

# 串联药型罩中心圆柱高度对射流的影响\*

李喜锋<sup>1</sup>, 陈智刚<sup>1</sup>, 侯秀成<sup>1</sup>, 李惠明<sup>2</sup>

(1 中北大学地下目标毁伤技术重点学科实验室, 太原 030051;

2 武汉军械士官学校, 武汉 430075)

**摘要:** 为了提高药型罩有效射流量以及对钢靶的侵彻深度, 设计了五种不同中心圆柱高度的串联药型罩, 并利用有限元软件 LS-DYNA 对不同中心圆柱高度的串联药型罩装药结构射流的成形以及对钢靶的侵彻过程进行了数值模拟研究, 然后配以相应的炸药装药进行试验研究。对研究结果进行了简要的比较分析, 结果表明, 合适的中心圆柱高度要比太高或者太低的中心圆柱高度的装药结构形成的射流头部速度更高, 侵彻钢靶更深, 且数值模拟与试验研究所得结论基本吻合。

**关键词:** 串联药型罩成型装药; 中心圆柱; 射流成形; 靶板侵彻

**中图分类号:** TJ410.333 **文献标志码:** A

## The Influence of Series Liner's Center Cylinder Height on Jet

LI Xifeng<sup>1</sup>, CHEN Zhigang<sup>1</sup>, HOU Xiucheng<sup>1</sup>, LI Huiming<sup>2</sup>

(1 National Defense Key Laboratory of Underground Target Damage Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2 Wuhan Ordnance N. C. O School, Wuhan 430075, China)

**Abstract:** To further improve effective jet of liner and depth of steel target penetration, five structures of series liner were designed by different center cylindrical height. Numerical simulation of different center cylindrical height of liner series' jet forming and the penetration of steel targets was done with the finite element software LS-DYNA, then accompanied by the appropriate test of explosive charge. Essential analysis and conclusion have been drawn out. It can be concluded from the results that the velocity of front jet formed by the charge structure with proper center cylindrical height is higher than the one with too high or too low center cylindrical height, and the penetration of the former is deeper, the numerical simulation basically agrees with the experimental study.

**Keywords:** tandem shaped charge liner; center cylinder; jet formation; target penetration

### 0 引言

近些年来, 在防护装甲和破甲弹的不断竞争发展中, 出现了许多采用先进技术的装甲, 如复合装甲、间隙装甲和爆炸式反应装甲等, 使普通穿甲弹的穿深大大下降。针对此问题, 文中提出的整体(同口径)串联装药结构比传统的单罩形成的有效射流多、速度大、威力与破甲深度有大幅提高, 具有明显优势。而此装药结构前级中心圆柱高度非常重要, 如果控制不好, 不仅会影响连续射流的有效长度, 还会影响到连续射流各自的作用效果。国内外鲜有这类的研究文章, 故而研究了不同中心圆柱高度的整体串联装药射流的形成以及侵彻靶板的深度, 得到了比较合适的中心圆柱高度, 具有重要的工程应用价值。

### 1 整体串联结构中心圆柱高度的描述

文中所述的整体串联装药结构是在常规聚能装药结构技术的基础上拓展引申的一种装药结构, 用于

增大破甲深度与孔径, 达到大幅增加稳定生成且相互

加强的呈同轴分布的金属射流量的目的。整体串联结构装药中心圆柱高度( $h$ ), 即前级药型罩顶端圆柱部分的高度, 如图1所示。设计中心圆柱的初衷是为了增加前级的装药量, 并且圆柱部分也可认为是 $0^\circ$ 角的药型罩产生更高速的射流。但是圆柱部分也会产生一定量的反向射流, 使前后两级药型罩形成的射流发生内耗, 从而降低了破甲威力。所以选择合适的中心圆柱高度具有重要意义。

