

一种新型聚能战斗部^{*}

安二峰, 杨军, 陈鹏万

(北京理工大学爆炸灾害预防、控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 根据能量利用的观点提出了一种将聚能射流与爆炸成型弹丸相结合的新型聚能战斗部装药结构, 在此基础上, 运用系统的静破甲实验研究了该战斗部装药结构关键参数对破甲效果的影响。实验结果表明: 保持穿孔孔径相当和同等装药条件下, 该聚能装药结构比普通 EFP 装药结构穿深可提高约 50%, 小锥角聚能罩采用裂锥型是一个更好的选择。利用等效药量法对小锥角聚能罩的最大底面半径进行了工程计算。实验和计算结果表明该新型聚能战斗部有较大发展潜力。

关键词: 爆炸力学; 聚能战斗部; 等效药量法; 聚能装药; 聚能射流; EFP

中图分类号: O385; TD235 **国标学科代码:** 130°35 **文献标志码:** A

1 引言

聚能装药作为一种产生高能量密度的技术, 在军事领域和民用领域得到了越来越广泛的应用, 特别是军事领域。聚能射流弹以低炸高、大穿深为主要特点, 但穿孔孔径小, 后效不明显。爆炸成型弹丸 (EFP) 以大炸高、穿孔孔径大且均匀及后效和气动性好为主要特点, 但穿深太小^[1]。这种情况下, 研究一种既保证穿孔孔径又提高穿深的新概念战斗部迫在眉睫。本文中尝试从装药结构入手解决此问题。

2 理论依据

对于典型的聚能射流破甲弹, 炸药爆炸作用下, 药型罩被压合后, 形成速度较高的射流和运行较慢的杵。药型罩锥角增大时, 向内压合部分显著减少, 相应地射流和杵体之间的速度差随之减小。M. Herd^[2]发现, 当半锥角接近 75°时, 射流和杵速度接近, 将形成 EFP。

众所周知, 弹丸穿孔孔径不变时, 侵彻深度与弹丸动能成正比, 弹丸动能与聚能罩接受的能量成正比, 即与锥型罩的母线长约成正比^[3]。首先从聚能武器的装药结构出发, 提出了一种新型聚能装药结构^[2]如图 1(a), 设计思路如图 1(b)。

此聚能装药结构的设计思路: 由原来普通爆炸成型弹丸装药中聚能罩与炸药直接接触变为图 1(a) 所示装药结构, 由于图 1(a) 所示装药结构聚能罩母线明显长于普通爆炸成型弹丸聚能罩母线, 扩大了能量接收面积, 从而提高对目标的侵彻能力。

作用机理可分两个方面:

(1) 成型机理。当主装炸药被起爆后, 聚能罩在炸药爆炸作用下, 首先产生压合运动, 上部形成的高速射流从空孔穿出, 下部在压合作用下与聚能罩碰撞复合形成弹丸 (见图 2)。EFP 的翻转、压跨、混合三种成型方式是通过药型罩角度和厚度来控制药型罩微元轴向和径向速度分量实现的。翻转成型的弹丸重心前移、呈杆状, 有利于稳定飞行及提高弹速。压跨形成的弹丸重心靠后, 飞行稳定性较差, 但速度较高, 适用于炸高偏小的情况。该新型战斗部的弹丸形成与 EFP 的形成很相似, 并且该战斗部有效炸高小。因此, 翻转和压跨成型将是主要研究内容。

(2) 破甲机理。射流从小孔穿出后, 首先拉动低速弹丸快速成型和加速, 并在拉动过程中与弹丸脱

* 收稿日期: 2003-09-08; 修回日期: 2004-09-13

作者简介: 安二峰 (1975—), 男, 博士。

离(见图 2), 随后对靶板开坑侵彻, 使射孔周围材料发生热软化形成塑性区, 低速弹丸经过加速, 尾随射流而入对射流射孔进行扩孔和再侵彻, 从而完成了一个战斗部对靶板的两次侵彻, 提高了战斗部对目标的侵彻能力。

