



TERMINAL EFFECTS

终点效应

黄正祥 祖旭东 编著



科学出版社

终 点 效 应

黄正祥 祖旭东 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统而全面地叙述了弹丸(战斗部)终点效应,主要包括爆炸效应、杀伤效应、聚能效应、穿甲效应、弹丸(战斗部)对土石介质的侵彻效应以及终点效应试验。本书在编写中注重理论联系实际,并反映国内外最新研究成果。

本书可以作为理工科院校和科研院所的弹药与战斗部专业高年级本科生、研究生及教师使用的专业教材或深入钻研的指导资料,也可供从事弹药及战斗部产品开发研究的科研人员和工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

终点效应/黄正祥,祖旭东编著. —北京:科学出版社,2014.11

ISBN 978-7-03-042380-1

I. ①终… II. ①黄… ②祖… III. ①弹药-武器效应 IV. ①TJ41

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第257115号

责任编辑:陈岭啸 顾晋飴 胡 凯/责任校对:钟 洋

责任印制:徐晓晨/封面设计:许 瑞

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>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年11月第一版 开本:787×1092 1/16

2014年11月第一次印刷 印张:22 1/2

字数:534 000

定价:89.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

终点效应是弹药(战斗部)工程专业的必修课程,是一门与工程实际联系紧密的课程,主要研究弹丸与目标的相互作用,涉及如弹塑性动力学、流体力学、爆炸动力学等理论基础知识。近年来,在终点效应研究方面取得了许多重要的研究成果,迫切需要对原有的教材进行补充和更新,以适应对弹丸(战斗部)设计和研究人才的培养需求。本书正是在这一背景下,参考了大量国内外文献,融入了许多最新研究成果编写而成的。

本书系统而全面地叙述了弹丸(战斗部)的终点效应,详细介绍了终点效应的基本概念、基本理论和技术应用等方面的知识。全书共分7章。第1章介绍终点效应的概念、分类、研究方法和特点等。第2章介绍爆炸效应,包括战斗部在空中爆炸、水下爆炸和土石介质中爆炸的效应以及产生的冲击波与目标的相互作用等。第3章介绍破片的杀伤效应,包括破片的质量分布和破片数、破片初速度、破片空间分布、破片的运动规律以及破片与目标的相互作用等。第4章介绍聚能效应,包括聚能现象、聚能射流形成理论、金属射流的侵彻理论和爆炸成型弹丸及其终点效应等。第5章介绍穿甲效应,包括刚性弹丸对半无限靶板的侵彻、刚性弹丸对有限厚靶板的贯穿、侵蚀长杆对靶板的侵彻以及弹丸与靶板的不对称作用等。第6章介绍弹丸(战斗部)对土石介质的侵彻效应,包括对低阻材料的侵彻和对混凝土的侵彻与破坏等。第7章介绍弹丸(战斗部)研制过程中涉及的终点效应试验,包括冲击波参数试验、破片空间分布试验、破碎性(破片质量分布)试验、破片速度分布试验、扇形靶试验、爆破威力试验、极限穿透速度试验和动破甲试验等。

本书在编写过程中注重理论联系实际,既考虑理论体系的完整性和深度,也考虑了工程实际问题,内容阐述由浅入深,并逐步深化。同时对新建立的半经验和经验公式也进行了充分解释,使读者能从书中学习到最新的终点效应方面的知识。

本书在编写过程中得到了有关院所和兄弟院校的支持和帮助,贾鑫、刘蓓蓓、高振宇、宋斌绘制了全书的各种图表,在此深表谢意。中国兵器工业集团导航与控制技术研究所午新民、南京理工大学赵国志审阅了全书,并提出许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。

