

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0041

起爆方式对椭圆截面战斗部破片速度分布的影响*

邓宇轩, 张先锋, 刘 闯, 李鹏程, 马正伟, 刘子涵
(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为研究椭圆截面战斗部在不同起爆方式下破片速度的分布特性, 建立了5种具有不同短长轴比的椭圆截面战斗部数值模拟模型。开展了端面中心单点、短(长)轴中点双点、短长轴中点4点以及端面起爆5种起爆方式数值模拟研究, 分析了不同起爆方式下椭圆截面战斗部破片的速度分布及能量输出特性。研究表明: 在径向方向, 战斗部在不同起爆方式下破片最大径向速度变化规律基本一致, 均呈现由长轴至短轴方向对数增长, 且随着短长轴比的增大, 短长轴方向破片速度差值逐渐减小。然而, 不同起爆方式下椭圆截面战斗部最大速度截面上破片速度平均值存在明显差异, 具体表现为端面起爆时的破片径向平均速度最高, 单点起爆最低, 且随着起爆点数量的增加, 最大速度截面上的破片整体平均速度逐渐增大。在轴向方向, 受端面稀疏波的影响, 不同方位角最大破片速度均出现在靠近非起爆端1/4处, 且起爆点在短轴轴线上相较于在长轴轴线上会提高靠近起爆端长轴方向的破片速度, 但短轴方向沿轴向的破片速度分布无明显差异。此外, 不同起爆方式对椭圆截面装药爆炸能量输出特性无明显影响, 其中27%的装药能量转化为壳体动能, 有50%的能量被壳体断裂变形以及空气冲击波消耗。

关键词: 椭圆截面战斗部; 爆炸驱动; 破片速度; 起爆方式; 能量输出

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Effect of initiation models on the fragment velocity distribution of elliptical cross-section warhead

DENG Yuxuan, ZHANG Xianfeng, LIU Chuang, LI Pengcheng, MA Zhengwei, LIU Zihan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the velocity distribution characteristics of elliptical section warhead (ECSW) fragments under different initiation modes, a numerical simulation model was established for five ECSWs with different shape ratios. Numerical simulations were conducted to investigate the velocity distribution and energy output characteristics of fragments from ECSW under five different initiation modes: central single-point initiation, dual-point initiation at the midpoint of the minor (or major) axis, four-point initiation at the midpoint of the major and minor axes, as well as surface-initiated detonation. The research findings suggest that the maximum radial velocity of fragments follows a consistent logarithmic growth pattern in the radial direction across various initiation modes, increasing from the major axis to the minor axis direction. With an increase in the shape ratio, the difference in fragment velocities between the major and minor axis directions gradually decreases. However, the maximum velocity profiles of fragments from elliptical section warheads exhibit noticeable differences in average velocities under different initiation modes. Surface-initiated detonation produces the highest average radial velocity, whereas single-point initiation leads to the lowest. As the number of initiation points increases, the overall average fragment velocity on the maximum velocity profile gradually rises. In the axial direction, the influence of rarefaction waves leads to the maximum fragment velocities occurring near the 1/4 position from the non-initiating end at different azimuthal angles. Initiation points

* 收稿日期: 2024-01-29; 修回日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(12141202, 12202205)

第一作者: 邓宇轩(1998—), 男, 博士研究生, dengyuxuan103@163.com

通信作者: 张先锋(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, lynx@njjust.edu.cn

along the minor axis enhance the fragment velocity in the major axis direction near the initiating end compared to initiating points along the major axis. However, there are no significant variations in the axial velocity distribution of fragments in the minor axis direction. The different initiation modes have negligible effects on the energy output characteristics of elliptical section charges. Approximately 27% of the charge energy is converted into shell kinetic energy, while 50% is dissipated through casing fracture deformation and air shock wave propagation.

Keywords: elliptical cross-section warhead; detonation drive; fragment velocity; initiation model; energy output

以椭圆截面战斗部为代表的非旋转对称异形截面战斗部, 因其与高超武器的非圆载荷平台具有较好的空间适配性, 近年来得到了国内外学者的广泛关注。目前, 关于椭圆截面战斗部在传统中心点起爆方式下破片径向速度分布的研究已较为成熟, 典型特征是椭圆截面战斗部短轴方向的破片比长轴方向的破片具有更高的速度^[1]。然而, 椭圆截面战斗部的轴向速度分布以及非中心起爆时的破片速度分布尚处于初步探索阶段, 亟待开展相关研究。

对于传统圆形截面战斗部, 冯顺山等^[2]利用实验回归方法给出了单点偏心起爆时的破片初速计算经验公式; Resnyansky 等^[3]基于数值模拟方法分析了不同起爆方式下战斗部破片的速度及密度分布, 发现采用面起爆时战斗部破片杀伤效率最高; Held^[4-5]、Huang 等^[6]基于试验结果对 Gurney 公式^[7]进行了修正, 提出了适用于偏心起爆的计算公式; Li 等^[8-13]针对圆形壳体偏心起爆问题开展了系统的试验、理论及数值模拟研究, 分析了偏心起爆对破片速度的增益机理, 并基于一维活塞模型和虚拟能量分配中心假设, 提出了一种计算柱形壳体偏心起爆破片速度分布的新方法。An 等^[14]针对中空装药结构, 开展了偏心起爆数值模拟研究, 发现在装药中空处爆轰产物会形成类“聚能”效应, 进而提高起爆点对侧破片速度。Guo 等^[15]基于数值模拟方法, 分析了偏心线起爆时端面稀疏波对破片速度分布的影响机理, 研究结果表明, 端面稀疏波作用不仅受装药端面自由面大小影响, 还与其作用时间相关。

对于异形截面战斗部, Guo 等^[16-19]基于试验和数值模拟方法, 系统分析了 D 形截面战斗部在不同起爆方式以及不同装药结构下破片的速度及空间分布特性, 发现不同的起爆点位置会显著影响 D 形战斗部的破片速度。Ding 等^[20-22]设计了具有不同弧面结构的 D 形壳体, 并开展了试验研究, 获得了 D 形壳体最佳曲率与中心角的匹配关系。此外, 棱柱形战斗部由于具有较好的密度及速度增益特性, 因此一些学者对其开展了大量的试验和数值模拟研究, 发现相较于圆形截面战斗部, 不同的起爆方式能够显著影响棱柱形战斗部破片的空间及速度分布^[23-26]。对于椭圆截面战斗部, Deng 等^[27]、邓宇轩等^[28-29]开展了系统的试验研究, 获得了端面中心点起爆作用下不同短长轴比的椭圆截面战斗部破片径向速度分布特性, 并结合数值模拟方法对其爆轰驱动过程进行了深入探讨。杨祥等^[1]通过数值模拟方法分析了中心线起爆作用下椭圆截面战斗部的径向速度分布, 并基于数值模拟结果修正了 Gurney 公式, 提出了一个用于预测椭圆截面战斗部破片速度分布的经验公式。姜斌等^[30]利用一维爆轰驱动模型, 分析了椭圆截面战斗部短长轴破片加速过程的差异。

综上所述, 目前对于偏心起爆下战斗部破片速度分布的研究主要集中在圆截面战斗部, 而对椭圆截面战斗部的研究主要集中在传统单点起爆, 缺少对于椭圆截面战斗部在非中心对称多点起爆时破片速度分布的研究, 同时, 不同起爆方式下, 椭圆截面装药的爆炸能量输出特性尚不明确。因此, 本文将基于试验弹体结构^[29], 建立 5 种具有相同装药和壳体质量比而短长轴比不同的椭圆截面战斗部数值模拟模型, 考察端面中心单点起爆、短轴中点双点起爆、长轴中点双点起爆、短长轴中点 4 点起爆以及端面起爆等 5 种起爆方式对椭圆截面战斗部破片速度分布的影响规律, 分析不同起爆方式下椭圆截面装药的爆炸能量输出特性, 以为椭圆截面战斗部的工程应用提供指导。

1 数值模拟模型

1.1 材料模型

根据课题组前期开展的试验^[29]确定了数值模拟模型结构, 其中战斗部壳体及端盖材料均为 45 钢,

用尼龙代替内衬材料聚醚醚酮 (poly ether ether ketone, PEEK), 因为尼龙与 PEEK 具有相似的、很低的机械力学性能, 替换后对数值模拟结果的影响可以忽略, 战斗部装药为 B 炸药。采用 Johnson-Cook 本构模型来描述战斗部壳体的材料行为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_{\text{eq}}^n)(1 + C \ln \varepsilon^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

