

文章编号:1006-9941(2019)02-0090-07

## 锥弧结合罩形成长杆状密实 EFP 的可行性

黄炫宁<sup>1</sup>,李伟兵<sup>1</sup>,程伟<sup>2</sup>,王晓鸣<sup>1</sup>,李文彬<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094; 2. 重庆红宇精密工业有限责任公司, 重庆 402760)

**摘要:** 为了进一步提高爆炸成型侵彻体(EFP)的侵彻能力,基于大锥角罩结构的圆弧段设计,提出了一种可形成长杆状密实 EFP 的锥弧结合罩。分析了锥弧结合罩与传统的大锥角罩和弧锥结合罩在压垮过程中的区别。运用 LS-DYNA 仿真软件,计算得到了锥弧结合罩的结构参数(曲率半径、锥角、壁厚)对 EFP 速度、长径比、密实度等侵彻体成型参数的影响规律。找出了 EFP 成型较佳时各结构参数的取值范围:曲率半径为 1.1~1.3 倍装药口径,锥角为 155°~160°,壁厚为 0.04~0.046 倍装药口径,并设计得到了一种可形成长径比为 2、密实度为 0.88 的 EFP 的锥弧结合罩结构。

**关键词:** 锥弧结合罩;爆炸成型侵彻体(EFP);长径比;密实度;数值模拟

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018051

### 1 引言

爆炸成型侵彻体(explosively formed penetrator, EFP)是利用聚能原理,通过装药的爆轰作用,使金属药型罩被压垮、闭合形成具有较高质心速度和一定结构形状的弹丸,从而利用动能侵彻目标<sup>[1]</sup>。随着装甲目标防护能力的不断增强,迫切需要设计速度更高、长径比和比动能更大的高性能 EFP,以满足武器系统威力设计的要求<sup>[2]</sup>。药型罩结构是影响 EFP 成型的主要因素之一,近年来国内外学者针对药型罩结构参数对 EFP 毁伤元成型的影响规律开展了大量的研究,Cardoso D<sup>[3]</sup>研究了 EFP 速度与药型罩厚度之间的规律,提出药型罩厚度为 4%~7% 倍装药口径时能得到高性能 EFP, Fedorov S V<sup>[4]</sup>进行了组合药型罩半球形部分的曲率半径和壁厚对密实毁伤元影响的研究, Rolc S<sup>[5]</sup>针对药型罩锥角研究了罩几何形状对 EFP 速

度的影响;国内唐蜜<sup>[6]</sup>、顾文彬<sup>[2]</sup>利用正交设计的方法,得到了球缺罩以及装药结构参数对 EFP 成型性能影响的主次关系,刘建青<sup>[7]</sup>研究了变壁厚球缺罩的结构参数对 EFP 成型的影响,发现优化罩顶口壁厚差能大幅提高 EFP 的长径比和密实度,李伟兵<sup>[8]</sup>、陈奎<sup>[9]</sup>等基于弧锥结合形药型罩双模毁伤元战斗部进行了研究,确定了药型罩曲率半径和锥角的优化取值,黄风雷<sup>[10]</sup>对大锥角药型罩结构侵彻体的形成和侵彻进行了实验研究,尹建平<sup>[11]</sup>运用灰关联法得出大锥角药型罩参数对 EFP 成型性能影响的主次关系。

目前国内关于 EFP 成型方面的研究,使用的药型罩结构主要是等壁厚或变壁厚球缺形、大锥形、弧锥结合形。但是,之前学者优化的 EFP 在实验中远距离飞行时,均出现不同程度的颈缩甚至断裂。而韩国的 Yi Y S 和 Kim H J<sup>[12]</sup>在第 30 届国际弹道会议上报道了一种锥弧结合形结构药型罩,得到一种成型良好的尖头形 EFP,试验中远距离飞行时 EFP 未断裂,但是未见成型装药药型罩的具体尺寸。锥弧结合形药型罩是否更适合形成远距离飞行 EFP,有必要针对锥弧结合形、大锥形及弧锥结合形药型罩的爆轰压垮过程区别及其结构参数的不同影响规律开展深入研究。

本研究利用 LS-DYNA 仿真软件,研究药型罩的圆弧曲率半径、锥角、壁厚等结构参数对 EFP 成型参数的影响规律,找出一种能形成长杆状密实 EFP 的药型罩结构。

