



起爆位置对预制破片飞散特性影响仿真研究

王英霖*, 周力, 周正炜, 李春艳

(中国船舶集团有限公司第七一三研究所, 河南 郑州 450015)

摘要:为研究小口径预制破片弹药在末端防御中的毁伤效能,采用有限元方法对预制破片弹战斗部的起爆过程进行模拟计算,分别研究装药底部中心位置起爆、单点偏心起爆、双点对称起爆、中心-偏心双点起爆4种起爆形式下,预制破片飞散的特性,获得预制破片平均终速、平均飞散角及分布占比的变化规律。研究结果表明:装药底部中心起爆时,预制破片的飞散速度存在分层现象,71.7%的破片速度在300~800 m/s之间,平均飞散终速约为687.1 m/s,且约91.7%的破片飞散角度分布在 $\pm 45^\circ$ 区间内。改变装药起爆位置后,预制破片的平均飞散终速发生变化,单点偏心起爆时,随着偏心距离的增加,破片的平均飞散终速减小约1.2%~2.5%;双点起爆2种工况下,预制破片的飞散终速随偏心距离的增加呈现减小-增加-减小的趋势,适当增加偏心距离,破片平均飞散终速提升约5%。在偏心起爆方式下,破片的平均飞散角度随着起爆位置偏心距离的增加而波动减小。因此,为提升战斗部的毁伤能力,对于双点起爆方式,可适当增加起爆点间的偏心距离;对于单点起爆方式,则应适当缩小偏心距离。研究结果可为指导预制破片弹药战斗部的设计提供参考。

关键词:预制破片;起爆位置;飞散速度;飞散角;数值模拟

中图分类号:TJ413.4+1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2024)04-0048-07

Simulation on the Effect of Detonation Position on the Dispersion Characteristics of Prefabricated Fragments

WANG Yinglin*, ZHOU Li, ZHOU Zhengwei, LI Chunyan

(The 713 Research Institute of CSSC, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: In order to study the lethal effect of small-caliber prefabricated fragmentation warheads in terminal defense, finite element method was used to simulate the detonation of prefabricated fragmentation warheads. The dispersion characteristics of fragmentation under four detonation conditions: central detonation at the bottom of the charge, single-point off-center detonation, dual-point symmetrical detonation, and dual-point center-off-center detonation was studied. The average final velocity and average scattering angle of the prefabricated fragments, as well as the distribution ratio, under the four detonation conditions were obtained. The research results show that when the detonation position is located at the contral-bottom of the charge, the scattered final velocity of 71.7% of prefabricated fragments is between 300~800 m/s. The scattered final velocity of the prefabricated fragments is approximately 687.1 m/s, and about 91.7% of the fragments' scattering angle are distributed within $\pm 45^\circ$. After changing the detonation position of the charge, the average scattered final velocity of the prefabricated fragments changes. The average scattered final velocity of the fragments decreased in average final velocity by approximately 1.2%~2.5%, as the off-center distance increased under single-point off-center detonation condition. For

the dual-point detonation conditions, the average scattered final velocity of the prefabricated fragments showed a trend of decreasing-increasing-decreasing under dual-point detonation conditions. The average final velocity of fragments can be increased by about 5% when the eccentricity distance is increased appropriately. The average scattering angle of the fragments decreased with the increase of the off-center distance of the detonation position for the off-center detonation. Therefore, in order to enhance the damage capability of the warhead, the off-center distance of the detonation points can be appropriately increased for the dual-point detonation method, For the single-point detonation method, the off-center distance should be appropriately reduced. The research results provide reference for the design of prefabricated fragmentation warhead warheads.

