文章编号：1001-1455(2014)01-0035-06

有效射流结构模式的数值模拟*

侯秀成[1,2]，蒋建伟[1]，陈智刚[2]
（1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室，北京 100081；
2. 中北大学机电工程学院，山西 太原 030051）

摘要：应用 LS-DYNA 程序及示踪点信息后处理方法，将典型小锥角药型罩沿母线方向分为 4 段，研究其微元在炸药爆炸驱动下的运动规律及有效射流结构模式。射流形成并稳定后，将罩质材料按速度大小分为 6 段，得到各段结构组成模式。结果表明，有效射流高速段由药型罩顶部材料组成，次高速段及中速段由罩中部及中下部材料组成，靠近罩底部约 0.25 倍罩高范围内的材料不形成射流，有效射流段为初始材料微元的管状分层分布形结构。

关键词：爆炸力学；结构模式；示踪点；有效射流；药型罩；LS-DYNA 程序
中图分类号：O385；TJ410.33　　**国标学科代码**：13035　　**文献标志码**：A

现代战争中，随着新结构新原理产生的新型复合装甲的不断更新换代，坦克等坚固目标有了更强防护能力，对武器系统性能提出了更高的要求。提高弹药的目标特性适配性，成为常规战斗部毁伤技术发展的主要需求之一。在含能材料总能量及能量密度限定条件下，使破甲战斗部的输出效应与目标特性相匹配，从而实现对目标的高效毁伤，是目前破甲弹药研究的一个主要方向[1]。射流是破甲弹药对目标侵彻的携能体，对目标的侵彻效果与有效射流性能有着密切关系[2]。研究并掌握射流结构模式的规律，寻找控制射流结构模式的分配方法，可为装药结构参数匹配关系和高效破甲战斗部的研究提供参考。

聚能装药射流作用过程复杂，由于理论及测试手段的局限性，难以详细获取材料内部微元的相互作用细节。于骐[3]、赵国志[4]和朱鹤荣等[5]分别用回收杵体的方法，对射流形成及罩微元对侵彻的贡献进行估算。裴思行[6]采用分段切割药型罩的杵体回收方法，对射流结构模式进行了研究。数值模拟快速发展，成为聚能装药研究的重要手段，在材料模型、计算精度等一致的情况下，以数值模拟手段分析射流相关规律及趋势是可行的[7-9]。数值模拟中，将空间与时间离散，可产生大量其他研究手段难以获得的数据信息。侯秀成等[10]通过数值模拟及静态示踪点处理方法，得到不同时刻射流速度梯度，发现射流在稳定拉伸前，其速度分布并非线性，且射流形成初期最高射流速度并不在射流头部最前端，这导致射流头部产生质量堆积。侯秀成等[11]发现射流侵彻中等强度的钢质靶板时，常规射流的临界侵彻速度为 2 km/s 左右，而杆式射流的临界侵彻速度为 1.4 km/s。本文中，采用数值模拟示踪点处理方法及分段材料定义法，对典型小锥角罩装药结构的射流形成过程及射流结构进行研究，获得药型罩微元在射流形成过程中的更多细节信息。可用以分析药型罩材料对目标侵彻有效能量及炸药的有效利用率，拟为研究射流形成机理、高效聚能装药及复合药型罩提供参考。

1　数值模拟

1.1　算法及材料模型

聚能装药的作用过程是多物质相互作用的大变形运动[12]，采用 Van Leer ALE 算法[13-15]进行模拟。该算法为二阶精度的对流算法，可较精确计算炸药爆炸过程中的动量及能量转化。

炸药材料模型则采用高能炸药燃烧模型和 JWL 状态方程共同描述[13-15]，其中 JWL 方程的表达式如下：

* **收稿日期**：2012-07-16；**修回日期**：2012-12-17
作者简介：侯秀成(1978—　)，男，博士研究生，讲师。

$$p = Fp_{\mathrm{eos}}(V,E) \tag{1}$$

$$p_{\mathrm{eos}} = A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)\mathrm{e}^{-R_1V} + B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)\mathrm{e}^{-R_2V} + \frac{\omega E}{V} \tag{2}$$

