

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0317

多点起爆下鼓形战斗部的威力特性*

李豪凯¹, 冯昱祥¹, 李元^{1,2}, 索涛^{1,2}

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西 西安 710072;

2. 西北工业大学极端力学研究院, 陕西 西安 710072)

摘要: 为调控对地弹药破片杀伤威力场, 研究了一种鼓形战斗部在静爆和动爆下的威力特性。采用数值模拟研究了端面中心单点、中心单点两种起爆方式下, 鼓形战斗部相较于同口径圆柱形战斗部在静爆下的破片威力特性及动爆下对地面装甲车辆目标的毁伤面积。在此基础上, 调整鼓形战斗部起爆方式为偏心两线同时起爆、偏心两线序贯起爆及偏心两线同时-序贯起爆, 计算了不同偏心起爆下鼓形战斗部静爆时的破片速度、飞散角和动爆时对车辆目标的毁伤面积及有效破片落地动能分布。研究表明, 相比于同口径的圆柱形战斗部结构, 鼓形战斗部的破片飞散角增大了55.98%, 对地面军用车辆的毁伤面积最大增大了59.3%; 相对于偏心两线同时起爆, 偏心两线同时-序贯起爆的鼓形战斗部破片飞散角增大了18.0%, 破片飞散的离散程度提高了11.48%; 相对于装药中心单点起爆, 偏心两线序贯起爆下鼓形战斗部的毁伤面积受炸高影响较小, 在落角50°、落速200 m/s、炸高为9 m时的毁伤面积达47.15 m²。通过调整战斗部的结构和起爆方式, 可有效增大破片的飞散角, 增大破片对目标的覆盖面积, 提高战斗部的毁伤效能。

关键词: 破片; 多点起爆; 毁伤面积; 鼓形战斗部; 威力特性

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Power characteristics of drum-shaped warheads under multi-point detonations

LI Haokai¹, FENG Yuxiang¹, LI Yuan^{1,2}, SUO Tao^{1,2}

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Institute of Extreme Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: To adjust the fragment lethality field of the anti-ground ammunition, the paper studies the power characteristics of a drum-shaped warhead under static and dynamic detonation. Aiming at the ground armored vehicles, the damage efficiency of the drum-shaped warhead under different initiation modes is analyzed. The fragment power characteristics of a drum-shaped warhead under static detonation and the damage area to vehicle target under dynamic detonation are studied by numerical simulation under two initiation modes of end face center single point and center single point compared with cylindrical warhead of the same caliber. On this basis, further by adjusting the drum-shaped warhead initiation mode into three kinds of eccentric two-line synchronous initiation, eccentric two-line sequential initiation and eccentric two-line synchronous-sequential initiation. The fragment velocity and dispersion angle of the drum-shaped warhead during static detonation, the damage area to the vehicle target and the distribution of the effective fragment landing kinetic energy during dynamic detonation are calculated under different eccentric initiation. The effect of adjusting the detonating mode on the destruction power field of the fragment of the drum-shaped warhead is analyzed by comparing the power characteristics of the fragment of the drum-shaped warhead during the static detonation and the damage results of the vehicle target during dynamic detonation with the corresponding results under the end face center single-point initiation of the drum-shaped warhead. The results show that compared with the

* 收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2024-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(12002178, 12141203)

第一作者: 李豪凯(1997—), 男, 博士研究生, lihaokai@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 李元(1987—), 男, 博士, 副教授, panshi-boshi@163.com

cylindrical warhead structure with the same caliber, the fragment dispersion angle of the drum-shaped warhead is increased by 55.98%, and the damaged area of the ground military vehicles is increased by the maximum 59.3%. Compared with the eccentric two-line synchronous initiation, the drum-shaped warhead with eccentric two lines synchronous-sequential initiation can increase the fragment dispersion angle by 18.0%, and increase the dispersion of fragments by 11.48%. Compared with the single-point initiation of charge center, the damage area of the drum-shaped warhead under eccentric two-line sequential initiation is less affected by the burst height, and the damage area reaches 47.15 m^2 when the falling angle is 50° , the falling velocity is 200 m/s and the burst height is 9 m . By adjusting the structure and the initiation mode of the warhead, the dispersion angle of fragments can be effectively increased, the coverage area of fragments to the target can be increased, and the damage efficiency of the warhead can be improved.

Keywords: fragment; multi-point initiation; damage area; drum-shaped warhead; power characteristics

破片战斗部是现役装备中最主要的战斗部形式之一,用于对付空中、地面活动的低生存力目标以及有生力量,具有较好的杀伤效果^[1]。刘彦等^[2]研究发现,破片战斗部对地面目标的毁伤效果受弹药弹道末端的姿态影响较大。弹体弹道末端姿态和落地速度会使破片的飞散角发生很大变化^[3],使得预定杀伤目标未被破片威力范围所覆盖。由于侧风等因素的影响,弹体弹道末端落地姿态实难控制^[1],迫切需要通过其它方法来调整破片的飞散范围^[4]。近年来,人们开展了大量不同战斗部结构和不同起爆方式的战斗部毁伤威力研究,其中龚柏林等^[5]、Wang 等^[6]、李振铎等^[7]、李翔宇等^[8]、Guo 等^[9-10]采用试验和数值模拟方法研究了 D 形战斗部结构的破片威力特性,获得了 D 形结构战斗部的破片威力场分布规律。冯顺山等^[11]、袁书强等^[12]给出聚焦战斗部的设计方法,严翰新等^[13]、王娟娟等^[14]获得了不同起爆方式下聚焦战斗部的威力特性。李元等^[15]模拟了一种平面和凸面交错布置的异面棱柱战斗部结构,研究了不同起爆方式下异面棱柱战斗部的威力特性。张浩宇等^[3,16]、刘琛等^[17]针对偏心起爆圆柱形杀爆战斗部进行了试验和数值模拟研究,获得偏心起爆下杀爆战斗部破片威力分布规律。综上所述,目前研究虽已针对不同战斗部结构进行了系列研究,但所研究战斗部结构留给破片轴向飞散的可调控范围有限。考虑到鼓形战斗部外表面为圆弧,具有飞散角较大的优点,有必要研究其配合不同起爆方式下的战斗部威力调控特性,以期获得一种在弹体落地姿态影响较大时维持对地弹药威力的有效方法。

为此,本文中以地面车辆为目标,基于毁伤概率法对比传统圆柱形战斗部和鼓形战斗部的威力特性,研究典型战斗部落地姿态下,起爆方式对鼓形战斗部毁伤面积的影响,得到鼓形战斗部的破片威力场分布规律,通过毁伤面积反向优化战斗部结构及起爆方式,以期提高破片战斗部的威力,为战斗部结构和起爆系统的设计提供参考。