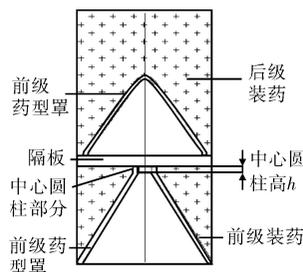


图1 整体串联装药结构中  
心圆柱高度

该装药结构直径为40mm, 药型罩材料为紫铜, 前级药型罩中心圆柱半径为2mm, 壁厚1mm, 锥角 $40^\circ$ ; 后级药型罩壁厚0.8mm, 锥角 $50^\circ$ , 两级间为与药型罩材料相同的隔板。分别对五种不同的前级药型罩中心圆柱高度( $h$ ), 即: $h=0\text{mm}, 1.0\text{mm}, 2.0\text{mm}, 3.0\text{mm}, 4.0\text{mm}$ 的药型

\* 收稿日期: 2011-04-14

作者简介: 李喜锋(1985-), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向: 弹箭远程与高效毁伤技术。

罩装药结构所形成的射流进行研究。

## 2 数值模拟

### 2.1 计算模型及材料模型

文中有限元网格划分的几何模型用 Truegrid 前处理软件建立,因聚能装药为轴对称结构,所以模型采用 1/4 结构,其有限元模型见图 2。利用 LS-DYNA 中成熟的 ALE 算法<sup>[1-2]</sup>、流固耦合算法及较为完善的材料模型等特点对五种不同圆柱高度的聚能装药射流的形成及其侵彻过程进行数值模拟计算。在计算过程中,靶板厚度为 350mm,采用单点起爆方式。炸药为 8701<sup>[3]</sup>,选用高能炸药爆轰模型(HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN),状态方程为 JWL 方程;空气采用 NULL 材料模型和 LINEAR-POLYNORMAL 状态方程来描述。计算中对金属的材料变形<sup>[4]</sup>采用 Johnson-Cook Grüneisen 方程进行描述,可获得五种聚能装药对钢靶侵彻的结果参数。

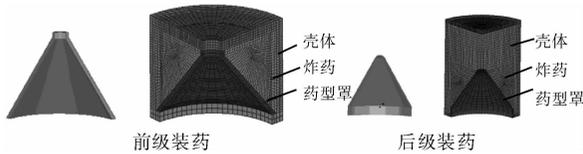


图 2 装药结构有限元模型

### 2.2 射流形成的数值模拟

对前文提到的不同中心圆柱高度( $h$ )的五种药型罩装药结构进行数值模拟。起爆后,在  $30\mu\text{s}$  时,所形成的射流如图 3 所示。

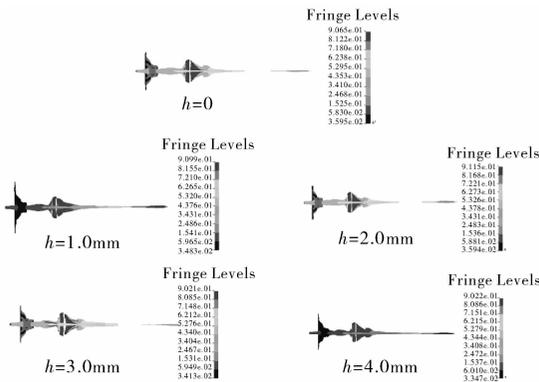


图 3  $30\mu\text{s}$  时不同中心圆柱高度( $h$ )药型罩射流形成云图

利用 LS-DYNA 后处理软件测量工具精确测量后,得到各射流的基本参数见表 1。

表 1  $30\mu\text{s}$  时 侵彻钢靶前射流参数

中心圆柱高度 $h/\text{mm}$	射流头部速度 $v_j/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	射流尾部速度 $v_t/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	射流长度 $L/\text{mm}$
$h=0$	9064	1525	154.3
$h=1.0$	9099	1541	162.6
$h=2.0$	9115	1534	167.9
$h=3.0$	9020	1531	150.1
$h=4.0$	9022	1537	147.9

