

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0280

偏心起爆对战斗部装药能量分配增益的影响*

邓 海, 全嘉林, 梁争峰

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为研究不同方式的偏心起爆对炸药装药能量分配及增益的影响, 建立了偏心起爆战斗部的计算模型, 通过局部装填比这一变量, 给出了偏心起爆战斗部破片的初速计算公式。采用数值模拟与试验验证结合的方法, 对六分位条件下不同偏心起爆方式的破片速度增益和能量增益进行了对比, 得出以中心起爆为基准, 分别以邻位双线、连位三线、间位双线、偏心单线方式起爆, 定向方位内破片的速度增益依次增大; 邻位双线起爆时, 目标方向破片速度增益达 25.47%, 定向区域破片动能占总能量的 24.57%, 能量增益超过 40%。

关键词: 偏心起爆; 能量分配; 能量增益; 起爆方式; 破片速度

中图分类号: O389 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Influence of eccentric initiation on energy distribution gain of a warhead charge

DENG Hai, QUAN Jialin, LIANG Zhengfeng

(Xi'an Institute of Modern Chemistry, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the influence of different ways of eccentric initiation on the energy distribution and the gain of explosive charge, a theoretical model of eccentric initiation warhead is established, and the concept of energy distribution center is introduced. By introducing the variable of local loading ratio, the calculation formula of initial velocity of fragments of eccentric initiation warhead is formulated. In this paper, the velocity gain of fragments and energy gain with different initiation modes under the sextile condition are compared and analyzed by using numerical simulation and experimental verification. The results show that at the directional orientation, the maximum pressure at the edge of multi-line eccentric initiation is significantly greater than that of eccentric single line initiation and central initiation, and the detonation pressure at the edge of charge increases from 23.5 GPa of central initiation to 36.2 GPa of asymmetrical two lines 60° initiation; The distribution law of fragment velocity in the direction of 0°–30° is similar to the distribution law of maximum pressure at the edge of charge. Taking the central initiation as the benchmark, the relationship of velocity gain with the directional orientation takes the following relation: asymmetrical two lines 60° > asymmetrical three lines 120° > asymmetrical two lines 120° > asymmetrical one line. When asymmetrical two lines 60° initiation, the fragment velocity gain in the target direction is 25.47%. Finally, through the verification of experiments and theoretical calculation, it is concluded that the energy proportion in the directional area of adjacent asymmetrical two lines 60° is the highest, with the energy gain in this area being 47.42%; followed by asymmetrical three lines 120° initiation, with the energy gain being 38.84%; then symmetrical two lines 120° initiation, with the energy gain being 36.98%; and finally asymmetrical one line initiation, with the energy gain in the directional area being 32.72%.

Keywords: eccentric initiation; energy distribution; energy gain; initiation mode; fragment velocity

* 收稿日期: 2021-07-05; 修回日期: 2021-11-11

第一作者: 邓 海(1990—), 男, 博士研究生, hail79590@163.com

通信作者: 梁争峰(1972—), 男, 博士, 研究员, 2042lzf@sohu.com

破片杀伤战斗部是防空反导、对付空中目标弹药的主要毁伤载荷。早期受制导精度、引信技术的制约, 防空反导战斗部多为具有轴对称结构, 并采用中心起爆的大飞散角战斗部。战斗部装药爆轰后, 破片沿径向均匀飞散, 然而目标仅处于杀伤区域内很小的一个锥角范围内, 因而装药能量和破片利用率极低。据统计, 分布于目标方向的破片数仅为总破片数的 $1/12 \sim 1/8$ 。随着制导和引战水平的日益发展, 定向战斗部技术成为各军事大国的研究热点。目前, 研究最为活跃、技术最为成熟的定向战斗部为偏心起爆战斗部。它利用爆炸逻辑网络实现多分位的可控起爆, 在装药中形成定向汇聚爆轰波, 产生马赫波超压载荷, 使破片在定向方向上的速度大大提高, 并使破片集中飞向目标方向, 增大目标飞散方向上的破片密度, 达到高效毁伤目标的目的^[1-2]。

偏心起爆定向战斗部由于易于实现, 研究最为活跃, 目前是防空反导战斗部发展的主方向。Resnyansky 等^[3]采用数值模拟方法研究了偏心多线起爆条件下破片战斗部的破片速度和密度分布, 并进行了实验验证, 发现平面波起爆可使破片战斗部杀伤效率最高。Kennedy^[4]研究发现, 采用偏心起爆方式可使破片战斗部速度增益 1.32 倍, 破片密度增益 1.4 倍。Held^[5]在偏心起爆战斗部中运用 Taylor 公式, 给出了可以应用在双线性偏心起爆模型中, 计算弹体截面内径向破片速度的 Gurney 修正方程。黄静等^[6]比较了 3 种不同夹角的偏心线起爆方式下破片速度增益情况, 发现夹角 45° 的双线起爆方式对破片初速提高最显著, 增益超过 30%。王树山等^[7]通过实验研究了预制杆状破片战斗部侧面四点偏心起爆下破片径向飞散规律, 发现偏心起爆能显著提高定向方向的破片初速及破片数量。

以上研究主要验证了偏心起爆对破片速度及破片密度增益的效果, 对于不同形式的起爆方式对装药能量增益的区别研究较少。本文中, 以典型破片杀伤战斗部结构为研究对象, 建立偏心起爆定向战斗部的数值模型, 对不同六分位偏心起爆方式下战斗部爆轰驱动破片的过程开展数值模拟, 分析预制破片的速度增益, 以及偏心起爆条件下主装药对不同角度范围内的能量增益和分配规律, 并设计战斗部样弹进行试验验证, 以期对战斗部的优化设计提供参考。

1 偏心起爆的能量增益

偏心起爆由于起爆过程存在爆轰波的相互作用, 在局部区域产生了马赫波超压, 提高了原有装药在定向区域的能量分配比例及利用率, 从而使得定向区域破片速度产生增益。当偏心的多个起爆点同时起爆后, 从起爆点同时发出多个球面爆轰波, 并以相同的爆速向炸药内传播, 当多个爆轰波阵面相遇时, 将发生爆轰波的碰撞、叠加, 在碰撞面附近产生相对于 CJ 爆轰很强的局部超压。这种局部超压随着爆轰波碰撞过程的继续将会持续维持, 在碰撞点附近出现一个非均匀的过渡区, 从而造成碰撞点附近物质的堆积, 迫使反射冲击波上移, 与入射爆轰波交于距离起爆点对称平面的一定距离处, 形成马赫爆轰波, 构成非正规斜反射^[8-9]。图 1 为间位 60° 的两点偏心起爆后爆轰波相互作用的示意图, O_1 和 O_2 为位于装药端面的 2 个起爆点。