收稿日期:2018-03-01;修回日期:2018-05-07

网络出版日期:2018-05-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11202103),江苏高校“青蓝工程”资助

作者简介:黄炫宁(1994-),男,硕士研究生,主要从事聚能装药战斗部技术研究。e-mail:njhxuaning@163.com

通信联系人:李伟兵(1982-),男,副研究员,博士生导师,主要从事弹丸的终点效应与目标毁伤技术研究。

e-mail:njustlw@163.com

**引用本文:**黄炫宁,李伟兵,程伟,等.锥弧结合罩形成长杆状密实 EFP 的可行性[J].含能材料,2019,27(2):90-96.

HUANG Xuan-ning, LI Wei-bing, CHENG Wei, et al. Feasibility of the Formation of Long Rod-shaped Compacted Explosively Formed Penetrator by Cone-arc Liner[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(2): 90-96.

## 2 结构设计及对比

### 2.1 基于大锥角罩结构的圆弧段设计

要形成良好的爆炸成型侵彻体,药型罩的形状选择很重要。文献[13]发现当药型罩半锥角接近  $75^\circ$  时,射流和杵体趋近于相同的速度,形成 EFP。因此要使形成的 EFP 成型较佳,锥角罩的锥角必须足够大,本研究选择锥角为  $155^\circ$  的大锥角罩,并在此基础上进行改进。

对罩顶部的圆锥段进行倒角,使其变为圆弧,这就成为了弧锥结合罩。相反地,当对大锥角罩底部进行倒圆弧时,这就成为一种新药型罩结构-锥弧结合形药型罩,即药型罩顶部是圆锥形,底部是圆弧形,锥段与圆弧段之间光滑连接,并且等壁厚,其结构参数包括曲率半径  $R(\text{mm})$ 、锥角  $2\alpha(^\circ)$ 、壁厚  $b(\text{mm})$ 。因为罩底部形成的是 EFP 尾部,这会对 EFP 尾裙部分产生不同于前两种罩的影响。

综上,设计的三种药型罩如图 1 所示,其中图 1a 为大锥角罩,图 1b 为弧锥结合罩,圆弧段曲率半径为  $55 \text{ mm}$ ,图 1c 为锥弧结合罩,圆弧段曲率半径为  $120 \text{ mm}$ ,三种罩锥角均为  $155^\circ$ ,壁厚均为  $4.2 \text{ mm}$ 。

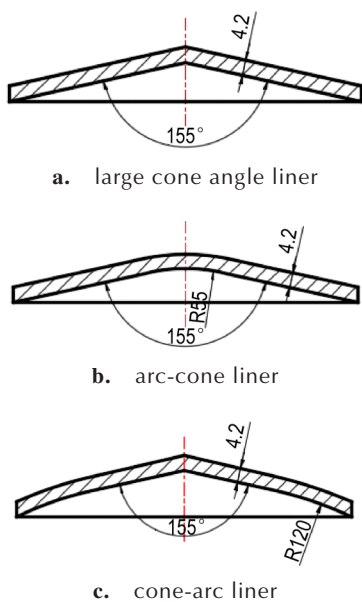


图 1 三种药型罩结构图

Fig.1 Structure diagrams of three liners

### 2.2 战斗部结构及计算模型

基于文献[14]对装药及药型罩结构参数的影响开展的研究,本研究采用其船尾形装药结构,当药型罩

为锥弧结合罩时对应的战斗部装药结构如图 2 所示。装药口径  $D_k$  为  $100 \text{ mm}$ ,装药高度  $H$  为  $90 \text{ mm}$ ,采用装药底部中心单点起爆。

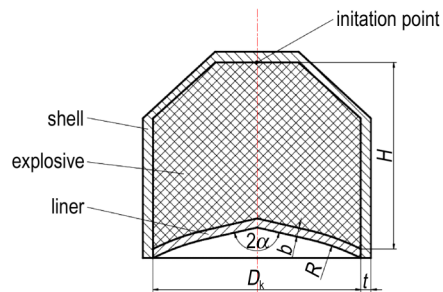


图 2 装药结构及起爆位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of charge structure and initiation position

