

# 爆炸成型弹丸速度计算方法研究

赵慧英, 沈兆武

(中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 230026)

**[摘要]** 从炸药装药的瞬时爆轰产物飞散理论出发, 根据动量守恒原理得出药型罩装药形成爆炸成型弹丸的速度计算模型, 并根据装药高度与直径之比对弹丸速度的影响修正了计算模型。应用该计算模型计算了大锥角药形罩和球缺药型罩装药形成的爆炸成型弹丸速度, 计算结果与实验和数值模拟得到的结果吻合较好, 此速度计算模型适合于工程应用。

**[关键词]** 爆炸成型弹丸; 瞬时爆轰产物飞散; 动量守恒; 弹丸速度

**[中图分类号]** TG392; TJ410.3\*3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009 - 1742(2007)08 - 0062 - 04

爆炸成型弹丸(EFP)是一种大炸高、侵彻能力强、成型性稳定的新型装药结构。理论研究和实验表明, EFP 侵彻能力很大程度上取决于弹丸的速度, 其成型过程属于爆炸高压加载范畴, 药型罩和炸药作用机理复杂, 影响因素很多。目前对 EFP 成形计算分析一般采用准定常理想不可压缩流体模型或数值模拟软件, 这两种方法在分析 EFP 成型方面效果较好, 但计算量大, 耗时多, 工程应用不便。笔者对基于瞬时爆轰产物飞散理论的弹丸速度计算方法进行了研究, 并应用数值模拟和实验方法进行检验。文献[1]也涉及到这方面的研究, 但并没有考虑装药长径比对 EFP 速度的影响, 计算结果没有经过数值模拟和实验检验。本文的研究结果证明, 这种方法是计算 EFP 速度的较为简单且适合于工程应用的方法。

## 1 基于瞬时爆轰产物飞散理论的计算方法

### 1.1 EFP 装药结构及药型罩模型

EFP 装药结构如图 1 所示, 药型罩模型见图 2。

### 1.2 EFP 弹丸速度计算公式

瞬时爆轰产物飞散理论首先设想炸药柱各微元均在保持初始比体积  $V_0$  条件下, 瞬时完成反应, 变

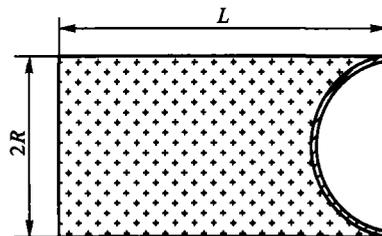


图 1 基本的 EFP 装药结构示意图

Fig. 1 Primary shaped charge structure of EFP

为产物。假设炸药所放出的能量全部转化为产物的内能, 产物飞散时全部转化药型罩动能, 整个过程瞬间完成与外界无能量交换。若产物为  $\gamma$  律完全气体, 不计炸药初始压力得到瞬时爆轰产物的初始压力  $p_0$  以及初始声速  $c_0$  与爆轰参数和炸药爆热的关系<sup>[2]</sup>:

$$p_0 = (\gamma - 1)\rho_0 Q = p_1/2 \quad (1)$$

$$c_0 = (\gamma p_0 V_0)^{1/2} = \left[ \frac{\gamma}{2(\gamma + 1)} \right]^{1/2} D_1 = \left( \frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^{1/2} c_1 \quad (2)$$

式中  $p_0$  为爆轰产物初始压力;  $\gamma$  为等熵指数;  $\rho_0$  为装药密度;  $Q$  为装药爆热;  $c_1$  为  $C - J$  声速;  $D_1$  为炸药爆速;  $p_1$  为  $C - J$  爆轰压力。

