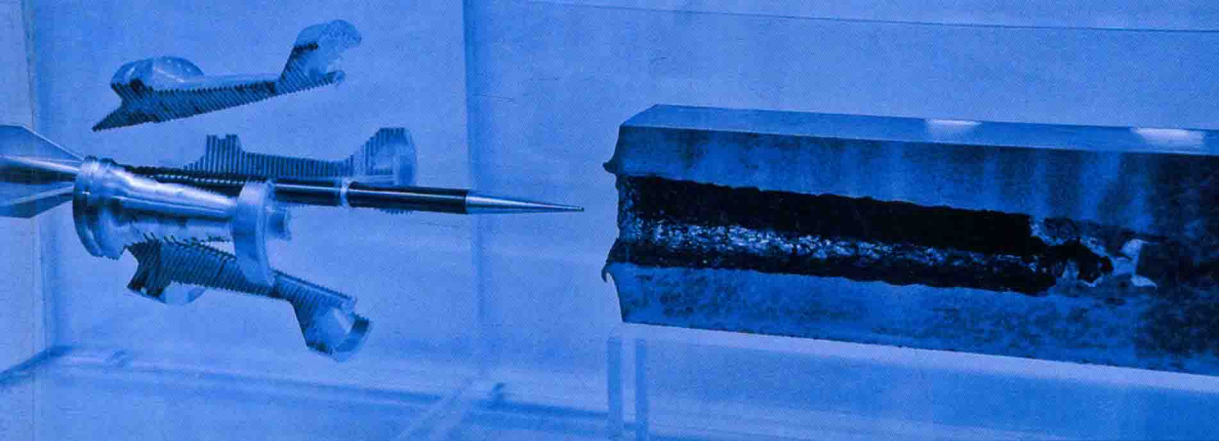




终点效应学

(第二版)

王树山/著

Terminal Effects

非外借



科学出版社

终点效应学

(第二版)

王树山 著

本书得到爆炸科学与技术
国家重点实验室(北京理工大学)资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以常规武器/弹药终点毁伤理论与应用为主题,以战斗部作用原理与毁伤效应为主线,较为系统地介绍了终点效应学的基本理论和知识,归纳总结了相关的计算模型、试验数据以及工程应用方法等。全书共八章,依次为绪论、目标易损性与毁伤机理、穿甲效应、杀伤效应、聚能效应、爆炸效应、非致命武器毁伤效应和武器/弹药终点毁伤效能评估。本书对终点效应学的经典内容有所充实和深化,对终点效应学的知识体系和架构有所补充和完善,并引入了新的研究进展。

本书适用于武器/弹药、防护工程、安全工程等领域从事教学、研发、应用以及需求论证等方面工作的各种专业技术人员,并可作为高等学校相关学科专业的教师、研究生和本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

终点效应学/王树山著. —2版. —北京:科学出版社,2019.5

ISBN 978-7-03-060988-5

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 066319 号

责任编辑:刘凤娟 陈艳峰 / 责任校对:彭珍珍

责任印制:肖 兴 / 封面设计:无 极

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

天津市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 5 月第 二 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 5 月第一次印刷 印张:31 插页:2

字数:620 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

王树山教授请我为他的新书写个序,我欣然接受。

王树山是我的博士生,1995年初就通过了学位论文答辩获得博士学位。之后他留在北京理工大学,一边教书育人,一边进行科学研究。现在,他要出书了,我很高兴。他是一位从教多年的专业教师(博士生导师),是学术圈中最有资格出书的人之一。我常常对学生说,你们已经有了经验和积累,你们可以为历史、为专业留下系统的文字。王树山的新著就是这样的一本书,我为此感到高兴。

该书的题名《终点效应学》,讲的是有关武器弹药的理论。弹药是种类最多、用量最大和适用范围最广的军事装备或器械,是武器系统中最积极、最活跃的因素。弹药的作战效能、综合性能和技术水平主要体现在射程、精度和威力三个方面,其中与弹药威力最直接、最紧密相关的基础理论之一就是终点效应学。终点效应学是兵器科学或武器科学的组成部分,属于实验科学和技术科学的范畴。从这门学说的出现来看,它历史悠久;从这门学说的内涵来看,它又是与时俱进的。从王树山教授的书中,可以看到这一点。

