

文章编号: 1006-9941(2017)01-0063-06

# 偏心起爆方式对棱柱形定向战斗部破片飞散规律的影响

刘琛, 李元, 李燕华, 温玉全

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究起爆方式对棱柱形定向战斗部破片飞散规律的影响,采用 LS-DYNA 软件模拟研究了六棱柱定向战斗部分别用面偏心一线、面偏心两线、面偏心三线、棱偏心一线及棱偏心两线起爆时的破片飞散速度、破片方向角,结果表明,偏心起爆可以明显提高定向区域内的破片飞散速度,且破片束基本分布在  $25^\circ$  左右的径向范围内,棱偏心两线同步起爆时,对目标方位破片最大飞散速度增益可达 29.73%,采用棱偏心两线序贯延时起爆可使轴向方向角改变量达  $6.77^\circ$ 。

**关键词:** 棱柱战斗部; 偏心起爆方式; 破片速度; 破片飞散角

**中图分类号:** TJ55; TJ410.33

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.011

## 1 引言

偏心起爆圆柱形定向战斗部因其结构简单,并能明显提高目标方向破片速度,一直以来受到广泛的关注<sup>[1-5]</sup>,而棱柱形定向战斗部采用偏心起爆方式后,破片飞散速度及分布密度均可得到显著提高<sup>[6]</sup>。美英的“可编程集成弹药舱”(PIOS)计划<sup>[7]</sup>研究了一种自适应六棱柱定向战斗部,其毁伤效率高于常规战斗部。Sam Waggener<sup>[8]</sup>针对六棱柱定向战斗部破片飞散存在覆盖盲区的问题,研究了起爆方式对破片飞散角的影响,通过调整起爆方式可使破片束的飞散角度发生  $7^\circ \sim 8^\circ$  的偏移,从而实现  $360^\circ$  可打击范围。李元等<sup>[6]</sup>对比研究了棱柱型和圆柱型偏心起爆定向战斗部的毁伤效能,得出棱柱型偏心起爆定向战斗部能形成高密度的破片束,棱上偏心八点同时起爆时的平均速度和平均动能增益分别达到 24.13% 和 54.52%,且在弹靶距离 40m 时仍有较强的毁伤效果。

虽然国外很早就提出了棱柱型定向战斗部的概念<sup>[7-9]</sup>,但是其具体性能参数并无报道,而国内对棱柱

形定向战斗部研究较少,其破片飞散规律尚未完全掌握。本研究利用 LS-DYNA 软件对六棱柱定向战斗部进行了数值模拟分析,结合爆炸逻辑网络定向起爆系统的逻辑功能、爆轰波输出特点,综合研究了起爆方式对棱柱形定向战斗部破片速度及分布密度的影响,意图为棱柱型定向战斗部及其起爆系统设计提供理论依据。

## 2 六棱形战斗部模型建立

### 2.1 模型结构及相关参数

六棱柱定向战斗部模型结构如图 1 所示,主要由炸药、空气、衬筒和球形破片四部分组成,模型结构未显示空气域结构,破片直径 6 mm,战斗部总外径 122 mm,衬筒厚度 2 mm,战斗部总长度 240 mm。有限元模型中空气域直径 300 mm。装填破片数量 2577 个,破片相互交错均匀排布于衬筒之上。

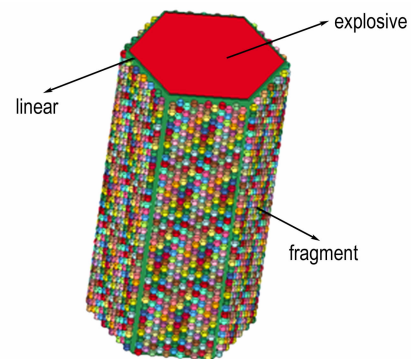


图 1 六棱柱定向战斗部模型结构

Fig. 1 The model structure of prismatic aimable warhead

收稿日期: 2016-06-23; 修回日期: 2016-07-29

基金项目: 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金资助项目(U1530135)