式中：p_{eos}为来自于 JWL 状态方程的炸药爆轰产物压力；p 为任意时刻炸药单元所释放的压力；F 为炸药燃烧质量分数；V 为相对体积；E 为体积内能密度；A、B、R_1、R_2 和 ω 为输入参数。B 炸药的主要材料模型参数分别为：$\rho=1.717\ \mathrm{g/cm^3}$，$D=7.98\ \mathrm{km/s}$，$p_{\mathrm{CJ}}=29.5\ \mathrm{GPa}$，JWL 状态方程参数分别为：$A=524.23\ \mathrm{GPa}$，$B=7.678\ \mathrm{GPa}$，$R_1=4.2$，$R_2=1.1$，$\omega=0.34$，$E_0=8.5\ \mathrm{J/mm^3}$。

药型罩材料选用紫铜，使用 Steinberg 模型和 Grüneisen 状态方程[13]描述，紫铜材料模型的主要参数分别为：$\rho=8.93\ \mathrm{g/cm^3}$，$G=47.7\ \mathrm{GPa}$，$\sigma_y=0.65\ \mathrm{GPa}$，$c=3.94\ \mathrm{km/s}$，$s_1=1.49$，$s_2=0.6$，$s_3=0$，$\gamma_0=2$，$a=0.47$。

1.2 示踪点处理介绍

LS-DYNA 求解器提供对 ALE 单元的示踪点历史文件的输出，体现在 trhist 文件[13]中。trhist 文件以固定格式存放示踪点信息数据，可用于计算结果的二次处理，有动态示踪点及静态示踪点两种设置方式，分别介绍如下。

在药型罩内、外表面上由顶部到底部沿母线方向均匀设置一定数量的动态示踪点，药型罩压垮形成射流后，射流的动态示踪点会随着射流微元的运动而运动，如图 1 所示。材料微元的坐标、速度及密度等信息将被以固定格式记录于一定格式的文件中，计算结束后，通过一定的数据处理方法用来分析射流微元的运动轨迹及相互位置。

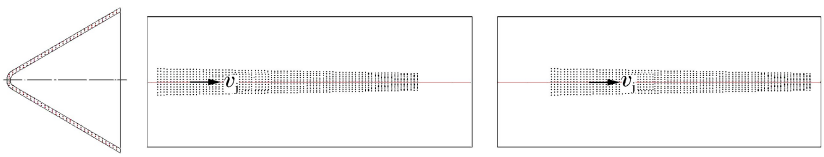


图 1 射流的动态示踪点示意图

Fig. 1 Free tracer point of effective jet

在药型罩口部到炸高范围内均匀设置一定数量静态示踪点，如图 2 所示。当药型罩材料经过这些示踪点时，材料微元的坐标、速度及密度等信息被以固定格式记录于一定格式的文件中，计算结束后，通过一定的数据处理方法可以用来量化分析射流性能参数。

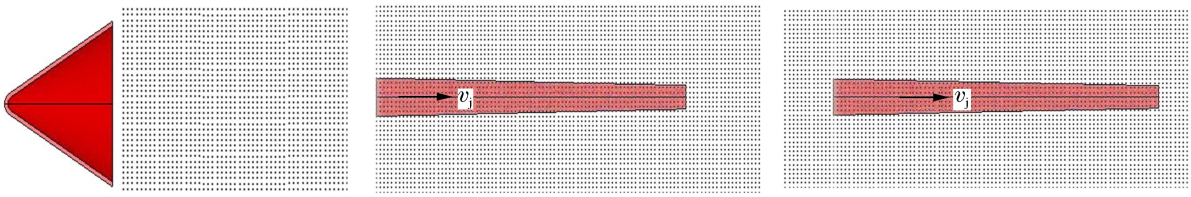


图 2 射流的静态示踪点示意图

Fig. 2 Fixed tracer point of effective jet

1.3 药型罩微元的有限元处理

在用 LS-DYNA 程序求解前的前处理过程中，可将药型罩沿母线方向分为若干段，在网格划分阶段，将每段药型罩应用不同的 PART 号[13-15]，在求解前使用相同的材料模型。应用此方法可将药型罩分为若干个材料微元，用于研究在爆轰产物的作用下药型罩材料微元之间的相互作用与位置关系。考虑 LS-DYNA 程序在多物质 ALE 算法在求解稳定性方面的局限，将所研究的药型罩分为 4 段，如图 3 所示。