采用 ALE 算法<sup>[14]</sup>进行数值模拟,其中炸药、药型罩、空气选择多物质欧拉算法,而壳体采用拉格朗日算法<sup>[14]</sup>,定义壳体与炸药、药型罩、空气之间的流固耦合算法<sup>[14]</sup>。炸药为 8701,其状态方程为 JWL,本构关系为 HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN;药型罩材料为紫铜,壳体为 45#钢,选择 Johnson-Cook 本构方程和 Gruneisen 状态方程进行描述,计算中使用的材料具体参数见文献[14]。为避免压力在边界面反射,在整个空气计算域的周围表面定义无反射边界。

前期将弧锥结合罩应用于多模战斗部设计中<sup>[15]</sup>,采用 X 光拍摄获得了弧锥罩 EFP 的成型效果图,并与数值模拟进行了对比,如图 3 所示,较好地验证了仿真算法和材料模型参数。

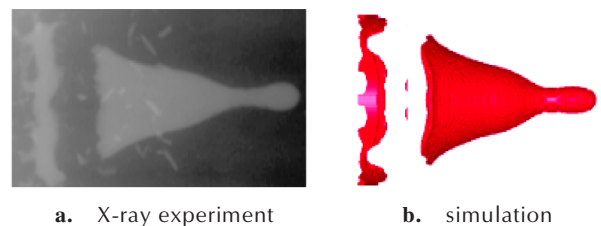


图 3 弧锥罩 EFP 的 X 光试验与仿真对比

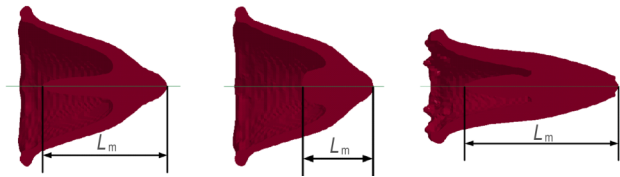
Fig.3 Comparison of the X-ray experiment and simulation of arc-cone liner EFP

考虑本研究采用与文献[15]中相同的装药结构与起爆方式,并且仿真算法与材料模型参数也均相同,故能保证仿真结果的可靠性。

### 2.3 三种罩结构计算对比分析

在药型罩锥角为  $155^\circ$  的基础上,分别对上述大锥

角罩、弧锥结合罩、锥弧结合罩运用 LS-DYNA 仿真软件进行数值模拟。200  $\mu\text{s}$  时刻三种药型罩均形成了头尾速度一致的 EFP, 成型图如图 4 所示, 图 4 中  $L_m$  表示密实段长度, 成型参数如表 1 所示。



a. large cone angle liner b. arc-cone liner c. cone-arc liner

图 4 三种结构药型罩 EFP 成型图(200  $\mu\text{s}$ )

Fig.4 The formation shape of three structure liners(200  $\mu\text{s}$ )

表 1 三种结构药型罩 EFP 成型参数

Table 1 The formation parameters of three structure liners EFP

| EFP                    | tip velocity / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | length-diameter ratio | compacted section length / mm |
|------------------------|---|-----------------------|-------------------------------|
| large cone angle liner | 2427  | 0.92                  | 51.25                         |
| arc-cone liner         | 2410  | 0.87                  | 28.75                         |
| cone-arc liner         | 2391  | 1.72                  | 61.25                         |

从图 4 可以看出, 大锥角罩与弧锥结合罩形成的 EFP 形状类似馒头形, 而锥弧结合罩形成的 EFP 是长杆状。与大锥角罩形成的 EFP 相比, 弧锥结合罩形成的 EFP 密实段长度较小, 这是因为相比圆锥段罩顶与对称轴之间的夹角, 圆弧段罩顶与对称轴之间的夹角较大, 径向压垮速度减小, 罩顶径向压合较小, 导致 EFP 密实段长度减小。锥弧结合罩与弧锥结合罩 EFP 在头部成型方式上存在区别, 因为锥弧结合罩的罩顶是锥形, 爆轰波对药型罩的顶部压垮面积很小, 带有一定的射流成型性质, 不能完全翻转成型, 而是兼顾压垮和翻

表 2 不同曲率半径下侵彻体成型图(150  $\mu\text{s}$ )

Table 2 The formation shape of penetrator with different curvature radius (150  $\mu\text{s}$ )

| curvature radius | $0.7D_k$ | $0.8D_k$ | $0.9D_k$ | $1.0D_k$ | $1.1D_k$ | $1.2D_k$ | $1.3D_k$ | $1.4D_k$ | $1.5D_k$ | $1.6D_k$ |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| formation shapes |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |

Note:  $D_k$  is the charge diameter.

