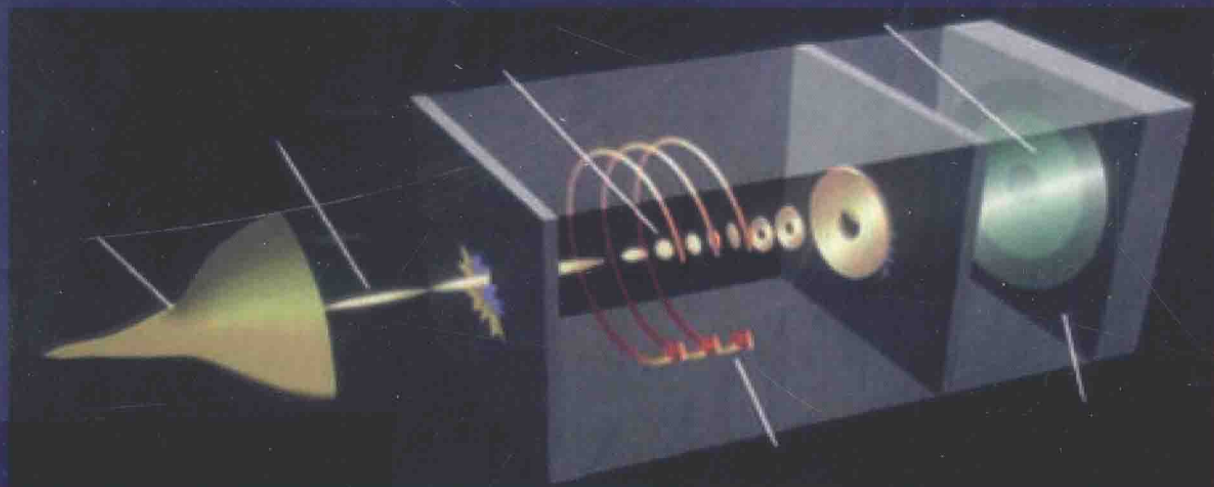


国家自然科学基金项目资助

成型装药多模 战斗部设计原理

CHENGXING ZHUANGYAO DUOMO
ZHAN DOUBU SHEJI YUANLI

● 李文彬 王晓鸣 李伟兵 吴义锋 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

国家自然科学基金项目资助(11202103)

成型装药多模战斗部 设计原理

李文彬 王晓鸣 李伟兵 吴义锋 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

成型装药多模战斗部技术是在现代成型装药破甲弹的基础上逐步发展起来的一种新型破甲技术,其技术的核心是多模毁伤元的形成和转换方法。

本书共 10 章,系统地阐述了多模毁伤元的形成理论,重点讨论了多模毁伤元形成与侵彻的影响因素,给出了多模毁伤元形成的条件范围和仿真研究方法,内容完整、重点突出。

本书图文并茂,理论与实际紧密结合,是一本有重要参考价值的著作,可供从事该领域科研、试验、生产的工程技术人员参考,也可供相关专业的高等学校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

成型装药多模战斗部设计原理 / 李文彬等著. —北京:国防工业出版社,2016.6
ISBN 978-7-118-10880-4

I. ①成... II. ①李... III. ①装药设计 IV.
①TD235.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 130782 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 100048)
天利华印刷装订有限公司印刷
新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 11¼ 字数 255 千字
2016 年 6 月第 1 版第 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)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

成型装药多模战斗部技术是为适应未来战场上目标多样性的需求,实现对不同目标或目标的不同部位的精确毁伤而发展起来的新型破甲技术,其随着多点同步起爆精度的提高而逐步趋向成熟,是未来智能弹药实现可控毁伤的主要技术途径之一,是近10年来国内外成型装药技术发展的热点。

本书系统地阐述了多模毁伤元的形成机理、毁伤元的转换方法等多模战斗部的核心技术问题,是作者所在研究团队近10年研究工作的总结,其特点综合起来主要有以下几个方面:

(1) 详细阐明了多模毁伤元形成理论,将扩展的PER理论应用于描述大锥角药型罩正向和逆向环起爆形成侵彻体的过程,给出了描述射流和杆式射流形成的理论模型以及基于动量守恒的EFP速度模型,奠定了多模战斗部设计的理论基础。

(2) 系统地讨论了多模毁伤元形成的影响因素,从多点起爆爆轰波形成与控制出发,讨论了不同起爆方式、药型罩结构、装药结构对多模毁伤元形成的影响,得到了相关的影响规律。

(3) 给出了多模毁伤元形成的条件范围,在大量的仿真和试验结果的基础上,给出了形成EFP和JPC药型罩参数、装药参数与起爆位置的匹配关系,确定了各参数的取值范围,奠定了多模战斗部结构设计基础。

