

Multiple Explosively Formed Projectile Warhead Technology

多爆炸成型弹丸 战斗部技术

尹建平 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

多爆炸成型弹丸 战斗部技术

**Multiple Explosively Formed
Projectile Warhead Technology**

尹建平 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

多爆炸成型弹丸战斗部技术/尹建平著. —北京: 国防工业出版社, 2012.9

ISBN 978-7-118-08491-7

I. ①多... II. ①尹... III. ①弹丸—战斗部
IV. ①TJ410.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 281540 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 12½ 字数 200 千字

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

弹药是武器系统中执行预定作战任务的战斗载荷,是武器系统终端作战效能的最终体现。长期以来,世界各国在发展武器系统时,总是优先考虑从弹药上寻求突破,因为更换一种弹药比更换一种武器系统在技术上要容易得多,而且具有更高的效费比。

未来战争中,地面集群装甲目标和空中武装直升飞机都是主要的突击力量,能否阻碍并有效地摧毁它们成为了影响战争格局的重要因素。传统采用单一的爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile, EFP)战斗部进行点对点攻击,无法形成一个攻击区域,不能对付防护和生存能力日益加强的各类集群装甲目标,无法满足现代战争的需要。而采用多爆炸成型弹丸(Multiple Explosively Formed Projectile, MEFP)战斗部,可以通过形成的MEFP弹幕近距离拦截和引爆来袭导弹、大密度地攻击集群坦克和武装直升飞机,对目标造成大面积的毁伤,有效地提高了武器系统的毁伤效能。因此,近年来国内外学者着力开展了MEFP战斗部技术的应用研究。本书基于这一研究背景,对当前多爆炸成型弹丸战斗部技术的一些研究成果进行了总结论述,使相关的科研人员能够尽快了解技术的进展,以起到抛砖引玉的作用。

全书共分10章,第1章介绍了当前爆炸成型弹丸的成型模式、影响成型性能的主要因素和爆炸成型弹丸战斗部技术的应用与发展趋势。第2章介绍了多爆炸成型弹丸战斗部技术的研究现状、结构特点、应用领域和发展趋势。第3章到第10章分别对轴向变形罩式、轴向组合式、周向组合式、网栅切割式、多层串联式、刻槽半预制式、周向线性式、多用途组合式等八种多爆炸成型弹丸战斗部结构进行了数值模拟研究,阐述了各类型MEFP战斗部的结构特点和作用原理,初步分析了影响MEFP战斗部成型

过程和毁伤效能的因素,为 MEFP 战斗部技术的研究提供了一些参考。

本书是在以往及目前所做研究工作的基础上编写而成的,王志军教授、吴国东副教授等对本书的研究内容给予了悉心指导,在此对他们的关怀和帮助表示衷心的感谢。研究生陈超、周栋、李宝峰、付璐、姚志华、张洪成、孙华、臧立伟、董方栋、李东伟等参加了本书相关内容的研究,并在数值模拟工作方面给予了帮助。此外本书的内容参考了一些国内外专家、学者的文献,在此一并表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,尽管倾注了极大的精力和努力,但书中的疏漏和不足之处恐在所难免,恳请各位专家和读者予以批评指正,不胜感谢。

尹建平
2012 年 9 月

目 录

第 1 章 爆炸成型弹丸战斗部技术	1
1.1 EFP 成型模式	4
1.1.1 向后翻转型	4
1.1.2 向前压拢型	4
1.1.3 压垮型	5
1.2 影响 EFP 形成性能的主要因素	6
1.2.1 药型罩形状	6
1.2.2 药型罩材料	7
1.2.3 药型罩厚度	8
1.2.4 装药长径比	9
1.2.5 起爆方式	10
1.3 EFP 计算机模拟	12
1.4 EFP 的应用和发展趋势	13
第 2 章 多爆炸成型弹丸战斗部技术	19
2.1 轴向变形罩式 MEFP 战斗部	21
2.2 轴向组合式 MEFP 战斗部	23
2.3 周向组合式 MEFP 战斗部	24
2.4 网栅切割式 MEFP 战斗部	27
2.5 多层串联式 MEFP 战斗部	29
2.6 刻槽半预制式 MEFP 战斗部	30
2.7 多用途组合式 MEFP 战斗部	31
2.8 MEFP 的应用和发展趋势	32