转成型, 导致药型罩顶部径向压合现象增强, 因此 EFP 头部密实段长度增大, 对密实度有一定提高; 并且与大锥角罩和弧锥结合罩相比, 锥弧结合罩 EFP 尾部张角明显减小, 这是因为与锥角段罩底部相比, 圆弧段罩底部表面与爆轰波阵面之间的夹角变化较大, 导致轴向、径向速度梯度较大<sup>[16]</sup>, 因此 EFP 尾裙部分向内收缩程度增强, 能在一定程度上增大长径比。

由表 1 可知, 锥弧罩 EFP 的长径比与密实段长度均最大, 其长径比较大锥角罩和弧锥罩分别提高了 0.87 倍和 0.98 倍, 而密实段长度较大锥角罩和弧锥罩分别增加了 20% 和 113%。考虑到三种 EFP 速度相近, EFP 长径比越大、密实段长度越长, 侵彻能力越强, 因此, 锥弧罩形成的 EFP 侵彻性能有一定提高。

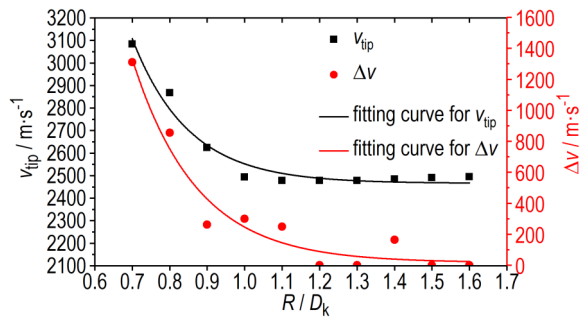
### 3 锥弧结合罩结构参数影响规律

对不同药型罩结构参数的装药结构进行数值模拟, 分别研究锥弧结合罩的曲率半径  $R$ 、锥角  $2\alpha$ 、壁厚  $b$  对 EFP 成型的影响规律。EFP 成型参数除了头部速度  $v_{\text{tip}}$ 、头尾速度差  $\Delta v$ 、长径比  $L/D$  外, 根据文献[7]引入密实度  $\mu$  这一参数。后文进行成型规律描述时, 为得到通用性的适合不同尺寸装药的参数取值范围, 以装药口径  $D_k$  为量化标准, 来表示药型罩曲率半径、壁厚。

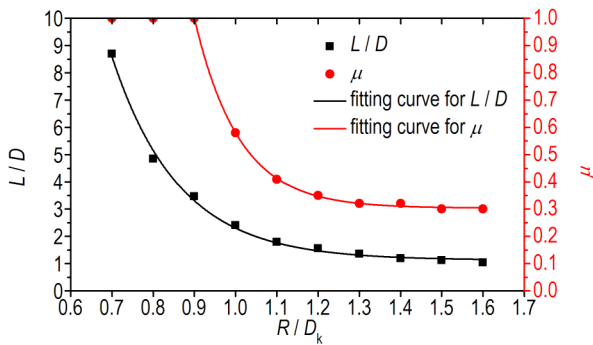
#### 3.1 曲率半径的影响

固定药型罩壁厚  $0.038D_k$ , 锥角  $155^\circ$ , 曲率半径变化范围为  $0.7D_k \sim 1.6D_k$  (每种方案增加  $0.1D_k$ ), 通过数值模拟计算每种方案侵彻体的成型参数。各方案侵彻体 150  $\mu\text{s}$  时刻成型图如表 2 所示, 侵彻体头部速度  $v_{\text{tip}}$ 、头尾速度差  $\Delta v$ 、长径比  $L/D$ 、密实度  $\mu$  随曲率半径变化曲线如图 5 所示。

从图 5a 可以看出, 侵彻体头部速度、头尾速度差



a. changing curves of  $v_{tip}$  and  $\Delta v$



b. changing curves of  $L/D$  and  $\mu$

图5 侵彻体成型参数随曲率半径变化曲线

Fig.5 Changing curves of the formation parameters of penetrator along with curvature radius

