



工业和信息化部“十二五”规划专著

聚能装药 理论与实践

THEORY AND PRACTICE OF
SHAPED CHARGE

黄正祥 编著

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



工业和信息化部“十二五”规划专著

聚能装药 理论与实践

THEORY AND PRACTICE OF
SHAPED CHARGE

黄正祥 编著

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

内 容 简 介

本书是国内聚能装药领域的第一本专著。书中系统而全面地阐述了聚能装药的基本概念、基本理论、结构设计、技术应用以及数值模拟等方面的知识,包括聚能射流形成理论、聚能射流侵彻理论、聚能射流与复合靶板相互作用机理、聚能装药战斗部设计、爆炸成型弹丸、串联聚能装药战斗部设计、聚能装药加工和装配以及聚能装药数值仿真等,为读者提供了大量公式、参数和图表。

本书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参考,也可供航空航天、石油、冶金、制造等行业中涉及聚能装药应用的科技人员参考,还可以作为理工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专研的指导资料。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

聚能装药理论与实践 / 黄正祥编著. —北京:北京理工大学出版社, 2014. 12

工业和信息化部“十二五”规划专著

ISBN 978-7-5640-9713-4

I. ①聚… II. ①黄… III. ①弹药-装药 IV. ①TJ410.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第208002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)

82562903 (教材售后服务热线)

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 / 25.5

字 数 / 482千字

版 次 / 2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷

定 价 / 78.00元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

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

序

聚能装药技术是高效毁伤战斗部中常用的技术之一。由于聚能装药的毁伤能力不受发射平台和发射能力的限制,聚能装药技术在军事上应用最为广泛,目前已应用于枪榴弹、迫弹、榴弹、单兵火箭弹、末敏弹、巡航导弹(包括空射、舰射、潜射和陆射等)、机载航空弹药、精确制导炸弹和航空布撒器等武器系统中。

我国自20世纪60年代开始对聚能装药进行了系统研究,目前活跃着一大批从事聚能装药技术研究的科技人员。他们在不同技术方向为促进聚能装药在我国军事技术、科学研究和经济建设中的发展与应用做出了巨大的贡献,也使得聚能装药技术成为我国能够与军事先进国家相媲美的战斗部技术之一。尽管我国在聚能装药技术领域取得了令人瞩目的成就,但与国外相比,国内在聚能装药方面的研究还不够系统,规律差,有些方面还存在重复研究和炒作概念等现象。因此,国内迫切需要一部能够为科研、设计、生产和教学提供帮助的聚能装药专业性书籍。

黄正祥教授从事聚能装药技术研究二十余年,在聚能装药技术研究和开发应用方面积累了丰富的实践经验。为了填补国内在聚能装药技术领域专业性著作的缺失,并为国内相关科技人员提供参考,黄正祥教授查阅了大量文献资料,并结合自己多年来在聚能装药技术领域取得的成果,编著了这本《聚能装药理论与实践》。该书系统介绍了聚能装药的基本概念、基本原理、结构类型,聚能侵彻体形成理论和运动特性,侵彻体与目标的相互作用,精密聚能装药技术和数值仿真等方面内容,涵盖了国内外聚能装药的传统问题和技术前沿,尤其对一些当今研究热点,如聚能侵彻体作用下靶板的动态响应、反应装甲和复合装甲抗射流侵彻机制、串联战斗部技术等方面具有独到见解。除此之外,书中包含了大量的实例和数据,不

仅为科技工作者提供理论指导，也为他们解决聚能装药实际问题提供了帮助。可以说，《聚能装药理论与实践》一书是黄正祥教授多年来对聚能装药技术探索、思考及实践的总结，为推动我国聚能装药技术的发展具有重要意义。

总装备部炮兵防空兵装备技术研究所 沈晓军

前言

聚能装药经过 100 多年的发展,已经在军用和民用领域得到了广泛应用,逐步形成了反坦克、反轻型装甲、反舰船、反硬目标聚能装药技术,石油射孔弹技术,聚能切割技术,爆炸焊接技术,冶金除堵技术,空间分离技术以及破拆、破障聚能装药技术等,并且各个技术领域都有一支从事聚能装药研究、设计和生产的队伍。但是,迄今为止,国内还没有一本可供科研、设计、生产和教学人员参考的聚能装药技术专著。