第3章 轴向变形罩式 MEFP 战斗部技术	36
3.1 战斗部结构	36
3.2 成型数值模拟	37
3.2.1 有限元数值模拟方法	37
3.2.2 材料本构模型和状态方程	39
3.2.3 常用材料的性能参数	41
3.2.4 三罩式轴向变形罩式 MEFP 战斗部成型数值模拟	42
3.3 影响 MEFP 战斗部成型因素分析	44
3.3.1 起爆方式对 MEFP 战斗部成型的影响	45
3.3.2 相邻药型罩间距对 MEFP 战斗部成型的影响	48
3.3.3 药型罩锥角对 MEFP 战斗部成型的影响	49
3.3.4 药型罩壁厚对 MEFP 战斗部成型的影响	50
3.3.5 装药高度对 MEFP 战斗部成型的影响	51
3.3.6 装药直径对 MEFP 战斗部成型的影响	52
3.4 MEFP 战斗部技术在智能雷武器系统中的应用	53
3.4.1 MEFP 智能雷武器系统	53
3.4.2 MEFP 智能雷飞行动力学模型	57
3.4.3 MEFP 智能雷战斗部毁伤模型	75
3.4.4 MEFP 智能雷对装甲目标毁伤数值仿真	80
3.4.5 影响 MEFP 智能雷毁伤概率因素分析	85
第4章 轴向组合式 MEFP 战斗部技术	93
4.1 战斗部结构	93
4.2 成型数值模拟	94
4.3 影响 MEFP 战斗部成型因素分析	96
4.3.1 相邻子装药间距对 MEFP 战斗部成型的影响	96
4.3.2 不同装药对 MEFP 战斗部成型的影响	98
4.3.3 不同曲率半径对 MEFP 战斗部成型的影响	99
第5章 周向组合式 MEFP 战斗部技术	102
5.1 战斗部结构	102

5.2	成型数值模拟	103
5.3	影响 MEFP 战斗部成型因素分析	105
5.3.1	药型罩曲率半径对 MEFP 战斗部成型的影响	105
5.3.2	药型罩壁厚对 MEFP 战斗部成型的影响	106
5.3.3	药型罩口径对 MEFP 战斗部成型的影响	107
第 6 章	网栅切割式 MEFP 战斗部技术	110
6.1	十字形网栅切割式 MEFP 战斗部技术	111
6.1.1	战斗部结构	111
6.1.2	成型数值模拟	111
6.1.3	影响网栅切割式 MEFP 战斗部成型因素分析	114
6.2	中心圆环形网栅切割式 MEFP 战斗部技术	117
6.2.1	战斗部结构	117
6.2.2	成型数值模拟	118
6.3	中心星形线形网栅切割式 MEFP 战斗部技术	119
6.3.1	战斗部结构	119
6.3.2	成型数值模拟	120
6.4	井字形网栅切割式 MEFP 战斗部技术	122
6.4.1	战斗部结构	122
6.4.2	成型数值模拟	122
第 7 章	多层串联式 MEFP 战斗部技术	125
7.1	战斗部结构	125
7.2	成型数值模拟	126
7.3	影响 MEFP 战斗部成型因素分析	128
7.3.1	药型罩曲率半径对 MEFP 战斗部成型的影响	128
7.3.2	药型罩壁厚比对 MEFP 战斗部成型的影响	130
7.3.3	药型罩材料对 MEFP 战斗部成型的影响	133
第 8 章	刻槽半预制式 MEFP 战斗部技术	136
8.1	战斗部结构	137
8.2	刻槽药型罩断裂机理	137