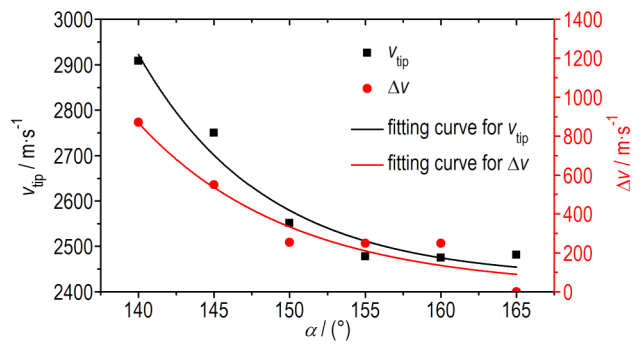
均呈指数减小趋势,从图5b可以看出,长径比呈指数减小趋势,密实度在曲率半径大于 $0.9D_k$ 时呈指数减小趋势。结合表2发现,当曲率半径在 $0.7D_k \sim 0.9D_k$ 时,形成的是杆式侵彻体,有明显的射流和杵体部分,这是因为罩顶高度足够大,为罩单元被压垮向轴线的拉伸运动提供了更大的空间,此时头部速度、头尾速度差、长径比都很大,均随着曲率半径的增大而大幅度减小。虽然曲率半径为 $0.7D_k$ 或 $0.8D_k$ 时,侵彻体密实度为1,但是其头尾速度差较大容易断裂,不满足要求。当曲率半径达到 $1.0D_k$ 以上时,侵彻体变为头部密实尾部中空的结构,但是头部没有完全翻转,存在占整体质量较小的杵体,这是因为罩顶部为锥形,形成的EFP头部带有射流的性质,随着曲率半径增大,头部速度几乎不变,密实段长度和长径比略有减小,而密实度呈指数减小趋势并趋于定值,EFP尾部的张角越来越大,当曲率半径增大到 $1.1D_k$ 以上,头尾速度差小于 $200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,长径比小于1.8,可以认为形成了头尾速度几乎一致的EFP。

在侵彻体头尾速度差尽可能小的情况下,要形成头部速度大、长径比大、密实度好的EFP,综合考虑各

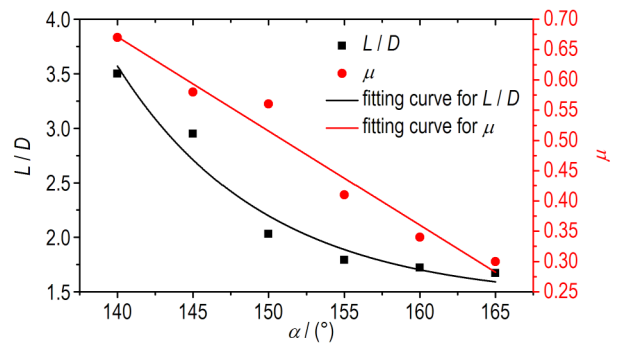
因素,确定曲率半径取值范围为 $1.1D_k \sim 1.3D_k$ 。

### 3.2 锥角的影响

固定药型罩壁厚 $0.038D_k$ ,曲率半径 $1.1D_k$ ,锥角变化范围为 $140^\circ \sim 165^\circ$ (每种方案增加 $5^\circ$ ),计算每种方案侵彻体的成型参数。各方案侵彻体 $150 \mu\text{s}$ 时刻成型图如表3所示,侵彻体头部速度 $v_{tip}$ 、头尾速度差 $\Delta v$ 、长径比 $L/D$ 、密实度 $\mu$ 随锥角变化曲线如图6所示。



a. changing curves of  $v_{tip}$  and  $\Delta v$



b. changing curves of  $L/D$  and  $\mu$

图6 侵彻体成型参数随锥角变化曲线







Fig.6 Changing curves of the formation parameters of penetrator along with cone angle

从图6a可以看出,侵彻体头部速度、头尾速度差均呈指数减小趋势,从图6b可以看出,长径比呈指数减小趋势,密实度呈线性减小趋势。结合表3发现,当锥角在 $140^\circ \sim 150^\circ$ 时,形成的是杆式侵彻体,锥形罩顶在爆轰波作用下无法完全翻转,而是被压垮,此时侵彻体密实度和长径比都很大,并且当锥角较小时,因为头尾速度差过大,产生颈缩甚至断裂,尾部也被拉成多段,在这一区间内,随着锥角的增大,锥段结构所占比例减小,罩顶高度逐渐减小,罩微元轴向拉伸和径向压缩的空间减小,导致头部速度、头尾速度差、密实度与长径比均大幅度减小。当锥角达到 $155^\circ$ 之后,头部速