由于作者的知识结构和水平有限,本书在内容上或编排上可能存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2014年3月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 终点效应的概念	1
1.2 终点效应分类	2
1.2.1 硬毁伤效应	2
1.2.2 软毁伤效应	5
1.2.3 特种毁伤效应	8
1.3 终点效应研究方法和特点	8
1.3.1 试验法	8
1.3.2 分析法	9
1.4 终点效应学的发展	12
第2章 爆炸效应	15
2.1 概述	15
2.2 空气中爆炸	16
2.2.1 空气冲击波	16
2.2.2 空气冲击波的相似性	27
2.2.3 空气冲击波与障碍物的相互作用	35
2.2.4 弹丸(战斗部)在空气中爆炸	45
2.2.5 空气冲击波对目标的破坏作用	50
2.3 水中爆炸	54
2.3.1 水中爆炸的物理现象	54
2.3.2 水中冲击波	57
2.3.3 水中冲击波参数计算	61
2.3.4 水中爆炸的气泡脉动	64
2.3.5 水中冲击波的破坏作用	65
2.4 岩土中爆炸	66
2.4.1 岩土中爆炸的基本现象	66
2.4.2 岩土中的爆炸波及其传播规律	69
2.4.3 岩土中爆炸波的参数计算	71

2.4.4 岩土中爆炸波的作用	73
2.4.5 弹丸(战斗部)在土壤中爆炸	78
第3章 杀伤效应	83
3.1 概述	83
3.2 破片质量分布和破片数	84
3.2.1 Mott 破片质量分布	84
3.2.2 Held 破片质量分布	86
3.2.3 Strømsøe-Ingebrigtsen 破片质量分布	86
3.2.4 其他破片数计算公式	89
3.2.5 预控破片数计算	91
3.3 破片初速	96
3.3.1 Gurney 方程	96
3.3.2 计算破片初速的其他经验公式	101
3.3.3 影响破片初速的因素	102
3.4 破片空间分布	105
3.4.1 破片飞散角	106
3.4.2 破片空间分布规律	108
3.5 破片在空气中的运动规律	111
3.5.1 破片运动方程	111
3.5.2 破片速度衰减特性	116
3.5.3 破片运动规律	118
3.6 破片毁伤准则及其确定	119
3.6.1 毁伤准则	119
3.6.2 人员的杀伤准则	121
3.7 破片对目标的作用	122
3.7.1 破片对目标的贯穿作用	122
3.7.2 破片对油箱的引燃作用	123
3.7.3 破片对弹药的引爆作用	125
3.8 杀伤面积	128
3.8.1 球形靶杀伤面积的定义	128
3.8.2 杀伤破片球面分布密度	131
3.8.3 球形靶杀伤面积的计算	133
3.8.4 扇形靶杀伤面积的计算	134

第4章 聚能效应	136
4.1 概述	136
4.1.1 聚能现象	136
4.1.2 聚能装药专用术语	140
4.2 聚能射流形成理论	140
4.2.1 定常理论	141
4.2.2 PER 准定常理论	146
4.2.3 药型罩压垮一般性理论	149
4.2.4 射流头部的形成	152
4.2.5 射流的凝聚性	153
4.3 金属射流的自由运动	155
4.3.1 运动射流的位置、伸长和半径计算	155
4.3.2 射流颈缩和断裂	157
4.3.3 射流断裂经验模型	161
4.4 金属射流的侵彻理论	165
4.4.1 射流侵彻现象	165
4.4.2 射流侵彻均质靶板理论	166
4.4.3 射流侵彻多层间隔靶和复合靶板理论	174
4.5 爆炸成型弹丸	184
4.5.1 爆炸成型弹丸概念	184
4.5.2 爆炸成型弹丸类型	186
4.5.3 爆炸成型弹丸成型参数计算	188
4.5.4 爆炸成型弹丸侵彻理论	193
4.6 影响聚能效应的因素	194
4.6.1 药型罩	194
4.6.2 隔板	199
4.6.3 装药	203
4.6.4 弹丸(战斗部)结构	209
第5章 穿甲效应	211
5.1 概述	211
5.1.1 穿甲弹丸和靶板	211
5.1.2 穿甲现象	215
5.2 刚性弹丸对半无限靶板的侵彻	217

