

文章编号: 1006-9941(2014)05-0594-06

## 多点起爆装药结构参数对尾翼 EFP 成型的影响

刘建青, 顾文彬, 徐浩铭, 陆鸣, 武双章

(解放军理工大学野战工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要:** 采用 LS-DYNA 建立三组多点起爆爆炸成型弹丸(EFP)装药数值模型进行计算,系统研究了起爆点数量( $N$ )、起爆环直径( $D_1$ )、装药长径比( $L_c/D_c$ )等结构参数对尾翼 EFP 成型性能的影响规律。研究表明:起爆点数量、起爆环直径、装药长径比对尾翼 EFP 的速度、长径比和翼径比等基本性能均有显著影响;起爆点的数量  $N$  与所形成尾翼的数量相同, $N=4$  时翼径比最大,增加起爆环直径和装药长径比是提高 EFP 速度和长径比最为有效和直接的途径。对不同曲率半径的等壁厚和变壁厚球缺罩对比分析,结果表明采用变壁厚球缺罩更有利于获得形态良好的尾翼 EFP,并且  $N$  取 4、 $D_1$  取 40 mm、 $L_c/D_c$  取 0.8 为宜。

**关键词:** 爆炸力学; 多点起爆; 尾翼 EFP; 数值模拟

**中图分类号:** TJ410.33; O381

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.004

### 1 引言

爆炸成型弹丸(Explosively Formed Projectile, EFP)由于其具有远距离(大炸高)攻击能力,所以在反装甲武器中应用广泛。但是,由于材料、加工和装配的结构不对称性不可避免,必然造成 EFP 气动结构不对称,并且爆轰产物会对 EFP 存在初始扰动,所以 EFP 初始飞行姿态不稳定。为保证 EFP 飞行弹道稳定并准确命中目标,要求其具备足够的空气动力稳定性,并且减小与目标作用的攻角和飞行阻力,提高着靶精度<sup>[1-2]</sup>。尾翼 EFP 是通过一定的技术措施使 EFP 尾部发生规律性皱褶,形成具有呈星形布置多个鳍状尾翼的特殊 EFP。通过控制尾翼形状能改善 EFP 的气动力特性,提高飞行稳定性,进一步改善其在大炸高条件下的终点弹道效应。实践表明,多点起爆是形成尾翼 EFP 的一种可行和简便的途径<sup>[3-7]</sup>。多点起爆装药结构对 EFP 成型的影响已有不少研究,如门建兵<sup>[8]</sup>和罗健等<sup>[9]</sup>研究了起爆点数量和起爆环直径对 EFP 速度和长度的影响;近年来关于多点起爆 EFP 的研究工作主要是基于双模战斗部,采用多点起爆方式获得性能优异的杆式侵彻体,如李伟兵<sup>[10-11]</sup>、苗勤书等<sup>[12]</sup>研究了弧锥结合罩结构参数和起爆环位置对侵彻体头尾速

度、长径比的影响规律,陈奎等<sup>[13]</sup>对双模战斗部结构进行了正交优化设计,研究了结构参数对毁伤元头部速度、头尾速度差和长径比的影响。但是上述研究未系统和定量分析多点起爆结构参数对尾翼 EFP 成型的影响,并且关于多点起爆结构参数对 EFP 尾翼形状的影响国内外很少报道。

为此,在文献[14]研究的基础上,本课题组利用 LS-DYNA 非线性动力有限元程序,建立三组多点起爆 EFP 装药数值模型进行仿真计算,系统研究起爆点数量  $N$ 、起爆环直径  $D_1$ 、装药长径比  $L_c/D_c$  等装药结构参数对尾翼 EFP 成型性能的影响规律,以期进一步深化多点起爆条件下尾翼 EFP 的成型机理,为多点起爆 EFP 装药结构的设计提供理论依据。