(4) 建立了多模毁伤元侵彻的理论模型,引入弹靶分离的思想,建立了EFP和JPC侵彻半无限均质靶的理论模型和JPC对混凝土介质侵彻深度的计算模型,奠定多模战斗部毁伤威力评估的基础。

全书共分10章,第1、4、8章由李文彬撰写,第6、7、10章由王晓鸣撰写,第3、5、9章由李伟兵撰写,第2章由吴义锋撰写,全书由李文彬统稿。

本书得到了北京理工大学蒋建伟教授和门建兵副教授的支持和帮助。作者所在团队研究生们为研究工作的完成付出了辛勤的劳动,他们是汪得功、樊菲、李慧子、陈忠勇、陈奎、周欢、吴有龙、张攀军等。另外,郭倩、朱建军、陈帅等同学为书稿的编辑做出了贡献。在书稿完成之际向他们一并表示衷心的感谢。

本书是围绕作者的研究成果而撰写的一部专著,受篇幅所限,国内外有关的重要著作可能有所遗漏,在此请予以谅解。限于作者的能力和水平,书中难免存在缺点和错误,敬请读者批评指正。

作者

第1章 成型装药多模战斗部概述	1
1.1 成型装药多模战斗部的概念	1
1.2 多模战斗部的结构与工作模式	3
1.3 多模战斗部国内外研究现状	4
1.4 多模战斗部发展趋势	6
第2章 成型装药多模毁伤元形成理论	8
2.1 定常理想不可压缩流体力学理论	8
2.2 准定常理想不可压缩流体力学理论(PER理论)	10
2.3 扩展的PER理论模型	13
2.3.1 药型罩的压垮参数	14
2.3.2 药型罩微元在轴线上的闭合参数	15
2.3.3 射流形成的临界条件	17
2.3.4 射流头部的速度参数	18
2.3.5 微元汇聚后射流在轴线上的运动参数	18
2.3.6 大锥角下Defourneaux经验方程适用性验证及系数的计算	19
2.3.7 逆向环形起爆条件下锥形罩成型装药形成射流的计算	22
2.4 端面环形起爆球缺型药型罩形成EFP模型	25
2.4.1 EFP形成后稳定飞行速度	25
2.4.2 药型罩的压垮速度	26
2.4.3 微元受到的冲击压力	26
2.4.4 药型罩压垮角	27
2.4.5 药型罩微元有效装药量	27
2.4.6 压垮速度与药型罩法线之间的夹角	28
2.4.7 模型计算实例	28
2.5 弧锥结合罩形成EFP速度的工程算法	29
2.5.1 弧锥结合罩形成EFP速度的工程算法	29
2.5.2 装药长径比影响的修正系数	31
2.6 端面环起爆形成杆式射流影响因素分析	32
2.6.1 提高射流质量	32
2.6.2 减小射流速度梯度	33

第3章 起爆方式对多模毁伤元的影响	34
3.1 不同起爆方式下爆轰波的形成与传播	34
3.1.1 爆轰波 C-J 理论	34
3.1.2 爆轰波碰撞理论	36
3.2 点起爆和环起爆方式下爆轰压力分析	40
3.2.1 单点起爆	40
3.2.2 环起爆	42
3.2.3 理论与仿真的比较分析	45
3.3 起爆位置对多模毁伤元的影响	47
3.3.1 起爆点高度对多模毁伤元的影响	47
3.3.2 不同起爆位置对毁伤元形成的影响	49
3.4 点代环起爆点数的确定	54
3.5 多点同步起爆偏差的确定	55
3.5.1 起爆偏差的设定	55
3.5.2 起爆偏差的影响	56
3.5.3 起爆偏差的确定及试验对比	59
第4章 药型罩对多模毁伤元的影响	61
4.1 弧锥结合罩参数对多模毁伤元的影响	61
4.1.1 弧锥结合罩圆弧曲率半径的影响	61
4.1.2 弧锥结合罩锥角的影响	62
4.1.3 弧锥结合罩壁厚的影响	63
4.1.4 弧锥结合点位置对毁伤元成型的影响	64
4.2 球缺形罩参数对多模毁伤元的影响	68
4.2.1 药型罩圆弧曲率半径对毁伤元特性的影响	68
4.2.2 药型罩壁厚对侵彻体特性的影响	68
4.3 药型罩材料性能的影响	70
4.3.1 药型罩材料的选取	70
4.3.2 不同材料同结构药型罩对多模毁伤元形成的影响	71
4.3.3 不同材料同质量药型罩形成多模毁伤元的影响	73
4.3.4 试验结果	74
第5章 装药结构对多模毁伤元的影响	76
5.1 装药长径比对多模毁伤元成型的影响	76
5.1.1 有效装药高度分析	76
5.1.2 装药长径比对 EFP 成型的影响	77
5.1.3 装药长径比对杆式射流成型的影响	79
5.1.4 杆式射流成型仿真与试验对比	82