式中: A 、 B 、 C 、 n 和 m 为材料常数, ε_{eq} 为等效塑性应变, ε^* 为无量纲塑性比; T^* 为无量纲相对温度, $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, 其中 T_r 为室温, T_m 为材料熔点。具体数值列于表 1^[8] 中。

表 1 45 钢 Johnson-Cook 本构参数^[8]

Table 1 Johnson-Cook constitutive parameters of 45 steel^[8]

| 材料 | A/MPa | B/MPa | n | C | m | T_m/K |
|-----------|----------------|----------------|------|-------|------|----------------|
| AISI 1045 | 507 | 320 | 0.28 | 0.064 | 1.06 | 1793 |

采用 AUTODYN 中的 Mott 随机失效模型描述壳体在爆轰驱动下的断裂损伤行为, 表达式为:

$$dp = (1 - p)C e^{\gamma \varepsilon} d\varepsilon \quad (2)$$

式中: $1 - p$ 为材料应变小于 ε 时发生失效的概率, C 和 γ 为常数, 且 γ 的计算公式为:

$$\gamma \approx 160 \times \frac{\sigma_2}{\sigma_f(1 + \varepsilon_f)} \quad (3)$$

式中: σ_f 为壳体断裂时的真实应力, σ_2 为材料强度增强系数, ε_f 为塑性应变。Li 等^[8] 通过力学试验获得了 45 钢的 γ 和 ε_f 分别为 53.8 和 0.65。

JWL 状态方程用于描述 B 炸药的爆炸响应行为, 表达式为:

$$p_e = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (4)$$

式中: p_e 为炸药爆轰产物压力, E 为单位体积内能, V 为相对体积。炸药详细参数列于表 2 中, 表中 ρ 为装药密度, D 为炸药爆速, p_{CJ} 为炸药爆压, C_1 、 C_2 、 R_1 、 R_2 和 ω 为表征炸药爆轰特征的常数。

表 2 B 炸药的 JWL 状态方程参数

Table 2 JWL state equation parameters of composition B

| $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | p_{CJ}/GPa | C_1/GPa | C_2/GPa | R_1 | R_2 | ω |
|--------------------------------------|----------------------------------|---------------------|------------------|------------------|-------|-------|----------|
| 1.717 | 7980 | 29 | 542 | 7.68 | 4.2 | 1.1 | 0.24 |

此外, 炸药内衬尼龙材料取自 AUTODYN 材料库^[31], 这里不做描述。

1.2 计算方法及网格敏感性分析

SPH 是一种无网格计算方法, 被广泛应用于描述炸药爆轰作用过程中的变形、膨胀及流动行为。此外, SPH 方法计算过程中不涉及网格侵蚀, 不会造成战斗部壳体断裂过程中的质量损失, 因此, SPH 也被用于描述自然破片战斗部壳体。然而, 对于预制/控破片壳体, Lagrange 求解方法具有更好的适应性, 能够清晰反映破片的飞散及变形情况, 因此, 本文中炸药采用 SPH 求解方法, 壳体及内衬采用 Lagrange 求解方法。

SPH 计算方法的求解准确性受粒子直径影响较大, 对于炸药和壳体均采用 SPH 算法的情况, 已有学者对粒子直径进行了敏感性分析^[8]。然而, 对于 Lagrange 和 SPH 耦合计算模型的网格敏感性分析尚未见公开报道。本文中基于之前开展的试验中采用的战斗部结构, 建立了相应的数值模拟模型, 模型结构参数如表 3 所示, 其中 a 为装药半短轴, b 为装药半长轴, μ 为装药短长轴比。

为提高计算效率, 根据椭圆截面战斗部的面对称特性建立了 1/4 数值模拟模型, 如图 1 所示。战斗部整体长度为 97.0 mm, 战斗部壳体由 20 个刻槽破片环堆叠而成, 单个破片环厚 4.3 mm, 刻槽宽度 0.3 mm, 刻槽后剩余壳体连接厚度为 1.5 mm; θ 为方位角, 即由战斗部中心发出的射线与装药右半长轴的夹角。计算了不同粒子大小圆形截面战斗部(C1)在端面中心点起爆下轴向破片的速度分布, 计算结果如图 2 所示。从图中可以看出, 随着粒子尺寸的减小, 圆形截面战斗部的轴向速度整体逐渐增大, 直至粒子直径为 0.3 mm 时, 此后破片速度趋于稳定。因此, 考虑到计算机的运算能力和计算效率, 选取直径为 0.3 mm 的粒子开展下一步计算分析。

表 3 战斗部参数

Table 3 Parameters of warhead

| 弹体编号 | a/mm | b/mm | μ | 壳体厚度/mm |
|------|---------------|---------------|-------|---------|
| E1 | 35.58 | 14.23 | 0.40 | 3.763 |
| E2 | 30.34 | 16.69 | 0.55 | 3.956 |
| E3 | 26.89 | 18.82 | 0.70 | 4.053 |
| E4 | 24.40 | 20.74 | 0.85 | 4.096 |
| C1 | 22.50 | 22.50 | 1.00 | 4.108 |

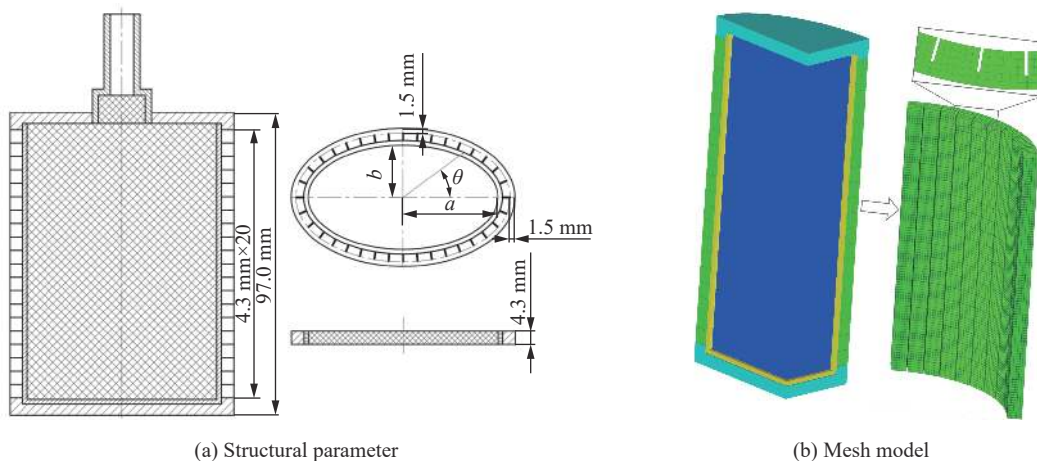


图 1 数值模拟模型

Fig. 1 Simulation model

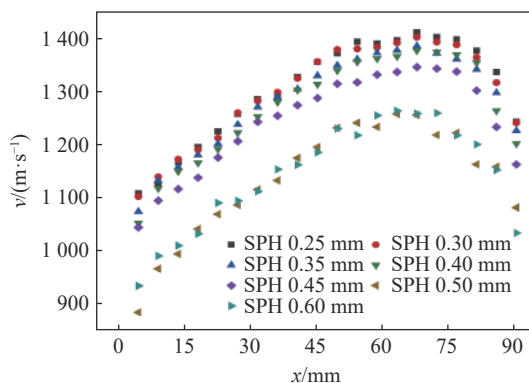


图 2 网格敏感性分析

Fig. 2 Grid sensitivity analysis

1.3 数值模拟方法验证

将数值模拟结果中最大速度截面上的破片速度, 与试验^[29]中通过锡箔纸测速靶获得的椭圆截面战斗部的径向最大破片速度分布进行对比, 如图 3 所示。从图中可以看出, 数值模拟结果与试验结果吻合较好, 验证了数值模拟方法的可靠性。

