

终点效应学

张先锋



北京理工大学出版社



兵器科学与技术丛书

终点效应学

张先锋 李向东 沈培辉 祖旭东 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书在继承传统弹丸终点效应理论和方法的基础上,注重理论联系实际,并反映最新的科研成果,全面介绍了弹药战斗部终点效应的基本概念、理论模型及其毁伤目标的特点。本书共分6章,主要内容包括侵彻效应、爆炸效应、杀伤效应、穿甲效应和破甲效应。

本书具有通用性和广泛的适用范围,主要作为高等院校有关专业本科生、研究生的教材,亦可作为从事弹药战斗部研究、设计科研工作者的参考资料。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

终点效应学 / 张先锋等编著. —北京:北京理工大学出版社, 2017.9
ISBN 978-7-5682-4702-3

I. ①终… II. ①张… III. ①弹药-武器效应 IV. ①TJ41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 204857 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 18.25

字 数 / 432 千字

版 次 / 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 58.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

《终点效应学》是依据弹药工程专业教学大纲需求进行编写的, 终点效应学是弹道学(内弹道、中间弹道、外弹道、终点弹道)的一部分, 也可以称为终点弹道学。它是研究火炮弹丸、迫击炮弹、枪弹弹头、航空炸弹、火箭弹战斗部、导弹战斗部或其毁伤元对目标的作用规律及伴随现象的科学。它系统描述了各种弹药战斗部的毁伤元对目标介质的作用原理、作用机制、作用特色和作用效果的理论分析、数值计算、效果验证方法, 揭示了毁伤元对不同目标介质的作用现象和本质, 给弹药工程专业学生提供了理性和感性的弹药威力设计方面的系统理论指导, 对从事弹药工程研究的科技人员进行产品的威力优化设计提供了很好的借鉴和帮助。

本教材共 6 章。第 1 章为绪论, 主要介绍终点效应学的定义、分类及作用特点、研究方法和发展历史等基本概念。第 2 章侵彻效应介绍弹体侵彻受力分析、阻力特点、阻力函数等基本概念, 重点介绍了弹体对岩石及混凝土介质的侵彻效应特点、空腔膨胀模型等。第 3 章爆炸效应介绍了爆炸冲击波形成机制及作用特点, 分类介绍了空气中爆炸、水中爆炸及岩土中爆炸的特点及毁伤目标作用机制。第 4 章杀伤效应按照杀伤破片形成、飞散、毁伤目标的顺序介绍了破片形成质量分布、速度分布及空间分布; 破片飞散、速度衰减; 侵彻毁伤作用的基本概念及试验方法; 介绍了破片对目标的杀伤准则、杀伤面积及毁伤效应评估等内容。第 5 章穿甲效应介绍了穿甲基本概念、普通穿甲弹和杆式穿甲弹侵彻目标作用特点。第 6 章破甲效应系统介绍了聚能效应的基本概念、射流的形成、拉伸及侵彻、爆炸成型弹丸的作用特点、影响破甲的因素及聚能射流试验的基本方法。

《终点效应学》教材由张先锋教授完成第 1 章~第 3 章的编写工作; 李向东教授完成第 4 章的编写工作; 沈培辉教授完成第 5 章的编写工作; 祖旭东副教授完成第 6 章的编写工作。全书由张先锋教授统稿。

《终点效应学》是作者在原有《弹丸终点效应》教材基础上, 继承了部分原教材的内容, 力图根据终点效应学的特点和发展趋势, 结合近年来国内外学者取得的科研成果, 系统介绍了各类终点效应的基本概念、作用特点、基础理论等, 使本教材具有时代特色和先进性。本教材具有通用性和较广泛的适用范围, 主要作为高等院校有关专业本科生、研究生的教材, 亦可作为从事弹药战斗部研究、设计科研工作者的参考资料。

本教材在章节体系和内容组织方面得到了黄正祥教授、陈惠武高级工程师的指点和帮助, 特此致谢。在定稿过程中进行了多次修改和完善, 期间, 课题组研究生熊玮、邓佳杰、刘闯、徐晨阳、谈梦婷、王季鹏、陈海华、王文杰、包阔、吴雪等为书稿的打印、插图绘制和修改付出了辛勤的劳动, 也提出了很多有益的