1 鼓形战斗部的有限元模型

1.1 鼓形战斗部的结构

图 1 为鼓形战斗部结构示意图,对比传统圆柱形战斗部,鼓形战斗部在高度方向存在曲率半径为 r 的弧线,鼓形战斗部在两侧部分由于圆弧半径减小,导致两侧的破片排列个数相对于同口径 d_1 的圆柱形战斗部破片排列个数减少。

本文中鼓形战斗部的装药高度为 275 mm ,装药中间最大直径 d_1 为 157.8 mm ,装药两端直径 d_2 为 131.0 mm ,高度方向的圆弧曲率半径 r 为 711 mm ,内衬筒厚度为 2 mm ,破片直径为 6 mm ,上下端盖厚度为 10 mm 。

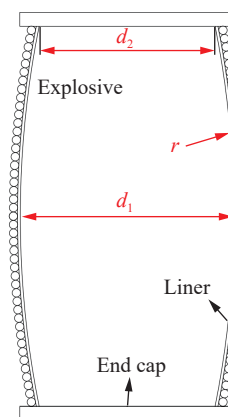


图 1 鼓形战斗部结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of drum-shaped warheads

1.2 鼓形战斗部的有限元模型

利用 TrueGrid 建立鼓形战斗部的有限元模型, 如图 2 所示。模型由空气、炸药、衬筒、上下端盖以及破片组成, 其中空气和炸药采用 Euler 算法, 衬筒、上下端盖及破片采用 Lagrange 算法, 衬筒和上下端盖之间采用固连接触, 衬筒和破片之间采用面面侵蚀接触, 破片之间采用自动单面接触, 炸药和破片之间定义流固耦合, 破片之间交错排布, 采用全尺寸模型进行计算。炸药使用为 COMP B, 内衬筒和上下端盖材料使用 LY-12 硬铝, 破片使用 93W。Li 等^[18]通过试验验证了偏心起爆下定向战斗部有限元模型的正确性, 本文的相关材料模型及参数与文献 [18] 中的相同。

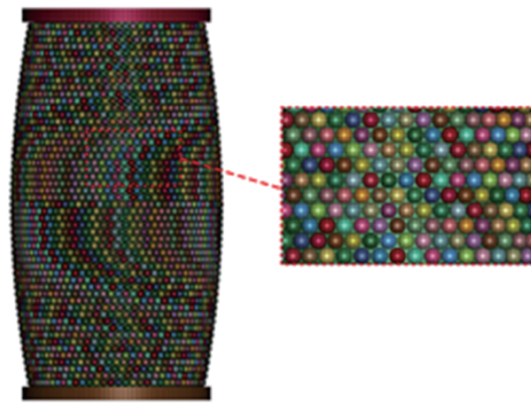


图 2 鼓形战斗部的有限元模型

Fig. 2 A finite element model for drum-shaped warheads

2 单点起爆的威力特性

为明晰鼓形战斗部破片威力特性及相对于传统圆柱形战斗部的优势所在, 开展了中心起爆下战斗部的破片威力参数分析和动爆条件下对目标的毁伤面积研究。

2.1 战斗部静爆的威力参数

为对比鼓形战斗部的威力特性, 根据鼓形战斗部的材料参数分别建立装药直径 d_1 和 d_2 的圆柱形战斗部, 将 3 种战斗部编号为 I、II、III, 起爆方式均为上端端面中心单点起爆, 增设工况 IV 为装药中心单点起爆的鼓形战斗部, 如图 3 所示, 图中黄色代表起爆点。经统计, 战斗部 I、II、III 的破片排列个数分别为 4 524、3796 和 4 347 枚, 鼓形战斗部比同口径圆柱形战斗部 I 的破片个数减少了 177 枚, 破片总质量减少 350.53 g, 装药质量减少 649.36 g, 详见表 1。

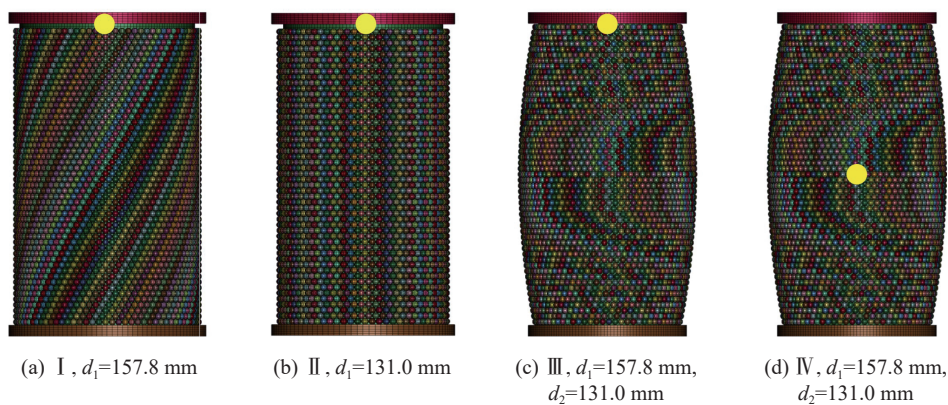


图 3 战斗部结构

Fig. 3 Warhead structures

表 1 战斗部装药及球形破片质量

Table 1 The mass of warhead charges and spherical fragments

| 战斗部 | 战斗部形状 | 装药质量/g | 球形破片质量/g | 战斗部 | 战斗部形状 | 装药质量/g | 球形破片质量/g |
|-----|-------|----------|----------|-----|-------|--------|----------|
| I | 圆柱形 | 9 234.36 | 8 954.24 | III | 鼓形 | 8 585 | 8 608.72 |
| II | 圆柱形 | 6 364.08 | 7 517.53 | IV | 鼓形 | 8 585 | 8 608.72 |

利用 LS-DYNA 有限元软件得到 200 μs 时刻的威力参数, 对 4 种战斗部的破片初始威力参数进行统计。如图 4 所示给出了沿弹体轴向的速度分布和破片飞散角。图中破片相对位置原点位于装药上端面, 而飞散角定义为每枚破片飞散方向与弹体赤道平面的夹角, 且向上为正。可以看出, 战斗部 I、II、III 的破片速度分布基本一致, 圆柱形战斗部 I 具有较高的装填比, 破片速度略高于另外 3 种战斗部。战斗部 IV 靠近上端部的破片速度大于其他 3 种战斗部, 远离原点一端的破片速度小于其余 3 种战斗部, 破片速度关于赤道平面对称; 战斗部 IV 大于 0° 的飞散角比其他 3 种战斗部大, 小于 0° 的飞散角与战斗部 III 几乎一致。圆柱形战斗部的破片飞散角分布基本一致, 鼓形战斗部的破片飞散角明显大于圆柱形战斗部的。