本书系统而全面地阐述了聚能装药的基本概念、基本理论、结构设计、技术应用以及数值模拟等方面的知识。全书共分 9 章。第 1 章介绍了聚能装药概念和常用术语、聚能装药的发展历史以及聚能装药在军用和民用领域的典型应用。第 2 章介绍了药型罩压垮理论模型、射流的运动特性和断裂模型。第 3 章介绍了射流侵彻均质靶板理论、多层间隔靶板和多层复合靶板理论以及与射流侵彻相关的一些问题。第 4 章介绍了聚能射流与爆炸反应装甲、被动反应装甲和复合装甲三种典型附加装甲相互作用的机理。第 5 章介绍了两种聚能装药战斗部威力设计方法,详细给出了药型罩结构、装药结构和隔板的设计方法以及聚能装药战斗部设计时需要注意的其他问题。第 6 章介绍了爆炸成型弹丸的成型理论和侵彻理论,详细介绍了爆炸成型弹丸装药结构设计。第 7 章介绍了反爆炸反应装甲串联战斗部、串联聚能装药战斗部和串联随进战斗部三种常用串联战斗部的设计方法。第 8 章介绍了药型罩精密加工技术、精密装药技术和装配技术等。第 9 章介绍了聚能装药数值模拟中常用的数值软件以及状态方程和本构模型,并给出了一些典型算例。

参加本书编写的还有陈惠武高工、祖旭东博士、肖强强博士、贾鑫博士、姬龙博士。另外,国营九二五厂陶从高高工为第 8 章的编写提供了许多有价值的素材。贾鑫博士、刘蓓蓓硕士、高振宇硕士、宋斌硕士绘制了全书各种图表。另外,本书在编写过程中得到了有关厂所和兄弟院

校的支持和帮助。总装炮兵防空兵装备技术研究所沈晓军高工、南京理工大学徐学华教授审阅了本书，并提出了许多宝贵意见，对此表示诚挚的感谢。

由于作者的知识结构和水平有限，本书无论在内容上还是编排上肯定会有很多不足之处，希望广大读者批评指正。

编著者

目 录

CONTENTS

第 1 章 聚能装药发展与应用	1
1.1 概述	1
1.1.1 聚能现象	1
1.1.2 聚能装药专用术语	4
1.2 聚能装药的发展过程	5
1.3 聚能装药应用	13
1.3.1 军事应用	13
1.3.2 民用	15
参考文献	18
第 2 章 聚能射流形成理论	19
2.1 概述	19
2.2 射流形成理论	20
2.2.1 药型罩压垮理论	20
2.2.2 射流运动和伸长	35
2.3 射流断裂模型	40
2.3.1 实验测定断裂时间的方法	40
2.3.2 断裂时间经验模型	45
2.3.3 WS 射流断裂时间理论模型	51
参考文献	59
第 3 章 聚能射流侵彻理论	65
3.1 射流侵彻现象	65
3.2 射流侵彻均质靶板理论	66
3.2.1 一维流体动力学侵彻理论模型	67

3.2.2	准静态流体动力学侵彻理论	69
3.2.3	其他侵彻模型	75
3.3	射流侵彻多层间隔靶板和多层复合靶板理论	79
3.3.1	射流侵彻间隔靶板理论	79
3.3.2	射流侵彻复合靶板理论模型	85
3.4	与侵彻相关的几个问题	88
3.4.1	虚拟原点	88
3.4.2	可压缩性效应	94
3.4.3	侵彻终止	99
	参考文献	105
第4章	聚能射流与复合靶板相互作用机理	108
4.1	概述	108
4.1.1	爆炸反应装甲	108
4.1.2	复合装甲	110
4.1.3	被动反应装甲	111
4.2	聚能射流与爆炸反应装甲相互作用	112
4.3	聚能射流与陶瓷复合装甲相互作用	117
4.3.1	陶瓷复合装甲干扰射流机理	117
4.3.2	射流侵彻多层钛钢玉陶瓷靶板实验研究	118
4.3.3	射流侵彻陶瓷复合装甲实验研究	121
4.3.4	射流侵彻陶瓷工程模型	124
4.4	聚能射流与被动反应装甲相互作用	127
4.4.1	简介	127
4.4.2	射流与橡胶复合靶板相互作用理论模型	129
4.4.3	射流与橡胶复合靶板相互作用计算	140
4.4.4	橡胶复合靶板抗射流侵彻性能实验研究	151
4.5	射流与织物纤维增强橡胶复合靶板相互作用	156
4.5.1	射流与织物纤维增强橡胶复合靶板相互作用理论模型	156
4.5.2	聚能射流与织物纤维增强橡胶复合靶板相互作用实验研究	168
	参考文献	174
第5章	聚能装药战斗部设计	178
5.1	概述	178