修改建议，在此一并表示感谢。

由于现代战争、科技的发展，使弹药品种发展变化很快，一些特种弹药、软杀伤弹药的威力效果尚缺少系统理论分析；终点效应作用过程十分复杂，相关理论模型仍在发展完善中。由于作者水平有限，谬误、不足之处在所难免，恳请读者指正。

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	001
1.1 概述	001
1.2 终点效应分类及作用特点	001
1.2.1 侵彻效应及作用特点	001
1.2.2 爆炸效应及作用特点	002
1.2.3 杀伤效应及作用特点	002
1.2.4 穿甲效应及作用特点	002
1.2.5 破甲效应及作用特点	002
1.3 终点效应研究方法	003
1.3.1 理论分析方法	003
1.3.2 半经验法	003
1.3.3 试验法	003
1.3.4 数值计算方法	004
1.4 终点效应学的发展	004
参考文献	005
第 2 章 侵彻效应	006
2.1 弹体在介质中的运动方程	006
2.1.1 弹体侵彻介质时的受力	006
2.1.2 作用在弹体上的力和力矩	007
2.1.3 弹体运动微分方程	007
2.2 弹体侵彻介质的阻力	008
2.2.1 介质阻力的影响因素	008
2.2.2 液体介质的阻力	009
2.2.3 颗粒体介质的阻力	010
2.2.4 固体介质的阻力	011
2.2.5 阻力函数的一般形式及工程应用	012
2.2.6 弹体侵彻深度、头部形状和攻角等对阻力的影响	018
2.3 弹体对岩石及混凝土介质的侵彻效应	020

2.3.1	岩石及混凝土介质的特点	020
2.3.2	弹体侵彻岩石及混凝土介质的作用过程	022
2.3.3	弹体高速侵彻岩石及混凝土介质的侵蚀效应	022
2.3.4	弹体侵彻岩石及混凝土介质深度的经验计算式	026
2.4	空腔膨胀理论及其在侵彻中的应用	033
2.4.1	靶体抗侵彻响应区及基本方程	034
2.4.2	静态空腔膨胀模型	035
2.4.3	动态空腔膨胀模型	040
2.4.4	基于空腔膨胀模型的刚性弹侵彻过程模型	046
2.5	弹体质心轨迹的曲率和跳弹分析	051
2.5.1	弹体质心运动轨迹的曲率	051
2.5.2	跳弹分析	052
	参考文献	054
第3章	爆炸效应	056
3.1	空气中爆炸	057
3.1.1	空气冲击波	057
3.1.2	冲击波基本方程及性质	060
3.1.3	空气冲击波对障碍物的作用	073
3.1.4	战斗部(弹丸)在空中爆炸	079
3.1.5	空气冲击波对目标的破坏作用	083
3.1.6	安全距离	085
3.1.7	云雾爆炸特点及其对目标的作用	086
3.2	水中爆炸	094
3.2.1	水中爆炸的物理现象	094
3.2.2	水中冲击波	098
3.2.3	水中冲击波参数的计算	101
3.2.4	水中冲击波的反射	105
3.2.5	水中爆炸气泡脉动二次压力(缩)波	106
3.2.6	水中爆炸的破坏作用	108
3.3	岩土中的爆炸效应	109
3.3.1	岩土中爆炸的基本现象	110
3.3.2	岩土中爆炸波及其传播规律	113
3.3.3	岩土中爆炸相似律及其应用	114
3.3.4	岩土中爆炸的作用	116
3.3.5	战斗部(弹丸)在岩土中爆炸	123
	参考文献	125