### 2 数值计算模型和参数

#### 2.1 模型和参数

多点起爆装药结构如图 1 所示,EFP 药型罩呈球缺型,装药直径  $D_c$ ,装药长度  $L_c$ ,装药长径比  $L_c/D_c$ ;起爆环直径  $D_1$ ;球缺药型罩曲率半径  $R$ 、罩顶厚  $\delta$ ,计算模型如图 2 所示。主装药采用 JH-2,用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程描述,炸药参数见文献[15]。紫铜药型罩用 Grüneisen 状态方程和 Johnson-Cook 本构模型描述,具体参数见文献[7]。典型的三点起爆尾翼 EFP 成型计算结果和验证试验见文献[14],仿真计算和试验结果吻合较好,一方面验证了采用多点起爆形成星形尾翼 EFP 的可行性,另一方面也说明本

收稿日期: 2013-09-19; 修回日期: 2014-02-20

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAK05B01)

作者简介: 刘建青(1980-),男,讲师,主要从事战斗部结构设计、工程爆破研究。e-mail: qq5893736@163.com

研究所选计算模型和参数合理可靠。

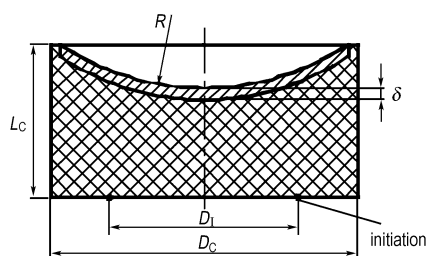


图 1 装药结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of EFP charge



图 2 数值计算模型

Fig.2 A model for numerical simulation

### 2.2 尾翼 EFP 性能参数

为了后续研究方便,下面给出表征尾翼 EFP 弹形特点的各结构参数定义,如图 3 所示。EFP 由弹丸主体和尾翼两部分组成,头部较为密实,尾部中空。“直径”指 EFP 主体部分最大直径,用“ $D_E$ ”表示;弹体长度用“ $L_E$ ”表示;“长径比”用“ $L_E/D_E$ ”表示;“翼展”指翼端距弹轴距离的两倍,用“ $W_s$ ”表示;“翼径比”为“翼展”与“直径”的比值,用“ $W_s/D_E$ ”表示。

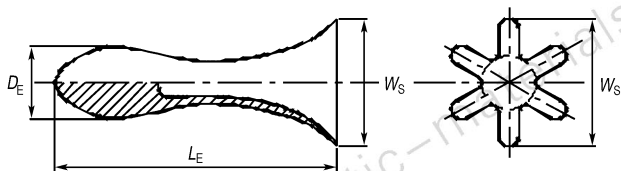


图 3 尾翼 EFP 结构参量示意图

Fig.3 Schematic diagram of configuration parameters of EFP with fins

## 3 多点起爆结构对尾翼 EFP 成型的影响

### 3.1 起爆点数量的影响

计算模型装药直径  $D_c = 65 \text{ mm}$ , 装药长径比  $L_c/D_c = 0.5$ ; 罩顶厚  $\delta = 2.5 \text{ mm}$ , 罩曲率半径为  $R = 70 \text{ mm}$ 。端

面多点环形起爆,起爆环直径  $D_i = 40 \text{ mm}$ ; 起爆点数量  $N$  分别取 2、3、4、5、6 个,共五种工况。图 4 为尾翼 EFP 头部和尾部速度差为零,外形稳定时刻的正视图 and 底视图。