5.1.1	威力设计	178
5.1.2	战斗部结构设计	179
5.2	聚能装药战斗部战术技术指标及考核方法	179
5.2.1	均质靶板	180
5.2.2	模拟复合靶板	181
5.2.3	间隔靶板	182
5.3	聚能装药战斗部威力设计	183
5.3.1	静态侵彻威力指标的确定	183
5.3.2	静态威力初步估算	185
5.3.3	聚能装药结构设计	187
5.3.4	聚能装药威力工程计算	205
5.4	聚能装药战斗部设计时需要注意的其他问题	211
5.4.1	聚能装药战斗部炸高设计	211
5.4.2	聚能装药战斗部发射安全性	216
5.4.3	战斗部壳体	216
5.4.4	聚能装药成型空间	217
5.4.5	聚能装药战斗部起爆方式	219
5.5	聚能装药战斗部模拟设计	222
5.5.1	相似定理	223
5.5.2	模拟设计	223
5.5.3	模拟实验	236
	参考文献	242
第 6 章	爆炸成型弹丸 (EFP)	244
6.1	概述	244
6.1.1	爆炸成型弹丸类型	247
6.1.2	爆炸成型弹丸应用	248
6.2	爆炸成型弹丸 (EFP) 成型参数计算	250
6.2.1	形成 EFP 的必要条件	250
6.2.2	EFP 参数计算	252
6.3	爆炸成型弹丸侵彻理论	254
6.3.1	Allen-Rogers 侵彻模型	255
6.3.2	Alekseevskii-Tate 侵彻模型	260
6.4	EFP 装药结构设计	263

6.4.1	药型罩的材料选择	263
6.4.2	药型罩结构形状	264
6.4.3	装药结构	268
6.4.4	EFP 飞行稳定性和速度衰减	277
6.5	EFP 模拟设计	281
6.5.1	EFP 成型过程的相似参数	281
6.5.2	EFP 几何相似律	282
6.5.3	EFP 模拟实验	283
	参考文献	285
第7章	串联聚能装药战斗部设计	288
7.1	概述	288
7.1.1	反爆炸反应装甲串联战斗部发展	288
7.1.2	多级串联聚能装药战斗部发展	291
7.1.3	串联随进战斗部发展	293
7.2	反爆炸反应装甲串联战斗部设计	295
7.2.1	爆炸反应装甲作用场	296
7.2.2	破—破式串联战斗部设计	310
7.3	两级串联聚能装药战斗部设计	321
7.3.1	逆序起爆串联结构参数设计	322
7.3.2	截流装置设计	327
7.3.3	两级传爆和射流通道的通道设计	330
7.4	串联随进战斗部设计	334
7.4.1	总体结构和参数设计	334
7.4.2	前级聚能装药设计	336
7.4.3	随进战斗部设计	346
7.4.4	前级爆轰场对后级的影响	348
	参考文献	351
第8章	聚能装药加工和装配	354
8.1	概述	354
8.2	药型罩加工技术	356
8.2.1	药型罩原材料和加工精度等级	356
8.2.2	药型罩加工方法和工艺	357