8.2.1	刻槽尖端裂纹扩展的位错模型	138
8.2.2	最大剪应力线及其方向	140
8.3	成型数值模拟	141
第9章	周向线性式 MEFP 战斗部技术	145
9.1	战斗部结构	146
9.2	成型机理	147
9.2.1	翻转模型	147
9.2.2	翻转速度	149
9.3	成型数值模拟	151
9.4	影响 MEFP 战斗部成型因素分析	154
9.4.1	药型罩壁厚对 MEFP 战斗部成型的影响	154
9.4.2	药型罩曲率半径对 MEFP 战斗部成型的影响	158
9.4.3	装药长径比对 MEFP 战斗部成型的影响	162
9.5	周向线性式 MEFP 战斗部优化设计	165
9.5.1	优化方案	165
9.5.2	优化结果	166
第十章	多用途组合式 MEFP 战斗部技术	172
10.1	战斗部结构	172
10.2	成型数值模拟	173
10.3	影响 MEFP 战斗部成型因素分析	176
10.3.1	装药对 MEFP 战斗部成型的影响	176
10.3.2	药型罩壁厚对 MEFP 战斗部成型的影响	177
10.3.3	药型罩曲率半径对 MEFP 战斗部成型的影响	180
10.3.4	环形辅药型罩数量对 MEFP 战斗部成型的影响	183
参考文献		186

第 1 章 爆炸成型弹丸战斗部技术

成型装药作为反装甲武器中的一个重要组成部分,其威力发展水平也相应不断提高。目前,成型装药领域发展了三种类型的聚能侵彻体:聚能射流(Shaped Charge Jet,JET)、聚能杆式弹丸(Jetting Projectile Charge,JPC)和爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile,EFP),其成型后的外形如图 1.1 所示。

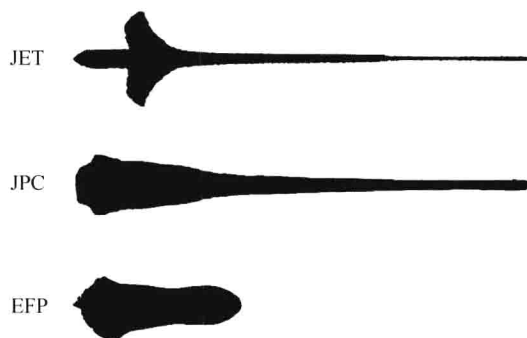


图 1.1 成型装药的三种类型聚能侵彻体

聚能射流以低炸高、大穿深为主要特点,广泛应用于反装甲武器系统和石油射孔弹,但其穿孔孔形不理想,后效不明显。其头部速度一般达到 $7000\text{m/s} \sim 10000\text{m/s}$,尾部速度 $500\text{m/s} \sim 1000\text{m/s}$,由于射流具有较高的速度梯度,导致其有效作用距离有限,限制了其在远距离攻击目标武器平台上的应用。爆炸成型弹丸以大炸高、后效作用大、侵彻孔径大且均匀为主要特点,在一定程度上弥补了聚能射流的不足,是击破各种轻装甲车辆和舰船密封隔舱的有力武器,也可用于对岩石、混凝土进行侵彻开孔,多应用于末敏弹等远距离反装甲武器系统中,其速度一般为 $1500\text{m/s} \sim 3000\text{m/s}$ 。而聚能杆式弹丸是国内外近年来基于聚能效应发展的一种新型侵彻体结

构形式,它是利用一定起爆方式,与装药及药型罩结构匹配关系得到的一种介于射流与爆炸成型弹丸之间的聚能侵彻体结构,其速度一般为 $3000\text{m/s} \sim 6000\text{m/s}$ 。与聚能射流相比具有远距离攻击能力强、药型罩利用率高、侵彻孔径大且比较均匀的特点;与爆炸成型弹丸相比具有弹体更长、攻击速度更快、侵彻能力更强等特点,但其有效作用距离相对于爆炸成型弹丸仍然很小。