当装药在 O_1 和 O_2 点同时起爆后, 分别以 O_1 、 O_2 为中心发出 2 个散心球面爆轰波, 各自独立地向炸药内传播。当这 2 个爆轰波波阵面传至两起爆点对称平面 A_1A_2 时, 将发生这 2 个爆轰波的对心正碰撞, 碰撞后分别向两侧爆轰产物中传入冲击波, 并在碰撞点附近形成一个非均匀的过渡区, 造成碰撞点附近物质的堆积, 构成非正规斜反射, 形成马赫爆轰波, 从而在碰撞点附近产生相对于 CJ 爆轰的很强的局部超压, 如图 1 所示, i 为入射爆轰波, r 为反射爆轰波, M 为马

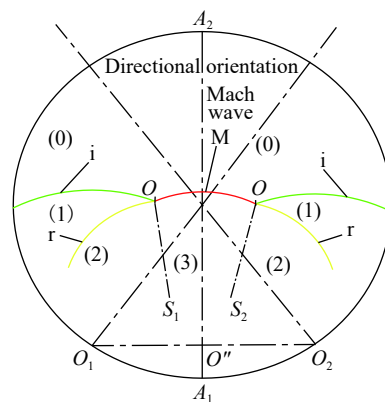


图 1 邻位两点偏心起爆后爆轰波相互作用

Fig. 1 Interaction between two detonation waves produced by two-point eccentric initiation with an interval of 60°

赫爆轰波。区 (0) 为未爆炸药区, 区 (1) 是高压爆轰产物区, 区 (2) 为反射冲击波后区, 区 (3) 为马赫波后区。马赫波传递的区域, 即为定向区域^[10-12]。

2 偏心起爆破片初速计算公式推导

圆柱形装药中心起爆时, 某处破片的速度 v 可通过 Gurney 公式进行计算:

$$v = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{\beta}{1+0.5\beta}} \quad (1)$$

式中: E 为装药比内能, $\sqrt{2E}$ 为 Gurney 常数, β 为装填比。

根据圆柱形装药的对称性可知, 式 (1) 中的装填比 β 与装药中心点围成的扇形装药的质量 m_{c1} 和破片质量 m_f 的比值 β' 相等, 即:

$$\beta = \beta' = m_{c1}/m_f \quad (2)$$

由此, 可以将装药中心点看作战斗部装药的能量分配中心, 该点与破片边缘围成的装药区域为对应的破片提供能量, 可以将该破片处的局部装填比 β' ^[13] 代入 Gurney 公式计算相应的破片速度^[14-15]。

对于偏心起爆, 假定同样存在一个能量分配点 P , 如图 2 所示。假设偏心起爆的目标方位为点 C 所在方向, 由圆柱形装药的对称性可知, 点 P 应位于目标方位所在直径上, 且在另一端的某个位置。假定能量分配点到战斗部中心的距离为 l , $l = ar$, a 为偏心系数。

在圆柱形壳体上取一段破片, 通过几何关系计算点 P 与 \widehat{AB} 所围的装药的质量 m_{c2} , 即可得到这部分破片对应的局部装填比。

在圆周上任取一点 B , 该点的方位角 θ , 即 $\angle BOC = \theta$, 则点 P 与 \widehat{BC} 围成的面积可以表示为 θ 的函数, 即:

$$S(\theta) = S_{\Delta BPO} + S_{\Delta BOC} = \frac{1}{2}ar^2 \sin\theta + \frac{1}{2}r^2\theta \quad (3)$$

在点 B 处取一弧形微元 \widehat{AB} , $\angle AOB = d\theta$, 则 P 点与 \widehat{AB} 围成部分的面积为:

$$S = S(\theta + d\theta) - S(\theta) = \frac{1}{2}ar^2 [\sin(\theta + d\theta) - \sin\theta] + \frac{1}{2}r^2 d\theta \quad (4)$$

局部装填比为:

$$\beta' = \beta \frac{S}{S_{AOB}} = \beta \left(1 + a \frac{\sin(\theta + d\theta) - \sin\theta}{d\theta} \right) \quad (5)$$

$d\theta$ 趋于无穷小, 则方位角 θ 处的局部装填比为:

$$\beta' = \beta \left(1 + a \frac{d\sin\theta}{d\theta} \right) = \beta(1 + a \cos\theta) \quad (6)$$

从式 (6) 可知, 偏心起爆条件下, 某一点的等效装填比与能量分配中心的偏心比 a 、方位角 θ 有关。可以通过数值模拟或试验提取, 反推能量分配点的位置, 只要确定了 a 的值或 a 的函数关系, 就能够确定偏心起爆破片速度随周向方位角的变化规律, 从而为其他战斗部的设计与研发提供参考。

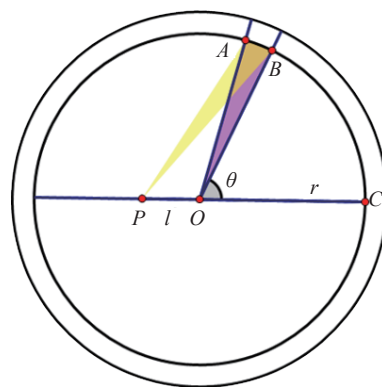


图 2 偏心起爆弹轴中心截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the eccentric detonator shaft center section

3 数值模拟

3.1 计算模型及材料参数

本文中采用 LS-DYNA 有限元软件进行计算, 战斗部模型由主装药、空气域、预制破片、内衬、端盖 5 部分组成, 如图 3 所示。主装药尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$; 破片为单层立方体破片, 破片质量为 3 g, 材料为 93W 合金; 内衬材料为铝, 厚度为 1 mm; 端盖材料为钢, 厚度为 5 mm。

计算过程中采用任意 Lagrange-Euler (arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 算法, 破片与壳体间的接触为自动面对面接触, 破片之间的接触为单面自动接触; 炸药为 HMX 基 PBX 炸药, 该炸药密度为 1818 kg/m^3 , CJ 爆轰压力为 31.86 GPa, 爆轰速度为 8 336 m/s, 对其采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型和 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 状态方程; 破片和内衬采用 Johnson-Cook 本构模型和 Grüneisen 状态方程; 空气采用理想气体状态方程。