作者简介: 刘琛(1994-),女,硕士研究生,主要从事火工系统理论与可靠性技术研究。e-mail: 15810370322@163.com

通信联系人: 温玉全(1965-),男,副教授,博士生导师,主要从事火工系统理论与可靠性技术、爆炸毁伤技术研究。e-mail: wyquan@bit.edu.cn

战斗部主装药为 TNT/RDX 40/60 炸药, 炸药材料采用高能炸药燃烧材料模型和 JWL 状态方程<sup>[10]</sup>描述。材料模型和状态方程相关参数如表 1 所示<sup>[11]</sup>。

空气采用空材料模型和多项式状态方程<sup>[10]</sup>, 具体参数如表 2 所示<sup>[11]</sup>。

表 1 装药性能参数及状态方程参数

Table 1 Parameters of charge property and equation of state

| density<br>/g · cm <sup>-3</sup> | $p_{cr}$<br>/GPa | $D_{cr}$<br>/m · s <sup>-1</sup> | $A$<br>/GPa | $B$<br>/GPa | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ |
|----------------------------------|------------------|----------------------------------|-------------|-------------|-------|-------|----------|
| 1.717                            | 29.5             | 7890                             | 524.23      | 7.678       | 4.2   | 1.1   | 0.34     |

表 2 空气材料参数

Table 2 Parameters of air material

| density<br>/g · cm <sup>-3</sup> | $C_0$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ |
|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.00129                          | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.4   | 0.4   |

战斗部衬筒采用 LY12-CZ 硬铝材料, 该材料在爆轰作用下发生弹塑性变形, 所以采用各向同性硬化弹塑性模型描述, 具体参数如表 3 所示<sup>[11]</sup>。

破片用 93W 合金材料制成, 采用刚性材料模型, 以确保破片在驱动过程中不发生变形和损坏, 其材料参数如表 4 所示<sup>[11]</sup>。

表 3 衬筒材料参数

Table 3 Parameters of linear material

| density<br>/g · cm <sup>-3</sup> | elastic<br>modulus/GPa | poisson<br>ratio | yield limit<br>/GPa | hardening<br>index |
|----------------------------------|------------------------|------------------|---------------------|--------------------|
| 2.7                              | 72                     | 0.33             | 0.31                | 0.7                |

表 4 破片材料参数

Table 4 Parameters of fragment material

| density/g · cm <sup>-3</sup> | Young's modulus/GPa | Poisson ratio |
|------------------------------|---------------------|---------------|
| 17.51                        | 117                 | 0.22          |

## 2.2 起爆方式设定

爆炸逻辑网络定向起爆系统可以实现侧向一线或多线多点同步输出、序贯输出等模式, 因此在起爆方式设定时, 首先选定五种起爆方式, 即面偏心一线起爆(图 2a)、面偏心两线起爆(图 2b)、面偏心三线起爆(图 2c)、棱偏心一线起爆(图 2d)、棱偏心两线起爆(图 2e), 起爆点位置如图 2 所示。先在同步起爆方式下进行数值计算, 再考虑延时起爆方式。延时起爆时, 起爆点由上至下依次延时相同的时间间隔。研究中还

