

文章编号: 1006-9941(2014)02-0230-05

# VESF 材料与结构参数对 JPC 成型影响的数值模拟

高淑萍<sup>1</sup>, 王志军<sup>1</sup>, 董方栋<sup>1</sup>, 张新<sup>2</sup>, 毕春艳<sup>3</sup>

(1. 中北大学机电工程学院, 山西太原 030051; 2. 96518 部队, 湖南怀化 418000; 3. 太原重型机械集团有限责任公司, 山西太原 030051)

**摘要:** 采用非线性动力学分析软件 AUTODYN-2D 数值仿真分析了 VESF 对聚能杆式射流 (JPC) 成型的影响, 获得了不同 VESF 材料、形状 (K 字形, 矩形, 三角形) 及其与主装药间距下侵彻体成型的仿真结果。结果表明, 随着 VESF 材料密度的增加及其与主装药间距的增大, 主装药起爆点由中心逐渐向外过渡; 不同横断面形状的 VESF 也可形成不同的起爆方式, K 字形与矩形时为点起爆, 三角形时为面起爆。在本研究条件下, VESF 材料为钢, 横断面为 K 字型与主装药距离为 6 mm 的, JPC 成型效果最佳。

**关键词:** 爆炸力学; VESF; 爆轰波形; 杆式射流; 数值模拟

**中图分类号:** TJ414; O38

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.021

## 1 引言

聚能杆式射流 (Jetting Projectile Charge, JPC) 是一种头部速度高、具有一定速度分布、长径比较大的弹丸, 兼有射流速度高、侵彻能力强和爆炸成型弹丸药型罩质量利用率高、大炸高性能好的特点, 可用于对抗坦克或其它装甲武器系统, 摧毁反应装甲和陶瓷装甲, 也可作为串联战斗部的前级装药, 为后级主装药开辟侵彻通道。这种特殊性能的弹药是 20 世纪 90 年代才发展起来并正在转入应用的一种新型装药<sup>[1-3]</sup>。

聚能杆式射流的形成主要通过改变起爆方式来实现, 理论上起爆方式有点起爆、面起爆和环起爆, 但实际上面起爆与环起爆不能直接实现, 而是通过设置多个点代替面起爆与环起爆<sup>[4]</sup>。传统控制爆轰波波形的方法是在聚能装药中设置一定形状的隔板用来调整爆轰波形, 使爆轰波阵面与药型罩外壁的夹角减小, 以增大作用在药型罩上的压力从而增大药型罩的压垮速度和压垮角, 实现高速的杆式射流。在实验和生产中发现, 有隔板的聚能侵彻体比没有隔板的在侵彻深度上存在一定不稳定性, 其主要原因在于隔板引起爆轰波形的不对称和不稳定。为了获得期望的爆轰波形, Blanche A<sup>[5]</sup> 等采用 VESF 起爆系统, 其基本结构是在普通爆炸成型装药基础上增加一个 VESF。VESF 又称蝶形起爆装置

(波形调整器), 是形状特殊的金属或塑料板, 与主装药有一定间隙, 雷管起爆后, 辅助装药驱动 VESF 撞击并起爆主装药, 形成环起爆或平面起爆, 通过调节 VESF 的形状、材料及其与主装药的间距, 在主装药中形成期望的爆轰波形, 从而获得高速的杆式射流<sup>[1,6-7]</sup>。

已有研究<sup>[1,5]</sup> 均未具体对上述观点进行模拟和试验, 因此, 本研究利用 AUTODYN-2D 软件就 VESF 的材料、形状及其与主装药的间距对侵彻体成型的影响进行了数值模拟, 得到不同情况下注装药的起爆方式, 此研究可为战斗部起爆方式设计和工程应用提供一定参考。