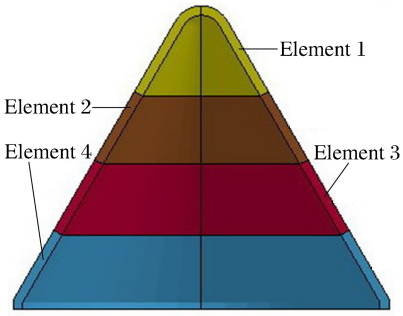


图 3 药型罩微元分段处理

Fig. 3 Liner divided into sections

1.4 装药结构

选用典型装药结构进行数值模拟，装药为 B 炸药，紫铜药型罩，

无壳体，主要装药结构参数分别为：装药直径 $D_0=40$ mm，罩顶装药高度 $H=32$ mm，罩锥角 $2\alpha=60°$，罩壁厚 $\delta=1.0$ mm，罩顶圆角半径 $R=2.5$ mm，炸高 $H_a=120$ mm。

2　结果分析

2.1　示踪点轨迹

图 4 为射流头部到达炸高位置时药型罩内、外表面的示踪点轨迹。由图可见，药型罩的大部分外表面材料形成杵体，药型罩内表材料微元则形成射流部分。这与实验和理论研究得到的结果完全一致，进一步证实了数值模拟研究射流结构模式的正确性。

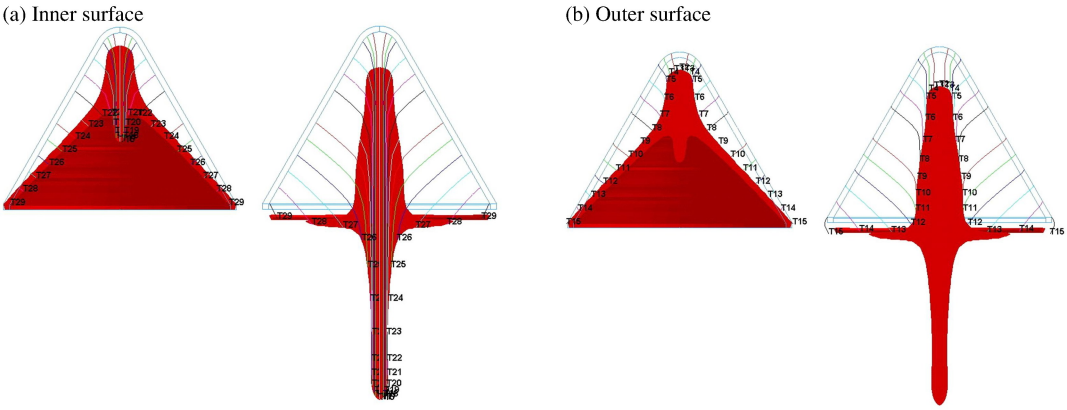


图 4　药型罩内外表面材料示踪点轨迹

Fig. 4　Trace line of tracer points at liner surface

2.2　罩质材料微元的运动规律

根据聚能装药轴对称理想不可压缩流体理论，药型罩微元向轴线运动过程中，能量由外层向内层集中，且愈靠近对称轴，能量集中愈快。当微元到达轴线附近时，由于微元内表面附近的压力急剧升高，使微元变宽，并且改变运动方向，最后内层金属成为沿轴向运动的射流[16]。

罩质材料微元运动的数值模拟结果如图 5 所示。由图可见，药型罩分段处理后，药型罩顶部材料微元在爆轰压力作用下先压垮形成一个连续的杆状物。随着后续材料微元的不断压垮与闭合，先参与压垮的材料被后续材料微元挤压拉伸并最终分离，形成射流的头部及杵体的尾部，且原有空间被后续材料微元占用，材料微元之间呈现为相互嵌套的管状分层压垮的形式[2]。图 6 为分段切割药型罩的回收杵体，也可见杵体是中空的，相邻两段杵体呈相互嵌套状，证实了上述射流形成规律。另外，距药型罩底端

