



国防科技著作精品译丛



Springer

Terminal Ballistics

终点弹道学

【以色列】 Zvi Rosenberg Erez Dekel 著

钟方平 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

终点弹道学

Terminal Ballistics

[以色列] Zvi Rosenberg

Erez Dekel 著

钟方平 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军-2013-054 号

图书在版编目 (CIP) 数据

终点弹道学/ (以) 罗森贝格 (Rosenberg, Z.) (以) 德克尔 (Dekel, E.) 著;
钟方平译. —北京: 国防工业出版社, 2014. 10
(国防科技著作精品译丛)
书名原文: Terminal ballistics
ISBN 978-7-118-09594-4

I. ①终… II. ①罗… ②德… ③钟… III. ①终点弹道学 IV. ①0315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 212639 号

Translation from English language edition:

Terminal Ballistics

by Zvi Rosenberg and Erez Dekel

Copyright © 2012 Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer

Science+Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Berlin Heidelberg 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

终点弹道学

[以色列] Zvi Rosenberg Erez Dekel 著 钟方平 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限公司

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 20½

字 数 342 千字

版 印 次 2014 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2500 册

定 价 92.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

内容简介

本书结合实验、数值模拟和解析模型分析的广泛内容, 探讨终点弹道学的重要问题。

第 1 章简述弹道学实验设备和脉冲载荷作用下材料特性的诊断技术。第 2 章论述终点弹道学数值模拟程序的基本特点, 如欧拉描述和拉格朗日描述、网格划分技术以及一些最常用的材料模型等。第 3 章讨论刚性侵彻体的侵彻力学, 并介绍这一领域最新的分析模型。第 4 章处理薄板贯穿问题; 第 5 章研究聚能射流和消蚀长杆的侵彻力学。第 6 章和第 7 章讨论装甲设计领域使主要威胁破坏或失效的一些技术。

全书自始至终展示数值模拟对于理解实验现象背后的基本物理机制的优势或好处。

译者序

Zvi Rosenberg 和 Erez Dekel 长期在以色列 Rafael Advanced Defense System Ltd. 的弹道研究中心工作, 是该领域的国际知名学者。2012 年由 Springer 出版社出版的《Terminal Ballistics》一书是作者总结自己的研究成果并结合本领域最新进展而完成的专著。书中综合实验、数值模拟和解析模型分析手段, 广泛讨论了这方面的问题, 尤其是突出强调和展示了数值模拟、解析模型对于探究终点弹道学现象背后的基本物理机制的重要作用。

本书主要分为三部分。第一部分介绍了终点弹道实验室及其诊断技术、数值模拟技术及材料模型。第二部分主要讨论不同的弹/靶组合情况下, 发生撞击和侵彻的基本作用过程。第三部分分析了各种抗侵彻结构 (包括抵抗聚能射流), 如陶瓷装甲和编织物装甲, 以及它们的基本原理。全书既包括许多关于终点弹道学的有用的信息资料, 又由浅入深地探讨了所涉及的各个专题内容。

本书对于希望更新自己的终点弹道学知识的读者是较理想的书籍, 可供对于终点弹道学感兴趣的学者、工程师阅读, 也适合于作为本领域的教科书或参考书使用。书中囊括了本领域的一些最新成果, 涉及的丰富内容可作为进一步深入研究的基础。

感谢国防工业出版社和杨秀敏院士、李永池教授对本书翻译出版的大力支持,感谢出版社编辑们为书稿编排、校对所做的辛勤工作,感谢丁兵、贺鑫、熊益波、谢兆钱、林雪洁等在本书翻译过程中提供的帮助。

由于译者水平有限,本书翻译中肯定存在一些错误和不当之处,恳请同行专家、学者和广大读者提出宝贵意见。

译者

2014年9月

献给我们的父亲

S. 罗森贝格和 N. 德克尔

序

过去一个世纪以来, 军事和民用工程师们对固体高速碰撞现象开展了大量研究。高达数百米至数千米每秒的撞击速度, 使相撞物体产生大变形, 甚至导致碰撞区域物体的彻底毁坏。其中, 弹体对装甲车辆的撞击 (速度为 $1 \sim 2 \text{ km/s}$) 和陨石对空间站的撞击 (速度为 $10 \sim 20 \text{ km/s}$) 是尤其令人感兴趣的。汽车工业的安全工程师研究最高一两百米每秒的碰撞速度下物体的结构响应问题。为研究高速碰撞现象, 过去 50 年来形成和发展了称为“脉冲载荷下固体动态响应”的专门学科, 涉及诸如弹-塑性理论、流体动力学、高压物理、高应变率下材料响应、断裂力学、失效分析等不同专业学科。最近几十年, 出版了一些针对上述问题的专题论文集, 如系列超高速撞击会议、国际弹道学会议、美国物理学会固体冲击压缩会议以及欧洲的 DYMAT 会议系列等。此外, 创立了该领域的一些专门期刊, 如 1983 年创刊的《国际碰撞工程学杂志》和 2010 年创刊的《国际防护结构杂志》。这些学术活动集中在脉冲载荷下固体的动态响应研究方面, 即发展新的实验设备和诊断技术、先进的数值模拟和解析模型等。

