法	168
4.4 带膛口装置时的膛口冲击波场	172
4.5 膛口制退器的设计	176
4.6 带膛口装置时膛口冲击波场的数值模拟	183
4.7 无后坐炮测量膛口冲击波场	194
4.8 无后坐炮冲击波场的相似律	199

参考文献	203
第五章 脱壳弹的脱壳过程	207
5.1 引言	207
5.2 脱壳弹脱壳过程的基本理论	209
5.2.1 脱壳弹的物理模型	210
5.2.2 脱壳弹弹托结构及脱壳机理	211
5.2.3 脱壳弹脱壳过程的描述	213
5.2.4 脱壳过程中的干扰源及其对脱壳 非对称性的影响	216
5.3 脱壳弹脱壳过程的数学模型	218
5.3.1 脱壳弹(弹体)一般运动微分方程组	218
5.3.2 阻力型弹托脱壳弹一般运动微分方程组	222
5.3.3 混合型弹托脱壳弹一般运动微分方程组	228
5.4 脱壳过程中各时期的受力分析与计算	237
5.4.1 阻力型弹托脱壳弹各时期的受力分析 与计算	237
5.4.2 混合型弹托脱壳弹各时期的受力分析 与计算	245
5.5 脱壳过程的数值模拟	248
5.5.1 脱壳过程数值模拟的技巧与方法	249
5.5.2 阻力型弹托脱壳弹脱壳过程数值模拟 结果分析	251
5.5.3 混合型弹托脱壳弹脱壳过程数值模拟 结果分析	257
5.5.4 APFSDS 模型弹的数字仿真与射击试验 分析	266
5.6 脱壳过程的实验研究	268
5.6.1 概述	268
5.6.2 试验方法	270
5.6.3 实验数据的处理与分析	274

5.6.4 脱壳过程中的干扰力函数	280
参考文献	285
第六章 弹丸在后效期内的扰动	287
6.1 引言	287
6.2 弹丸在后效期内所受到的力和力矩	289
6.3 弹丸在后效期内的运动微分方程	290
6.3.1 第一类模型	290
6.3.2 第二类模型	292
6.3.3 讨论	293
6.4 弹丸在后效期内的扰动规律	293
6.4.1 对弹丸运动的数学近似处理方法	293
6.4.2 弹丸在后效期内的一般运动规律	298
6.4.3 弹丸在后效期内的偏角	300
6.5 算例与结论	301
6.6 弹丸后效期基本参数的测定	302
6.6.1 测试方法简述及测试结果处理	303
6.6.2 曲线拟合与后效期基本参数的确定	305
参考文献	307