JWL 状态方程为:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \bar{V}} \right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \bar{V}} \right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{\omega E}{\bar{V}} \quad (7)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为表征炸药爆轰特征的常数, E 为炸药的初始比内能, \bar{V} 为相对体积比。本文中 $A=748.6 \text{ GPa}$, $B=13.38 \text{ GPa}$, $R_1=4.5$, $R_2=1.2$, $\omega=0.38$, $E=0.09 \text{ GPa}$, $\bar{V} = 1.0$ 。

Johnson-Cook 本构方程为:

$$\sigma = (A + B \bar{\epsilon}_p^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (8)$$

式中: σ 为材料的流动应力, A 为材料的准静态屈服强度, B 为应变硬化系数, $\bar{\epsilon}_p$ 为等效塑性应变, n 为应变硬化指数, C 为与加载应变率相关的强化参数; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}$ 为等效塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, T_r 为参考温度, 通常取常温, T_m 为材料的熔点。具体材料参数见文献 [16-18]。

3.2 起爆方式

选取六分位作为起爆圆截面划分的方式, 研究邻位双线起爆、间位双线起爆、偏心单线起爆、连位三线起爆 4 种偏心起爆方式对装药能量分配的影响, 起爆方式示意图如图 4 所示。破片周向方位角定义为: 目标方向方位角为 0° , 偏心单线起爆线的方位角为 180° , 圆周上任意一点的方位角为该点到目标方向间的圆心角。定义方位角 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 间的区域为定向区。

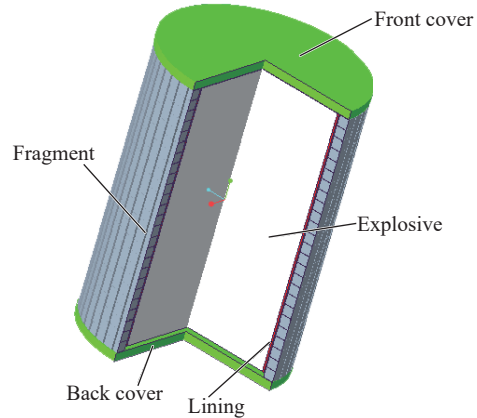


图 3 战斗部模型
Fig. 3 The warhead model

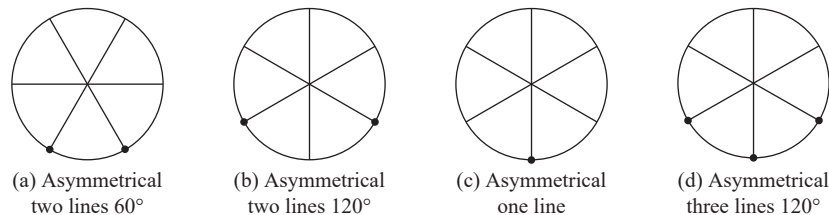


图 4 六分圆起爆方式
Fig. 4 Initiation modes of sextant circle

3.3 结果分析

对不同起爆方式下爆轰波的传播、叠加及破片在爆轰驱动作用下的飞散情况进行了计算, 以中心起爆作为比较基准, 评价了不同起爆方式下破片的速度增益及定向区域的能量增益。计算得到的战斗部装药内部爆轰波传播的压力云图如图 5 所示。