本书主题是终点弹道学, 论述运动物体 (威胁或弹体) 与防护结构 (靶体) 之间的相互作用, 碰撞速度为几百米至几千米每秒。在此碰撞速度下, 导致靶体局部破坏: 损坏集中在弹体运动方向上, 横向扩展到几倍弹体直径范围。对于薄靶将发生贯穿, 而厚靶发生深侵彻。从事装甲防护研究的工程师, 想方设法减小被防护结构的破坏; 而从事反装甲研究的工程师, 关注于通过增加弹体速度、质量等提高其破坏力。这类侵彻/贯穿问题对他们都是很重要的。终点弹道学研究领域覆盖面广, 涉及的科学技术挑战和

工程应用的范围广,因此作者不得不限制本书要讨论的题材范围。作者在以色列的防务技术研究院——RAFAEL 公司(Rafael Advanced Defense System Ltd.)的终点弹道实验室从事装甲问题研究许多年,很自然地,我们选择的问题大部分属于这方面。

作者感谢许多年来同事们令人兴奋又富有成果的研究工作。特别地,感谢以下合作研究者:来自 RAFAEL 公司的 Y. Yeshurun、D. Yaziv、M. Mayseless、Y. Ashuach 和 Y. Partom; 美国的 S. J. Bless、M. J. Forrestal 和 N. S. Brar; 英国的 N. K. Bourne 和 J. F. Millett。作者感谢 M. Siman、R. Kreif、M. Rozenfeld、Y. Reifen、D. Kanfer、N. Yadan、D. Mazar、I. Shahrabani 和 Y. Zidon 等人 30 多年来在实验室完成的许多杰出实验。在准备本书过程中,与 C. E. Anderson、A. J. Piekutowski、K. Poormon、T. J. Holmquist、T. Borvik、S. Chocron 和 K. Thoma 等进行了有益讨论,他们还提供了一些很好的图片给本书增色不少,在此一并表示感谢。

Z. Rosenberg

E. Dekel

引言

研究物体撞击的碰撞科学与工程有很广的应用范围,具体依碰撞类型和碰撞速度而定。在速度很低时,碰撞响应局限在弹性范围,相撞击物体实际上没有损坏。在速度很高时,相撞物体发生十分明显的变形、局部熔化甚至彻底粉碎。不同的科学技术与工程学科都对该领域的某一特定方面有贡献,如车辆碰撞、雨滴侵蚀、装甲和反装甲设计、航天器陨石撞击防护和大流星体以极高速度撞击行星等。为了理解这些不同事件,研究者必须熟悉诸如固体弹-塑性理论、断裂力学、高温高压下材料物理等不同的学科领域。终点弹道学是装甲/反装甲工程师们感兴趣的关于碰撞的科学和工程学科的通用名称。其相应的碰撞速度通常为 $0.5 \sim 2.0 \text{ km/s}$ 的兵器速度范围,也就是枪、炮发射的攻击人员、装甲车辆和建筑物的弹体速度范围。成型装药射流(聚能射流)的速度属于 $2.0 \sim 8.0 \text{ km/s}$ 的超高速范围,射流与装甲的相互作用也是装甲/反装甲工程师们主要兴趣之一。本书致力于战场上常见的各种威胁(弹体)与防护结构相互作用的终点弹道学研究。

终点弹道学研究起始于瑞士数学家 Leonard Euler (1745) 和英国工程师 Benjamin Robins (1742),他们分析了球形钢弹侵彻土壤的数据,其侵彻深度依赖于碰撞速度。在随后的两个世纪里,直到第二次世界大战,终点弹道学领域都以不同弹体撞击不同靶体时侵彻深度与撞击速度的经验关系为基础。Hermann、Jones (1961) 以及 Backman、Goldsmith (1978) 的评述中,概述了许多这样的经验公式。第二次世界大战期间,美国和英国的科学家采用基于物理考虑得到的解析模型,研究了聚能射流和刚性钢弹