Key words: prefabricated fragment; detonation position; flight velocity; flight angle; numerical simulation

近年来,随着无人机、精确制导弹药等技术的发展成熟,无人机渗透抵进侦查攻击和制导弹药的应用愈发广泛,末端防御压力陡增^[1]。传统防空武器毁伤效率低、费效比大,而小口径武器系统具有高初速、高射速、高适装性、大载弹量、低成本等优势^[2],特别是具有面杀伤效果的预制破片弹药,在应对无人机等目标的末端防御、近区防卫作战任务中具有重要的应用价值。

文献[3~4]针对破片对无人机及无人机群的毁伤能力进行了研究,结果表明破片战斗部对无人机有较好的毁伤能力。而其中小口径预制破片弹的破片初速及飞散特性成为影响其作战效能的关键因素。孙韬等^[5]对弹药战斗部静态及动态起爆进行研究,获得了破片速度及飞散特性规律。李茂等^[6]对圆柱形 TNT 装药驱动预制破片进行研究,获得了破片的飞散参数及飞散过程。贺亮亮等^[7]研究了起爆方式及隔爆层对破片的影响规律,结果表明内外三点起爆的方式相比中心起爆能有效提高破片速度,同时非金属材料的隔爆效果更好。刘荣琪等^[8]、董晓亮等^[9]研究了破片材料、类型对飞散特性的影响。谭波等^[10]使用有限元方法对中心点起爆方式战斗部破片毁伤区域进行预测,并提出提高破片场的飞散范围,增强破片存速能力的方法。余志统等^[11]对 V 形刻槽预制破片弹的起爆过程进行研究,获得了预制破片的速度、飞散角度等参数。徐梦林等^[12]对球缺曲率半径、装药长径比、壳体厚度等参数对预制破片的平均飞散角的影响进行了研究,获得了其影响规律。

基于已有学者的研究基础,本研究以小口径弹药为研究对象,使用有限元方法对其预制破片战斗部的破片速度及飞散特性进行研究,研究战斗部装

药起爆位置对破片飞散特性的影响,研究结果可为小口径预制破片弹战斗部设计提供参考依据。

1 计算模型建立

1.1 有限元模型

预制破片弹战斗部主要由壳体、隔板、堵头、预制破片和装药组成,预制破片为直径 2 mm 的钨球,战斗部使用底部起爆方式,起爆后隔板推动预制破片前向抛撒。

由于战斗部中预制破片较多,为简化计算、节约计算资源,在不影响预制破片飞散效果的基础上,忽略战斗部加工过程中预制钨球排布的随机性,建立如图 1 所示的破片均匀分布的二维平面模型。壳体、隔板、堵头及钨球采用拉格朗日方法进行计算,由于装药起爆后,装药网格产生大变形,从而导致计算终止,因此,装药区域与空气域使用欧拉流体网格,固体区域与流体区域间建立相关流固耦合关系,模型的计算时间设为 120 μ s。

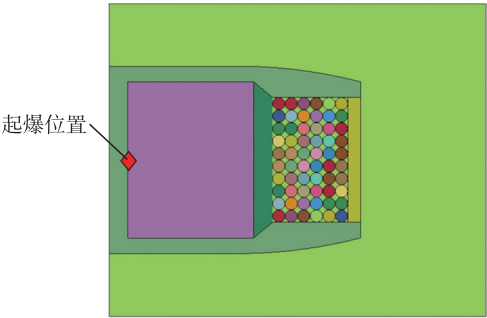


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

1.2 材料本构模型及参数

模拟计算所建立的有限元模型中,装药使用 TNT 炸药。TNT 的材料模型选择高能炸药燃烧模型

并使用 JWL 状态方程进行描述:

$$P=A\left(1-\frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中: P 为压力, E 为炸药爆轰产物的内能, V 为爆轰产物的相对体积, A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为与装药相关常数。TNT 装药的主要参数参考文献[12~13]。

战斗部壳体为钢, 密度为 7.85 g/cm^3 , 使用 J-C 材料模型进行描述, 对于 J-C 材料模型需配合 Gruneisen 状态方程。战斗部的预制破片密度为 17.3 g/cm^3 , 使用刚体材料模型进行描述。堵头及隔板使用铝材料, 密度为 2.7 g/cm^3 , 使用随动硬化塑性模型进行描述。空气密度为 $1.29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, 并使用线性多项式状态参数方程进行描述, 各材料参数参考文献[14~18]。