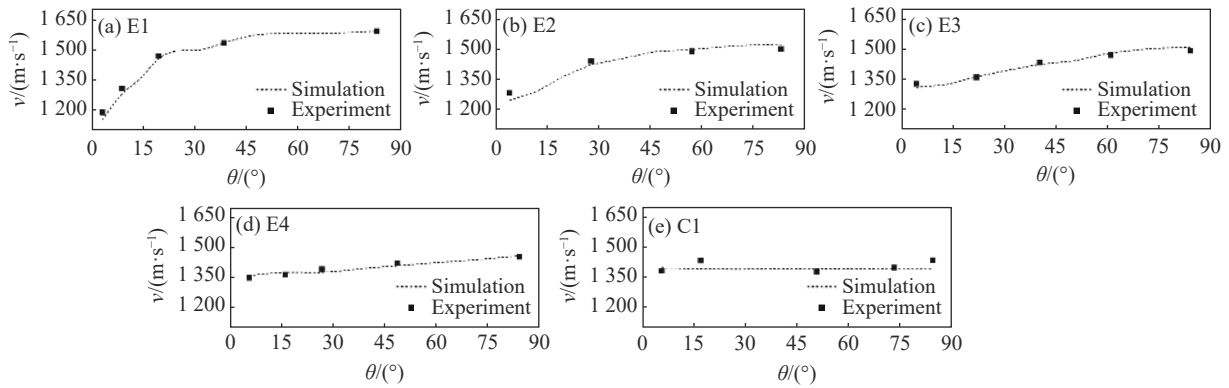


图 3 试验^[29]与数值模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of experimental^[29] and numerical simulation results

2 数值模拟结果与分析

2.1 问题描述

椭圆截面战斗部在传统端面单点起爆方式的作用下, 破片的径向速度由长轴至短轴方向逐渐增大^[29]。在实际工程应用中, 不同的起爆方式能够改变爆轰波在壳体内部的传播作用过程, 进而实现不同的破片速度分布。其中对称起爆一直以来被学者广泛关注, 本节中在椭圆截面战斗部端面典型位置处设置起爆点, 分析不同起爆方式对椭圆截面战斗部径向和轴向破片速度分布的影响规律。起爆方式示意图如图 4 所示, 由左至右分别为端面中心单点起爆、短轴中点双点起爆、长轴中点双点起爆、短长轴中点四点起爆以及端面起爆, 5 种起爆方式分别编号为 I ~ V。

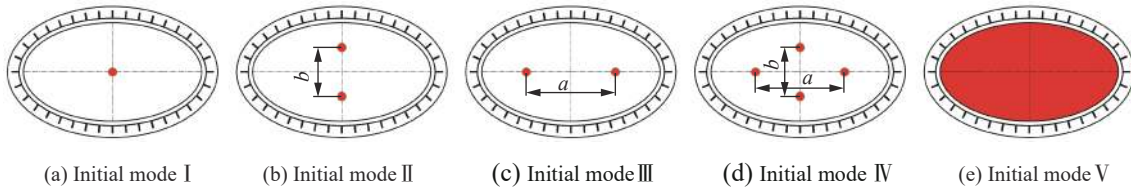


图 4 不同起爆方式示意图

Fig. 4 Initial mode diagram

2.2 对称点起爆对椭圆截面战斗部破片速度分布的影响

2.2.1 径向破片速度分布

图 5 给出了椭圆截面战斗部在端面中心单点起爆作用下壳体的膨胀加速过程, 从图中可以看出, 爆轰驱动完成时, 短轴速度明显高于长轴方向, 且在靠近非起爆端时破片速度达到最大值。以最大速度截面处破片为研究对象, 不同起爆方式下破片的径向速度分布如图 6 所示, 图 6(a) 对相同起爆方式下不同短长轴比战斗部破片的径向速度分布进行了汇总; 相同截面形状在不同起爆方式下破片的径向速度分布规律体现在图 6(b) 中。从图中可以看出, 不同的端面起爆方式对椭圆截面战斗部破片径向速度的变化规律无明显影响。

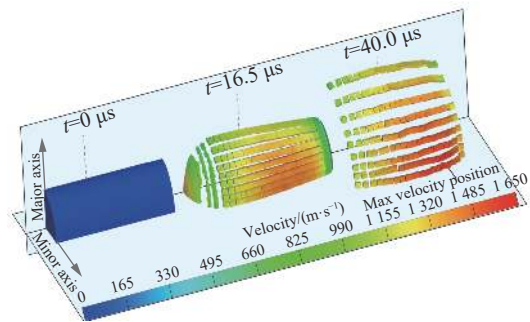


图 5 战斗部壳体膨胀过程

Fig. 5 Expansion process of warhead casing

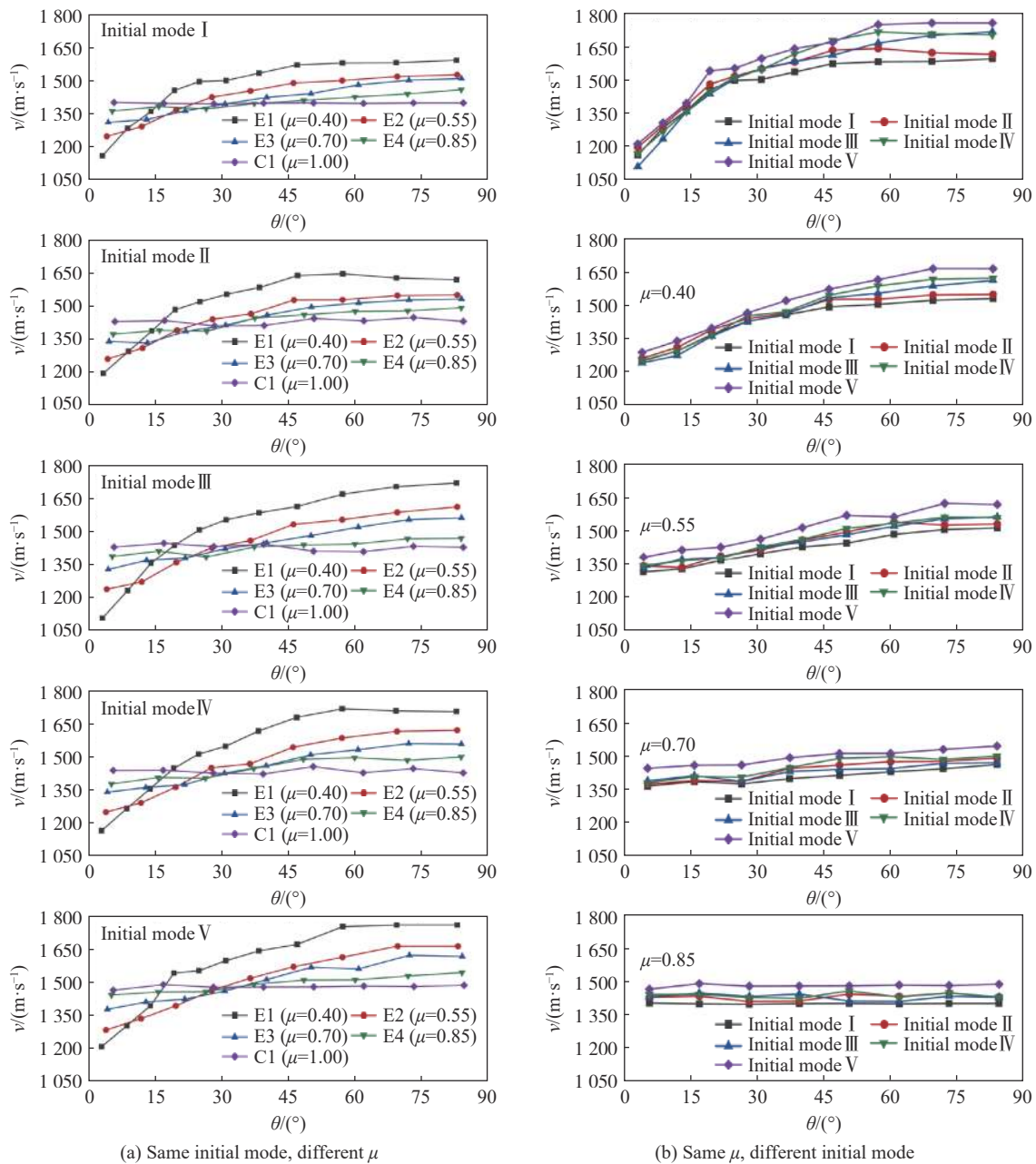


图 6 战斗部破片最大径向速度分布规律

Fig. 6 Distribution law of maximum radial velocity of fragment

图 7 给出了短长轴比为 0.55 的椭圆截面战斗部在不同起爆方式下爆轰波传播至最大速度破片处的波形形貌。从图中可以看出, 在不同起爆方式的作用下, 经过轴向的传播演化, 爆轰波传播至最大破片速度截面处时, 波阵面已基本趋于平面波, 呈滑移状态扫过破片, 爆轰波对该截面上破片的驱动作用无明显差异, 因此导致了不同起爆方式下破片的径向速度分布规律基本一致。