## 2 计算模型

### 2.1 几何模型建立

JPC 装药主要由药型罩、主装药、辅助装药、壳体、VESF 和起爆装置等组成, 其结构如图 1 所示。

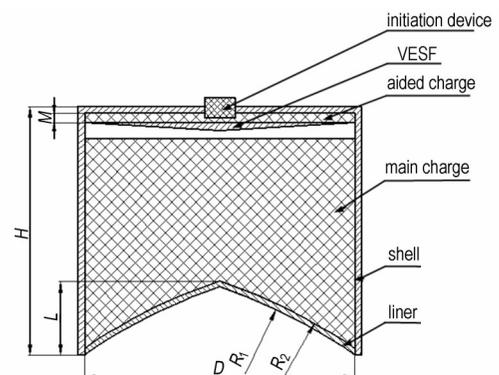


图 1 JPC 装药结构简图

Fig. 1 Structural sketch of JPC charge

收稿日期: 2013-03-26; 修回日期: 2013-10-17

作者简介: 高淑萍 (1987-), 女, 硕士, 主要从事高效毁伤战斗部设计及数值仿真研究。e-mail: gaoshuping\_2007@163.com

装药直径  $D$  为 200 mm, 药型罩采用偏心亚半球结构, 内曲率半径  $R_1$  为 400 mm, 外曲率半径  $R_2$  为 404 mm, 高度  $L$  为 54.65 mm, 辅助装药的高度  $M$  为 6 mm, 壳体厚度为 5 mm, 药型罩结构如图 2 所示。

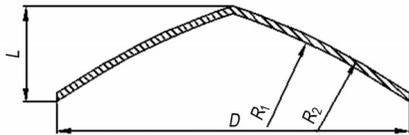


图 2 药型罩结构简图

Fig. 2 Structural sketch of liner

## 2.2 有限元模型的建立

由于药型罩压垮、闭合, 侵彻体的形成属于大变形问题, 因此选用处理大变形的 Euler 算法。主装药、空气和辅助装药也采用 Euler 算法, VESF 采用 Lagrange 网格建模, 模型如图 3 所示。采用 AUTODYN-2D 程序计算, 为了更好的模拟侵彻体成型过程, 在欧拉域采用中心加密的渐变网格。同时为了将问题简化, 模型中不考虑壳体影响。主装药选用 PBX 炸药, 按弹塑性强度模型 Von-Mises 准则, 采用 Lee-Tarver 状态方程。辅助装药为 OCTOL 炸药, 采用 JWL 状态方程。药型罩采用紫铜, 按弹塑性强度模型 Steinberg Guinan 准则, 采用 Shock 状态方程。以上材料参数均选自 AUTODYN 材料库。模拟采用的单位为  $\text{cm}-\mu\text{s}-\text{g}-\text{Mbar}^{[8]}$ 。

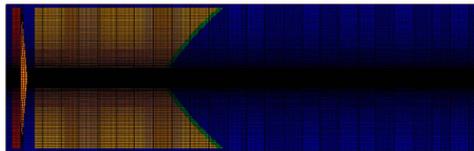


图 3 JPC 装药有限元模型

Fig. 3 Finite-element model of JPC charge

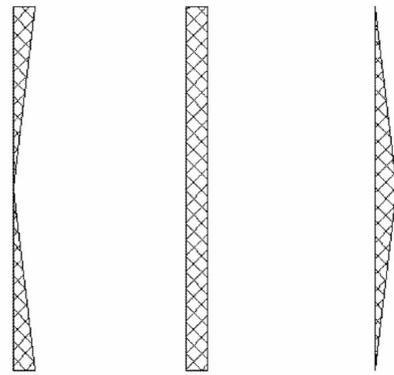
## 2.3 相关参数的选取

选取铝、钢、铜和钨 4 种密度由小到大的材料; 选取横断面为 K 字形、矩形和三角形三种代表形状, 见图 4; 与主装药的间距选取 3, 6, 9 mm。计算时间为 300  $\mu\text{s}$  (此时 JPC 已成型)。

