

文章编号:1006-9941(2008)04-0415-05

## 起爆方式对聚能射流影响的数值仿真研究

张会锁<sup>1</sup>, 赵捍东<sup>2</sup>, 黄延平<sup>1,2</sup>, 石兴玉<sup>1,2</sup>, 张燕欣<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学机电工程学院弹药模拟仿真研究中心, 山西 太原 030051;

2. 兵器集团国营第 825 库, 山西 太谷 030800)

**摘要:**应用 ANSYS/LS-DYNA3D 有限元分析软件,采用 ALE 算法对在同种装药结构条件下的药型罩顶部单点起爆、顶面双环线起爆、装药面轴向外壁中心单环线起爆、三环线起爆后形成的聚能射流分别进行了数值模拟。计算结果表明,起爆方式对射流性能有着重要的影响,不同起爆方式在装药中形成不同的爆轰波形,药型罩顶部双环线起爆比单点起爆后形成的射流头部速度提高 11.6%;装药面轴向外壁线起爆比药型罩顶部任何方式起爆后形成的聚能射流头部速度都低,装药面轴向外壁三环线起爆比药型罩顶部双环线起爆后形成的射流头部速度降低 18%;同时进行了验证实验,仿真结果与实验结果吻合。

**关键词:** 弹药爆轰理论与工程;起爆方式;射流;数值模拟;聚能装药

**中图分类号:** TJ410

**文献标识码:** A

### 1 引言

聚能装药技术已广泛应用于弹药战斗部、现代矿山、石油钻井、及地质深层开坑等方面,其产品的更新也不断变化。随着计算机技术的发展,使用数值模拟对这一复杂过程进行仿真,再现射流形成过程成为可能。国外对射流的数值模拟以美国原子能委员会 Los Alamos 实验室为代表,对聚能射流的穿孔和侵彻过程进行了数值模拟<sup>[1]</sup>。国内对聚能装药射流的形成机理,以及影响射流的因素作了许多试验工作,文献[2-4]从药形罩结构及主装药性能对射流头部速度的影响进行了仿真研究,文献[5]对聚能装药在装药顶部以点起爆、面起爆、环向起爆、和装药底部环向起爆等不同起爆方式下的爆轰波形和聚能射流形成过程进行了数值仿真研究。

本文在文献[5]基础上,用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA3D 程序,建立了合理的数值计算仿真模型,对聚能装药产品采用顶部单点中心起爆、顶面双环线起爆及装药面轴向外壁中心单环线起爆和三环线起爆对射流头部速度影响进行了数值模拟,并进行实验对比分析。

### 2 数值仿真模型的建立

#### 2.1 三维实体模型

本次仿真计算模型所用的结构尺寸如图 1 所示,不同起爆方式下的实体三维模型如图 2~6 所示。

#### 2.2 有限元仿真模型

数值计算程序按建立方程所选取划分网格的方法不同,计算方法可分为:拉格朗日法和欧拉法。欧拉算法的网格划分在空间上是固定的,材料是由于其填充在了欧拉网格空间而被欧拉网格划分为许多的离散单元,该方法适用于处理大畸变问题,特别是超高速撞击问题,只能采用欧拉算法程序解决。但物质交界面需作专门处理,计算较复杂的问题需划分相当数目的计算网格,花费较多的机时,拉格朗日算法的网格划分是固定在物体上,随物体一起运动的,计算网格固定在材料内,且随材料变形,它能精确跟踪材料边界和界面,所需网格数目也相对较少。但它最大的弱点是不适于计算大变形问题,这是因为采用拉格朗日算法时,如果网格发生大变形时,计算就不再稳定,会产生负质量、负体积及其它病态现象使计算进行不下去;另一方面,由于计算网格随材料不同而畸变,一旦畸变变得严重,必须抛弃旧网格,对材料重新进行网格划分、计算才能继续下去<sup>[6]</sup>。因此,本文在仿真计算中采用了 ANSYS/LS-DYNA3D 软件提供的 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 算法,这种算法中包括拉格朗日法与欧拉法两种算法<sup>[7]</sup>。由于在欧拉算法中,网格固定不动,材料和能量在网格间动,所以在建立模型时不仅包括金属射流部分,还需加入空气<sup>[8]</sup>。根据结构的对称性,考虑计算时间与周期,建立了 1/4 模型,模型包括炸药、药型罩、空气、钢靶。其中炸药、药型罩、空气采用欧拉法,钢靶采用拉格朗日法,所建有限元模型如图 7 所示,网格分布如图 8 所示。