2 破片飞散特性模拟计算

图2为装药底部中心位置起爆后流体区域内的压力冲击波传递图像, 计算时间分别为 $1 \mu\text{s}$ 和 $7 \mu\text{s}$, 对应的最高压力分别为 14.7 GPa 和 16.2 GPa 。

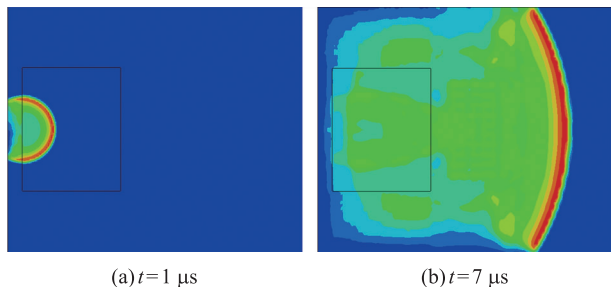


图2 压力冲击波传播过程

Fig. 2 Propagation process of pressure shock wave

图3所示为预制破片在 $t = 120 \mu\text{s}$ 时的速度矢量。由图可知, 破片的速度分布存在分层现象, 排列在外层的预制破片相较于内层破片的飞散速度更高, 破片飞散的速度最高为 1210 m/s , 最小为 344 m/s 。根据破片的速度矢量分布可知破片飞散的方向, 对预制破片的运动轨迹进行处理, 获得图4所示飞散轨迹图。破片在装药爆轰的作用下获得速度后飞散, 除部分破片相互碰撞导致飞散轨迹发生改变, 出现较大角度的飞散外, 大部分破片的飞散区域约为 $\pm 45^\circ$ 范围, 而预制破片的集中分布会提升破片对目标的毁伤程度。

图5所示为预制破片的速度变化图。大部分破片经过加速后, 在 $40 \sim 120 \mu\text{s}$ 内飞散速度趋于稳定, 破片的最终飞散速度集中分布在 $300 \sim 800 \text{ m/s}$ 的区间内, 该区间内的破片数量为 43 枚, 占全部破片的

71.7%。全部预制破片的平均飞散速度为 687.1 m/s 。

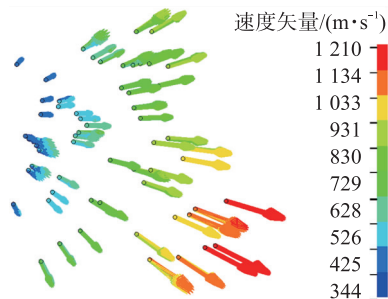


图3 破片速度矢量分布图

Fig. 3 Distribution of velocity vector of fragments



图4 破片飞散轨迹图

Fig. 4 Diagram of dispersion trajectory of fragments

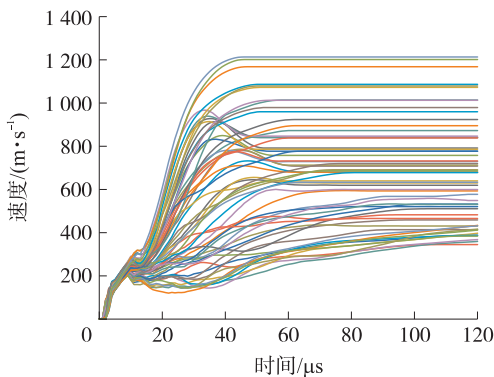


图5 破片的飞散速度变化图

Fig. 5 Variation of flight velocity of fragments

除破片飞散速度外, 破片的杀伤范围也是评价战斗部效能的一项重要指标。由于模型为二维平面模型, 为有效反应破片的杀伤范围, 因此采用破片的飞散角对该指标进行描述, 并对预制破片的飞散角度进行计算统计。模型中任意破片的速度大小可表示为^[12]:

$$v_j = \sqrt{v_{jx}^2 + v_{jy}^2} \quad (2)$$

式中: v_{jx} 与 v_{jy} 为任一预制破片 j 在 x 与 y 方向的分速度。因此, 预制破片的飞散角可表示为:

$$\beta = \arcsin \frac{v_{jy}}{v_j} \quad (3)$$

由图6可知,破片的飞散速度在120 μs 时基本稳定,因此选取该时刻对60枚预制破片进行飞散角的计算。经计算统计,在±20°飞散角范围内的破片数量为32枚,占全部破片的53.3%,而±45°飞散角范围内的破片占比为91.7%,统计结果与图4中破片运动轨迹相符。在装药底部中心位置起爆的工况下,全部破片的平均飞散角 $\bar{\beta}$ 约为-7.87°,全部预制破片的飞散角分布如图6所示。图7为破片飞散角的正态分布曲线图,由图7可知破片飞散角的分布规律,绝大部分破片飞散角分布在±45°区间内。

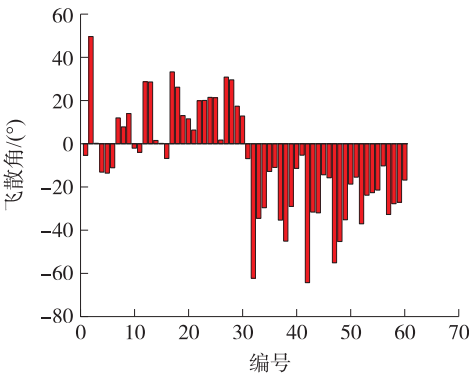


图6 飞散角度分布

Fig. 6 Dispersion angle distribution of fragments

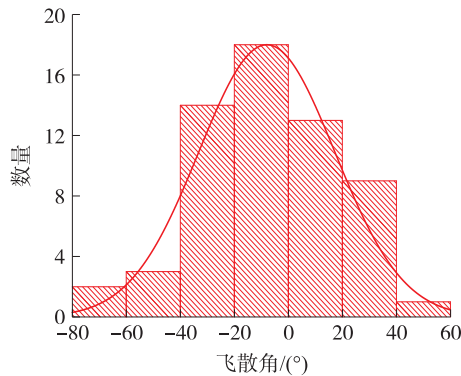


图7 破片飞散角正态分布图

Fig. 7 Normal distribution of fragments

3 起爆位置对破片飞散特性的影响

当装药底部起爆位置发生变化时,预制破片的飞散特性将会发生相应改变,因此针对装药底部起爆位置对破片的飞散特性影响进行研究。其中起爆位置如图8所示,除起爆位置外其他参数均保持不变。仿真计算得到的破片飞散速度矢量如图9所示,根据计算结果对不同工况下破片飞散速度进行统计,并分析计算破片的平均飞散终速及平均飞散角。

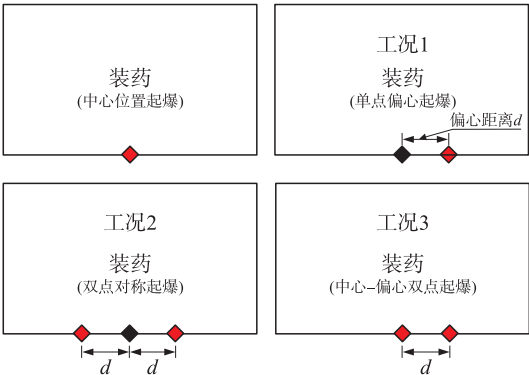
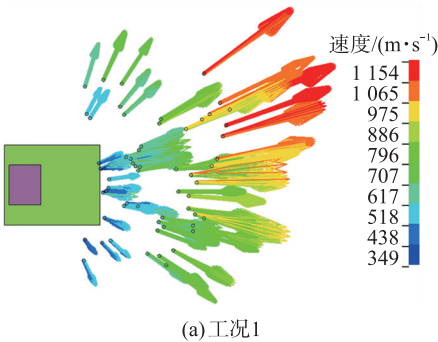
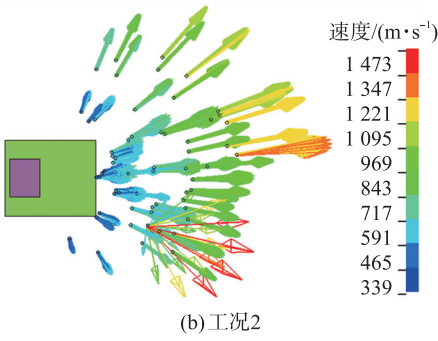