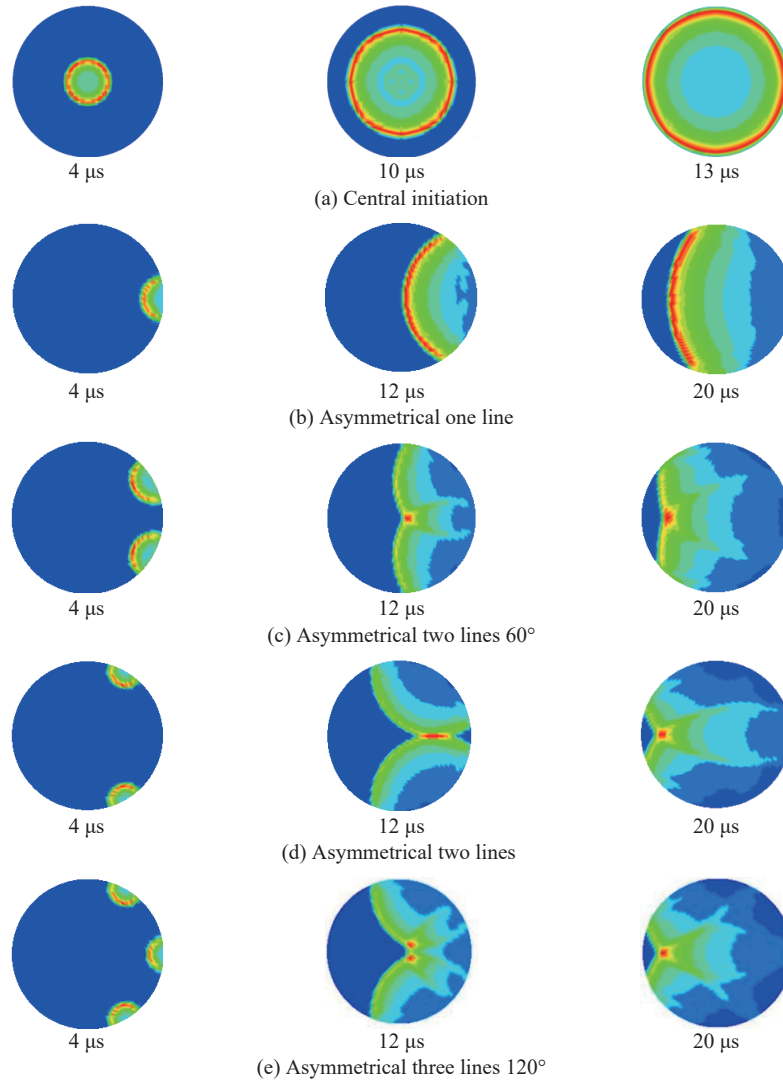


图 5 不同起爆方式下爆轰波的传播过程

Fig. 5 Propagation processes of detonation waves with different initiation modes

从计算结果可以得到, 采用中心起爆时, 经过约 $13 \mu\text{s}$ 爆轰波传播至装药边缘, 整个周向装药边缘处的爆轰压力相等, 压力为 23.5 GPa 。采用 4 种偏心起爆时, 多线起爆在爆轰波传播过程中, 从 $12 \mu\text{s}$ 后就发生爆轰的碰撞和汇聚, 产生局部的高压区域, 大约经过 $20 \mu\text{s}$ 爆轰波传播至目标方位装药边缘, 随后壳体膨胀破裂, 在爆轰波和爆轰产物的作用下驱动破片飞行; 可以看出在整个装药区域, 方位角为 0° 的装药边缘处压力最高, 方位角为 180° 装药边缘处压力最低, 对比 4 种起爆方式装药边缘的最大爆轰压力, 邻位双线起爆方式压力最大, 可达 36.2 GPa , 其次是连位三线起爆, 最高压力为 35.7 GPa , 再次是间位双线起爆, 压力为 34.3 GPa , 最后是偏心单线起爆, 压力最高为 27.1 GPa 。由于采用多线起爆后, 爆轰波装药内部传播过程发生碰撞、汇聚、叠加, 产生了较强的局部超压, 造成多线偏心起爆装药边缘处最大压力明显大于偏心单线起爆。与中心起爆最大压力 23.5 GPa 相比, 偏心起爆爆轰波传播至目标方位装药边缘, 经历了更长的爆轰增长时间, 并存在爆轰波碰撞叠加, 4 种偏心起爆方式均能显著提高目标方位处

的爆轰波压力。装药边缘处爆轰压力的提高, 能够使作用在破片上的动量增加, 从而提高破片的加载速度。装药轴向中心截面处最大压力随方位角的分布曲线如图 6 所示; 不同起爆方式下不同方位角处破片速度变化曲线如图 7 所示。

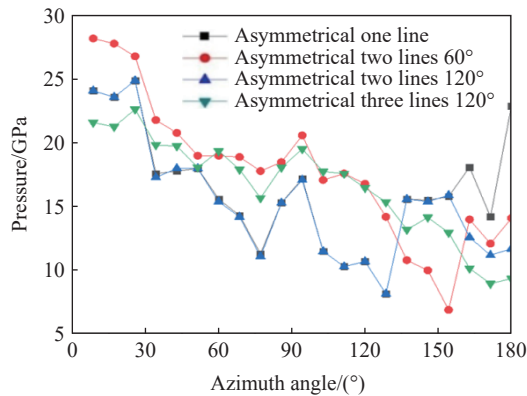


图 6 不同起爆方式下, 爆轰波压力峰值随方位角分布曲线

Fig. 6 Detonation wave pressure peak varying with azimuth angle under different initiation modes

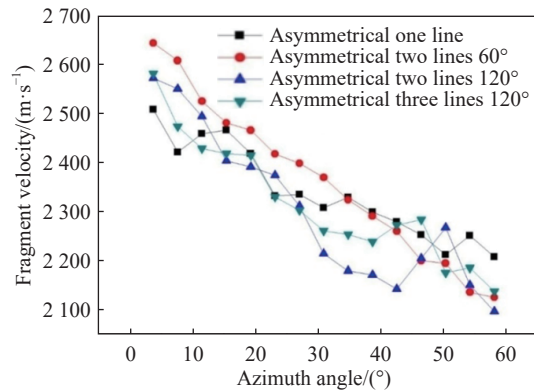


图 7 不同起爆方式下破片速度随方位角的分布

Fig. 7 Fragment velocity varying with azimuth angle under different initiation modes

从图 6 可以看出, 在方位角 0~30° 范围内, 几种偏心起爆方式下压力均明显高于其他方位角处的爆轰波压力, 在-30°~30° 的定向毁伤区域内, 间位双线起爆与连位三线起爆的压力较为接近, 邻位双线起爆爆轰波压力明显大于其他几种起爆方式。

从图 7 可以看出, 随着方位角度的增大, 破片速度值越来越小。方位角较大处的破片距离起爆点位置较近, 起爆后, 爆轰波成长时间较短, 爆轰波未能达到最大能量就接触到了这些破片, 作用于破片的冲量较小, 造成了其速度较低。方位角较小处, 爆轰波经过较长时间的成长, 能量达较大值, 破片加载速率更高。分别采用中心起爆、偏心一线、间位两线、连位三线、邻位双线 5 种方式起爆时, 在 0°~30° 定向区域内破片速度和装药边缘处最高压力都依次增大; 邻位双线定向区域破片速度最大, 这是由于邻位双线的起爆点距离定向区域更远, 能量分配中心也更远离定向区域, 因此破片获得的速度也最高; 而偏心单线与邻位双线相比, 虽然起爆点离定向区更远, 但邻位双线起爆方式下, 两路爆轰波发生碰撞、汇聚、叠加, 产生较强的局部超压, 因此增益相对于偏心单线起爆方式更高。取战斗部中间截面一圈破片进行统计, 定向区域不同方位破片速度统计如表 1 所示。

表 1 定向区不同方位破片速度

Table 1 Fragment velocity in different directions of orientation area

起爆方式	目标方位		方位角 30°		定向区内平均	
	初速/(m·s ⁻¹)	速度增益/%	初速/(m·s ⁻¹)	速度增益/%	初速/(m·s ⁻¹)	速度增益/%
中心起爆	2113.0		2113.0		2113.0	
偏心单线	2487.6	17.72	2267.6	7.32	2397.6	13.47
邻位双线	2651.3	25.47	2389.3	13.08	2568.4	21.55
间位双线	2572.2	21.73	2313.0	9.47	2424.9	14.76
连位三线	2583.3	22.25	2319.5	9.77	2441.3	15.54

从表 1 可以发现, 相对于中心起爆破片速度 2113.0 m/s, 偏心起爆战斗部可以获得显著的破片速度增益。邻位双线起爆, 破片速度最高可达 2651.3 m/s, 目标方向速度增益达 25.47%, 定向区域内破片平均速度增益 21.53%; 连位三线起爆, 破片速度最高可达 2583.3 m/s, 目标方向速度增益达 22.26%, 定向区域内破片平均速度增益 15.52%; 间位双线起爆, 破片速度最高可达 2572.2 m/s, 目标方向破片速度增益达