收稿日期:2008-01-08;修回日期:2008-05-07

基金项目:中北大学青年科技创新基金项目(2007035)

作者简介:张会锁(1976-),男,讲师,从事弹药终点毁伤研究。

e-mail:zhshywjh@sohu.com

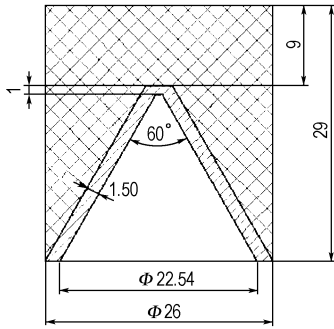


图 1 聚能装药结构图

Fig. 1 Configuration of shaped charge

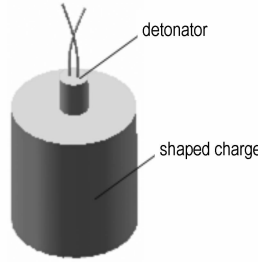


图 2 单点起爆示意图

Fig. 2 Configuration of one point ignition

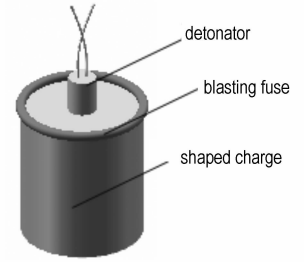


图 3 单点单环线起爆示意图

Fig. 3 Configuration of one point and one ring line ignition

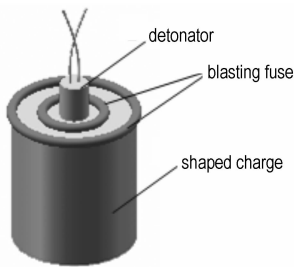


图 4 单点双环线起爆示意图

Fig. 4 Configuration of one point and two ring line ignition

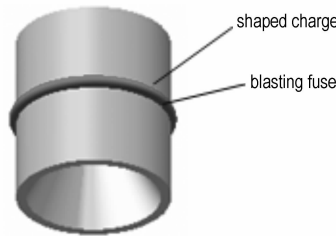


图 5 轴向单环线起爆示意图

Fig. 5 Configuration of axial charge outer wall center one ring line ignition

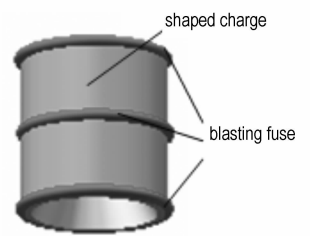


图 6 轴向三环线起爆示意图

Fig. 6 Configuration of axial charge outer wall three ring line ignition

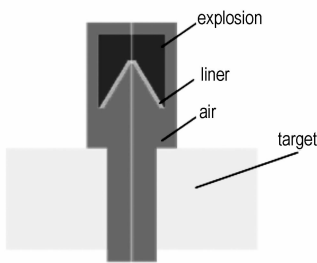


图 7 计算模型图

Fig. 7 Model of calculation

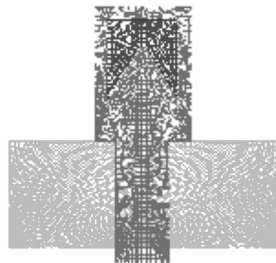


图 8 网格分布图

Fig. 8 Mesh of distribution

## 2.3 材料模型

### 2.3.1 炸药

主装药的物态方程采用标准形式的 JWL 物态方程

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_1} \right) e^{-\frac{R_1}{\eta}} + B \left( 1 - \frac{\omega \eta}{R_2} \right) e^{-\frac{R_2}{\eta}} + \omega \rho e \quad (1)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为实验拟合参数;  $\rho$  为炸药密度;  $e$  为比内能;  $\eta = \rho/\rho_0$ ,  $\rho_0$  为炸药初始密度。

