

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.02.005

# 偏心亚半球成型装药结构的数值模拟\*

姚志华 李德战 付庆海 吴川

空军场务技术试验中心(山东济宁,272000)

[摘要] 为研究起爆方式、药型罩的高度和曲率半径对偏心亚半球装药形成射流的影响,利用 LS-DYNA 有限元分析软件对偏心亚半球装药结构射流形成过程进行数值模拟,分析了其成型过程。研究表明:对于偏心亚半球装药结构,端面环起爆形成的爆轰波形和药型罩外形匹配较好。药型罩的高度和口径比值  $H/A < 0.2$  时,形成爆炸成形弹丸; $H/A \geq 0.2$  时,形成杆式侵彻体。 $H/A$  值越大,弹体越细长,头尾速度差越大,有分裂成高速射流和低速杆体的趋势。曲率半径和口径比值  $R/A \geq 1.5$  时,形成的射流具有较好的外形和较高的速度。

[关键词] 爆炸力学 偏心亚半球 射流 数值模拟

[分类号] TP69 O383

## 引言

随着现代装甲目标防护能力的提高,尤其是高强度装甲钢的研制以及非金属材料、陶瓷等复合装甲的广泛应用,都对聚能装药威力提出了更高要求。如何通过改变药型罩结构来提高成型装药聚能射流威力一直是国内外学者们研究的热点之一。

多年来,从未间断对成型装药新结构、新技术的探索,如早期研究的喇叭形、变壁厚药型罩、双锥罩等,目前研究的分离式药型罩、罩环锥式药型罩、W形药型罩、星锥罩<sup>[1-2]</sup>等,都是为对付防护能力不断增强的装甲目标而提出的新型成型装药的药型罩结构。为了在大炸高下提高射流的连续性和侵彻能力,杆式射流<sup>[3-6]</sup>成为了研究的新热点。

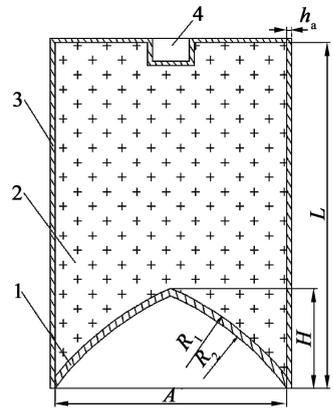
本文应用有限元软件对等壁厚偏心亚半球罩形成射流的过程进行数值模拟,分析了起爆方式、药型罩高度和曲率半径对等壁厚偏心亚半球罩形成侵彻体性能的影响。

## 1 偏心亚半球装药结构及几何模型

偏心亚半球装药结构如图1所示,其几何结构参数主要有:药型罩直径  $A$ ,药型罩罩高  $H$ ,药型罩外曲率半径  $R_1$ ,内曲率半径  $R_2$ 。装药直径与药型罩口径相同,装药长度  $L$ ,壳体厚度  $h_a$ 。

模型参数为:药型罩口径  $A = 100$  mm,药型罩罩高  $H = 30$  mm,药型罩外曲率半径  $R_1 = 134$  mm,内曲率半径  $R_2 = 130$  mm。装药直径与药型罩口径相同,装药长度  $L = 150$  mm。壳体厚度  $h_a = 2$  mm。

## 2 数值模拟



1 - 药型罩;2 - 炸药;3 - 壳体;4 - 起爆装置

图1 偏心亚半球装药结构简图

Fig. 1 The structure sketches of the new cone-shaped liner

## 2.1 数值模拟算法和材料参数选择

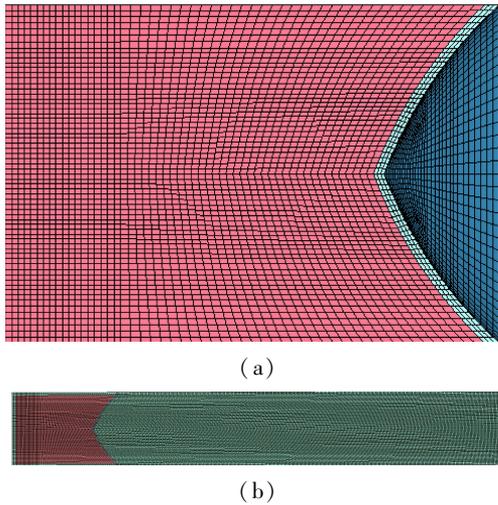
使用 Truegrid 前处理软件建立等壁厚偏心亚半球罩成型装药的有限元模型。鉴于该结构为轴对称结构,为节约计算所用时间,采用实体结构的 1/4 建立有限元模型(图2)。