从图 6(b) 中可以看出, 不论在何种短长轴比下, 端面起爆时破片的整体径向速度均明显大于其余几种起爆方式, 且端面单点起爆时破片整体径向速度最低。为了进一步分析上述差异, 提取了不同起爆方式下最大速度截面上破片的径向平均速度, 如图 8 所示。从图中可以看出, 端面起爆时的破片平均速度最高, 单点起爆最低, 且随着起爆点数量增加, 破片整体平均速度逐渐增大。

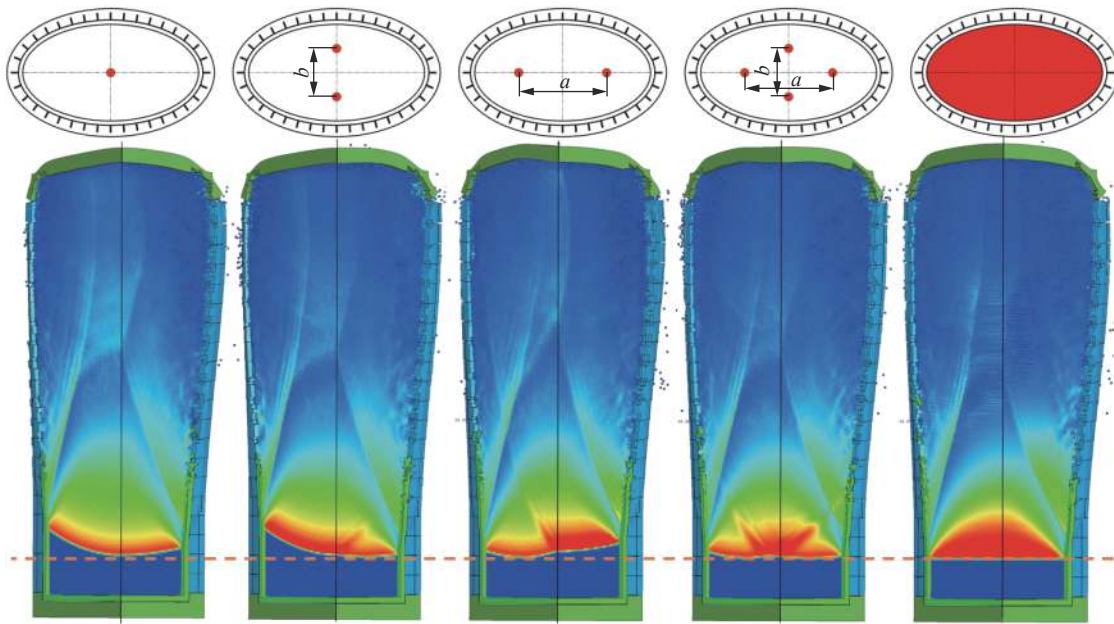


图 7 不同起爆方式下爆轰波的轴向演化

Fig. 7 Axial evolution of detonation wave under different initiation modes

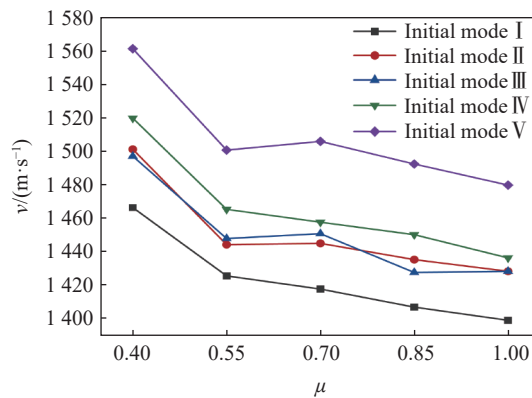


图 8 不同起爆方式下最大速度截面上破片的径向平均速度

Fig. 8 Average radial velocity of fragments on the maximum velocity section under different initiation modes

对于上述现象,以端面单点起爆和面起爆为例,分析内部装药的爆轰作用过程。现有研究表明,战斗部破片加速过程主要受破片下侧薄片装药微元的驱动作用^[32]。图 9(a)给出了两种起爆方式下最大速度截面处爆轰波及稀疏波的作用过程,图中黄色带为驱动破片的炸药微元。当来自端面的爆轰波到达破片左侧时,认为是开始驱动时刻,图中用红色虚线表示。当爆轰波扫过破片到达破片右侧时,爆轰波(红色实线)对破片的作用完成,此后进入爆轰产物加速阶段。在一端起爆时,来自端面的稀疏波紧跟在爆轰波之后,同时,爆轰产物膨胀产生中心稀疏波,爆轰波扫过炸药微元后立即进入稀疏衰减阶段。因此,在端面单点起爆作用下,破片在开始受驱动时刻,炸药微元中即已有部分炸药进入稀疏衰减阶段(图中蓝色区域),而端面起爆时则没有。结合图中给出的两种起爆方式下的爆轰压力曲线,可以看出,在爆轰波作用完成后,端面起爆相较于单点起爆爆轰产物存在明显的压力增益区域,因此,导致了端面起爆时最大速度截面上破片整体的平均速度大于端面单点起爆。

根据上述分析,图 9(b)进一步给出了单点起爆、多点起爆和端面起爆作用下,开始驱动时刻的炸药微元受稀疏波影响的区域对比。从图中可以看出,随着端面起爆点的增多,开始驱动时刻炸药微元受稀

疏波影响区域逐渐减小, 即随着端面起爆点的增多, 破片整体平均速度逐渐增大。该分析结果与图 8 中数值模拟结果一致。

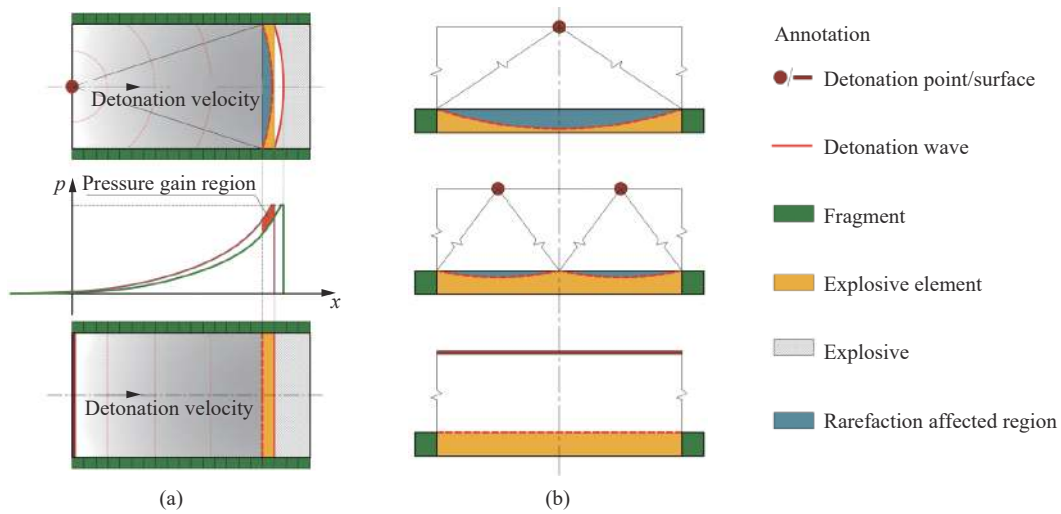


图 9 不同起爆方式下的爆轰驱动示意图

Fig. 9 Detonation drive schematics under different detonation modes

2.2.2 轴向破片速度分布

通过上述分析可知, 在战斗部端面上, 不同的起爆方式对椭圆截面战斗部最大速度截面上的破片速度分布规律无明显影响, 但不同的起爆方式对战斗部轴向破片速度分布的影响规律有待进一步探索。本节中将对不同起爆方式下战斗部轴向破片速度变化规律开展分析, 考虑到计算工况的多样性, 以短轴和长轴两列破片为研究对象, 对比分析不同短长轴比战斗部在不同起爆方式下轴向破片速度的分布规律。