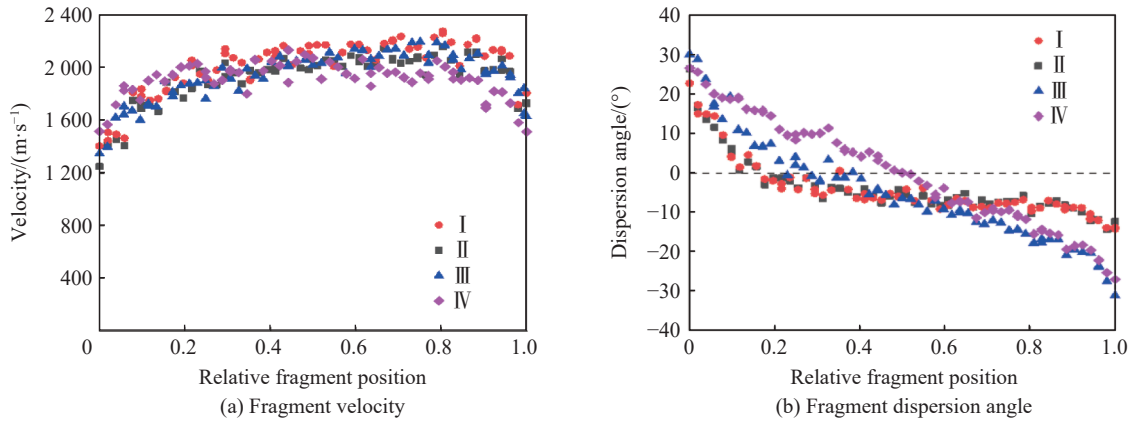


图 4 单点起爆下战斗部破片威力参数

Fig. 4 Fragment power parameters of warheads under a single-point detonation

统计周向夹角为 60° 范围内的破片飞散角参数, 统计方法为:

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_a = \sum_{i=1}^n \frac{|\delta_i|}{n} \\ \bar{\sigma}_b = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{n} \\ s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\sigma}_b)^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ_i 为每一枚破片的飞散角, n 为统计范围内的破片个数, $\bar{\sigma}_a$ 为破片飞散角的绝对值均值, 代表飞散角总体分布的大小, $\bar{\sigma}_b$ 和 s^2 为破片飞散角的均值和标准差, s 反映了破片飞散角的离散程度。破片飞散角统计结果如表 2 所示, 可以看出, 鼓形战斗部的破片飞散角明显大于圆柱形战斗部的, 端面中心起爆下, 鼓形战斗部 III 比同口径圆柱形战斗部 I 的破片飞散角增大 55.98%, 破片飞散角的离散程度提高 76.21%。

表 2 战斗部单点起爆破片飞散角的统计参数

Table 2 Statistical parameters of the fragment dispersion angles for single-point detonation of warheads

| 战斗部 | $\bar{\sigma}_a/(\circ)$ | $s/(\circ)$ | 战斗部 | $\bar{\sigma}_a/(\circ)$ | $s/(\circ)$ |
|-----|--------------------------|-------------|-----|--------------------------|-------------|
| I | 7.77 | 7.86 | III | 12.12 | 13.85 |
| II | 7.63 | 7.96 | IV | 12.44 | 14.49 |

2.2 战斗部动爆的毁伤面积

对比 4 种战斗部的毁伤面积, 编写外弹道程序计算出战斗部在一定姿态下的破片落点, 跟踪每个破片的初始位置和落点位置, 绘制出破片的打击轨迹线图, 图中左上角为战斗部位置, 每条彩色线代表有效破片(落地动能大于 2158 J^[16])的运动轨迹, 即破片打击线。图 5 为落角 50°(战斗部落速与目标地面的

夹角)、落速 200 m/s、炸高 5 m 的有效破片打击线。可以看出, 相比于圆柱形战斗部, 鼓形战斗部的有效破片打击线更分散, 覆盖面积更大。

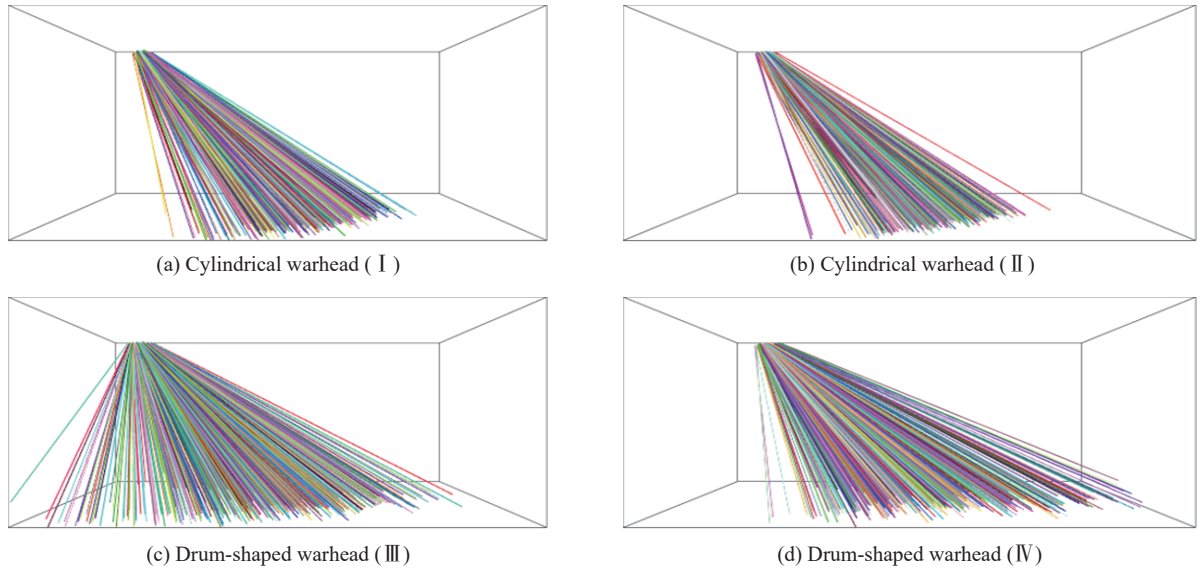


图 5 不同战斗部有效破片的打击线

Fig. 5 Strike lines of effective fragments from different warheads

假设地面军用车辆为目标对象, 刘彦等^[2]给出了破片对地面车辆目标的毁伤概率:

$$P(x,y) = \begin{cases} 1 & \rho(x,y) \geq \rho_2 \\ \frac{\rho(x,y) - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1} & \rho_1 < \rho(x,y) < \rho_2 \\ 0 & \rho(x,y) \leq \rho_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ_1 为目标不被破坏的最大破片密度, ρ_2 为目标被完全破坏时的最小破片密度。对于车辆目标, 破片密度可取 $\rho_1 = 1 \text{ m}^{-2}$, $\rho_2 = 5 \text{ m}^{-2}$ 。除了满足破片密度准则, 还需要满足破片的动能准则 ($> 2158 \text{ J}$), 即式 (2) 中的破片密度指的是有效破片密度。