所用炸药的 C-J 参数和 JWL 状态方程参数见表 1<sup>[9]</sup>。

### 2.3.2 药型罩

药型罩材料选用紫铜<sup>[9]</sup>, 在程序中, 用本构模型描述偏应力和偏应变之间的关系, 并用状态方程表达应力张量的球张量、能量和密度之间的关系。在计算

中, 选取 EOS\_GRUNEISEN 状态方程; 对药型罩材料模型选取结合了压力效应、温度和塑性延展率, 并且塑性延展率高于  $10^5 \text{ s}^{-1}$  的 Steinberg 本构模型<sup>[9]</sup>。Steinberg 本构模型计算参数在表 2 中列出。

### 2.3.3 空气

空气材料模型选用空材料模型 (MAT\_NULL), 状态方程选用流体材料的状态方程 (EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL)<sup>[10]</sup>; 空气材料计算参数在表 3 中列出。

### 2.3.4 靶板

对靶板材料 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。屈服应力  $\sigma_Y$  由计及应变率的 Cowper-Symonds 模型计算得到

$$\sigma_Y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^e) \quad (2)$$

式中,  $\sigma_0$  表示初始屈服应力;  $\dot{\epsilon}$  为应变率;  $C$ 、 $P$  为 Cowper-Symonds 应变率参数;  $\epsilon_p^e$  为有效塑性应变;  $E_p$  为塑性硬化模量, 且

$$E_p = \frac{E_{\tan} E}{E - E_{\tan}} \quad (3)$$

式中,  $E$  为弹性模量;  $E_{\tan}$  为切线模量。计算参数在表 4 中列出。

表1 炸药参数<sup>[9]</sup>Table 1 Parameters of explosion<sup>[9]</sup>

materials	$D/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho_0/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$p_{C-J}/\text{GPa}$	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$e_0/\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$	$\omega$
RHT-901	7.980	1.717	29.5	524.23	7.678	4.2	1.1	8.5	0.34

Note:  $D$ , detonation velocity;  $\rho_0$ , mass density;  $p_{C-J}$ , Chapman-Jouget pressure;  $A, B, R_1, R_2, \omega$ , coefficient;  $e_0$ , specific internal energy.

表2 Steinberg本构模型计算参数<sup>[9]</sup>Table 2 Computational parameters of Steinberg constitutive equation<sup>[9]</sup>

materials	$G_0/\text{GPa}$	$b/\text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2/3}$	$b'/\text{s}^2 \cdot \text{kg}^{-2/3}$	$h$	$f$	$A/\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	$T_{m0}/\text{K}$	$\sigma'_0/\text{GPa}$	$\gamma_0$
red copper	47.7	2.83	2.83	$3.77 \times 10^{-4}$	0.001	63.55	1356	0.12	2.02

Note:  $G_0$ , basic shear modulus;  $b, h, f, \gamma_0$ , coefficients;  $\sigma'_0, b'$ , materials constants;  $A$ , mole mass;  $T$ , ambient temperature.

表3 空气模型计算参数<sup>[11]</sup>Table 3 Computational parameters of air model<sup>[11]</sup>

$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$C/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$E_0/\text{kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$	$V_0$
$1.25 \times 10^{-3}$	394	0	1

Note:  $\rho$ , mass density;  $C$ , sound velocity;  $E_0$ , initial internal energy;  $V_0$ , initial relative volume.

表4 靶板材料计算参数<sup>[9]</sup>Table 4 Computational parameters of target materials<sup>[9]</sup>

$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\sigma_Y/\text{GPa}$	$E_{\text{tan}}/\text{GPa}$	$\beta$	$C/\text{s}^{-1}$	$p$
7.81	204	0.28	0.366	22	1.0	4.0	0.6

Note:  $\rho$ , mass density;  $E$ , Young's modulus;  $\nu$ , poisson's ratio;  $\sigma_Y$ , yield stress;  $E_{\text{tan}}$ , tangent modulus;  $\beta$ , hardening parameter;  $C, P$ , Cowper-Symonds strain ratio parameters.