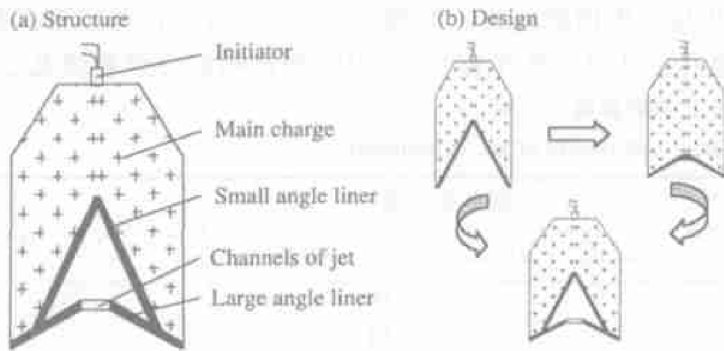


图 1 新型聚能装药结构及设计思路图

Fig. 1 The sketch of structure and design of the new shaped charge

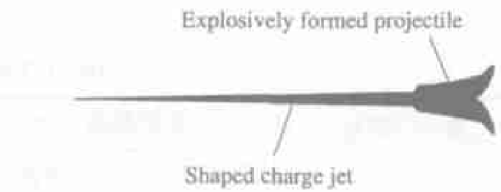


图 2 弹丸成型示意图

Fig. 2 The sketch of formed projectile

3 实验

3.1 目的与装置

同等装药及相同钢壳约束条件下, 系统研究了该新型聚能装药结构关键参数, 如聚能罩材料、空孔孔径 D_1 、小锥角药型罩底面直径 d 、炸高 H 、小锥角药型罩锥角 α 等对破甲效果的影响。实验装置如图 3, 装药口径为 48mm, 装药 RDX 与 TNT 的质量比为 6:4, 靶板材料为 45# 钢。

3.2 结果分析

实验参数^[1,4]及结果由表 1 给出, β 为大锥角药型罩锥角, δ 为大锥角药型罩厚度, b 为小锥角药型罩厚度, m 为装药量, L 为穿深。

(1) 对表 1 中第 I、II 组实验, 小锥角聚能罩为钨铜粉末压实材料 ($\rho = 8.8 \text{g/cm}^3$) 时, 该战斗部最佳炸高约 55mm, 小锥角聚能罩为紫铜时, 该战斗部最佳炸高约 75mm。从表 1 及实验 I、II 曲线(见图 4) 可看出: (a) 该新型战斗部最佳炸高条件下, 紫铜小锥角聚能罩比钨铜粉末压实小锥角聚能罩有明显优势; (b) 紫铜小锥角聚能罩战斗部比粉末压实小锥角聚能罩战斗部最佳炸高明显提高; (c) 穿深 L 随空孔孔径增大先增加后减小。结合聚能罩设计理论与实验现象可知: (a)、(b) 主要由小锥角聚能罩材料之间动态力学性能(如粘度、径向收缩效应、速度梯度、密度、屈服强度以及本构关系等) 的差异造成的, 而 (c) 主要由于空孔孔径小时, 射流与空孔相互干扰对弹丸成型和射流拉伸都有不利影响, 空孔孔径大时, 大锥角聚能罩成型过程中容易破裂失稳而不能成型, 因此, 两种因素彼此消长而存在一个最佳孔径。

(2) 从实验 II 结果曲线(见图 5) 可看出, 穿深随着炸高增加先增大后减小, 炸高约 85mm 时, 穿深达最大。根据射流、弹丸成型机理及联合侵彻原理可知, 该新型聚能战斗部的最佳炸高是射流和弹丸相互竞争的结果, 射流趋向小炸高而弹丸趋向大炸高, 因此, 最佳炸高必位于聚能射流和爆炸成型弹丸的最佳炸高之间。

(3) 从实验 IV 结果曲线(见图 6) 可看出, 穿深随小锥角聚能罩底面直径先增大后减小, 底面直径约 25mm 时达最大。可见大、小锥角聚能罩之间的相互作用, 随小锥角聚能罩底面直径由小变大而从有利变为有害。从射流和弹丸成型机理可知, 这是小锥角聚能罩对大锥角聚能罩成型过程影响的直接结果。