21.72%, 定向区域内破片平均速度增益 14.71%; 偏心单线起爆, 破片速度最高可达 2487.6 m/s, 目标方向速度增益达 17.71%, 定向区域内破片平均速度增益 13.45%。定向方位的破片速度增益最大, 随着方位角增大破片速度增益迅速下降, 到方位角为 90°附近时, 破片速度近似于中心起爆破片速度相同。

根据不同方位角处的破片速度, 可以计算出战斗部周向破片动能分布情况。假设所有破片质量相等, 且在爆轰加载过程中不发生质量损失, 则方位角 θ 处的破片动能为:

$$e_{\theta} = \frac{1}{2}mv_{\theta}^2 \tag{9}$$

式中: m 为破片质量, v_{θ} 为方位角 θ 处的破片速度。

则 $(0, \theta)$ 方位角区域内整体动能为:

$$E_{\theta} = \int_0^{\theta} e_{\theta} d\theta = \frac{1}{2}m \int_0^{\theta} v_{\theta}^2 d\theta \tag{10}$$

$(0, \theta)$ 方位角区间内的动能分配比为:

$$\frac{E_{\theta}}{E_{\pi}} = \frac{\int_0^{\theta} v_{\theta}^2 d\theta}{\int_0^{\pi} v_{\theta}^2 d\theta} \tag{11}$$

将统计得到的破片速度代入公式 (11), 计算得到不同起爆方式下动能分配比随破片方位角的变化规律, 如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 偏心起爆能量分配比与方位角间的关系曲线成上凸形状, 即方位角较小的部分能量更多, 更为集中, 占比更大, 通过调节能量分配比使得能量向目标方位集中。

选取战斗部中间截面速度最快的一圈破片, 对不同区域破片总动能分布统计如表 2 所示, 不同起爆方式下破片总动能近似相等, 相对中心起爆定向区能量占比为 16.67%, 邻位双线起爆定向区域能量占比最高可达 24.57%, 该区域内能量增益最高达 47.42%; 其次是连位三线起爆, 能量增益 38.84%, 间位双线起爆定向区内能量增益 36.98%; 偏心单线起爆定向区能量增益 32.72%。

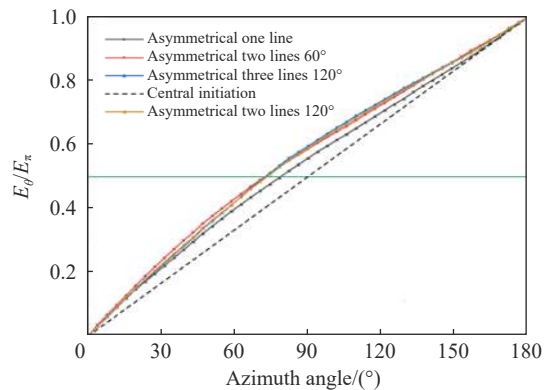


图 8 不同起爆方式下动能分配比随破片方位角的变化
Fig. 8 Kinetic energy distribution ratio varying with azimuth angle under different initiation modes

表 2 不同区域内破片总动能的分布情况

Table 2 Total kinetic energy distribution of fragments in different regions

起爆方式	0~30°区域		30°~90°区域		90°~150°区域		150°~180°区域	
	动能占比/%	动能增益/%	动能占比/%	动能增益/%	动能占比/%	动能增益/%	动能占比/%	动能增益/%
中心起爆	16.67		33.33		33.33		16.67	
偏心单线	22.12	32.72	33.64	0.93	28.06	-15.81	16.17	-2.99
邻位双线	24.57	47.42	34.07	2.22	26.99	-19.02	14.36	-13.85
间位双线	22.83	36.98	36.65	9.96	26.16	-21.51	14.35	-13.92
连位三线	23.14	38.84	35.80	7.41	26.52	-20.43	14.54	-12.78

从以上分析可以看出, 偏心起爆通过改变起爆点的位置, 调整爆轰波的波形与能量分配, 从而改变了破片的杀伤能量在环向均匀分布的现象。装药分配给破片的能量与破片到起爆点之间的距离

有关, 定向区与起爆点间的距离越远, 分配给定向区内破片的等效装药量更多, 获得的能量较高。

根据不同方位角处的破片速度反推出各方位角的局部装填比 β' , 根据公式 (6) 的形式拟合出不同起爆方式局部装填比随方位角的变化关系如表 3 所示, 从而可得到预测偏心起爆战斗部破片速度的经验计算公式。

表 3 局部装填比随方位角的拟合关系式

Table 3 Fitting relationship between local loading ratio and azimuth angle

起爆方式	β'
偏心单线	$\beta(1.015 + 0.451 \cos\theta)$
邻位双线	$\beta(-0.207 + 1.923 \cos\theta)$
间位双线	$\beta(0.009 + 1.511 \cos\theta)$
连位三线	$\beta(1.252 + 0.228 \cos\theta)$

4 偏心起爆周向动能分配试验研究

4.1 试验样弹设计

传统的杀伤战斗部静爆试验由于破片离散分布, 测速靶不能拦截所有破片, 并存在爆炸残渣误触发测速靶等现象, 因此不能测量出所有破片的速度, 无法完整地反映在不同区域内装药的能量分配情况。为验证六分位起爆网络条件下, 不同偏心起爆方式不同区域内的能量增益, 参照六分位起爆圆划分模式, 设计了战斗部试验样弹, 通过预刻槽的方式将壳体由轴向均匀分为 6 个整体。具体结构如图 9 所示, 由壳体、主装药与端盖 3 部分组成, 主装药采用某 HMX 基含铝炸药, 装药尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$; 壳体和端盖的材料为塑性较好的 20 钢, 壳体厚度为 36 mm, 端盖厚度为 5 mm; 保证在爆轰加载过程中不发生碎裂, 试验时忽略爆轰加载过程中因壳体变形等因素导致的能量损失, 每块壳体的动能即可近似为该起爆方式下战斗部装药在该方向区域的输出能量。