一般的成型装药破甲弹在炸药爆炸后,将形成高速射流和杵体,由于射流速度梯度很大,从而被拉长甚至断裂。因此,破甲弹存在有利炸高问题,炸高的大小直接影响了射流的侵彻性能。而由大锥角、球缺形等药型罩在爆轰波作用下形成的爆炸成型弹丸,无射流与杵体的区别,整个质量全部用于侵彻目标,后效大;而且对炸高不敏感,从而大大地提高了弹药的毁伤效能。爆炸成型弹丸,又称为自锻破片(Self - Forging Fragment, SFF)、P 装药(Projectile - charge)、密斯内 - 沙汀战斗部(Misznay - Schardin Warhead)、弹道盘(Ballistic Disk)装药或质量聚焦装置等,是聚能装药技术的一个新分支。一般把采用大锥角罩($120^\circ \sim 160^\circ$)、球缺罩及双曲形药型罩等的聚能装药,在装药爆炸后,药型罩被爆炸载荷压垮、翻转和闭合形成的高速弹丸,称为爆炸成型弹丸。典型 EFP 战斗部结构、数值模拟和试验结果如图 1.2 所示,EFP 战斗部主要由药型罩、壳体、炸药、起爆装置等组成。

EFP 战斗部基本原理是利用聚能效应,通过高温高压作用,将高能炸药在爆轰时释放出来的化学能转化为药型罩的动能和塑性变形能,使金属药型罩锻造成所需形状的高速 EFP,从而以自身的动能侵彻装甲目标,其速度约为 $1500\text{m/s} \sim 3000\text{m/s}$ 。与普通破甲弹相比,EFP 战斗部具有以下特点:

1. 对炸高不敏感

普通破甲弹对炸高敏感,在 2 倍 ~ 5 倍弹径炸高时破甲效果较好,在大于 10 倍弹径的大炸高条件下,由于射流拉长断裂,破甲效果明显降低。而 EFP 战斗部可以在 800 倍 ~ 1000 倍弹径的炸高范围内有效侵彻装甲目标,击穿装甲目标的最大厚度可达 1 倍装药直径,为远距离攻击装甲车辆的顶装甲提供了技术途径。

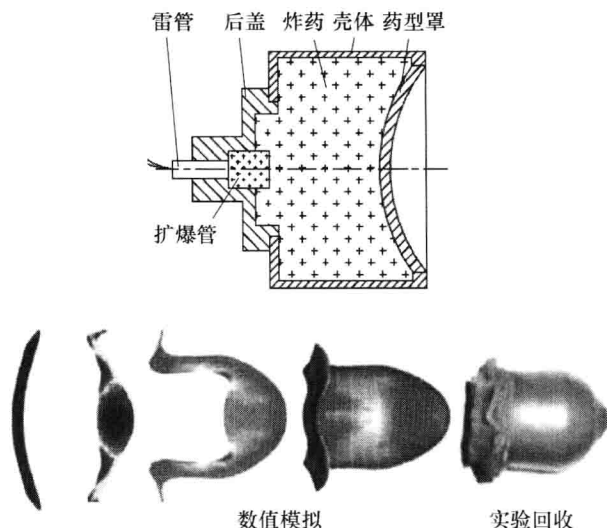


图 1.2 典型 EFP 战斗部结构、数值模拟和实验结果

2. 反应装甲对其干扰小

EFP 外形短粗,长径比一般在 3~5 范围内,因此反应装甲对其干扰小。反应装甲对普通破甲弹有致命威胁,反应盒爆炸后能切割掉大部分射流或使射流变向,从而使破甲效果大大降低。而 EFP 由于长度较短,弹径较粗,它撞击反应装甲时反应盒可能不被引爆,即便被引爆,弹起的反应盒后板也可能撞不到 EFP,因而对其侵彻效果干扰较小。

3. 侵彻后效作用大

通常破甲射流在穿透装甲后,产生的侵彻孔径很小,只有少量金属射流进入装甲目标内部,因而毁伤后效作用有限。而 EFP 侵彻装甲时,70% 以上的弹丸进入装甲目标内部,而且在侵彻的同时还会引起装甲背面大面积崩落,产生大量具有杀伤破坏作用的二次破片,使后效增大。

