

环向聚焦战斗部驱动 Zr 基非晶合金破片作用特性研究*

王彬州¹, 熊玮¹, 孟德垚¹, 苏靖轶¹, 陈学秒², 张先锋¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 冲击波物理与爆轰物理全国重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: Zr 基非晶合金具有高强度、高硬度等优异力学性能, 作为战斗部破片毁伤元具有重要应用价值。为研究 Zr 基非晶合金破片在环向聚焦装药爆轰驱动下的飞散特性和变形破碎行为, 开展了 $\Phi 80$ mm 圆柱形与喇叭形环向聚焦装药结构战斗部驱动 $\Phi 8$ mm $\times$ 8 mm 圆柱 Zr 基非晶合金破片静爆试验, 获得两种装药结构下破片的空间分布特性, 并使用软回收装置对爆轰驱动的破片进行了回收。结合数值模拟方法, 分析了装药母线形状对破片飞散行为的影响规律, 探究了隔爆层厚度对破片破碎行为的作用特性。研究表明: 针对所开展试验与模拟结构, 喇叭形环向聚焦装药相较于圆柱装药结构可显著降低破片飞散角, 在聚焦曲率半径为 600 mm 时, 70%破片所在的聚焦带宽度减小 38.4%。在隔爆层厚度为 8 mm 时, 破片虽发生轻度破碎, 但主体破片仍能侵彻并贯穿 3 mm 厚 Q235 钢靶。在一定范围内, 减小聚焦母线曲率半径有利于破片汇聚, 但曲率半径过小会导致破片间过度挤压而破碎; 适当减小装药上端直径既可使聚焦带向靶面中心区域移动, 也有利于改善聚焦带内破片分布的均匀性。由于 Zr 基非晶合金破片在爆轰驱动中易发生破碎, 通过控制隔爆层厚度可对其破碎程度进行调控。实现 Zr 基非晶合金破片相对完整驱动的最佳隔爆层厚度为 8 mm, 若厚度小于该值, 破片将出现严重破碎, 若厚度大于该值, 又会增加速度损失。研究成果可为 Zr 基非晶合金材料在杀爆战斗部的工程应用提供数据和技术支撑。

关键词: 聚焦战斗部; Zr 基非晶合金; 爆轰驱动; 数值模拟

中图分类号: O385

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Study on the detonation driving characteristics of Zr-based amorphous alloy fragments by circumferentially focusing charge structure

WANG Binzhou¹, XIONG Wei¹, MENG Deyao¹, SU Jingyi¹,

CHEN Xuemiao², ZHANG Xianfeng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Zr-based amorphous alloy has excellent mechanical properties such as high strength and high hardness. It has important

*收稿日期: 2026-05-14; 修回日期: 2026-07-07;

基金项目: 冲击波物理与爆轰物理全国重点实验室开放基金资助(项目编号 2025JCJQLB10404); 国家自然科学基金(12141202, 12372359)

第一作者: 王彬州 (2002—), 男, 硕士研究生, bzhouwang@163.com;

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

application value as a warhead fragment damage element. To investigate the dispersion characteristics and fragmentation behavior of Zr-based amorphous alloy fragments driven by detonation of a circumferentially focusing charge, the static explosion tests of $\Phi 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ cylindrical Zr-based amorphous alloy fragments driven by $\Phi 80\text{ mm}$ cylinder and trumpet-shaped circumferentially focusing warheads were carried out, and the spatial distribution characteristics of fragments under two charge structures were obtained. Using the fragment recovery device, the detonation-driven Zr-based amorphous alloy fragments were recovered. Combined with numerical simulations, the influence of the charge generatrix shape on the dispersion behavior of the fragments was analyzed, and the effect of the flameproof layer thickness on the fragmentation behavior of the fragments was investigated. For the tested and simulated constructs, the results show that compared with the cylinder charge structure, the trumpet-shaped circumferentially focusing charge significantly reduces the fragment scattering angle. When the focusing radius of curvature is 600 mm, the width of the focusing band containing 70% of the fragments is reduced by 38.4%. Moreover, at the flameproof layer thickness of 8 mm, slight fragmentation occurs, but the main-body fragments can penetrate and damage a 3 mm thick Q235 steel target. Within a certain range, reducing the curvature radius of the focusing generatrix facilitates fragment convergence; However, if the radius is too small, it will cause excessive squeezing and fragmentation of the fragments. Appropriately reducing the diameter of the upper end of the charge can not only shift the focusing band toward the central area of the target but also improve the uniformity of fragment distribution within the focusing band. Because Zr-based amorphous alloy fragments are prone to fragmentation under detonation loading, the degree of fragmentation can be controlled by adjusting the thickness of the flameproof layer. The optimal flameproof layer thickness for achieving relatively intact driving of Zr-based amorphous alloy fragments is 8 mm; if the thickness is less than this value, the fragments will be severely fragmented; If the thickness is greater than this value, velocity loss will increase. The research results provide data and technical support for the engineering application of Zr-based amorphous alloy materials in blast-fragmentation warheads.