若  $\gamma = 3$ , 产物作用于图 2 所示药型罩微元的动

[收稿日期] 2006 - 05 - 22; 修回日期 2006 - 10 - 16

[作者简介] 赵慧英(1979 - ), 女, 山西定襄县人, 中国科学技术大学博士研究生

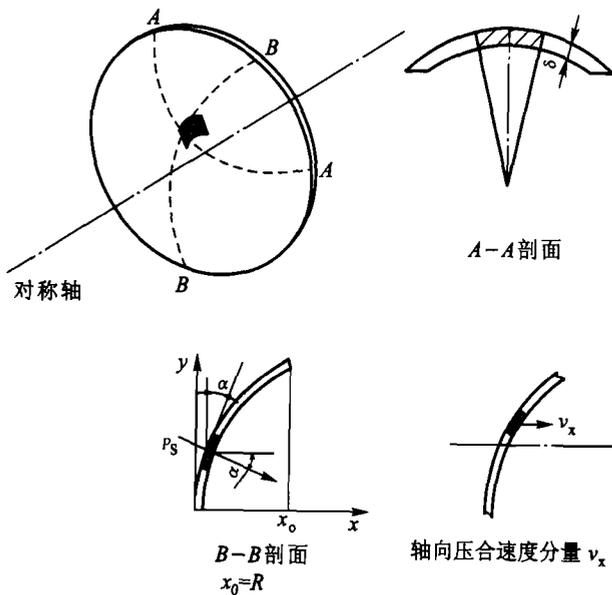


图2 药型罩模型及几何描述

Fig.2 Liner schematic plan and geometric description

量冲量为

$$I(x) = p_s t ds \quad (3)$$

其中  $t$  为瞬时爆轰压力作用时间, 爆轰产物微元受到的冲量为

$$p_s t = (R - y) \rho_0 u \quad (4)$$

式中  $u$  为爆轰产物飞散速度;  $R$  为药型罩半径;  $x, y$  为微元坐标值,

$$u = \sqrt{2Q} \quad (5)$$

根据式(3), 式(4), 式(5)得

$$I(x) = p_s t ds = \rho_0 \sqrt{2Q} (R - y) ds = 2\pi\rho_0 \sqrt{2Q} (R - y) y dx \quad (6)$$

微元体的初始动量为0, 由动量守恒定律得到:

$$2\pi\rho_0 \sqrt{2Q} (R - y) y dx = m(x) v(x) \quad (7)$$

式中  $m(x) = \rho ds \delta(x)$  是坐标值为  $x$  的微元的质量,  $\delta(x)$  是坐标值为  $x$  的微元的厚度,  $v(x)$  是坐标值为  $x$  的微元的压合速度,  $\rho$  为药型罩密度。因此有

$$v(x) = \frac{\rho_0 (R - y)}{\sqrt{k^2 - 1} \rho \delta(x)} D \quad (8)$$

式中  $D$  为炸药爆速。

由于装药结构的对称性, EFP 只有  $x$  方向的动量, 其整体的动量与微元动量之和相等, 因此有

$$\int_0^{x_0} 2\pi\rho_0 \sqrt{2Q} (R - y) y v(x) \cos\alpha dx = v \int_0^{x_0} \rho \delta(x) dx \quad (9)$$

式中  $x_0$  为药型罩高度;  $\alpha$  为药型罩微元压合角度;  $v$

为 EFP 速度。

角度  $\alpha$  与药型罩的几何形状及  $y = f(x)$  的函数形式有关, 如图2所示:

$$\alpha = \arccot f'(x) \quad (10)$$

因此得到弹丸速度为

$$v = \frac{\rho_0 D}{\rho \sqrt{\gamma^2 - 1}} \cdot \frac{\int_0^{x_0} f(x) [R - f(x)] \cos(\arccot f'(x)) dx}{\int_0^{x_0} f(x) \delta(x) dx} \quad (11)$$

以上方法没有考虑装药高度和壳体对弹丸速度的影响, 文献[3]和[4]的研究结果表明, 当壳体厚度从1 mm增加到6 mm时, 弹丸速度只增加5.8%, 因此壳体厚度对弹丸速度的影响不是很大, 可以不考虑。根据文献[4]和[5], 考虑装药高度与直径之比对弹丸速度的影响, 对式(11)进行修正, 得到:

$$v = K \frac{\rho_0 D}{\rho \sqrt{\gamma^2 - 1}} \cdot \frac{\int_0^{x_0} f(x) [R - f(x)] \cos(\arccot f'(x)) dx}{\int_0^{x_0} f(x) \delta(x) dx} \quad (12)$$

$$K = 1.1 (L/2R)^{0.36} \quad (13)$$

$K$  为修正系数。

## 2 速度计算模型应用于大锥角药形罩

### 2.1 计算结果与实验结果比较

为了验证上述计算方法的可行性, 进行了EFP测速实验研究。实验用的是锥角  $125^\circ$ , 壁厚3 mm, 直径  $\phi 50$  mm, 密度  $8.93 \text{ g/cm}^3$  的大锥角紫铜药型罩。装药用梯黑混合炸药, 装药密度为  $1.63 \text{ g/cm}^3$ , 爆速为  $6930 \text{ m/s}$ , 装药高度与直径之比  $L/2R = 1.3$ 。实验采用断通靶测量, 测速实验设置如图3所示, 实验测得弹丸速度为  $1342 \text{ m/s}$ 。