终点效应学研究弹药/战斗部终点作用原理及对目标的毁伤效应,这方面的理论和实践也是武器弹药创新发展的源动力之一。在热兵器发展的早期,高能炸药尚未出现的时候,黑火药等这种威力并不大的含能材料被用作弹药装填物。现在,高能炸药及其瞬时释放化学能并产生强劲载荷的性质被应用于弹药,使常规弹药威力发生了革命性的变化,并为常规战斗部类型的多样化及实现对各种类型目标的针对性高效毁伤提供了物质基础。核裂变、核聚变原理的应用导致了热核武器的出现,使武器弹药的威力达到了前所未有的程度,并对国际关系、国家安全、政治外交乃至伦理道德均产生了深远的影响。20世纪末,新材料、新机理和新方法的应用,产生了以碳纤维弹、微波弹为代表的新概念、非致命武器并应用于实战,为武器弹药的体系化发展、战术应用方法以及作战理念变革等开拓了新思路。因此,终点效应学自诞生之日起,一直处于不断地充实、完善和创新发展的过程中,始终充满着生机和活力。

以美、俄为代表的军事发达国家在终点效应学的研究上一直领先于中国。经过几代人的不懈努力,现在这种差距已明显缩小。就这方面的著作而言,我国学者撰写的不多,且基本上参考苏联或美国的经典文献等,在主题思想、知识体系以及内容编排等方面均存在某些不足,尤其是知识更新、前沿热点以及自主研究成果等更是难得一见。有鉴于此,该书在武器弹药“终点毁伤”这一核心主题下,将终点效

应学的经典理论、扩充内容和新的研究进展等进行了认真梳理和有机整合,同时也引入了一些作者自己的研究成果,特别值得肯定的是作者对终点效应学的独立思考以及有深度的心得认识。

王树山教授属于与中国的改革开放一起成长的科研人员,可以说,他们是为了中国人民的“中国梦”在专业技术领域夯下坚实基础的一代人,这本书属于这个时代。该书集中反映了作者在该领域长年的教学和科研实践,具有明显的继承性和扩展性,十分注重理论对工程实践的指导性和实用性,值得业内人士和同行们关注,我很高兴向读者们推荐这本书。

冯长根

2019年4月25日

前 言

终点效应学还远不是一门科学,更多的是以实验为主并结合基础理论的半理论半经验公式,以及不太可靠的实战数据和研究经验的综合。终点效应学属于兵器科学与技术的学科范畴,是一种多学科交叉的工程应用学科,主要研究弹药/战斗部等各种毁伤装置的终点作用原理及对目标的毁伤效应,研究成果主要用于弹药/战斗部威力设计与分析、目标防护设计与生存能力分析、武器终点毁伤效能评估以及武器系统的作战效能研究等。本书以常规武器/弹药终点毁伤理论与应用为主题,以战斗部作用原理与毁伤效应为主线,较为系统地介绍了终点效应学的基本理论和知识,归纳总结了相关的计算模型、试验数据以及工程应用方法等。

终点效应学从萌芽、诞生、演变直至发展到今天,已有近 300 年的历史,其发展的动力来源于人们不太情愿的战争需求和科学技术持续进步的推动。终点效应学的早期研究和成长摇篮在欧洲,以英国、法国和德国等为突出代表。关于终点效应学研究的历史地位,仍然首推美国和苏联,这是因为终点效应学的快速集中与跨越式的发展主要由美国和苏联的研究成果所体现,在该领域至今仍处于国际领先地位。然而根据研究现状和发展趋势可以预期,中国有望成为未来世界上新的终点效应学研究中心。对终点效应学的发展有重大影响的历史事件主要有:火炸药的发明并成为武器/弹药的动力推进和终点毁伤的能源;第一次和第二次世界大战;热核武器的出现并用于实战;水到渠成、自然而然的武器/弹药信息化与智能化。

终点效应学研究主要体现为弹药/战斗部和目标对立统一的两个方面,通过毁伤这一核心主题相衔接,一方面是弹药/战斗部的终点作用原理和毁伤因素的形成,另一方面是目标的毁伤响应及其结果。因此,本书从讨论终点效应学的科学技术内涵和追溯终点效应学发展历史开始,较为系统地归纳总结了目标易损性与毁伤机理、穿甲效应、杀伤效应、聚能效应、爆炸效应、非致命武器毁伤效应以及武器/弹药终点毁伤效能评估等方面的经典研究成果,其中不乏作者的深度思考、深化理解以及深入研究后的心得和认识。本书十分关注经典理论与工程实践的结合性、模型算法的适用性以及工程应用的操作性等实际问题,同时也特别考虑了军事需求和技术发展的动态变化,这在内容梳理、结构编排和文字表述等方面有所体现。相较于本书的第一版(国防工业出版社,2000)以及国内已有的其他相关著作,本书的显著特色主要有:从学科的角度对终点效应学进行了综合论述;增加了相对系统完整的“非致命武器毁伤效应”和“武器/弹药终点毁伤效能评估”两方面的内容;对终点效应学的传统内容进行了补充和完善,如毁伤及其关联概念体系、混凝土侵彻

