

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.05.009

大开孔聚能装药威力性能研究*

郭光全^① 郭子云^① 雷文星^② 郑延斌^③ 石晓山^③ 王维占^④ 陈智刚^④

- ①晋西工业集团有限责任公司防务装备研究院(山西太原,030051)
②晋西工业集团有限责任公司防务装备研究院第三研究所(山西太原,030041)
③国营524厂(吉林吉林,132021)
④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] 为了实现聚能装药大开孔威力要求,针对典型钢靶和混凝土目标,对3种不同结构的聚能装药展开研究。数值模拟研究了紫铜、钛合金、铝/钛3种球缺罩的杆式射流成型、开孔及侵彻威力性能;通过静破甲试验对不同结构聚能装药开孔及侵彻威力进行测试和分析。数值模拟结果表明:内/外罩材料为铝/钛时,开孔威力较钛合金罩、紫铜罩有明显提高,其侵彻威力较钛合金罩有所提高,紫铜罩的开孔威力相对最差。静破甲试验结果表明:铝/钛复合杆式射流对45#钢靶及C35钢筋混凝土的开孔孔径较钛合金、紫铜杆式射流有明显提高,其主要原因是低熔点钛、铝的高温气化效应及与靶板介质在熔融状态下发生脆性化学反应,导致靶板抗侵彻强度降低。

[关键词] 聚能装药;威力性能;大开孔;抗侵彻

[分类号] TJ410.3+4

Study on Power Performance of Shaped Charge with Large Opening

GUO Guangquan^①, GUO Ziyun^①, LEI Wenxing^②, ZHENG Yanbin^③, SHI Xiaoshan^③, WANG Weizhan^④, CHEN Zhigang^④
① Institute of Defense Equipment, Jinxi Industrial Group Co., Ltd. (Shanxi Taiyuan, 030051)
② Institute of Defense and Equipment Research Institute, Jinxi Industrial Group Co., Ltd. (Shanxi Taiyuan, 030041)
③ No. 524 Factory (Jilin Jilin, 132021)
④ National Defense Key Laboratory of Underground Damage Technology, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] In order to achieve the power requirements of large openings for shaped charges, three different configurations of shaped charges were studied for the targets of typical steel and concrete. Numerical simulation method was used to study the performance of rod-type jet molding, hole-opening, and penetration of three hemispherical liners made of copper, titanium alloy, and aluminum/titanium. Hole-opening and penetration performance of different shaped charges were tested and analyzed by static armor breaking test. Numerical simulation results show that the power of the hole opening and penetration are obviously improved when the inner and outer garment material are aluminum/titanium, and when the cover material is copper, the power of hole opening is relatively inferior. The static armor breaking test results show that the aluminum/titanium compounding jet diameter hole opening power for steel and C35 concrete target has obviously been improved compared with titanium alloy and copper rod jet. The main reasons are low melting point of titanium and aluminum, high temperature gasification effect and the target plate medium in molten state issued by brittle biochemical reaction, resulting in the decrease of anti-penetration strength of target.

[KEYWORDS] shaped charge; power performance; large opening; anti-penetration

引言

近年来,由于串联侵彻战斗部的兴起,在能够穿透有限厚靶的条件下,对开孔孔径提出了更高的要求,使得研究者们增加了对新型合金材料药型罩的研究。其中,钛合金具有密度低、成分均匀、晶粒细小等特点,作为一种新型药型罩材料而备受关注。

* 收稿日期:2018-03-26
作者简介:郭光全(1968-),男,研究员级高工,研究方向为战斗部毁伤技术。E-mail:2538236591@qq.com
通信作者:王维占(1990-),男,博士研究生,研究方向为弹药工程与毁伤技术。E-mail:530056679@qq.com

张晓伟等^[1]进行的钛合金药型罩聚能装药射流成型与侵彻实验表明,钛合金药型罩能够提高对目标的开孔孔径;薛鑫莹等^[2]则对聚能装药钛合金药型罩进行深入研究,发现该材料药型罩针对混凝土目标侵深与开孔具有明显的优越性;鄂智佳等^[3]对高密度钛合金聚能药型罩进行研究,确定了数值模拟用高密度钛合金材料参数;王维占等^[4]对不同材料双层球缺罩侵彻特性进行研究,得出了钛合金作为药型罩材料时,可以明显提高成型装药开孔威力。