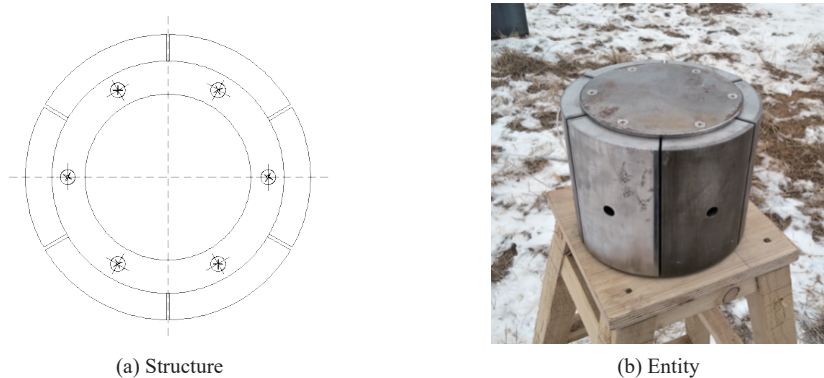


图 9 试验样弹的结构设计

Fig. 9 Structure design of test sample projectile

为了对比不同起爆方式下战斗部装药在不同区域内的能量分配规律和能量增益, 并与计算结果进行对比, 共设计了 5 发样弹试验, 样弹编号及起爆方式如表 4 所示。

表 4 样弹起爆方式

Table 4 Initiation modes of test bombs

样弹	起爆方式	轴向起爆点数
1	连位三线	轴向中心一点
2	间位两线	
3	邻位两线	
4	偏心单线	
5	中心起爆	

4.2 试验布置

靶场布置根据扇形靶试验的原理, 以试验样弹爆心为圆心, 在距离爆心半径 3 m 处, 周向均匀布置 6 块 6 mm 厚的 Q235 钢靶, 靶板高 2 m, 弧长 1.25 m。靶场具体示意图如图 10 所示。以样弹目标方向正对的靶板为靶板 1, 对应方位角 0° 方向。从靶板 1 起, 顺时针每隔 60° 分别布置靶板 2~6。采用断通靶和高速摄影 2 种方法同时对破片速度进行测量。

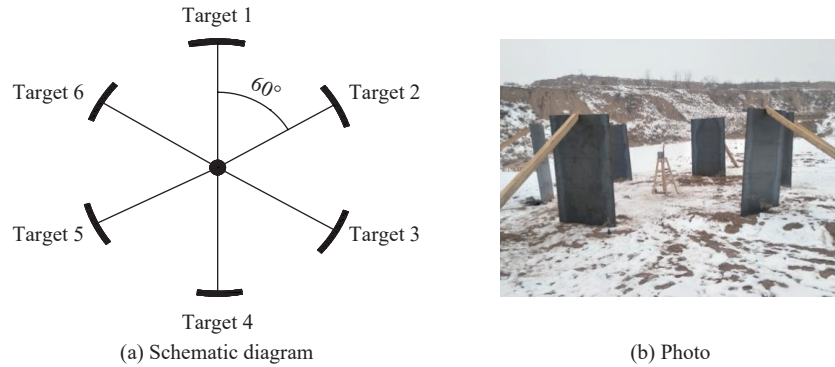


图 10 靶场布局

Fig. 10 Shooting range layout

4.3 实验结果及分析

高速摄影记录得到样弹 1 战斗部起爆、壳体飞散过程如图 11 所示。

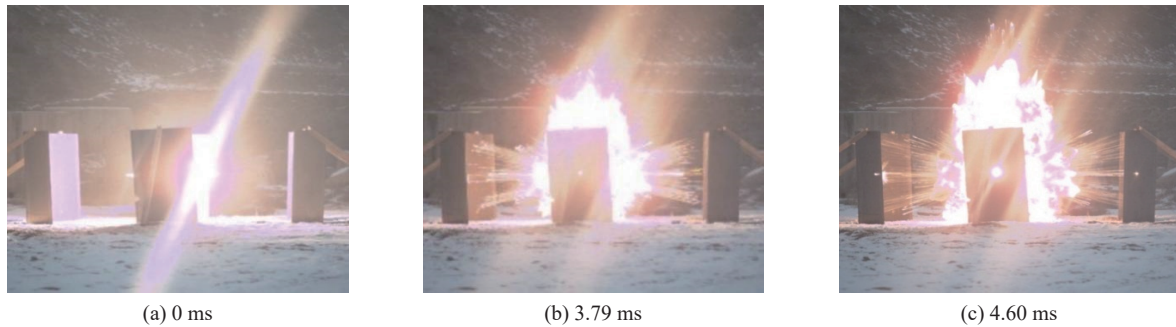


图 11 样弹 1 爆轰过程的高速摄影

Fig. 11 High-speed photography of detonation process of test bomb 1

从高速摄影照片可得: 3.79 ms 时刻, 样弹 1 命中正前方靶板; 4.60 ms 时刻, 样弹 1 命中前侧方靶板。结合梳状靶测速结果, 得到每块靶板对应壳体的速度。战斗部沿起爆侧与目标侧所在的直径轴对称, 因此将靶板 2 和 6、靶板 3 和 5 的数据合并取平均值。对于中心起爆, 取 6 块靶板速度的平均值。

采用拟合得到的局部装填比关系式和偏心起爆初速计算公式对目标方位的样弹壳体速度进行计算, 试验结果与理论计算结果如表 5 所示, 可以得到, 邻为双线起爆定向方位壳体速度最大, 相对于中心起爆, 速度增益为 18.4% (表 5 中没有具体的值), 偏心单线起爆壳体速度最低, 速度增益为 11.9%。目标方向的壳体速度, 理论计算值比试验值大, 最大存在 12% 的偏差。鉴于试验样弹与传统破片战斗部形式存在差异; 靶板 1 对应壳体的方位角为 $-30^\circ \sim 30^\circ$, 计算时采用的方位角为 0° ; 高速摄影采用的拍摄频率为 $10\,000\text{ s}^{-1}$, 存在 0.10 ms 的时间误差, 导致速度存在约 20.0 m/s 的速度误差; 从试验后靶板穿孔情况得出, 壳体存在少量破裂现象, 变形带来了一定能量损失等原因, 对于定向区域破片的速度预估, 偏心起爆初速计算公式有着较高的适配性。

根据各方位壳体速度计算得到不同方向的动能分配, 试验值和数值模拟值统计如表 6 所示。

表 5 不同周向起爆方式下样弹壳体速度分布

Table 5 Velocity distributions of tested bomb shells under different initiation modes