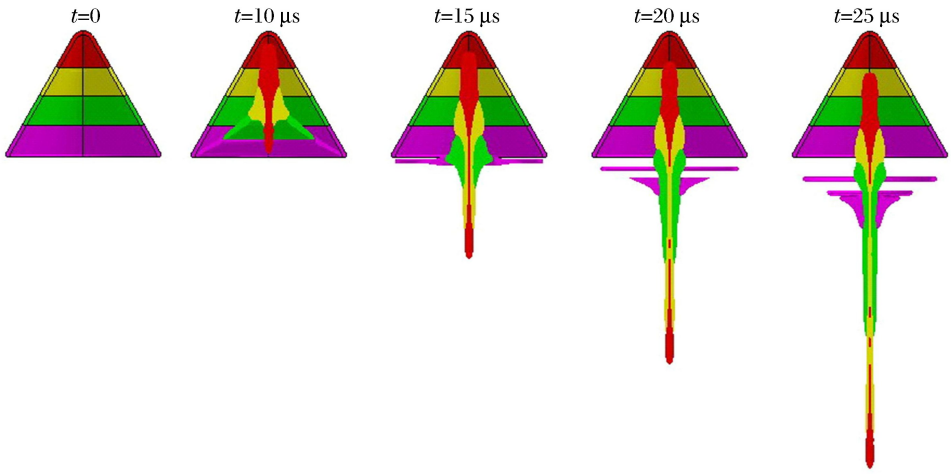


图 5　药型罩材料微元运动规律及相互作用关系

Fig. 5　Moving pattern and interaction of material sections of liner

0.25 倍高度以上的内表面材料微元形成射流部分，距罩底端 0.25 倍高度以下的药型罩材料则形成崩落圈。这与文献[5]回收杵体完全一致。文献[17]中提及的杵体金属微结构组分也表明，剖面层越靠近轴线，各结构组分沿轴向的排列方向和伸展越明显，文献[17]中还提到铜可以生成密实的射流，但其密度降低不到 10%，本文中数值模拟结果进一步解释了上述实验现象。

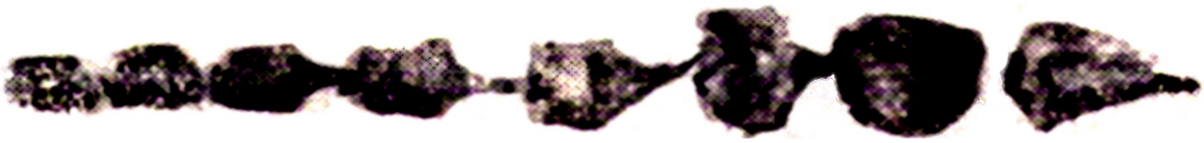


图 6 分段切割罩杵体回收结果

Fig. 6 Recovered slugs of sectional liner

2.3 有效射流速度

实验和理论研究表明，射流的整个长度都具有侵入靶板的能力，参与靶板穿孔的部分称为射流的有效长度，其微元的最低速度 v_j^* 称为临界速度[17]。对于 45 钢靶板，射流的临界侵彻速度通常为 2.0～2.2 km/s[17]，本文中取有效射流段的临界速度 $v_j^*=2.0$ km/s[18]。通过上述示踪点信息处理方法，可获取 30 μs 时速度 2.0 km/s 的射流示踪点坐标，速度大于 2.0 km/s 的射流微元为有效射流。

图 7 为由示踪点处理方法获得的有效射流头部速度变化及速度分布曲线。由图 7 可见，射流头部速度存在一个最大值 5.7 km/s，射流头部速度达最大值后由于射流速度梯度的存在，射流能量在射流段内不断重新分配，致使射其头部速度逐渐下降，有效射流除头部小段范围大致呈线性分布，这与 PER 理论的结果一致[12].