图 10 给出了不同起爆方式下战斗部短轴方向的破片速度沿轴向的变化曲线。从图中可以看出, 短长轴比不变时, 受端面稀疏波影响, 战斗部在不同的端面起爆方式下, 短轴方向破片速度沿轴向变化规律基本一致, 均呈现先增大后减小的变化趋势, 且随着短长轴比的增大, 短轴方向的破片速度整体上呈现逐渐减小的趋势。

图 11 给出了不同起爆方式下战斗部长轴方向的破片速度沿轴向的变化曲线。与短轴方向类似, 长轴方向破片的速度沿轴向基本呈现先增大后减小的变化趋势。然而, 与短轴方向的破片不同的是, 在 $\mu=0.40$ 时, 端面单点起爆 (起爆方式 I) 和短轴中点双点起爆 (起爆方式 II) 时, 战斗部长轴方向的破片出现速度稳定区域 (图中蓝色虚线框选区域), 且稳定速度明显高于其余 3 种起爆方式。同时, 随着短长轴比的增大, 速度稳定区域逐渐消失, 但在靠近起爆端依然存在速度增益区域 (图中灰色虚线框区域), 且速度增益区域逐渐减小。

战斗部在一端起爆时, 不同的起爆点位置会改变爆轰波对于长轴方向破片的入射方向, 虽然当爆轰波传至非起爆端时, 爆轰波基本以平面波形式扫掠破片, 但在靠近起爆端处, 尤其在中心点起爆时, 短长轴比越小, 爆轰波对于长轴方向的破片入射角越大, 因此, 为消除爆轰波入射角的影响, 引入中心线起爆对比分析, 数值模拟模型如图 12 所示。

图 13 给出了不同短长轴比椭圆截面战斗部在中心线起爆下长轴和短轴的破片速度分布。从图中可以看出, 在长轴方向, 破片速度存在明显的稳定区域 (图中蓝色阴影部分), 随着短长轴比的增大, 稳定区域逐渐减小, 且整体速度逐渐增大, 直至短长轴比为 1.00 时, 速度稳定区域基本消失。而在短轴方向, 并未出现速度稳定区域, 这一现象与端面点起爆时一致。在此基础上, 进一步探讨长轴方向破片速度出现稳定区域的原因。

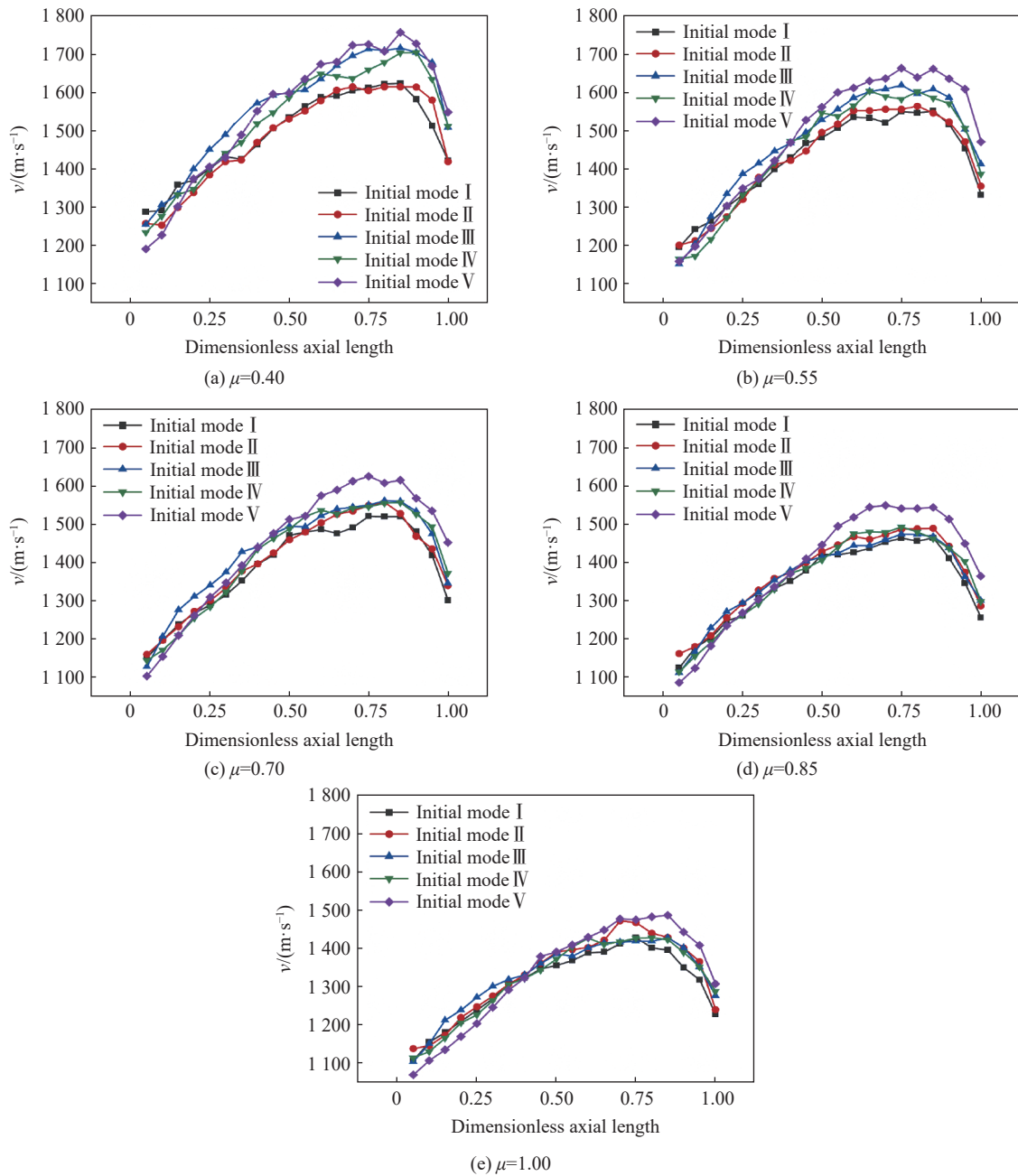


图 10 不同起爆方式下短轴方向破片的速度分布

Fig. 10 Axial velocity distribution of fragments in the minor axis direction under different initiation modes

炸药驱动战斗部壳体加速过程可分为爆轰波加速和爆轰产物加速两个阶段^[33]。图 14 给出了中心线起爆作用下短长轴比为 0.55 时, 战斗部中间截面处不同方位角破片的加速过程。从图 14 (a) 中可以看出, 不同方位角破片在爆轰波的作用下, 速度迅速增大至 800 m/s, 随后在爆轰产物的作用下进入缓慢增长阶段, 进而逐渐趋于稳定。此外, 尽管破片最终稳定速度由长轴至短轴方向逐渐增大, 但在爆轰波加速阶段破片速度并无明显差异。图 14 (b) 单独给出了短轴和长轴方向破片的加速时程曲线。从图中可以看出, 短轴和长轴方向的破片受爆轰产物加速时间存在明显差异, 长轴方向破片加速时间为 11.0 μs , 而短轴方向破片加速时间达到了 23.3 μs 。因此, 爆轰产物对椭圆截面战斗部不同方位角处破片的加速时间差异导致了最终径向速度分布的差异。