目标毁伤面积计算方法见文献 [16], 将目标划分为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的网格区域, 目标在 (x_i, y_j) 处被破片杀伤的概率为 $P(x_i, y_j)$, 杀伤面积 S_{ij} 等于杀伤概率在该网格区域的积分, 总的有效毁伤面积 S 为每个网格杀伤面积的总和:

$$S_{ij} = \iint P(x_i, y_j) dx dy, \quad S = \sum_{i,j} S_{ij} \quad (3)$$

式中: i, j 为网格索引。

图 6(a)~(f) 分别为落角 α_f 为 40° 和落速 v_f 为 200 m/s、落角为 40° 和落速为 100 m/s、落角为 50° 和落速为 200 m/s、落角为 50° 和落速为 100 m/s、落角为 60° 和落速为 200 m/s、落角为 60° 和落速为 100 m/s 时, 不同炸高下战斗部的毁伤面积。可以看出, 在落角为 40° 和 50° 时, 随着炸高的增大, 战斗部的毁伤面积都先增大后减小; 在落角为 60° 时, 战斗部的毁伤面积在炸高 1 m 时最大, 随着炸高的增大, 战斗部的毁伤面积逐渐减小。相同落速下, 随落角的增大, 4 种战斗部的毁伤面积最大值增大。相同落角下, 落速的提高, 使得 4 种战斗部的最大毁伤面积均有所增大, 且在炸高较大时仍保有较大的毁伤面积。

对比 4 种战斗部在不同落地姿态下的毁伤面积, 圆柱形战斗部 I 的装药直径高于圆柱形战斗部 II, 导致圆柱形战斗部 I 的毁伤面积大于圆柱形战斗部 II; 尽管鼓形战斗部的破片排列个数少于圆柱形战斗部, 由于鼓形战斗部的飞散角较大, 因此鼓形战斗部 III 和 IV 的最大毁伤面积大于同口径圆柱形战斗部 I 的。经统计, 在落角为 40° 、落速为 200 m/s 时, 鼓形战斗部 IV 的最大毁伤面积比圆柱形战斗部 I 增大 55.7%;

在落角为 50° 、落速为 200 m/s 时, 鼓形战斗部 IV 的最大毁伤面积比圆柱形战斗部 I 增大 59.3% ; 在落角为 60° 、落速为 200 m/s 时, 鼓形战斗部 IV 的最大毁伤面积比圆柱形战斗部 I 增大 54.5% , 说明鼓形战斗部由于飞散角分布的优势, 可以在减少破片个数的情况下大大增大战斗部的毁伤面积, 鼓形战斗部结构优于传统圆柱形战斗部。

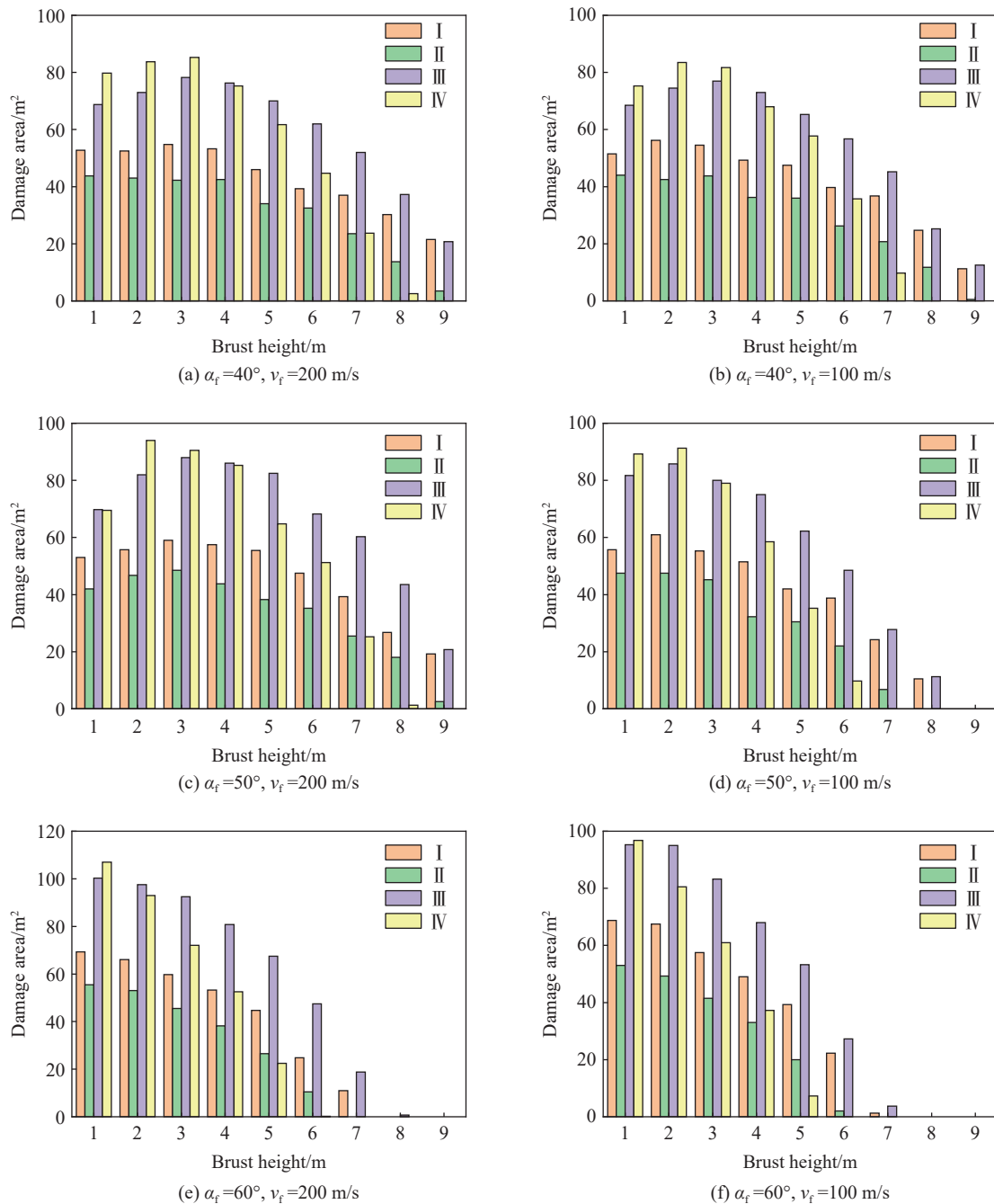


图 6 单点起爆和不同炸高下的毁伤面积

Fig. 6 Damage areas under a single-point detonation and different burst heights

3 偏心起爆的威力特性

以上分析表明, 在装药量和破片个数减少的情况下, 鼓形战斗部结构的毁伤面积仍然大于传统圆柱

形战斗部。下面进一步结合偏心多点起爆, 探索多点同步起爆和时序起爆对鼓形战斗部毁伤威力场和对目标毁伤面积的调控特性。

3.1 战斗部静爆的威力参数

为进一步探索鼓形战斗部的威力特性, 对其采用偏心两线起爆(两条线上各均布 4 个起爆点, 分别为 i_{s1} 、 i_{s2} 、 i_{s3} 、 i_{s4} 和 i_{r1} 、 i_{r2} 、 i_{r3} 、 i_{r4}), 分别设置偏心两线同时起爆、偏心两线序贯起爆, 起爆点布置见图 7, 设置装药中心单点起爆作为对照。偏心两线起爆的起爆线夹角 β 均为 60° , 序贯起爆的延时时间为 $2t/4$, 其中 $t=L/D$, L 为相邻起爆点间距, D 为炸药爆速, 偏心两线序贯起爆的起爆点自上而下序贯起爆。