8.3 装药技术	362
8.3.1 注装法	363
8.3.2 压装法	368
8.4 装配技术	371
8.4.1 用塑料衬套充填的装药装配	371
8.4.2 用硅橡胶或类似充填物充填的装药装配	373
参考文献	374
第9章 聚能装药数值仿真	375
9.1 概述	375
9.2 常用状态方程和本构模型	376
9.2.1 状态方程	376
9.2.2 本构模型	382
9.3 聚能射流成形和侵彻过程数值仿真	387
9.3.1 聚能射流的成形和拉伸过程	388
9.3.2 聚能射流对靶板的侵彻过程	388
9.4 爆炸成型弹丸成型和侵彻过程数值仿真	390
9.4.1 爆炸成型弹丸成型过程数值模拟	391
9.4.2 爆炸成型弹丸侵彻靶板过程数值模拟	391
9.5 聚能射流与爆炸反应装甲相互作用	392
9.5.1 射流与单层爆炸反应装甲相互作用	392
9.5.2 射流与双层楔形爆炸反应装甲相互作用	394
参考文献	395

第 1 章 聚能装药发展与应用

1.1 概 述

1.1.1 聚能现象

1.1.1.1 聚能装药概念

由凝聚态炸药炸轰过程可知，圆柱形装药爆炸后，高温高压下的爆炸产物基本是沿炸药表面的法线方向向外飞散（图 1-1）。圆柱形装药作用在靶板上的压力等于爆炸产物的压力，随着爆炸产物的飞散，作用在板上的压力不断衰减，靶板上形成了一个浅坑，如图 1-2（a）所示。如果圆柱形装药一端有空穴，另一端起爆后将在空穴对称轴上汇聚一股速度和密度都很大的气流，这种能量集中的效应称为空穴效应或聚能效应。聚能效应会在目标局部造成强烈的破坏，因而有空穴的圆柱形装药在金属靶板上的成坑比没有空穴的要深，如图 1-2（b）所示。通常把一端有空穴，另一端有起爆装置的装药称为成型装药（Shaped Charge）、空心装药（Cavity Charge）或聚能装药等。

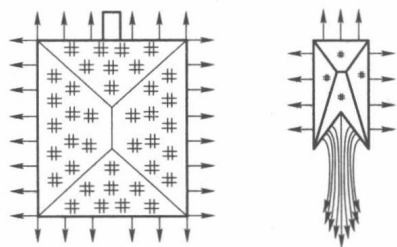


图 1-1 爆轰产物飞散方向

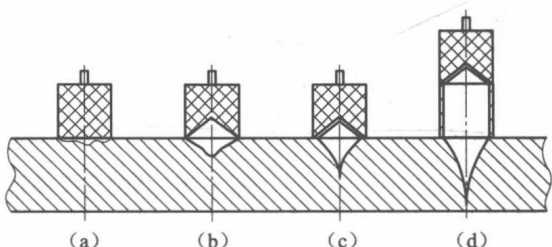


图 1-2 聚能效应

1.1.1.2 聚能射流

如果在聚能装药的空穴内表面衬以一层薄的金属、玻璃、陶瓷或其他材料作为内衬，这种内衬称为药型罩。聚能装药起爆后，起爆点处的爆炸波以极快的速度（约 8 000 m/s）在炸药内部传播，当爆轰波到达药型罩后，药型罩在爆轰压力（压力峰值达到 200 GPa，平均压力大约 20 GPa）作用下被压垮，以 2 000~3 000 m/s 的速度向药型罩对称轴闭合。被压垮的药型罩在极短的时间间隔内变形非常大，应变率达到 $10^4 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$ ，最大应变超过 10。药型罩在轴线上闭合后，产生一个高温（接近 1 000 °C）高速（5 000~10 000 m/s）的细长流，称为射流，或称聚能侵彻体；跟随在射流之后，速

度很慢的部分（500~1 000 m/s）称为杵体，如图 1-3 所示。图中序号表示药型罩上的不同位置所对应的射流和杵体的位置。从图中可以看出，杵体上的位置排列顺序与药型罩上的位置排列顺序一致，而射流上的位置排列顺序则与药型罩上的相反。因此，某一位置处的药型罩材料的一部分（内表面）会形成射流，另一部分（外表面）将形成杵体。