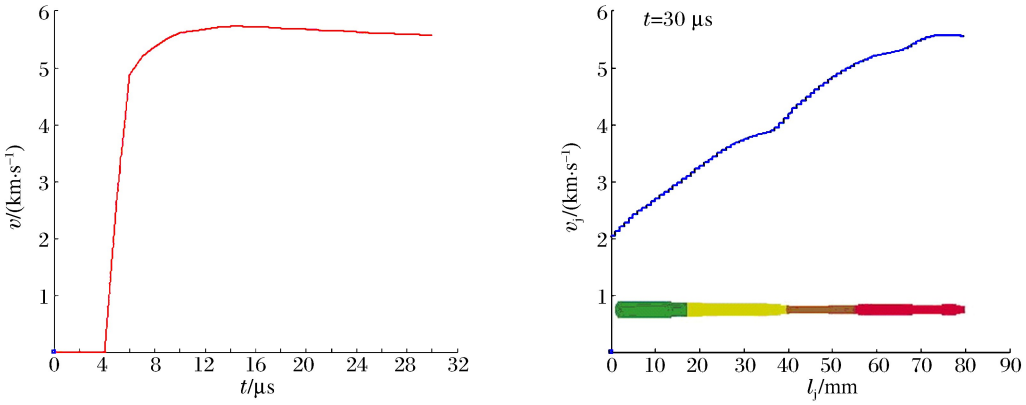


图 7 有效射流头部速度变化及速度分布曲线

Fig. 7 Tip velocity and velocity distribution of effective jet

2.4 有效射流及杵体结构

射流形成并稳定后，不考虑射流沿径向微小的速度梯度，将罩质材料按速度大小沿轴线分为 6 段(见图 8)，分别称为：射流高速段($v\geqslant5.0$ km/s)、射流次高速段(4.0 km/s$\leqslant v<$5.0 km/s)、射流中速段(3.0 km/s$\leqslant v<$4.0 km/s)、射流低速段(2.0 km/s$\leqslant v<$3.0 km/s)、过渡段(1.0 km/s$\leqslant v<$2.0 km/s)及杵体段($v<$1.0 km/s)。由图可知，射流高速段及次高速段中包含微元 1 及微元 2，射流中速段及低速段包含微元 2 及微元 3，过渡段及崩落区只包含微元 4，杵体则包含了除微元 4 的所有微元。药型罩沿母线各段微元形成有效射流的贡献是不同的，但其变化有规律，贡献比例最大处大概在药型罩的中下部位[19]。

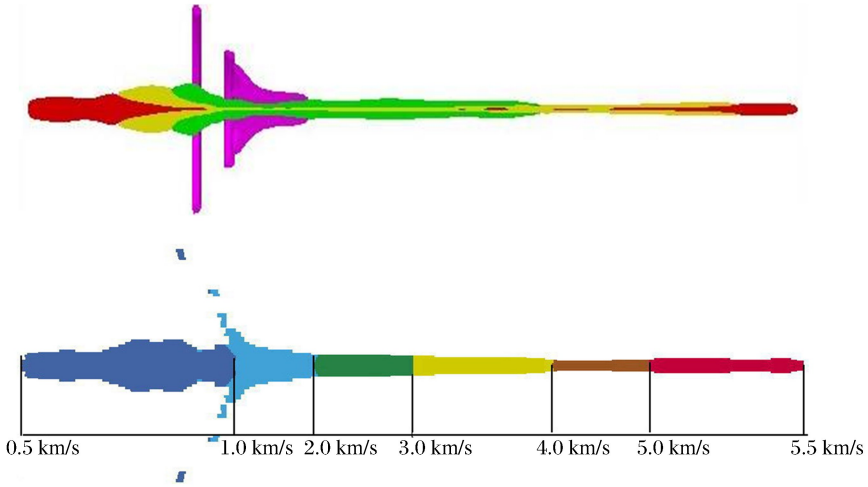


图 8 有效射流及杵体的结构组成

Fig. 8 Composition module of effective jet and slug

3 结　论

将药型罩沿母线方面均分为 4 段，用数值模拟方法研究了典型无壳聚能装药结构在射流形成过程中药型罩微元的运动规律及相互作用关系。

有效射流高速段及次高速段由药型罩内表面顶部及中上部材料组成，射流的次高速段及中速段由药型罩内表面中上部及中下部材料组成，有效射流段为药型罩初始材料微元的管状分层分布形结构。

过渡段及崩落区由药型罩底部材料组成，杵体包含除罩底微元的所有材料微元。

有效射流结构模式可为聚能装药射流形成机理、高效聚能装药结构及复合药型罩研究提供参考。

参考文献：

[1] 肖川，莫红军，苏健军，等. 常规战斗部毁伤技术中的能量学问题分析[J]. 火炸药学报，2011，35(增刊)：1-5.
Xiao Chuan, Mo Hong-jun, Su Jian-jun, et al. Energy problem of general warhead[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 35(suppl): 1-5.