基于钛和铝在高温下发生剧烈反应,甚至发生爆炸现象,并且钛/铝与其他金属和杂质极易发生化合反应,产生脆性化合物,使结合物强度降低^[5-10],从金属钛合金材料性能和化学特点着手,重点研究了紫铜、钛合金药型罩、铝/钛复合球缺罩的威力性能。采用数值模拟的方法,对紫铜单层药型罩、钛合金单层药型罩、铝/钛复合双层药型罩 3 种聚能装药结构进行数值计算分析。利用静破甲试验的方法研究 3 种聚能装药,对比 3 种聚能装药的侵彻威力及开孔性能,并对其毁伤机理进行分析。

1 聚能装药结构设计^[4,11]

文中聚能装药采用球缺罩作为毁伤元,其中,紫铜罩和钛合金罩均采用单层罩结构,铝/钛复合罩采用双层罩结构,外罩(接触炸药)与内罩采用的厚度比为 1 : 3。

计算模型几何尺寸,药型罩底部内口径为 $D_1 = 52.4\text{ mm}$,装药直径为 $D_2 = 60.0\text{ mm}$,内球曲率半径为 $R_1 = 31.80\text{ mm}$,外球曲率半径为 $R_3 = 34.80\text{ mm}$,中球曲率半径 $R_2 = 32.55\text{ mm}$,装药倒角圆直径 $D_3 = 44.0\text{ mm}$,装药高度为 $H = 85\text{ mm}$,倒角高度 $h = 20\text{ mm}$,装药壳体为 $b = 3\text{ mm}$ 的厚钢壳。聚能装药结构如图 1 所示。

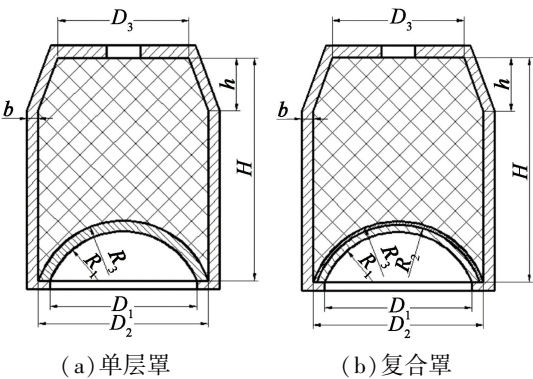


图 1 聚能装药结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the shaped charge structure

2 数值模拟^[4,11-13]

2.1 计算模型与算法

通过 LS-DYNA 软件对杆式射流的成型过程进行数值模拟。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 Solid164 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。为避免压力在边界上的反射,在模型的边界节点上施加压力流出边界条件。

2.2 材料模型

所有金属都采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程。主装药为 B 炸药,选用 High_Explosive_Burn 材料模型和 JWL 状态方程,材料参数见表 1。钛合金密度为 6.0 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 。空气采用 Null 模型和多线性状态方程。装药采用中心点起爆方式。其他材料主要参数见文献[14]。

表 1 B 炸药参数

Tab. 1 Parameters of Explosive B						
$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	A	B	R_1	R_2	ω	$D/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1.712	55.8	6.9	4.1	1.4	0.4	8 425

3 结果与分析

3.1 数值模拟结果

采用不同外罩材料时,对 3 倍装药直径炸高条件下,杆式射流的头部和尾部速度 $v_{\text{头}}$ 和 $v_{\text{尾}}$ 、杆式射流长度 L 、动能 E 、侵深等参数进行模拟对比,进而分析射流性能^[4],如表 2 所示。射流形态和 45° 钢靶的破坏情况见图 2。

由表 2 和图 2 可看出,3 倍装药直径炸高条件下,铝/钛复合罩形成的杆式射流头、尾部速度最高,动能最大,尾部杆体较小,射流充分拉长,利于开孔

表 2 不同聚能装药杆式射流威力参数对比

Tab. 2 Comparison of rod jet power parameters of different shaped charges						
材料	$v_{\text{头}}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{\text{尾}}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$L/$ mm	$E/$ kJ	侵深/ mm	入孔/ mm
紫铜	2 805	729	130.1	0.302	168.2	24.1
钛合金	4 316	1138	138.4	0.425	136.5	28.3
铝/钛	4 823	1207	153.3	0.492	142.7	31.5