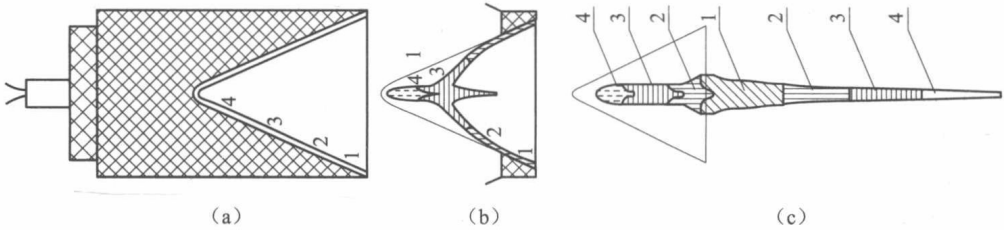


图 1-3 射流和杵体的形成过程

图 1-4 为 X 光摄影系统拍摄到的药型罩在不同时刻的压垮照片。从照片中可以清楚地观察到药型罩在爆轰产物作用下形成射流和杵体的过程。

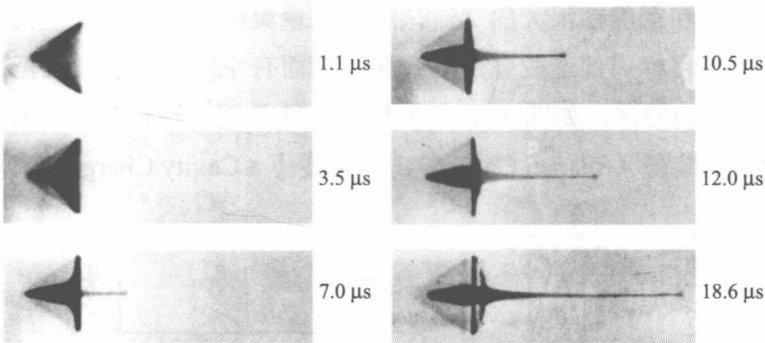


图 1-4 药型罩压垮过程的 X 光照片

射流的温度和能量很高，金相分析显示，铜射流温度为 800℃~1 000℃，但还未达到铜的熔点 1 083℃。当能量很高的射流撞击到金属靶板时，金属靶板中将产生很高的压力（峰值压力为 100~200 GPa，平均压力为 10~20 GPa），同时，靶板的应变率也非常高，达到 $10^6\sim10^7\text{ s}^{-1}$ ，平均应变为 0.1~0.5。靶板中的温度大约是其熔化温度的 20%~50%。射流和靶板相互作用会在靶板上形成一个坑，成坑的深度远大于无药型罩的聚能装药，如图 1-2（c）所示。射流与金属靶板相互作用的过程称为破甲过程。若适当控制药型罩口部到靶板表面的距离，射流得以充分拉长，射流在靶板上的成坑深度将更深，如图 1-2（d）所示。

射流和杵体的参数可以根据 Evans（1950）^[1] 给出的经验公式来估算。对于铜锥形药型罩，大约 20% 的药型罩材料形成射流，射流直径约为药型罩直径的 1/20，射流头部

速度与所用炸药的爆速相当，射流速度从头到尾逐渐降低，近似线性分布，尾部速度大约为炸药爆速的 1/4。杵体速度大约为射流头部速度的 1/10。由于射流头部速度和尾部速度相差较大，存在速度梯度，再加上射流塑性能力的限制，伸长到一定程度后就出现颈缩和断裂。与静态拉伸不同的是，射流速度高、惯性大，会在各处断裂，而且相互无影响，如图 1-5 所示。另外，如果聚能装药对称性不好，射流在运动过程中也会产生分散现象，射流拉伸时间越长，分散现象越明显。



图 1-5 射流断裂过程 X 光照片（起爆后 116 μs ）

1.1.1.3 药型罩

药型罩可以是任何形状。可以是简单的几何形状（如半球形、锥形等），也可以是复杂的几何形状（如双锥形、喇叭形和钟形等），还可以是各种组合形状（如锥形和球形组合等）。但最基本的药型罩形状有两种，即锥形和半球形，如图 1-6 所示。