第4章 杀伤效应	126
4.1 弹丸的爆炸过程及破碎机理	126
4.2 破片数目及质量分布	127
4.2.1 破片数	127
4.2.2 预控破片数目计算	130
4.2.3 破片的质量分布	130
4.2.4 破碎性试验	132
4.3 破片的初速	133
4.3.1 自然破片战斗部的破片初速	134
4.3.2 预制破片战斗部的破片初速	135
4.3.3 影响破片初速的因素	136
4.3.4 破片初速的测量	137
4.4 破片的空间分布	138
4.4.1 破片的飞散角	138
4.4.2 破片数目随飞散方向的分布规律	139
4.4.3 球形靶试验	141
4.5 破片在空气中的运动规律	143
4.5.1 破片所受空气阻力	143
4.5.2 破片的平均迎风面积	143
4.5.3 破片的速度衰减	145
4.6 破片的侵彻作用	146
4.6.1 自然破片对靶板的侵彻	146
4.6.2 规则形破片对靶板的侵彻	148
4.7 破片的引燃和引爆作用	151
4.7.1 破片对油箱的引燃作用	151
4.7.2 破片对炸药的引爆作用	152
4.8 破片对人员目标的杀伤及杀伤准则	155
4.8.1 破片对人员目标的杀伤及影响因素	155
4.8.2 人员目标的杀伤准则	156
4.9 杀伤面积	159
4.9.1 球形靶杀伤面积	159
4.9.2 扇形靶杀伤面积	163
4.10 对战场轻型防护目标的毁伤评估	165
4.10.1 目标分析	165
4.10.2 目标的毁伤级别	165
4.10.3 目标关键部件分析	166
4.10.4 部件毁伤准则	166
4.10.5 破片场与目标的交会分析	168
4.10.6 部件的毁伤	168

4.10.7 目标的毁伤	169
4.10.8 破片式战斗部对目标毁伤的简易评估方法	170
参考文献	172
第 5 章 穿甲效应	173
5.1 概述	173
5.1.1 穿甲作用的分类	173
5.1.2 靶板系统	174
5.1.3 穿甲现象	177
5.1.4 对靶板的基本假设	179
5.1.5 撞击状态图	179
5.1.6 弹坑容积与弹丸动能的关系	181
5.2 普通穿甲弹的穿甲作用	182
5.2.1 穿甲现象	183
5.2.2 钝头弹对靶板的作用	184
5.2.3 其他破坏形式的穿甲问题简介	194
5.3 杆式穿甲弹的穿甲作用	196
5.3.1 杆式弹穿甲作用的特点	197
5.3.2 长杆体对半无限靶的冲击	199
5.3.3 杆式弹对有限厚靶板的穿透	207
参考文献	211
第 6 章 破甲效应	212
6.1 聚能现象及其应用	212
6.1.1 聚能现象	212
6.1.2 金属聚能射流	213
6.2 金属射流形成理论	214
6.2.1 定常理想不可压缩流体力学理论	214
6.2.2 PER 准定常理论	217
6.2.3 Behrmann 射流形成理论	225
6.2.4 黏-塑性射流形成理论	227
6.3 金属射流的自由运动	229
6.3.1 射流速度分布的测定	229
6.3.2 运动射流的位置、伸长和半径计算	234
6.3.3 射流颈缩和断裂	235
6.3.4 射流断裂模型	239
6.3.5 射流断裂时间的测定	242
6.4 金属射流的破甲理论	244
6.4.1 破甲现象	244

6.4.2 破甲理论模型	246
6.4.3 侵彻深度及 $L-t$ 曲线的工程计算	251
6.4.4 计算破甲深度的经验公式	255
6.5 爆炸成型弹丸	257
6.5.1 爆炸成型弹丸的概念	257
6.5.2 爆炸成型弹丸的形成机理	258
6.5.3 战斗部外形和侵彻体形状	260
6.5.4 爆炸成型弹丸侵彻理论	261
6.6 影响破甲效应的因素	264
6.6.1 药型罩	264
6.6.2 装药	268
6.6.3 隔板	270
6.6.4 弹丸结构	271
6.6.5 靶板	272
6.7 破甲参数的试验测定	272
6.7.1 射流头部速度的测定	273
6.7.2 侵彻深度和侵彻时间关系的测定	273
6.7.3 侵彻深度与罩微元位置关系的测定	275
6.7.4 侵彻深度和弹丸转速关系的测定	276
6.7.5 聚能装药的几何模拟试验	278
参考文献	280