样弹	起爆方式	壳体速度/(m·s ⁻¹)				
		靶板1方向		靶板2、6方向	靶板3、5方向	靶板4方向
		试验	理论计算	试验	试验	试验
1	连位三线	794.6	849.9	708.0	637.5	604.2
2	间位两线	784.3	860.4	687.3	649.4	606.4
3	邻位两线	806.8	909.9	703.4	632.2	602.8
4	偏心单线	763.2	846.0	685.2	654.3	590.3
5	中心起爆	681.5	707.3		681.5	

表 6 不同起爆方式不同方位区域动能分配对比

Table 6 Total kinetic energy distribution in different regions under different initiation modes

样弹	起爆方式	动能占比/%							
		靶板1(-30°~30°)		靶板2(30°~90°)		靶板3(90°~150°)		靶板4(-150°~150°)	
		试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟
1	连位三线	22.45	23.14	17.83	17.90	14.45	13.26	12.98	14.54
2	间位两线	22.20	22.83	17.05	18.33	15.22	13.08	13.27	14.35
3	邻位两线	23.22	24.57	17.65	17.03	14.26	13.49	12.96	14.36
4	偏心单线	21.37	22.12	17.22	16.82	15.70	14.03	12.78	16.17
5	中心起爆	16.67							

从表 6 可以看出, 试验获得的 6 块大破片在对应区域获得的动能分配占比与数值模拟得到的小破片在各区域获得的动能占比吻合很好, 说明以大破片样弹试验去验证不同偏心起爆方式下, 定向区域的动能分配和动能增益规律是可行性的。

相对于中心起爆, 不同方位动能增益试验值和数值模拟结果统计如表 7 所示。从表 7 可以看出: 定向区域动能增益最高的起爆方式为邻位双线起爆, 相对于中心起爆, 动能增益可达 40.2%; 其次是连位三线, 动能增益达 35.9%; 连位三线与间位双线差距不大, 间位双线起爆动能增益为 32.4%; 偏心单线定向区总动能增益相对最低, 动能增益最高可达 25.4%; 在定向区和定向区相邻的区域内动能增益试验结果与模拟结果符合较好, 4 种起爆方式模拟结果与试验结果偏差均在 10% 以内; 起爆侧区域内动能增益相对模拟结果明显偏低。这是由于在数值模型中, 起爆点仅为一个理想点, 对样弹壳体驱动速度无影响, 试验样弹中为了放置起爆点, 需要预先在壳体上穿孔, 起爆后由于起爆点附近的壳体提前被破坏, 爆轰产物气体提前泄露, 导致起爆侧区域内破片速度偏低。

表 7 不同起爆方式下不同方位区域的动能增益

Table 7 Kinetic energy gain in different regions under different initiation modes

样弹	起爆方式	动能增益/%							
		靶板1(-30°~30°)		靶板2(30°~90°)		靶板3(90°~150°)		靶板4(-150°~150°)	
		试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟
1	连位三线	35.9	38.8	7.9	7.4	-12.5	-20.4	-21.4	-12.7
2	间位两线	32.4	36.9	1.7	9.9	-9.2	-21.5	-20.8	-13.9
3	邻位两线	40.2	47.4	6.5	2.2	-13.9	-19.0	-21.7	-13.9
4	偏心单线	25.4	29.1	1.1	1.5	-7.8	-15.1	-24.9	-1.8

4.4 试验合理性的数值模拟验证

为验证试验设计的合理性,建立了偏心起爆能量周向分配试验样弹的数值模型,模型尺寸与试验样弹保持一致,模型壳体采用 Lagrange 网格,装药采用 Euler 网格。壳体材料为 20 钢,采用 *MAT_ELASTIC 模型描述,壳体材料初始密度为 7.8 g/cm^3 ,杨氏模量为 206.7 GPa,泊松比为 0.31,屈服强度为 0.65 GPa。模型装药与样弹装药类型相同,采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型和 JWL 状态方程。

分别数值计算了不同偏心起爆方式下壳体的飞散速度,数值计算得到的各方向的壳体速度与试验测得的壳体速度如表 8 所示,邻位双线起爆条件下壳体的飞散状态如图 12 所示。从图 12 可以看出,邻位双线起爆,传爆过程两路爆轰波碰撞、汇聚,形成了局部高压区,定向区域 1#壳体受到了更高压力的作用,获得了更快的速度,与 3.3 节数值模拟结果的装药边缘压力结果一致。

表 8 壳体速度
Table 8 Shell velocity

起爆方式	壳体速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)							
	靶板1		靶板2、6		靶板3、5		靶板4	
	模拟	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟	试验
连位双线	849.1	794.6	742.6	708.0	703.0	637.5	654.6	604.2
间位三线	859.3	784.3	766.8	687.3	689.8	649.4	652.3	606.4
邻位双线	873.3	806.8	762.0	703.4	683.9	632.2	650.8	602.8
偏心单线	815.0	763.2	728.7	685.2	709.6	654.3	637.6	590.3

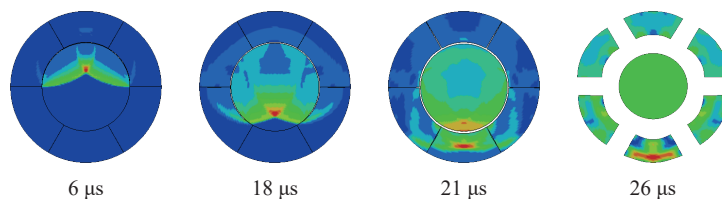


图 12 邻位双线起爆过程的状态

Fig. 12 The states of the initiation process of two wires in adjacent positions

从表 8 可以看出,数值模拟得到的壳体速度偏高,各方向的壳体速度偏差都在 10% 以内,考虑到试验样弹爆轰过程,两端稀疏波效应影响更强,装药一部分能量被浪费,造成试验值偏低。因此,可以认为试验结果与数值模拟结果所揭示的规律吻合较好,试验样弹设计合理,可以相互佐证。

5 结 论

(1) 从中心起爆战斗部破片速度的计算公式中,引出能量分配中心的概念,通过引入局部装填比这一变量,给出了偏心起爆战斗部破片的初速计算公式,结合仿真结果,通过数据拟合,得到了能够体现不同周向偏心起爆方式的破片速度计算公式,通过试验验证,偏心起爆初速公式能较好的预测不同偏心起爆方式目标方位的破片速度。