5.2	次口径装药对多模毁伤元成型的影响	83
5.2.1	次口径装药形成侵彻体的形态	83
5.2.2	同口径和次口径装药形成毁伤元对比分析	84
5.3	装药壳体对多模毁伤元成型的影响	87
5.3.1	带壳装药与裸装药的毁伤元形态比较	88
5.3.2	壳体厚度对多模毁伤的影响	88
5.3.3	壳体材料对毁伤元成型的影响	89
5.3.4	壳体厚度与装药口径匹配关系	90
5.4	装药性能对多模毁伤元成型的影响	91
第6章	多模毁伤元的形成条件	95
6.1	多模毁伤元形成的灰关联分析	95
6.1.1	灰色系统理论概述	95
6.1.2	灰关联分析方法的步骤	95
6.1.3	多模毁伤元形成的灰关联分析	97
6.2	EFP、JPC 两模毁伤元形成条件范围	99
6.3	JET、JPC 两模毁伤元形成和转换	100
6.3.1	JET 与 JPC 两模毁伤元形成的影响规律	100
6.3.2	JET 和 JPC 两模毁伤元形成条件范围	104
第7章	偏心亚半球罩装药结构单点起爆多模毁伤元的形成与转换	105
7.1	单点起爆形成 EFP 和 JPC 的机理	105
7.1.1	罩顶点起爆形成 EFP	105
7.1.2	装药端面中心起爆形成 JPC	106
7.2	偏心亚半球罩多模毁伤元成型理论	108
7.2.1	偏心亚半球罩 EFP 毁伤元成型理论模型	108
7.2.2	偏心亚半球罩 JPC 毁伤元成型理论模型	113
7.3	偏心亚半球罩结构参数对多模毁伤元成型的影响	115
7.3.1	药型罩外圆弧曲率半径的影响	115
7.3.2	药型罩壁厚的影响	116
7.3.3	药型罩罩顶高的影响	116
第8章	MEFP 的形成与控制方法	119
8.1	MEFP 形成机理	120
8.2	隔栅对 MEFP 成型的影响	121
8.2.1	隔栅结构	121
8.2.2	单元格大小的影响	122
8.2.3	隔栅位置的影响	122

8.3	MEFP 飞散角的控制	124
8.3.1	起爆点位置对飞散角的影响	124
8.3.2	隔栅曲率对发散角的影响	125
8.4	MEFP 对靶板的侵彻	126
第9章	多模毁伤元侵彻威力	128
9.1	EFP、JPC 对装甲钢板的侵彻	128
9.1.1	侵彻过程描述与基本假设	128
9.1.2	侵彻模型	129
9.1.3	α 、 β 的确定	132
9.1.4	装药长径比对 EFP 侵彻半无限靶的影响	132
9.1.5	着角对 EFP 侵彻半无限靶的影响	133
9.2	JPC 对混凝土介质的侵彻	136
9.2.1	JPC 侵彻混凝土靶的过程	136
9.2.2	靶板阻力的确定	137
9.2.3	JPC 对混凝土靶的侵彻模型	138
9.2.4	仿真、试验与理论结果对比分析	144
第10章	多模战斗部数值仿真方法	146
10.1	多模毁伤元的数值仿真方法概述	146
10.2	模型构建及影响分析	147
10.2.1	多模战斗部网格模型的建立方法	147
10.2.2	网格对多模毁伤元形成的仿真结果的影响	149
10.3	材料模型的选取	154
10.4	算法	157
10.4.1	ALE 算法原理	157
10.4.2	基本方程及处理	157
10.5	多模战斗部数值仿真标定	160
10.6	正交设计方法在多模毁伤元仿真中的应用	162
10.6.1	正交设计法概述	162
10.6.2	多模毁伤元仿真的正交设计案例分析	163
	参考文献	170

第1章

成型装药多模战斗部概述

1.1 成型装药多模战斗部的概念

多模战斗部(Multimode Warhead)也称为可选择战斗部(Selectable Warhead),是指根据目标特性而自适应选择不同作用模式的战斗部。

成型装药多模战斗部是指在同一战斗部(同一装药结构和药型罩)上,通过改变起爆方式或起爆位置,合理控制爆轰波形,形成不同形态的毁伤元,可选择攻击不同目标或同一目标不同部位的战斗部。

成型装药多模战斗部的多模毁伤元形态一般有4种模式:

(1) 金属射流(JET)。JET作为一种传统的聚能侵彻体,已经得到广泛应用,其头部速度一般为 $5000 \sim 10000\text{m/s}$,尾部速度为 $500 \sim 1000\text{m/s}$ 。射流高的速度梯度,导致其有效作用距离有限,随着炸高的增加,JET易发生断裂,使侵彻能力下降很快,一般在 $3 \sim 8$ 倍装药口径的炸高下对均质装甲的侵彻深度可达10倍装药口径,如图1.1.1所示。



图1.1.1 典型的金属射流形貌

(2) 爆炸成型弹丸(EFP)。EFP战斗部已成功应用于末敏弹等远距离反装甲武器系统中。EFP速度为 $1700 \sim 2500\text{m/s}$,没有速度梯度,能够实现远距离飞行,炸高可达到1000倍装药直径,侵彻深度一般为 $0.5 \sim 1$ 倍装药口径,如图1.1.2所示。

(3) 杆式射流(JPC)。JPC具有比EFP更高的速度,为 $3000 \sim 5000\text{m/s}$,其长杆式外形能够保证在一定的距离内稳定飞行,有利炸高在 $10 \sim 20$ 倍装药直径,侵彻深度在 $1 \sim 3$ 倍装药口径,侵彻孔径一般可达装药口径的45%左右,具有较大的后效杀伤效果,如图1.1.3所示。

(4) 多破片(MEFP)。MEFP式侵彻体是在EFP成型装药端部放置隔栅装置,在成型装药EFP形成的初始时刻被该装置切割,形成多个破片,通过隔栅装置控制破片数量、质

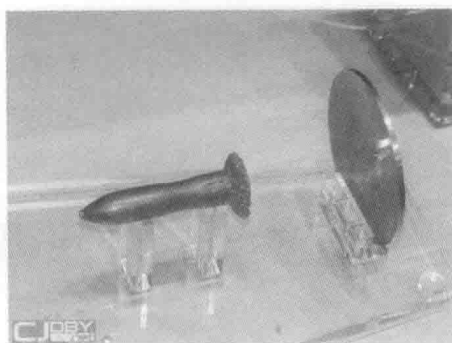


图 1.1.2 典型的 EFP



图 1.1.3 典型的杆式射流

量,通过起爆控制破片飞散角,实现对轻型装甲目标和软目标的毁伤,如图 1.1.4 和图 1.1.5所示。

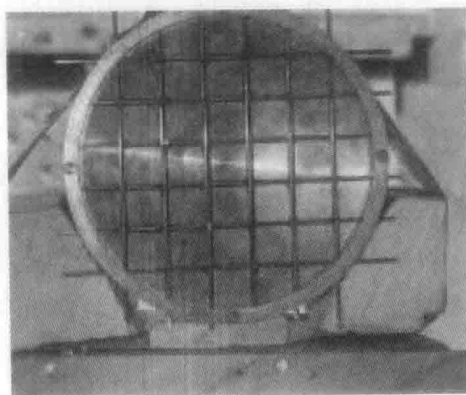


图 1.1.4 典型多破片隔栅装置

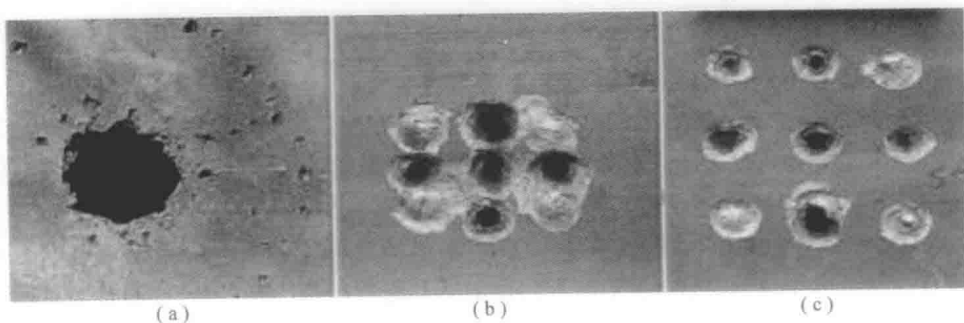


图 1.1.5 典型多破片对均质装甲的侵彻结果

以往的研究中,以发展多功能为手段,以牺牲某些单项性能为代价,实现对多种目标的打击。例如,在对付厚重的装甲目标时,一般采用破甲战斗部,利用射流毁伤目标;在远

距离上对付装甲目标时,采用爆炸成型弹丸战斗部,利用 EFP 毁伤目标。多模战斗部则根据攻击的目标不同,自适应地实时实现毁伤元的转换,达到毁伤不同目标和不同毁伤目的的要求。

毁伤元的可选择和实时转换是多模战斗部的核心,爆轰波形的控制是多模战斗部的关键。多模战斗部是智能毁伤的基础,是未来灵巧/智能弹药实现最佳毁伤效能的保证。多模战斗部技术已经成为未来武器系统发展的主要方向之一。