(4) 从实验 V 结果曲线(见图 7) 可看出, 小锥角聚能罩锥角 $35^\circ \sim 70^\circ$ 时, 锥角变化对穿深影响不大。对小锥角聚能罩, 可理解为射流的小锥角效应和两聚能罩之间碰撞复合所要求的大锥角效应共同作用的结果。

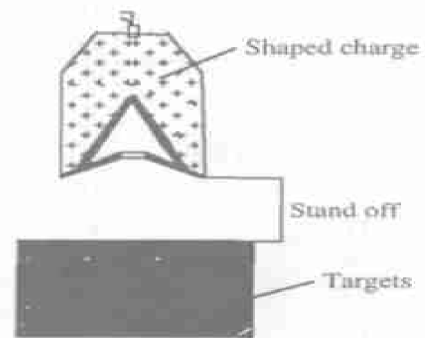


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 The sketch of the experimental set-up

综合(3)、(4)知,小锥角聚能罩采用裂锥-喇叭形聚能罩是一个更好的选择(见图9),且最佳底面直径比直锥型聚能罩更大、母线更长、表面积更大、能量利用更高。

以上分析主要依据穿深不全面,而实验穿孔孔径也是该战斗部的一个重要性能参数。该新型聚能战斗部的穿孔是由先导射流和后继随进弹丸共同作用的结果。结构参数变化时,穿孔孔径形式复杂。图8(b)、图8(d)所示先导射流开孔侵彻和弹丸扩孔侵彻作用相当时,射流射孔刚好完全被弹丸二次扩

表 1 实验参数及结果

Table 1 Parameters and results of the experiments

实验组序	实验号	大锥角药型罩				小锥角药型罩				H/mm	m/g	L/mm
		$\beta/(\circ)$	D_1/mm	材料	δ/mm	$\alpha/(\circ)$	d/mm	材料	b/mm			
I	1		2				钨					30
	2		4				铜					48
	3	125	6	紫铜	2	45	粉末	2	55	70		54
	4		8	铜			末					60
	5		10				压					60
	6		12				实					42
II	7		4							55		42
	8		6	紫铜						75		66
	9	125	8	铜	2	45	24	紫铜	2	75	70	72
	10		10							75		72
	11		12							75		42
III	12									85		78
	13	125	8	紫铜	2	45	24	紫铜	2	95	70	66
	14			铜						105		60
	15									115		48
IV	16						16					54
	17						24					72
	18	125	8	紫铜	2	45	28	紫铜	2	75	70	66
	19			铜			32					48
	20						40					24
V	21					35						66
	22	125	8	紫铜	2	50	24	紫铜	2	75	70	72
	23			铜		60						66
	24					70						60
VI ^[5]	25	125	—	紫铜	2	—	—	—	—	300	78	40
	26			铜	3	—	—	—	—			48