第1章

绪论

1.1 概述

终点效应学是研究弹丸或战斗部的作用元对目标作用机理、作用规律、威力效果与评估的弹道学分支学科。主要研究火炮弹丸、迫击炮弹、枪弹弹头、航空炸弹、火箭及导弹战斗部的作用元（爆炸波、破片、射流等）到达弹道落点后的运动规律及伴随现象，其是弹道学的组成部分。研究的主要内容有：弹丸对装甲及土石、混凝土介质等的侵彻及相互作用；破片的形成、运动及对不同目标的毁伤机制；金属射流的形成、运动及对各种靶的侵彻；创伤弹道学；炸药在不同介质中的爆炸现象及对目标的破坏理论；特种弹药（照明弹、烟幕弹、干扰弹、侦察弹等）对目标的作用；弹药威力的反设计等。终点效应学对于弹药系统的设计、装甲的研制与防护研究，以及武器系统的威力评价与使用等具有重要意义。

1.2 终点效应分类及作用特点

1.2.1 侵彻效应及作用特点

侵彻效应是指弹丸或战斗部依自身动能侵彻进入目标介质内部产生的破坏行为。穿甲作用、破片杀伤作用、侵地作用、贯穿混凝土障壁作用、破甲作用等均属于侵彻作用。被侵彻的目标介质种类繁多，如土壤、岩石、木材、混凝土建筑、钢板、陶瓷、有机体组织和水、油类等战场上经常出现的介质。各类侵彻体对不同目标介质的侵彻作用各有其不同的影响因素和特点。一般而言，侵彻效应关注的重点是弹丸或战斗部的作用元对钢甲、岩土和混凝土目标介质的侵彻作用。

弹丸或战斗部对钢甲、岩土的侵彻作用，除与钢甲、土石介质成分、钢甲性能、土壤坚实松散程度或岩石含水饱和度有关外，还与着速、着角、弹头形状等有关。着速主要影响侵入动能，动能过小，达不到侵彻深度要求时，不能发挥爆炸威力；动能过大，侵入深度过大时，将产生盲炸。着角小于跳弹极限角时，则发生跳弹。弹体头部形状决定侵彻过程中迎角的变化，进而影响侵彻弹道。

反跑道炸弹、半穿甲战斗部、钻地侵彻战斗部等主要对机场跑道、混凝土目标的侵彻作用。其侵彻作用效能以穿透最大的钢筋混凝土厚度为特征。混凝土目标的穿透厚度主要取决于弹丸或战斗部的质量、直径、弹体强度、弹头形状结构以及侵彻速度。在弹体猛烈撞击下，混凝土靶板表面剧烈压缩变形，使混凝土颗粒脱落，形成喇叭状凹坑。侵彻弹挤入混凝土靶

板后, 压缩波传到靶板背面, 形成拉伸波, 使压应力转变成拉伸应力, 造成靶板背面崩落, 有利于侵彻弹穿过靶板将炸药装药带入目标内部爆炸。

1.2.2 爆炸效应及作用特点

爆炸效应通常指杀伤、爆破、杀伤爆破弹爆炸对目标产生的破坏作用。由三部分组成: 爆炸产物的直接作用, 冲击波的破坏作用和破片的杀伤作用。通常破片的杀伤作用归类为杀伤效应。随着毁伤目标介质的不同, 爆炸效应所关注的毁伤形式也相应不同。空爆战斗部主要依靠冲击波超压(比冲量)来毁伤目标。对于典型硬目标, 如坦克、加固建筑物等, 主要依靠爆炸产生的冲击波超压毁伤目标; 而对于诸如飞机、导弹、人员、汽车等软目标, 则主要依靠比冲量来毁伤。岩土介质内的爆炸作用是以抛掷漏斗坑容积来衡量爆炸毁伤能力的。水中爆炸对目标的毁伤主要依靠水中冲击波、气泡脉动及二次压力波的破坏效应。