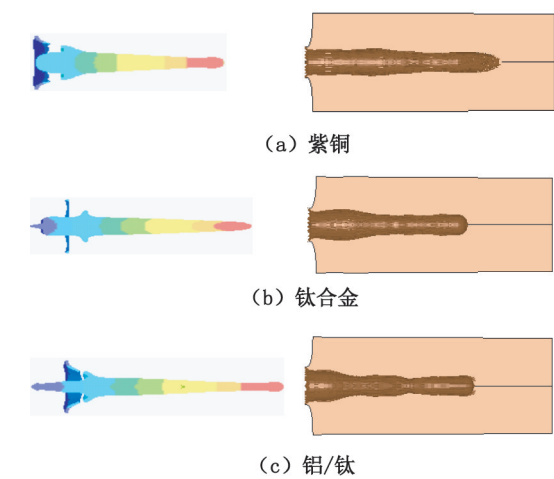


图 2 射流形态与 45#钢靶破坏情况

Fig. 2 Jet morphology and destruction of 45# steel target

破甲。相对于紫铜罩,钛合金罩与铝/钛复合罩具备良好的开孔能力,开孔孔径提高 15% 以上,但侵彻深度明显降低。相对于钛合金罩,铝/钛复合罩具备较优的开孔和侵深性能。由于铝/钛复合罩中铝的阻抗小于钛的阻抗,根据阻抗匹配原理^[11,15-17],炸药爆炸产生冲击波压力透射过铝后较直接作用在钛上的压力有一定提高,故作用在铝/钛合金罩上的压力增加,从而形成较长、速度较高、动能较大的射流,具备一定的破甲优势。

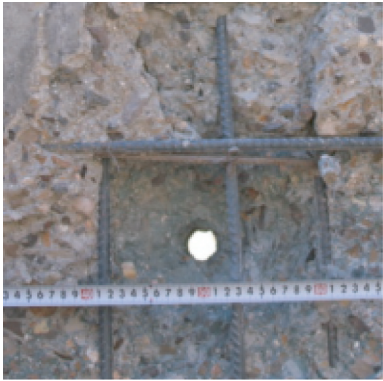
3.2 试验结果

静破甲试验中,采用铝/钛复合药型罩、钛合金罩、紫铜罩,采用先冲压后车制的加工方法。装药采用 B 炸药^[4]。45#钢靶采用直径 150 mm、高 200 mm 的 45#钢锭。C35 钢筋混凝土靶采用 300 mm 厚靶板(2#、3#)、400 mm 厚靶板(1#);其中,紫铜罩用 3#靶板,钛合金罩用 2#靶板,铝/钛复合罩用 1#靶板。试验参数及靶板破坏情况见表 3、图 3、图 4。

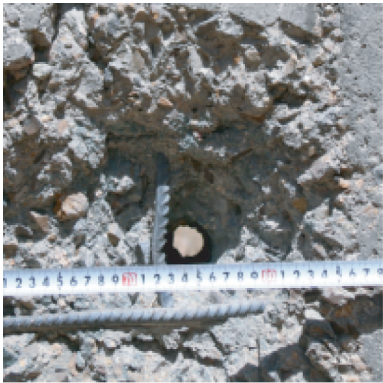
由表 3、图 3、图 4 可得知:3 种聚能装药均能穿透 300 mm 厚的 C35 钢筋混凝土。相对于紫铜罩,钛合金罩与铝/钛复合罩对钢靶的侵彻深度有所降低;对 C35 靶和 45#钢靶开孔能力有明显提升,验证

表 3 试验数据

材料	C35 靶		45#钢靶	
	侵深/mm	入孔/mm	侵深/mm	入孔/mm
紫铜 (3#)	300	31	145	22
钛合金 (2#)	300	39	126	29
铝/钛 (1#)	330	46	137	33