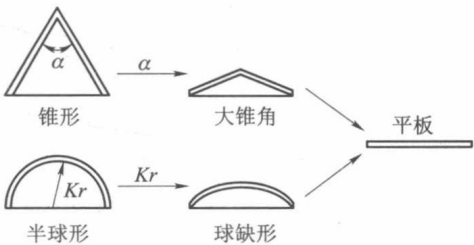


图 1-6 药型罩基本形状

锥形药型罩锥角为 $40^\circ \sim 60^\circ$ 。随着锥角增加，药型罩的闭合方式会发生变化。Held 给出了不同锥角药型罩闭合过程的 X 光照片^[2]，如图 1-7 所示。当药型罩锥角大于 150° 时，这种药型罩称为大锥角罩，如图 1-6 所示。大锥角罩在爆轰产物作用下将不再压垮，而是翻转形成了射流和杵体合一的自锻弹丸，也称爆炸成型弹丸（EFP），如图 1-8 所示。

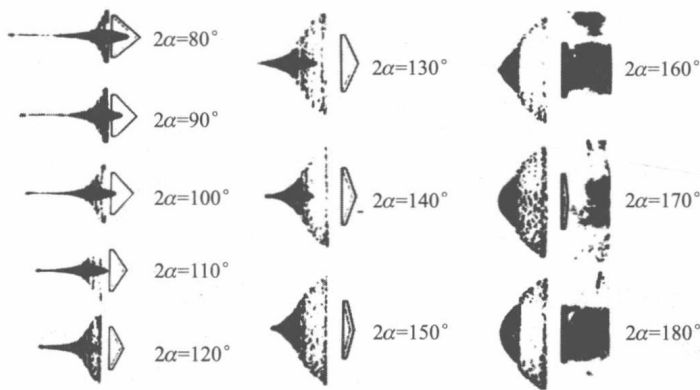


图 1-7 不同锥角药型罩闭合过程

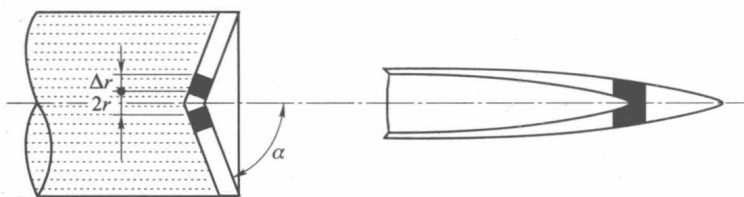


图 1-8 大锥角药型罩闭合过程

半球形药型罩形成射流的过程与锥形药型罩的并不相同。锥形药型罩形成射流的过程是，药型罩材料在轴线上碰撞，药型罩内表面形成射流，外表面形成杵体，射流是“挤”出来的。而半球形药型罩在爆轰产物作用下内表面外翻形成射流，射流质量很大，无杵，速度为 2~6 km/s。半球形药型罩形成射流的过程如图 1-9 所示。

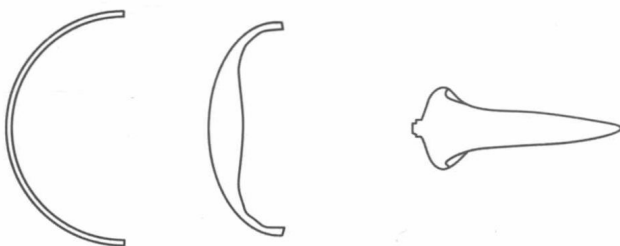


图 1-9 半球形药型罩形成射流的过程

随着半球形药型罩曲率半径 Kr 的增加，药型罩逐渐变为球缺形，如图 1-6 所示。球缺形药型罩在爆轰产物的作用下将翻转成一个密实的 EFP，如图 1-10 所示。因此，大锥角和球缺形两种药型罩都会形成 EFP。

