

文章编号: 1003-1480 (2003) 01-0045-04

# 药型罩曲率半径对爆炸成型 弹丸参数的影响

李裕春<sup>1</sup>, 杨万江<sup>2</sup>, 沈蔚<sup>1</sup>

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京, 210007; 2. 成都军区科研设计所, 四川 成都, 610031)

**摘 要:** 采用显式有限元程序对爆炸成型弹丸的形成过程进行了数值模拟, 模拟的弹丸形状与高速摄影记录的结果非常相似。本文主要分析了 EFP 装药结构中药型罩曲率半径这一因素对所形成的弹丸参数的影响, 结果显示, 药型罩曲率半径对爆炸成型弹丸的外形、弹径和弹丸长度有着明显的影响。数值模拟技术可以指导爆炸成型弹丸战斗部的设计和分析, 有助于研究 EFP 形成过程的研究, 对进一步展开聚能装药的理论研究也具有一定的指导作用。

**关键词:** 爆炸成型弹丸; 数值模拟; 药型罩; 曲率半径

中图分类号: TD235

文献标识码: A

## Influence of Liner Curvature Radius on Parameters of Explosively Formed Penetrator (EFP)

LI Yu-chun, YANG Wan-jiang, SHEN Wei

(1. Engineering Institute of Engineering Corps. Nanjing, 210007;

2. Designing Institute of Chengdu Military Area, Chengdu, 610031)

**Abstract:** This paper takes advantage of explicit finite element method to simulate the process of explosively formed penetrator (EFP) formation. The shape of simulated EFP is similar to the records of high-speed photography. We mainly analyzes influence of liner curvature radius on the parameters of EFP. The results show that liner curvature radius does have influence on the shapes of EFP and its diameter and length. The technology of numerical simulation is able to involve in design and analysis of EFP warhead. It would help to give useful insight into the unobservable part of the EFP formation process and validate the theory investigation of shaped charge.

**Key words:** Explosively formed penetrator; Numerical simulation; Liner; Curvature radius

由于爆炸成型弹丸(以下简称 EFP)战斗部具有大炸高特点, 所以它在国防应用中有相当长的使用历史。从 20 世纪 70 年代开始, 人们在靶板毁伤效应中引入炸高的概念后, 大大提高了动能侵彻体的侵彻能力, 在实际的战斗部中开始采用 EFP<sup>[1]</sup>。在大炸高条件下使用 EFP 时, 其性能受

到药型罩材料的密度、极限拉伸及其所需的气动稳定性的限制。

EFP 的成形受多种因素的影响, 如炸药性能、装药结构、外壳材料和结构以及药型罩材料和结构等。国内外对 EFP 的形成和侵彻特性进行过较为深入的试验和数值模拟研究, 如 C. Lam 和 D.

收稿日期: 2002-12-04

作者简介: 李裕春(1974- ), 男, 博士研究生, 主要从事爆破器材应用研究。

McQueen 等人采用二维有限元法分析了 EFP 的形成过程及其对水介质的侵入<sup>[2]</sup>，蒋浩征和刘乃生对大直径半球形药型罩的威力进行了模拟试验研究<sup>[3]</sup>。但在药型罩曲率半径方面，进行专门探讨的文献很少见诸报导。本文结合弹药小型化问题，利用二维有限元程序探讨 EFP 形成过程和药型罩曲率半径对 EFP 参数的影响。

## 1 数值模拟及分析

### 1.1 模型的基本参数

本文采用如图 1 的计算模型，它由炸药、壳体 and 药型罩组成。药型罩为等壁厚紫铜罩，其厚度为 2mm，曲率半径为 60mm，装药为 RDX/TNT(60/40) 炸药，主装药高度为 30mm（即球缺顶部到起爆中心点的距离），装药直径为 60mm，侧向外壳厚度为 3mm 的钢材料，顶外壳厚度为 6mm，材料为金属铝。计算模拟过程只改变药型罩的曲率半径，其它参数不变。表 1 中定义了模拟 EFP 所需的材料模型和状态方程<sup>[4]</sup>，材料的具体参数可参见参考文献<sup>[4]</sup>。

药型罩采用  $4 \times 20$  的单元划分，而炸药采用  $20 \times 20$  的单元划分，使炸药与药型罩界面上的节点相对应，以改善药型罩和炸药之间的相互作用，增强冲击波在炸药网格之间的耦合。外壳采用了较为稀疏的网格，其目的是减少计算时间。EFP 装药采用点起爆方式，起爆点位于装药和顶外壳界面的中心处。炸药起爆  $20\mu\text{s}$  后，外壳和炸药不再对 EFP 的形成过程产生直接影响，这时，可将外壳和炸药单元从计算模型中删除。在计算过程中，药型罩边