图8 起爆位置示意图

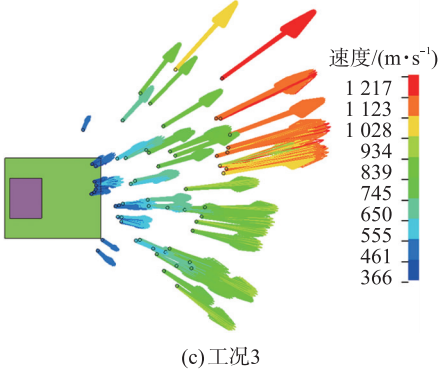
Fig. 8 Diagram of explosive position



(a) 工况1



(b) 工况2



(c) 工况3

图9 3种工况下破片速度矢量分布图

Fig. 9 Velocity vector distribution diagrams for the three operating conditions

底部单点偏心起爆方式下破片的平均飞散终速 $\bar{v}$ 如图10所示。随着偏心起爆位置距装药底部中心的距离的增加,战斗部预制破片的平均飞散终速

逐渐减小,当偏心距离 $d > 2.5$ mm 后,破片的平均飞散终速逐渐升高,但破片的飞散速度仍然小于装药底部中心起爆形式下破片的飞散终速。相较于底部中心起爆时,起爆位置偏心距离为 1 mm, 2.5 mm, 5 mm 和 7 mm 时破片的平均飞散终速分别降低 1.50%, 2.46%, 1.53% 和 1.15%。因此,与装药底部中心位置起爆相比,底部单点偏心起爆方式会降低预制破片的平均飞散终速。

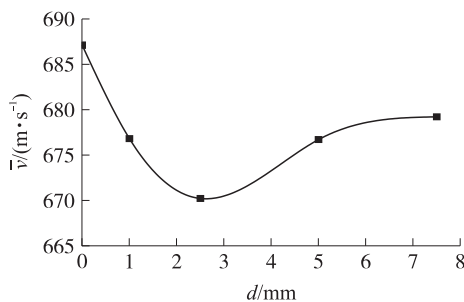


图 10 工况 1 破片平均飞散终速变化曲线

Fig. 10 Average fragment dispersion final velocity of condition 1

当装药起爆位置为底部双点对称起爆时,仿真计算获得的破片平均飞散终速如图 11 所示。由图中曲线变化可知,随着偏心距离的增加,预制破片的平均飞散终速出现小幅降低后逐渐升高,当两点分别距装药底部中心位置偏心为 5 mm 时,破片的平均飞散终速达到计算工况下的最大值,随后速度开始降低。相较于装药底部中心起爆,双点对称起爆偏心距离为 1 mm, 2.5 mm, 5 mm 和 7 mm 时时破片的平均飞散终速提升 -0.41%, 0.42%, 3.68%, 2.26%, 而双点起爆时相较于相同偏心距离下的单点起爆,破片的平均飞散终速提升了 1.11%, 3.06%, 5.28%, 3.46%。计算结果表明,随着起爆点之间距离的增加,一定范围内双点对称起爆能够增加预制破片的平均飞散终速,从而提升战斗部对目标的毁伤破坏能力。

图 12 为装药底部中心起爆与偏心起爆共同作用时,获得的预制破片的平均飞散终速的变化曲线。由图 12 可知,在两起爆点的共同作用下,预制破片的平均飞散速度随着偏心距离的增加而呈现减小-增加-减小的变化趋势,相较于装药底部中心起爆,中心-偏置双点起爆的偏心距离为 1 mm, 2.5 mm, 5 mm 和 7 mm 时破片的速度提升为 -1.82%, -0.38%, 1.94%, 0.83%, 相较于相同偏心距离的单点偏心起爆时破片的速度分别提升 -0.33%, 2.13%, 3.50%, 2.00%。计算结果表明,在底部中心起爆与