由表 1 可知,这种同口径的串联药型罩装药结构形成的射流均有较高的头部速度以及较大的头尾速度差,均能达到后级射流先行,前级射流随进的效果,均能够形成较长的金属射流,提高了抗拉断能力,保证了侵彻效果,从而证明了该装药结构的优越性。

五种不同圆柱高度的装药结构所形成射流的头尾部速度差异并不十分明显,但其射流长度有明显不同:当  $h=2.0\text{mm}$  时,射流长度最长,当  $h<2.0\text{mm}$  时,射流长度略有下降,当  $h>2.0\text{mm}$  时射流长度明显降低,而射流的长短会直接影响其侵彻效果。

### 2.3 射流侵彻靶板的数值模拟

对形成的五种不同射流侵彻靶板进行数值模拟,其侵彻过程基本相同,只是射流的拉断时间有所差异,体现在其侵彻深度上。计算到在  $200\mu\text{s}$  时,350mm 的钢靶未穿透,射流头部速度基本均已降到了  $2000\text{m/s}$  以下,其侵彻效果如图 4 所示。

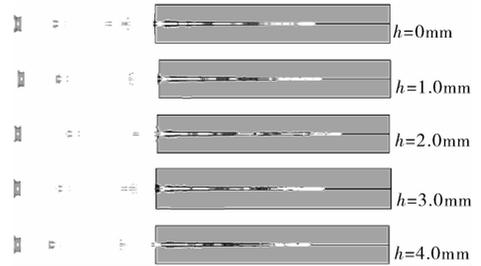


图 4  $200\mu\text{s}$  时五种射流侵彻靶板效果

经后处理工具测量,得到各射流穿深如表 2 所列。

表 2  $200\mu\text{s}$  时射流侵彻靶板深度

中心圆柱高度 $h/\text{mm}$	$h=0.0$	$h=1.0$	$h=2.0$	$h=3.0$	$h=4.0$
侵彻靶板深度 $L/\text{mm}$	278.9	295.6	309.5	273.7	266.1

为了更清楚比较五种射流在各时段侵彻钢靶的深度,利用 origin 软件绘制出了各射流在不同时刻的侵彻深度曲线如图 5 所示。

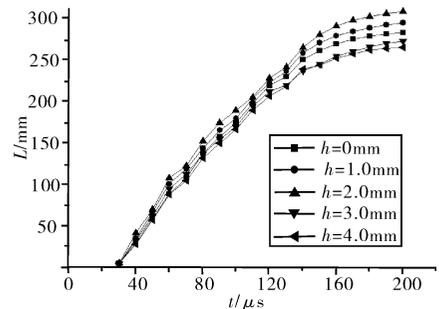


图 5 五种射流在不同时刻的侵彻深度比较

从上可知, $h=2.0\text{mm}$  时,穿深最大,当  $h<2.0\text{mm}$  时,穿深有所下降,当  $h>2.0\text{mm}$  时,穿深明显降低。分析其原因在于增加中心圆柱的高度可以增加整个装药结构的装药量以及提高射流的头部速度,这对其破甲深度有着正影响;而圆柱部分产生的反向

射流又会使前后级药型罩形成的射流发生内耗,这又对其破甲深度有负影响;在这两种影响的综合作用下,就出现了如上所示的穿深差异,初步验证了引言中所述的反向射流对穿深的影响。

### 3 试验研究

#### 3.1 试验装置

为进一步验证不同中心圆柱高度( $h$ )的五种药型罩的侵彻性能,开展了该装药侵彻目标的验证试验。为了节省材料,选用中心圆柱高度  $h=0\text{mm}$ 、 $1.0\text{mm}$ 、 $2.0\text{mm}$ 、 $3.0\text{mm}$ 、 $4.0\text{mm}$  的药型罩装药结构各一进行试验研究。

试验中使用的药型罩为紫铜棒材车制而成,药型罩结构尺寸与数值模拟中使用的结构尺寸相同,整个装药结构外部包覆  $2\text{mm}$  的钢质壳体,采用电雷管中心点起爆,靶板为厚度  $300\text{mm}$  的  $45\#$  钢靶。图 6 为试验装置图。