将实验所用药型罩的有关参数及炸药装药有关参数代入速度计算模型中进行计算, 且  $\gamma = 3$ 。由于药型罩为等壁厚, 因此:

$$y = f(x) = x \tan\theta \quad (14)$$

式中  $\theta$  为药型罩半锥角。

因此式(12)应用于等壁厚大锥角药形罩时可简化为

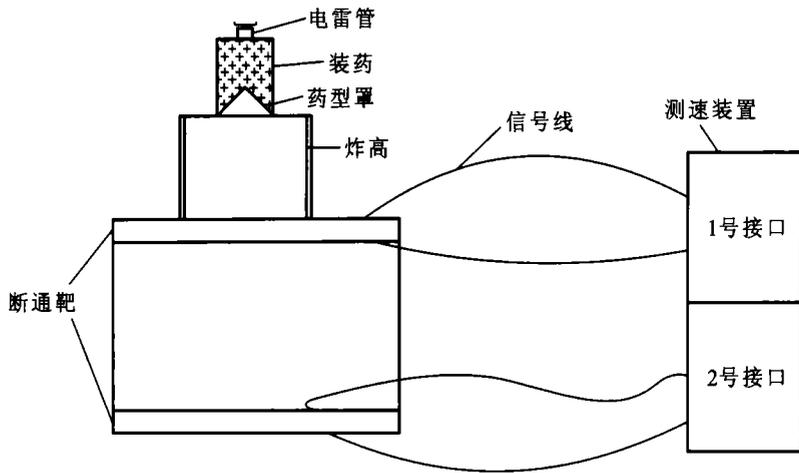


图3 测速实验设置

Fig. 3 Velocity test installing

$$v = K \frac{\rho_0 D}{\rho \sqrt{\gamma^2 - 1}} \frac{\sin \theta}{3} \quad (15)$$

计算得到的弹丸速度  $v = 1\,327.7\text{ m/s}$ , 与实验结果 ( $1\,342\text{ m/s}$ ) 的偏差较小。

### 2.2 速度计算模型计算结果与数值模拟结果比较

为了从不同的角度验证计算模型的正确性, 应用 LSDYNA - 3D 有限元程序对实验所用的药型罩装药进行数值模拟计算。图4为大锥角药型罩的计算模型, 图5为 EFP 速度时程曲线, 爆轰结束弹丸速度变化平缓, 最终速度为  $1\,319\text{ m/s}$ 。应用上述模型计算得到的结果与数值模拟计算结果较为吻合。

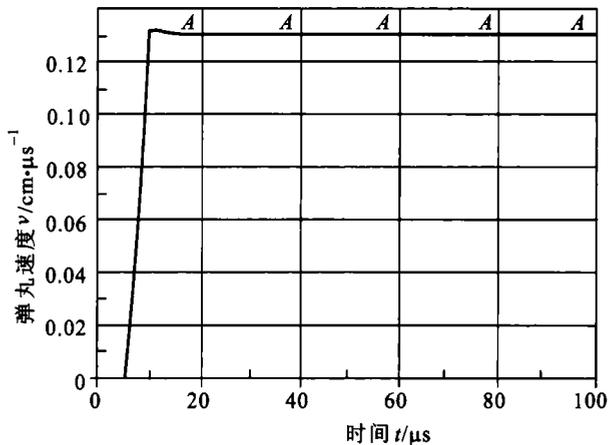


图5 数值模拟计算得到的 EFP 时程曲线

Fig. 5 EFP velocity history curve from numerical simulation

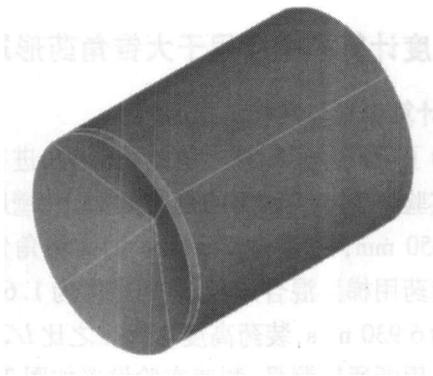


图4 大锥角药型罩装药计算模型

Fig. 4 Numerical simulation model of large apex angle shaped charge

2.5 mm, 曲率半径 120 mm, 装药直径  $\phi 50\text{ mm}$ , 装药密度  $1.63\text{ g/cm}^3$ , 装药爆速  $6\,930\text{ m/s}$ , 装药高度与直径之比 1.1。