偏心起爆的共同作用下,适当增加两起爆点间距离,对于提升战斗部预制破片的平均飞散终速仍有正向作用。

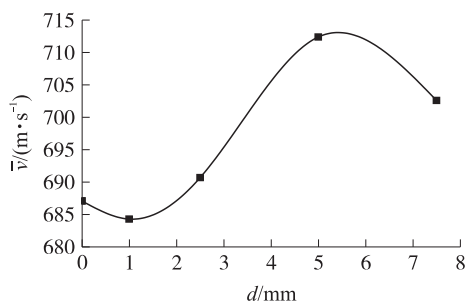


图 11 工况 2 破片平均飞散终速变化曲线

Fig. 11 Average fragment dispersion final velocity of condition 2

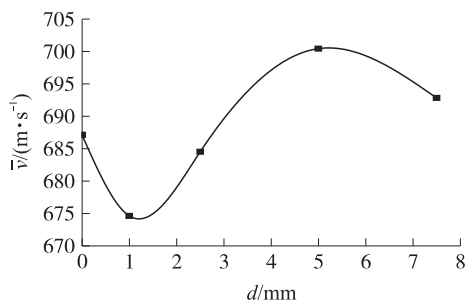


图 12 工况 3 破片平均飞散终速变化曲线

Fig. 12 Average fragment dispersion final velocity of condition 3

对计算结果中飞散速度在 300~800 m/s 区间内的破片数量进行统计,绘制如图 13 所示破片数量随起爆工况变化图。由图 13 可知,3 种工况下统计区间内的破片整体上呈现先减小后在增加的趋势;2 种双点起爆工况下破片数量的变化趋势相似,对于单点起爆适当增加起爆点的偏心距离可有效增加 300~800 m/s 区间内的破片数量,而对于双点起爆工况则应控制两点间的距离。因此可利用这一特性对战斗部装药起爆位置进行优化设计。

图 14 所示为不同起爆工况下的预制破片的平均飞散角。由图可知对于 3 种不同的起爆方式,随着起爆点偏心距离的增加,破片的平均飞散角整体上呈现波动减小变化。而单点偏心起爆与中心-偏心双点起爆方式破片的平均飞散角变化趋势一致。当偏心距离大于 5 mm 后,破片的平均飞散角减小的程度较大。而双点对称起爆工况中,当两起爆点位置偏心为 1 mm 时,破片的平均飞散角将增大,而随着偏心距离的继续增大,破片的平均飞散角则逐渐减小,相较于偏心起爆方式,对称起爆方式下破片

平均飞散角的变化较为平稳。

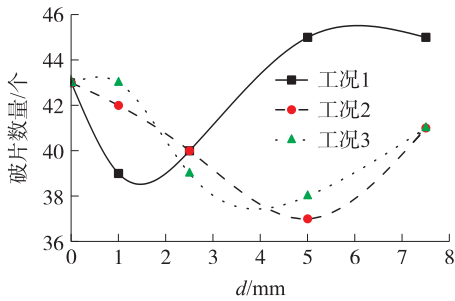


图 13 300~800 m/s 区间破片数量变化
Fig. 13 Number of fragments varies between 300–800 m/s

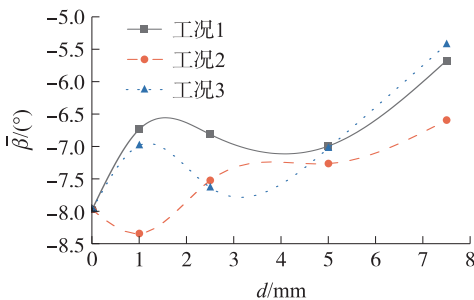


图 14 破片平均飞散角变化曲线
Fig. 14 Average fragment dispersion angle change curve

表 1 为不同起爆方式下战斗部的预制破片在 $\pm 20^\circ$ 飞散角及 $\pm 45^\circ$ 飞散角区间内的破片比例。由表 1 数据可知,3 种计算工况下,随着起爆位置偏心距离的增加, $\pm 20^\circ$ 及 $\pm 45^\circ$ 飞散角范围内的破片数量均呈现先增加后减小的趋势。因此,适当增加点偏心距离可增加破片集中度,有利于增加战斗部杀伤效果。