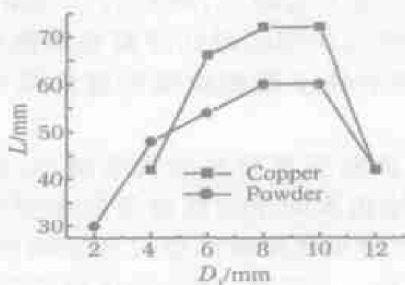


图 4 实验 I、II 结果曲线

Fig. 4 Experimental results of I and II

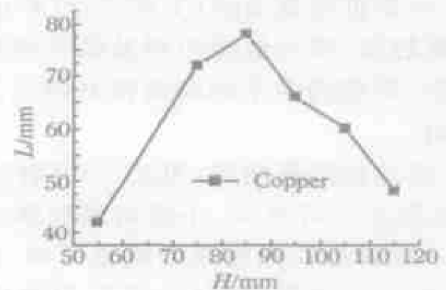


图 5 实验 III 结果曲线

Fig. 5 Experimental results of III

孔侵彻结果所掩盖,所成孔型上下均匀,孔型较好。图8(c)则表现为射流的先导开孔作用强于弹丸的扩孔侵彻作用,上半部分为扩孔孔径,下半部分为射流射孔孔径。图 8(a)所示靶试结果为表 1 中 26[#]实验,装药口径 48mm 带壳装药,装药为铸装 B 炸药 78g,保持穿孔孔径为 16~18mm,穿深可达 48mm (6 块 8mm 的叠钢靶)。图 8(b)、图 8(d)分别为新型聚能战斗部 9[#]和 10[#]实验结果,装药口径 48mm 带壳装药,装药为铸装 B 炸药 70g,穿孔孔径均匀,保持穿孔孔径 15~25mm,穿深可达 72mm (12 块 6mm 的叠钢靶)。图 8(c)为 12[#]实验结果,装药口径为 48mm 带壳装药,装药为铸装 B 炸药 70g,穿孔孔径上下不均,不易定量描述,穿深达 78mm (13 块 6mm 的叠钢靶)。

因此,综合考虑穿深和穿孔孔径,该新型聚能战斗部在同等装药且保持相当穿孔孔径和各自最佳炸高条件下,穿深比 EFP(表 1 第 V组)提高约 50%。

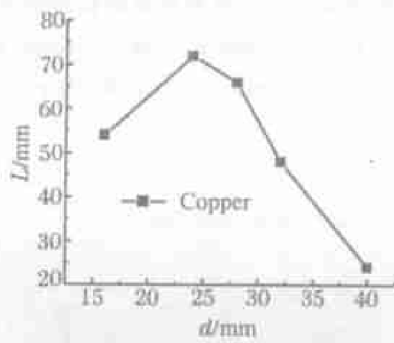


图 6 实验 IV 结果曲线

Fig. 6 Experimental results of IV

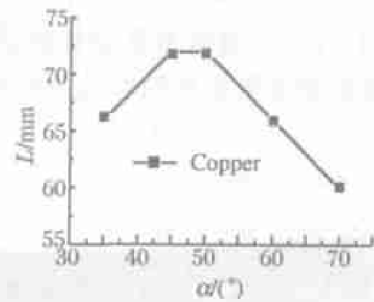
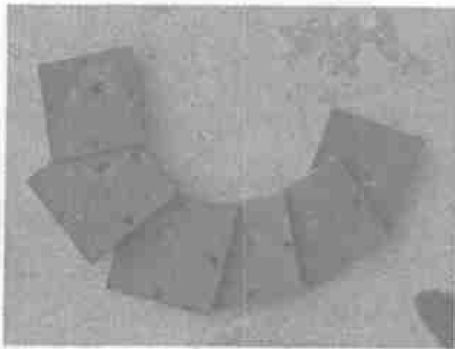


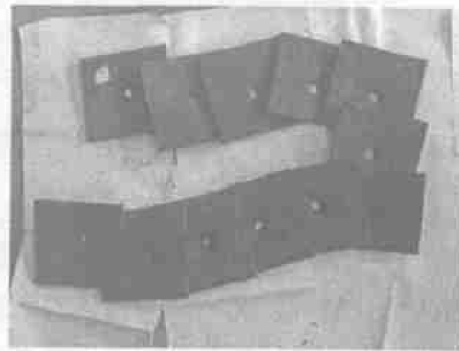
图 7 实验 V 结果曲线

Fig. 7 Experimental results of V

(a) Experimental results of ordinary EFP^(a)



(b) Experimental results of new model



(c) Experimental results of new model



(d) Experimental results of new model

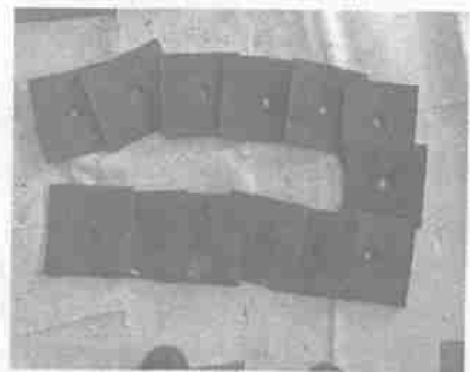


图 8 典型实验结果照片

Fig. 8 Representative photos of experimental results

3.3 采用普通直锥型和裂锥型小锥角聚能罩的实验比较

由对图6、图7分析可知,裂锥-喇叭形小锥角聚能罩代替普通直锥型小锥角聚能罩时,该新型聚能战斗部更具优势,所以本文中将对这两种情况破甲实验进行对比,采用裂锥型聚能罩的新型聚能装药结构如图9所示。