5.2.1	刚性弹丸在半无限靶板中的侵彻历程	217
5.2.2	刚性杆式弹对半无限靶的侵彻深度计算模型	223
5.2.3	刚性普通穿甲弹对半无限靶的侵彻深度计算模型	230
5.3	刚性普通穿甲弹对有限厚靶板的贯穿	239
5.3.1	刚性尖头弹丸延性贯穿靶板	240
5.3.2	刚性球头弹丸贯穿有限厚靶板	247
5.3.3	刚性钝头弹丸贯穿有限厚靶板	249
5.4	杆式弹对靶板的侵彻	257
5.4.1	刚性杆式弹与侵蚀杆式弹的转换	257
5.4.2	侵蚀杆式弹对半无限靶中的侵彻	261
5.4.3	侵蚀杆式弹对有限厚靶的贯穿	269
5.4.4	杆式弹与靶板的不对称作用	274
第 6 章	对土石介质的侵彻效应	285
6.1	概述	285
6.2	弹丸(战斗部)对岩土材料的侵彻	286
6.2.1	弹丸(战斗部)在介质中的运动方程	286
6.2.2	介质阻力	287
6.2.3	弹丸(战斗部)侵彻深度计算经验公式	291
6.2.4	弹丸(战斗部)质心轨迹的曲率和跳弹分析	296
6.3	弹丸(战斗部)对混凝土的侵彻	298
6.3.1	刚性弹丸(战斗部)对半无限混凝土的侵彻	300
6.3.2	弹丸(战斗部)侵彻混凝土量纲分析	301
6.3.3	弹丸(战斗部)对钢筋混凝土的侵彻	306
6.3.4	弹丸(战斗部)对岩石和混凝土的侵彻深度计算经验公式	307
第 7 章	终点效应试验	312
7.1	概述	312
7.2	爆炸效应试验	312
7.2.1	空气冲击波参数测量	312
7.2.2	爆破威力试验	314
7.3	杀伤效应试验	315
7.3.1	破片质量分布(破碎性)试验	315
7.3.2	破片速度分布试验	318
7.3.3	破片空间分布试验	321

7.3.4 破片密集杀伤半径试验.....	330
7.3.5 杀伤威力综合试验	332
7.4 聚能效应试验.....	335
7.4.1 射流速度分布测量	335
7.4.2 射流侵彻深度与时间曲线和侵彻速度与时间曲线测定.....	341
7.4.3 旋转破甲试验	342
7.4.4 动态威力试验	344
7.5 侵彻效应试验.....	345
7.5.1 穿甲弹丸极限穿透速度的测定	345
7.5.2 弹丸（战斗部）侵彻加速度历程测量	347
主要参考文献	349

第1章 绪 论

1.1 终点效应的概念

弹药或导弹战斗部在其弹道终点（段）处产生的毁伤元对目标造成物理的、化学的毁伤称为终点效应。

弹药通常是指在金属或非金属壳体内装有火药、炸药或其他装填物，能对目标起到毁伤作用或完成其他作战任务的军械物品。现代弹药主要由战斗部、投射部、导引部和稳定部等组成。火炮用弹药的典型战斗部由壳体（弹体）、装填物和引信组成，见图 1-1-1。导弹系统中的战斗部一般由壳体、装填物和传爆序列组成，在火炮弹药和导弹系统中，有关战斗部的界定略有区别。导弹系统中保险装置和引信通常不包含在战斗部中，见图 1-1-2。

