

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.05.009

不同材料双层球缺罩侵彻特性的研究^{*}

王维占 赵太勇 陈智刚 印立魁 付建平 付 恒 杨大昭
中北大学地下目标毁伤技术国防重点学科实验室(山西太原,030051)

[摘 要] 采用数值模拟及钢靶侵彻试验两种方法研究了单层钛合金球缺罩、钛合金/铜、铝合金/铜双层球缺罩形成的 3 种杆式射流对 45[#]钢靶板侵彻深度和开孔的问题。研究表明:不同材料的双层球缺罩形成的杆式射流对 45[#]钢靶板的开孔孔径和侵彻深度大小均有直接影响,且钛合金/铜双层罩杆式射流破甲深度相对于铝合金/铜双层罩有一定提高,其开孔孔径明显增大。而单层钛合金药型罩杆式射流整体速度最大,开孔孔径较钛合金/铜、铝合金/铜双层罩杆式射流有明显提高,但破甲能力较低。研究结果对于武器战斗部设计具有一定的指导作用。

[关键词] 聚能装药;双层球缺罩;孔径;数值模拟

[分类号] TJ410.33

Penetration Characteristics of Double-layer Hemispherical Liner Made of Different Materials

WANG Weizhan, ZHAO Taiyong, CHEN Zhigang, YIN Likui, FU Jianping, FU Heng, YANG Dazhao

National Defense Key Laboratory of Underground Damage Technology, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] In this paper, penetration depth and opening problems of 45[#] steel ingot target caused by three kinds of rod-shaped jet formed by the single-layer titanium alloy hemispherical liner, titanium alloy/copper and aluminum alloy/copper double-layer hemispherical liner were studied by numerical simulation and steel target penetration test. The results show that different types of rod-shaped jets have a direct influence on the aperture and penetration depth of the 45[#] steel ingot target plate. Penetration depth of titanium alloy/copper double-layer rod jet has a relative increase compared to aluminum alloy/copper double-layer rod jet, and the aperture increases significantly. The whole velocity of the single layer titanium is the largest, and the aperture is higher than that of titanium alloy/copper and aluminum alloy/copper double layer rod jet, but the armor capability is low. The results of this paper have a certain guidance on the design of weapon warhead.

[KEYWORDS] shaped charge; double-layer hemispherical liner; aperture; numerical simulation

引言

近年来,随着目标防护技术的飞速发展,钢筋混凝土和装甲钢作为首选硬目标,对聚能装药战斗部的威力要求越来越高。其中,药型罩材料充当着提高射流性能的关键性角色。不同材料双层药型罩形成的杆式射流具有速度梯度小、整体速度高、射流质量高等优点,备受国内外广泛关注。

Hong 等^[1]对多层药型罩的形成过程进行了数值仿真研究,得出复合射流的形成机理;付建平等^[2]则对双层球缺罩形成复合杆式射流进行了初

步研究,认为铝/铜双层杆式射流的侵彻威力大于单层铜质杆式射流的侵彻威力;郑宇等^[3]对双层药型罩侵彻半无限靶板进行了数值仿真研究,结论为:相同几何尺寸条件下,与单金属罩相比,双层药型罩不仅侵彻能力提高,而且质量减小;龚超安等^[4]进行了双层药型罩不同材料对比对侵彻结果的影响研究,得出了合理调整外罩与内罩的厚度比有助于改善射流性能的结论。

针对双层药型罩技术,前人已取得了一定的研究成果,但不同内外药型罩材料组合对双层杆式射流性能的影响还涉及不多,有待进一步研究^[5]。基于此,文中首先阐述了双层药型罩的特点;其次设计

^{*} 收稿日期:2016-12-23

作者简介:王维占(1990-),男,硕士研究生,主要从事弹药工程与毁伤技术研究。E-mail:530056679@qq.com

了两种不同材料的双层药型罩,使用钛合金和铝合金两种新型材料,采用数值模拟和钢靶侵彻的试验方法,在内层罩为紫铜的条件下,改变外层球缺罩材料为铝合金、钛合金作为试验因变量,同时使用单层钛合金药型罩代替双层钛合金药型罩,依次对 45# 钢靶进行侵彻试验研究,对比分析不同材料双层罩形成的杆式射流的破甲性能。针对目标特性不同,为串联战斗部前级的选取提供参考依据。