表 1 不同飞散角范围内破片比例

Table 1 Fraction of fragments in range flight angles			
起爆方式	起爆点偏心距离	破片分布比例/%	
		<20°	<45°
原始工况	0	53.3	91.7
	$d=1\text{ mm}$	58.3	93.3
	$d=2.5\text{ mm}$	50	91.7
	$d=5\text{ mm}$	50	93.3
	$d=7.5\text{ mm}$	53.3	85
工况 1	$d=1\text{ mm}$	58.3	95
	$d=2.5\text{ mm}$	50	93.3
	$d=5\text{ mm}$	50	93.3
	$d=7.5\text{ mm}$	51.6	83.3
工况 2	$d=1\text{ mm}$	58.3	90
	$d=2.5\text{ mm}$	50	91.7
	$d=5\text{ mm}$	53.3	90
	$d=7.5\text{ mm}$	50	91.7

4 结论

本文利用有限元方法开展了起爆位置对预制破片的飞散特性数值模拟研究,得到如下结论:

- ①装药底部中心起爆时,破片的飞散速度集中在 300~800 m/s 区间范围内,破片的平均飞散终速为 687.1 m/s,平均飞散角为 -7.97° ,且 90% 以上的破片集中在 $\pm 45^\circ$ 区间。
- ②改变装药起爆位置后,单点偏心起爆工况下随着偏置距离的增加,破片的平均飞散终速相比中心起爆时降低;双点起爆工况下,破片的飞散终速呈现减小-增加-减小的趋势。而破片的平均飞散角度,在三种起爆工况下,随着偏心距离的增加,飞散角变化的波动减小。
- ③对于双点起爆方式中,适当增加起爆点的偏心距离,可在一定程度上提升破片的飞散终速,同时减小破片的飞散角度。有利于提升战斗部的毁伤能力,而对于单点起爆,则应适当缩小偏心距离。

参考文献

[1] 冯杨,蒋超,崔玉伟. 俄乌冲突中无人机作战运用及启示[J]. 中国军转民,2022(23):35-40.
FENG Yang, JIANG Chao, CUI Yuwei. Application and enlightenment of UAVs in Russia-Ukraine conflict[J]. Defence Industry Conversion in China,2022(23):35-40. (in Chinese)

[2] 罗文敏,齐圣辉,彭安,等. 小口径防空高炮弹药发展趋势分析[J]. 现代防御技术,2023,51(5):31-38.
LUO Wenmin, QI Shenghui, PENG An, et al. Analysis on the development trend of small caliber anti-aircraft gun ammunition[J]. Modern Defence Technology, 2023, 51 (5) : 31 - 38. (in Chinese)

[3] 李彤. 定向破片战斗部对无人机群毁伤效能评估[D]. 沈阳: 沈阳理工大学,2023.
LI Tong. Targeted fragmentation combat team damage effectiveness assessment for UAV swarms [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University,2023. (in Chinese)

[4] 岳通. 定距弹对无人机的毁伤概率分析[D]. 太原: 中北大学,2020.
YUE Tong. Damage probability analysis of ranging projectile to unmanned aerial vehicle[D]. Taiyuan:North University of China, 2020. (in Chinese)

[5] 孙韬,张国伟,齐蕾. 预制破片飞散规律的数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报,2017,38(12):45-47.
SUN Tao,ZHANG Guowei,QI Lei. Numerical simulation study on the rule of prefabricated fragments flying[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2017,38(12):45-47. (in Chinese)

