

文章编号: 1006-9941(2007)03-0248-05

高速杆式弹丸初步研究

李成兵¹, 沈兆武¹, 裴明敬²

(1. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026;

2. 西北工业大学航天学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 根据高速杆式弹丸的特点和经典射流理论分析高速杆式弹丸的成型条件, 提出了高速杆式弹丸的设计准则。应用 LS-DYNA 软件对设计的变球缺罩装药结构进行数值模拟, 得到该装药结构下高速杆式弹丸的成型过程和成型机理。通过模拟计算得到了药型罩结构参数和起爆方式对弹丸成型的影响规律, 并初步确定药型罩结构参数间的相互关系: 药型罩直径 D , 内径 $R_1 = (0.55 \sim 0.6)D$, 外径 $R_2 = (0.58 \sim 0.62)D$, 药型罩高度为 $H = (0.3 \sim 0.35)D$, 半锥角 $\alpha = 82^\circ \sim 86^\circ$ 。

关键词: 爆炸力学; 高速杆式弹丸; 药型罩; 结构参数; 起爆方式

中图分类号: O385; TJ414

文献标识码: A

1 引言

高速杆式弹丸属于聚能侵彻体范畴^[1], 与爆炸成型弹丸(EFP)一样没有明显的杵体和射流之分, 其侵彻性能介于 EFP 和聚能射流之间, 与普通锥角罩形成的射流相比, 具有对炸高不敏感、药型罩利用率高和后效大的特点。与 EFP 和穿甲弹相比, 高速杆式弹丸比 EFP 飞行速度更大、长度更长、断面比动能更大、侵彻能力更强, 对砖墙、钢筋混凝土等坚固工事的侵彻更易显示出杆式侵彻体的优势, 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等具有较好的应用前景^[2]。早在 20 世纪 80 年代国外便开始研究聚能杆式侵彻体, 90 年代中期广泛应用到精确打击的灵巧弹药武器系统中, 在较大炸高下获得较大的侵彻深度, 提高了武器装备的作战效能。在 CBU-97/CBU-105、STAFF 非制导炮弹、SADRAM 末敏弹、STRIX 末制导炮弹、XM93 型广域反装甲雷等武器中都配有爆炸成形杆式侵彻体战斗部^[3]。

国外对大锥角装药进行了较多研究, 最早是 X Charge^[4]。国内也对大锥角装药进行了一定的研究, 如中国工程物理研究院学者^[5, 6]利用脉冲 X 光照相技术研究了大锥角罩所形成的侵彻体的特点, 证实了杆式侵彻体在 15 倍炸高条件下对钢靶具有较好的侵彻性能。北京理工大学的学者^[7]对杆式射流装药在水下的作用行为进行了研究。南京理工大学的学

者^[8]对聚能杆式侵彻的成型及其相关问题进行了研究, 并得到许多有用的结果。本文根据已有的研究成果, 对高速杆式弹丸的相关问题进行研究。首先, 对高速杆式弹丸的特点进行分析, 依据经典射流成型理论提出高速杆式弹丸的设计准则; 其次, 应用 LS-DYNA 软件对所设计的变球缺罩装药结构进行数值模拟, 得到该装药结构下高速杆式弹丸的成型过程和成型机理。通过模拟计算得到药型罩结构参数和起爆方式对弹丸成型的影响规律, 并初步确定药型罩结构的参数。

2 高速杆式弹丸设计准则

高速杆式弹丸本质上是一种具有一定速度梯度、没有明显射流和杵体之分的长杆式射流型弹丸。因此, 设计高速杆式弹丸时, 应对比它与射流的差异, 分析其成型条件。总的来说, 应遵循以下几点:

(1) 减小杵体质量

根据 PER 扩展理论^[9], 假设药型罩材料是非粘性的不可压缩流体, 罩壁很薄, 微元之间无相互影响, 并且罩微元在一定的时间内从零加速至压合速度 v_0 。药型罩的压垮过程如图 1 所示。