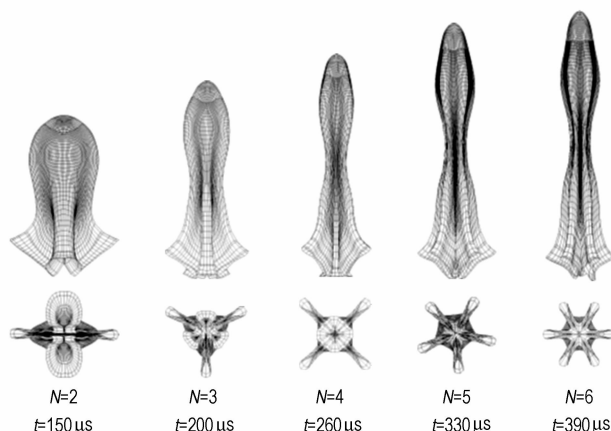


图 4 不同数量起爆点 ( $N$ ) 形成的尾翼 EFP 外形

Fig.4 Shapes of EFP with fins formed by different numbers of initiation points

EFP 的成型过程和最终形状,是由药型罩的截面形状和罩材料初始速度分布决定。药型罩各部分材料在爆轰波和爆轰产物高压加载作用下获得初始运动速度,而后进行所谓的自锻变形。初始速度的大小和方向由爆轰波强度、爆轰波阵面与罩材料表面的作用角、罩材料的质量(与壁厚成正比)等因素决定。若将罩材料初始速度沿装药轴向和径向分解,那么 EFP 的拉伸变形过程主要由轴向速度分布决定,压垮和闭合过程主要由径向速度分布决定。起爆点数量增加,爆轰波的结构和强度发生改变,导致罩材料在爆轰加载作用后的初始速度分布发生改变,EFP 主体的形状、尾翼数量及形状都发生很大变化,尾翼数量与起爆点数量  $N$  一一对应。若想获得长径比较大的 EFP,罩材料必须具有一定的初始轴向速度梯度,能产生足够的拉伸变形。但是,对于本节所讨论的等壁厚球缺罩,由于罩顶部和罩底部材料的轴向速度差过大,材料的拉伸变形可能会超过动态抗拉强度,所以容易发生缩颈和断裂现象。计算结果表明随着  $N$  增加,罩材料初始的速度梯度增大,拉伸变形的过程变长,EFP 达到稳定状态的时刻也相应后移,EFP 发生断裂的风险大大增加。由于目前并无可信的拉伸断裂失效判据,所以罩材料的 Johnson-Cook 本构模型中并未设定失效参数,计算得到的 EFP 外形为头尾速度一致时的形状。如果 EFP 在某些工况下发生断裂,文中的计算结果也可反映

EFP 断裂前的形态, 仍能体现尾翼 EFP 成形规律。

多点起爆条件下, EFP 主体已经不再是回转体形。两点起爆时, EFP 的主体被压合成椭球形, 在弹轴垂面内的投影为椭圆形, 长轴与短轴的比值为 1.73。在与之垂直的位置由于两翼间罩材料收缩产生褶皱, 另外形成了翼展稍小、厚度较大的两个对称褶皱。随着起爆点数量的增加, 褶皱越来越小。当  $N=3$  或 4 时, 褶皱已经不明显;  $N=5$  或 6 时, 罩材料完全收缩。

图 5 为起爆点数量  $N$  与 EFP 速度、长径比、翼径比关系曲线, 从计算结果可以看出:

(1) EFP 速度  $v$  随起爆点数量  $N$  的增加而增大 (图 5a), 但变化的速率不断减小。  $N$  由 2 增加到 6, EFP 速度增大 5.1%, 动能将提高 10.5%, 所以增加起爆点数量能有效提高装药的利用率及 EFP 动能。

(2) EFP 长径比  $L_E/D_E$  随  $N$  增加近似线性增大 (图 5b)。  $N=6$  时的  $L_E/D_E$  约为  $N=2$  时的 3 倍。因为起爆点数量增加, 爆轰波对罩材料的加载作用增强, 罩材料初始径向和轴向速度, 以及速度变化梯度都相应增大, 弹丸整体变得更为细长。 EFP 与目标作用的比动能增加, 所以增加起爆点的数量也是提高 EFP 侵彻能力的有效途径。

(3) 随着  $N$  增大, EFP 直径和翼展均减小 (图

5c), 但是两者变化的规律不同。  $N$  小于 4 时, EFP 直径减小较为明显;  $N$  大于 4 以后, EFP 直径减小的趋势变缓。  $N$  由 4 增加到 6, EFP 直径仅减小 2.4 mm。这说明 EFP 变得越来越密实, 罩材料径向压缩变形的难度越来越大。对于翼展则不同, 尾翼的数量与  $N$  相同, 尾翼数量越多每个尾翼所占用的罩材料质量越少, 翼面也越小; 从数值计算分析<sup>[14]</sup> 还可知, 起爆点数增加后, 相邻两点间的距离减小, 爆轰波在到达起爆点对称面上同一位置 (在罩外表面上) 时发生碰撞的入射角增大, 反射波的强度也相对较弱, 导致对罩相应位置材料的加载作用也弱, 最终形成的尾翼相对也小, 所以翼展随着  $N$  增大几乎呈线性减小。这两方面因素综合就导致翼径比先增大后减小, 当  $N=4$  时出现拐点, 翼径比达到最大值 2.18。翼径比越大说明尾翼越明显, 尾翼的稳定作用越强, 所以起爆点数量并不是越多越好, 对于文中讨论的球缺罩  $N$  取 4 时最佳。在工程设计中, 起爆点数量的选择还应考虑其它方面的因素, 比如: 如果装药物理尺寸较小, 会在空间上限制起爆点的设置; 尾翼数量增加一方面会使稳定力矩增大, 另一方面各个尾翼产生的阻力总和也随之提高, 在相同的炸高处 EFP 速度损失将更大, 在实际应用中应综合考虑。