(a) 紫铜



(b) 钛合金



(c) 铝/钛

图 3 C35 靶破坏图

Fig. 3 Destruction of C35 target

了数值模拟的可靠性。相对于紫铜罩,钛合金罩及铝/钛复合罩对 C35 靶开孔的孔深、孔径大,崩落区深度较大,崩落面积较小;对 45#钢靶开孔形貌呈现入孔孔径大,近似崩落区面积较大,深度较浅,原因是 45#钢强度远远大于 C35 靶,在入孔处不易产生崩落,故入孔处近似崩落面积较大,深度较浅,其中对比分析紫铜、钛/铝与钛合金聚能装药对钢靶侵彻效果可知,钛/铝与钛合金聚能装药均能实现入口处较大面积的崩落,预示着对强度较低的混凝土靶可实现在入孔处形成较大的崩落区。



(a) 紫铜



(b) 钛合金



(c) 铝/钛

图 4 45# 钢靶破坏图

Fig. 4 Destruction of 45# steel target

3.3 分析与讨论

由数值模拟分析可知,聚能装药采用钛/铝双层罩结构时,根据阻抗匹配原理,作用在药型罩的投射压力增大,所形成的杆式射流长度、速度、动能也随之增大,较利于侵彻威力的提高,其较高的射流头部速度也可能导致开孔威力的增加。但数值模拟并不能真实反映射流成型过程中熔融状态的金属特性,同时在炸药爆炸高温的作用下,并不能体现气化的金属状态及金属间的化合反应现象。

钛/铝结构聚能装药具有较好的侵彻及开孔威力。分析其毁伤机理,除阻抗匹配机理原因外,钛的

化学性质非常活泼^[8],可以与除银以外的任何金属形成质硬而脆的金属间化合物,使反应区严重脆化,与大气中 O、N、H、CO、CO₂、水蒸气、氨气等产生强烈的化学反应,同时钛/铝复合金属可在不同温度环境下与多种陶瓷介质反应。钛和铝的沸点分别为 3 260 C°和 2 467 C°。针对于钢靶,在炸药爆炸高温爆温的作用下,熔融状态的钛与铝发生局部高温化学反应,部分铝发生气化现象,气化后的射流温度较高,对钢靶具有较好的破坏效果,同时熔融状态的钛、铝与钢靶发生化学反应,铝单独与钢靶、钛单独与钢靶也发生化学反应,三者均将在结合部产生脆性的金属间化合物,而使结合物强度显著降低^[10],从而导致钢靶抗侵彻能力降低。针对混凝土靶板,呈现脆性状态,在高温、高速、高压的射流冲击下,抗压强度远远大于抗拉强度^[18],射流速度、动能越大,混凝土靶板所受压应力与剪切应力越大,较大的冲击波应力可对混凝土形成有效的毁伤区域,在靶板表面形成较大的崩落层,入孔孔径也就越大。

综上分析,采用低熔点钛/铝结构聚能装药形成温度、速度较高的熔融态与气态相间的杆式射流,依靠其金属间化学反应特性,可对钢靶及混凝土实现较好的开孔威力。

4 结论

1)通过数值模拟,从射流动能、开孔、侵深等参数分析得出,与紫铜罩相比,钛合金单层罩、铝/钛复合罩开孔威力较好。其中,使用铝/钛复合罩无论是侵深还是开孔均优于钛合金罩。

2)静靶甲试验中,铝/钛复合罩对 45# 钢靶及 C35 钢筋混凝土靶的开孔威力均优于紫铜罩和钛合金罩,钛合金罩开孔威力又较优于紫铜罩,主要原因是低熔点钛、铝的高温气化效应及与靶板介质在熔融状态下发生脆性化合反应,导致其侵彻威力增大。

上述结论可为串联战斗部设计提供参考依据。

参 考 文 献

- [1] 张晓伟,段卓平,张庆明. 钛合金药型罩聚能装药射流成型与侵彻实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(12): 1229-1233.
ZHANG X W, DUAN Z P, ZHANG Q M. Experimental study on the jet formation and penetration of conical shaped charges with titanium alloy liner [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2014, 34 (12): 1229-