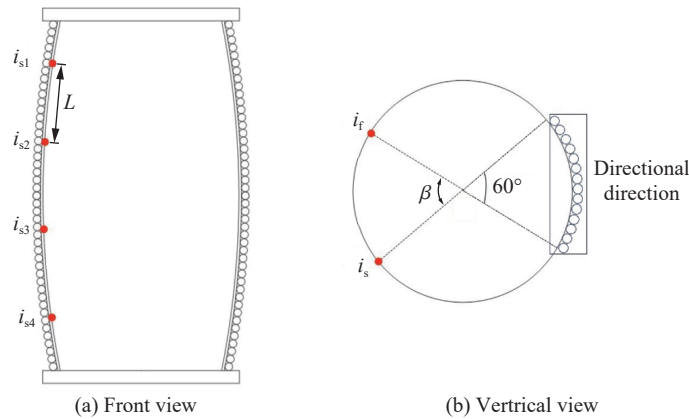


图 7 偏心两线起爆位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of eccentric two-line initiation

根据鼓形战斗部的结构特性, 提出偏心两线同时-序贯起爆, 该起爆方式为起爆点 i_{s2} 、 i_{s3} 同时起爆, 起爆点 i_{s1} 、 i_{s4} 经过 $2t/4$ 后起爆, 起爆示意图如图 8 所示。起爆点 i_{s2} 和 i_{s3} 为对称起爆, 形成的马赫波沿着对称轴线直线传播, 起爆点 i_{s1} 和 i_{s4} 为非对称起爆, 形成的马赫波沿着延时起爆的方向曲线传播, 可进一步提高靠近端面处破片的速度, 增大破片飞散角。

分别将偏心两线同时起爆、偏心两线序贯起爆及偏心两线同时-序贯起爆战斗部编号为 V、VI、VII, 计算不同起爆方式下鼓形战斗部的威力参数。图 9 为 $200 \mu s$ 时不同起爆方式下的速度云图, 可以看出: 中心起爆下, 破片速度沿周向分布较均匀; 偏心起爆下, 在定向方向位置处破片速度较高; 偏心两线序贯起爆下, 由于爆轰波的时序作用, 在定向方向靠近下端位置的破片速度较高。

图 10 为不同起爆方式下定向方向 60° 范围内(见图 7(b))的破片威力参数, 装药中心单点起爆、偏心两线同时起爆及偏心两线同时-序贯起爆时, 破片速度和飞散角呈对称分布。相对于中心单点起爆, 偏心两线同时起爆、偏心两线序贯起爆、偏心两线同时-序贯起爆下, 在定向方向夹角 60° 内的破片平均速度增益分别为 9.96%、12.03% 和 9.17%。

表 3 为破片飞散角的统计参数。由表 3 可知, 相比于装药中心单点起爆, 偏心起爆下, 破片飞散角均有所减小。偏心两线同时-序贯起爆下, 由于两端起爆点形成的马赫波沿着两侧移动, 破片飞散角的绝对值均值和标准差均高于偏心两线同时起爆下的情况。相对于偏心两线同时起爆, 偏心两线同时-序贯

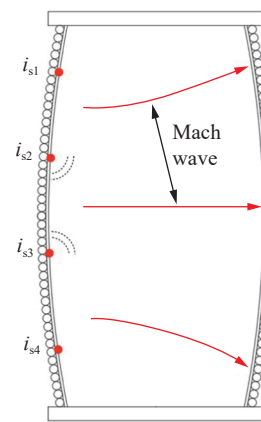


图 8 偏心两线同时-序贯起爆示意图

Fig. 8 Schematic diagram of eccentric two-line synchronous-sequential initiation

起爆下, 破片飞散角可增大 18.0%, 破片飞散角的离散程度提高 11.48%。这表明, 调整起爆方式可改善破片飞散角的分布, 进而改善鼓形战斗部的破片飞散角。