无壳体约束和炸高330mm条件下,其他实验参数见表1中19[#]实验,实验结果(j见图10)有力地证明了图6、图7的分析结果,图10(b)的破甲效果明显好于图10(a)。结合射流、弹丸成型、联合破甲原理、实验结果可知:裂锥情况下,一方面,裂锥罩上、下部分可用不同的聚能罩材料;另一方面,弹丸成型加快,射流杆体减少,射流有效炸高增加。因此,裂锥型新型聚能弹的有效炸高范围比普通直锥型新型聚能弹的有效炸高范围明显增大。

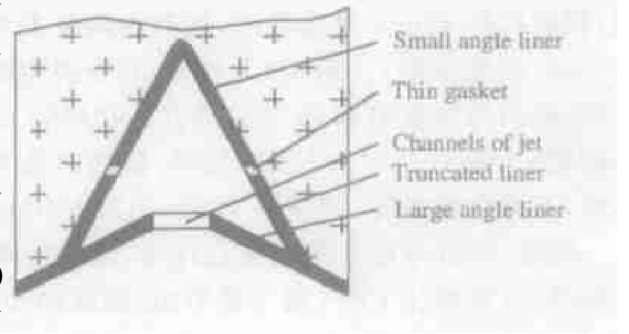


图9 采用裂锥型小锥角聚能罩的新型聚能装药结构
Fig.9 The new shaped charge warhead adopting dissected small angle liner

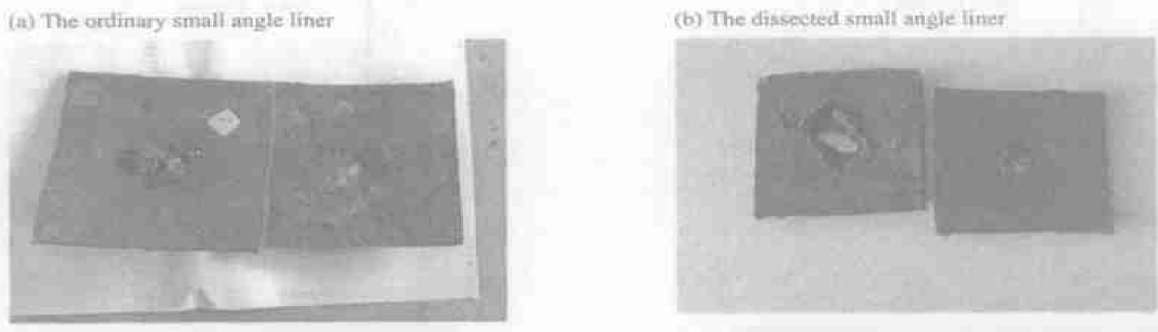


图10 实验结果比较图
Fig.10 Comparison of the experimental results

4 小锥角聚能罩最大底面半径的工程计算

工程计算采用有效装药绝热压缩法^[6],主要思路及假设:(1)炸药瞬时全部爆轰,且稀疏波沿装药表面内法线向爆炸产物内部传播;(2)爆炸产物以稀疏波的初始交界面为刚性边界做定向膨胀,并由此确定有效装药量;(3)药型罩的闭合运动是有效装药部分向内绝热膨胀做功的结果。

按上述假定一般可用装药剖面图的各个角平分线划定有效装药,该新型聚能装药的局部有效装药如图11所示,以罩微元*i*为对象进行工程计算。罩微元运动应满足运动方程

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = S_i p_i \quad (1)$$

式中: m_i 为药型罩第*i*微元的质量; v_i 为药型罩第*i*微元的瞬时速度; S_i 为药型罩第*i*微元与爆炸产物的接触面积; p_i 为作用于药型罩第*i*微元上的爆炸产物压强。

