

《近代兵器力学》丛书

爆炸力学

Explosion Mechanics

恽寿榕 赵衡阳 编著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

爆炸力学 / 恽寿榕, 赵衡阳编著. — 北京: 国防工业出版社, 2005.5

(近代兵器力学丛书)

ISBN 7-118-03678-1

I. 爆... II. ①恽... ②赵... III. 爆炸力学
IV. 038

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 122273 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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 10 247 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 35.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

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 (按姓名笔画排序)	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成	
	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
(按姓名笔画排序)

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第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 several fluid, connected strokes. The characters appear to be 'Song Zhi' (宋智) in a cursive script.

2001 年元月

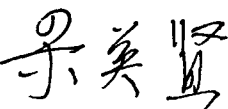
序

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,也就日益有别于其他工程领域。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

爆炸作为广泛存在于宇宙时空的现象,与人类的过去、现在和将来有密切的关系,是人们必须认真研究和对待的问题。以力学的观点和方法对爆炸进行研究构成了爆炸力学。新中国成立以来,在常规武器的研究和发展过程中,爆炸力学发挥了理论指导作用,并且得到了蓬勃发展。本书的宗旨是总结这方面的成果并加以提高,以利于爆炸力学的提高和进一步发展。

本书主要取材于我国常规武器领域的研究成果,也涉及国外少量新成果。本书免去了成熟的爆炸力学基础理论的阐述和推导,各章节的内容视我国研究成果的多寡而定,不追求整体系统性。本书取材力求创新性和重要性,对研究成果进行了研究和分析,以保证取材的真实性和客观性。本书内容中有超过半数作者独立研究和参与研究的成果,其可靠性和对问题理解的深度均较高。

本书的内容,许多是在爆炸力学前辈:郑哲敏院士、丁敬教授和薛鸿陆教授等的指导下完成的。本书采用了北京理工大学、南京理工大学、中国科技大学、国防科技大学、兵科院有关研究所和中国工程物理研究院有关研究所等单位的研究成果。

本书撰写过程中,得到了经福谦院士、章冠人教授、李德元教授和孙锦山教授等专家的指导。本书第六章由赵衡阳教授完成;其他各章主要由恽寿榕教授完成,其中陈智刚教授参加了第四、五章的工作,何远航教授参加了第二章的工作。在文字和图表工作方面由马峰、王成、陈鹏万、高凤霞、康敬和陈利等同志协助完成。

本书由南京理工大学彭金华教授和国防科技大学张若棋教授审阅,他们提出了许多宝贵意见。

本书得以出版,源于《近代兵器力学》丛书编委会及上级领导的支持。

在此,本书作者对上述单位和同志,表示深深的谢意。

本书中包含了一些新方法、新观点和新解释,尚需进一步深入探讨和研究。本书写的时间较长,经过了多次修改,由于作者水平有限,难免有错误和不妥之处,敬请读者批评和指正。

作 者

2004 年夏于北京理工大学

目 录

第一章 总论	1
第一节 爆炸	1
第二节 爆炸力学	2
第三节 爆炸力学研究方法	3
第四节 爆炸力学发展简史	5
参考文献	8
第二章 化学爆炸	9
第一节 炸药	9
第二节 爆轰	13
一、概述	13
二、爆轰波的 CJ 理论	14
三、爆轰波结构的 ZND 模型	20
四、一维平面定常爆轰波结构	24
五、一维平面定常爆轰波结构计算	29
六、瞬时爆轰	31
第三节 非理想爆轰	35
一、非理想炸药	35
二、爆轰波的二维效应	36
三、爆轰波的立体结构	39
第四节 多相爆轰	41
一、气-液相爆轰	43
二、气-固相爆轰	46
三、粉尘爆炸事故分析	50
第五节 云爆武器	53