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 VESF 材料对 JPC 成型的影响

选取铝、钢、铜和钨等四种材料的 VESF, 其板形状的横断面如图 4c 所示, 其中最长边为 200 mm, 最长边对应的高度为 4 mm, 与主装药的距离为 6 mm。



a. K shape    b. rectangular    c. triangular

图 4 不同形状的 VESF

Fig. 4 Different shape of VESF

起爆装置起爆后, 引爆辅助装药, VESF 受辅助装药产生的爆轰波作用向主装药运动, 撞击并引爆主装药, 药型罩受到爆轰波作用, 出现翻转并压垮形成杆式射流。VESF 材料不同时, 产生的爆轰波形不同, 12  $\mu\text{s}$  时, VESF 撞击主装药时产生的爆轰波形如图 5 所示。

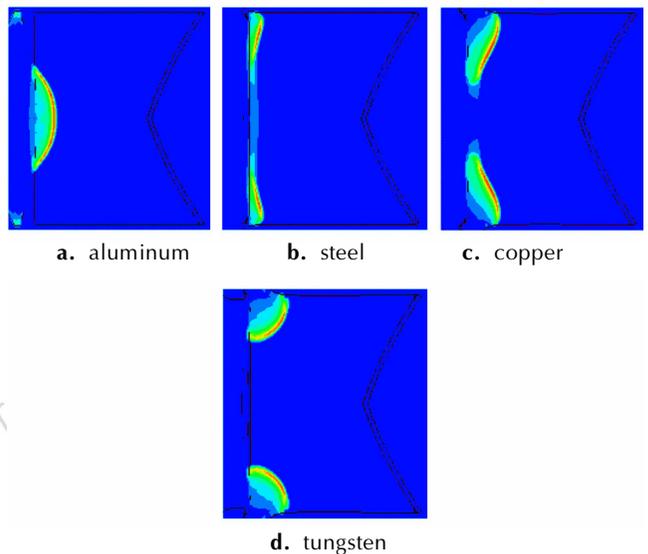


图 5  $t=12 \mu\text{s}$  时不同 VESF 材料对应的爆轰波形

Fig. 5 Detonation wave shape with different materials of VESF when  $t=12 \mu\text{s}$

由图 5 可见, VESF 为铝时, 对应的起爆方式为中心点起爆; 为钢时, 对应的起爆方式为面起爆; 为铜或钨时, 对应的起爆方式均为环起爆。依据能量守恒, 在辅助装药爆轰时释放的能量转化为 VESF 动能一定的情况下, VESF 获得的速度按照 VESF 材料密度的增加而减小, VESF 中心和边沿到达主装药的时间也因此而改变。由于 4 种材料的密度  $\rho_{\text{铝}} < \rho_{\text{钢}} < \rho_{\text{铜}} < \rho_{\text{钨}}$ , 所

以当材料为铝时, VESF 中心首先撞击主装药, 形成中心起爆; 当材料为钢时, VESF 中心与外沿同时撞击主装药, 形成面起爆; 当材料为铜和钨时, VESF 外沿首先撞击主装药形成环形起爆。

由于起爆方式的不同, 造成射流速度、直径和长度及杆式射流的形态的不同。表 1 为  $t=300 \mu\text{s}$  时 4 种 VESF 材料对应的射流性能参数。

由表 1 可见, VESF 板的材料密度越大, 射流头部

速度越大, 尾部速度先大后小, 射流头部直径越小, 而尾部直径先小后大; 射流形态亦随着 VESF 密度的不同而改变, 射流长度随之增加。当板材料为铝时, 形成的射流粗而短; 随着板密度的增加, 形成了具有一定速度梯度和均匀质量分布的杆式射流; 随着板密度的继续的增加, 射流长径比和头尾速度差继续增大, 有分离成低速杆体和高速射流的趋势。因此, 综合考虑, 当 VESF 材料为钢时, 成型效果最佳。

表 1 300  $\mu\text{s}$  不同 VESF 材料的射流性能参数

Table 1 Performance of jet of VESF with different materials at 300  $\mu\text{s}$

material	$V_{\text{head}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{\text{tail}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$D_{\text{head}}/\text{mm}$	$D_{\text{tail}}/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	jet form
aluminum	3165.8	2526.4	21.358	29.736	230	
steel	4159.0	2927.8	13.582	23.312	384	
copper	4731.0	2924.1	11.323	23.312	469	
tungsten	5713.0	2759.0	8.541	27.496	531	

Note:  $V_{\text{head}}$  is the head speed of JPC;  $V_{\text{tail}}$  is the empennage speed of JPC;  $D_{\text{head}}$  is the head diameter of JPC;  $D_{\text{tail}}$  is the empennage diameter of JPC;  $L$  is the length of JPC.