同时设置了端面中心一点起爆方式(图 2f), 以便和偏心起爆方式作对比, 分析毁伤性能参数变化情况。

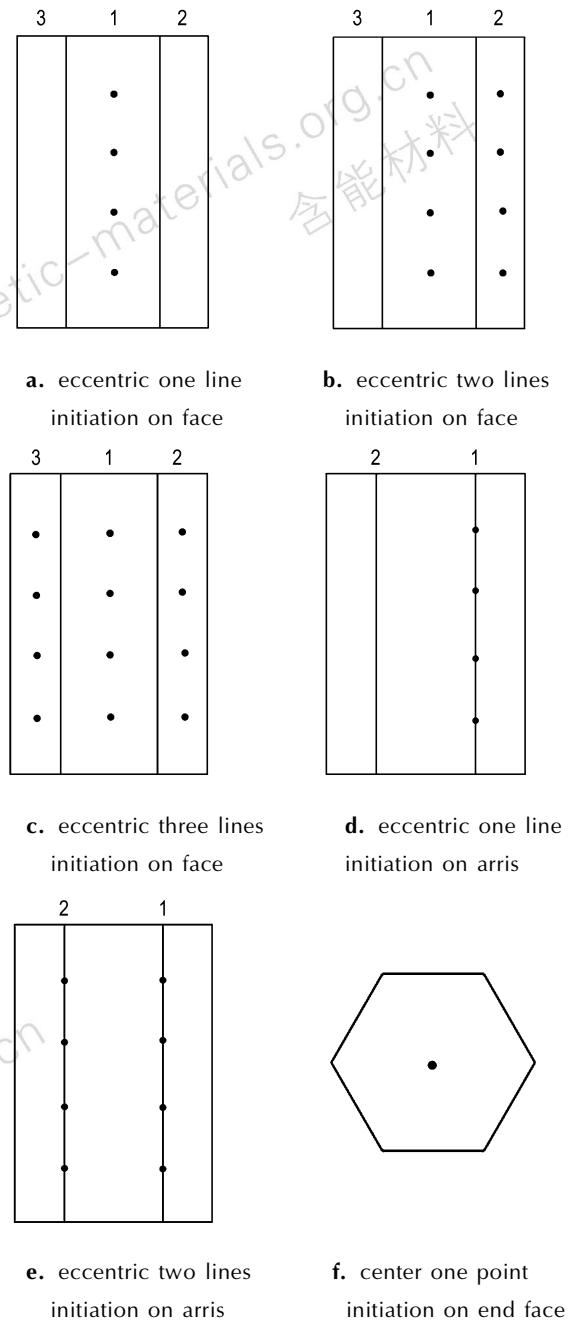


图 2 六棱柱定向战斗部起爆点布置

Fig. 2 Initiator layouts of prismatic aimable warhead

## 3 计算结果及数据分析

利用 LS-DYNA 计算 180  $\mu$ s, 统计此时刻多点同步起爆和延时起爆下定向区域内破片沿轴向及径向的飞散速度及方向角, 将其作为评价定向战斗部威力的性能参数。

### 3.1 同步起爆

#### 3.1.1 破片飞散规律

图3为该六棱战斗部起爆 180 μs 时分别采用不同起爆方式所形成的典型破片飞散图,由图3可知,破片飞散汇聚成6个破片束。与端面中心一点起爆相比,采用偏心起爆后,破片沿径向飞散呈现明显的不对称性,如图3a、图3c、图3e所示。起爆点对侧破片速度明显提高,但各方向破片数量并未发生改变。采用棱偏心一线起爆或面偏心两线起爆后,左侧上方破片速度明显高于右侧,如图3b、图3d所示。