图 6 试验装置

#### 3.2 试验结果及分析

试验后,为了精确测量射流的破甲深度,对钢靶进行了纵向切割,得出了射流侵彻靶板后的剖面图,如图 7 所示。

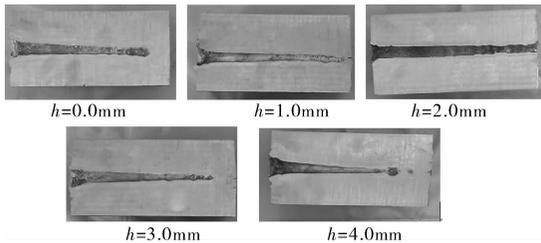


图 7 射流侵彻后靶板剖面

经精确测量,得出各射流穿深如表 3 所列。

表 3  $200\mu\text{s}$  时射流侵彻靶板深度

中心圆柱高度 $h/\text{mm}$	$h=0$	$h=1.0$	$h=2.0$	$h=3.0$	$h=4.0$
侵彻靶板深度 $L/\text{mm}$	263.7	283.3	穿透	272.5	256.7

由上可得, $h=2.0\text{mm}$  的药型罩装药结构完全穿透  $300\text{mm}$  钢靶; $h=1.0\text{mm}$ 、 $3.0\text{mm}$  的药型罩装药结构未穿透,但钢靶下表面均有小鼓包和裂纹; $h=0\text{mm}$ 、 $4.0\text{mm}$  的药型罩装药结构穿深远远小于其它的装药结构。进一步验证了圆柱部分产生的反向射

流,降低了破甲威力原因。孔洞处明显有铜材料附着,究其原因在于开坑过程中,前端射流受到后续射流的推动,向四周扩散从而附着在钢靶的孔洞处,且实验研究结果与数值仿真结果基本吻合。

### 4 结论

文中对不同中心圆柱高度( $h$ )的五种药型罩整体串联装药结构的射流成型和侵彻靶板的过程进行了数值模拟计算和试验验证,结果表明这五种药型罩射流参数及侵彻特性有明显差异。主要结论如下:

1) 文中提出的这种不同中心圆柱高度但同口径的串联药型罩装药结构均能很好的形成射流,能达到后级射流先行,前级射流随进的效果,射流均有较高的头部速度和较大的头尾速度差,以及较长的金属射流,提高了抗拉断能力,保证了侵彻效果,从而证明了该装药结构的优越性。

2) 设计中心圆柱部分增加前级的装药量,并且圆柱部分也可认为是  $0^\circ$  角的药型罩产生更高速的射流。 $h=2.0\text{mm}$  的药型罩装药结构的穿深要比  $h=1.0\text{mm}$ 、 $3.0\text{mm}$  的药型罩装药结构穿深高  $8.4\%$  以上;比  $h=0\text{mm}$ 、 $4.0\text{mm}$  的药型罩装药结构穿深高  $15.1\%$  以上。究其原因为圆柱部分会产生一定量的反向射流,使前后两级药型罩形成的射流发生内耗,降低了破甲威力,从而得出  $h=2.0\text{mm}$  的药型罩装药结构为比较合理的装药结构。

3) 试验研究中,射流侵彻钢靶的深度低于数值模拟的结果,其原因为数值模拟各种条件较实际情况理想,但二者的侵彻钢靶规律是基本吻合的。为下一步的设计研究由其它装药口径,特别是大口径整体串联结构装药的中心圆柱高度的研究提供技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 赵海鸥. LS-DYNA 动力学分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社,2003.
- [2] 时党勇,李裕春,张胜民,基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显示动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:3-4.
- [3] 董海山,周芳芳. 高能固体炸药及相关物性[M]. 北京:科学出版社,1995.
- [4] T J Holmquist, G R Johnson, W H Cook. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures[C]//14th International Symposium on Ballistics,1995.