1 双层球缺罩简述及结构设计

根据射流形成原理,射流是由药型罩的内层金属在爆轰产物压力作用下形成的,而杵体则由药型罩的外层金属形成。双层药型罩正是利用这一特点,它的内层药型罩采用塑性好、密度大并且易于形成侵彻射流的紫铜材料,而外层药型罩则采用密度、熔点、气化点以及阻抗均较低的材料。这样既能保证形成射流所需内层金属的质量,又能使外层材料起到传递及增压的作用,从而达到提高射流速度的目的^[6]。

文中,球缺罩内层采用紫铜作为形成杆式射流的主要质量材料,外层材料依次采用铝合金、钛合金,同时使用单层钛合金罩代替双层钛合金罩;外罩与内罩采用的厚度比例为 1 : 2。计算模型几何尺寸:药型罩的底部内口径 $D_1 = 80\text{ mm}$,装药直径 $D_2 = 80\text{ mm}$,内球曲率半径 $R_1 = 37\text{ mm}$,外球曲率半径 $R_3 = 40.75\text{ mm}$,中球曲率半径 $R_2 = 39.5\text{ mm}$ 。装药高度 $H = 128\text{ mm}$,装药壳体厚度 $b = 2\text{ mm}$,钢壳。结构见图 1 所示。

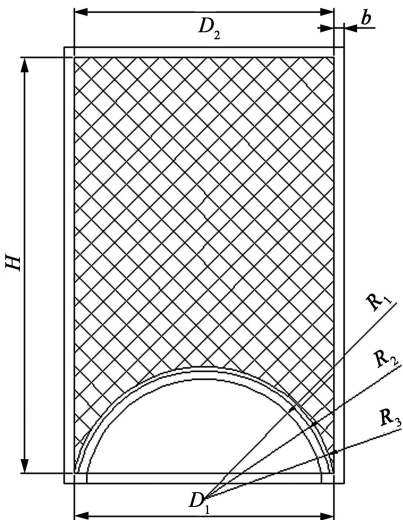


图 1 双层球缺罩装药结构尺寸图

Fig.1 Charging structure and size of the double-layer hemispherical liner

2 数值模拟

2.1 计算模型与算法

为节约计算时间,采用 1/4 结构建立三维有限元模型,并设置对称约束条件于 1/4 模型的对称面上。计算网格均采用 Solid 164 八节点六面体单元,炸药、药型罩、空气采用 ALE 算法,它们之间的接触作用采用流固耦合算法。并在模型的边界节点上施加压力流出边界条件,避免压力在边界上的反射。通过 LS-DYNA 软件对杆式射流的成形过程进行三维数值模拟。

2.2 材料模型

本文的算例中,内层药型罩材料采用紫铜,外层药型罩采用铝合金、钛合金;对比项采用单层钛合金药型罩。所有金属材料模型都采用 Johnson-Cook 材料模型和 Grueise 状态方程。主装药为 8701 炸药,选用 High_Explosive_Burn 材料模型和 JWL 状态方程来描述,材料参数见表 1。空气采用空物质材料 (Null) 描述,对应的状态方程为多线性状态方程。装药起爆方式采用中心点起爆。钛合金 (Ti-6Al-4V) 材料主要参数:密度为 4.45 g/cm^3 ,声速为 $5\,130\text{ m/s}$,剪切模量为 41.9 GPa ,屈服应力为 0.4 GPa ^[7]。其他材料主要参数如表 2。

表 1 8701 炸药参数

Tab.1 Parameters of 8701 explosive						
$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	A	B	R_1	R_2	ω	$D/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1.722	55.8	6.9	4.1	1.4	0.4	8 425

表 2 金属材料参数

Tab.2 Parameters of metal material						
材料	$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$A/$ GPa	$B/$ MPa	C	n	m
紫铜	8.96	0.09	0.292	0.025	0.31	1.91
铝合金	2.77	0.26	0.430	0.015	0.34	1.00
45#钢	7.83	0.79	0.510	0.014	0.26	1.03

其中: A 是屈服应力; B 为应变硬化系数; n 是应变硬化指数; C 是应变率相关系数; m 是温度相关系数^[8]。

3 结果分析

在外层罩采用不同材料的条件下,通过数值模拟,对 2.5 倍装药直径炸高条件下,杆式射流的头尾

部速度 $v_{\text{头}}$ 、 $v_{\text{尾}}$,头尾部直径 $D_{\text{头}}$ 和 $D_{\text{尾}}$ 、杆式射流长度 L 、动能 E 、长径比等参数以及射流形态进行对比,分析射流性能,见表 3。