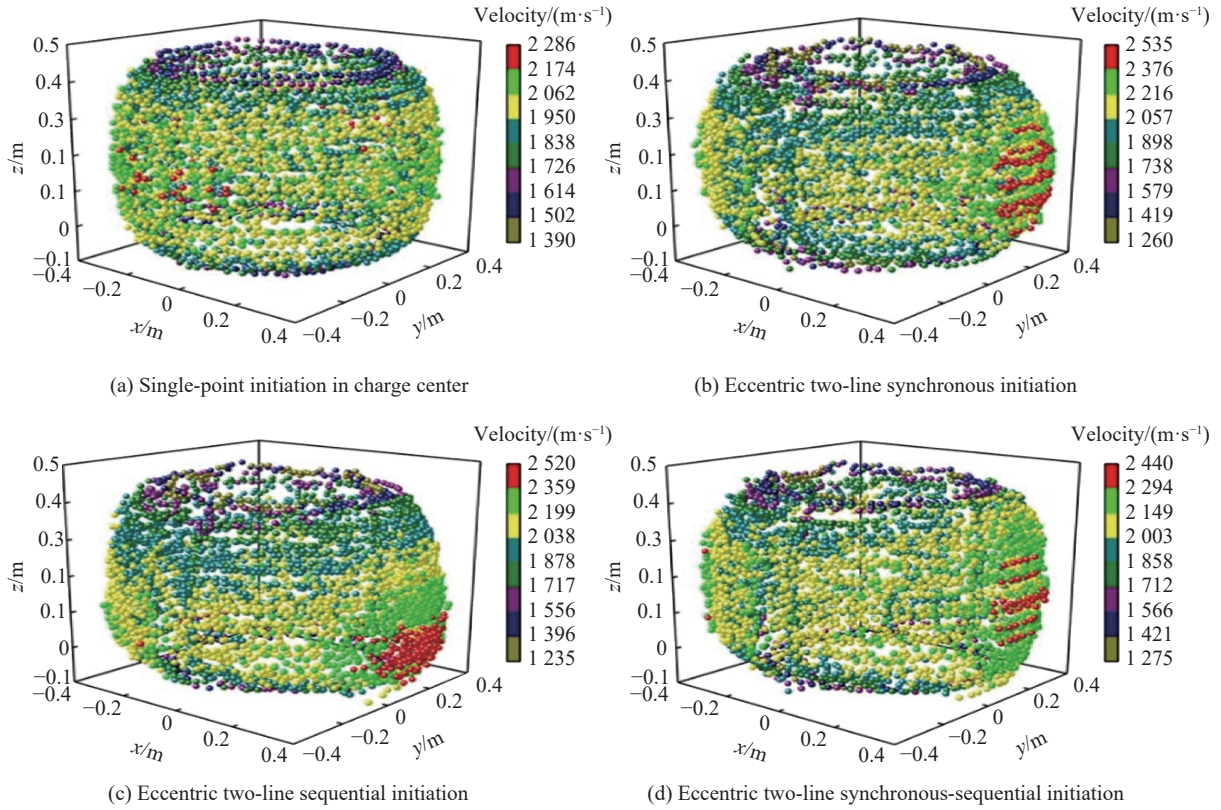


图 9 破片速度云图

Fig. 9 Cloud charts of fragment velocity

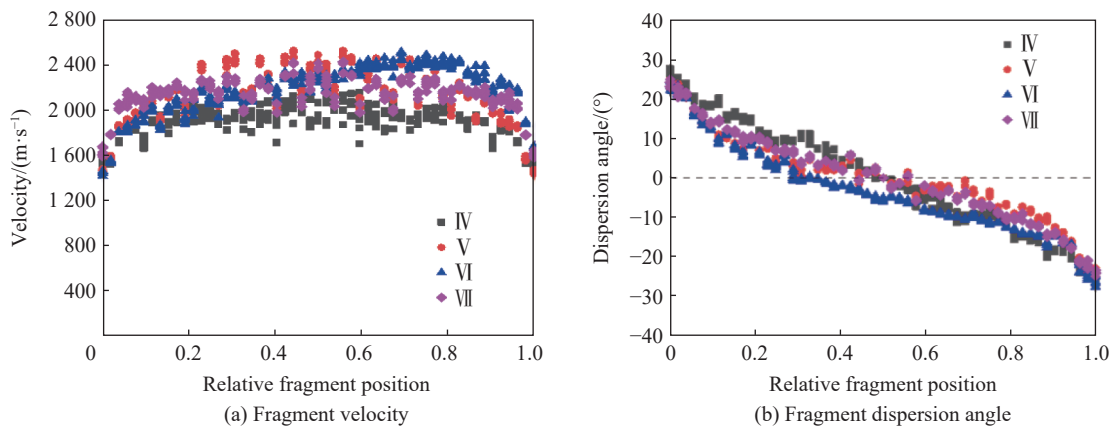


图 10 偏心两线起爆下战斗部破片威力参数

Fig. 10 Fragment power parameters of warheads under eccentric two-line detonation

表 3 战斗部偏心起爆破片飞散角的统计参数

Table 3 Statistical parameters of the fragment dispersion angles for eccentric detonation of warheads

| 战斗部 | $\bar{\sigma}_a/(^\circ)$ | $s/(^\circ)$ | 战斗部 | $\bar{\sigma}_a/(^\circ)$ | $s/(^\circ)$ |
|-----|---------------------------|--------------|-----|---------------------------|--------------|
| IV | 12.44 | 14.49 | VI | 10.32 | 11.94 |
| V | 8.44 | 10.98 | VII | 9.96 | 12.24 |

3.2 战斗部动爆的毁伤面积

设置战斗部落角 40° 和落速 200 m/s、落角 40° 和落速 100 m/s、落角 50° 和落速 200 m/s、落角 50° 和落速 100 m/s、落角 60° 和落速 200 m/s、落角 60° 和落速 100 m/s, 计算战斗部在炸高为 1~9 m 时的毁伤面积, 分别如图 11(a)~(f) 所示。可以看出, 随着炸高的增大, 毁伤面积先增大后减小, 偏心起爆受炸高的影响程度普遍小于装药中心单点起爆, 其中偏心两线同时-序贯起爆均能获得各不同交汇条件下 4 种战斗部中最大的毁伤面积。不同落角和落速下, 当炸高为 1~5 m 时, 中心单点起爆(IV)和偏心两线同时-序贯起爆(VII)具有较大的毁伤面积。当炸高为 5~6 m 时, 偏心两线序贯起爆(VI)和偏心两线同时-序贯起爆具有较大的毁伤面积。当炸高大于 6 m 时, 偏心两线序贯起爆的毁伤面积最大。落角一定, 落速为