由于药型罩壁厚相等, 根据图2所示的药型罩所在的坐标,  $y$  和  $x$  的关系可以表示为

$$y = f(x) = \sqrt{R_0^2 - (R_0 - x)^2} \quad (16)$$

将式(16)代入式(12)并代入有关参数, 得到 EFP 的最终速度为  $v = 2\,279.6\text{ m/s}$ 。

对上述药型罩装药应用 LSDYNA - 3D 程序进行数值模拟, 建立的模型如图6所示, 计算得到的弹丸头部速度时程曲线如图7所示。计算得到 EFP 的最终速度为  $2\,321\text{ m/s}$ 。可见, 用所提出的速度计算模型与数值模拟计算结果较为吻合。

### 3 球缺药型罩形成弹丸速度计算结果与数值模拟计算结果比较

实例计算的球缺药型罩直径为  $\phi 100\text{ mm}$ , 壁厚

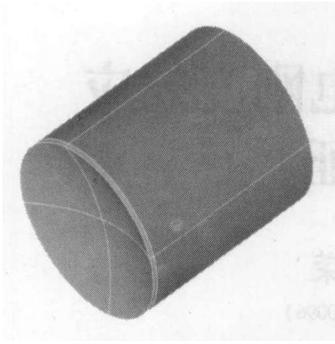


图6 球缺药型罩装药模型

Fig. 6 Sphere liner shaped charge numerical model

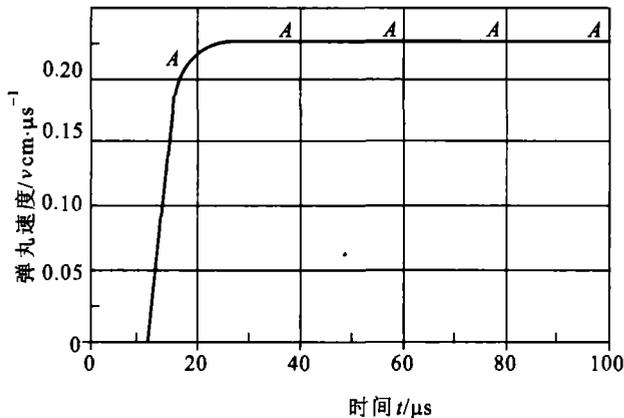


图7 数值模拟得到的EFP速度时程曲线

Fig. 7 EFP velocity history curve from numerical simulation

## 4 结语

根据瞬时爆轰产物飞散理论得到作用在药形罩微元上的压力,利用药型罩微元的动量守恒定律计算得到爆炸成型弹丸的速度,计算公式较为简单;由于装药高度与装药直径之比对弹丸速度影响较大,需对计算公式进行修正;应用笔者提出的计算模型得到的弹丸速度与实验和数值模拟结果吻合较好,因此提出的计算爆炸成型弹丸速度的方法是适用的。

## 参考文献

- [1] 李必红,鲁艳红,陈寿如,等. 基于瞬时爆轰 EFP 成型速度的分析及应用研究[J]. 采矿技术,2005,5(3):87~89
- [2] 孙承伟,卫玉章,周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京:国防工业出版社,1999. 557~634
- [3] 慈明森. 爆炸成型弹丸优化设计[J]. 火箭技术,1994,(2):1~5
- [4] 周翔,龙源,岳小兵. 76 mm 口径 EFP 成形过程数值模拟及影响因素研究[J]. 弹道学报,2003,15(2):59~63
- [5] Weimann K, Blache A, Caure M, et al. Terminal ballistics of EFPs with high L/D - ration[A]. 17th International Symposium of Ballistics [C]. Midrand, South Africa: International Ballistics Committee. 1998. 281~287

# Calculation Method of Explosively Formed Projectile Velocity

Zhao Huiying, Shen Zhaowu

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**[Abstract]** From the theory of instantaneous expansion of detonation product and momentum conservation, this paper obtains velocity calculation model of explosively formed projectile (EFP) and the model is revised due to the influence of the ratio of charge altitude to charge diameter. This paper calculates the velocities of EFPs formed by large apex angle liner and sphere liner through the velocity calculation model and the results are consistent with the numerical simulation and experiment results. This velocity calculation model is applicable in engineering.

**[Key words]** explosively formed projectile (EFP); instantaneous expansion of detonation product; momentum conservation; EFP velocity