由表 3 可见,当外罩材料为钛合金时,射流头部速度、长径比相对适中,尾部杵体主要由钛合金形成,所占体积比例较高,射流整体动能最大,形态较佳;外罩材料为铝合金时,所形成的杆式射流头部速度相对适中,长径比最大,尾部杵体所占质量比相对较低,动能适中;当药型罩为单层钛合金罩时,杆式射流整体速度最高,但动能最小,尾部较粗,适合开孔。外罩为钛合金与外罩为铝合金相比,钛合金/铜杆式射流长径比较小,但射流整体形态更加密实,整体动能较大,尾部杵体与射流中后部衔接过渡较均匀,速度梯度相对较小,尾部钛合金杵体所占体积比

例较大,射流有效破甲体积多集中在射流中间靠近头部;由此可知,射流性能相对较佳。

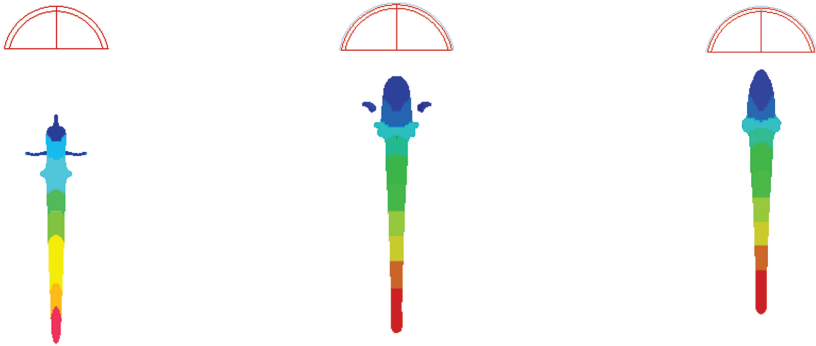
4 试验准备

试验采用铝合金/铜双层药型罩、单层钛合金药型罩、钛合金/铜双层药型罩。装药结构见图 2。3 种药型罩对应的钢靶编号分别为 1#、2#、3#,双层球缺罩总壁厚均为 4.32 mm。药型罩原材料为紫铜板、聚乙烯树脂和钛合金,采用先冲压、后车制的加工方法。试验中的装药采用 8701 炸药压制而成,装药直径为 80 mm,装药高度为 128 mm,起爆方式均为中心点起爆。靶板为 45#钢,1#靶厚度为 250 mm,分别由两块 100 mm 厚和一块 50 mm 厚的钢锭叠摞

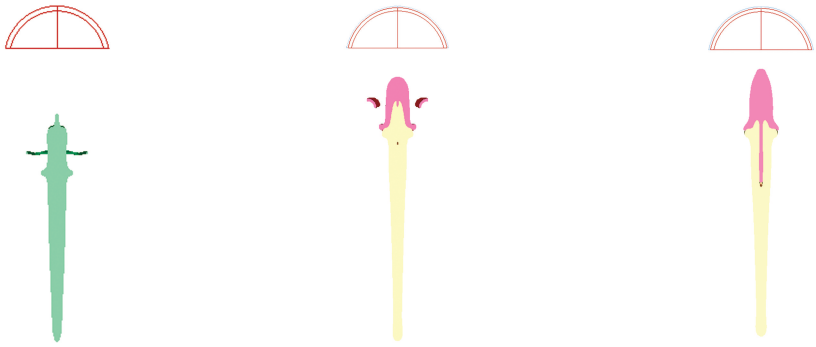
表 3 不同材料条件下杆式射流形态及参数对比
Tab.3 Rod-type jet shape and parameter comparison under different material conditions

材料参数	单层钛合金	铝合金/铜	钛合金/铜
$v_{\text{头}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	5 187	3 834	3 685
$v_{\text{尾}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	898	313	305
$D_{\text{头}}/\text{mm}$	4.68	8.74	9.40
$D_{\text{尾}}/\text{mm}$	58.22	32.82	32.98
L/mm	154.66	177.80	175.60
E/kJ	0.131	0.168	0.172
长径比	5.81	8.56	8.28