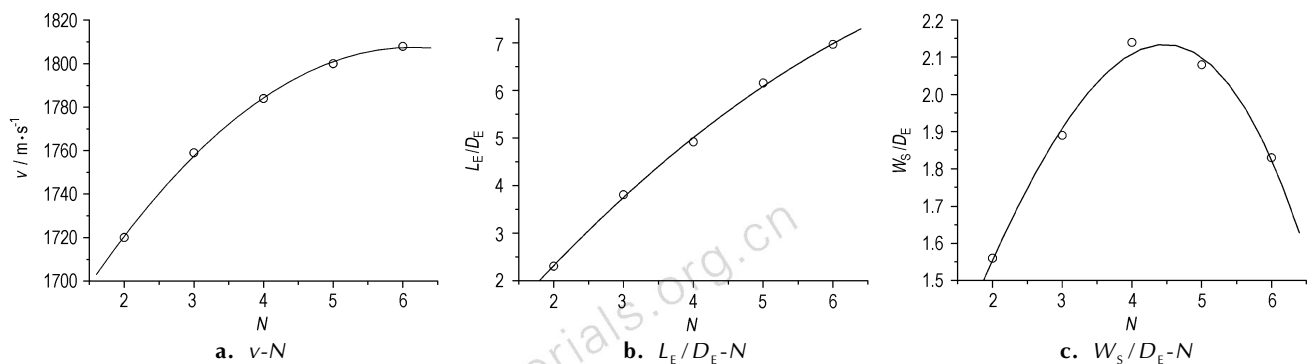


图 5 起爆点数量与尾翼 EFP 速度、长径比、翼径比关系曲线

Fig. 5 Curves of initiation points number ( $N$ ) vs. velocity ( $v$ ), length/diameter ( $L_E/D_E$ ), wingspan/diameter ( $W_s/D_E$ ) of EFP with fin

### 3.2 起爆环直径的影响

计算模型  $N=4$ ,  $D_1$  分别为 20, 30, 40, 50 mm 四种工况。增大起爆环直径, 在爆轰波作用下药型罩初始速度梯度增加, 罩材料在成型过程中的拉伸和压合更剧烈。3.1 节的几个工况计算结果表明, 当罩曲率半径为 70 mm 时 EFP 所受的拉伸仍比较剧烈, 很可能发生断裂。在工程设计中, 常以提高 EFP 长径比和速度为目标, 实践表明在这一过程中 EFP 发生缩颈和断

裂的问题不可避免, 但是必须采取有效措施以避免这种情况发生。为了保证所研究的 EFP 装药模型能形成弹形稳定的 EFP, 按照球缺罩 EFP 优化设计原则<sup>[16]</sup> 可以采取增加罩壁厚、增加罩外表面曲率半径等措施。为使研究内容和过程更为明晰, 仅适当增加罩曲率半径, 选取  $R=90$  mm, 罩顶厚仍选  $\delta=2.5$  mm。这样做一方面有效地降低了 EFP 发生断裂的可能性, 另一方面也保持了研究过程和结果的可比性。图 6 给出了上

述工况下尾翼 EFP 外形正视图和底视图。

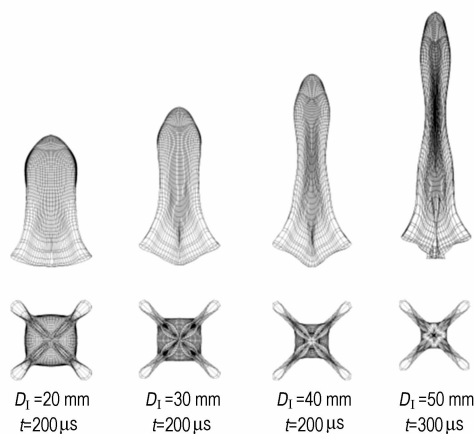


图 6 不同直径起爆环 ( $D_1$ ) 形成的尾翼 EFP 外形 ( $N=4$ )  
 Fig. 6 Shapes of EFP with fins formed by different diameters of initiation circle ( $N=4$ )