4. 受弹体的转速影响小

旋转飞行的弹体会使聚能射流产生径向发散从而影响其侵彻能力,而 EFP 是近似于有较高强度的高速动能弹丸,其质量很大,约占药型罩质量的 90%,旋转运动会一定程度上影响 EFP 成型,但会使其飞行更稳定,对其侵彻能力影响较小。

1.1 EFP 成型模式

普通成型装药破甲弹的药型罩在爆炸载荷作用下,一方面形成高速运动的、不断延伸的金属流,另一方面还将形成低速运动的杵体。而爆炸成型弹丸的药型罩则是在爆炸载荷作用下,形成单一的特殊破片,即 EFP。

成型模式是影响 EFP 性能的最基本因素之一,设计不同的 EFP 装药,其药型罩将以不同的模式被锻造成爆炸成型弹丸。根据 EFP 形成过程的不同,EFP 成型模式可以分为三种类型:向后翻转型 (Backward Folding), 向前压拢型 (Forward Folding) 和介于这两者之间的压垮型 (Radial Collapse)。在设计 EFP 战斗部时,要根据毁伤目标的特性和武器系统的主要任务来选择适当的成型模式。

EFP 最终以何种模式成型,主要取决于药型罩微元与爆轰产物相互作用过程中获得的速度并沿药型罩的分布特点。

1.1.1 向后翻转型

当药型罩同爆轰产物的有效相互作用结束时,如果药型罩顶部微元的轴向速度明显大于底部微元的轴向速度时,将出现向后翻转的成型模式。此时,罩壳中部超前,边部迟后并向对称轴收拢,成为弹的尾部,最终形成带尾裙或带尾翼的弹丸。这种弹丸前部光滑,气动性能好,可以远距离攻击目标,如图 1.3 所示。

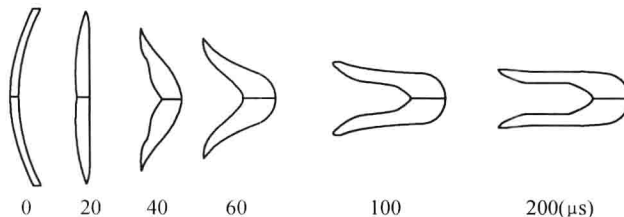


图 1.3 向后翻转型

1.1.2 向前压拢型

当药型罩同爆轰产物的有效相互作用结束时,如果药型罩顶部微元的

轴向速度明显小于底部微元的轴向速度,将出现向前压拢的成型模式。此时,罩壳中部迟后,边部速度较高并向对称轴收拢,成为射弹的头部,最终形成球形或杆形弹丸。这种弹丸比较密实但飞行稳定性差,如图 1.4 所示。对于药型罩的设计,进一步减小药型罩底部厚度,从而继续增大底部微元的轴向速度,就会出现底部微元轴向速度明显大于顶部微元的轴向速度的情形。

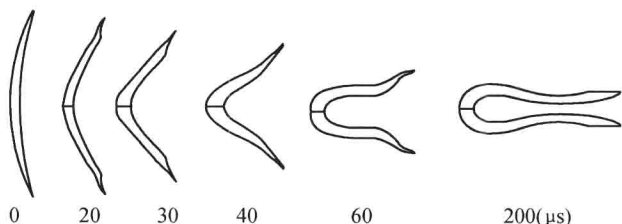


图 1.4 向前压拢型

1.1.3 压垮型

当药型罩同爆轰产物的有效相互作用结束时,如果药型罩微元的轴向速度相差不大,这时药型罩在成型过程中的主要运动形式不是拉伸而是压垮,即微元向对称轴的径向运动,如图 1.5 所示。