- 1233.
- [2] 薛鑫莹, 景涛, 李国邓. 聚能装药钛合金药型罩研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(5): 83-86.
XUE X Y, JING T, LI G D. Research on titanium alloy liner of shaped charge [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(5): 83-86.
 - [3] 鄂智佳, 段卓平, 张晓伟, 等. 高密度钛合金聚能药型罩研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(增2): 22-26.
E Z J, DUAN Z P, ZHANG X W, et al. Research on high-density titanium alloy shaped charge liner [J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(Suppl. 2): 22-26.
 - [4] 王维占, 赵太勇, 陈智刚, 等. 不同材料双层球缺罩侵彻特性的研究[J]. 爆破器材, 2017, 46(5): 43-47.
WANG W Z, ZHAO T Y, CHEN Z G, et al. Penetration characteristics of double-layer hemispherical liner made of different materials [J]. Explosive Materials, 2017, 46(5): 43-47.
 - [5] IMAYEVA R M, GABDULLINA N K, SALISHCHEVA G A, et al. Effect of grain size and partial disordering on ductility of Ti_3Al in temperature range of 20-600 °C [J]. Acta Materialia, 1999, 47(6): 1809-1821.
 - [6] 孙军浩. 铝/钛和铝/热挤压钢异种金属 CMT 焊接性分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
SUN J H. The analysis of CMT weldability for dissimilar metals between Al/Ti and Al/usibor steel [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
 - [7] 毛秋水. 舰船用铝-铝-钢复合材料焊接性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2009.
MAO Q S. Study on welding performance of composite of Al-Al-St in shipbuilding [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2009.
 - [8] 兰天. 铝/钛异种金属激光焊接研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
LAN T. Study of dissimilar metal Al/Ti laser welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2009.
 - [9] LIU A H, LI B S, NAN H, et al. Study of interfacial reaction between TiAl alloys and four ceramic molds [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(6): 956-959.
刘爱辉, 李邦盛, 南海, 等. 钛铝基合金与 4 种陶瓷界面反应的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(6): 956-959.
 - [10] 李正华, 彭文安, 张志良. 铝-钢及铝-钛-钢爆炸焊接过渡接头[J]. 稀有金属合金加工, 1981(2): 5-10, 73-74.
 - [11] 王维占, 赵太勇, 陈智刚, 等. 复合杆式射流成型及威力性能的数值模拟及试验验证[J]. 火炸药学报, 2017, 40(5): 93-97, 106.
WANG W Z, ZHAO T Y, CHEN Z G, et al. Experimental verification and numerical simulation on composite rod-type jet molding and power performance [J]. Chinese Journal of Explosive and Propellants, 2017, 40(5): 93-97, 106.
 - [12] 张钧, 陈智刚, 李小军, 等. 变壁厚球缺罩杆式射流的形成与侵彻性能研究[J]. 爆破器材, 2016, 45(1): 39-42.
ZHANG J, CHEN Z G, LI X J, et al. Formation and penetration performances of jetting penetrator charge of hemispherical liners with variable thickness [J]. Explosive Materials, 2016, 45(1): 39-42.
 - [13] 王维占, 赵太勇, 陈智刚, 等. 周向约束对杆式射流成型规律的仿真研究[J]. 弹道学报, 2017, 29(1): 79-84.
WANG W Z, ZHAO T Y, CHEN Z G, et al. Effect of circumferential constraint on the formation of rod-type jet [J]. Journal of Ballistics, 2017, 29(1): 79-84.
 - [14] 伊建亚, 王志军, 尹建平, 等. 不同罩材对 K 装药性能影响的数值模拟研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(5): 32-36.
YI J Y, WANG Z J, YIN J P, et al. Simulation research on effect of different material liner on K-charge performance [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(5): 32-36.
 - [15] 付建平, 冯顺山, 陈智刚, 等. 双层球缺罩形成复合杆式射流的初步研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 24-28, 38.
FU J P, FENG S S, CHEN Z G, et al. Preliminary study of composite jetting penetrator charge with double-layer spherical segment liner [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2016, 37(1): 24-28, 38.
 - [16] 李惠明, 张怀智, 赵东华, 等. 内外层材料特性对双层 EFP 的影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(6): 81-82, 86.
LI H M, ZHANG H Z, ZHAO D H, et al. The study on the effect of inner and outer layer of material properties of double-layer EFP [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(6): 81-82, 86.
 - [17] 许世昌. 双层含能药型罩射流成型机理及侵彻性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
 - [18] 张毅, 王志军, 崔斌, 等. 不同结构钛合金罩战斗部侵彻混凝土数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程, 2015, 38(2): 95-98.
ZHANG Y, WANG Z J, CUI B, et al. Numerical simulation on concrete target penetrated by warhead of different titanium alloy shaped charge [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2015, 38(2): 95-98.