缘的某些单元会发生严重变形，使计算的时间步长大大减小，因此，这些单元在重分区过程中也应删除。

### 1.2 EFP 形成过程的模拟结果

EFP 在形成过程中，不同的药型罩外形和壁厚，可以形成各种各样的 EFP 形状。本文仅讨论等壁厚情况下不同药型罩曲率半径对 EFP 成形及其参数的影响。

图 2 是炸药起爆后，药型罩变形过程中的几

表 1 EFP 模拟中采用的材料模型

| 组 件   | 材料              | 材料模型             | 状态方程      |
|-------|-----------------|------------------|-----------|
| 药 型 罩 | 紫铜              | Johnson-Cook     | Grüneisen |
| 装 药   | 梯黑炸药<br>(40/60) | 线性燃烧             | JWL       |
| 侧向外壳  | 钢               | Johnson-Cook     | Grüneisen |
| 顶 外 壳 | 铝               | Steinberg-Guinan | Grüneisen |

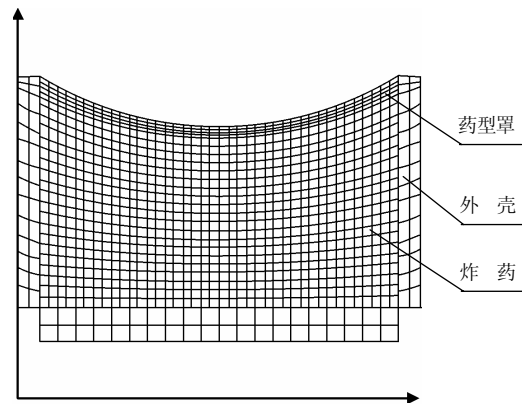


图 1 计算模型

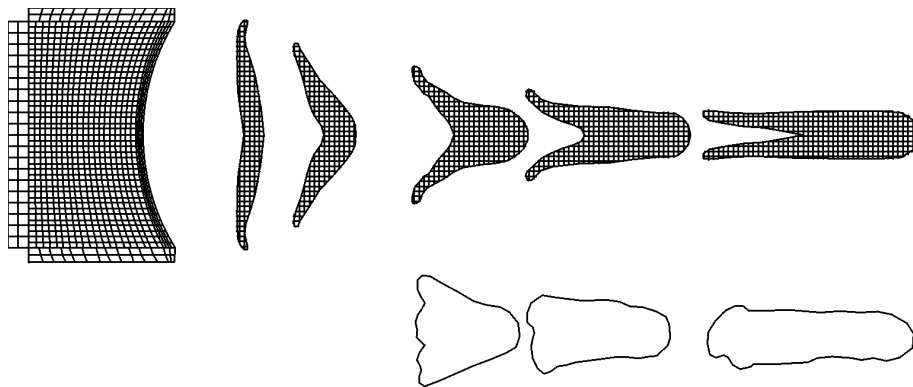


图 2 不同时刻的 EFP 数值模拟结果与 X 光照对比

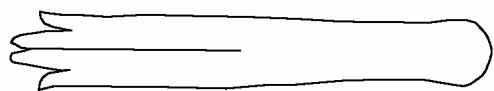

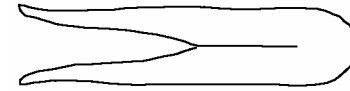
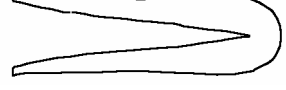


个瞬态图。其中上面的网格图表示数值模拟的结果，它们分别是 0, 20, 30, 50, 70, 100 $\mu\text{s}$  药型罩网格变形图。下面的轮廓线图为 50, 70, 100 $\mu\text{s}$  高速摄影所记录的药型罩外形图。由于闪光照片上不能清晰地反映出 EFP 的内部形状，这一点较难与数值模拟所得出的 EFP 形状进行比较。但是，模拟结果的总体外形和尺寸与闪光照片的轮廓和尺寸在相对应的时刻点处吻合较好。另外，数值模拟所得的 EFP 速度为 1.95km/s，试验测得的弹丸平均速度为 2.0km/s，这两个速度值非常接近。总的看来，数值模型的选取正确、合理。

### 1.3 EFP 曲率半径对其参数和形状的影响分析

药型罩曲率半径的变化，对 EFP 的成形起着决定性的作用。这是因为药型罩曲率半径的变化将引起爆轰波阵面作用于药型罩位置的改变，从而导致药型罩材料流动方向的变化。

采用上述的计算模型，讨论药型罩曲率半径发生变化时，EFP 参数和形状的改变。在装药结构和参数不变的情况下，选取 SR=50、55、60、65、70 和 75mm 等几种药型罩曲率半径进行讨论，模拟的结果在表 2 中列出。

表 2 药型罩曲率半径影响 EFP 成形的数值计算结果

| 曲率半径 /mm | EFP 速度 / ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) | EFP 长度 /mm | EFP 外形 (100 $\mu\text{s}$ )   |
|----------|---|------------|---|
| 50       | 1 881                                     | 81.1       |     |
| 55       | 1 926                                     | 68.1       |    |
| 60       | 1 954                                     | 59.2       |  |
| 65       | 1 975                                     | 53.8       |  |
| 70       | 1 994                                     | 48.3       |  |
| 75       | 2 007                                     | 47.0       |  |