工程模型、密闭空间爆炸效应、水中爆炸威力场结构等。除此之外,书中还引入了一些作者的研究成果,相对于经典研究成果的千锤百炼,这些内容是稚嫩和单薄的,甚至有可能经不起时间和实践的检验,在此予以特别声明。

作者从事终点效应学以及以此为核心理论基础的武器/弹药、毁伤理论等方面的教学和科研工作 20 余年,时常有写一本好书的冲动,希望它能体系完整、内容丰富、深度适中和工程实用。然而在实际工作中,仍然为一些经典问题而困惑,为一些新出现的问题而茫然,这既说明作者的能力和水平确实有限,也昭示终点效应学的纷繁复杂和不断发展变化。因此,本书难免存在不足,在此提前请读者原谅。由于尽善尽美无论主观和客观上都是难以做到的,于是怀着忐忑不安的心情静候读者的批评指正,尽管如此,仍然希望本书能对同仁们的教学和科研工作有所帮助或提供有益的参考。

在书稿完成之际,特别感谢我攻读硕士和博士学位的导师——冯长根教授,他是我科学研究的引路人;同时感谢隋树元教授,是她带领我走进了该研究领域,她也是该书第一版的共同作者。另外,由衷感谢中央军委装备发展部与中央军委科学技术委员会(原中国人民解放军总装备部)、国家国防科技工业局以及中国兵器科学研究院等,为我从事这方面研究提供了科研经费支持,书中已经包含了相关科研项目所取得的研究成果。在本书写作过程中,我的同事韩峰教授、马峰副教授、魏继锋副教授和徐豫新副教授等,或审阅了部分书稿并提出了中肯的修改意见,或进行了有益的探讨和交流,在此表示衷心感谢。除此之外,李婧伟老师协助完成了书稿文字录入和编辑,我的学生王新颖、梁振刚、赵书超、王传昊、蒋海燕、卢熹、贾曦雨、高源、郭勋成和刘东奇等都为此书的完成提供了帮助,在此一并表示感谢。



2018 年 12 月 15 日

3.6.2 侵彻深度经验公式的比较	139
3.7 超高速侵彻与碰撞	140
3.7.1 半无限靶的超高速侵彻	141
3.7.2 中厚靶的超高速侵彻	145
3.7.3 薄靶的超高速碰撞	146
参考文献	147
第4章 杀伤效应	149
4.1 爆轰驱动金属壳体的能量释放与转换	149
4.1.1 炸药爆轰与能量释放	149
4.1.2 爆轰释放能量向破片动能的转换	152
4.1.3 炸药驱动与加速金属能力的分析与评定	157
4.2 爆轰驱动壳体破裂和破片形成机理	160
4.2.1 基本现象	160
4.2.2 静压破坏理论	161
4.2.3 动压破坏理论	163
4.3 破片形状、质量与数量控制	166
4.3.1 破片类型和控制方法	166
4.3.2 自然破片的质量与数量分布	171
4.3.3 弹体破碎性试验	177
4.4 破片初速与存速	180
4.4.1 经典破片初速模型——Gurney 公式	180
4.4.2 Gurney 公式的修正	186
4.4.3 破片存速	191
4.4.4 破片速度测试	194
4.5 破片散飞	198
4.5.1 Taylor 角近似	198
4.5.2 Shapiro 公式	200
4.5.3 破片动态散飞方向	201
4.5.4 破片飞散角与方位角及其测定	202
4.6 杀伤战斗部威力表征与评估	205
4.6.1 杀伤战斗部威力表征	205
4.6.2 杀伤半径	206
4.6.3 杀伤面积和毁伤幅员	208
4.6.4 综合威力评估实例	209
参考文献	212