有效装药绝热膨胀, p_i 应满足

$$p_i = p_{0i} (V_{0i}/V_i)^\gamma \quad (2)$$

式中: γ 为绝热指数,一般猛炸药取 $\gamma \approx 3$; V_{0i} 为瞬时爆轰后,爆炸产物的初始体积; V_i 为爆炸产物体积; p_{0i} 为瞬时爆轰后,爆炸产物的初始压强,可近似取

$$p_{0i} = \frac{1}{2} p_{cji} = \frac{1}{8} \rho_{ei} D^2 \quad (3)$$

式中: p_{cji} 为C-J爆轰压强, ρ_{ei} 为有效装药密度, D 为爆速。不考虑药型罩微元向轴线压缩过程中面积 S_i 的变化,则有

$$\frac{V_{0i}}{V_i} = \frac{S_i b_{ei}}{S_i (b_{ei} + h_i)} = \frac{b_{ei}}{b_{ei} + h_i} \tag{4}$$

其中： b_{ei} 为*i*微元的有效装药厚度； h_i 为罩微元闭合到轴线的运动距离。 v 沿罩面法向，由(1)式可得

$$m v_i dv_i = S_i p_i dh_i \tag{5}$$

将式(2)、式(3)、式(4)代入式(5)得

$$d \left[\frac{v_i}{D} \right]^2 = \frac{m_{ei}}{4m_i} \left[\frac{1}{1 + h_i/b_{ei}} \right]^3 d \left[\frac{h_i}{b_{ei}} \right] \tag{6}$$

式中： m_{ei} 为有效装药微元质量。由于药型罩微元在很短时间(约 10^{-6} s)、很小距离内达到最终速度的 90%以上，大、小锥角药型罩又都是运动的，所以有足够时间和空间使小锥角药型罩底部微元加速。近似计算中，“ h_i ”的积分与一般聚能罩相同。将式(6)两边积分，当 h_i 由 $0 \rightarrow h_i$ 时， v_i 由 $0 \rightarrow v_{0i}$ ，整理得

$$v_{0i} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\rho_{ei} b_{ei}}{2 \rho_i b_i} \left[1 - \left(\frac{b_{ei}}{b_{ei} + h_i} \right)^2 \right]} \tag{7}$$

式中： b_i 为*i*微元的药型罩厚度， ρ_i 为罩密度， v_{0i} 为罩微元所能达到的最大速度。由图 11 中的几何关系可知

$$b_{ei} = \frac{(R - r) \tan(\alpha/2)}{\sin \alpha} \tag{8}$$

$$h_i = r / \cos \alpha \tag{9}$$

式中： R 为大锥角聚能罩的底面半径， r 为小锥角聚能罩的底面半径。

由文献[6~7]可知，只有当 v_{0i} 大于某一 v_0 时，小锥角聚能罩锥底才能与大锥角聚能罩进行有效复合，而不在稀疏波作用下飞散。由已知条件： $D=7.4\text{km/s}$ ， $\rho_{ei}=1.64\text{g/cm}^3$ ， $\rho_i=8.9\text{g/cm}^3$ ， $b_i=2\text{mm}$ ， $R=24\text{mm}$ ， $\alpha=22.5^\circ$ ，根据参考文献[6]， $v_0=1.3\text{km/s}$ ，本文中取 $v_0=1.390, 1.495, 1.590\text{km/s}$ ，联立方程(7)、(8)、(9)计算得 $r=18, 17, 16\text{mm}$ 。该计算结果已通过平板抛掷计算验证，进一步的实验验证无壳体约束及炸高 330mm，小锥角聚能罩底面半径分别为 17mm 和 15mm，其余条件与第 IV 组实验相同，该条件下新型聚能弹的实验结果如图 12。

结合弹丸成型机理和侵彻结果(见图 12)可知，当小锥角聚能罩底面半径过大时，弹丸翻转成型困难，一定炸高下，成型效果变差，侵彻效果也差。实验结果和计算结果相互印证表明，该新型聚能战斗部小锥角聚能罩最大底面直径应不超过 32mm。