### 3 数值仿真结果

#### 3.1 不同起爆方式下射流的形成过程

##### 3.1.1 药型罩装药顶部不同方式起爆

以顶部单点起爆方式(方法1)起爆后爆轰波波形及射流形成过程部分云图如图9所示,从图中可以看出,爆轰波以球形方式向下传播,射流到达靶板时的头部最大速度为  $2724 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,穿靶深度为  $67 \text{ mm}$ ;以顶部单点单环线起爆方式(方法2)起爆后爆轰波波形及射流形成过程部分云图如图10所示,爆轰波以凹锥形向下传播,射流到达靶板时头部最大速度为  $2836 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,穿靶深度为  $72 \text{ mm}$ ;以顶部单点双环线起爆(方法3)起爆后爆轰波波形及射流形成过程部分云图如图11所示,爆轰波以近似平面波的形式向下传播,射流到达靶板时头部最大速度为  $3040 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,穿靶深度为  $78 \text{ mm}$ 。

##### 3.1.2 装药外表面轴向不同起爆方式

以装药外表面轴向单环线起爆方式(方法4)起爆

后爆轰波波形及射流形成过程部分云图如图12所示,爆轰波以对称球形波向药型罩轴向传播,射流到达靶板时头部最大速度为  $2296.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,穿靶深度为  $63 \text{ mm}$ ;装药外表面轴向三环线起爆方式(方法5)起爆后爆轰波波形及射流形成过程部分云图如图13所示,从图中可以看出,爆轰波以对称凹锥形向药型罩轴向传播,射流到达靶板时头部最大速度为  $2491 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,穿靶深度为  $65 \text{ mm}$ 。

#### 3.2 实验

根据仿真中的装药结构要求及结构尺寸进行实验,其中环线起爆采用高能导爆索引爆和电雷管引爆,单点起爆采用起爆药柱和电雷管引爆,炸高与仿真时一致均为  $20 \text{ mm}$ ,起爆条件相同。实验结果见表5。

#### 3.3 仿真与实验结果对比

对采用不同起爆方式得到的仿真结果与实验结果进行对比,见表5,其中方法1的实验照片如图14所示。从表5可以看出,起爆方式对射流头部速度有影响,起爆点越多,射流速度越高。分析原因是因为随着起爆点的增多,爆轰波以近似平面波的形式向下压垮药型罩,使到达药形罩锥面的瞬间压力增大,压垮速度增加,从而提高了射流着靶速度,使破甲深度增加。此仿真结果与文献[5]的结果趋势相同,也与实验结果一致;同时仿真结果与实验结果也表明轴向起爆所形成的射流头部速度低于药柱顶部起爆方式所形成的射流头部速度,分析原因是由于轴向起爆后药形罩锥面的压力矢量方向垂直于中轴线,从而使药型罩在轴线上发生碰撞后沿轴向上下运动,向上运动部分受到爆轰波压力改变速度方向,最终形成杵体;相反,药型罩顶部起爆后,爆轰压力矢量平行于中心轴线向下,从而使药型罩压垮后在沿轴线向下运动过程中碰撞并合并,使射流速度增加,最终提高破甲深度。

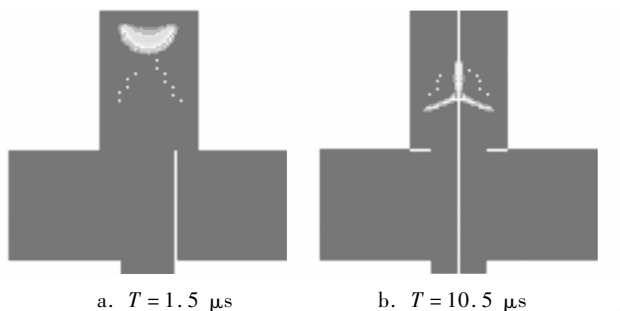
a.  $T = 1.5 \mu\text{s}$       b.  $T = 10.5 \mu\text{s}$ 

图9 采用方法1射流形成过程

Fig. 9 Formation process of jet by method 1

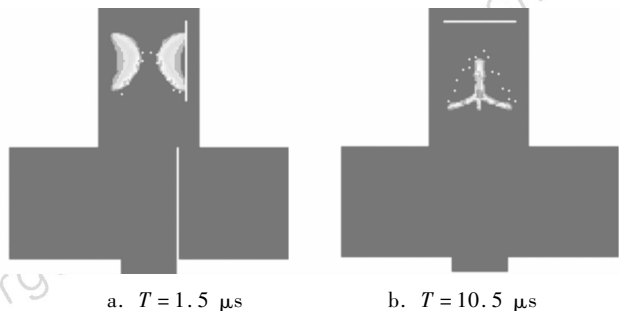
a.  $T = 1.5 \mu\text{s}$       b.  $T = 10.5 \mu\text{s}$ 