本书所研究的多模战斗部主要是上述 4 种毁伤元中的 2 种或 3 种的组合,以 EFP、JPC 和 MEFP 为主。

1.2 多模战斗部的结构与工作模式

成型装药多模战斗部结构如图 1.2.1 所示,由壳体、药型罩、装药、压环、前置网栅、单点起爆装置和多点起爆装置组成。

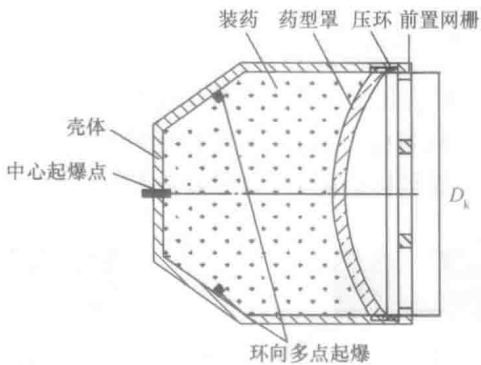


图 1.2.1 多模战斗部结构示意图

3 种作用模式: EFP 模式,中心单点起爆实现,可远距离攻击轻型装甲;杆式侵彻体 (JPC) 模式,采用环向多点起爆,用于近距离打击重型装甲;多 EFP 模式,利用前置网栅的剪切作用形成毁伤元,用于打击分散目标或软目标。多模战斗部的作用模式如图 1.2.2 所示。

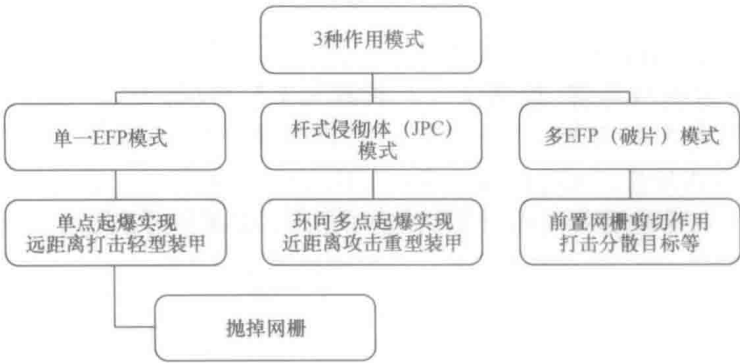


图 1.2.2 多模战斗部的作用模式

1.3 多模战斗部国内外研究现状

近 10 年来,国外对多模战斗部的研究与开发非常活跃,取得了显著成果,最有代表性的例子是美国洛克希德·马丁公司 1994 年开始研制 LOCAAS - 自主攻击弹药,如图 1.3.1 和图 1.3.2 所示。



图 1.3.1 LOCAAS 三模战斗部

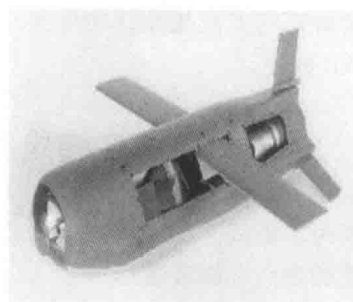


图 1.3.2 LOCAAS 巡飞弹

洛卡斯(LOCAAS)子弹药采用了三模式爆炸成型侵彻体(JPC、EFP、MEFP)战斗部,可实现对人员(软目标或半硬目标)、轻/重装甲目标的有效打击,具有在复杂的战场环境中自动搜索、捕获并摧毁关键目标的能力,如图 1.3.3 所示。