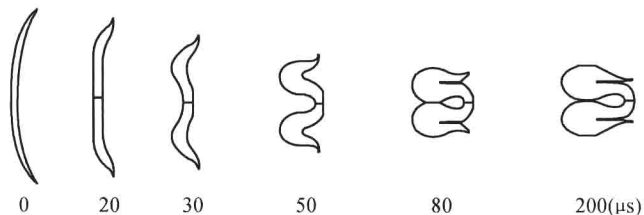


图 1.5 压垮型

成型模式直接决定 EFP 的基本形状。EFP 有三种基本外形,即球形、一般杆状和带扩展尾部的杆状。早期设计的 EFP 大部分是球状的,它以压垮的模式成型。球状 EFP 对付轻型装甲目标时是相当有效的。对付重型装甲目标的 EFP,其结构应当是长杆状的,并且具有良好的密实性,因为弹丸对目标的高速侵彻能力是弹丸长度和密度的函数。当需要攻击的目标距离较远时,则要求 EFP 的尾部扩展,以提供远距离飞行所需要的稳定性。

向后翻转的模式可以形成一般杆状及带扩展尾部的杆状 EFP。以这种模式成型的尾部扩展的 EFP,头部一般具有良好的对称性,扩展的尾部使得这种 EFP 具有较好的飞行稳定性。由于药型罩在成型过程中的压垮速度相对较小,沿轴向的拉伸较弱,使得 EFP 的完整性较容易得到保持。

1.2 影响 EFP 形成性能的主要因素

1.2.1 药型罩形状

药型罩形状对所形成的 EFP 的类型和速度有着直接影响。图 1.6 所示为采用不同药型罩结构形成的不同类型 EFP。

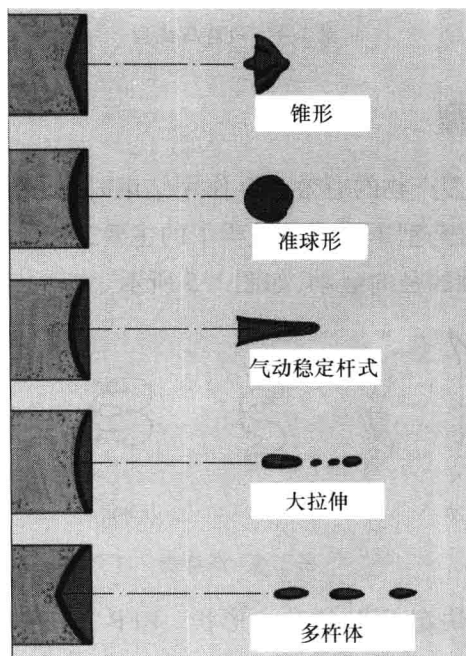


图 1.6 不同药型罩结构形成的不同类型 EFP

通常,球缺形药型罩在爆炸载荷作用下形成翻转式 EFP,此时球缺罩的曲率半径和壁厚是影响其成型性能的重要因素。对于锥形药型罩来说,其形成 EFP 的类型随着锥角的变化而有所不同。试验表明,锥角为 150° 的

变壁厚双曲线形紫铜药型罩在爆轰压力作用下形成杆体式 EFP;当锥角达到 160°时可以形成翻转式 EFP。实验表明,封顶药型罩形成的 EFP,径向收缩性好,但前端出现严重破碎,使空气阻力加大;变壁厚药型罩在翻转后径向收缩极差,形成的 EFP 如圆盘状一样,飞行时空气阻力大;中心带孔的等壁厚药型罩所形成的 EFP,不仅径向收缩性好,且有良好的外形,而且金属损失也少,是一种成型较好的结构形状。

1.2.2 药型罩材料

EFP 的成型过程是在高温、高压、高应变率的条件下发生的,因此对药型罩材料的动态特性有较高的要求。理想的药型罩材料应具有较高的熔化温度、密度、延展性以及动态强度特性,其性能的好坏直接影响着 EFP 成型、飞行稳定性和侵彻威力。常用于制造 EFP 战斗部药型罩的材料有工业纯铁、紫铜、钽、银等单一金属材料 and 合金材料。表 1.1 列出了工业纯铁、紫铜、钽三种材料的主要性能参数和形成的 EFP 性能参数。