一、概述	53
二、云爆炸药的燃烧转爆轰过程	56
三、二次起爆型云爆弹爆炸试验	57
四、一次起爆型云雾爆轰	59
五、云雾爆炸威力评价方法之一: TNT 当量法	62
第六节 化学爆炸作功能力的表征	63
一、概述	63
二、爆炸作功能力的强度量	64
三、爆炸作功能力的广延量	65
参考文献	66
第三章 化学爆炸的传播与爆轰产物状态方程	68
第一节 爆轰的传播	68
一、概述	68
二、球、柱面爆轰波的传播	69
三、直径效应	72
四、爆轰冲击波动力学(DSD)方法	77
五、爆轰波形的控制	80
第二节 爆炸网络	89
一、爆轰波传播的拐角效应和沿惰性介质的绕射	89
二、爆炸逻辑网络	101
三、刚性爆炸网络	104
第三节 爆轰产物的状态方程	106
一、不显含化学反应的状态方程	106
二、显含化学反应的状态方程	109
三、爆轰反应区内游离碳的状态方程	112
四、爆轰参数的理论计算	114
五、JWL 状态方程参数的理论确定方法	116
六、含铝炸药的 JWL 状态方程	118
参考文献	120
第四章 爆炸对飞片的驱动加速	122

第一节 概述	122
第二节 一维平面非定常流体力学模型	122
一、瞬时爆轰状态的声速	122
二、瞬时爆轰双向驱动	132
三、一维平面非定常流动双向驱动	139
四、一端为刚性固定壁(刚固壁)或真空情况	145
五、不同爆炸抛掷方法的比较	149
第三节 能量守恒方程模型	151
一、格尼公式	151
二、一维平面爆炸驱动中爆轰产物的参量分布计算	152
三、一维爆炸驱动能量守恒方程	153
第四节 飞片二维拉氏速度测定技术	162
一、概述	162
二、立体狭缝扫描高速摄影技术	162
三、爆炸驱动变厚板二维拉格朗日速度测定	169
参考文献	170
第五章 聚能效应	171
第一节 概述	171
第二节 聚能射流形成理论	172
一、射流形成过程的实验观察	172
二、射流形成过程的定常流体力学理论	172
三、轴对称药型罩压合过程中厚度方向各层的速度和 压力分布	175
第三节 聚能射流形成的临界条件	179
一、低速限制条件	179
二、高速限制条件	181
三、临界条件的综合	183
第四节 药型罩内表面压合速度的测定	185
一、前人的工作	185
二、用立体狭缝扫描高速摄影技术测定压合速度	185

第五节 射流在空气中运动及参数测定	187
一、概述	187
二、射流速度分布的测定	188
三、射流质量分布的测定	189
四、射流颈缩与断裂	189
五、射流在空气中运动的自调整	191
第六节 射流侵彻理论	193
一、概述	193
二、连续射流侵彻的流体力学理论	195
三、断裂射流侵彻的流体力学理论	199
四、射流对多层钢板的斜侵彻	202
第七节 射流侵彻参数的实验测定	203
一、破甲深 L 和破甲时间 t 关系的测定	203
二、药型罩微元位置和相应侵彻深的测定	204
第八节 射流侵彻能力的稳定性	206
一、概述	206
二、药型罩材料与均匀性	206
三、加工精度与装配的对称性	208
四、药型罩压合过程的不稳定性	209
第九节 筒形射流聚能装药	211
一、概述	211
二、W 装药设计原则	212
三、筒形射流形成过程的数值模拟	213
四、实验研究	216
五、讨论	217
参考文献	218
第六章 水中爆炸	219
第一节 水中爆炸的基本现象	219
第二节 水中冲击波	225
一、基本方程组	225

二、水中冲击波的初始参数	230
三、水中爆炸引起的水介质运动规律	232
第三节 水中爆炸相似律	233
第四节 不可压缩流体中的气泡脉动	241
第五节 水中爆炸排淤	246
第六节 水中爆炸的破坏效应和安全防护	248
一、破坏效应	248
二、水中爆炸安全防护技术	251
三、水中爆炸安全距离	254
参考文献	257
第七章 爆炸力学数值模拟中的若干问题	258
第一节 概述	258
一、对数值模拟的要求	258
二、对数值模拟的误差分析	258
三、程序对处理材料大变形和清晰显示界面功能的 兼备	259
四、网格构造和设置	260
第二节 数值模拟程序的物理考核	260
一、概述	260
二、药型罩微元的压合速度	261
三、射流速度	261
四、射流对钢材的破甲深	264
五、讨论	264
第三节 侵彻钢筋混凝土的数值模拟	265
一、概述	265
二、ALE 法	265
三、分离式拉氏法	268
四、讨论	271
第四节 欧拉程序中的材料界面示踪点显示算法	272
一、概述	272