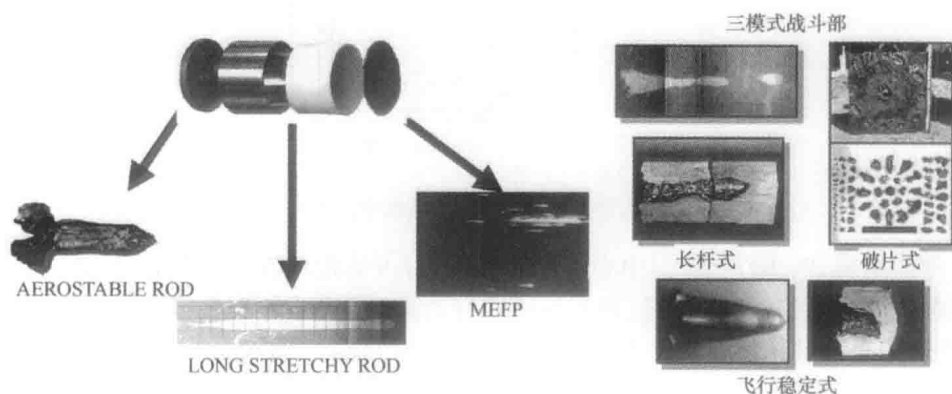


图 1.3.3 洛卡斯子弹药三模式 EFP 战斗部的 3 种作用模式

雷声公司研制的精确攻击导弹(PAM)和洛克希德·马丁公司研制的巡飞攻击导弹(LAM)均配装多模战斗部,如图 1.3.4 和图 1.3.5 所示。PAM 导弹的战斗部重达 12.7kg,是 LAM 的 3 倍,可用于攻击如坦克类的重型装甲目标或者软目标、中等强度的防御工事。巡飞攻击导弹(LAM)的战斗部用于攻击轻型装甲目标、高价值点目标、非装甲编队等,如多管火箭炮、指挥与控制车和防空目标等。如果所要执行的是战斗毁伤评估任务,LAM 就会拥有一段“巡飞时间”,并在此时向地面站发送攻击后的图像以提高再次打击的精度。

除美国外,俄罗斯、以色列、英国、德国、意大利、法国等发达国家也加入到多模巡飞弹药的发展行列。英国在研的低成本巡飞弹(LCLC)、以色列在研的单兵使用的巡飞弹等均采用多模战斗部技术。

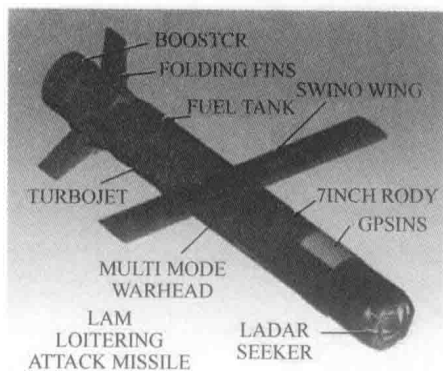


图 1.3.4 LAM 巡飞攻击弹药

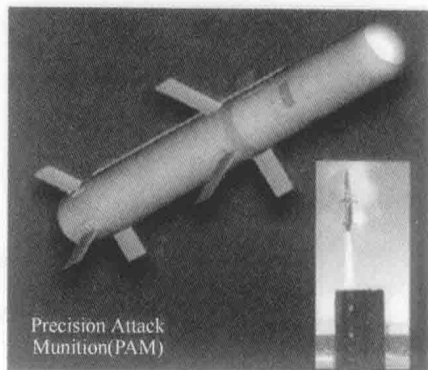


图 1.3.5 PAM 精确攻击弹药

在产品研制的同时,与多模战斗部相关的关键技术得到了长足的发展,已形成从计算、试验到产品设计的一整套系统完善的理论和方法。

1991 年,美国的 Richard Fong 在第 41 届弹药和战斗部会议上提出了新型可选择的 EFP 战斗部概念,通过在药型罩前端加置隔栅,研究了隔栅的直径和材料对形成 EFP 破片的大小和散布面积的影响,得出了破片模式由隔栅棒的排列和直径控制。

1996 年,加拿大的 Robert J. Lawther 设计的双模式战斗部申请了专利,通过尾部端面点起爆形成射流侵彻厚装甲,通过药型罩端部环起爆和尾部端面点起爆形成大飞散角破片。

2000 年,美国的 Lucia D. Kuhns 获得专利(侵彻双模战斗部),该战斗部拥有圆柱外表面破片壳体、炸药和爆炸加载形成的长杆,形成破片模式攻击软目标,或者通过长杆侵彻硬目标。Richard Fong 又在战斗部技术发展 AD 报告中提出了对付不同目标的 3 种毁伤元,即稳定飞行 EFP、大伸长 EFP 和 MEFP。

2001 年,美国的 David Bender 等人在第 19 届国际弹道会议中提出通过使用多点起爆装置可形成双 EFP 模式毁伤元。

2002 年,美国的 E. L. Baker 和 A. S. Daniels 研究了可选择起爆成型装药,通过改变起爆位置实现对轻装甲、地质材料等的毁伤,研究了多种起爆位置射流形成方案。

2004 年,德国的 Fritz Steinmann 和 Christa Lösch 研究了多模战斗部技术,改进了 Bunkerfaust 战斗部,使其在能毁伤轻型装甲和典型城市目标外,同时还能毁伤重型装甲;提出了多模式 EFP 战斗部,通过改变起爆方式,仿真和试验获得了多模式 EFP 毁伤元;仿真研究了起爆环半径对射流成型的影响,获得了不同起爆方式对侵彻体成型的影响,如图 1.3.6 所示。吴成等人试验研究了多模态聚能战斗部,通过改变 VESF 装置参数控制射流的形状和质量分布,产生针对不同目标的多模态射流。

2005 年,郭美芳和范宁军研究了多模式战斗部及其起爆技术,初步分析了药形罩的材料与结构、炸药的类型与装药结构对多模式战斗部性能的影响,提出多点可选择起爆技术是多模式战斗部首先突破的重要关键技术。