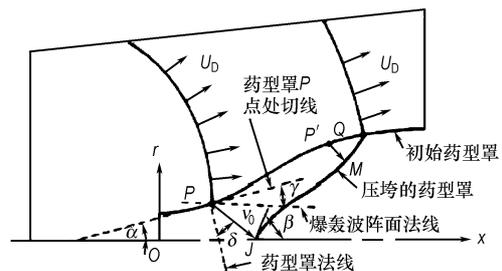


图 1 药型罩压垮过程

Fig. 1 Collapsing process of the liner

收稿日期: 2006-06-14; 修回日期: 2006-09-25

基金项目: 国防预研项目(413260401)

作者简介: 李成兵(1977-), 男, 博士, 主要从事爆炸力学研究。

e-mail: lichbing@mail.ustc.edu.cn

根据经典射流形成理论,射流和杵体质量表达式为:

$$dm_j = dm \sin^2(\beta/2) \quad (1)$$

$$dm_s = dm \cos^2(\beta/2) \quad (2)$$

式中, dm 、 dm_j 和 dm_s 分别是药型罩、射流和杵体微元的质量, β 是压合角。压合角主要由药型罩锥角决定,其值越大,射流质量越大,杵体质量则越小,因此高速杆式弹丸战斗部应采用大压合角的药型罩。根据装药结构可知,相对于罩顶部微元,越靠近底部的罩微元的有效药量越小,得不到充分加速,大部分形成杵体。因此,为了减小杵体质量和增大其速度,往往将药型罩设计成变壁厚结构,即从罩顶部到底部厚度逐渐减小,并且装药直径大于药型罩直径。

(2) 降低头尾速度差

根据射流形成理论,射流和杵体速度 v_j 、 v_s 的表达式分别为:

$$v_j = v_0 \csc(\beta/2) \cos[\alpha + \delta - (\beta/2)] \quad (3)$$

$$v_s = v_0 \sec(\beta/2) \cos[\alpha + \delta - (\beta/2)] \quad (4)$$

式中, α 和 δ 分别是药型罩半锥角和偏转角。设 η 为微元的头尾速度比,因此有:

$$\eta = \frac{v_j}{v_s} = \frac{1}{\tan(\beta/2) \tan[\alpha + \delta - (\beta/2)]} \quad (5)$$

对于一定形状的药型罩来说, α 在 P 点是一个定值, δ 是与药型罩、炸药等参数有关的量,对于 P 点也是确定的,因此 η 只与 β 有关。随 β 增大, η 是先减小后增大的,即 η 存在最小值。因此,为了降低头尾速度差,就需要将微元的压合角 β 控制在 η 取得较小值的附近。

(3) 提高弹丸整体速度

在炸药及装药结构确定的情况下,影响射流速度的主要因素是起爆点位置、药型罩壁厚度和药型罩半锥角等。减小药型罩厚度和半锥角可以有效地提高射流速度,但是降低了射流质量和直径。根据射流速度 v_j 表达式(3)可知:在装药及药型罩结构确定的条件下,采用平面起爆和环形起爆可以有效地提高射流速度,这是因为与中心点起爆相比,平面起爆和环形起爆可以降低爆轰波阵面法线与药型罩法线之间的夹角,一方面提高药型罩微元的压合速度 v_0 ,另一方面降低药型罩微元的偏转角 δ ,从而降低罩微元的压合角 β ,这两方面的作用均能提高射流速度和射流质量。因此,为了提高弹丸的整体速度,就要改传统的中心点起爆为平面起爆和环形起爆。提高弹丸整体速度、降低弹丸头尾速度差都涉及药型罩的压合角 β ,但两者对 β 的取值要求却是相对矛盾的。为了保证弹丸具有较高的速度,以及较小的头尾速度差,设计药型罩和起爆点时需要将药