1.2.3 杀伤效应及作用特点

杀伤效用主要是指利用弹药或战斗部爆炸、撞击、抛射产生的毁伤元杀伤目标。毁伤元形式可分为自然破片、预控破片和预制破片。弹丸或战斗部爆炸时产生破片的数量、质量、飞散速度、空间分布是决定杀伤威力的主要因素, 而这些因素本身取决于弹体结构和材料, 以及炸药装药的种类和装药量。弹丸或战斗部对人员的杀伤作用主要依靠破片的动能完成, 破片杀伤人员的能力用遭遇目标时的动能及杀伤半径(通常为密集杀伤半径)来衡量。破片对战场上的一些轻型防护目标(如飞机、导弹、轻型装甲车辆等)的毁伤效应主要是对这类目标产生结构毁伤或者是引燃、引爆靶后效应物。如对飞机结构件的毁伤, 除需要破片具有足够的动能穿透目标, 还需要具有足够的破片数量。而对飞机及导弹的油箱的毁伤则除需要具有一定破片数量外, 还需要破片具备足够的后效作用引燃油箱中的燃油。

1.2.4 穿甲效应及作用特点

穿甲效应依靠穿甲弹的动能撞击装甲目标并进入其内部, 依靠剩余弹体或靶板碎片毁伤靶后目标。就撞击速度而言, 穿甲效应所涉及的速度范围在几百米每秒至几千米每秒之间, 对应弹靶材料的应变率在 $10^2 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。在穿甲效应中, 对目标的侵彻往往是侵彻体对目标结构各部(零)件依次碰撞的总结果, 穿甲毁伤目标效应主要考虑动能撞击的能量损失。随着新型防护装甲的出现, 特别是反应装甲、主动防御系统的应用, 穿甲弹与反应装甲的相互作用也成为穿甲效应关注的重点。

1.2.5 破甲效应及作用特点

破甲效应是利用聚能效应使金属药型罩产生高速射流、爆炸成型弹丸或杆式射流穿透装甲或其他坚硬目标, 并具有一定后效作用能力。在金属射流对装甲侵彻过程中, 由于高速射流的不断冲击, 装甲上的孔不断加深, 冲击点附近压力可达 10^{11} Pa , 温度在 $1\,000 \text{ K}$ 左右, 甚至更高, 应变率 $d\varepsilon/dt$ 也很高, 称之为三高区(高温、高压、高应变率)。在高压作用下, 装甲材料产生径向塑性流动; 射流头部也向侧向流动形成蘑菇状, 待其动能耗尽后, 部分射流残留在孔壁上。破甲孔径通常比射流直径大若干倍, 由于射流具有头部速度高、尾部速度低, 头部直径小、尾部直径大的特点, 靶板上的穿孔形状通常呈入口直径大、出口直径小的

漏斗状。射流后部有时先自行颈缩、断裂，再侵彻装甲，使孔底附近形成“糖葫芦”状，或更不规则的形状。

1.3 终点效应研究方法

1.3.1 理论分析方法

终点效应作用过程是一个涉及强动载、高应变率、高温高压瞬态作用过程的多因素影响下的复杂作用过程。分析弹体和靶板的运动、变形及破坏时，不可避免地要使用全部连续介质方程和物理方程，其中最复杂的是材料的本构方程。这些方程往往是非线性的，用解析的方法进行积分求解几乎不可能。为此，人们往往集中研究某一现象（例如挤凿、层裂、成坑等），针对这种现象的特点引入简化假定，建立简化模型，把三维问题简化为一维或二维问题，以便求解，进而研究弹靶的破坏模式。在这种分析中，通常把弹体假定为刚性的。近年来，有少数论文把弹体当作可变形体，但必须采用简单的本构模型。另外，几乎所有的分析都采用了一些经验结论或一些尚待测定的材料参数。

1.3.2 半经验法

所谓经验法是用量纲分析或其他方法，给出某一有待定常数的关系式，然后通过弹道试验，确定这些常数。它主要是通过弹道试验（包括原型试验和模型试验，原型试验准确而不经济，模型试验经济但技术要求高），结合少量假设，建立侵彻的初始条件与最终结果之间的关系，但不能给出中间结果。由于冲击侵彻现象的复杂性，所以在很长时期内该问题的实用计算都是以试验为基础的，并根据大量试验数据建立了计算侵彻深度的经验公式，用于工程设计计算。

建立经验公式的方法大体有两种：一种是直接对试验数据进行相关回归分析而建立的经验公式，又称纯经验公式；另一种是预先假定作用在弹体上的阻力变化规律，运用刚体运动方程推导出计算公式，再利用经验数据资料修正或确定公式中的常数，这种方法又称半经验半理论公式。