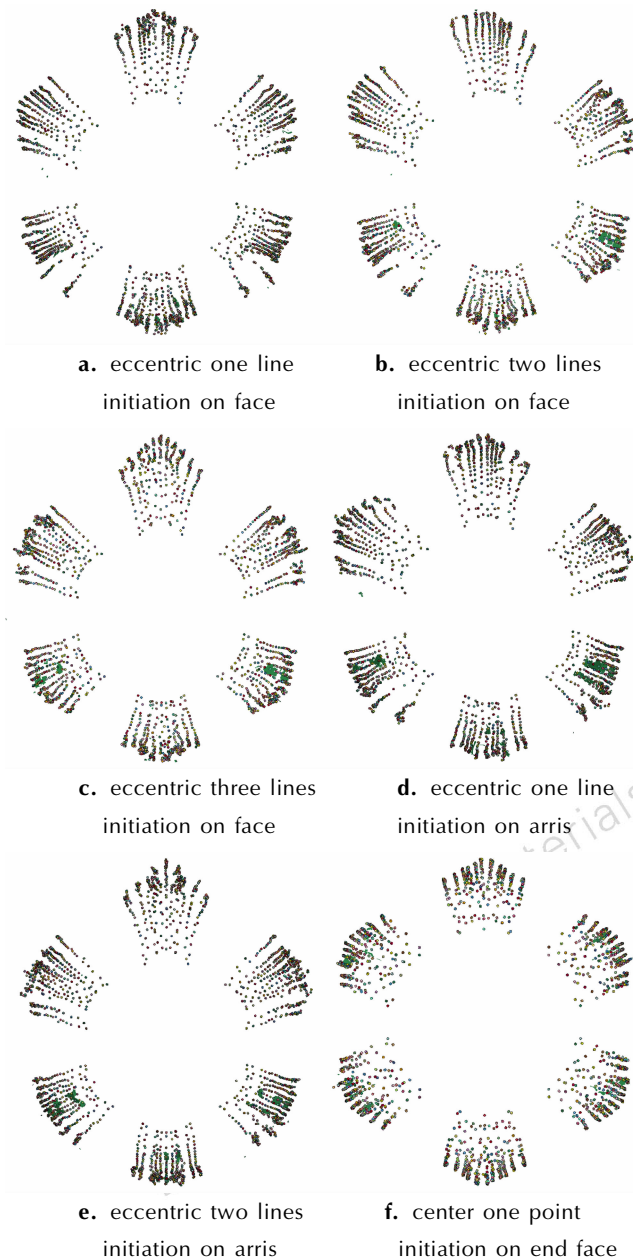


图3 180 μs 不同起爆方式下破片飞散情况  
Fig. 3 Fragment dispersion situation of different initiation ways at 180 μs

#### 3.1.2 破片飞散速度

由于每个面上排布的破片个数较多,为了便于量化比较,取起爆点对侧平面内中间一行的破片作为研究对象。棱柱战斗部对侧平面上共布置了78行破片,中间行为第39、40行,从左到右依次编号为1-11,其中中间6号破片所在位置称为中间区域,两边1、11号破片所在位置称为边缘部位,破片排列位置如图4所示。不同起爆方式下的破片飞散速度统计如图5所示。

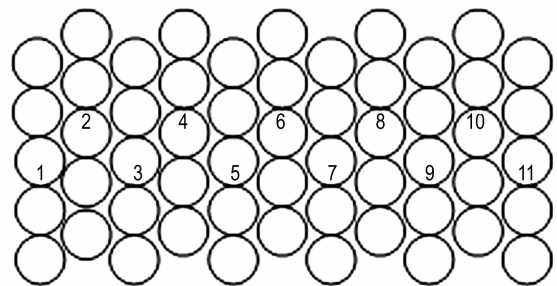


图4 破片排布示意图  
Fig. 4 Fragment configuration Diagram

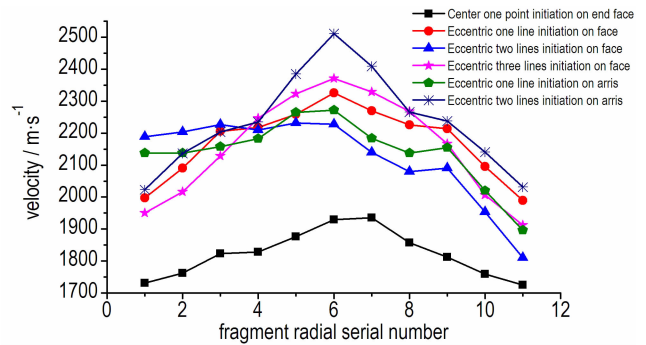


图5 不同起爆方式下的径向破片飞散速度  
Fig. 5 Fragment dispersion velocities in radial direction under different initiation ways

由图5可以看出,起爆方式对破片飞散速度影响较大。采用端面中心一点起爆方式起爆时,破片最大飞散速度为 1935.49 m · s<sup>-1</sup>;采用面偏心一线同步起爆时,其破片最大飞散速度为 2326.06 m · s<sup>-1</sup>,比端面中心一点起爆时提高 20.18%;采用面偏心两线同步起爆时,其破片最大飞散速度为 2231.91 m · s<sup>-1</sup>,提高 15.31%;采用面偏心三线同步起爆时,其破片最大飞散速度为 2371.33 m · s<sup>-1</sup>,提高 22.52%;采用棱偏心一线同步起爆时,其破片最大飞散速度为 2272.25 m · s<sup>-1</sup>,提高 17.40%;采用棱偏心两线同步起爆时,其破片最大飞散速度为 2510.83 m · s<sup>-1</sup>,提高 29.73%。