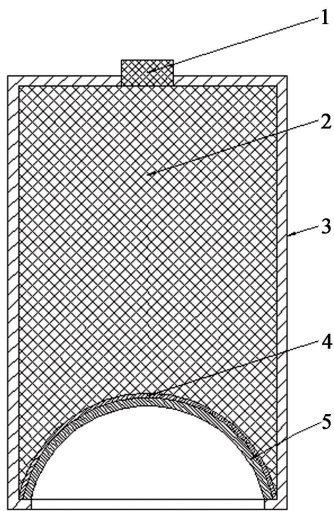
射流速度云图



射流质量分布



而成;2#靶厚度为 150 mm,由一块 100 mm 厚和一块 50 mm 厚的钢锭叠摺而成;3#靶厚度为 250 mm,分别由两块 100 mm 厚和一块 50 mm 厚的钢锭叠摺而成,其中 50 mm 厚钢锭放置于中间位置。内外层球缺罩参数如表 4。



1 – 起爆装置;2 – 装药;3 – 壳体;
4 – 外层药型罩;5 – 内层药型罩。

图 2 双层球缺罩装药结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of double-layer hemispherical liner

表 4 双层球缺罩内外层罩参数
Tab. 4 Parameters of double-layer hemispherical liner

编号	内层罩参数		外层罩参数	
	材料	壁厚/mm	材料	壁厚/mm
1 [#]	紫铜	2.50	铝合金	1.25
2 [#]	钛合金	3.75		
3 [#]	紫铜	2.50	钛合金	1.25

5 试验结果与分析

试验射流侵彻靶板后典型照片如图3、图4、

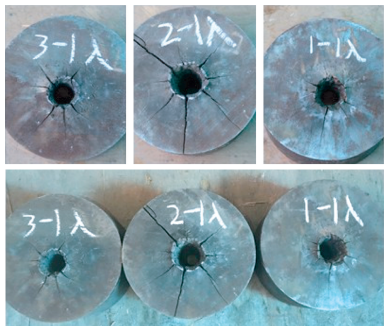


图 3 钢靶正面

Fig. 3 Front view of the steel target

图 5 所示;试验侵彻参数见表 5。表 5 中出口尺寸均为 100 mm 厚处靶板的出口尺寸。



图 4 钢靶背面

Fig. 4 Rear view of the steel target

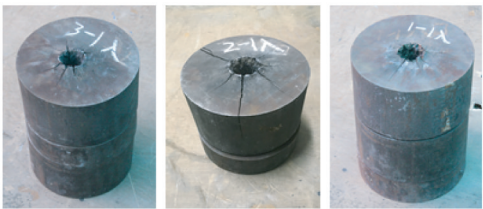


图 5 试验钢锭

Fig. 5 Experimental steel ingot

表 5 试验数据对比

Tab. 5 Comparison of experimental data

编号	炸高	开口尺寸	出口尺寸	侵彻深度	平均穿孔直径
1 [#]	200	26	18	195	22
2 [#]	200	42	26	134	34
3 [#]	200	30	24	204	27

由图 3 可看到,钛合金药型罩对 2#钢靶开孔孔径最大,可以模糊看到银白色(钛合金颜色)金属覆盖在孔径周边;1#钢靶开孔孔径最小,明显低于 3#钢靶开孔孔径;由图 3 中第 2#钢靶出口可明显看到银白色金属附着在出口四周,那是因为钛合金(银白色)射流穿透第一块靶板后,高温高压的射流向钢靶间隙中膨胀溅射造成,虽然破甲深度只有 134 mm,但入孔和出孔分别达到 42 mm 和 26 mm,适合作为串联战斗部前级开孔使用,为后级随进子弹药创造良好的随进通道。

6 结论

1)通过数值模拟方法,描述了两种不同材料双层球缺罩杆式射流的形态,并对杆式射流的性能进行分析对比,得出不同外罩材料对杆式射流成型有

- [5] 北京工业学院八系爆炸及其作用编写组. 爆炸及其作用(下册)[M]. 北京:国防工业出版社,1979:95-110.
- [6] 高永宏,顾晓辉,王凤英. 粉末药型罩的材料密度对聚能射流性能的影响[J]. 高压物理学报,2013,27(4):556-560.
- GAO Y H, GU X H, WANG F Y. Powder liner density effect on the performance of shaped charge jet[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(4):556-560.