经验法的优点是抓住了终点效应相关问题的主要矛盾，能反映问题的主要影响因素，且使用简单、计算可靠度较高，因此目前各国有关防护结构的设计规范或计算手册中，基本还是采用经验公式计算弹体的侵彻深度。其缺点在于试验费用高，适用范围窄，公式只反映侵彻的初始情况与最终结果之间的关系，不能描述侵彻过程，不能说明相互作用机理，不能准确分析侵彻过程中弹体所受到的阻力。

1.3.3 试验法

试验是进行终点效应研究的主要和基本手段。对终点效应相关问题的最早认识都来自于试验研究，而且理论分析方法中用到的许多参数值也是来自于试验。同时，许多终点效应问题的经验公式也是从大量的试验数据中总结出来的。以侵彻效应为例，美国桑地亚国家实验室从1960年在开发钻地武器设计技术中，进行了约3 000次试验，建立了重要的试验数据库。以此为基础建立了侵彻效应的经验计算式。

尽管试验手段是直接获得终点效应现象的最直接手段,但试验结果及得到的经验,都有一定的应用范围,随意的 extrapolation 都会产生荒谬的结论甚至是错误的结果。但实际试验结果可以用来验证、核对理论分析和数值模拟方法提供的预测值。

在进行试验时,由于现有试验技术、条件与研究经费的限制,进行全尺寸弹侵彻试验是极难的,解决这一问题的有效途径是进行模拟试验,即根据相似理论和量纲分析采用缩比试验。

1.3.4 数值计算方法

随着电子计算机的广泛使用和数值计算方法的不断完善,自 20 世纪 60 年代开始在终点效应领域采用数值计算方法,已显示出它的许多优点。现在已经有多个适用于描述终点效应作用过程数值计算的通用和专用程序。数值计算方法的基本过程是:首先分析所研究问题的物理实质,建立数学模型,选择合适的坐标系,根据模型写出偏微分方程组,然后用有限差分法或有限元法在数值计算机上求解。

根据采用坐标和网格划分的不同,数值计算方法分为拉格朗日法和欧拉法。拉格朗日法描述的对象是物质质点,计算时在物体(介质)上划分网格,每一个网格单元随物体运动而变形,可以较准确地确定材料的边界形状,提供较多的信息,便于处理物质界面,可以把微分方程和差分方程写成简单的形式。但当物体变形很大时,网格产生扭曲、交叉与合并等大畸变,使计算产生较大的误差。当畸变增大到破坏网格的连续性时,则需重新划分网格,这样会带来许多计算上的不便。欧拉法描述的对象是空间点,只对空间预先划分网格。由于网格固定在空间,使变形物体通过它,所以不存在网格扭曲变形的大畸变问题,但处理不同物体(介质)的界面有一定的困难。因此选择哪种方法解决战斗部的数值模拟问题是很重要的。

由于计算机进行数值解只有对代数方程才能运算,因此需将所建立的偏微分方程和常微分方程改写成差分方程。不同的差分方程和不同的边界条件,其解法也不同,其中的技术技巧需要在实践中掌握。在应用数值计算法时,需注意计算精度和差分格式的稳定性问题。

数值计算法的优点是:在分析终点效应问题时对选择参数有很大的灵活性,可以任取边界;在求解多因素同时作用的复杂过程时,可反映出各种物理参数在所研究问题中的地位、相互依赖关系以及过程中的物理量的动态变化。它能做理论分析和试验都不易做到的事,如能检验对一些独立的理论近似的敏感性、检验本构方程的正确性。

1.4 终点效应学的发展

终点效应学的研究是伴随着武器弹药的发展而发展的,反过来又促进武器弹药的发展,并逐步形成一门独立的学科。在 19 世纪 50 年代以前,人们重点着眼于枪炮技术的发展,而对弹药及其终点效应的重要作用重视不够,终点效应的研究进展不快。随着生产和科学技术的发展、战场上新目标的不断出现(尤其是第一次世界大战和战后出现坦克和飞机等),弹药及其终点效应的研究才受到普遍重视,迅速蓬勃地开展起来。在此期间,出现了穿甲弹、高射炮弹、榴弹等,穿甲理论、杀伤理论的研究也有了新的进展。第二次世界大战期间,出现了许多新弹种,如次口径穿甲弹、破甲弹、预制或预控破片榴弹、混凝土侵彻破坏弹等。同时穿甲理论、破甲理论、对土石及混凝土介质的侵彻理论、对目标的毁伤理论、爆炸理论等

