

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.01.009

# 变壁厚球缺罩杆式射流的形成与侵彻性能研究<sup>\*</sup>

张 钧<sup>①</sup> 陈智刚<sup>①</sup> 李小军<sup>②</sup> 于小洁<sup>③</sup> 郭光全<sup>④</sup> 吕慧贞<sup>④</sup>

①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)

②中国人民解放军防化研究院(北京,102205)

③总装北京军代局(北京,100042)

④晋西工业集团有限责任公司(山西太原,030051)

[摘 要] 为了研究不同结构对变壁厚球缺罩形成杆式射流的影响,设计了等壁厚、中间厚边缘薄、中间薄边缘厚 3 种等质量球缺罩方案。利用 LS-DYNA 软件对杆式射流的形成与侵彻进行了数值模拟,并进行了大炸高下的侵彻试验。研究表明:结构不同导致形成杆式射流的方式不同,并对射流的形态与速度分布有显著影响;中间厚边缘薄球缺罩形成的杆式射流侵彻深度最大,等壁厚球缺罩次之,中间薄边缘厚球缺罩最差。

[关键词] 聚能装药;杆式射流;球缺罩;壁厚;数值模拟

[分类号] TJ410.3

## 引言

现代战场对反坦克弹药大炸高攻顶技术的需求提高,而战斗部的布置空间有限,高品质射流的形成是提高其侵彻性能的关键技术。杆式射流<sup>[1]</sup>是一种侵彻性能介于爆炸成型弹丸和聚能射流之间的聚能侵彻体,由于其中在近炸高条件下侵彻能力强,装药及药型罩材料利用率高和可调性较强,在对付某些特殊的装甲防护如多层间隔装甲、含水间隙装甲和机场跑道时具有较好的应用前景<sup>[1-2]</sup>。

形成杆式射流的装药结构主要是大锥角聚能装药。国外对大锥角装药进行了较多研究,最早的是 K-Charge<sup>[3]</sup>。近些年来,中国工程物理研究院谭多望<sup>[4]</sup>、北京大学王成<sup>[5]</sup>、北京理工大学黄风雷<sup>[6]</sup>、南京理工大学黄正祥<sup>[7]</sup>和李伟兵<sup>[8]</sup>等大量国内学者,都针对杆式射流的形成及侵彻能力进行了研究。

球缺罩作为一种常用的药型罩结构,当它的高度和内表面底直径的比值满足一定关系时,可以产生杆式射流。与其他结构杆式射流相比,球缺罩形成的杆式射流粗细均匀,其材料利用率与动能值均较高。

本文设计了 3 种等质量变壁厚球缺罩,利用 LS-DYNA 非线性分析软件分析了杆式射流的形成与侵彻过程,并进行了大炸高下侵彻 45° 钢靶的试验。

## 1 杆式射流方案设计

### 1.1 杆式射流的技术途径

形成杆式射流的核心是控制侵彻体的速度梯度,目前可以通过两种技术途径得到杆式射流:1) 提高爆炸成型弹丸(EFP)的速度梯度,将 EFP 拉长来得到杆式射流;2) 降低射流的头部速度并提升射流的尾部速度,减小射流整体速度梯度的差异。

### 1.2 初步方案设计

初步设计了 3 种等质量变壁厚球缺罩:等壁厚球缺罩(方案 I)、中心厚边缘薄球缺罩(方案 II)、中心薄边缘厚球缺罩(方案 III)。战斗部装药主要由球缺罩、炸药、战斗部壳体、起爆装置等组成。

## 2 数值模拟

### 2.1 有限元模型与算法

采用多物质耦合 ALE 算法来模拟聚能装药作用的大变形过程,并在有限元模型的边界上施加压力透射边界条件。

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。计算网格均采用六面体实体单元,炸药、药型罩、空气采用 ALE 算法,战斗部壳体、靶板采用 Lagrange 算法,它们之间的相互作用采用流固耦合算法。计算模型几何尺寸为:炸药药柱直径 55 mm,炸药药柱高度为 52 mm,球缺罩口部直径 52 mm,球

<sup>\*</sup> 收稿日期:2015-05-05

作者简介:张钧(1989~),男,硕士研究生,主要从事弹箭控制与高效毁伤技术的研究。E-mail:583325602@qq.com

通信作者:陈智刚(1963~),男,教授,主要从事弹药高效毁伤技术研究。E-mail:tj85tj@163.com

缺罩高度为 17.2 mm。

2.2 材料模型

选择 8701 炸药,其主要材料参数为: $\rho = 1.72\text{ g/cm}^3$ , $D = 8.425\text{ km/s}$ , $p_{\text{CJ}} = 29.95\text{ GPa}$ 。计算中炸药模型采用高能炸药材料本构模型\* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 和状态方程 JWL 来描述。选择紫铜为球缺罩材料,并采用流体弹塑性材料模型和 Gruneisen 状态方程来描述药型罩在爆轰波作用下的动力响应行为。壳体与靶板材料为 45# 钢,采用应变率相关和失效相结合的各向同性塑性随动硬化模型。以上各材料模型的参数均选择经典数值。