根据 Guo 等^[15]的研究结果可知, 端面稀疏波的影响距离与破片加速时间呈正相关, 因此, 在椭圆截

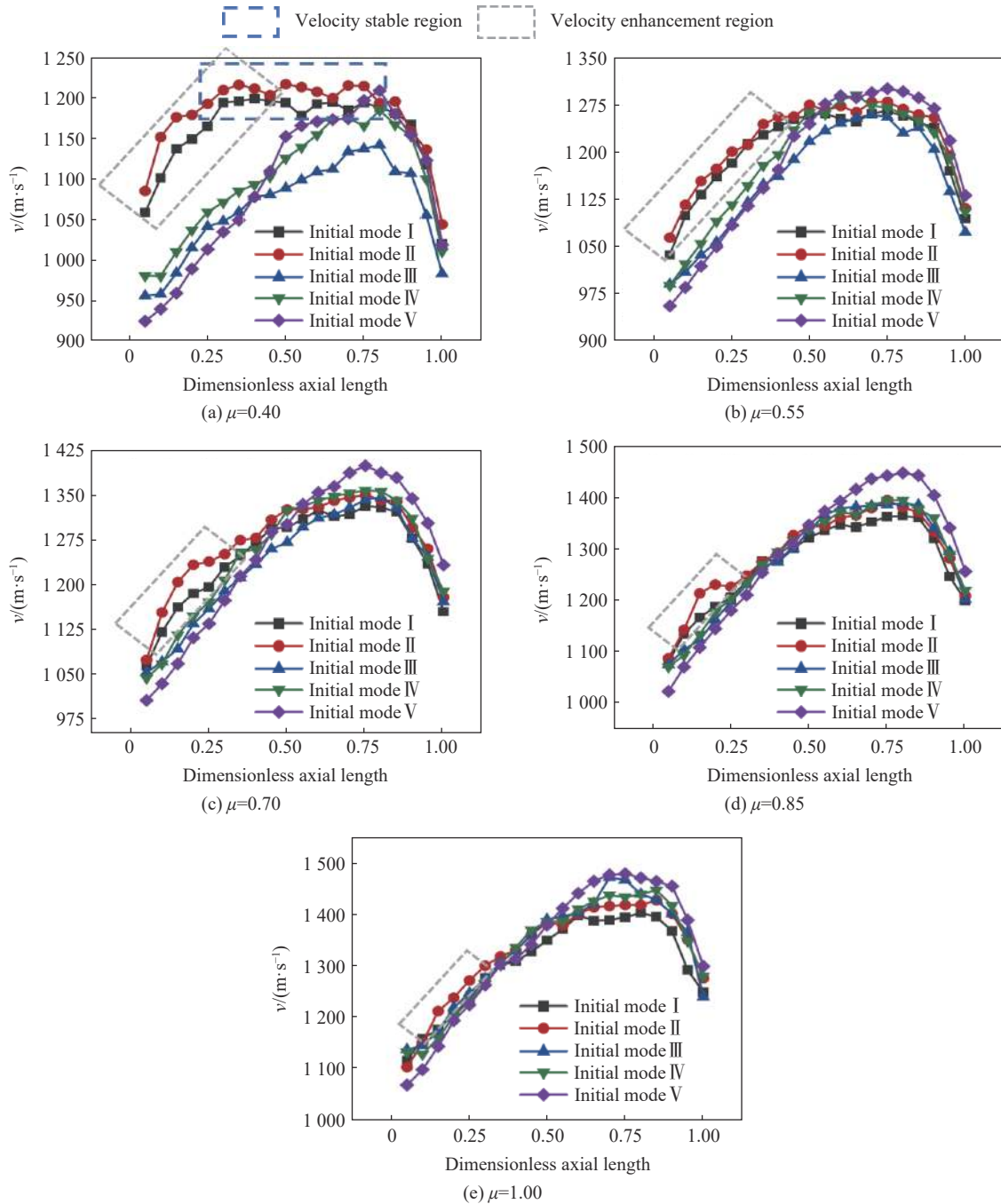


图 11 不同起爆方式下长轴方向破片速度分布

Fig. 11 Axial velocity distribution of fragments in the major axis direction under different initiation modes

面战斗部中, 尽管长轴方向相对于短轴具有更多的装药, 但驱动破片作用时间明显小于短轴方向, 即端面稀疏波对长轴方向的破片速度影响距离小于短轴方向, 导致了在长轴方向破片速度出现稳定平台阶段, 而短轴方向则没有。此外, 随着短长轴比的增大, 短轴方向破片的加速时间逐渐减小, 而长轴方向的破片加速时间逐渐增大, 导致其稀疏波影响逐渐加剧, 即速度稳定区域逐渐减小, 如图 13(a) 所示。

此外, 从图 11(a) 可知, 当起爆点仅位于短轴轴线上 (中心单点起爆、短轴双点起爆) 时, 靠近起爆端的破片轴向速度明显大于其他 3 种起爆方式 (长轴中点起爆、短长轴中点四点起爆、面起爆), 在逐渐远离起爆面时, 不同起爆方式下长轴方向的破片速度差异逐渐减小。为此, 图 15 给出了端面单点起爆和长轴中点起爆时长轴截面上的爆轰波演化过程。从图中可以看出, 起爆后爆轰波呈球形向外扩张, 随后

爆轰波与长轴方向壳体作用, 端面单点起爆时爆轰波早期入射角明显大于长轴中点双点起爆 (图中 t_2 时刻)。随着爆轰波的传播, 中心单点起爆时爆轰波对壳体的入射角逐渐增大, 在靠近非起爆端时基本演化为滑移爆轰 (图中 t_3 时刻)。

结合前述分析可知, 长轴方向壳体破片的加速贡献主要来自于爆轰波作用, 爆轰产物贡献占比较小。同时, 爆轰波对介质的驱动能力与入射角呈负相关^[34], 因此, 端面中心单点起爆相较于长轴中点双点起爆对长轴方向靠近起爆端破片具有更强的驱动能力, 进而导致了其具有更高的破片速度。在靠近非起爆端, 爆轰波入射角差异逐渐减小, 破片速度又趋于一致。

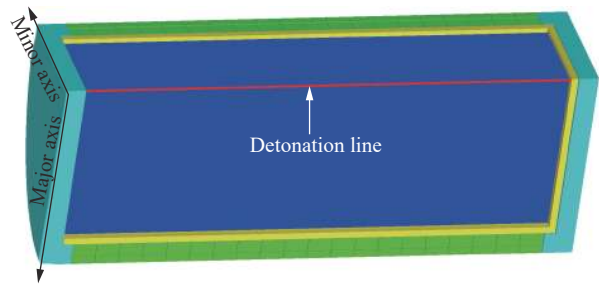


图 12 中心线起爆的数值模拟模型

Fig. 12 Numerical simulation model of centerline initiation

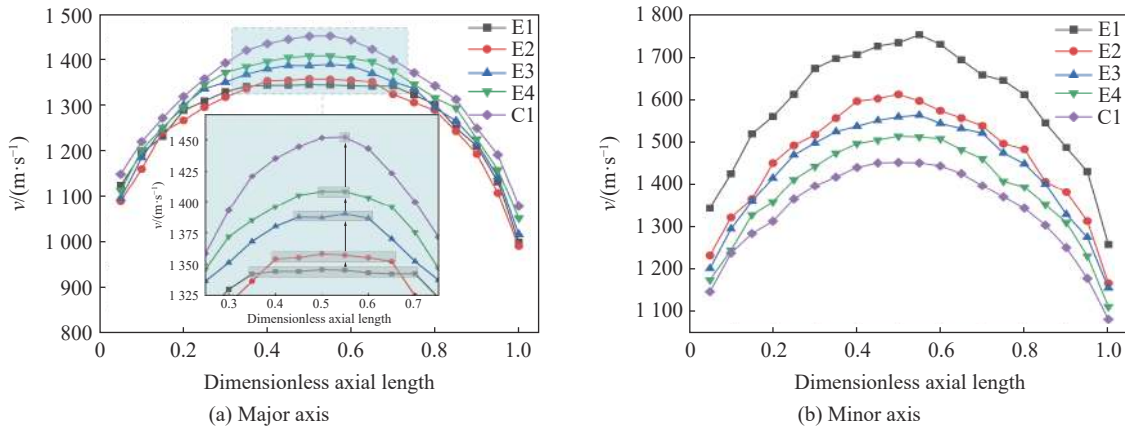


图 13 中心线起爆时短长轴破片的轴向速度分布

Fig. 13 Axial velocity distribution of minor and major axis fragments under centerline initiation