型罩微元的 β 值控制在一个合适的范围内。

3 数值模拟

3.1 计算模型

依据形成高速杆式弹丸的设计原则,设计出一种变球缺型(大锥角)装药结构。该药型罩结构介于聚能射流罩和爆炸成型弹丸药型罩之间,具有大的压合角。采用变壁厚的药型罩来减小形成杵体的质量,降低整个侵彻体的速度梯度。同时装药直径大于药型罩直径,提高罩底部的有效药量。聚能装药整体结构如图 2a 所示,它由起爆网络、炸药、药型罩和壳体组成。

采用目前比较成熟的 LS-DYNA 软件对变球缺型装药结构进行三维数值模拟,分析在该装药结构下高速杆式弹丸的成型过程和机理、药型罩的结构优化和起爆方式对弹丸成型的影响等。为简化建模与计算,不考虑壳体,计算模型如图 2b 所示。药型罩的材料采用密度较大、塑性好的紫铜,装药为注装炸药 ($RDX/TNT = 70/30$),装药密度 $1.70 \sim 1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,主装药采用中心点起爆和环形起爆两种方式,其中环形起爆直径为 $3D_c/4$,装药长径比为 1.2。计算所用材料模型、状态方程和相关参数等均来源于文献[10~13]。计算中采用 Lagrange 网格建模,计算时间均设定为 $50 \mu\text{s}$ 。

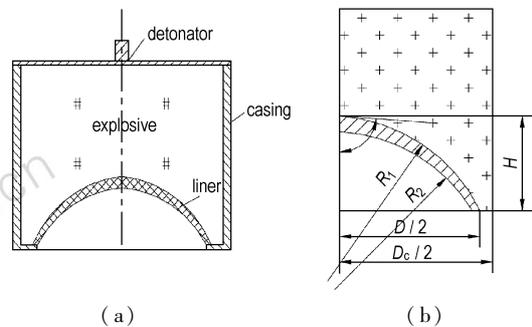


图 2 装药结构与计算简图
Fig. 2 Shaped charge and computation sketch

3.2 高速杆式弹丸成型过程

主装药起爆后大约 $7 \mu\text{s}$,药型罩表面开始受到炸药爆轰驱动作用,先被压垮成两面都突起的“圆盘”,罩上半部分直接向轴线压合,压合角从上至下逐渐增大,下半部分药型罩在向轴线收拢过程中逐渐向后翻转,压合角超过 90° 。药型罩整个的压垮压合过程如图 3 所示。药型罩在轴线处碰撞后,分成射流和杵体两部分,由于压合角较大,射流的质量和直径相应较大,又由于药型罩壁厚是从顶至下逐渐减小,射流的速度梯度较小,并且杵体和射流没有明显的分界,最终成为具有较均匀的质

量分布、较大的长径比和较小速度梯度的高速杆式弹丸。在 $t = 50 \mu\text{s}$ 时,弹丸头部速度 $v_{\text{tip}} = 3250 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,尾部速度 $v_{\text{rear}} = 1178 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,头尾速度差 $\Delta v = 2072 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