表 1.1 药型罩材料性能参数和形成的 EFP 性能参数

材 料	密 度 /(g/cm ³)	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	形成的 EFP 长度 (装药直径的倍数)	EFP 速度 /m/s
铁	7.89	227.5	25	0.70 ~ 1.61	2400
铜	8.96	152	30	0.9 ~ 1.3	2600
钽	16.65	137.8	45	1.5	1900

对于采用相同药型罩结构、不同药型罩材料的爆炸成型弹丸装药,形成的钽 EFP 最长,铁 EFP 最短,铜 EFP 居中。这与三种材料的延展性相对应,说明延展性好,有利于 EFP 的拉伸,从而形成大长径比的 EFP,可以获得更高的穿甲威力。图 1.7 展示了 EFP 发展史上,采用不同材料药型罩形成不同长径比 EFP 的关系。

由图 1.7 可以看出,铜和铁材料的药型罩只能使 EFP 的长径比达到 3,而钽可达到 5.5,甚至更大。因此,三种材料对比,钽由于密度高、延展性好,且钽药型罩形成的 EFP 侵彻性能比铁、铜罩大约高 30% 以上,是理想的药型罩材料。但由于钽材价格昂贵,目前主要用在末敏弹和导弹战斗部高价值弹药上。紫铜的延展性比工业纯铁好,对于要求形成大炸高、大长径

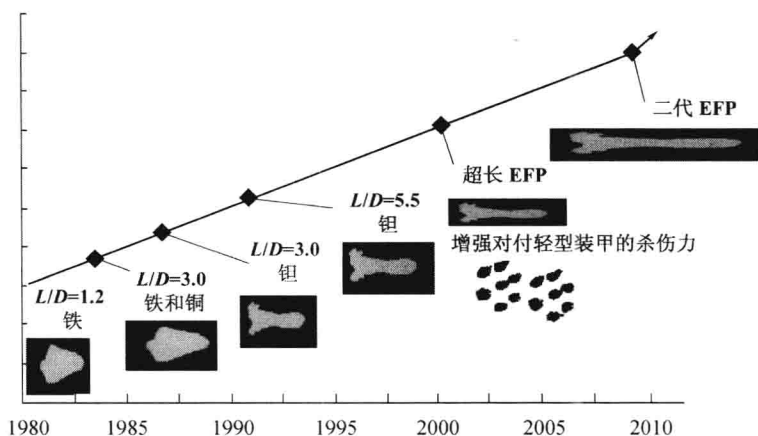


图 1.7 不同材料药型罩形成的 EFP 与长径比的关系

比的 EFP 战斗部,紫铜是最合适的经济型药型罩材料。铁和钢主要用在大型反舰战斗部上,或用于集束、P 型战斗部上以增加杀伤威力。

对于合金材料药型罩,钽合金具有良好的延展性、高密度和高声速。用钽合金制作的药型罩可使破甲深度有较大幅度提高。日本研制了 Ta - Cu 或 Re - Cu 合金药型罩,其破甲深度比常用的纯铜提高 36% ~ 54%。近几年,国外对 Ta - W 合金罩材也作了部分研究工作,主要集中于钨含量对 Ta - W 合金力学性能、晶粒结构及射流性能的影响等方面。

1.2.3 药型罩厚度

对一定形状的药型罩,壁厚对 EFP 的形状和速度分布具有决定性的影响,由试验结果看:翻转弹一般采用等壁厚;杆体弹一般采用变壁厚,但壁厚的变化规律与小锥角时不同,从罩顶至底部厚度越来越薄。对杆体弹来说,罩底厚与顶部厚之比是一重要设计参数。

另外,可以通过改变药型罩的厚度来改变翻转弹的外形,药型罩各处的厚度将影响 EFP 的外形、尺寸和速度。当药型罩外边的厚度比中间的厚度大时,药型罩将向后翻转形成翻转型 EFP,当药型罩外边的厚度比中间的厚度小时,药型罩将向前压合形成压拢型 EFP。图 1.8 所示为药型罩壁厚对 EFP 成型的影响。