有限元模型中采用多物质 Euler 算法模拟药型罩、炸药和空气,网格均选用 solid164 八节点六面体单元,整体有限元模型中共包括 418125 节点和 401840 单元。药型罩材料选用紫铜,材料模型采用 \*MAT\_JOHNSON\_COOK,状态方程采用 GRUNEISEN 状态方程;炸药选用 8701 炸药,材料方程为 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 高能材料模型,状态方程为 JWJ 状态方程;空气材料采用流体材料模

\* 收稿日期:2012-09-13

作者简介:姚志华(1984~),男,硕士,工程师,研究方向:弹箭仿真技术。E-mail:364124843@qq.com

型:MAT\_NULL, 状态方程采用线性多项式:EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程<sup>[7-9]</sup>。药型罩、炸药的具体参数值见表 1 和表 2<sup>[10-11]</sup>。



(a) 战斗部有限元模型; (b) 整体有限元模型

图 2 有限元模型

(a) The finite-element model of the warhead  
(b) The finite-element model of the whole structure

Fig. 2 The finite-element model

表 1 铜材料模型参数<sup>[2]</sup>

Tab. 1 Parameters of copper

材料	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	屈服强度/ MPa	杨氏模量/ GPa
铜	8.96	90	46

表 2 8701 炸药材料模型参数<sup>[2]</sup>

Tab. 2 Parameters of 8701 explosion material

材料	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	爆速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	爆压/ GPa
8701	1.69	8300	29.6

## 2.2 数值模拟结果与分析

### 2.2.1 起爆方式对形成侵彻体的影响

为研究起爆方式对偏心亚半球药型罩形成杆式射流的影响,本文对装药长径比为 0.75、1.00、1.50 的偏心亚半球装药结构分别采用顶端点起爆、中心线起爆和环起爆,在其它参数不变情况下进行数值模拟。表 3 为不同装药长径比在不同起爆方式下的计算结果。

由表 3 可知,在装药长径比相同情况下,3 种起爆方式形成射流的射流长度以及头部速度依次为环形起爆方式最大,点起爆方式次之,中心线起爆的最小,而射流的尾部速度则变化不太明显。出现上述情况的原因是不同起爆方式下形成的爆轰波的波形不同。

表 3 不同装药长径比、起爆方式下在 160 $\mu s$  时的计算结果

Tab. 3 The results of the numerical simulation with different  $H/A$  and initiation methods at 160 $\mu s$

起爆方式	参数	长径比		
		0.75	1.00	1.50
点起爆	射流长度/mm	250	260	286
	射流头部速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	2565	2859	3222
	射流尾部速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	1036	1281	1176
线起爆	射流长度/mm	235	233	277
	射流头部速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	2440	2491	2434
	射流尾部速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	1086	1211	1252
环起爆	射流长度/mm	425	411	301
	射流头部速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	3715	3920	3959
	射流尾部速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	1081	1159	2312

点起爆后形成球面爆轰波,线起爆后形成柱面波,环形起爆后形成“喇叭形”爆轰波,3 种波形波阵面与药型罩法线之间的夹角依次减小,夹角越小,药型罩微元的压合速度则越大,罩微元的偏转角也减小,即降低了罩微元的压合角,由于以上两种原因的共同作用,使得射流速度和射流长度都得到了明显提高。

所以,环形起爆方式形成射流的各项性能参数要明显优于点起爆方式和中心线起爆方式。

### 2.2.2 药型罩高度对形成侵彻体的影响

为研究药型罩高度对偏心亚半球药型罩形成侵彻体的影响,本文分别对药型罩高度为 10mm、15mm、20mm、25mm、30mm、35mm 和 40mm 的偏心亚半球装药结构在其他参数不变情况下进行数值模拟。

计算结果如图 3 和图 4 所示。计算结果表明:当  $H/A < 0.2$  时,形成的侵彻体长径比较小,即形成

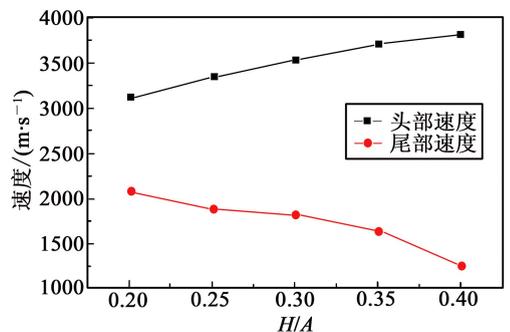


图 3 不同罩高在  $t = 150 \mu s$  时形成侵彻体的头尾速度

Fig. 3 The jet's velocity of metallic jet and slug with different linear height at 150  $\mu s$