2006 年,余道强研究了可选择作用/多模战斗部技术,分析了实现多模作用的技术途径,试验研究了切割网栅材质选择和切割网栅与药型罩之间的距离对切割效果的影响。

2008 年,英国的 A. J. Whelan 设计了一种能同时攻击城市建筑物和装甲钢板的多级

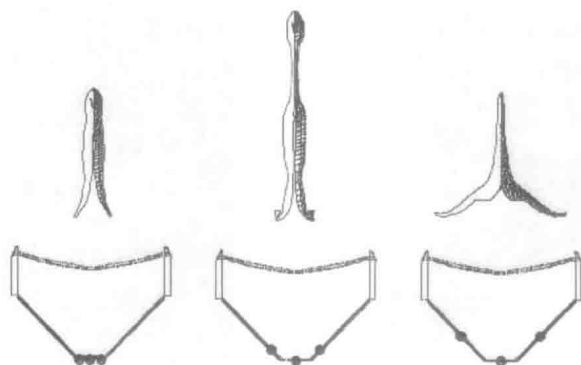


图 1.3.6 不同的起爆环组合对毁伤元形成的影响

战斗部,其中的主战斗部通过环形起爆形成射流,前级战斗部则形成缓慢拉伸射流(SSJ)。南非的 G. de la Bat 等人提出了一种能有效攻击多种目标的、低附带损伤的武器,这样就能减少军队昂贵的武器军费开支,设计并改进了一种能攻击人员、掩体和轻装甲等多目标侵彻体,通过减少炸药而降低附带损伤,提出可应用多选择可编程的时间引信在相对目标最佳的位置起爆战斗部。蒋建伟等人数值模拟研究了点起爆和环形起爆方式下爆炸成型弹丸和杆式侵彻体的形成和侵彻能力。

2010 年,张玉荣等人仿真研究了多模式 EFP,通过在战斗部前加置金属网切割装置来切割得到预期形状的 EFP。张扬一研究了同模式的多模战斗部,仿真研究了单一 EFP 和 EFP 破片,并进行了试验验证。门建兵等人仿真和试验研究了多模战斗部毁伤元成型和侵彻过程,通过单点起爆形成 EFP、多点起爆形成杆式侵彻体、加置切割网形成 MEFP。

南京理工大学作者所在的团队从 2003 年开始,系统研究了多模战斗部技术,从爆轰波形控制理论入手,建立了多模毁伤元成型理论,得到了装药结构、药型罩参数等多模毁伤元成型的影响规律,给出了多模毁伤元的形成条件范围,实现了多模毁伤元的转换。

1.4 多模战斗部发展趋势

多模毁伤技术是集成了战斗部技术、电子信息技术、传感器检测技术等领域的新一代高效毁伤技术,需要突破战斗部总体集成技术、起爆控制技术、多模毁伤元稳定成型等关键技术,多模战斗部为了更好地适应战场作战要求,促进其在装备中大量使用,其未来的主要发展方向如下:

(1) 小型化设计。多模战斗部需要集成探测装置、起爆控制装置、成型装药等,其总体集成技术一直是重点关注的研究内容。找出各装置最佳匹配关系,小型化设计多模战斗部,将有利于其在今后灵巧弹药中得到应用。

(2) 兼顾多功能与高威力。多模战斗部在集成多种模式毁伤元过程中,必将损失单一毁伤元的毁伤能力,如何在实现多功能的同时,进一步提高战斗部毁伤威力将是一个需要进一步研究的课题。

(3) 引战配合最优化。现代灵巧弹药及今后智能弹药,对目标的准确定位和跟踪探测,可以实现对目标的最佳毁伤。但是对于如何选择最佳毁伤模式,需要进行目标易损性

分析,快速确定目标薄弱位置,适时控制起爆装置,选择合适的起爆方式,起爆主装药形成最佳毁伤元,这就需要探测、控制、起爆及装药之间的最佳配合。

(4) 多模战斗部系统设计。为了多模战斗部能适应多平台应用,需要建立一套完整的多模战斗部系统设计方法,多模毁伤元成型及侵彻的分析模型需要进一步深化研究,为建立多模战斗部系统设计平台奠定基础,同时结合多模成型装药参数优化模型,形成从威力要求到战斗部结构参数优化的系统设计平台。

第2章

成型装药多模毁伤元形成理论

成型装药毁伤元的形成是一个伴随着高温、高压、高速的十分复杂的过程,其动力学描述应考虑诸多因素的影响;相互作用物体的速度和几何形状;弹塑性应力波的传播;材料结构及材料的塑性流动、应变率、材料的断裂及其扩展等。要得到毁伤元成型准确的解析解十分困难。