EFP 的外形随起爆环直径增大变得更为细长,但其成型模式仍为完全翻转型。随着起爆环直径增加,EFP 的变形更剧烈,EFP 达到稳定状态的时刻也相应后移。如图 6 所示,前三种工况  $t=200 \mu\text{s}$  时 EFP 外形均能达到稳定状态,但是当  $D_1=5 \text{ cm}$  时, $t=300 \mu\text{s}$  弹

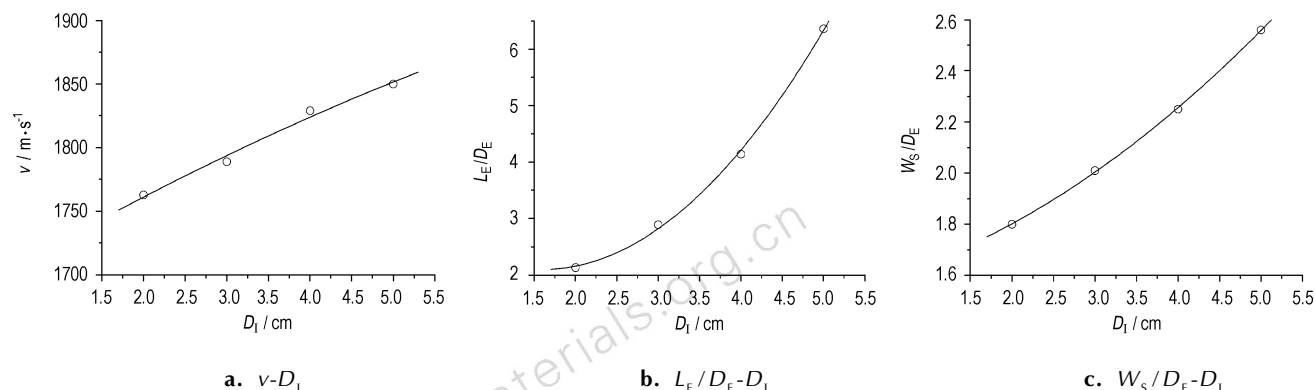


图 7 起爆环直径与尾翼 EFP 速度、长径比、翼径比关系曲线  
 Fig. 7 Curves of  $v$ ,  $L_E/D_E$ ,  $W_S/D_E$  versus the diameter of annular initiation ( $D_1$ )

#### 4 装药长径比对尾翼 EFP 成型的影响

计算模型  $D_C = 65 \text{ mm}$ ,  $N = 4$ ,  $D_1 = 40 \text{ mm}$ ,  $L_C/D_C$  分别取 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 四个值。从前两节对比分析可以预测增加装药长比后,药型罩在成型过程中罩材料拉伸和压垮变形更为剧烈,EFP 不可避免会发生断裂。仅仅改变罩曲率半径和壁厚,仍不能保证本节所讨论的 EFP 装药模型,在  $L_C/D_C$  所选取的范围内都

形才稳定。图 7 为起爆环直径与 EFP 速度、长径比、翼径比关系曲线,从计算结果可以看出:

(1) EFP 速度与起爆环直径近似呈线性递增关系 (图 7a),增大起爆环直径并不增加装药结构的复杂性,但是能有效提高弹丸速度,提高装药利用率。 $D_1$  从 2 cm 增加到 5 cm, EFP 速度增加约  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,装药利用率提高 10%。

(2) EFP 长径比随  $D_1$  增大急剧增加 (图 7b)。由理论分析<sup>[14]</sup>可知,起爆环直径越大爆轰波在向罩表面传播过程中形成的中心超压区越大,使得 EFP 头部速度提高,弹丸在变形过程中头尾速度差增大;爆轰波与药型罩表面作用的入射角增大,罩材料径向压合速度增大。两方面共同影响下轴向拉伸和径向压合都增强,最终导致 EFP 长径比增大有利于提高侵彻威力,同时 EFP 拉伸断裂的可能性也增加。