第5章 聚能效应	215
5.1 成型装药与聚能战斗部	215
5.1.1 成型装药现象	215
5.1.2 聚能射流形成与侵彻机理	217
5.1.3 爆炸成型弹丸形成机理	220
5.2 聚能射流形成理论	221
5.2.1 定常理论	221
5.2.2 准定常理论	225
5.2.3 射流形成理论的扩展	232
5.2.4 黏-塑性理论	234
5.3 聚能射流的拉伸与断裂	237
5.3.1 射流拉伸模型	237
5.3.2 射流断裂模型	240
5.4 聚能射流侵彻理论	245
5.4.1 射流侵彻基本现象	246
5.4.2 定常侵彻理论	248
5.4.3 准定常侵彻理论	250
5.4.4 双线性速度分布射流的侵彻	254
5.5 聚能射流实验研究	256
5.5.1 射流形成实验研究	256
5.5.2 射流侵彻实验研究	263
5.5.3 破甲威力影响因素	266
5.6 爆炸成型弹丸的形成与侵彻	271
5.6.1 爆炸成型弹丸的形成	272
5.6.2 爆炸成型弹丸的形状控制	274
5.6.3 爆炸成型弹丸的材料动力学性能	277
5.6.4 EFP 的恒速杆侵彻理论	278
5.7 成型装药的应用	282
5.7.1 射流战斗部与破甲弹	283
5.7.2 EFP 战斗部与末敏弹	285
5.7.3 粉末药型罩与石油射孔弹	287
参考文献	290
第6章 爆炸效应	293
6.1 空气中爆炸	293
6.1.1 空气中爆炸现象	293

6.1.2	爆炸空气冲击波初始参数求解	300
6.1.3	空气中爆炸的相似律	304
6.1.4	战斗部(弹丸)在空气中爆炸	308
6.1.5	空气冲击波的反射与绕流	310
6.1.6	空中爆炸波的毁伤特性	316
6.2	水中爆炸	321
6.2.1	水中爆炸现象	321
6.2.2	水中爆炸波基本方程与初始参数求解	330
6.2.3	水中爆炸波传播与爆炸相似律	336
6.2.4	脉动压力波和脉动水流	340
6.2.5	水射流	341
6.2.6	水锤	342
6.2.7	水中爆炸的毁伤特性	343
6.3	岩土中爆炸	352
6.3.1	岩土中爆炸现象	352
6.3.2	岩土中的爆炸波及其传播规律	356
6.3.3	岩土中的爆炸相似律	360
6.3.4	岩土中爆破效应工程计算	368
6.3.5	战斗部(弹丸)在岩土中爆炸	374
6.4	密闭空间内爆炸	376
6.4.1	基本现象与内爆压力载荷	377
6.4.2	冲击波	378
6.4.3	准静态压力	381
	参考文献	382
第7章	非致命武器毁伤效应	385
7.1	非致命武器基本原理	385
7.2	反电力系统软毁伤效应	386
7.2.1	电力系统的运行与软毁伤失稳机理	386
7.2.2	碳(导电)纤维引弧短路毁伤机理与碳(导电)纤维弹	389
7.2.3	导电液溶胶闪络短路毁伤机理与导电液溶胶弹	392
7.3	电磁脉冲与微波毁伤效应	396
7.3.1	微波概念	397
7.3.2	高功率微波武器(HPMW)	399
7.3.3	微波武器的毁伤机制	407
7.4	典型物理型非致命毁伤效应	411

7.4.1 声光武器	411
7.4.2 非致命定向能武器	412
7.4.3 电击武器	414
7.4.4 动能防暴武器	416
7.4.5 障碍、缠绕型武器	418
7.5 典型化学型非致命毁伤效应	419
7.5.1 人体失能性武器	419
7.5.2 毁坏目标材质武器	421
7.5.3 发动机失能武器	421
7.5.4 限制目标机动武器	422
参考文献	423
第8章 武器/弹药终点毁伤效能评估	426
8.1 基本概念	426
8.1.1 武器系统效能	426
8.1.2 武器系统作战效能与射击效能	428
8.1.3 战斗部毁伤效能及其量度	430
8.2 基本原理	431
8.2.1 计算原理与理论基础	431
8.2.2 直接命中和间接命中	433
8.3 命中精度与随机弹道	434
8.3.1 命中精度模型	434
8.3.2 随机弹道方程	443
8.4 引信启动规律	448
8.4.1 引信功能与工作原理	449
8.4.2 引信启动点模型	454
8.5 炸点坐标模拟的 Monte-Carlo 方法	457
8.5.1 Monte-Carlo 方法原理	457
8.5.2 随机数产生	458
8.5.3 战斗部随机炸点模型	460
8.6 实例分析	464
8.6.1 集束箭弹命中概率的 Monte-Carlo 方法	464
8.6.2 坦克主动防护系统拦截弹药毁伤效能评估	469
8.6.3 一种末敏子母战斗部对防空导弹阵地的毁伤效能评估	474
参考文献	480