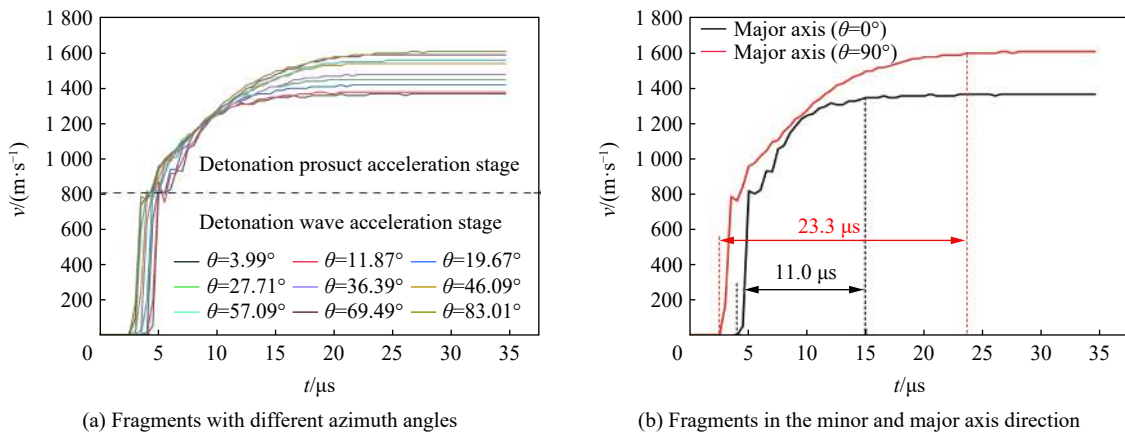


图 14 $\mu=0.55$ 时破片的加速过程

Fig. 14 Fragment acceleration process at $\mu=0.55$

上述以中心单点起爆和长轴中点双点起爆为例, 分析了起爆点分别位于短轴轴线和长轴轴线上时长轴方向破片速度沿轴向的分布差异。结果表明, 多点对称起爆时, 起爆点位于短轴轴线上相较于位于长轴轴线上靠近起爆端处长轴方向的破片会具有相对较高的速度, 而对靠近非起爆端处的破片速度无明显影响。短轴方向破片加速受爆轰产物的作用较大, 因此, 起爆点位置对短轴方向的破片速度分布无明显影响。

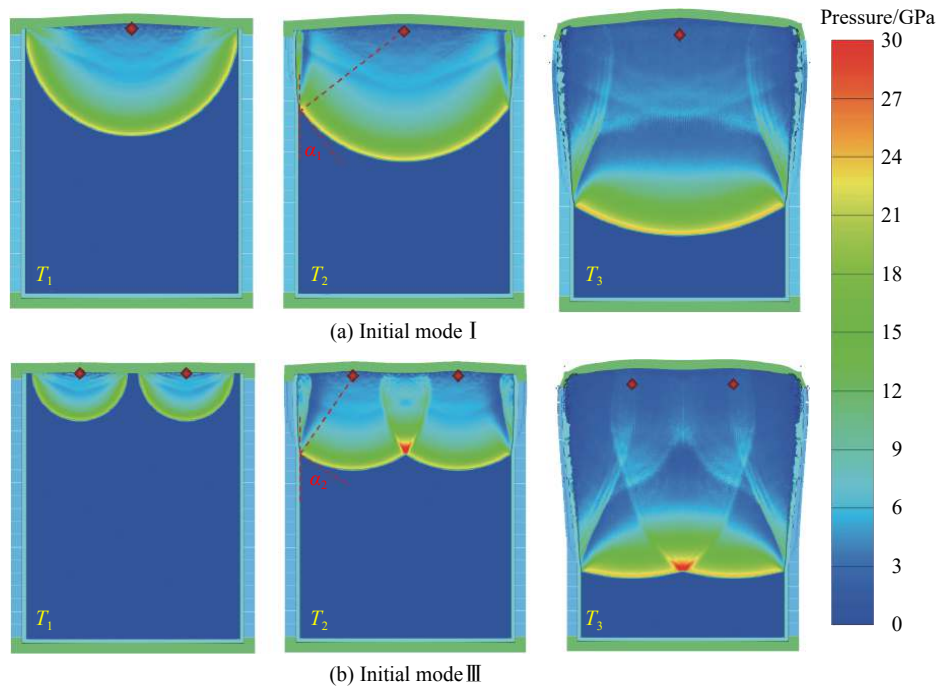


图 15 2 种典型起爆方式下长轴截面爆轰波传播过程

Fig. 15 Propagation process of detonation wave in major axis cross section under two typical initiation modes

2.3 爆炸能量输出特性

图 16 给出了不同起爆方式下椭圆截面战斗部的装药能量分配。从图中可以看出, 椭圆截面战斗部

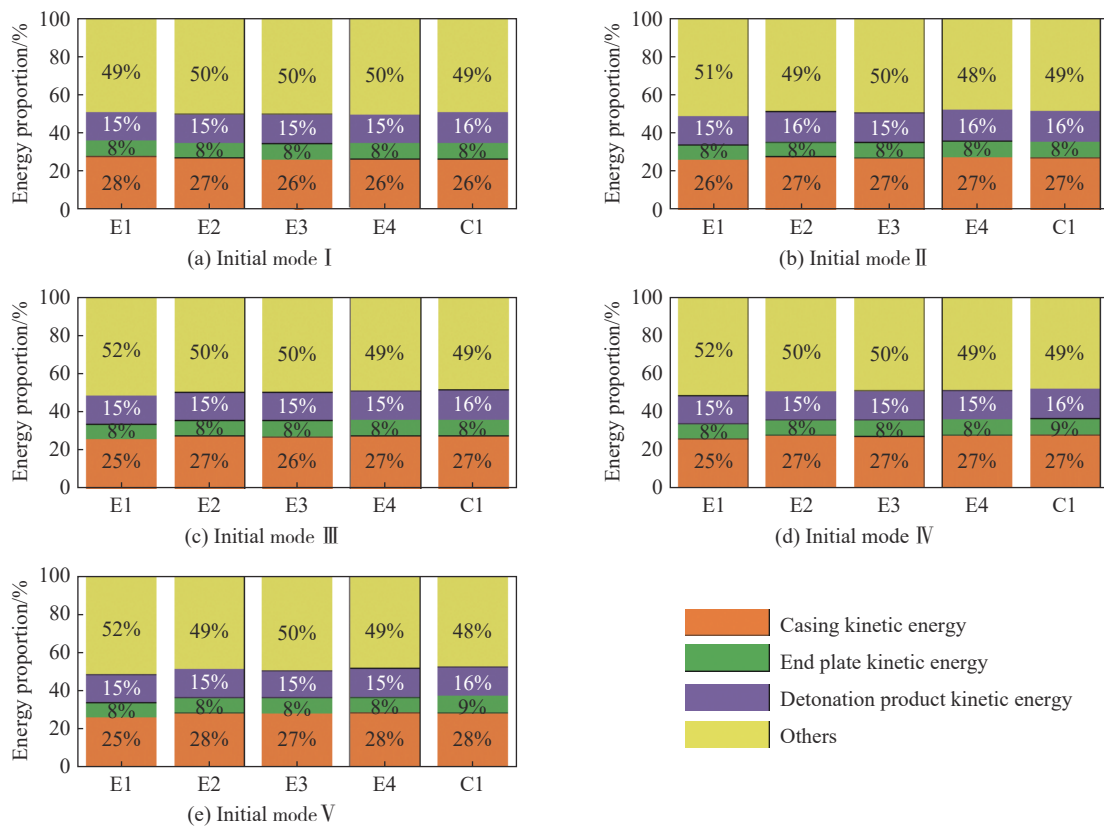


图 16 不同起爆方式下椭圆截面战斗部的能量分配

Fig. 16 Energy distribution of elliptical section warhead under different detonation modes

装药能量主要转化为壳体动能、端盖动能、爆轰产物动能以及其他能量 4 个部分。在不同的端面起爆方式下, 不同短长轴比的椭圆截面战斗部爆炸能量分配基本一致。其中, 27% 左右的装药能量转化为战斗部壳体动能, 8% 左右的能量转化为端盖动能, 15% 左右的能量转化为爆轰产物动能, 而剩余 50% 左右的其他能量以内能、壳体断裂能、塑性变形能以及空气冲击波等形式被消耗。

结合 2.2 节分析, 虽然不同的起爆方式会在一定程度上改变椭圆截面战斗部的径向和轴向速度分布规律, 且端面起爆时会对椭圆截面战斗部最大径向速度平均值有所增益 (图 8), 以及起爆点在短轴上时会提高长轴方向靠近非起爆端的破片速度 (图 11), 但从整体上来看, 壳体破片动能占比却基本一致。因此, 针对椭圆截面战斗部, 不同的端面起爆方式无法提高战斗部的整体杀伤效能, 但需要注意的是, 此处获得的能量分配占比仅针对本文中的装药条件, 对于不同装药类型的战斗部结构, 装药能量分配比例还有待进一步探索。