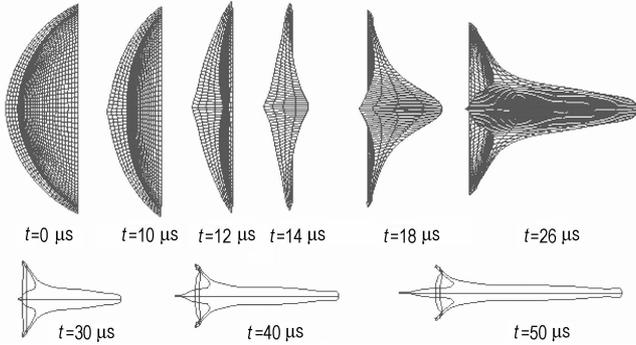


图 3 高速杆式弹丸的成型过程

Fig. 3 Formation process of high velocity rod-shaped projectile

在变球缺罩装药结构下,高速杆式弹丸的成型机理与典型射流有比较明显的区别。由典型射流的成型机理已知:射流在形成过程中,爆轰波扫过药型罩后,药型罩不发生翻转现象,而被直接驱动到对称轴处发生碰撞,形成高速射流,因此压合角小。并且药型罩微元在轴线碰撞后,分裂成高速射流和低速杆体,射流部分质量只占罩质量的百分之十几。与典型射流相比高速杆式弹丸,速度较低,但质量和弹体直径大,速度梯度小,大炸高性能好,侵彻孔径大。从本质上来讲,高速杆式弹丸也不同于爆炸成型弹丸。爆炸成型弹丸在形成过程中,药型罩微元在轴线处基本不发生碰撞(即使发生碰撞现象,压合角也很大,接近 180°),不再分裂成高速和低速两部分,弹体的速度梯度和长径比都很小。与之相比,高速杆式弹丸具有速度高、存在一定的速度梯度、长径比大和侵彻孔深等特点。

3.3 药型罩结构参数对高速杆式弹丸成型影响

众所周知,聚能装药能形成聚能射流、爆炸成型弹丸和介于两者之间的杆式射流弹丸等侵彻体,其根本原因在于药型罩的结构不同。药型罩的主要结构参数有:罩高度 H 、罩内外曲率半径 R_1 和 R_2 、罩半锥角 d (罩顶外表面切线与罩轴线的夹角)、罩壁厚度 δ (一般由内外曲率半径和偏心距来确定)和罩直径 D (一般由前面的参量来决定)等,这里对其中的几个重要参数作计算,分析它们对高速杆式弹丸成型的影响,进而优化药型罩的结构设计。为简化计算,主装药采用中心点起爆方式。

3.3.1 罩高度 H

变化药型罩的高度 H ,罩直径 D 随着 H 变化,其它罩参量和装药长径比保持不变。计算结果如图 4 和

图 5 所示,为了相互比较,将所有弹丸均缩放成统一长度。计算结果表明:当药型罩的 H/D 值较小时(如 $H/D = 0.23$),弹丸的头部速度低,其头尾速度差很小,弹体成粗短状,即成型为爆炸成型弹丸(EFP);随着 H/D 值的增大,弹丸长径比、头部速度和头尾速度差都随之增大,即形成具有一定速度梯度、质量分布比较均匀的高速杆式弹丸。 H/D 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。

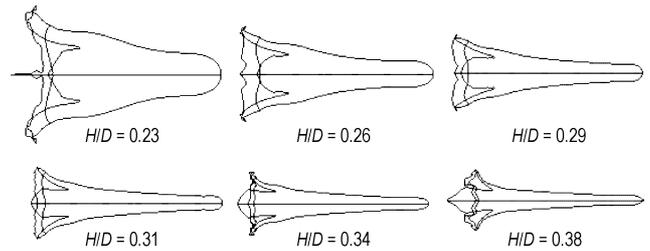


图 4 药型罩高度对弹丸成型的影响

Fig. 4 Effects of height of liner on projectile formation

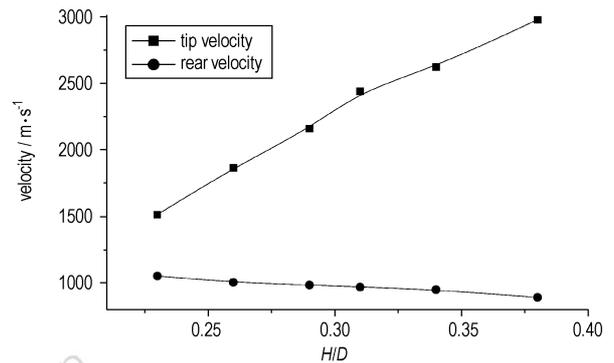


图 5 药型罩高度对弹丸速度的影响

Fig. 5 Effects of height of liner on projectile velocity

3.3.2 内外曲率半径 R_1 和 R_2

曲率半径变化,罩直径 D 随着曲率半径变化,其它罩参量和装药长径比保持不变。由于内外曲率半径同时按相同比例变化,所以只计算外曲率半径的影响。计算结果如图 6 和图 7 所示。弹丸头、尾速度随 R_1/D 值增大而增大,长径比却随之减小,头尾速度差无明显变化。