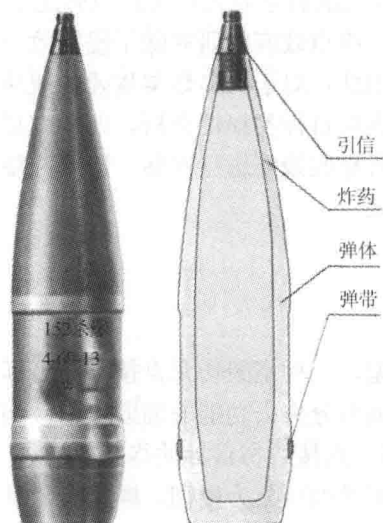


图 1-1-1 152mm 杀爆弹弹丸

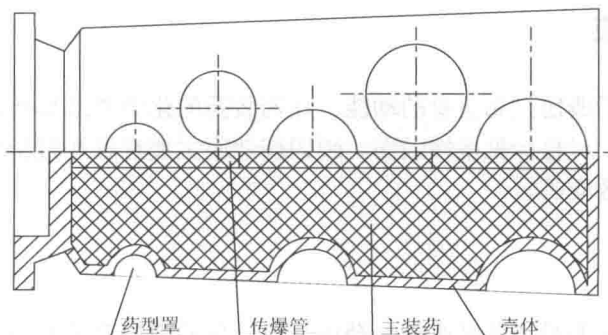


图 1-1-2 罗兰特导弹战斗部的结构示意图

目标是指弹药预计毁伤的对象。战场上预计毁伤的目标种类非常多,如有生力量、坦克、车辆、建筑物、构筑物和其他工程设施,以及各种舰船、潜艇等水上和水下目标,还有各种飞机和导弹等空中目标。战斗部和目标是一对互相对立而又紧密联系的矛盾统一体。不同的目标有着不同的功能及防护特性,必须采用不同的战斗部对其进行毁伤。战斗部对目标的毁伤主要依靠毁伤元,不同战斗部会形成不同的毁伤元。毁伤元指弹药或战斗部通过对目标的高速碰撞或装填物(剂)的自身特性与反应,产生或释放出具有机械、热、声、光、电磁、核、生物等效应的毁伤元素,如实心弹丸、破片、爆炸冲击波、射流、热辐射、核辐射、电磁脉冲、高能粒子束、生物及化学战剂气溶胶等。毁伤元按毁伤方式可分为硬毁伤元、软毁伤元和特种毁伤元。

终点效应主要研究弹丸(战斗部)对目标的作用,研究内容主要包括两方面,一方面是毁伤机理分析,即对各种弹丸或战斗部与目标的相互作用过程进行分析,获取弹丸或战斗部对目标的毁伤机制,揭示其中的毁伤规律。这实质上是从战斗部威力的角度来研究如何毁伤目标。热兵器初期的毁伤元主要是实心弹丸,因此终点效应研究主要集中在弹丸侵彻各种介质(土壤、岩石、装甲等)中的侵彻效应。由于弹丸侵彻过程发生在其飞行弹道的终点处,与此相关的科学研究称为终点弹道学(或终点效应学)。随着对目标毁伤机制研究的不断深入,终点效应的研究除了侵彻效应和爆炸效应外,还包含聚能效应和其他软杀伤效应等。因此,对于大多数常规弹药或战斗部来说,终点效应可以作为毁伤效应的代称。另一方面是目标易损性分析,即研究目标对战斗部作用的敏感性,建立目标的毁伤标准,并对目标的毁伤进行评估。因此,终点效应是弹丸或战斗部设计和目标防护设计的理论基础之一。

1.2 终点效应分类

终点效应有两种基本类型,一种是毁伤元直接摧毁目标,另一种是毁伤元产生有助于使目标在特定时间内全部或部分失去功能的辅助作用(如发射干扰信号、照明或烟幕屏蔽等)。本书主要讨论毁伤元直接毁伤目标的终点效应。

终点效应按弹丸或战斗部类型可分为侵彻、爆炸、穿甲、杀伤、聚能、碎甲、干扰、电磁效应和生化效应等。按毁伤元类型可分为硬毁伤效应、软毁伤效应和特种毁伤效应。

1.2.1 硬毁伤效应

硬毁伤效应是指毁伤元靠自身的动能、炸药装药的化学能或炸药装药的化学能转换成其他物质的动能,对目标机械性毁伤。硬毁伤效应主要有爆炸毁伤效应、破片杀伤效应和穿甲(侵彻)效应等。