度、头尾速度差几乎不变, 逐渐趋于定值, 长径比略有减小, 形成头尾速度差几乎为零的EFP。但是当锥角大于 $160^\circ$ 时EFP头部较钝, 成型反而不理想, 会造成侵彻深度有所降低, 这是因为锥角过大时, 罩顶高度减小, 逐渐趋于平板结构, 罩单元还没有完全拉伸就开始向前运动, 趋向于形成翻转型EFP。

表3 不同锥角下侵彻体成型图( $150 \mu\text{s}$ )

Table 3 The formation shape of penetrator with different cone angle ( $150 \mu\text{s}$ )

| cone angle / ( $^\circ$ ) | 140   | 145   | 150   | 155   | 160   | 165   |
|---------------------------|---|---|---|---|---|---|
| formation shapes          |  |  |  |  |  |  |

综合分析侵彻体成型参数, 锥角取值范围为 $155^\circ \sim 160^\circ$ , 在侵彻体不被拉断的前提下, 既要保证EFP头部速度、长径比增大, 同时密实度又不至于太小, 头部成型良好。









### 3.3 壁厚的影响

固定药型罩曲率半径 $1.1D_k$ , 锥角 $155^\circ$ , 壁厚变化范围为 $0.036D_k \sim 0.05D_k$  (每种方案增加 $0.002D_k$ )。各方案侵彻体 $150 \mu\text{s}$ 时刻侵彻体成型图如表4所示, 侵彻体头部速度 $v_{\text{tip}}$ 、头尾速度差 $\Delta v$ 、长径比 $L/D$ 、密实度 $\mu$ 随壁厚变化曲线如图7所示。

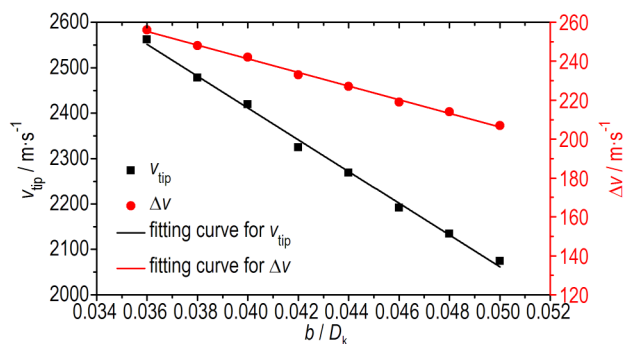
分析表4可以发现, 壁厚的改变对侵彻体形态的影响很小, 均为头部密实尾部中空的结构, 结合图7a和图7b得到, 随着壁厚增大, EFP头部速度、头尾速度差呈线性减小, 头部直径略有增大, 而密实度、长径比几乎不变。为保证EFP头部速度较大以及头尾速度差尽可能小, 同时考虑头部直径不至于太大, 壁厚取 $0.04D_k \sim 0.046D_k$ 。

表4 不同壁厚下侵彻体成型图( $150 \mu\text{s}$ )

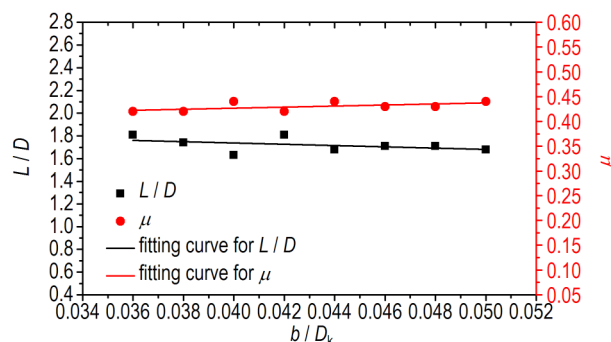
Table 4 The formation shape of penetrator with different wall thickness ( $150 \mu\text{s}$ )

| wall thickness   | $0.036D_k$  | $0.038D_k$  | $0.040D_k$  | $0.042D_k$  | $0.044D_k$   | $0.046D_k$  | $0.048D_k$  | $0.050D_k$  |
|------------------|---|---|---|---|--|---|---|---|
| formation shapes |  |  |  |  |  |  |  |  |