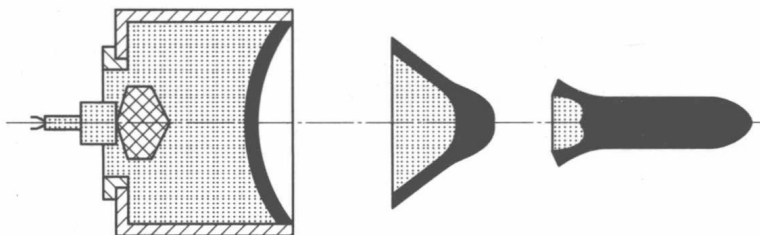


图 1-10 球缺形药型罩闭合过程

另外，药型罩的壁厚和材料是半球形药型罩的重要参数，调整这两个参数会改变射流形态和性能。例如，如果半球形药型罩壁厚变薄，形成的侵彻体形态就很像射流，如图 1-11 所示。

1.1.2 聚能装药专用术语

在军事应用领域，聚能装药有自己特有的术语，下面以锥形聚能装药（药型罩嵌入装药内）为例进行说明，如图 1-12 所示。图中，爆炸序列由雷管、传爆药和高能炸

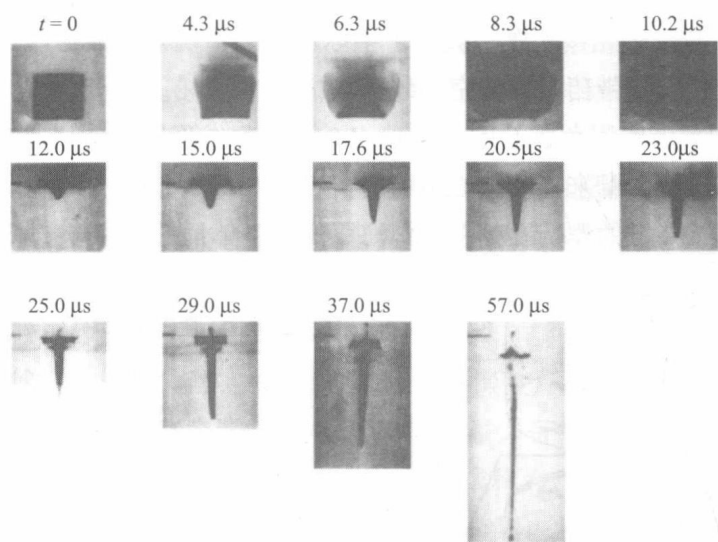


图 1-11 薄壁半球形药型罩压垮 X 光照片^[2]

药组成。LD 为药型罩外径，CD 为装药直径（不要与药型罩直径混淆），药型罩外径 LD 小于 CD，药型罩为次口径。聚能装药外部一般都有壳体，壳体外径 WD 称为战斗部直径，药型罩顶点到隔板之间的距离称为罩顶高。聚能装药总长称为装药高度，药型罩底部到靶板之间的距离称为炸高。射流侵彻深度达到最大值时的炸高称为最佳炸高或有利炸高。国外通常把炸高定义为从虚拟原点到靶板表面的距离，虚拟原点为假想的聚能射流起始点（后续章节会进行介绍）。

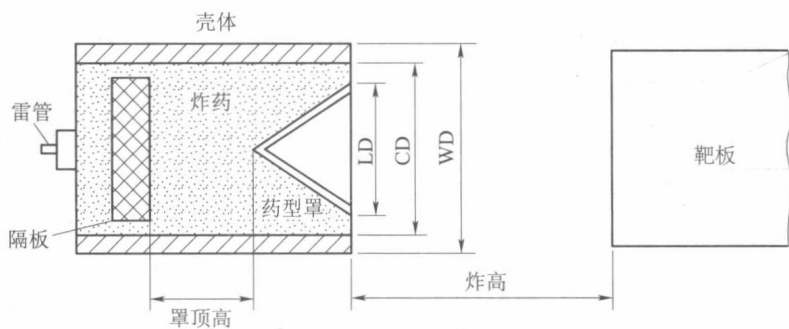


图 1-12 锥形聚能装药示意图

1.2 聚能装药的发展过程^[3]

Franz von Baader 早在 1792 年就开始使用空心装药一词。那时他主要关注的是空心装药爆炸产生的能量。但他在实验中用的是黑火药，不能形成爆轰，因此，聚能装药的历史应该从 1867 年 Alfred Nobel 发明炸药之后开始。

1883 年，Foerster 最先证明了高能炸药的空穴效应。德国杜塞尔多夫市的 G. Bloem