1. 爆炸毁伤效应

爆炸毁伤效应主要是指各种高能炸药爆炸时,依靠爆轰产物和冲击波来毁伤目标,

见图 1-2-1。爆炸毁伤效应主要用于爆破战斗部和爆破杀伤战斗部的情况，常用来毁伤各种建筑物（指挥所、雷达站、仓库、桥梁、地下深层工事等）及其人员等。



图 1-2-1 爆炸毁伤效应

2. 破片杀伤效应

破片杀伤效应主要是利用弹丸或战斗部中所装填的炸药爆炸后产生的高速破片来毁伤目标，主要用于杀伤有生力量，破坏武器装备及设备。破片按其形成机理又可分为自然破片、预控破片和预制破片三种，见图 1-2-2。

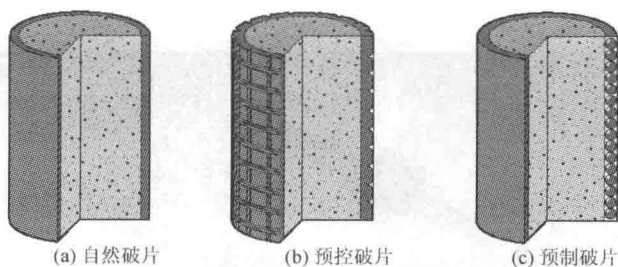


图 1-2-2 破片类型

自然破片是指炸药爆炸时，战斗部壳体破碎形成的破片。自然破片的特点是破片形状不规则，大小不一致，破片速度也不同，见图 1-2-3。但自然破片战斗部结构简单、成本低，常用于杀伤有生力量的杀爆战斗部中。

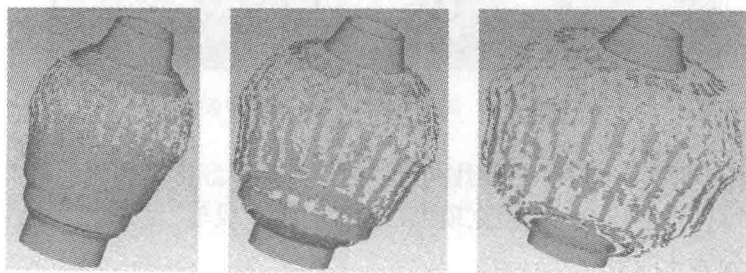


图 1-2-3 自然破片形成过程

预控破片是指事先在战斗部壳体上刻槽,或在装药上刻槽,利用炸药爆炸时壳体上的应力集中效应或装药产生的聚能效应使壳体产生规则的破片,其几何形状、大小基本相同,常用于毁伤武器装备的导弹战斗部中。

预制破片是指把事先制造好的破片以一定的方式置于战斗部壳体中,炸药爆炸时赋予预制破片足够大的动能,用以摧毁敌方武器装备或杀伤有生力量,常用于杀伤战斗部和子母弹战斗部中等。

3. 穿甲(侵彻)效应

穿甲(侵彻)效应是指毁伤元凭借自身的动能撞击目标引起的侵彻和破坏作用。如果目标是装甲和非装甲车辆、飞机、舰船、导弹等有坚硬外壳的武器装备,毁伤元撞击这些目标引起的侵彻和破坏作用通常称为穿甲效应。毁伤元撞击钢筋混凝土工事、地下深层工事、飞机场跑道等引起的侵彻和破坏作用通常称为侵彻效应。依据毁伤元动能获得的途径,穿甲(侵彻)毁伤元可分为动能穿甲弹、爆炸成型弹丸、聚能射流等。

(1)动能穿甲弹按速度大小可分为低速($V_c=300\sim 1000\text{m/s}$)穿甲弹、高速($V_c>1000\sim 2000\text{m/s}$)穿甲弹、超高速($V_c>2000\text{m/s}$)穿甲弹等;按有无装填物可分实心穿甲弹(无装填物)和半穿甲战斗部(有装填物)两种。对付厚装甲目标,如坦克,通常采用实心穿甲弹,如尾翼稳定脱壳杆式穿甲弹,见图 1-2-4;对付地下深层工事通常采用高速或超高速半穿甲弹。