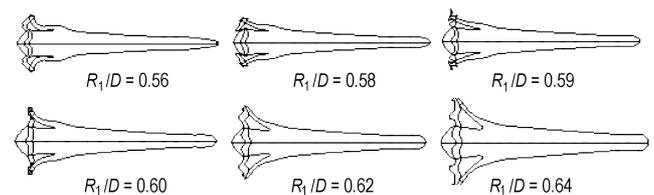


图 6 曲率半径对弹丸成型的影响

Fig. 6 Effects of curvature radius on projectile formation

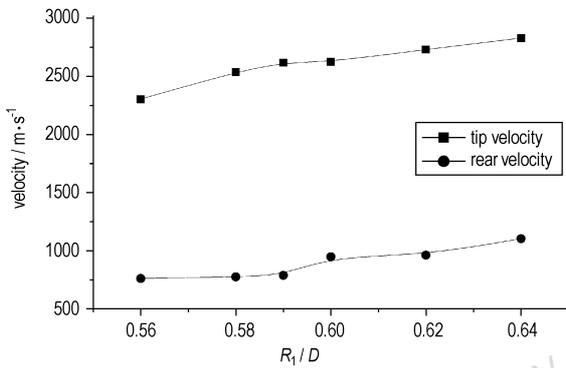


图 7 曲率半径对弹丸速度影响

Fig. 7 Effects of curvature radius on projectile velocity

3.3.3 罩半锥角 α

变化罩的半锥角 α ，罩直径 D 随之变化，其它罩参量和装药长径比保持不变。计算结果如图 8 和图 9 所示。弹丸头部速度、头尾速度差和长径比随 α 值增大而减小，尾部速度随之增大。当半锥角越小时，弹丸头部速度越高，头部质量也越小，尾部速度越小。当 α 小到一定值时，弹丸将分裂成质量小的高速射流和质量大的低速栓体。

3.4 起爆方式对高速杆式弹丸成型和性能参数的影响

主装药在中心点起爆和环形起爆方式下，爆轰波的产生、传播、对药型罩的作用以及成型后的弹体形状如图 10 所示。点起爆后形成散心的球面爆轰波，波阵面法线与药型罩法线夹角大；而环形起爆后形成会聚的“喇叭形”爆轰波，降低了爆轰波阵面法线与药型罩法线之间的夹角，提高药型罩微元的压合速度 v_0 ，同时降低

罩微元的偏转角 δ ，从而降低罩微元的压合角 β ，这两方面的作用均能提高弹丸速度和高速段的质量。点起爆方式下，在 $t = 50 \mu s$ 时，弹丸头部速度 $v_{tip} = 2704 m \cdot s^{-1}$ ，尾部速度 $v_{rear} = 948.8 m \cdot s^{-1}$ ，头尾速度差 $\Delta v = 1755.2 m \cdot s^{-1}$ ，弹体长径比小；环形起爆方式下，在 $t = 50 \mu s$ 时，弹丸头部速度 $v_{tip} = 3250 m \cdot s^{-1}$ ，尾部速度 $v_{rear} = 1178 m \cdot s^{-1}$ ，头尾速度差 $\Delta v = 2072 m \cdot s^{-1}$ 。