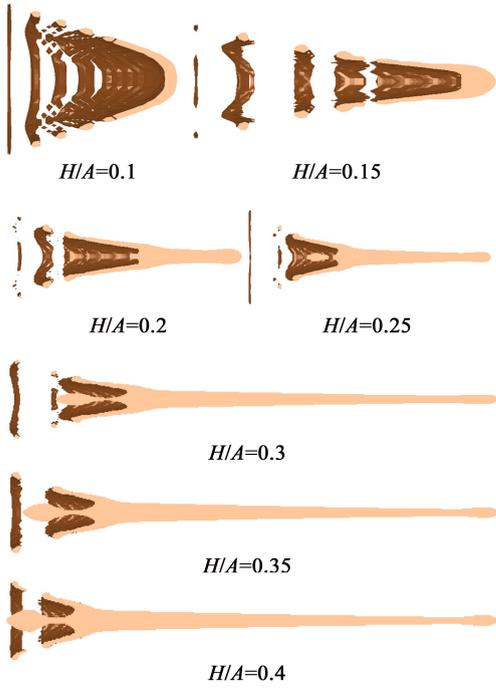


图4 不同罩高在  $t = 150 \mu\text{s}$  时形成侵彻体的外形

Fig. 4 The shape of formation penetration with different linear height at  $150 \mu\text{s}$

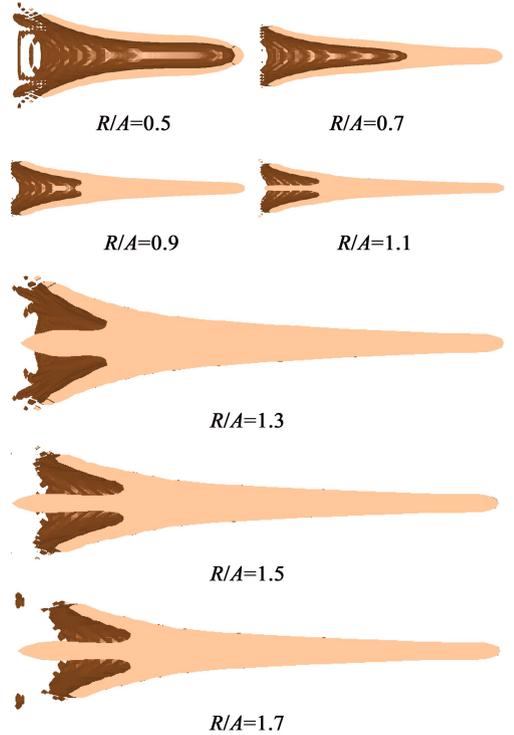


图5 不同药型罩曲率半径在  $t = 150 \mu\text{s}$  时形成侵彻体的外形

Fig. 5 The shape of formation penetration with different linear radius at  $150 \mu\text{s}$

爆炸成形弹丸。当  $H/A \geq 0.2$  时,形成的侵彻体变得细长,即形成杆式射流。随着  $H/A$  值的继续增大,弹体头尾速度差明显变大,具有典型聚能射流的特点。

### 2.2.3 内外曲率半径对形成侵彻体的影响

为研究药型罩曲率半径对偏心亚半球药型罩形成侵彻体的影响,在其他参数不变情况下,分别对曲率半径为 90mm、110mm、130mm、150mm 和 170mm 的偏心亚半球装药结构进行数值模拟。计算结果见表 4,其中,  $v$  为射流头部速度,  $v_0$  为射流尾部速度,  $L_0$  为射流长度。

表4 不同曲率半径  $150 \mu\text{s}$  时的计算结果

Tab. 4 The results of the numerical simulation with different linear radius at  $150 \mu\text{s}$

$R/\text{mm}$	$L_0/\text{mm}$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
90	188	3805	1732
110	205	3910	1786
130	234	3959	1831
150	235	4022	1865
170	237	4076	1884

由表4和图5可知:侵彻体头、尾速度、射流长度随  $R/A$  值增大都增加。随  $R/A$  值增大,侵彻体头部逐渐变得更加密实,尾部围裙逐渐减小。考虑到侵彻体的气动特性和速度等因素,取  $R/A \geq 1.5$  较

为合理。

### 3 结论

通过对偏心亚半球成型装药结构的数值模拟,可以得出以下结论:

- 1) 对于偏心亚半球装药结构,顶端环起爆形成的射流性能要优于端面起爆和中心线起爆。
- 2) 当药型罩的高度和直径的比值  $H/A < 0.2$  时,形成爆炸成形弹丸。当  $H/A \geq 0.2$  时,形成杆式侵彻体。 $H/A$  值越大,有分裂成高速射流和低速杆体的趋势。
- 3) 射流头、尾速度、射流长度随曲率半径和直径比值  $R/A$  值增大而增大。侵彻体头、尾速度,射流长度随  $R/A$  值增大都增加。随  $R/A$  值增大,侵彻体头部逐渐变得更加密实,尾部围裙逐渐减小。考虑到侵彻体的气动特性和速度等因素,取  $R/A \geq 1.5$  较为合理。

### 参考文献

[1] 王志军,吴国东.一种新型星锥状药型罩形成射流的数值模拟[J].兵工学报,2007,28(11):1397-1400.  
Wang Zhijun, Wu Guodong. Numerical simulation on jet formation of a new star shaped liner [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(11): 1397-1400.