### 3.2 VESF 形状对 JPC 成型的影响

为了分析不同形状的 VESF 对 JPC 成型的影响, 选取 VESF 材料为钢, 对图 4 所示的 K 字形、矩形、三角形三种 VESF 横断面形状进行研究, 其中 VESF 与主装药之间的距离参考文献[1], 取 2 mm。

当 VESF 横断面形状不同时, 在主装药中产生的爆轰波形各不相同, 如图 6 所示。  $t=300 \mu\text{s}$  形成的射流性能参数如表 2 所示。

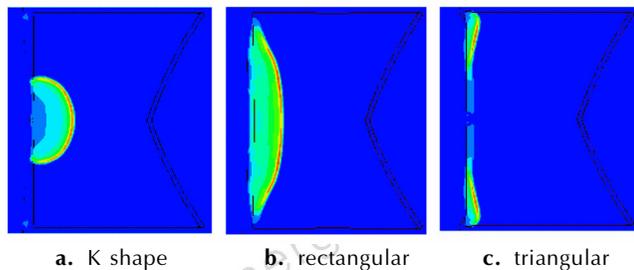


图 6  $t=12 \mu\text{s}$  时不同 VESF 形状对应的爆轰波形

Fig. 6 Initiation modes with different shape of VESF at 12  $\mu\text{s}$

由图 6 可以看出, 当 VESF 横断面形状为三角形时, 主装药的起爆方式为面起爆; 通过仿真结果得出当 VESF 为 K 字形或矩形时, 主装药的起爆方式为点起爆, 它们的爆轰波形却不相同, 如图 6 所示, 因此生成不同形态与速度的杆式射流。

由表 2 可知, VESF 形状由 K 字形到三角形时, 杆式射流头尾速度逐渐增加。当 VESF 横断面形状为三角形时, 速度虽然很高, 但是头尾速度差较大, 且射流直径太小; 而矩形较 K 字形而言, 形成的射流速度高, 射流直径大, 但是射流出现断裂, 成型效果不好。综合考虑, 在此 JPC 装药的结构与尺寸下, 横断面形状为 K 字形的 VESF 效果最佳。

### 3.3 VESF 与主装药距离对 JPC 成型的影响

为了研究 VESF 与主装药距离对杆式射流成型的影响, 当 VESF 材料为钢, 横断面形状为图 4 中 K 字形时, 分别选取距离  $h$  为 3、6、9 mm 进行数值模拟, 其计算结果如表 3 所示,  $t=12 \mu\text{s}$  产生的爆轰波形如图 7 所示。

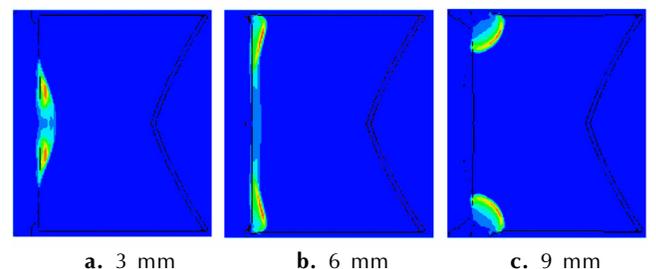


图 7  $t=12 \mu\text{s}$  时不同 VESF 与主装药距离对应的爆轰波形

Fig. 7 Initiation modes with different distances from VESF to main charge at 12  $\mu\text{s}$