从以上数据可看出,采用偏心起爆时的破片速度明显高于采用中心起爆时的破片速度,其中采用棱偏心两线同步起爆时的破片速度增益最大。从图5可以看出,不论采取何种起爆方式,都是中间区域的破片飞散速度高于边缘部位的破片飞散速度。这是因为中间区域有爆轰波汇聚,破片在爆轰波的汇聚作用下飞散速度会高一些,边缘部分因为有稀疏波的作用,破片速度会降低。此外,由于爆轰波对破片的加载过程不一致,使得破片沿径向的飞散速度分布存在较大差异。

### 3.1.3 破片径向飞散角

不同起爆方式下的破片径向飞散角如表5所示,表中参数定义见图6,其中 $\beta_1$ 为中心起爆时的径向飞散角, $\beta_2$ 为面偏心两线同步起爆或棱偏心一线同步起爆时的径向飞散角, $\alpha$ 为偏转角。

表5 不同起爆方式对破片径向飞散角的影响

Table 5 Influence of different initiation ways on fragment dispersion angle in radial direction

| initiation way                           | $\beta/(\circ)$ | $\alpha/(\circ)$ |
|--|-----------------|------------------|
| center initiation                        | 27.33           | 0                |
| eccentric one line initiation on face    | 24.92           | 0                |
| eccentric two lines initiation on face   | 26.63           | 0                |
| eccentric three lines initiation on face | 24.36           | 0                |
| eccentric one line initiation on arris   | 22.82           | 0                |
| eccentric two lines initiation on arris  | 25.58           | 0                |

Note:  $\beta$  is the radial dispersion angle,  $\alpha$  is the deflection angle.

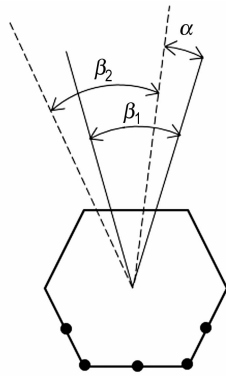


图6 径向飞散角

Fig.6 Dispersion angles in radial direction

由表5可得出,采用端面中心单点起爆时,破片束的径向飞散角在 $27^\circ$ 左右,偏转角 $0^\circ$ ;采用棱偏心一线起爆时,破片束的径向飞散角在 $23^\circ$ 左右,偏转角是 $0^\circ$ ;采用其它偏心起爆方式时,破片束的径向飞散角在 $25^\circ$ 左右,偏转角也是 $0^\circ$ 。这表明起爆方式对破片束的径向飞散角有一定的影响,但对偏转角没有影响。

这与采用偏心起爆可以明显提高定向区域内的破片飞散速度,但对目标方向的破片密度并无影响的研究结果一致<sup>[6]</sup>。

### 3.2 棱偏心两线序贯延时起爆

由于采用棱偏心两线同步起爆时破片速度增益最大,故在棱偏心两线序贯延时起爆方式下,研究序贯延时时间对破片飞散的影响。设相邻两起爆点之间的爆轰波传播时间为 $t=L/D$ , $L$ 为相邻两起爆点间距, $D$ 为装药爆速,则设定起爆延时时长分别为 $t/4$ 、 $2t/4$ 、 $3t/4$ ,对不同延时时长下的计算效果进行比较。

#### 3.2.1 爆轰波压力及破片飞散规律

图7为棱偏心两线序贯延时 $t/4$ 起爆时爆轰波传播情况。

图8为棱偏心两线序贯延时 $t/4$ 起爆 $180\ \mu\text{s}$ 时破片飞散图,可以看出,经过延时处理后,起爆点对侧的破片受到较大影响,在飞散过程中会产生一定角度的倾斜,这是因为随起爆点起爆时间的不同,其对侧破片向外飞散时间及距离也不同,最终使破片飞散角发生改变。