2.3 数值模拟结果与分析

3 种方案成型过程速度云图见图 1。  
由图 1 杆式射流成型过程可见,3 种方案杆式射流的形成方式有着显著差异。  
方案Ⅲ的药型罩中心处薄,质量小,在爆轰波的作用下先变形。成型过程是中心处翻转,边缘处压合,近似于 EFP 的形成;但在形成的过程中会因聚拢不实而产生空心,影响密实性。  
方案Ⅱ的杆式射流和传统聚能射流成型规律相似,主要由球缺罩压垮形成。中心厚,边缘薄,这样会造成球缺罩在爆轰波的作用下来不及翻转就被压垮,并向中心轴线汇聚。

方案Ⅰ的药型罩壁厚相等,杆式射流在成型过程中既有沿轴线的翻转作用,又有向轴线的压垮汇聚。  
决定杆式射流在大炸高下侵彻能力的主要因素是射流的断裂。速度梯度对射流的断裂有着显著影

响,速度梯度越大,射流的断裂时间越早。由图 2 和表 1 可见,方案Ⅲ形成的杆式射流头尾速度差与速度梯度最大,在大炸高下将最早产生颈缩而断裂。方案Ⅱ形成的杆式射流速度梯度最小,断裂时间最晚,且射流整体速度最高。方案Ⅰ中杆式射流的速度梯度大小居中,由 100  $\mu\text{s}$  时的射流形态与速度分布可知,方案Ⅰ将先于方案Ⅱ在射流中部发生断裂。  
通过数值模拟发现,杆式射流速度低于 1 000

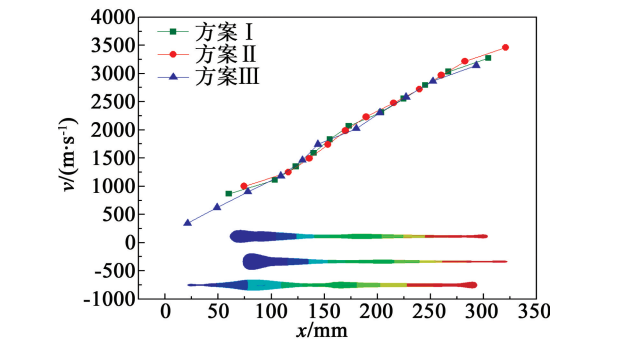


图 2 杆式射流在 100  $\mu\text{s}$  时刻的形态与速度分布  
Fig. 2 Shape and velocity distribution of jetting penetrator charge at 100  $\mu\text{s}$

表 1 杆式射流在 100  $\mu\text{s}$  时刻的主要参数  
Tab. 1 Major parameters of jetting penetrator charge at 100  $\mu\text{s}$

方案	头部速度 $v_j/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	尾部速度 $v_s/$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	射流长度 $L/\text{mm}$	速度梯度 $\eta/\text{s}^{-1}$
I	3 275	809.5	258.92	9 522
Ⅱ	3 462	1 002.0	265.11	9 279
Ⅲ	3 147	343.7	287.97	9 735