图12 采用方法4射流形成过程

Fig. 12 Formation process of jet by method 4

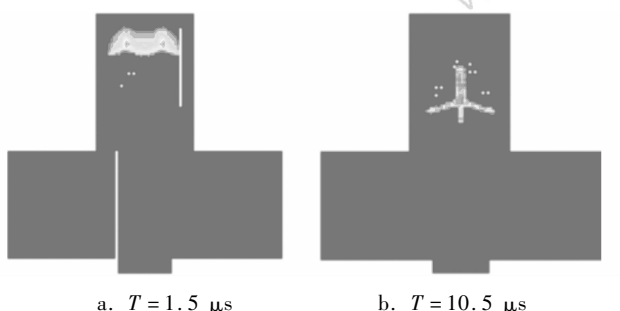
a.  $T = 1.5 \mu\text{s}$       b.  $T = 10.5 \mu\text{s}$ 

图10 采用方法2射流形成过程

Fig. 10 Formation process of jet by method 2

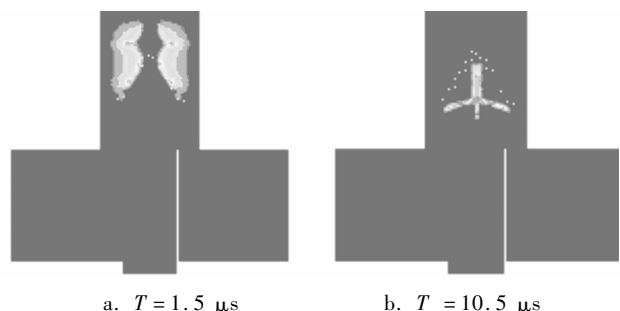
a.  $T = 1.5 \mu\text{s}$       b.  $T = 10.5 \mu\text{s}$ 

图13 采用方法5射流形成过程

Fig. 13 Formation process of jet by method 5

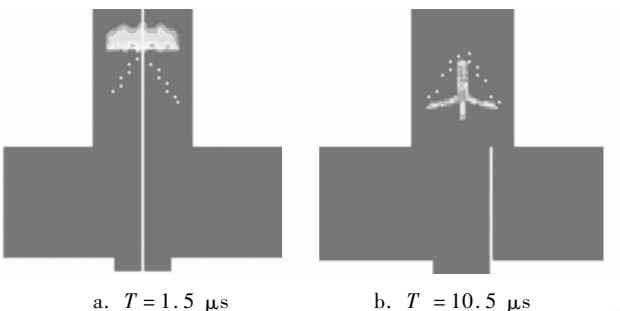
a.  $T = 1.5 \mu\text{s}$       b.  $T = 10.5 \mu\text{s}$ 

图11 采用方法3射流形成过程

Fig. 11 Formation process of jet by method 3

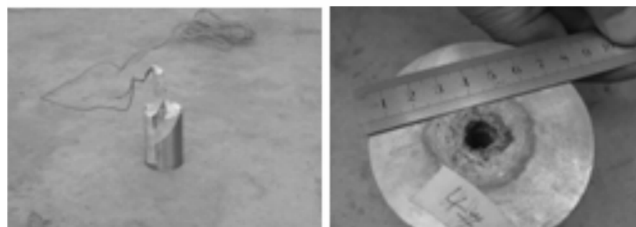


图14 方法1的实验照片

Fig. 14 Experimental photograph by method 1

表5 射流数值仿真结果与实验结果对比

Table 5 Comparison between simulation and experimental result of jet

initiation methods	1	2	3	4	5	
simulation result	jet velocity/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2724	2836	3040	2296.6	2491
	penetration depth/mm	67	72	78	63	65
experimental result	penetration depth/mm	62	65	70	58	60