第1章 绪 论

1.1 终点效应学的科学技术内涵

终点效应学(terminal effects)起源于终点弹道学(terminal ballistics),是在经典终点弹道学基础上随着研究范围和研究内容的不断拓展而逐渐形成的内涵更加丰富的工程应用学科。终点弹道学一直以弹道学分支的形式存在,而弹道学是研究各种弹丸或抛射体从发射起点到终点的运动规律及伴随发生的有关现象的学科^[1]。对于经典弹道学,主要从身管发射武器的角度出发,由内弹道学、外弹道学和终点弹道学三个分支构成。在现代弹道学的学科体系中,又衍生出了中间弹道学、创伤弹道学等分支。另外,随着航天和航海科技的发展,还形成了大气层外的太空弹道学(也称为地球弹道学)和水弹道学等,这些也属于现代弹道学的体系范畴。在高能炸药广泛应用之前,弹丸主要作为动能侵彻体或利用其中装填的火药燃爆效应对目标起破坏作用。早期的终点弹道学研究更多的是针对弹体到达终点时所发生的侵彻、穿甲以及高速碰撞效应等方面的研究,也因此产生了力学学科的一个分支——穿甲力学。现代的终点弹道学,已经扩充了目标易损性、战斗部原理等研究内容,按《中国大百科全书》的定义,终点弹道学是一门研究“弹丸或战斗部在目标区域的运动规律、对目标的作用机理及威力效应”的学科^[1]。

随着兵器科学与技术的不断创新和发展,军事对抗学说与武器运用方法的不断更新与完善,以及基础理论学科与工程应用学科的不断交叉与融合,使目标易损性、战斗部原理以及毁伤评估理论等方面的研究与应用得以不断深化和扩展,并使以此为核心的毁伤理论开始形成体系。这样,从兵器科学与技术的学科体系出发,在终点弹道学的基础上,以毁伤理论与技术为研究主题的发展型学科开始呼之欲出,本书正是基于此来定位终点效应学并与经典终点弹道学进行区分。按国际弹道委员会(International Ballistics Committee, IBC)关于弹道学的专题分类方法,终点弹道更多的是指穿甲效应方面的研究,并与战斗部原理及目标易损性并列起来。目前,国内相关学者并不对终点效应学和终点弹道学刻意加以区分,通常认为具有相同的概念内涵。事实上,从弹道学分支的角度,按弹道学的学科体系和经典终点弹道学的概念范畴,已不能全面、准确地诠释相关科学技术领域不断拓展的研究内容。因此,重新审视终点弹道学的发展历程,从学科发展的角度赋予终点效应学更科学的内涵,是必要的和适宜的。

广义的终点效应可扩展到各类武器系统的各种终端效应,甚至可以扩展到体育运动的球类、射击、射箭等项目中各种运动体的末端结果以及生产、生活中各种物理和化学过程的最终结果。狭义终点效应的载体是弹药/战斗部,本书采用狭义终点效应的概念。弹药一般指有壳体,装有火药、炸药或其他装填物,能对目标起毁伤作用或完成其他任务的军械装备^[2];战斗部指弹药完成对目标毁伤或使目标失能的核心部分^[2]。狭义的终点效应学主要研究弹药/战斗部等各种毁伤装置的终点作用原理及其对目标的毁伤理论,更突出“毁伤”这一核心概念,强调弹药对目标的作用及其结果。

终点效应学属于工程应用学科,涉及连续介质力学、爆炸力学、穿甲力学、含能材料学、目标易损性理论、引战配合理论和毁伤评估理论等多学科领域,研究成果主要用于弹药威力设计与分析、目标防护设计与生存能力分析、引战配合研究、武器终端毁伤效能评估研究以及武器系统的作战效能研究等。

1.2 终点效应学的研究内容

终点效应学的研究内容主要包括三个方面:目标易损性与毁伤机理、弹药/战斗部的终点作用原理以及毁伤效果评估。对于经典终点弹道学来说,则更侧重于各种类型弹药或战斗部的终点作用原理研究。

弹药或战斗部是武器系统唯一的战斗载荷,是武器系统的核心和最重要的分系统之一,是武器系统完成最终作战使命和任务的执行机构。现代武器是建立在信息化和机械化基础上的复杂系统,早已不是由单一的火力系统所构成,涉及侦察与探测、定位与跟踪、运载与发射、导航与控制、命中与毁伤以及毁伤效果评估等各个方面,其综合性、体系化日益增强,功能越来越强大。终点效应学主要与武器系统全使命周期的两个重要环节——命中与毁伤以及毁伤效果评估——紧密相关,终点效应学所涉及的方方面面直接关系到武器系统的作战效能和实战有效性。