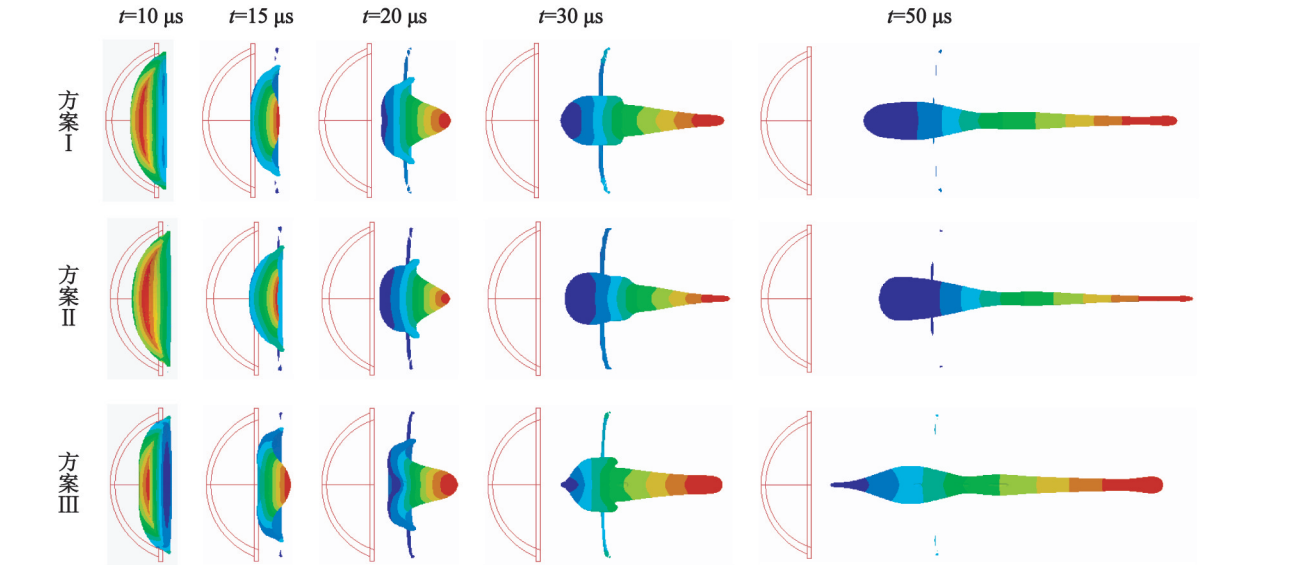


图 1 3 种方案成型过程速度云图  
Fig. 1 Speed cloud maps of three schemes in formation process

m/s 的部分对 45#钢靶侵彻能力较低,文中将速度高于 1 000 m/s 的射流部分称为有效杆式射流。方案 I 中有效杆式射流质量约占药型罩总质量的 52.60%,方案 II 为 85.85%,方案 III 为 52.20%。综合以上分析,方案 II 形成的杆式射流侵彻能力优于方案 I,方案 III 最差。侵彻靶板仿真结果见图 3。

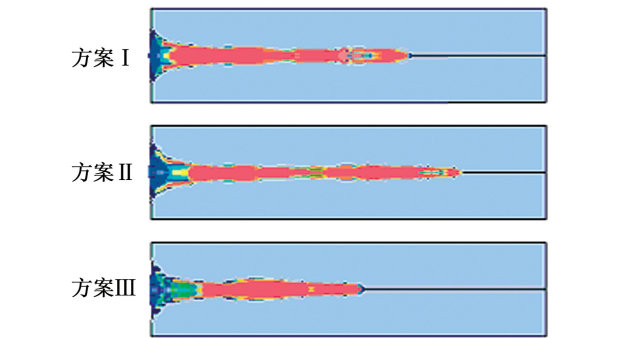


图 3 3 种方案侵彻靶板仿真结果

Fig. 3 Simulation results of target penetration in three schemes

### 3 试验研究

#### 3.1 试验安排

试验所用药柱采用 8701 炸药压制而成,炸药药柱直径为 55 mm,炸药药柱高度为 52 mm,起爆方式均为中心点起爆;球缺罩由紫铜板冲压而成,球缺罩口部外径 52 mm;壳体材料为 45#钢,壳体壁厚 2.1 mm,3 种球缺罩方案外半径保持一致,仅改变罩内半径与罩内外圆心距,并保证球缺罩的质量不变,详细参数见表 2。

试验布置见图 4 所示,木架高度 1.1 m(即 20 倍装药直径),靶板为 $\varnothing 150$  mm 的 45#钢,靶厚 90 mm。

#### 3.2 试验结果与分析

对以上 3 种方案进行静破甲试验,侵彻结果如图 5~图 7 所示,侵彻开坑数据见表 3。从试验结果可以看出,所有试验的入口孔径都大于 0.5 倍装药直径,且方案 II 的最大穿深超过 90 mm,将试验布置中的 45#钢靶完全穿透。

### 4 结论

通过对 3 种等质量变壁厚球缺罩形成杆式射流过程的数值模拟及侵彻靶板的试验研究,可以得出

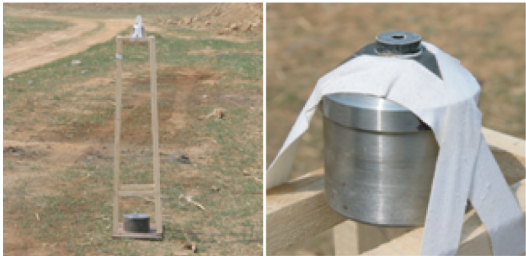


图 4 试验布置

Fig. 4 Test arrangements



(a)正面 (b)背面

图 5 方案 I 侵彻结果

Fig. 5 Penetration results in scheme I



(a)正面 (b)背面

图 6 方案 II 侵彻结果

Fig. 6 Penetration results in scheme II



(a)正面 (b)背面

图 7 方案 III 侵彻结果

Fig. 7 Penetration results in scheme III

表 2 试验参数

Tab. 2 Test parameters

方案	药型罩参数			装药参数		炸高与装药直径之比
	罩内表面半径/mm	圆心距/mm	罩质量/g	装药量/g	装药密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	
I	25.7	0	54.5	146.9	1.704	20
II	26.7	1.5	54.8	146.7	1.702	20
III	24.4	1.8	54.6	147.1	1.706	20