Note:  $D_k$  is the charge diameter.



a. changing curves of  $v_{\text{tip}}$  and  $\Delta v$



b. changing curves of  $L/D$  and  $\mu$

图7 侵彻体成型参数随壁厚变化曲线

Fig.7 Changing curves of the formation parameters of penetrator along with wall thickness

## 4 较优弧锥结合罩EFP成型计算

基于以上各结构参数对EFP成型参数影响规律及其取值范围确定多组结构参数组合, 经过多次仿真对比, 得到一种较优弧锥结合罩结构参数: 曲率半径 $1.1D_k$ , 锥角 $155^\circ$ , 壁厚 $0.042D_k$ 。

壳体厚度取 $5 \text{ mm}$ , 进行数值模拟计算,  $200 \mu\text{s}$ 时刻EFP成型形态如图8所示。

此时EFP头部速度为 $2368 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 头尾速度差为 $0$ , 长度为 $83.75 \text{ mm}$ , 密实段长度为 $73.75 \text{ mm}$ , 密实度为 $0.88$ , 长径比为 $2$ , 为尾部收缩良好的长杆状密实

EFP,并且未发生断裂。EFP长径比与密实段长度均较大,考虑长径比大、密实段长度长均有利于侵彻,因此成型性能较佳,这为之后长杆状密实 EFP 的进一步研究提供依据。



图8 EFP成型图(200 μs)

Fig.8 Formation shape of EFP(200 μs)

## 5 结论

(1)与传统的大锥角罩、弧锥结合罩形成的EFP相比,锥弧结合罩形成的EFP长径比较大锥角罩和弧锥罩提高了近1倍,密实段长度较大锥角罩和弧锥罩分别增加了20%和113%。

(2)基于本研究设计的锥弧结合罩战斗部结构,发现EFP头部速度、头尾速度差、长径比随曲率半径、锥角的增加均呈指数递减规律;密实度随锥角的增加呈线性减小趋势;随着壁厚增大,头部速度、头尾速度差呈线性减小趋势,而密实度,长径比几乎不变。最终确定了EFP成型较佳时各结构参数的取值范围:曲率半径 $R$ 取 $1.1D_k \sim 1.3D_k$ ,锥角 $2\alpha$ 取 $155^\circ \sim 160^\circ$ ,壁厚 $b$ 取 $0.04D_k \sim 0.046D_k$ 。

(3)设计了一种成型性能较好的锥弧结合罩结构,各参数为: $R=1.1D_k$ , $2\alpha=155^\circ$ , $b=0.042D_k$ ,仿真得到了长径比为2、密实度为0.88的长杆状密实EFP。