战场目标纷繁多样,主要包括有生力量、技术装备、军事设施、工业设施以及政治、经济目标等。广义上说,对战争进程和达成战役战术目的有影响的人和物均构成军事目标。目标毁伤是指目标战术功能的丧失或降低,既可以通过造成目标结构彻底毁坏或某种损伤来实现,也可以利用特殊的技术手段在不使目标发生损伤的情况下实现对目标的毁伤。在终点效应学的概念体系中,目标毁伤具有特定的含义,与目标损伤不可等同,在这里毁伤主要反映的是结果,而损伤则体现为过程和原因。

根据弹药/战斗部作用原理、毁伤元素类型和毁伤能量来源的不同,毁伤技术途径主要分为四类:核毁伤、生化毁伤、常规毁伤和非致命(软)毁伤。核毁伤利用原子核的裂变或聚变反应,瞬间释放出巨大能量,从而产生超大规模的杀伤和破坏

作用,其毁伤能量来源于原子间能量。生化毁伤通过释放生物战剂或化学毒剂使作战人员致病或受到毒害,其作用目标主要是有生力量。常规毁伤主要以火炸药为起始能源,由火炸药分子快速化学反应瞬时释放出的高密度化学能转换成冲击波、破片以及聚能射流等毁伤元素的能量,对目标结构产生致命性破坏作用,其毁伤能量来源于分子间能量。非致命(软)毁伤一般利用特殊的物理、化学和功能材料效应,造成目标功能失效或降低,使装备和人员等暂时丧失战斗能力,而附带的永久性破坏较小甚至没有。本书以常规毁伤效应为主,兼顾非致命(软)毁伤效应,不涉及核和生化毁伤效应。

军事作战需求是武器装备和弹药技术发展的源动力,总是在攻与防、矛与盾的对立统一中不断牵引技术进步和催生新型装备。军事作战思想的不断发展,作战样式的不断丰富以及战场目标的多样性且不断扩展,使弹药技术成为武器装备体系中最积极、最活跃的因素。由于目标的毁伤效果对毁伤方式具有选择性,所以弹药、战斗部的类型及其终点作用原理呈现针对性和多样性,终点效应学的研究领域非常广泛。

本书从目标易损性和毁伤机理开始,重点介绍常规毁伤的穿甲效应、杀伤效应、聚能效应和爆破效应以及一些非致命(软)毁伤效应等方面的知识,同时给出终点毁伤效能评估的基本原理和方法。

1.3 终点效应学发展简史

1.3.1 20 世纪以前

终点效应学的发展与演变首先要从终点弹道学的诞生与发展开始。人类有文献记载的关于终点弹道学的研究大致可追溯到 18 世纪 20 年代。18 世纪中叶,英国数学家 Robins^[3,4](1707~1751)发表了世界上最早的涉及终点弹道学研究的著作:*New Principles of Gunnery* 和 *Mathematical Tracts of Late Benjamin Robins*。与此同一时期,出生在瑞士的数学家 Euler^[5](1707~1783)也涉足这一研究领域,并出版了相关著作:*Neue Grundsätze der Artilleri*。

早在 18 世纪晚期,在弹丸中装填破片并作为毁伤元素的杀伤型弹药就已出现,1784 年,英国的 Shrapnel 发明了一种通过旧式火炮发射的内部装填有爆炸物和钢弹子的球形弹丸^[6],类似于现在的榴霰弹。需要说明的是,那时雷管和高能炸药尚未发明,相关基础和工程应用学科多未诞生,针对杀伤效应的系统科学研究无从谈起。适用于现代武器发射环境与使用条件的杀伤型弹药,最基本的特点是金属壳体既作为强度件也用于形成破片,其终点作用存在着爆轰驱动、壳体大变形和破碎等非常复杂的瞬态非线性力学过程,因此现代意义上的杀伤效应的系统和深

入研究基本上是 20 世纪以后的事。另外,与成型装药和聚能效应相关的研究也可追溯到 18 世纪末期,1792 年(一说是 1799 年),德国的 Baader 最先发现和公布了与钢板接触爆炸条件下,装药切口或表面一定形状对作用效果的影响。由于钢板上会形成对应的印迹而称为爆炸刻蚀现象^[7-9],据推测 Baader 的实验使用的可能是黑火药一类的物质。