表 3 试验侵彻数据  
Tab.3 Penetration data in test mm

方案	平均入口直径	平均侵彻深度	仿真计算值
I	32	80.3	113
II	31	85.7	135
III	35	68.4	92

以下结论:

- 1)数值模拟表明,在球缺罩质量与外半径不变的情况下,壁厚的变化会导致杆式射流形成过程的差异。
- 2)中间厚边缘薄球缺罩产生的杆式射流具有最小的速度梯度。
- 3)试验结果表明,在装药量与炸高相同时,3 种方案形成的杆式射流对 45# 钢靶侵彻深度为:中心厚边缘薄球缺罩最大,等壁厚球缺罩次之,中心薄边缘厚球缺罩最小。

参 考 文 献

[1] 付建平,杨慧群,李小军,等. 小口径聚能杆式射流的数值模拟与试验研究[C]//第十六届中国科协年会第九分会场含能材料及绿色民爆产业发展论坛论文集,昆明:中国兵工学会,2014:94-98.

[2] BLACHE A, WEIMANN K. Shaped charge with jetting projectile for extended targets [C]//17th International Symposium on Ballistics. Midrand, South Africa: The South African Ballistic Organization,1998:207-215.

[3] MATTSSON K,SORENSEN N,OUVE R. Development of the K-charge,a short L/D shaped charge[C]//Reinecke W G. 18th International Symposium on Ballistics. San An-

tonio,Texas,Terminal Ballistics Vulnerability Wound Ballistics,1999:528-534.

[4] 谭多望,孙承纬,赵继波,等. 大锥角聚能射流实验研究[J]. 高压物理学报,2003,17(3): 204-208.  
TAN D W,SUN C W. ZHAO J B, et al. Experimental investigation of shaped charge with large cone angle[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2003,17(3): 204-208.

[5] 王成,恽寿榕,黄风雷. 大锥角聚能装药射流形成及对多层靶侵彻的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2003,23(4):349-354.  
WANG C, YUN S R, HUANG F L. Numerical simulation of jet formation by wide angle shaped charge and penetration into multi-layer targets [J]. Explosion and Shock Waves,2003,23(4):349-354.

[6] 黄风雷,张雷雷,段卓平. 大锥角药型罩聚能装药侵彻混凝土实验研究[J]. 爆炸与冲击,2008,28(1):17-22.  
HUANG F L, ZHANG L L, DUAN Z P. Shaped charge with large cone angle for concrete target [J]. Explosion and Shock Waves,2008,28(1):17-22.

[7] 黄正祥. 聚能杆式侵彻体成型机理研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.  
HUANG Z X. Investigation on formation mechanism of rod shaped penetrator[D]. Nanjing:Nanjing University of Science & Technology, 2003.

[8] 李伟兵,王晓鸣,李文彬,等. 装药长径比对聚能杆式侵彻体成型的影响[J]. 弹道学报,2011,23(4):61-65.  
LI W B, WANG X M, LI W B, et al. Effect of length-diameter ratio of charge on jetting projectile charge forming[J]. Journal of Ballistics, 2011,23(4): 61-65.

Formation and Penetration Performances of Jetting Penetrator Charge  
of Hemispherical Liners with Variable Thickness

ZHANG Jun<sup>①</sup>, CHEN Zhigang<sup>①</sup>, LI Xiaojun<sup>②</sup>, YU Xiaojie<sup>③</sup>, GUO Guangquan<sup>④</sup>, LÜ Huizhen<sup>④</sup>

①National defense Key Laboratory of Underground Damage Technology, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

② Research Institute of Chemical Defense, PLA (Beijing, 102205)

③Beijing Army Generation Bureau, General Equipment Department (Beijing, 100042)

④ Jinxi Industries Group Co. , Ltd. (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ ABSTRACT] In order to study the effect of liner configuration on the formation of jetting penetrator charge of hemispherical liners with variable thickness, three hemispherical liners with equal mass were designed, including equal-thick liner, center thicker liner and edge thicker liner. LS-DYNA software was used to simulate the formation and penetration of jetting penetrator charge. And the experiment of jet penetrating against target was carried out at long charge diameters standoff distances. Results show that liner configuration leads to the dissimilar way of rod like jet formation, and liner configuration has a significant influence on shape and velocity of jet. Jetting penetrator charge with the center thicker liner presents the best penetration performance, the equal thick liner follows, and the edge thicker liner is the worst.

[ KEY WORDS] shaped charge; jetting penetrator charge; hemispherical liner; thickness; numerical simulation