[2] 范晨阳,王志军,吴国东.星锥状药型罩形成射流侵彻混凝土的数值模拟[J].弹箭与制导学报,2010,30

- (3):99-102.
- Fan Chenyang, Wang Zhijun, Wu Guodong. Numerical simulation on jet formation and projectile into concrete target of a new star shaped liner[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010,30(3):99-102.
- [3] 李成兵,裴明敬,沈兆武. 高速杆式弹丸三维数值模拟[J]. 高压物理学报,2007,21(2):165-172.
- Li Chengbing, Pei Mingjing, Shen Zhaowu. Three-dimensional numerical simulation of the high velocity rod-shaped projectile [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007,21(2):165-172.
- [4] Fred I, Stanley G, Golaski K. Hydrocode computations and experimented investigations of explosive staged shaped charge devices, AD-A109714 [R]. US: AD, 1981.
- [5] 张雷雷,朱鸿瑞,黄风雷. 大锥角药型罩聚能装药结构对混凝土介质侵彻研究[J]. 火箭与制导学报,2007,27(3):134-146.
- Zhang Leilei, Zhu Hongrui, Huang Fenglei. Shaped charge with large cone angle penetration to concrete target [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance,2007,27(3):134-146.
- [6] 吴晗玲,段卓平,汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击,2006,26(4):328-332.
- Wu Hanling, Duan Zhuoping, Wang Yongqing. Simulation investigation of rod-like jets [J]. Explosion and Shock Waves. 2006,26(4):328-332.
- [7] 曹德青,恽寿榕,丁刚毅,等. 用 ALE 方法实现射流侵彻靶板的三维数值模拟[J]. 北京理工大学学报,2000,20(2):171-173.
- Cao Deqing, Yun Shourong, Ding Gangyi, et al. 3-D Numerical simulation of jet penetrate target using ale method [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology. 2000, 20(2):171-173.
- [8] 段卓平,张震宇. 杆式射流形成的初步研究[J]. 火箭与制导学报,2004,24(4):308-310.
- Duan Zhuoping, Zhang Zhenyu. Elementary study of the rod-liked jet formation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004,24(4):308-310.
- [9] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS DYNA 8.1 进行显示动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:282-297.
- Shi Dangyong, Li Yuchun, Zhang Shengmin. Explicit dynamic analysis using ANSYS/LS DYNA 8.1 [M]. Beijing: Qinghua University Press,2005:282-297.
- [10] 张会锁,赵捍东,黄延平,等. 起爆方式对聚能射流影响的数值仿真研究[J]. 含能材料,2008,16(4):415-419.
- Zhang Huisuo, Zhao Handong, Huang Yanping, et al. Numerical simulation of effect of ignition ways on shaped charge jet [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008,16(4):415-419.
- [11] 成风生,宋浦,顾晓辉,等. TNT 装药爆炸波在刚性平面上方传播反射的数值研究[J]. 爆破器材,2011,40(4):1-4.
- Cheng Fengsheng, Song Pu, Gu Xiaohui, et al. Numerical investigation into the propagation and Reflection of TNT blast wave above rigid ptane [J]. Explosive Material,2011,40(4):1-4.

## Numerical Simulation of Shape Charge with an Eccentric Sub-hemisphere Liner

YAO Zhihua, LI Dezhao, FU Qinghai, WU Chuan

Airfield Technology Test Center of Airforce (Shandong Ji'ning, 272000)

[ABSTRACT] In order to study the effect of initiation methods, heights and radius of liner on the formation of jet, LS - DYNA software was used to numerically simulate and analyze the formation process of jet in this paper. The research shows that, for the eccentric sub - hemisphere charge structure, it proved to be better when the shape of detonation wave under annular initiation matches the outside shape of the liner. The linear forms the explosively formed projectile, when the ratio between height and diameter ( $H/A$ )  $< 0.2$ . The linear forms the rod projectile, when the ratio  $H/A \geq 0.2$ . The greater  $H/A$  value, the more slender the projectile body could be, and the greater the speed difference between the head jet and the tail jet comes to be. There is the trend that the linear forms the high - speed jet and the low speed slug. The formed jet has the good shape and high speed, when the ratio between radius and diameter ( $R/A$ )  $\geq 1.5$ .

[KEY WORDS] explosion mechanics, eccentric sub - hemisphere, jet, numerical simulation

## 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部