19 世纪的终点弹道学研究主要活跃在欧洲,并主要集中于穿甲效应研究。最初主要利用身管火炮发射实心动能弹丸对地面防护装甲板、土木工事以及水上舰船模拟结构等进行高速冲击试验,以检验毁伤与防护效果。1829 年法国人 Poncelet^[10](1788~1867)发表的关于弹体侵彻土石方面的研究结果,标志着定量研究终点弹道学的开始,其中著名的 Poncelet 公式成为最早的穿甲力学模型。19 世纪上半叶,由于理论基础薄弱、测试技术和手段落后,基本的研究方法是通过实弹射击实验^[11-15],然后在牛顿力学的理论基础上获得预测冲击侵彻结果的经验公式,供弹丸设计或解决防护问题参考。进入 19 世纪 40 年代后,相关研究成果逐步汇集于 Helié^[16]的 *Traité de Balistique Expérimentale*、Didion^[17]的 *Traité de Balistique* 等著作中,包括许多有关穿甲实验的数据和各种经验公式等。19 世纪下半叶很长的一段历史时期内,穿甲效应的主要研究内容和研究方法没有发生实质性的变化。这期间,1873 年英国人 Bahsforth^[18]出版的 *Motion of Projectiles* 和 1883 年德国人 Krupp^[19]出版的 *Über das Durchschlagen von Panzerplatten*,被认为是关于终点弹道学和穿甲力学的经典著作之一,集成了这期间的主要研究成果。

19 世纪后半叶对终点弹道学或终点效应学的发展具有特殊的历史意义,穿甲效应以外的其他许多方面的研究正是在这期间开始的。1863 年 Wilbrand^[20]发明了 TNT 炸药,1865 年 Nobel^[21]发明了雷管,高能炸药的军事应用为终点弹道学或终点效应学研究提供了非常广阔的空间。这期间,爆轰现象被发现,爆轰概念被确立。1881 年、1882 年,Berthelot 和 Vieille^[22,23]以及 Mallard 和 Chatelier^[24]分别在研究管道内气体燃烧和火焰传播时,各自独立地发现了化学反应波的超音速自持传播现象,将其定义为爆轰。1899 年,Chapman^[25]率先提出了建立在流体力学和热力学基础上的爆轰理论模型。1870 年、1887 年、1889 年,Rankine^[26,27]和 Hugoniot^[28,29]各自开创性地研究了爆炸空气冲击波的性质,给出了速度、密度和内能之间的关系式,形成了著名的 Rankine-Hugoniot 方程组。1883 年, von Foerster^[30,31]最先提出了采用高能炸药的成型装药,并被认为是成型装药的最早发现者。1886 年, Bloem^[32]发明了第一个带有半球形罩的成型装药。1888 年, Munroe^[33-35]对无罩的成型装药进行了较为深入的研究,并在之后不久提出了一个有药型罩的成型装药,在当时 Munroe 的研究非常具有影响力,因此成型装药效应也被称为“Munroe(门罗)效应”。

1.3.2 20 世纪

从 19 世纪末期开始,弹塑性力学特别是塑性动力学、流体力学、爆轰学以及爆炸动力学的发展,为终点弹道学的深入研究提供了重要的理论基础以及理论研究的方法和手段。值得一提的是,第一次和第二次世界大战对武器装备发展的需求牵引,以及以 TNT、RDX 为代表的高能炸药的发明与军事应用,极大地促进了终点弹道学的研究与发展。由于战场目标类型的日益增多和目标防护能力的不断增强,对以高能炸药为毁伤能源的多类型弹药及分别提高其毁伤威力提出了迫切需求,从而使终点弹道学的研究范围不断拓展,研究深度不断增加,并使其逐渐发展成为一个独立的工程应用学科。

进入 20 世纪以后,终点弹道学研究开始由欧洲向美国延伸,美国开始逐步成为新的研究中心之一。美国于 1929 年正式成立了海军武器研究所,于 1937 年成立了陆军弹道研究所,在此期间较为广泛地开展了终点弹道学特别是穿甲效应方面的研究^[36-42],而在此之前,这两个研究机构已以其他名义在该领域开展了多年的研究工作^[43]。经初步考证^[44,45],终点弹道学(*terminal ballistics*)作为主题词和专业术语,最早出现于二战时期的 1941 年,由美国人 Robertson^[46]提出,某种意义上说,这是终点弹道学开始成为一个独立的学科或一个专门的科学技术研究领域的标志。