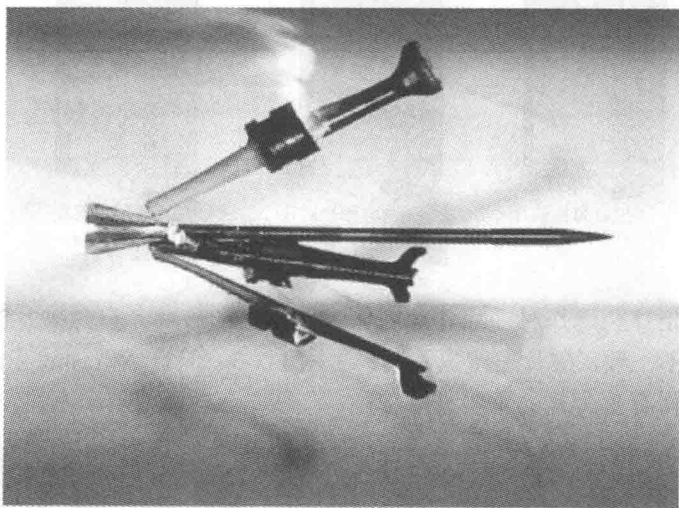


图 1-2-4 尾翼稳定脱壳杆式穿甲弹

(2)爆炸成型弹丸(EFP)是靠炸药爆炸时,药型罩翻转形成的,见图 1-2-5。这种弹丸主要用于对付轻型装甲,如坦克顶甲、侧甲、步兵战车、武装直升机等,常用于末敏子弹、反舰类战斗部中。

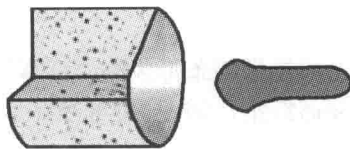


图 1-2-5 爆炸成型弹丸

(3) 聚能射流是炸药爆炸时药型罩压垮形成的, 见图 1-2-6, 主要用于对付厚装甲目标, 如坦克、钢筋混凝土工事等, 常用于破甲类弹药或战斗部中。

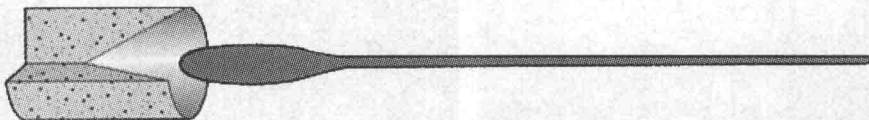


图 1-2-6 聚能射流

1.2.2 软毁伤效应

软毁伤效应是指毁伤元对敌方的各种武器装备、器材不具有直接毁伤作用, 仅对其功能起干扰、削弱、失效、陷于瘫痪等作用。软毁伤效应主要有干扰毁伤效应、诱骗效应和失能效应。