表 2 不同 VESF 形状时射流性能参数

Table 2 Performance of jet of VESF with different materials

shape	$V_{\text{head}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{\text{tail}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$D_{\text{head}}/\text{mm}$	$D_{\text{tail}}/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	jet form
K shape	2728.7	2252.5	21.36	35.80	191	
rectangular	3393.6	2677.6	20.41	34.53	237	
triangular	4159.4	2927.8	13.58	23.31	384	

表 3 不同 VESF 形状时射流性能参数

Table 3 Performance of jet of VESF with different materials from VESF to main charge at 12  $\mu\text{s}$ 

distance/mm	$V_{\text{head}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$V_{\text{tail}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$D_{\text{head}}/\text{mm}$	$D_{\text{tail}}/\text{mm}$	$L/\text{mm}$	jet form
3	3416.4	2637.9	19.49	30.90	257	
6	4159.0	2927.8	13.58	23.31	384	
9	4936.0	2740.6	7.88	25.36	526	

由图 7a 可见,当主装药的间距为 3 mm 时,爆轰波在主装药的中间位置产生,因此,主装药的起爆方式可近似为点起爆。当主装药的间距为 6 mm 时,主装药的起爆方式为面起爆;间距为 9 mm 时起爆方式为环起爆。

由表 3 可知,VESF 与主装药间距为 9 mm 时,虽然速度较高,但是射流直径太小,不宜采用。当距离为 3mm 与 6mm 时,形成的杆式射流的性能参数类似,射流直径也较大,但当距离为 3 mm 时,射流头部直径较大,速度相对较低,成型效果差。综合以上考虑,当 VESF 与主装药间距为 6 mm 时形成的 JPC 效果最佳。

## 4 结 论

(1) 随着 VESF 密度的增加和 VESF 与主装药间距的增大,主装药起爆点由中心逐渐向外过渡;不同形状的 VESF 可形成不同的爆轰波形,K 字形与矩形时为点起爆,三角形时为面起爆。

(2) 对于 JPC 来说,当 VESF 材料为钢,横断面形状为 K 字形,与主装药间距为 6 mm 时,成型效果最佳。因此,可以通过改变 VESF 材料、形状及其与主装药间距来调节起爆方式,从而得到期望的爆轰波形。

### 参考文献:

- [1] 谭多望,孙承伟. 成型装药研究新进展[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(1): 50-55.  
TAN Duo-wang, SUN Cheng-wei. Progress in studies on shaped charge[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(1): 50-55.
- [2] Blanche A, Weismann K. Shaped charge with jetting projectile

for extended targets[C]//Niekerk C V. Proceeding of the 17th International Symposium on Ballistics, Midland South Africa: The South African Ballistics Organisation, 1998: 207-215.

- [3] 宁俊生. 成型装药和爆炸成形弹丸的研究进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 9(1): 65-68.  
NING Jun-sheng. Progress in studies on shaped charge and explosively formed penetrator[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2004, 9(1): 65-68.
- [4] 陈奎,李伟兵,王晓鸣. 起爆点数与装药口径的匹配关系研究[C]//智能弹药技术学术交流会,江苏南京:智能弹药技术国防重点实验室,2010:218-222.  
CHEN Kui, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming. Matching Relationship of Initiation Points and Charge Diameter on The Formation of Penetrator[C]//Intelligent ammunition academic exchange meeting, Nanjing, Jiangsu: ZNDY Ministerial Key Laboratory, 2010: 218-222.
- [5] Blach e A, Weimann K. Generation of Different Detonation wave Contours[C]//16th International Symposium on Ballistics, San Francisco, 1996, 2: 347-356.
- [6] 王鹏,马晓青,高润芳. JPC—杆式射流的形成机理和应用[C]//第七届全国爆炸力学学术会议论文集,四川绵阳:流体物理研究所,2003:831-837.  
WANG Peng, MA Xiao-qing, GAO Rui-fang. JPC—The mechanization and application of Jetting Projectile Charge[C]//The 7th academic conference collected papers of explosion mechanics, Mianyang, Sichuan: Institute of fluid physics, 2003: 831-837.
- [7] 黄正祥,张先锋,陈惠武. 飞片起爆条件下聚能杆式侵彻体成型数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(8): 1830-1832.  
HUANG Zheng-xiang, ZHANG Xian-feng, CHEN Hui-wu. Numerical simulation of formation process of jetting projectile charge by flyer initiation[J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(8): 1830-1832.
- [8] 董方栋,王志军. 低密度射流冲击带壳装药起爆阈值的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 37(4): 49-51.  
DONG Fang-dong, WANG Zhi-jun. Study on initiating value of low-density jet impacting explosive with shell[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2013, 37(4): 49-51.