成型装药毁伤元形成的理论研究开始于1948年,Birkhoff等人根据爆轰波的压力远大于药型罩的强度,将药型罩作为一种非黏性不可压缩的流体处理,建立了定常不可压缩流体力学理论,定常理论不能预测射流的拉长。为了描述射流的速度梯度,Pugh、Eichelberger和Rostoker等人对成型装药的定常理论进行改进,发展了被称为PER理论的非定常理论,认为药型罩各个微元的压垮速度和压垮角不同。PER理论只适用于平面起爆的锥形和楔形罩,为此许多学者对其进行了扩展,增加了一些辅助方程,考虑微元的压垮加速过程,从而将其发展成适用于任意药型罩形状的一般射流分析理论。

本章在PER理论的基础上,将扩展的PER理论应用于描述大锥角药型罩的正向和逆向环起爆形成侵彻体的过程,将微元的指数压垮模型应用于描述任意形状的药型罩的压垮汇聚过程,并利用数值仿真方法获得德佛纽克斯系数,建立描述射流和杆式射流形成的理论模型;从微元初始压垮速度的获得到EFP的成型,其总动量守恒这一基本点出发,建立端面环起爆球缺罩形成EFP模型,并针对弧锥结合罩建立EFP速度的工程算法。

2.1 定常理想不可压缩流体力学理论

Birkhoff等人在定常不可压缩流体力学理论基础上研究射流的形成理论,用于解释射流的形成过程。

理论中的假设条件:

- (1) 在爆炸高压条件下,药型罩金属为理想(无黏性)不可压缩流体。
- (2) 药型罩各处压垮速度 v_0 保持不变。
- (3) 药型罩变形过程中其母线长度保持不变。

图2.1.1所示为药型罩母线上任一小段对应的环在闭合时的情况(以下称其为罩微元),根据假设条件,爆轰波传到A处时,A点以速度 v_0 开始闭合,在闭合到达罩轴线C处

发生碰撞,而此时爆轰波沿罩母线传到了 B 处,由假设条件(3)可知 $AB = BC$,速度 v_0 与 AC 方向一致。

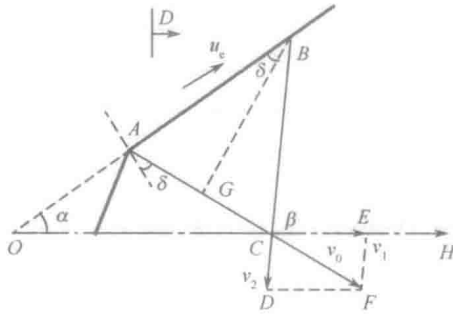


图 2.1.1 罩微元的闭合几何示意图

在图 2.1.1 中, α 为药型罩半锥角, δ 为偏转角, 偏离 A 点法线, β 为压垮角, v_0 为压垮速度, v_1 、 v_2 是 v_0 的两个分量, D 为爆轰波传播速度, u_e 为爆轰波沿罩面扫过的速度。

若在 v_1 的动坐标系下研究药型罩的压垮情况, 可以看出罩微元是以 v_2 的速度流向罩轴线, 这种情况类似于图 2.1.2 所示的定常流体冲击刚性壁面, 在碰撞点 C 分为方向相反的两股。定常不可压缩流体满足伯努利方程, 即流体各处满足

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const} \quad (2.1.1)$$

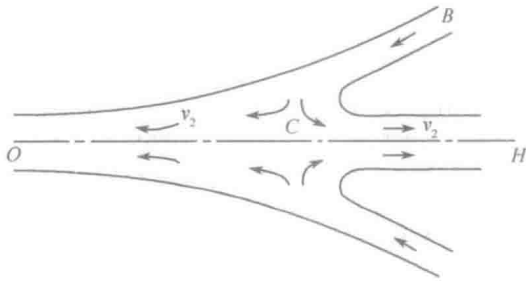


图 2.1.2 定常流动示意图

在碰撞点较远处, 可认为压强 p 近似相等, 由此可得 O 、 H 、 B 处流动速度相等, 均为 v_2 , 故静坐标下射流和杵体的速度分别为

$$v_j = v_1 + v_2 \quad (2.1.2)$$

$$v_s = v_1 - v_2 \quad (2.1.3)$$

从图 2.1.2 中可以得到

$$\beta = \alpha + 2\delta \quad (2.1.4)$$

再由正弦定理得

$$\frac{v_0}{\sin \beta} = \frac{v_1}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right)} = \frac{v_2}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - (\beta - \delta) \right)} \quad (2.1.5)$$

于是有

$$v_j = \frac{v_0}{\sin \frac{\beta}{2}} \cos \left(\frac{\beta}{2} - \alpha - \delta \right) \quad (2.1.6)$$