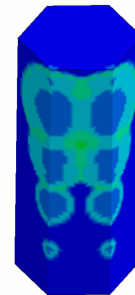


图7 序贯延时爆轰波传播

Fig.7 Detonation wave propagation under sequential delay detonation

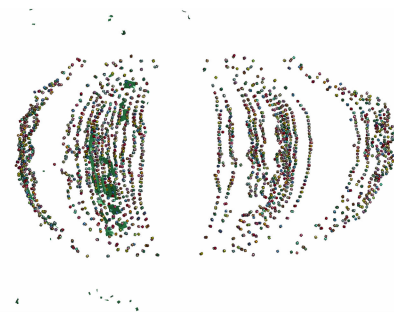


图8  $180\ \mu\text{s}$ 序贯延时破片飞散情况

Fig.8 Fragment dispersion situation under sequential delay at  $180\ \mu\text{s}$

#### 3.2.2 延时起爆对破片飞散速度的影响

为便于分析,取起爆点对侧面中间一系列的破片速



度作为比较对象。对侧面共排 11 列破片,取中间第 6 列,依次从上到下提取破片速度。中间列在不同延时时长的下的破片飞散速度分布如图 9 所示。

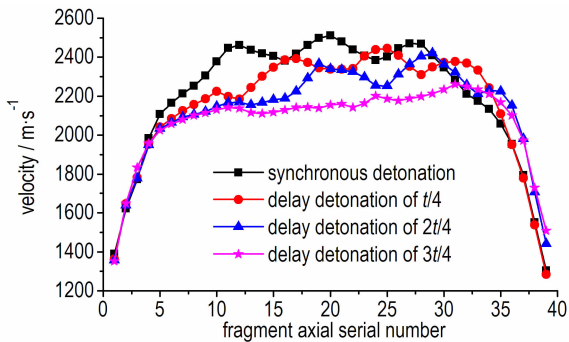


图 9 序贯延时起爆对轴向破片飞散速度的影响  
Fig. 9 Effect of sequential delay initiation on fragment dispersion velocities in axial direction

由图 9 可看出,对棱偏心两线起爆进行序贯延时处理后,其破片飞散速度会发生一定的改变。采用棱偏心两线同步起爆时,其破片最大飞散速度为  $2510.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 对其进行  $t/4$  序贯延时处理后,其破片最大飞散速度为  $2444.82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 对其进行  $2t/4$  序贯延时处理后,其破片最大飞散速度为  $2420.89 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 对其进行  $3t/4$  序贯延时处理后,其破片最大飞散速度为  $2260.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。以上结果表明,经过序贯延时处理后,破片飞散速度与棱偏心两线同步起爆时相比明显减小,且破片飞散速度随延时时长增加而减小,这是因为延时处理使得爆轰波之间的碰撞条件发生了改变。

### 3.2.3 延时起爆对破片轴向方向角的影响

仍取对侧面中间第 6 列作为研究对象,量取不同延时时长下该列上每个破片的轴向方向角,如图 10 所示。

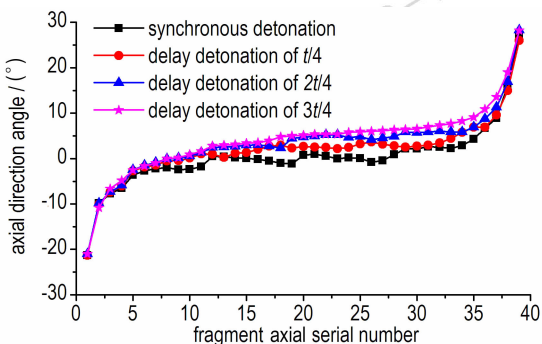


图 10 延时起爆对破片轴向方向角的影响  
Fig. 10 Effect of delay initiation on fragment direction angles in axial direction

由图 10 可看出,对棱偏心两线起爆进行序贯延时处理后,其轴向方向角整体增大,且随延时时长增加,角度改变量逐渐增大。将序贯延时起爆时各个位置破片轴向飞散角与棱偏心两线同步起爆时同一位置的破片轴向飞散角相减,得出破片轴向飞散角的变化量,将每种起爆方式下飞散角改变量的最大值作为对比统计量,如表 6 所示。

表 6 不同序贯延时下的破片轴向方向角改变量

Table 6 Change quantity in axial direction angle of fragment under different sequential delays

| delay time                          | 0 | $t/4$ | $2t/4$ | $3t/4$ |
|-------------------------------------|---|-------|--------|--------|
| change of axial direction angle/(°) | 0 | 4.47  | 5.61   | 6.77   |