(3) 由于罩材料径向压合速度增大,EFP 翼展随起爆环直径增加而减小。虽然翼展和 EFP 直径同时减小,但是翼展变化的幅度较小,所以翼径比反而增大。在进行装药结构设计时,应尽可能增加起爆环直径。对于文中讨论的球缺罩 ( $R = 1.38 D_C$ ),当  $D_1$  取 5 cm 时 EFP 仍有断裂的可能,所以  $D_1$  取 4 cm ( $0.62 D_C$ ) 为宜。

能形成弹形稳定的 EFP。所以,决定从调整罩壁厚变化梯度的角度进一步优化药型罩结构,采用变壁厚球缺罩结构,参照变壁厚球缺罩 EFP 设计原则<sup>[17]</sup>确定罩内、外曲率半径和罩顶厚度。采用顶部厚、底部薄的结构,药型罩内、外表面曲率半径  $R_N = 78 \text{ mm}$  ( $1.2 D_C$ )、 $R_W = 70 \text{ mm}$  ( $1.1 D_C$ ),罩顶壁厚  $\delta = 2.8 \text{ mm}$  ( $0.089 D_C$ )。图 8 给出了上述四种工况下所形成的尾翼 EFP 外形正视图和底视图。从图 8 对比可以发现,采用变壁厚球

缺罩尾翼 EFP 的弹形得到了较为明显改善, EFP 断裂的风险大大降低。

图 9 为装药长径比与 EFP 速度、长径比、翼径比关系曲线, 从计算结果可以看出:

(1) EFP 速度  $v$  随  $L_c/D_c$  增加几乎呈线性增加(图 9a),  $L_c/D_c=0.6$  时 EFP 速度最小为  $1935 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $L_c/D_c$  每增加 0.1 弹丸速度增加约  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当  $L_c/D_c$  由 0.6 增加至 0.9 时, EFP 速度增加约 14.6%, EFP 动能相应增加约 31.4%。由此可见, 增加装药长径比对于提高 EFP 威力作用相当显著。

(2) EFP 长径比  $L_E/D_E$  也随  $L_c/D_c$  基本呈线性增加(图 9b), 当  $L_c/D_c$  由 0.6 增加至 0.9 时,  $L_E/D_E$  由 3.29 增大为 6.13, 变化幅度达到 72.8%。

(3) EFP 翼展和翼径比均随  $L_c/D_c$  增大而增大(图 9c), 尤其是翼径比增加的幅度更显著。当  $L_c/D_c=0.6$  时翼径比最小为 1.49, 当  $L_c/D_c$  增大为 0.9 时翼径比为 2.42, 变化的幅度约为 62.4%。从理论上

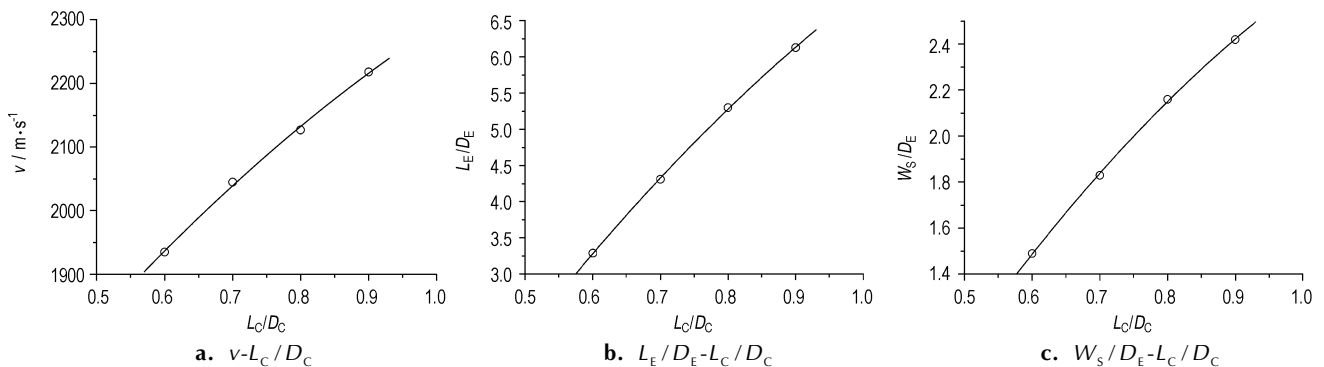


图 9 装药长径比与尾翼 EFP 速度、长径比、翼径比关系曲线

Fig. 9 Curves of  $v$ ,  $L_E/D_E$ ,  $W_s/D_E$  of EFP with fin versus  $L_c/D_c$