从表 2 中的结果可以看出，随着药型罩曲率半径的增大，EFP 的速度值也随之增大，但速度增长的幅度不是太大。相反，EFP 的长度则随药型罩曲率半径的增大而逐渐减小，EFP 长度的减小将降低其侵彻能力。图 3 为 EFP 速度随药型罩曲率半径的变化曲线，药型罩曲率半径的初始变化所引起的速度斜率变化较大，而后随曲率半径的增加则逐渐减缓。当药型罩的曲率半径增大到极大值，即药型罩为平板时，炸药推动药型罩运动所能达到的速度值可由格尼公式确定，此为药型罩被加速的极大速度

值。因此，为了提高 EFP 的速度，在装药结构不变的前提下，尽量采用曲率半径较大的药型罩结构。

从 EFP 的形状来看，药型罩曲率半径对 EFP 的质心位置也有较为明显的影响，随着药型罩曲率半径的增大，弹丸质心向其头部靠近，即弹芯的长度将减小，这将降低弹丸的侵彻深度。而且，曲率半径越大，形成的 EFP 越向中空形状发展，势必影响弹丸的整体穿甲能力。在药型罩曲率半径较小时，形成的 EFP 的稳定裙部分较小，不利于 EFP 的飞行稳定。考虑到弹丸的侵彻能力，形成的 EFP

内部空腔不能太大,这是因为实心弹丸较利于侵彻过程的稳定。所以,对于某一口径的EFP装药,其药型罩的曲率半径不能太大,能保证生成质量较好的稳定裙以增强EFP的气动稳定性即可。在EFP设计过程中,应将药型罩的部分质量转移到弹芯上,或是增加弹芯的长度,使EFP的性能得到较大的提高。

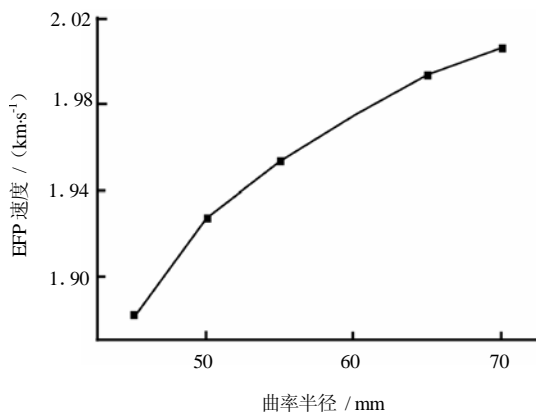


图3 EFP速度与药型罩曲率半径关系

从以上的分析可以看出,曲率半径为55mm和60mm的两种结构较为合理,将曲率半径与装药口径的比值记作 $r$ ,则 $r$ 的取值范围在0.9~1.0之间时EFP的形状和稳定性较好。引入装药形状系数 $\eta$ 的概念,定义 $\eta = \frac{H}{\phi}$ 。分析文中所提出的装药结构,即装药高度 $H=30\text{mm}$ ,装药口径 $\phi=60\text{mm}$ ,有 $\eta=0.5$ 。对于球缺型聚能装药而言,装药形状不同,爆轰波作用到药型罩上的形状也将随之改变,使形成的EFP的形状发生变化。所以,通过改变装药形状系

数 $\eta$ ,可控制EFP的外形。不同的装药形状系数, $r$ 的取值范围也将发生变化,在进行EFP型号的设计中,综合装药结构参数的影响,对于设计出性能优良的爆炸成型弹丸至关重要。

## 2 结论

本文采用二维有限元程序对爆炸成型弹丸的形成过程进行了数值模拟,分析了药型罩曲率半径对EFP参数及其形状的影响。结果表明,曲率半径的增大对EFP速度的影响程度不大,但对EFP的长度和形状有较为明显的影响。对于文中所采用的装药形状系数 $\eta=0.5$ 而言,为保证EFP的飞行稳定性和侵彻能力,药型罩的曲率半径宜采用 $r=0.9\sim 1.0$ 之间的结构。从文中的讨论可以看出,数值模拟方法具有实用性强,计算精度高等特点,它为聚能装药的定性研究和综合设计提供了一种可行的方法。

## 参考文献:

- [1] 隋树元,王树山. 终点效应学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [2] Lam C, McQueen D. Study of the penetration of water by an explosively formed projectile [R]. Defence Science and Technology Organisation. DSTO-TR-0686, 1999.
- [3] 蒋浩征, 刘乃生. 大直径半球形药型罩聚能战斗部威力模拟试验研究 [J]. 兵工学报, 1981 (2): 48~57.
- [4] 李裕春. 线型聚能装药射流的数值模拟及装药结构参数优化研究 [D]. 南京: 工程兵工程学院, 2001.