的研究有了进一步的发展,对于新的武器弹药的研制起到了促进作用。20世纪60年代以后,坦克、飞机等的长足进步推动了对反坦克弹药、高射杀伤弹药和穿甲、破甲、碎甲及杀伤机理的进一步研究;高速小质量枪弹弹头的出现促进了创伤弹道学的发展;杆式穿甲弹的出现及穿甲理论的发展、破甲弹的完善及破甲机理的深化,丰富了终点效应的内容。进入20世纪90年代以来,电磁脉冲弹、次声弹、碳纤维弹等技术的发展促进了高功率微波辐射效应、次声波效应、短路毁伤效应的研究;先进防护技术,如反应装甲、主动防御系统的出现,使人们开始关注弹药与防护结构的相互作用,为终点效应研究增添了新的研究内容。

科学技术的发展,尤其是连续介质力学、系统优化理论的出现,电子计算机的推广及应用以及电子、光学技术的发展,使终点效应学向深度和广度推进,研究内容进一步扩大。应力波理论、非线性稳定性理论、终点效应优化设计理论和方法、计算力学及大型连续介质动力学计算程序、终点效应物理现象的测试方法与测试技术、数值模拟计算的发展与应用、弹药威力的反设计等,已成为近代终点效应的重要内容。近代终点效应学的发展使武器弹药的设计更合理,威力更大,研制周期更短,耗费更低,也使武器系统的评价与使用更合理,各种防护更完善、更实用。

参考文献

- [1-1] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [1-2] 张国伟, 徐立新, 张秀艳. 终点效应及靶场试验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
- [1-3] 曹柏桢, 等. 飞航导弹战斗部与引信[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [1-4] 《兵器工业科学技术辞典》编辑委员会. 兵器工业科学技术辞典: 弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [1-5] 《兵器工业科学技术辞典》编辑委员会. 兵器工业科学技术辞典: 炮弹[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [1-6] 《兵器工业科学技术辞典》编辑委员会. 兵器工业科学技术辞典: 航空炸弹[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [1-7] 恽寿榕. 爆炸力学计算方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [1-8] 甄涛, 邱成龙. 软毁伤[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [1-9] 姚熊亮, 汪玉, 张阿漫. 水下爆炸气泡动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012.
- [1-10] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [1-11] 黄正祥, 祖旭东. 终点效应[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

第2章

侵 彻 效 应

弹丸与战斗部碰击目标时，具有一定的动能，故对介质具有一定的侵彻破坏作用，这类侵彻破坏作用称为侵彻效应。穿甲弹主要靠自身碰击目标时的动能来侵彻毁伤坦克等装甲目标，达到破坏目标的目的；侵爆弹如爆破榴弹、钻地弹、半穿甲弹等靠碰击目标时的动能侵入目标一定深度后在内部爆炸，以达到最佳的爆炸毁伤效果。但也有相反的情况，如杀伤弹为了达到有效地利用破片杀伤目标，就不希望侵入介质，而是利用侵彻时的跳弹作用。研究弹丸与战斗部对介质的侵彻效应就是对弹丸与战斗部在介质内的受力情况进行分析，找出其运动规律，确定弹靶运动关系，从而有目的地控制弹丸与战斗部的侵彻作用，获得最佳破坏效果。

2.1 弹体在介质中的运动方程

受弹靶关系及侵彻作用过程中诸多因素的影响，弹体侵彻介质时通常不是垂直入射，而是带攻角、着角的倾斜入射侵彻过程，其质心速度、加速度、攻角及着角等都随时间不断地发生变化。