[6] 李茂,高圣智,侯海量,等. 圆柱形装药驱动轴向预制破片飞散

- 特性[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(2): 141-147.
- LI Mao, GAO Shengzhi, HOU Hailiang, et al. Projection characteristics of axial prefabricated fragments driven by cylindrical charge[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(2): 141-147. (in Chinese)
- [7] 贺亮亮, 尹建平, 伊建亚. 起爆方式及隔爆层对杀爆战斗部破片初速的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(5): 77-82.
- HE Liangliang, YIN Jianping, YI Jianya. Effect of initiation model and flameproof layer on the initial velocity of blast fragmentation warhead fragment [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(5): 77-82. (in Chinese)
- [8] 刘荣琦, 郝永平, 史春景. 不同材料预制破片的飞散特性研究[J]. 机械工程与自动化, 2023, (2): 46-48.
- LIU Rongqi, HAO Yongping, SHI Chunjing. Study on scattering characteristics of prefabricated fragments of different materials[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2023, (2): 46-48. (in Chinese)
- [9] 董晓亮, 李文彬, 沈晓军. 预制破片对复合毁伤元战斗部发散角的影响[J]. 爆破器材, 2018, 47(6): 15-20.
- DONG Xiaoliang, LI Wenbin, SHEN Xiaojun. Influence of pre-fragment on divergence angle of warhead with combined damage elements [J]. Explosive Materials, 2018, 47(6): 15-20. (in Chinese)
- [10] 谭波, 金贺龙, 张俊, 等. 基于数值模拟方法的中心起爆战斗部破片动态飞散特性研究[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(3): 51-57.
- TAN Bo, JIN Helong, ZHANG Jun, et al. Research on dynamic scattering characteristics of in center initiation warhead fragments based on numerical simulation[J]. Journal of Detection & Control, 2023, 45(3): 51-57. (in Chinese)
- [11] 余志统, 施冬梅, 尚春明, 等. V形刻槽预制破片战斗部爆炸仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(4): 159-162.
- YU Zhitong, SHI Dongmei, SHANG Chunming, et al. Research on explosion simulation of V-shaped notched prefabricated fragment warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(4): 159-162. (in Chinese)
- [12] 徐梦林, 印立魁, 黄文龙, 等. 轴向聚焦式预制破片战斗部破片飞散角研究[J]. 弹箭与制导学报, 2022, 42(4): 108-113.
- XU Menglin, YIN Likui, HUANG Wenlong, et al. Study on fragment dispersion angle of axial focusing prefabricated fragment warhead [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2022, 42(4): 108-113. (in Chinese)
- [13] 王良全, 商飞, 张建伟, 等. 高能炸药毁伤威力数值仿真实验研究[J]. 测试技术学报, 2021, 35(1): 6-11.
- WANG Liangquan, SHANG Fei, ZHANG Jianwei, et al. Numerical simulation experimental study on damage capability of high energy explosive[J]. Journal of Test and Measurement Technology. 2021, 35(1): 6-11. (in Chinese)
- [14] 吉诚, 周云波, 张明, 等. TNT对近距离接触爆炸下防爆钢结构响应的影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(3): 47-53.
- JI Cheng, ZHOU Yunbo, ZHANG Ming, et al. Study on effect of TNT on response of explosion-proof steel structure under close-in explosion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(3): 47-53. (in Chinese)
- [15] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.
- [16] TANSEL D. Ballistic penetration of hardened steel plates [D]. Ankara: Middle East Technical University, 2010.
- [17] 于滨. 破片战斗部对导弹目标的毁伤效能分析 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- YU Bin. Damage assessment of fragmentation warhead against missile target [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] 李正川, 何源, 郭磊, 等. 爆轰驱动下轴向预制破片飞散特性研究[J]. 弹道学报, 2023, 35(3): 61-71.
- LI Zhengchuan, HE Yuan, GUO Lei, et al. Study on velocity gradient of axial prefabricated fragment driven by detonation[J]. Journal of Ballistics, 2023, 35(3): 61-71. (in Chinese)