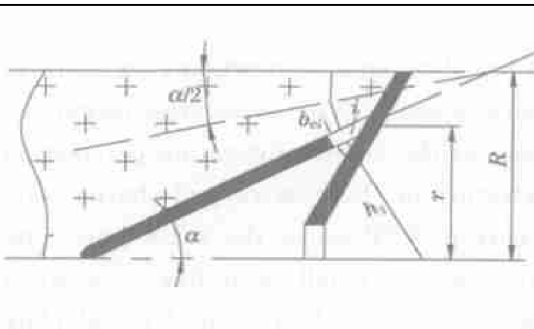


图 11 新型聚能装药的局部有效装药图

Fig. 11 Equivalent charge of the new shaped charge warhead

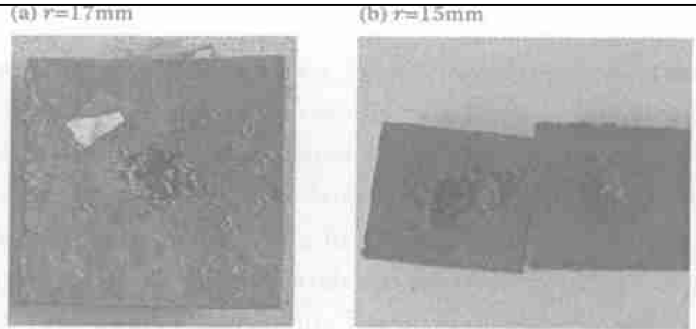


图 12 实验结果照片

Fig. 12 Photos of the experimental results

5 结 论

(1)本文中实验条件下，该聚能装药结构与爆炸成型弹丸静破甲对比实验显示，新型聚能战斗部穿深可提高约 50%。

(2)同等装药条件下，新型聚能战斗部的最佳炸高介于聚能射流战斗部和爆炸成型弹丸战斗部的最

佳炸高之间。

(3)大、小锥角聚能罩的材料及其材料的组合对破甲效果有显著影响。

(4)空孔孔径、炸高及小锥角聚能罩底面直径等参数是影响该聚能战斗部破甲效果的主要参数。本文中实验范围内,小锥角聚能罩锥角对破甲效果影响不大。

(5)小锥角聚能罩采用裂锥型聚能罩比采用普通直锥型聚能罩更好。

(6)采用裂锥型小锥角聚能罩的新型聚能弹有效炸高范围明显比采用普通直锥型小锥角聚能罩新型聚能弹的有效炸高范围大。

(7)该新型聚能战斗部小锥角聚能罩最大底面直径应不超过 32mm。

参考文献:

- [1] Weimann K. Research and development in the area of explosively formed projectiles charge technology[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1993, 18: 294—298.
- [2] Herd M. Truncated shaped charges[A]. 15th International Symposium on Ballistics[C]. Israel: Jerusalem, 1995: 21—30.
- [3] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用(下)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979: 203—204.
- [4] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 238.
- [5] 秦友花, 周昕清, 孙宇新, 等. 爆炸成型弹丸的实验研究[J]. 实验力学, 2002, 17(2): 160—164.
QIN You-hua, ZHOU Ting-qing, SUN Yu-xin, et al. Experimental study on explosively formed projectile[J]. Experimental Mechanics, 2002, 17(2): 160—164.
- [6] 郑哲敏, 杨振声. 爆炸加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 383—464.
- [7] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 205—220.

Study on a new shaped charge warhead

AN Er-feng^{*}, YANG Jun, CHEN Peng-wan

(State Key Laboratory of Prevention and Control of Explosion Disasters,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A new shaped charge warhead has been put forward based on energy viewpoint, which has combined the usage of shaped charge jet and explosively formed projectile. The static steel target experiments were systematically made in order to find the influence of the key configuration parameters on penetration. The experimental results reveal that the penetration of the new shaped charge warhead can achieve an increment of about 50% than that of the current EFP under the same crater and charged conditions. Another related experiment proves that the dissected small angle liner is a better choice than the ordinary small angle liner. Also, the equivalent charge method is used to calculate maximal bottom radius of the small angle liner.

Key words: mechanics of explosion; shaped charge warhead; equivalent charge method; shaped charge; shaped charge jet; EFP

* Corresponding author: AN Er-feng

E-mail address: anerfeng@ustc.edu

Telephone: 010-68912858