因此，环形起爆方式在弹丸成型及其性能参数方面明显要优于中心点起爆方式。

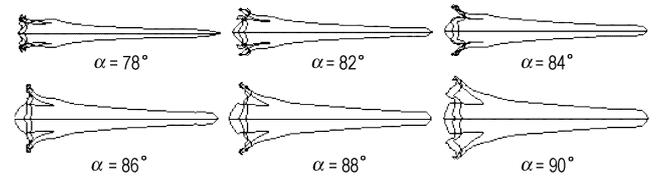


图 8 半锥角对弹丸成型的影响

Fig. 8 Effects of cone angle on projectile formation

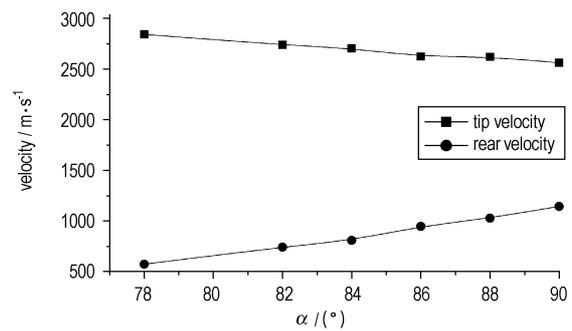


图 9 半锥角对弹丸速度影响

Fig. 9 Effects of cone angle on projectile velocity

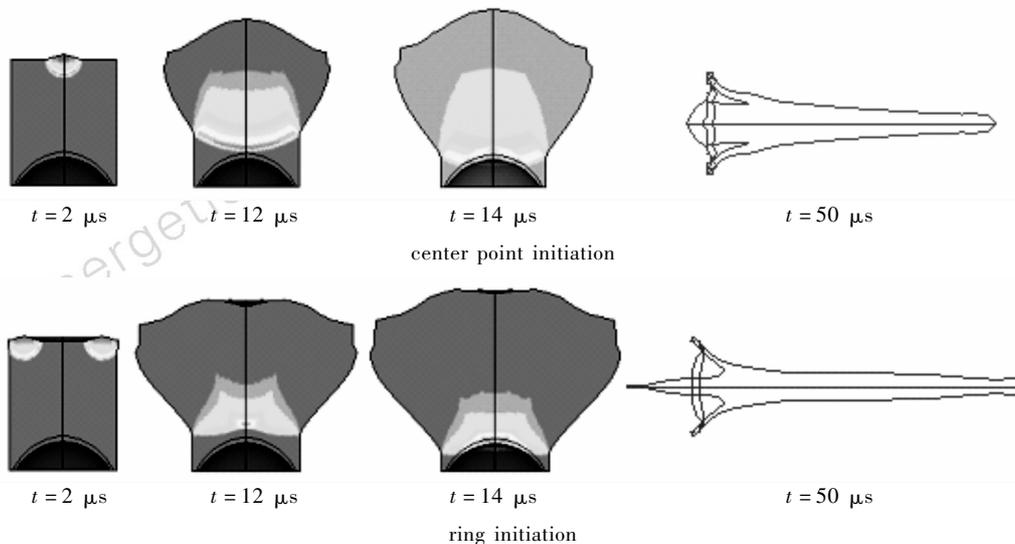


图 10 起爆方式对爆轰波形和弹丸成型的影响

Fig. 10 Effects of initiation methods on detonation waves and projectile formation

4 结论

(1) 根据高速杆式弹丸的特点和经典射流形成理论分析其成型条件,提出高速杆式弹丸的设计准则。

(2) 应用 LS-DYNA 软件对变球缺型装药结构下高速杆式弹丸的成型进行数值模拟,得到了高速杆式弹丸的成型过程和机理。通过计算,得到药型罩结构参数和起爆方式对弹丸成型的影响规律,并初步确定药型罩结构参数的相互关系为:内径 $R_1 = (0.55 \sim 0.6)D$,外径 $R_2 = (0.58 \sim 0.62)D$,药型罩高度 $H = (0.3 \sim 0.35)D$,半锥角 $\alpha = 82^\circ \sim 86^\circ$ 。这些结构参数是否最优化,还需要进一步的实验来验证。

参考文献:

- [1] Whelan A J, Furniss D R, Townsley R G. Experimental and simulated (analytical & numerical) elliptical-form shaped charges [A]. 20th International Symposium on Ballistics [C], Florida: National Defense Industrial Association, 2002. 446-454.
- [2] Baker E L A Sdaniels. Selectable initiation shaped charges [A]. 20th International Symposium on Ballistics [C], Florida: National Defense Industrial Association, 2002. 436-449.
- [3] Blache A, Weimann K. Shaped charge with jetting projectile for extended targets [A]. 17th 20th International Symposium on Ballistics [C], Midrand, South Africa: The South African Ballistic Organization, 1998. 235-244.
- [4] Mattsson K, Sorensen N, Ouve R, et al. Development of the K-charge, a short L/D shaped charge [A]. Reinecke W G. 18th International Symposium on Ballistics [C], San Antonio, Texas, Terminal Ballistics Vulnerability Wound Ballistics, 1999. 528-534.
- [5] 李发伯. 小长径比聚能装药实验研究 [R]. 绵阳: 流体物理研究所, 1997.
- LI Fa-bo. Experimental investigation on small length-diameter ratio shaped charges [R]. Mianyang: Fluid Physical Institute, 1997.
- [6] 谭多望, 孙承纬, 赵继波. 大锥角聚能装药实验研究 [J]. 高压物理学报, 2003, 17(3): 204-208.
- TAN Duo-wang, SUN Cheng-wei, ZHAO Ji-bo. Experimental investigation of shaped charge with large cone angle [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2003, 17(3): 204-208.
- [7] 王海福, 江增荣, 俞为民, 等. 杆式射流装药水下作用行为研究 [J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(3): 189-192.
- WANG Hai-fu, JIANG Zeng-rong, YU Wei-ming, et al. Behavior of jetting penetrator charge operating underwater [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(3): 189-192.
- [8] 黄正祥. 聚能杆式侵彻体成型机理研究 [D]. 南京理工大学学位论文, 2005.
- HUANG Zheng-xiang. Investigation on formation mechanism of rod-shaped penetrator [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Technology, 2005.
- [9] 隋树元, 王树山. 终点效应学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 198-260.
- SUI Shu-yuan, WANG Shu-shan. Terminal Effects [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.
- [10] Dobratz B M. Properties of chemical explosives and explosive simulants [R]. UCRL-51319, 1974.
- [11] Jones N. Structural aspects of ship collisions [A]. Jones N, Wierzbicki T. Structural Crashworthiness [M]. London: Butterworths, 1983.
- [12] Livermore. LS-DYNA Keyword User's Manual [DB]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2001. 610-616.
- [13] 桂毓林, 于川, 刘仓理. 带尾翼的翻转型爆炸成型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 Chang-li. 3D simulation of over-turned explosively formed projectile (EFP) with star-shaped fins [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 313-318.

Preliminary Study of High Velocity Rod-Shaped Projectile

LI Cheng-bing¹, SHEN Zhao-wu¹, PEI Ming-jing²

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

(2. Space College, Northwest Poly University, Xi'an 710072, China)

Abstract: According to the features of high velocity rod-shaped projectile and classical theory of shaped jet, formation qualifications of high velocity rod-shaped projectile were analyzed and some design guidelines were put forward. The shaped charge with modified hemispherical liner was simulated by LS-DYNA software. The formation process and mechanism of the high velocity rod-shaped projectile were obtained. The effects of structural parameters of liner and initiation methods on projectile formation and performance parameters were shown by simulation, the interrelations of structural parameters of liner were preliminarily fixed on; the inner radius of liner $R_1 = (0.55 \sim 0.6)D$, outer radius $R_2 = (0.58 \sim 0.62)D$, height $H = (0.3 \sim 0.35)D$, half cone angle $\alpha = 82^\circ \sim 86^\circ$, where D is diameter of liner.

Key words: explosion mechanics; high velocity rod-shaped projectile; liner; structural parameter; initiation method