终点弹道学历史上的一个重要发展是目标易损性和毁伤机理研究成为该学科重点研究内容之一,这也是终点弹道学发展成今天的终点效应学过程中十分关键的一步,而其中的起因正是第一次世界大战。在此期间,军用飞机首次出现在战场上,战争初期主要承担侦察、运输和校正火炮等辅助任务。1915 年,法国人在飞机上装了一挺机枪并在螺旋桨上安装一种叫做偏转片的装置,这是第一架真正意义上的战斗机并用于实战^[47]。空对空作战的实践,促使人们对飞机目标的易损性和战场生存能力产生极大兴趣并着意加以研究。与此同时,化学武器开始出现并用于实战^[48,49],德国人第一次在战场上使用了氯气,时间也是 1915 年。这激起了人们对化学物质和其他手段作为人体失能剂的研究兴趣,也推动了相关毁伤机理和人员战场防护问题的研究。大口径重型火炮的出现,以及空中轰炸能力的具备,使人们认识到把一切军事目标都构筑到坚不可摧是难以办到的,于是,关于爆破效应对建筑物等目标的毁伤机理研究也紧接着开展了起来。

目标易损性和毁伤机理研究的高潮出现于第二次世界大战末期及其以后的一段时间,主要是围绕原子武器和热核武器的研发与应用展开的^[50-52]。期间,关于爆炸冲击波、热辐射和核辐射的毁伤机理成为新的研究热点。除此之外,战争的需求以及技术的进步,使得大量高技术新型装备研制成功并投入使用,正是由于军事作战和武器对抗的迫切需要,进一步推动了飞机、建筑物、地面战斗车辆以及有生

力量等目标针对破片、动能弹丸、爆炸冲击波、聚能射流以及火焰等作用的易损性和毁伤机理研究。

二战以后,目标易损性与毁伤机理研究对武器装备的研制、发展以及原始创新和技术进步等的重大意义得到广泛认同,为此,以美国、苏联为代表的军事强国制定了系统的研究计划,投入了大量的人力、物力,积累了大量的实验和理论研究成果^[53-55]。限于这一方面的研究成果属于国家安全层面的重要机密,公开报导的文献并不丰富。总之,在这之后的几十年中,目标易损性和毁伤机理研究向基础性、系统性、纵深性以及通用性和针对性相结合的方向发展。同时新的作战需求和装备技术发展也使研究对象不断增多,例如:新型战机、战术导弹、航空母舰、雷达、深层地下工事以及电力设施等,研究领域也在不断扩展,研究深度不断增加。近年来,新军事革命思潮对战争理念的影响日益增强,战场目标的范围不断扩大,以及武器装备技术发展的日新月异和新型装备的层出不穷等,这些使目标易损性与毁伤机理研究难以停歇,永无止境。

终点效应学是在终点弹道学的基础上发展起来的,而终点弹道学是从研究穿甲效应问题开始的,所谓穿甲效应是指弹体(丸)对目标的高速撞击、侵彻、贯穿及因此而产生的破坏作用。进入20世纪以来,这一方面的研究方兴未艾,尤其其他学科的相应发展,为更精确地量化研究穿甲效应问题创造了良好的理论与实验条件。

20世纪40年代是穿甲效应研究与发展的一个重要历史阶段。1941年,美国人Robertson^[46]在一篇名为 *Terminal Ballistics* 的AD报告中,总结了在这之前二三十年关于穿甲效应的大量实验结果,给出了有关的经验公式并探讨了相应的穿甲机理。在第二次世界大战中,美国又进行了大量实验研究,其结果汇集在National Defense Research Committee (NDRC)的专题报告中^[56]。与此同时,Bethe^[57]于1941年首先对穿甲效应的侵彻过程进行了静态理论分析,随后Taylor^[58]在其基础上推导出了基于准静态考虑的靶板扩孔所需能量与弹丸半径关系的理论模型,同时Taylor^[59]还提出了假设靶板为刚体、弹体为理想刚塑性材料,杆形弹对半无限靶的垂直侵彻模型,可求解弹体长度、速度的变化及变粗的情况。后来的研究者又在Taylor的基础上考虑了惯性效应,对有关模型进行了进一步的推广,其中最重要的发展是Freiberger^[60]的塑性动力学理论。Bishop、Hill和Mott等^[61]于1945年首先提出了空腔膨胀理论(CET),获得了柱形和球形空腔在无限介质中准静态膨胀的解。

20世纪60年代以后,新的实际问题的出现、实验技术的进步和计算机的应用,为穿甲效应的研究提供了新的契机,该领域研究取得了长足进步与发展。1963年,Recht和Ipson^[62]在Spells^[63]理论的基础上,建立了基于能量守恒的刚性钝头弹体对薄靶板挤凿破坏的简单力学理论,给出了弹道极限、着速和剩余速度的关系