## 4 结论

(1) 此方法可以合理再现射流形成的整个运动过程,当聚能装药起爆环线越多,所形成的压力冲击波近似于平面波向前传播,使到达药形罩锥面的瞬间压力

增大,压垮速度增加,从而使射流头部速度提高。

(2) 药柱顶部起爆方式所形成的射流头部速度高于轴向起爆所形成的射流头部速度。

(3) 射流头部速度影响射流侵彻性能,仿真结果与实验结果趋势相符,验证了此次仿真模型及算法的

正确性,可为同类产品的设计提供参考依据。

#### 参考文献:

- [1] 董永香. 成型装药射流形成的机理研究[D]. 太原: 华北工学院, 2000.
- [2] 张会锁, 赵捍东, 王芳, 等. 药型罩锥角对聚能射流影响的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 351-353.  
ZHANG Hui-suo, ZHAO Han-dong, WANG Fang, et al. Numerical simulation of effect of shaped charge jet on the different cone angle of liner[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 351-353.
- [3] 赵捍东, 张会锁, 王芳, 等. 不同炸药对聚能射流影响的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 229-231.  
ZHAO Han-dong, ZHANG Hui-suo, WANG Fang, et al. Numerical simulation of effect of shaped charge jet on the different kind of explosives[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1): 229-231.
- [4] 张会锁, 赵捍东, 王芳, 等. 药型罩壁厚对聚能射流影响的数值模拟[J]. 测井技术, 2006, 30(1): 47-50.  
ZHANG Hui-suo, ZHAO Han-dong, WANG Fang, et al. Numerical simulation of effect of shaped charge jet on the different wall thicknesses of liners[J]. *Well Logging Technology*, 2006, 30(1): 47-50.
- [5] 王成, 付晓磊, 宁建国. 起爆方式对聚能射流性能影响的数值分析[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(5): 401-404.  
WANG Cheng, FU Xiao-lei, NING Jian-guo. Numerical simulation of shaped charge jet formation under different ways of initiation[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(5): 401-404.
- [6] 赵海欧. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [7] 董永香, 陈国光, 赵捍东, 等. 一种新型装药结构的探讨[J]. 华北工学院学报, 1999, 20(3): 233-235.  
DONG Yong-xiang, CHENG Guo-guang, ZHAO Han-dong, et al. Analysis on the structure of a new type of shaped charge[J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 1999, 20(3): 233-235.
- [8] 赵捍东, 陈国光. 聚能装药射流的数值仿真研究[J]. 华北工学院学报, 2001, 22(3): 211-214.  
ZHAO Han-dong, CHENG Guo-guang. The study on numerical simulation of shaped charge[J]. *Journal of North China Institute of Technology*, 2001, 22(3): 211-214.
- [9] 桂毓林, 于川, 刘仓理, 等. 带尾翼的翻转型爆炸成形弹丸的三维数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 313-318.  
GUI Yu-lin, YU Chuan, LIU Cang-li, et al. 3D simulation of overturned explosively formed projectile (EFP) with star-shaped fins[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 313-318.
- [10] LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. May 1999 Version 950.
- [11] 时党勇, 李裕春, 张胜明. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

## Numerical Simulation of Effect of Ignition Ways on Shaped Charge Jet

ZHANG Hui-suo<sup>1</sup>, ZHAO Han-dong<sup>2</sup>, HUANG Yan-ping<sup>1,2</sup>, SHI Xing-yu<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan-xin<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Projectiles and Rockets Analog Simulation, College of Mechanic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State-Run Warehouse No. 825 of Weapons Group, Taigu 030800, China)

**Abstract:** The ANSYS/LS-DYNA3D finite element analysis software and the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) algorithms were used to simulate the formation processes of shaped charge jet under different ways of initiation, such as one point ignition, the liner top two ring line ignition, axial charge outer wall center one ring line ignition and three ring line ignition. Calculated results show that ways of initiation have great influence on jet performance. Different ways of initiation produce different shapes of detonation wave. The jet tip velocity produced by the ignition ways of the liner top two ring line is increased by 11.6% than that by the one point ignition, the jet tip velocity through the liner the axial charge outer wall ignition is lower than that by any other ways of the top of the liner, and the jet tip velocity produced by the liner the axial charge outer wall three ring line is decreased by 18% than that by the ignition ways of the liner top two ring line. The confirmation experiment was carried out. The simulation results are in accordance with the experimental data.

**Key words:** ammunition detonation theory and engineering; ignition way; jet; numerical simulation; shaped charge