[2] Walters W P, Zukas J A. Fundamentals of shaped charges[M]. New York: Wiley Press, 1989.

[3] 于骐. 某破甲弹药型罩各微元破甲效率[J]. 华东工程学院学报，1978，(3)：119-125.

[4] 赵国志. 某破甲弹杵体分析[J]. 华东工程学院学报，1978(3)：107-118.

[5] 朱鹤荣，龚良贵. 破甲技术文集(二)：示踪点法杵体回收的实验室研究[M]. 北京：国防工业出版社，1982.

[6] 裴思行. 聚能装药射流的结构模式研究[J]. 太原机械学院学报，1986(3)：97-102.
Pei Si-xing. A study for the jet constitutive mode of shaped charge[J]. Journal of Taiyuan Institute of Machinery, 1986(3): 97-102.

[7] 陈智刚，侯秀成，李守苍，等. 高速破甲弹破甲稳定性数值模拟与实验研究[J]. 弹箭与制导学报，2009，29(1)：124-127.
Chen Zhi-gang, Hou Xiu-cheng, Li Shou-cang, et al. Numerical simulation and experimental study of high-speed high explosive antitank projectile stability[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(1): 124-127.

[8] 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.

[9] 蒋建伟，帅俊峰，李娜，等. 多模毁伤元形成与侵彻效应的数值模拟[J]. 北京理工大学学报，2008，28(9)：756-758.
Jiang Jian-wei, Shuai Jun-feng, Li Na, et al. Numerical simulation of the formation of multimode EFP and its penetration effect to RHA[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(9): 756-758.

[10] 侯秀成,陈智刚. 成型装药射流速度梯度数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2009(6):115-117.
Hou Xiu-cheng, Chen Zhi-gang. Numerical simulation of jet velocity gradient of shaped charge[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009,29(6):115-117.
[11] 侯秀成,蒋建伟,陈智刚. 某成型装药射流的数值模拟与射流转化率[J]. 火炸药学报,2012,35(2):53-57.
Hou Xiu-cheng, Jiang Jian-wei, Chen Zhi-gang. Numerical simulation and conversion rate of jet from a shaped charge[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012,35(2):53-57.
[12] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000:196-278.
[13] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual: Version 971[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
[14] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京:科学出版社,2005.
[15] 时党勇,李裕春. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
[16] 北京理工大学八系. 爆炸及其作用:下册[M]. 北京:国防工业出版社,1979.
[17] 解永红,陈智刚,赵太勇. 聚能装药药型罩作用机理的实验解析[J]. 弹箭与制导学报,2004,24(1):54-55.
Xie Yong-hong, Chen Zhi-gang, Zhao Tai-yong. Experiment analysis about the process of working shaped charge liner[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004,24(1):54-55.
[18] 奥尔连科 Л П. 爆炸物理学[M]. 孙承纬,译. 3 版. 北京:科学出版社,2011.
[19] 王儒策,赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993.

Numerical simulation on structure modules of effective jet*

Hou Xiu-cheng[1,2], Jiang Jian-wei[1], Chen Zhi-gang[2]
(1. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*)

Abstract: The typical copper liner with a small cone angle was divided into four sections along the bus direction via the explicit finite software LS-DYNA, and the tracer point method was used to study the movement of the liner element and the structure modules of the effective metallic jet. The result indicates that the liner material may be divided into six sections by velocity interval after the jet formation and stabilization. The highest-velocity section is made of the top material inside the liner, and the mid-higher velocity section and the mid-velocity section made of the middle and lower half material inside the liner, respectively. In the height range of about 0.25 times as high as the liner height away from the liner bottom, the liner material can not become effective jets. And the initial material elements of the liner are distributed as tubular in the effective jet.

Key words: mechanics of explosion; structure module; tracer point; effective jet; liner; LS-DYNA

* Received 16 July 2012; Revised 17 December 2012
Corresponding author: Jiang Jian-wei, bitjjw@bit.edu.cn

(责任编辑 丁 峰)