### 参考文献:

- [1] 刘飞.爆炸成型弹丸(EFP)研制及其工程破坏效应研究[D].合肥:中国科学技术大学,2006.  
LIU Fei. The explosively formed penetrator and its engineering damage effects research[D]. Hefei: University of science and Technology of China, 2006.
- [2] 顾文彬,刘建青,唐勇,等.球缺型EFP战斗部结构优化设计研究[J].南京理工大学学报(自然科学版),2008,32(2):165-170.  
GU Wen-bin, LIU Jian-qing, TANG Yong, et al. Optimizing design of EFP warhead with hemispherical liner[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2008, 32(2): 165-170.
- [3] Cardoso D, Teixeira-Dias F. Modelling the formation of explosively formed projectiles (EFP)[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 93: 116-127.
- [4] Fedorov S V, Bayanova Y M, Ladov S V. Numerical analysis of the effect of the geometric parameters of a combined shaped charge liner on the mass and velocity of explosively formed compact elements[J]. *Combustion Explosion & Shock Waves*, 2015, 51(1): 130-142.
- [5] Rolc S, Buchar J, Akstein Z. Computer simulation of explosively formed projectiles (EFP)[C]// Proceedings of the 23rd international symposium on ballistics, Tarragona, Spain: 2007, 185-192.
- [6] 唐蜜,柏劲松,李平,等.爆炸成型弹丸成型因素的正交设计研究[J].火工品,2006(5):38-40.  
TANG Mi, BAI Jing-song, LI Ping, et al. Orthogonal design research of shaping factors of explosively formed projectile[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2006(5): 38-40.
- [7] 刘建青,顾文彬,唐勇,等.变壁厚球缺罩爆炸成型弹丸成型性能数值模拟[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2008,9(2):172-176.  
LIU Jian-qing, GU Wen-bin, TANG Yong, et al. Numerical investigation on EFP forming performance with variational-wall-thickness hemispherical liner[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 9(2): 172-176.
- [8] 李伟兵,王晓鸣,李文彬,等.药型罩结构参数对多模毁伤元形成的影响[J].弹道学报,2009,21(1):19-23.  
LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin, et al. Effect of liner configuration parameter on formation of multimode penetrator[J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(1): 19-23.
- [9] 陈奎,李伟兵,王晓鸣,等.双模战斗部结构正交优化设计[J].含能材料,2013,21(1):80-84.  
CHEN Kui, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Orthogonal design configuration parameters of dual mode warheads[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(1): 80-84.
- [10] 黄风雷,张雷雷,段卓平.大锥角药型罩聚能装药侵彻混凝土实验研究[J].爆炸与冲击,2008,28(1):17-22.  
HUANG Feng-lei, ZHANG Lei-lei, DUAN Zhuo-ping. Shaped charge with large cone angle for concrete target[J]. *Explosive and Shock Waves*, 2008, 28(1): 17-22.
- [11] 尹建平,付璐,王志军,等.药型罩参数对EFP成型性能影响的灰关联分析[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2012,13(1):101-105.  
YIN Jian-ping, FU Lu, WANG Zhi-jun, et al. Grey incidence analysis on liner parameters influencing formation performance of EFP[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 13(1): 101-105.
- [12] Yi Y S, Kim H J. Flight and penetration characteristics of explosively formed penetrators[C]// Proceedings of the 30th International Symposium on Ballistics, Long Beach, USA: 2017, 1499-1502.
- [13] 黄正祥,张先锋,陈惠武.药型罩锥角对聚能杆式侵彻体成型的影响[J].南京理工大学学报(自然科学版),2005,29(6):645-647.  
HUANG Zheng-xiang, ZHANG Xian-feng, CHEN Hui-wu. Influence on formed mechanism of jetting projectile charge by liner angle[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2005, 29(6): 645-647.
- [14] LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, LI Wen-bin. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(4): 414-424.

- [15] 樊雪飞, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 药型罩材料性能参数对双模毁伤元成型的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(11): 888-895.  
FAN Xue-fei, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Effects of liner's material properties on the forming of dual mode damage elements[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(11): 888-895.
- [16] 朱传胜, 黄正祥, 刘荣忠, 等. 带隔板中空装药的 EFP 成型研究[J]. 弹道学报, 2013, 25(1): 53-58.  
ZHU Chuan-sheng, HUANG Zheng-xiang, LIU Rong-zhong, et al. Research on forming of EFP warhead with wave-shaper and center-hole charge[J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(1): 53-58.

## Feasibility of the Formation of Long Rod-shaped Compacted Explosively Formed Penetrator by Cone-arc Liner

HUANG Xuan-ning<sup>1</sup>, LI Wei-bing<sup>1</sup>, CHENG Wei<sup>2</sup>, WANG Xiao-ming<sup>1</sup>, LI Wen-bin<sup>1</sup>

(1. ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Chongqing Hongyu Precision Industrial Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

**Abstract:** To furtherly improve the penetration capability of explosively formed penetrator(EFP), a type of cone-arc liner which can form long rod-shaped compacted EFP was proposed based on the arc section design of large cone angle liner structure. The difference in collapse process for cone-arc liner and the traditional large cone angle liner as well as arc-cone liner was analyzed. The influences and regulars of cone-arc liner structure parameters (curvature radius, cone angle and wall thickness) on the formation parameters of penetrator, such as EFP velocity, length-diameter ratio and compactness, were calculated and obtained by LS-DYNA simulation software. The range of each parameters of optimum EFP are gained; the curvature radius is 1.1-1.3 times of charge diameter, the cone angle is 155°-160°, and the wall thickness is 0.04-0.046 times of charge diameter. And a kind of cone-arc liner structure that can form EFP with length-diameter ratio as 2 and compactness as 0.88 was designed and obtained.

**Key words:** cone-arc liner; explosively formed penetrator(EFP); aspect ratio; compactness; numerical simulation

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018051