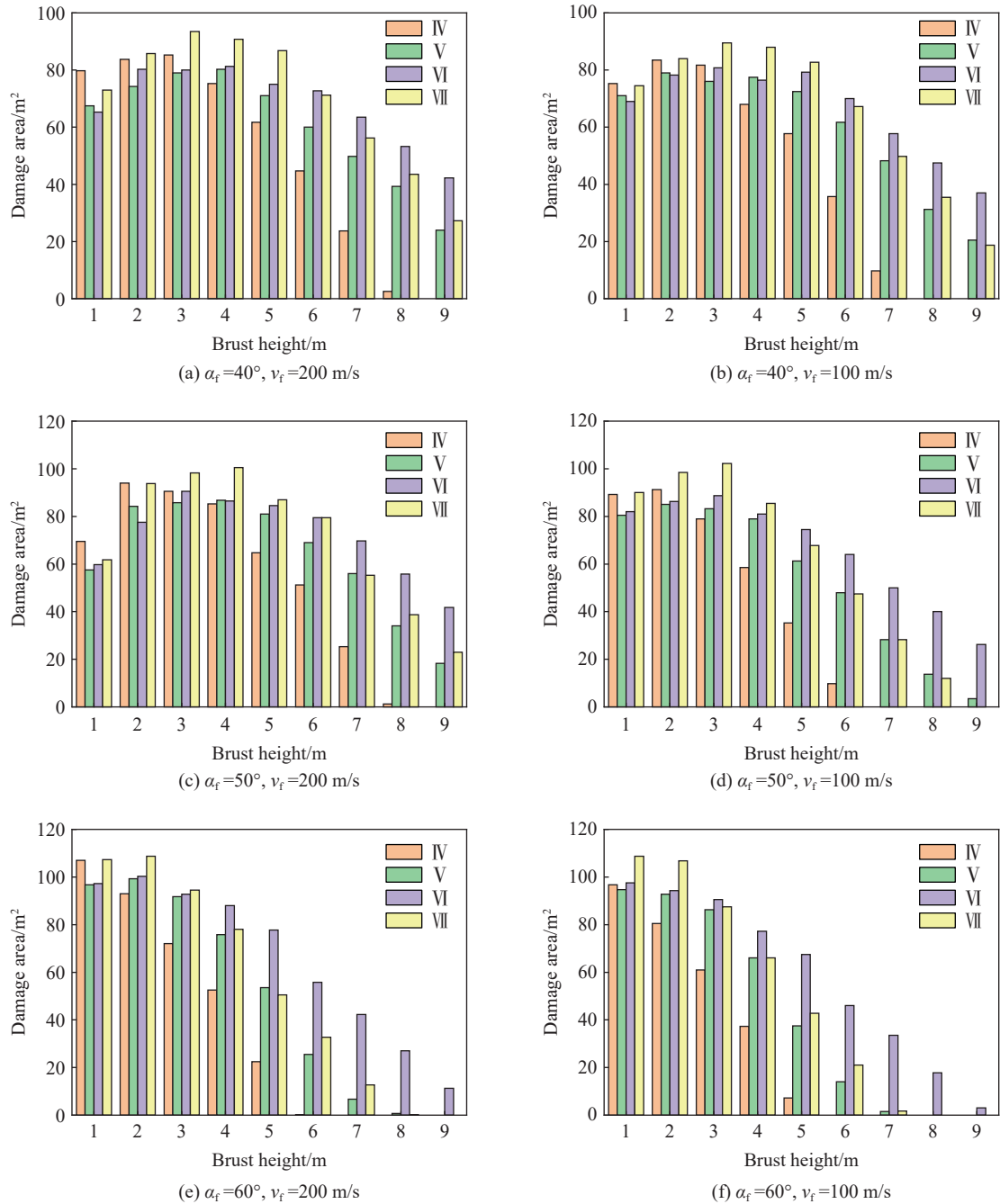


图 11 偏心两线起爆时不同炸高下的毁伤面积

Fig. 11 Damage areas under eccentric two-line detonation and different burst heights

200 m/s 时, 战斗部达到的最大毁伤面积均略大于落速为 100 m/s 时的, 且不同落速下 4 种战斗部的毁伤面积变化趋势一致。因此, 下面主要对毁伤更严重的落速 200 m/s 时的毁伤面积进行分析。

当落角为 40° 、落速为 200 m/s 时, 中心单点起爆在炸高为 3 m 时的毁伤面积达到 85.25 m^2 , 偏心两线同时-序贯起爆(VII)在炸高为 3 m 时毁伤面积达 93.5 m^2 , 相比于装药中心单点起爆(IV)增大 9.68%。当炸高为 8 m 时, 中心单点起爆仅有 2.5 m^2 的毁伤面积, 偏心两线同时-序贯起爆时的毁伤面积仍有 27.25 m^2 。当落角为 50° 、落速为 200 m/s 时, 中心单点起爆在炸高为 2 m 时的毁伤面积达到 94 m^2 , 偏心两线同时-序贯起爆(VII)在炸高为 4 m 时毁伤面积达 100.5 m^2 , 相比于装药中心单点起爆(IV)增大 6.9%。当炸高为 8 m 时, 中心单点起爆仅有 1.25 m^2 的毁伤面积, 偏心两线同时-序贯起爆时的毁伤面积仍有 38.25 m^2 。当落角为 60° 、落速为 200 m/s 时, 中心单点起爆在炸高为 1 m 时的毁伤面积达到 107.0 m^2 , 偏心两线同时-序贯起爆(VII)在炸高为 2 m 时毁伤面积达 108.75 m^2 , 相比于装药中心单点起爆(IV)增大 1.64%。当炸高为 7 m 时, 中心单点起爆的毁伤面积为 0, 偏心两线同时-序贯起爆时的毁伤面积仍有 12.75 m^2 。

图 12 为鼓形战斗部在落角为 50° 、落速为 200 m/s 时毁伤面积最大时有效破片落地的动能云图, 战斗部爆炸位置位于 (0, 0) 点上方。可以看出, 偏心两线序贯起爆下破片动能最高, 破片密集度高, 偏心两线同时-序贯起爆的破片更分散。这表明, 偏心两线同时-序贯起爆可以通过调整破片的飞散角, 增大战斗部的有效破片个数和毁伤面积。

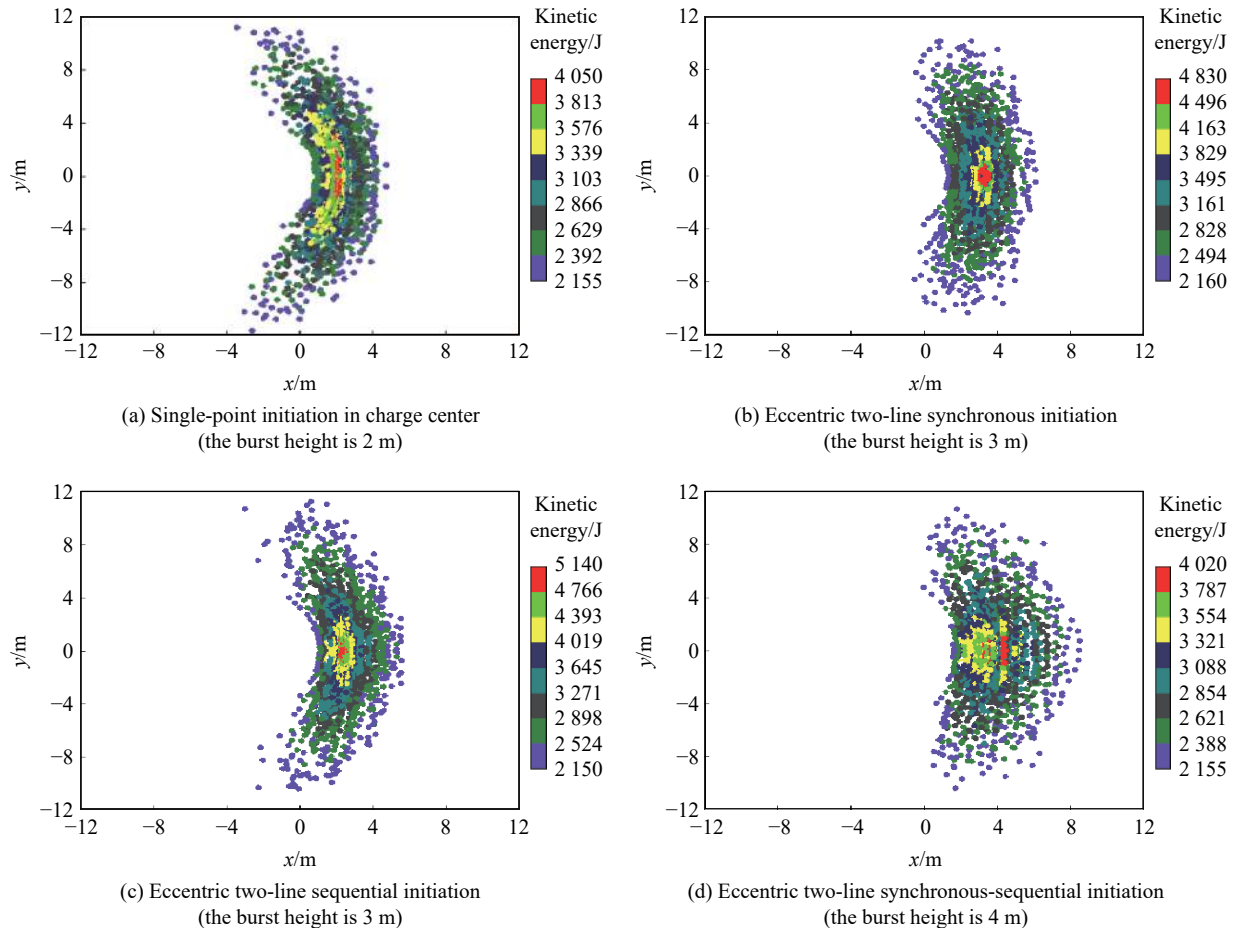


图 12 有效破片落地的动能云图

Fig. 12 Kinetic energy cloud images of effective fragment landing

4 结 论

系统研究了鼓形战斗部在偏心多点起爆下的破片威力场特性和对地面目标的毁伤面积, 探索了在

弹药弹道末端调控破片威力场的方法,得到了以下结论。

(1) 相比于传统圆柱形战斗部结构,鼓形战斗部可在降低装药量和破片排列个数的情况下,使破片的飞散角增大 55.98%,对地面军用车辆的毁伤面积最大增大 59.3%。