2.1.1 弹体侵彻介质时的受力

2.1.1.1 基本概念

- (1) 入射平面：弹体质心运动轨迹所在的平面；
- (2) 弹靶入射角：弹体轴线与入射面法线间的夹角；
- (3) 攻角（偏航角）：弹体质心速度与弹体轴线间的夹角；
- (4) 落角（偏转角）：弹体轴线与水平面间的夹角。

2.1.1.2 弹体侵彻时的受力分析

弹体冲击土壤、沙、岩石、混凝土介质时，碰击目标的瞬间介质的阻力与介质的表面垂直，弹体受力点位于弹体与介质的接触点。随着侵彻的深入，介质阻力方向向弹轴方向偏转，介质阻力方向不通过弹体的质心，阻力产生的力矩将使弹体的攻角发生变化。当弹体落角较小、弹体头部又较尖锐时，力矩使弹体攻角增大；但当弹体落角较大，弹体头部又很钝时可能出现相反的情况，使弹体的攻角减小，如图 2.1.1 所示。

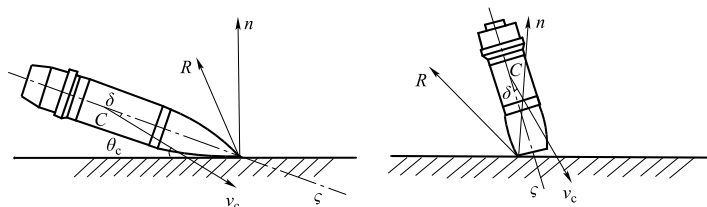


图 2.1.1 弹体碰击目标瞬间的受力分析

2.1.2 作用在弹体上的力和力矩

设弹轴 ζ 与弹道切线 v_c 间的夹角 δ 在落角平面内 (见图 2.1.2), 介质阻力 R 作用在弹体头部, 将 R 向质心简化得一力 R_c 和力矩 M_d , R_c 分解为两个力, 与弹道切线方向一致的正面阻力 R_f 和垂直弹道切线的法向阻力 R_N 。 R_f 使弹体运动速度减小, R_N 使弹体弹道弯曲, 力矩 M_d 使弹体的攻角变化。

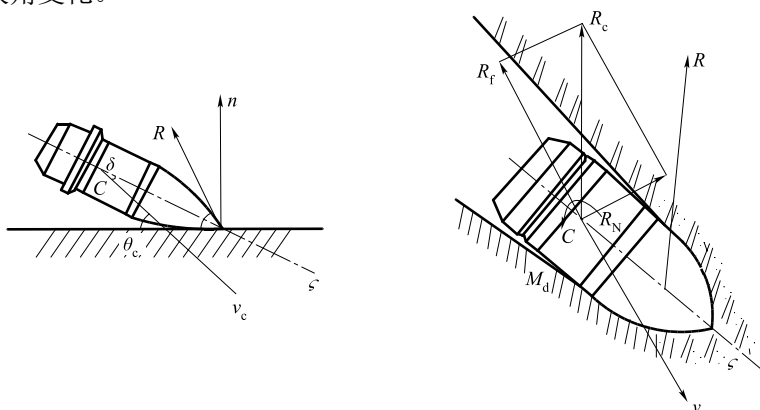


图 2.1.2 弹体受力分析图

2.1.3 弹体运动微分方程

为推导弹体运动方程, 做如下基本假设:

- (1) 入射平面在弹体侵彻过程中方位不变, 攻角和弹靶入射角始终在入射平面内;
- (2) 弹体绕弹轴旋转对入射平面及入射角不产生影响;
- (3) 作用在弹体上的力和力矩只有质心速度方向的正面阻力 R_f 和垂直于质心速度方向的法向阻力 R_N 以及绕质心轴的力矩 M_d ;
- (4) 弹体视为刚体, 且弹坑的直径与弹体直径相同;
- (5) 忽略旋转阻力和阻力矩的影响。

取直角坐标系。

$$\begin{aligned}
 m \frac{d^2 x}{dt^2} &= -R_f \cos \theta + R_N \sin \theta \\
 m \frac{d^2 y}{dt^2} &= -R_f \sin \theta - R_N \cos \theta \\
 B \left(\frac{d^2 \delta}{dt^2} - \frac{d^2 \theta}{dt^2} \right) &= M_d
 \end{aligned} \tag{2.1.1}$$