体对装甲板的侵彻过程。这些模型确定了侵彻过程中施加于弹体的主要作用力,随后将作用力代入弹体运动方程进行求解。解析模型将复杂三维问题的数学描述简化成一个反映侵彻过程物理本质的简单形式,得到易于求解的常微分方程组或一维偏微分方程组。模型能用可控条件的实验进行检验,实验参数进行系统的变化,以确定描述侵彻过程的无量纲参量。通过这些解析模型,实验数据间的关联变得容易,而将变化规律外推到实验设备的能力范围之外也成为可能。另一方面,解析模型需要采取某些折中处理,使其适用于仅有单一机制起作用的理想情况。尽管如此,解析模型在解释实验数据和减少实验次数方面还是获得了成功应用。随着数值模拟技术的进步,数值代码变得更好和更高效,解析模型的作用似乎在下降。然而,数值模拟通常仅能解释实验数据,很少提供对于作用过程的物理洞察。我们的强烈信念是,解析模型对于理解终点弹道学问题的物理本质和突出强调影响作用过程的重要参数是至关重要的。

本书提供了很多例子,在这些例子中,以物理本质为基础的模型在简化复杂相互作用分析方面起到了主要作用。这些模型从实验观测或数值模拟推理得到。我们的方法是,数值模拟可视为“理想实验”,每次“实验”改变一个参数,确定该参数对所研究过程的影响。我们将展示数值模拟研究对于以数值模拟为基础建立解析模型和评判已有模型的作用。文献里经常用的“模型”这一术语有时使人迷惑,因为它既用于描述材料性质(材料模型),又用于物理过程的解析说明(工程模型)。在这两种用法里,模型都应该是基于物理本质的,模型参数可以通过精确设定的实验予以测定。一个有效的材料模型应该适用于各种各样实验情况,而一个有效的工程模型应该能解释某一特定实验中许多材料的行为。

本书分成三篇。第一篇简单描述了终点弹道学实验室和本领域应用的主要诊断工具,同时概述了数值模拟常用的几个材料模型;第二篇专注于侵彻力学,讨论不同的弹/靶组合情况下,发生撞击和侵彻的基本作用过程。第三篇论述了用以抵抗一些常见威胁的几种装甲设计概念,以及支撑这些设计概念的工作原理。

目录

第一篇 实验和数值模拟技术

第 1 章 实验技术	2
1.1 终点弹道学实验室	2
1.1.1 实验室用枪炮	2
1.1.2 弹体和靶体	4
1.1.3 终点弹道学诊断技术	6
1.2 材料动态性能确定	7
1.2.1 状态方程测量	8
1.2.2 材料动态强度测量	10
1.2.3 诊断技术	12
1.3 终点弹道学研究中的常见威胁	20
第 2 章 数值模拟的材料模型	23
2.1 概述	23
2.2 材料特性	24
2.2.1 状态方程	25
2.2.2 本构关系	26
2.2.3 韧性材料破坏	28
2.2.4 脆性材料破坏	32
2.2.5 层裂破坏	34

第二篇 侵彻力学

第 3 章 刚性侵彻体	39
3.1 半无限厚靶侵彻力学	39
3.2 刚性长杆侵彻模型	49
3.2.1 兵器速度范围内的撞击	49
3.2.2 高速碰撞时弹孔扩张现象	54
3.3 空腔膨胀分析	61
3.4 最优弹头形状	65
3.5 短弹体侵彻	67
3.5.1 侵彻开坑阶段影响	67
3.5.2 以数值模拟为基础的侵彻开坑阶段影响的解析模型	72
3.6 球体撞击	79
3.6.1 刚性球体撞击	79
3.6.2 非刚性球体撞击	82
3.7 摩擦的影响	85
3.8 混凝土靶	87
3.9 可变形杆的深侵彻	90
3.10 半无限厚靶—有限厚靶的过渡	97
第 4 章 靶板贯穿	99
4.1 概述	99
4.2 刚性尖头弹对韧性靶板的贯穿	101
4.3 球头弹对靶板的贯穿	117
4.4 钝头弹对靶板的贯穿	120
4.5 剪切局部化和绝热剪切失效	135
4.6 超高速撞击下薄板的贯穿	138
第 5 章 消蚀侵彻体	141
5.1 聚能射流侵彻	141
5.2 消蚀长杆侵彻	145
5.2.1 Allen-Rogers 侵彻模型	147
5.2.2 Alekseevskii-Tate 侵彻模型	154

5.2.3	Alekseevskii-Tate 模型的有效性	159
5.2.4	长径比影响	164
5.2.5	其他侵彻模型	168
5.3	终点弹道学研究的相似律问题	172
5.4	超高速碰撞阶段的侵彻	179
5.5	消蚀杆对靶板的贯穿	183

第三篇 抗侵彻机制

第 6 章 高强度靶抗侵彻 193

6.1	定义	193
6.2	金属靶	194
6.3	陶瓷装甲	198
6.3.1	陶瓷装甲抗穿甲弹侵彻	199
6.3.2	陶瓷装甲与长杆弹相互作用	209
6.3.3	数值模拟	216
6.3.4	陶瓷装甲抗聚能射流侵彻	223
6.4	编织物作为装甲材料	226