(2) 相对于偏心两线同时起爆,偏心两线同时-序贯起爆下,破片飞散角可增大 18.0%,破片飞散角分布的离散程度可提高 11.48%,从而增大破片的覆盖面积。

(3) 相对于装药中心单点起爆,偏心两线序贯起爆下,鼓形战斗部的毁伤面积受炸高影响较小,在落角为 40° 、落速为 200 m/s、炸高为 9 m 时的有效毁伤面积达 42.25 m^2 ;在落角为 50° 、落速为 200 m/s、炸高为 9 m 时的有效毁伤面积达 47.15 m^2 ;在落角为 60° 、落速为 200 m/s、炸高为 9 m 时的有效毁伤面积达 11.25 m^2 。

(4) 鼓形战斗部结构结合偏心多点起爆能显著改变破片威力场特性,调整对地目标毁伤范围,有望弥补因弹体落地姿态造成的毁伤效能不足。

参考文献:

- [1] 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: 90–91.
- [2] 刘彦, 黄风雷, 吴相彬. 杀爆战斗部对导弹弹地的毁伤效能研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2008, 28(5): 385–387. DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2008.05.008.
LIU Y, HUANG F L, WU X B. A study on the damage effectiveness of blast-fragmentation warhead on attacking anti-aircraft missile positions [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(5): 385–387. DOI: 10.15918/j.tbit.1001-0645.2008.05.008.
- [3] 张浩宇, 张树凯, 程立, 等. 序贯起爆参数对定向战斗部毁伤效能的影响 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(2): 025101. DOI: 10.11858/gywlb.20210836.
ZHANG H Y, ZHANG S K, CHENG L, et al. Influence of sequential initiation parameters on damage effectiveness of aimed warhead [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(2): 025101. DOI: 10.11858/gywlb.20210836.
- [4] CHEN W K, LI X Y, LU F Y, et al. Parallel control to fragments of a cylindrical structure driven by explosive inside [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015: 723463. DOI: 10.1155/2015/723463.
- [5] 龚柏林, 卢芳云, 李翔宇. D 型预制破片战斗部破片飞散过程的数值模拟 [J]. *弹箭与制导学报*, 2010, 30(1): 88–90, 94. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2010.01.022.
GONG B L, LU F Y, LI X Y. Simulation and study on the fragment ejection process of premade D-shape warhead [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(1): 88–90. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2010.01.022.
- [6] WANG M F, LU F Y, LI X Y, et al. A new method to estimate the projection angles of fragments from a D shape configuration [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 275-277: 122–127. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.275-277.122.
- [7] 李振铎, 李翔宇, 卢芳云, 等. D 字形预制破片战斗部破片能量分布特性 [J]. *弹箭与制导学报*, 2016, 36(1): 55–58, 62. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2016.01.014.
LI Z D, LI X Y, LU F Y, et al. Study on fragment energy distribution characteristics of premade D-shape warhead [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2016, 36(1): 55–58. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2016.01.014.
- [8] 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.
- [9] GUO Z W, HUANG G Y, LIU H, et al. Fragment velocity distribution of the bottom part of D-shaped casings under eccentric initiation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 144: 103649. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103649.
- [10] GUO Z W, HUANG G Y, ZHU W, et al. Fragment velocity distribution of D-shaped casing with multiple fragment layers [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 131: 85–93. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.04.027.
- [11] 冯顺山, 黄广炎, 董永香. 一种聚焦式杀伤战斗部的设计方法 [J]. *弹道学报*, 2009, 21(1): 24–26.

- FENG S S, HUANG G Y, DONG Y X. A new design method of fragment focusing warhead [J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(1): 24–26.
- [12] 袁书强, 沈正祥, 李亚哲, 等. 双曲线型聚焦战斗部破片的设计方法 [J]. *火炸药学报*, 2015, 38(1): 36–40. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2015.01.09.
- YUAN S Q, SHEN Z X, LI Y Z, et al. Design method of fragments to focused warhead of hyperbola type [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2015, 38(1): 36–40. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2015.01.09.
- [13] 严翰新, 姜春兰, 李明, 等. 不同起爆方式对聚焦战斗部性能影响的数值模拟 [J]. *含能材料*, 2009, 17(2): 143–146, 151. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.004.
- YAN H X, JIANG C L, LI M, et al. Numerical simulation of the effect of different initiation positions on a certain focusing fragment warhead [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(2): 143–146, 151. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.004.
- [14] 王娟娟, 郭双锋, 袁宝慧, 等. 聚焦战斗部破片聚焦性能的数值计算和试验研究 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(2): 87–90. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.02.017.
- WANG J J, GUO S F, YUAN B H, et al. Numerical simulations and experimental study on directional-focused fragmentation warhead [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(2): 87–90. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2013.02.017.
- [15] 李元, 赵倩, 熊诗辉, 等. 一种异面棱柱战斗部威力特性的数值模拟 [J]. *含能材料*, 2019, 27(2): 97–103. DOI: 10.11943/CJEM2018143.
- LI Y, ZHAO Q, XIONG S H, et al. Numerical modeling on lethality of a faceted prismatic warhead [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2019, 27(2): 97–103. DOI: 10.11943/CJEM2018143.
- [16] 张浩宇, 张树凯, 程立, 等. 杀伤爆破战斗部起爆方式对地面目标杀伤威力的影响 [J]. *兵工学报*, 2021, 42(11): 2300–2309. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.11.002.
- ZHANG H Y, ZHANG S K, CHENG L, et al. The impact of initiation mode of blast fragmentation warhead on the power to kill the ground target [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(11): 2300–2309. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2021.11.002.
- [17] 刘琛, 李元, 李燕华, 等. 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, et al. 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.
- [18] LI Y, WEN Y Q. Experiment and numerical modeling of asymmetrically initiated hexagonal prism warhead [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, 9(1): 1–14. DOI: 10.1177/1687814016687966.

(责任编辑 张凌云)