(2) 相同弹结构下,不同偏心起爆方式之间,邻位双线、连位三线、间位双线、偏心单线、中心起爆定向区域破片速度依次降低。相对于中心起爆,邻位双线起爆破片速度增益 25.47%;连位三线起爆速度增益达 22.25%;间位双线起爆速度增益 21.73%;偏心单线起爆目标方向速度增益达 17.72%。定向方向上破片速度增益最大,随方位角增大破片速度增益迅速下降,到方位角为 90° 附近时,破片速度近似于中心起爆的破片速度。

(3) 根据破片速度分布,统计了不同起爆方式下破片能量分配随方位角区间的变化规律,不同起爆方式下破片总能量差距不大,偏心起爆改变不同区域内装药能量分配情况,通过试验验证,能量分配特性与模拟结果吻合较好,邻位双线起爆定向区域能量增益最高,能量增益超过40%。

参考文献:

- [1] 王宝成,袁宝慧.防空反导破片杀伤战斗部现状与发展[J].*四川兵工学报*,2013,34(9):20-24. DOI:10.11809/scbgxb2013.09.007.
WANG B C, YUAN B H. Research states and trend of fragment warhead for air-defense and anti-missile [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2013, 34(9): 20-24. DOI: 10.11809/scbgxb2013.09.007.
- [2] 冯顺山,蒋建伟,何顺录,等.偏轴心起爆破片初速径向分布规律研究[J].*兵工学报*,1993(S1):12-16.
FENG S S, JIANG J W, HE S L, et al. Study on radial distribution of initial velocity of off axis bursting disc [J]. *Acta Armamentarii*, 1993(S1): 12-16.
- [3] RESNYANSKY A D, WILDEGGER-GAISSMAIER A E, KATSELIS G. Directional fragmentation warheads: a theoretical and experimental investigation [C]//*Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics*. San Antonio, TX, USA, 1999: 543-550.
- [4] KENNEDY D R. A historical review of aimable air defense warhead technology [C]//*Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics*. San Antonio, TX, USA, 1999: 618-625.
- [5] HELD M. Velocity enhanced warheads [J]. *Journal of Explosives and Propellants*, 2001, 17(2): 1-12.
- [6] 黄静,孔凡勋,袁晋,等.多点偏心起爆对破片速度增益的影响[J].*现代防御技术*,2011,39(6):37-42. DOI:10.3969/j.issn.1009-086x.2011.06.008.
HUANG J, KONG F X, YUAN J, et al. Influence of multi-spots off-axis initiation on fragment velocity gain [J]. *Modern Defence Technology*, 2011, 39(6): 37-42. DOI: 10.3969/j.issn.1009-086x.2011.06.008.
- [7] 王树山,马晓飞,隋树元,等.偏心多点起爆战斗部破片飞散实验研究[J].*北京理工大学学报*,2001,21(2):177-179. DOI:10.3969/j.issn.1001-0645.2001.02.008.
WANG S S, MA X F, SUI S Y, et al. Experimental research on fragments dispersion of the warhead under asymmetrical multi-spots initiation [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2001, 21(2): 177-179. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0645.2001.02.008.
- [8] 刘琛,李元,李燕华.偏心起爆方式对棱柱形定向战斗部破片飞散规律的影响[J].*含能材料*,2017,25(1):63-68. DOI:10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.011.
LIU C, LI Y, LI Y H. Influence of eccentric initiation ways on fragment dispersion rule of prismatic aimable warhead [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2017, 25(1): 63-68. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.011.
- [9] LI Y, LI Y H, LIU C, et al. The initiation parameter of detonation wave aiming warhead [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(9): 915-921. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.09.017.
- [10] 卢芳云,李翔宇,林玉亮.战斗部结构与原理[M].北京:科学出版社,2009:112-129.
- [11] 王马法,卢芳云,李翔宇.爆轰波斜冲击作用下破片飞散特性研究[J].*国防科技大学学报*,2013,35(1):60-64. DOI:10.3969/j.issn.1001-2486.2013.01.012.
WANG M F, LU F Y, LI X Y. Research on the projection characteristics of fragments under the loading of the oblique shock wave [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2013, 35(1): 60-64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2486.2013.01.012.
- [12] 王力,韩峰,陈放,等.偏心对称起爆战斗部破片初速的增益[J].*爆炸与冲击*,2016,36(1):69-74. DOI:10.11883/1001-1455(2016)01-0069-06.
WANG L, HAN F, CHEN F, et al. Fragments' velocity of eccentric warhead with double symmetric detonators [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(1): 69-74. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)01-0069-06.
- [13] 李元.偏心起爆定向战斗部若干理论与技术研究[D].北京:北京理工大学,2016.
LI Y. Study on theories and technologies of asymmetrically initiated warhead [D]. Beijing, China: Beijing Institute of

- Technology, 2016.
- [14] 沈慧铭. 多点起爆方式作用机理及其在战斗部中的应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
SHEN H M. Research on action mechanism of multi-point initiation way and its application in warhead [D]. Nanjing, Jiangsu, China: Nanjing University of Science and Technology, 2018.
- [15] 李翔宇, 李振铎, 梁民族. D 型战斗部破片飞散性及威力场快速计算 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(4): 043301. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0420.
LI X Y, LI Z D, LIANG M Z. Dispersion properties and rapid calculation of fragment force field of D-shaped fragmentation warhead [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(4): 043301. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0420.
- [16] 彭军, 袁宝慧, 孙兴昀, 等. 立方钨破片穿甲效应的数值模拟与试验 [J]. *爆破器材*, 2017, 46(5): 23–28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2017.05.005.
PENG J, YUN B H, SUN X Y, et al. Numerical simulation and experiment for penetrating performance of cubic tungsten fragment [J]. *Explosive Materials*, 2017, 46(5): 23–28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2017.05.005.
- [17] 李刚, 刘荣忠, 郭锐. 爆炸成抛物面型弹丸战斗部的仿真研究 [J]. *计算机仿真*, 2011, 28(11): 1–4; 18. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2011.11.001.
LI G, LIU R Z, GUO R. Simulation on parabolic liner forming process [J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(11): 1–4; 18. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2011.11.001.
- [18] 周翔. 爆炸成型弹丸战斗部的相关技术研究 [D]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2006.
ZHOU X. Technological researches on explosive formed projectiles [D]. Nanjing, Jiangsu, China: Engineering Institute of Engineering Institute of Engineer Corps of PLA University of Science and Technology, 2006.

(责任编辑 张凌云)