## 5 结论

(1) 系统研究了起爆点数量  $N$ 、起爆环直径  $D_1$  和装药长径  $L_c/D_c$  等参数对尾翼 EFP 成型性能的影响规律, 深化了多点起爆条件下尾翼 EFP 形成机理认识, 也为后续装药结构设计提供了依据。

(2) 当  $N=4$  时翼径比  $W_s/D_E$  达到最大值, 并且应尽可能增加  $D_1$  和  $L_c/D_c$  的取值, 但同时不可避免会增加 EFP 拉伸断裂的风险, 在进行装药结构设计时应予以综合考虑。对于本文研究的球缺罩结构,  $N$  取 4、 $D_1$  取 40 mm ( $0.62D_c$ )、 $L_c/D_c$  取 0.8 为宜。

(3) 在研究过程中依次采用不同曲率半径的等壁厚和变壁厚球缺罩结构, 结果表明变壁厚球缺罩更有

利于形成形态良好的尾翼 EFP, 并且能有效降低尾翼 EFP 成型过程中发生断裂的可能, 提高尾翼 EFP 成型的稳定性。这也说明多点起爆结构设计还应与罩结构设计配合进行, 下一步应研究两者之间的匹配关系。

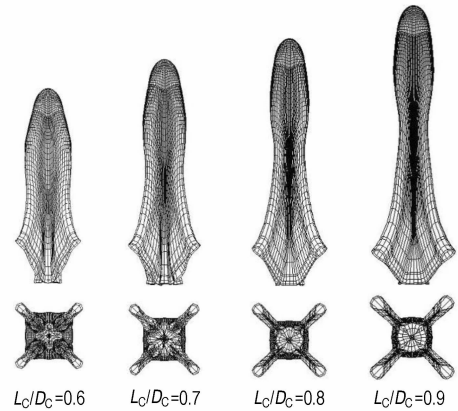


图 8 不同装药长径比 ( $L_c/D_c$ ) 形成的尾翼 EFP 外形

Fig. 8 Shapes of EFP with fins formed by different the length/diameter ( $L_c/D_c$ ) of charge

利于形成形态良好的尾翼 EFP, 并且能有效降低尾翼 EFP 成型过程中发生断裂的可能, 提高尾翼 EFP 成型的稳定性。这也说明多点起爆结构设计还应与罩结构设计配合进行, 下一步应研究两者之间的匹配关系。

## 参考文献:

- [1] Bender D, Chhouk B. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins[C] // Proceedings of the 19th International Symposium on Ballistics, Casino Kursaal Congress Center, Interlaken, Switzerland, 2001: 755-762.
- [2] 卢永刚, 蒋建伟, 门建兵. EFP 的气动及终端弹道优化设计新方案[J]. 兵工学报, 2002, 23 (3): 308-312.  
LU Yong-gang, JIANG Jian-wei, MEN Jian-bing. A new optimization design for the aerodynamics and terminal ballistics of explosively formed penetration (EFP) [J]. Acta Armamentarii, 2002, 23 (3): 308-312.