## Effect of VESF with Different Material and Structure Parameters on Formation of JPC Charge by Numerical Simulation

GAO Shu-ping<sup>1</sup>, WANG Zhi-jun<sup>1</sup>, DONG Fang-dong<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>2</sup>, BI Chun-yan<sup>3</sup>

(1. Collage of Mechanic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. 96518 army, huaihua 418000, China; 3. Heavy machinery company of Taiyuan, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** To analyze the impact of VESF on Jetting Projectile Charge (JPC) formation, nonlinear dynamics analysis software AUTODYN-2d was used for numerical simulation. The simulation results of penetrator formation were obtained with different VESF materials, shapes (K shape, rectangular, triangular) and the distance between VESF and main charge. Results show that the main charge initiation point transfers from center to outside gradually with the increase of VESF material density and the distance between VESF and main charge. Different initiation modes are formed with different transverse shapes of VESF, and it is a point initiation for K shape and rectangle, and the plane initiation for triangle. The optimum conditions to JPC formation are: steel plate, K shape and 6 mm (distance from VESF to charge).

**Key words:** mechanics of explosion; VESF; initiation modes; rod-like jet; numerical simulation

**CLC number:** TJ414; O38

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.021



## 2014 年含能材料与钝感弹药技术研讨会征文通知 (第一轮)

由中国工程物理研究院、北京理工大学、中国兵工学会爆炸与安全技术专业委员会联合主办, 中国工程物理研究院化工材料研究所、北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室联合承办的"2014 年含能材料与钝感弹药技术研讨会"将于 2014 年 11 月在海南三亚召开。

**一、征文范围:** (1) 含能材料及钝感弹药发展趋势与前沿; (2) 新型单质炸药的理论设计、合成、改性与绿色制备技术; (3) 高能混合炸药的配方设计、制备工艺与应用技术; (4) 烟火剂、推进剂及火工品新技术; (5) 含能材料理化、爆轰与安全性能表征和测试方法; (6) 钝感弹药设计与数值仿真技术; (7) 钝感弹药的规范与标准以及相关的试验与评估技术; (8) 含能材料与钝感弹药的安全循环利用技术; (9) 其他相关理论、技术及其应用。

**二、截稿日期:** 2014 年 09 月 30 日

**三、**本次研讨会将通过专家委员会评选出优秀论文并予以奖励。投稿文章将择优推荐到《兵工学报》、《含能材料》和《安全与环境学报》等 EI 收录或核心期刊发表。

**四、缴纳会议注册费**

	会前缴纳(2014 年 10 月 15 日前)	2014 年 10 月 15 日后或会上缴纳
一般代表	1600	1800
学生代表	1000	1200

收款单位: 中国工程物理研究院化工材料研究所;

开户银行: 工行四川省绵阳市科学城支行;

账号: 2308 4151 0902 4902 490

**五、会议秘书处及联系方式:** 会议秘书处设在中国工程物理研究院化工材料研究所。

联系人: 张琪 0816-2485362 13035675727 张翠娟 0816-2490810 18181766701 传真: 0816-2495856

电子邮箱: wxwzyj2013@163.com 通信地址: 四川省绵阳市 919 信箱 308 分箱, 621900

**六、其他事宜:** 请关注大会组委会信息发布网站: [www.energetic-materials.org.cn](http://www.energetic-materials.org.cn) ("含能材料"期刊网站)

[www.caep.cn](http://www.caep.cn) (中国工程物理研究院门户网站)

"含能材料与钝感弹药技术研讨会"组委会

2014 年 4 月 15 日