从表 6 可以看出,随着延时时长的增加,轴向方向飞散角改变量增大,最大可达  $6.77^\circ$ ,表明序贯延时起爆能够改变破片束飞散方向,可用于精确控制破片的飞散方向,有助于提高对目标的毁伤概率。

## 4 结论

- (1) 采用偏心起爆后,破片沿径向飞散呈现明显的不对称性,破片束基本分布在  $25^\circ$  左右的径向范围内;
- (2) 相对于中心起爆,采用棱偏心两线同步起爆时对目标方位破片最大飞散速度增益可达  $29.73\%$ ;
- (3) 序贯延时起爆对破片的轴向飞散角有一定的影响,随着延时时长的增加,轴向方向角最大可达  $6.77^\circ$ ,可用于精确控制破片的飞散方向,提高对目标的毁伤概率。

### 参考文献:

- [1] Fairlie G E, Marriott C O. Computer modeling of full size fragmenting aimable warheads using AUTODAN-3D[C] // 17th International Symposium on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998: 389-396.
- [2] Resnyansky A. Directional fragmentation warheads: A theoretical and experimental investigation[C] // 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, TX, 1999: 543-550.
- [3] 梁争峰, 袁宝慧, 孙兴昀, 等. 定向战斗部破片能量增益的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2005(2): 52-55.  
LIANG Zheng-feng, YUAN Bao-hui, SUN Xing-yun, et al. Numerical simulation on the kinetic energy increase of aimed warhead[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005(2): 52-55.
- [4] 李翔宇, 卢芳云. 三种类型战斗部破片飞散的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2007(1): 44-48.

- LI Xiang-yu, LU Fang-yun. Numerical Simulation on fragments dispersion of three type warheads[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007(1): 44-48.
- [5] 叶小军, 韩玉, 陈庆宝. 偏心起爆战斗部速度增益的数值模拟及实验[J]. *火炸药学报*, 2009(3): 29-34.  
YE Xiao-jun, HAN Yu, CHEN Qing-bao. Numerical simulation and experiment of velocity gains on the non-central detonation warhead[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009(3): 29-34.
- [6] LI Yuan, WEN Yu-quan. Simulation on damage effectiveness of hexagonal prism aimable warhead with multi-point synchronous initiations[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2014(1): 1-7.
- [7] Cunard D A Thomas K A. Programmable Integrated Ordnance Suite(PIOS) [C] // 1st Annual International Missiles & Rockets Exhibition, 1992
- [8] Waggener Sam, Relative performance of anti-air missile warheads[C] // 19th International Symposium on Ballistics, Interlaken, Switzerland, 2001: 623-630.
- [9] Borje Nyquist. Abraham to c-ram[R]. Technical report, 2007.
- [10] Hallquist J O. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. Livermore Software Technology Corporation, 2007, 970.
- [11] 魏继峰. 战斗部多点起爆模拟研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2005.  
WEI Ji-feng. Numerical research of multi-point initiated warhead [D]. Beijing: Beijing Institute of China, 2005.

## Influence of Eccentric Initiation Ways on Fragment Dispersion Rule of Prismatic Aimable Warhead

LIU Chen, LI Yuan, LI Yan-hua, WEN Yu-quan

(State Key Laboratory of Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To study the effect of eccentric initiation ways on the fragment dispersion rule of prismatic aimable warhead, the fragment dispersion velocity and fragment direction angle of prismatic aimable warhead in eccentric one line initiation on face, eccentric two lines initiation on face, eccentric three lines initiation on face, eccentric one line initiation on arris and eccentric two lines initiation on arris were simulated and studied by LS-DYNA software. The results show that the eccentric initiation can significantly improve the fragment velocity within the directional region. And the fragment beam is basically distributed in the radial direction of about 25°. When two eccentric lines on the arris detonate synchronously, the gain in fragment maximum dispersion velocity in the direction of the target can reach 29.73%. Using eccentric two lines sequential delay initiation on arris, it can make the axial direction angle change up to 6.77°.

**Key words:** prismatic warhead; eccentric initiation way; fragment velocity; fragment direction angle

**CLC number:** TJ55; TJ410.33

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.011