- [3] Bouet Th, Tarayer P, Guillon J P. Study of a multi-point ignition EFP [C] // Proceedings of the 15th International Symposium on Ballistics, Jerusalem, Israel, 1995: 159-166.
- [4] Bourne B, Curtis J P, Cowan K G. Variable multiple point initiated chemical energy warheads [C] // Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, Texas, 1999: 426-433.
- [5] LI Cheng-bing, SHEN Zhao-wu. Investigation of three-point detonation mechanism and formation of tails of EFP[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(1): 23-28.
- [6] 于川, 董庆东, 孙承纬, 等. 带尾翼翻转型爆炸成型弹丸成形试验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2003, 23(6): 561-564.  
YU Chuan, DONG Qing-dong, SUN Cheng-wei, et al. The experimental studies of explosively formed projectile with star shaped tail[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(6): 561-564.
- [7] 桂毓林, 于川. 带尾翼的翻转型爆炸成型弹丸的三维数值模拟研究[J]. *爆炸与冲击*, 2005, 25(4): 313-318.  
GUI Yu-lin, YU Chuan. 3D simulation of over-turned explosively formed projectile (EFP) with star-shaped fins[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25(4): 313-318.
- [8] 门建兵, 蒋建伟, 万丽珍. 带尾翼 EFP 形成的三维数值模拟研究[J]. *北京理工大学学报*, 2002, 22(2): 166-168.  
MEN Jian-bing, JIANG Jian-wei, WAN Li-zhen. 3D numerical simulation research on the formation of explosively formed penetrator with fins [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, 22(2): 166-168.
- [9] 罗健, 蒋建伟, 朱宝祥. 多点起爆对 EFP 形成的影响研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2004, 24(2): 27-29.  
LUO Jian, JIANG Jian-wei, ZHU Bao-xiang. The effect of multi-point initiation on the explosively formed penetrator formation [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2004, 24(2): 27-29.
- [10] 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.
- [11] 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*, 20011: 414-424.
- [12] 苗勤书, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 环起爆位置对 EFP 成型的影响[J]. *弹道学报*, 2012, 24(1): 58-62.  
MIAO Qin-shu, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Effect of annular initiation Position on formation of EFP[J]. *Journal of Ballistics*, 2012, 24(1): 58-62.
- [13] 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)*, 2012, 21(1): 80-84.
- [14] 刘建青, 郭涛, 顾文彬, 等. 三点起爆形成尾翼 EFP 的数值模拟和实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(1): 38-46.  
LIU Jian-qing, GUO Tao, GU Wen-bin, et al. Numerical simulation and experimental investigation of EFPs with fins formed by three-Point initiation[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(1): 38-46.
- [15] 吴哈玲, 段卓平. 杆式射流形成的数值模拟研究[J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(4): 328-332.  
WU Han-ling, DUAN Zhuo-ping, WANG Yong-qing. Simulation investigation of rod-like jets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 328-332.
- [16] 顾文彬, 刘建青, 唐勇, 等. 球型 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): 165-186.  
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 (Natural Science Edition)*, 2008, 32(2): 165-186.
- [17] 刘建青, 顾文彬, 唐勇, 等. 变壁厚球缺罩 EFP 成型性能的数值模拟研究[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.

## Effects of Multi-point Initiation Charge Configuration Parameters on EFP with Fins Formation

LIU Jian-qing, GU Wen-bin, XU Hao-ming, LU Ming, WU Shuang-zhang

(College of Field Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Multi-point initiation explosively formed projectile(EFP) charges with different  $N$  (the number of initiation points),  $D_i$  (the diameter of annular initiation),  $L_c/D_c$  (the length/diameter of charge) were studied by LS-DYNA program. The influences of multi-point initiation charge configuration parameters, such as  $N$ ,  $D_i$ ,  $L_c/D_c$ , on the formation parameters of EFP with fins were studied. The results of numerical simulation indicate that there are remarkable effects of  $N$ ,  $D_i$  and  $L_c/D_c$  on the formation parameters, including  $v$ ,  $L_e/D_e$  (the length/diameter),  $W_s/D_e$  (the wingspan/diameter) of EFP with fins. The number of fins is equal to the number of initiation points. When the  $N$  is 4, the  $W_s/D_e$  of EFP with fins approaches the maximum. Increasing  $D_i$  and  $L_c/D_c$  effectively enhances the  $v$  and  $L_e/D_e$  of EFP with fins. The formation parameters of EFPs formed by hemispherical liner with uniform or variational wall-thickness were compared. Results indicate that hemispherical liner with variational wall-thickness is a more feasible option. When  $N=4$ ,  $D_i=40$  mm, and  $L_c/D_c=0.8$  respectively, EFP with more appropriate configuration can be approached.

**Key words:** explosion mechanics; multi-point initiation; EFP with fins; numerical simulation

**CLC number:** TJ410.33; O381

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.004