3 结 论

建立了 5 种不同短长轴比椭圆截面战斗部的数值模拟模型, 基于试验结果验证了数值模拟方法的可靠性, 开展了端面中心单点、短 (长) 轴中点双点、短长轴中点四点以及端面面起爆 5 种起爆方式下椭圆截面战斗部的破片速度分布计算, 具体结论如下。

(1) 椭圆战斗部在不同端面起爆方式下径向最大速度截面上的破片速度分布规律基本一致, 均呈现由长轴至短轴方向对数增长, 且随着短长轴比的增大, 短长轴方向的破片速度差值逐渐减小。

(2) 不同起爆方式下, 椭圆截面战斗部最大速度截面上的破片径向速度的平均值存在明显差异, 具体表现为端面起爆时的破片径向平均速度最高, 单点起爆时最低, 且随着起爆点数量的增加, 最大径向平均速度逐渐增大。

(3) 受端面稀疏波的影响, 不同方位角最大破片速度均出现在靠近非起爆端 1/4 处, 且起爆点在短轴轴线上相较于在长轴轴线上会提高靠近起爆端长轴方向的破片速度, 但短轴方向的破片速度沿轴向的分布规律无明显差异。

(4) 椭圆截面战斗部在爆炸驱动下的破片动能占装药能量的 27%, 端盖动能占比 8%, 且起爆方式以及战斗部截面短长轴比的改变不影响其爆炸能量的分配。

参考文献:

- [1] 杨祥, 武海军, 皮爱国, 等. 椭圆截面杀伤战斗部破片初速沿周向分布规律 [J]. *北京理工大学学报*, 2018, 38(S2): 178–183. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.s2.040.
YANG X, WU H J, PI A G, et al. Fragment velocity distribution of elliptical cross-section killing warhead along circumference [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(S2): 178–183. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2018.s2.040.
- [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. On the pattern of radial distribution pattern of initial velocities of fragments under asymmetrical initiation [J]. *Acta Armamentarii*, 1993(S1): 12–16.
- [3] RESNYANSKY A, WILDEGGER-GAISSMAIER A E, KATSELIS G. Directional fragmentation warheads: a theoretical and experimental investigation [C] // 18th International Symposium on Ballistics. San Antonio, TX, USA, 1999: 543–550.
- [4] HELD M. Velocity enhanced warheads [J]. *Journal of Explosives and Propellants*, 2001, 17(2): 1–12.
- [5] HELD M. Aimable fragmenting warhead [C] // 13th International Symposium on Ballistics. Stockholm, Sweden: National Defence Research Establishment, 1992: 539–548.
- [6] HUANG G Y, LI W, FENG S S. Fragment velocity distribution of cylindrical rings under eccentric point initiation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(2): 215–220. DOI: 10.1002/prop.201400180.
- [7] GURNEY R W. The initial velocities of fragments from bombs, shells and grenades: report No 405 [R]. Aberdeen Proving Ground, MD: Ballistic Research Laboratories, 1943.

- [8] LI W, HUANG G Y, FENG S S. Effect of eccentric edge initiation on the fragment velocity distribution of a cylindrical casing filled with charge [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 80: 107–115. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.01.007.
- [9] LI Y, LI Y H, WEN Y Q. Radial distribution of fragment velocity of asymmetrically initiated warhead [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 99: 39–47. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.09.007.
- [10] LI Y, LI X G, XIONG S H, et al. New formula for fragment velocity in the aiming direction of an asymmetrically initiated warhead [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2018, 43(5): 496–505. DOI: 10.1002/prop.201800003.
- [11] LI Y, XIONG S H, LI X G, et al. Mechanism of velocity enhancement of asymmetrically two lines initiated warhead [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122: 161–174. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.07.011.
- [12] LI Y, CHENG L, WEN Y Q. Fragment velocity formula for reverse detonation driving with opposite initiation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(12): 1931–1936. DOI: 10.1002/prop.202000162.
- [13] LI Y, LI X G, WEN Y Q, et al. Detonation driving rules for cylindrical casings under asymmetrical multipoint initiations [J]. *Defence Technology*, 2023, 23: 35–49. DOI: 10.1016/j.dt.2022.10.001.
- [14] AN X Y, DONG Y X, LIU J Y, et al. Fragment velocity characteristics of warheads with a hollow core under asymmetrical initiation [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(8): 1049–1058. DOI: 10.1002/prop.201800382.
- [15] GUO Z W, HUANG G Y, ZHU W, et al. Mechanism and suppression of the effect of axial rarefaction waves on the eccentric initiation effect [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 124: 37–47. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.10.009.
- [16] GUO Z W, HUANG G Y, ZHU W, et al. The fragmentation of D-shaped casing filled with explosive under eccentric initiation [J]. *Defence Technology*, 2018, 14(5): 417–421. DOI: 10.1016/j.dt.2018.06.006.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] GUO Z W, HUANG G Y, LIU H, et al. Effects of shell thickness on the fragment velocity distribution of D-shaped casing filled with explosive [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1721(1): 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/1721/1/012018.
- [20] DING L L, LI Z D, LIANG M Z, et al. The dispersion rule of fragments about the asymmetric shell [J]. *Shock and Vibration*, 2017, 2017: 9810978. DOI: 10.1155/2017/9810978.
- [21] DING L L, LI Z D, LU F Y, et al. Rapid assessment of the spatial distribution of fragments about the D-shaped structure [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(5): 1–16. DOI: 10.1177/1687814018777594.
- [22] DING L L, LI Z D, LU F Y, et al. Research into the energy output of asymmetric cylindrical structure under internal explosion loading [J]. *Energies*, 2018, 11(4): 967. DOI: 10.3390/en11040967.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 武敬博, 苟瑞君, 郑俊杰, 等. 六棱柱形战斗部预制破片驱动数值模拟与试验 [J]. *火炸药学报*, 2016, 39(3): 89–94. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2016.03.018.
- WU J B, GOU R J, ZHENG J J, et al. Numerical simulation and experiment of premade fragments droved by hexagonal prism shaped warhead [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2016, 39(3): 89–94. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2016.03.018.
- [27] DENG X M, WU H J, YANG X, et al. Preformed fragment velocity distribution of elliptical cross-section projectile [J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2022, 19(1): e423. DOI: 10.1590/1679-78256835.

- [28] 邓宇轩, 张先锋, 冯可华, 等. 椭圆截面战斗部爆炸驱动破片作用过程的数值模拟 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(2): 025104. DOI: 10.11858/gywlxb.20210856.
DENG Y X, ZHANG X F, FENG K H, et al. Numerical simulation of fragmentation process driven by explosion in elliptical cross-section warhead [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(2): 025104. DOI: 10.11858/gywlxb.20210856.
- [29] 邓宇轩, 张先锋, 刘闯, 等. 椭圆截面战斗部爆轰驱动壳体的断裂及毁伤特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(9): 091412. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0135.
DENG Y X, ZHANG X F, LIU C, et al. Casing fracture and damage characteristics of an elliptical cross-section warhead under explosive loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(9): 091412. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0135.
- [30] 姜斌, 沈波, 薛再清, 等. 椭圆形截面杀伤战斗部破片初速分布特性研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(3): 149–155. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.03.023.
JIANG B, SHEN B, XUE Z Q, et al. Study on distribution characteristics of initial velocity of elliptic killing warhead fragment [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(3): 149–155. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2022.03.023.
- [31] DYNAMICS C. Release 14. 0 documentation for ANSYS AUTODYN [Z]. 2011.
- [32] 黄广炎, 刘沛清, 冯顺山. 基于战斗部微圆柱分析的破片飞散特性研究 [J]. *兵工学报*, 2010, 31(S1): 215–218.
HUANG G Y, LIU P Q, FENG S S. Research on dispersion characteristic of fragment based on micro-column analyses for warhead [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(S1): 215–218.
- [33] 高月光, 冯顺山, 刘云辉, 等. 不同端盖厚度的圆柱形装药壳体破片初速分布 [J]. *兵工学报*, 2022, 43(7): 1527–1536. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0443.
GAO Y G, FENG S S, LIU Y H, et al. Initial velocity distribution of fragments from cylindrical charge shells with different thick end caps [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(7): 1527–1536. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0443.
- [34] 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.

(责任编辑 曾月蓉)