1. 干扰毁伤效应

干扰毁伤效应是指通过有源或无源弹丸产生的各种干扰源, 对敌方的通信、电子设备和光学探测器等起到干扰和毁伤作用。

1) 通信干扰效应

通信干扰效应是指通过弹载通信干扰机发出的电磁波对敌方的通信进行干扰, 使敌方接收机无法正常工作。

2) 电磁脉冲效应

电磁脉冲效应是指利用炸药爆炸产生的强电磁脉冲毁伤敌方的电子装备, 见图 1-2-7。电磁脉冲武器是电子战、网络中心战的“杀手锏”武器。

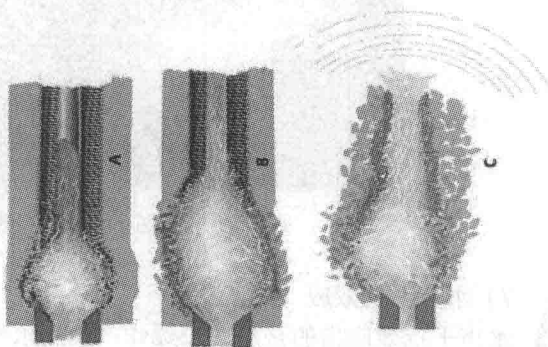
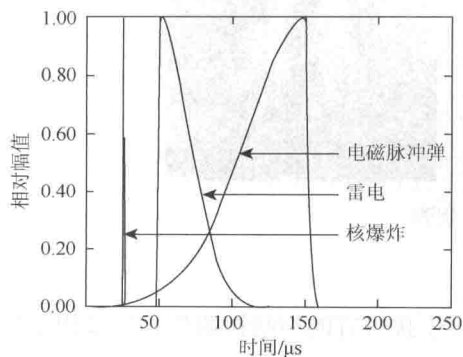


图 1-2-7 电磁脉冲效应

3) 箔条干扰效应

箔条干扰效应是指通过在空中抛撒箔条形成的“云雾”对敌方的雷达探测器进行干扰,常用的箔条有铝条或镀金属碳纤维,如图 1-2-8 所示。

4) 强光毁伤效应

强光毁伤效应是指通过激光发生器产生的强激光或炸药爆炸产生的强光,使敌方的光电探测器致盲,光电器件烧毁,目前还没形成真正装备。图 1-2-9 所示为强光致盲弹。



图 1-2-8 箔条干扰弹

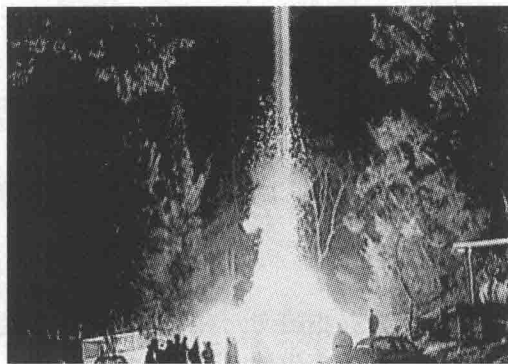


图 1-2-9 强光致盲弹

5) 次声波毁伤效应

次声波毁伤效应是指用次声波发生器产生的次声波对敌方人员实施干扰毁伤作用,常以子弹药形式出现。

6) 烟雾干扰效应

烟雾干扰效应是指利用炸药装药爆炸形成大面积、长时间的烟幕来干扰敌方光电探测器,使敌方光电探测器探测不到己方目标。烟雾干扰效应主要用于炮弹、火箭弹、舰炮炮弹中,见图 1-2-10。



图 1-2-10 烟雾干扰弹

7) 水声干扰效应

水声干扰效应指的是用水下爆炸产生的水声来干扰敌方的声呐探测器,主要用于舰载炮弹和火箭弹中,见图 1-2-11。

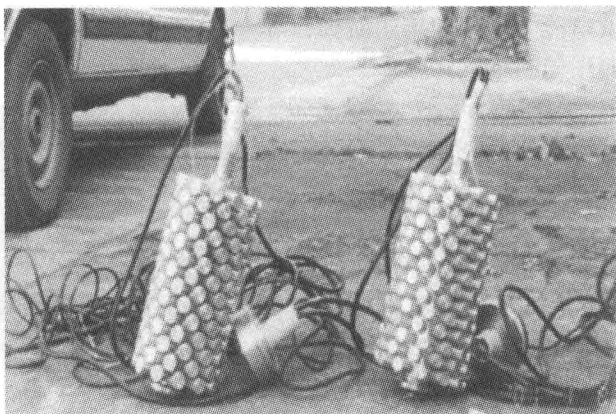


图 1-2-11 水声干扰弹

2. 诱骗效应

诱骗效应是指用欺骗等方式使敌方探测器无法获取信息或获取错误的信息，以假乱真，无法判读真假目标。

1) 红外诱骗效应

红外诱骗效应是指利用装药爆炸时产生的红外线（ $3\sim 5\mu\text{m}$ 或 $8\sim 14\mu\text{m}$ ）诱骗敌方的红外探测器，主要用于机载炮弹、舰载炮弹、榴弹和火箭弹中。