第 7 章 非对称弹/靶相互作用 236

7.1	抵抗穿甲弹侵彻	239
7.2	抵抗长杆侵彻	245
7.2.1	长杆贯穿斜靶板	245
7.2.2	长杆跳飞	246
7.2.3	长杆与运动靶板相互作用	251
7.2.4	攻角运动的杆的撞击	259
7.3	抵抗聚能射流侵彻	270
7.3.1	爆炸反应装甲	270
7.3.2	被动夹芯盒状装甲	279

参考文献 285

第一篇 实验和数值模拟 技术

第 1 章

实验技术

终点弹道学是各种各样弹/靶组合条件下,发生高速撞击的作用过程的统称。有两个互相关联的学科研究弹体发射问题,即内弹道学研究弹体加速到预期速度的问题和外弹道学研究弹体发射后到着靶的飞行动力学问题。本章简要描述发射弹体到预期速度的一些有关设备和技术,以及用来观察弹体飞行和碰撞着靶的相关诊断技术。本章还描述为确定发生碰撞的材料特性而发展起来的有关实验技术和理论方法。

1.1 终点弹道学实验室

1.1.1 实验室用枪炮

在实验室内,大多数终点弹道学实验使用实验室枪炮进行缩比实验。相对于全尺寸实验,缩比实验相当容易且费用低。缩比比例通常为 1:3 和 1:4,采用口径 20 ~ 40 mm 的枪炮进行实验。使用火药枪炮发射的弹体速度可达 2 km/s。使用二级轻气炮发射,弹体速度可达 10 km/s。一些综述文献,例如 Siegel (1955)、Stilp 和 Hohler (1990),专门讨论了实验室枪炮的工作原理和设计技术。

所有这些不同的发射器,都由一个高压储气室(后膛)连接到长管(发射管)上,弹体在长管内加速。推动弹体加速的压力可通过燃烧一定量火药获得(火药枪/炮),或由压缩气体快速释放获得(气体枪/炮)。弹体在发射管内持续加速,但弹体移动距离超过 120 倍发射管口径后,弹体速度的进一步增加不明显。实验室枪炮的典型长度就是 120 倍口径。加速过程中,

弹丸最终获得的动能和高压脉冲 $p(x)$ 做的功可建立如下方程:

$$\frac{1}{2}MV^2 = \frac{\pi}{4}D_g^2 \int p(x)dx \quad (1.1)$$

式中: M 为弹体质量; D_g 为发射管内径。

取压力平均值 p_{av} 作用在弹体上, 则弹体出口速度可表示为

$$V = D_g \sqrt{\frac{\pi p_{av} L_g}{2M}} \quad (1.2)$$

式中: L_g 为发射管长度。

方程 (1.2) 指出了影响枪炮性能的主要因素和它的发射能力 (对特定弹丸质量可达到的速度)。内弹道学研究准确确定不同气体或火药的压力波形和压力平均值的问题。每种气体都存在可赋予弹体速度的最大值, 即气体的逃逸速度 V_{esc} —— 高压气体自由膨胀 (除了加速气体自身外, 不加速其他质量) 可获得的最大速度。逃逸速度可表示为

$$V_{esc} = \frac{2c}{\zeta - 1} \quad (1.3)$$

式中: c 为气体高压条件下的声速; ζ 为气体的比热比。

气体声速与气体分子量平方根成反比, 这也是轻气炮用氦气或氢气的原因。 V_{esc} 与气体温度成正比, 二级轻气炮泵管里的气体在快速压缩下温度升高, 提高了气炮获得更高驱动速度的能力。20 世纪 50 年代, 为了研究陨石类弹体对航天器的超高速撞击 (撞击速度约 10km/s), 人们研制了二级轻气炮。Stilp 和 Hohler(1990) 介绍了其设计原理, 图 1.1 为二级轻气炮示意图。

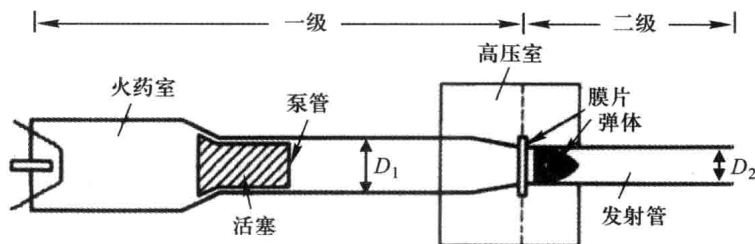


图 1.1 二级轻气炮示意图

二级轻气炮的第一级包括火药室和泵管 (内径 D_1 的长管)。火药在火药室里点燃, 火药燃烧产物加速放置在泵管里的塑料活塞。活塞后部为锥