2) 假目标诱骗效应

假目标诱骗效应是指用实物假目标和虚拟假目标（电磁形成的假目标）对敌方探测器实施诱骗，目前常用的是实物假目标，虚拟假目标尚未应用在常规战斗部中。

3. 失能效应

失能效应是指毁伤元使敌方武器装置或设施失去部分或全部功能。

1) 非致命效应

非致命效应是指采用次声、噪声、催泪剂等毁伤元对人员进行无生命危险的毁伤，可用于各种炮弹、枪弹和地雷中。

2) 高效润滑失能效应

高效润滑失能效应是指利用高效润滑剂使飞机跑道上的飞机不能起飞，主要用于炮弹、火箭弹和导弹战斗部中。

3) 高黏结失能效应

高黏结失能效应是指利用布撒在飞机跑道、公路上高黏结剂产生的强大黏结力，使飞机无法起飞，汽车无法开动，主要用于炮弹、火箭弹、航弹和导弹战斗部中等。

4) 高阻燃失能效应

高阻燃失能效应是指将阻燃剂撒在飞机或坦克车辆发动机排气管附近，阻燃剂一旦被吸入排气管道就会使发动机熄灭，主要用于炮弹、火箭弹和导弹战斗部中。

5) 碳纤维失能效应

碳纤维失能效应是指将碳纤维搭在高压电网的电线上，造成短路，烧毁供输电设

备,使输电网失去供电能力,主要用于航弹、导弹战斗部、单兵武器弹药中。图 1-2-12 所示为碳纤维失能毁伤元。

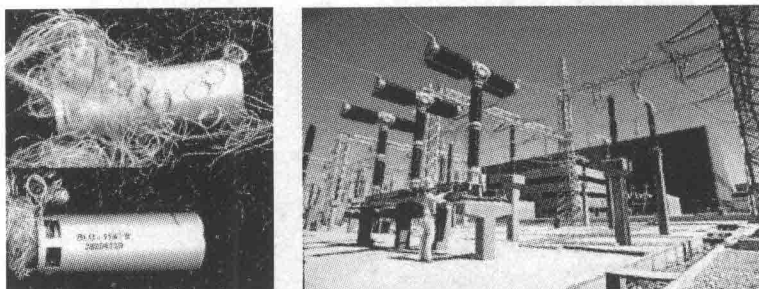


图 1-2-12 碳纤维失能毁伤元

1.2.3 特种毁伤效应

特种毁伤效应是指具有特种功能的毁伤效应,如燃烧效应、攻心效应和生化效应。

1) 燃烧效应

燃烧效应是指毁伤元(如铅、稀土合金等)对目标的引燃作用,主要用于引燃敌方的仓库、武器装备等,常用于榴弹或作为随进元素在目标内部起燃烧作用。

2) 攻心效应

攻心效应是指在敌战区布撒各种宣传品,对敌方人员实施心理战,瓦解敌方人员意志,常用于炮弹、火箭弹和航弹中。

3) 生化效应

生化效应是指通过昆虫或其他化学战剂毁伤敌方武器装备或仪器,目前还处于探索研究阶段。

1.3 终点效应研究方法和特点

终点效应研究方法可分为试验法和分析法两种。这里所谓的分析法较为广义,是指非实体试验,是包括定性和定量分析在内的研究方法的总和。

1.3.1 试验法

和所有工程学科一样,终点效应研究必须基于试验研究。通过试验观察与记录现象,探索现象发生的机理,寻找控制这些现象的主要参数,提取其内在规律;通过试验,验证分析研究结果以及检测战斗部性能。因此,试验法是终点研究中最基本、最重要的方法。对侵彻效应研究的最早认识都来自试验,而且理论分析方法中用到的许多参数值也来自试验。许多侵彻效应研究中所用的经验公式也是从大量的试验数据中总结出来的。例如,美国桑地亚国家实验室 1960 年在开发钻地武器技术中,进行了约 3000 次试验,与美国陆军工程兵水道试验站(WES)共同建立了战斗部在土石介质中的侵彻深度公式