Key words: focusing warhead; Zr-based amorphous alloy; detonation driving; numerical simulation

现代战争中, 导弹、飞机、无人机等典型空中目标的机动性能和防护能力不断提高, 对战斗部在极短作用时间和有限空间内形成高效局部毁伤提出了更高要求。聚焦战斗部通过采用内凹型的装药母线控制破片飞散汇聚于一小面积、高密度的聚焦带内, 具有更高的区域破片密度和能量利用率等优点, 在防空反导领域有广泛的应用前景^[1-3]。若在聚焦战斗部中采用兼具力学强度和化学反应双重特性的活性材料作为破片毁伤元^[4], 能够使破片群的动能作用与反应释能在聚焦窄带内集中释放, 从而达到对来袭目标解体、燃烧以至爆炸等完全毁伤效果, 为提升破片战斗部的局部高效毁伤能量提供了新的技术途径。

Zr 基非晶合金材料作为一种典型的活性金属材料, 具有高强度、高硬度等优异的力学性能, 以及高能量密度和快速释能特性^[5], 在高速侵彻和贯穿靶板过程中会发生爆燃反应^[6], 在提升侵彻破坏与后效毁伤能力方面潜力巨大^[7]。张云峰等^[5]和王佳敏等^[8]通过 14.5 mm 弹道枪装置开展了 Zr 基非晶合金准密闭冲击超压试验, 发现 Zr 基非晶破片在侵彻过程中发生剧烈氧化反应并伴有明显火光, 并结合试验确定了其冲击反应阈值速度, 明确了反应程度随冲击速度升高而增大的规律。罗普光等^[9]使用 12.7 mm 弹道枪发射 Zr 基非晶合金破片侵彻两层间隔靶, 结果表明 Zr 基非晶对靶后目标有较强的扩孔毁伤效果。张玉令等^[10]将 W 骨架/Zr 基非晶合金复合材料作为榴弹的预制破片开展了爆炸试验, 通过高速摄影捕捉到了破片在侵彻和贯穿靶板过程中伴有强烈反应释能效果, 并且在一定条件下还能够引燃靶后棉被和油箱, 试验结果进一步印证了 Zr 基非晶合金的释能特性。

聚焦战斗部经过装药结构的优化设计能够显著提高破片分布密度, 是作为防空反导弹药发展的重要研究方向^[1]。Li 等^[11]和李翔宇等^[12]分别改变战斗部结构, 实现了在某特定角度内破片环向与轴向双向聚焦飞散。苗春壮等^[13]和张绍兴等^[14]分别研究了环向、轴向聚焦装药结构曲率半径对破片飞散特性的影响规律, 得到破片初速及飞散角均随曲率半径的增大而增大的结论。Liu 等^[15,16]基于 Shapiro 公式提出了聚焦装药结构内衬设计方法, 分别设计出破片飞散角为 5° 和 9° 的内衬结构, 并进行了试验验证。马正伟等^[17]通过数值模拟方法系统性研究了装药母线形状、破片形状、装药质量与破片质

量比等因素对破片飞散特性的影响规律。

综上所述, Zr 基非晶合金作为典型活性毁伤元材料, 现有研究主要集中于静动态力学性能^[18-20]以及释能毁伤效应^[21-24]等方面, 而作为破片毁伤元在炸药爆轰驱动下的作用特性研究尚不充分。与传统钨合金等韧性破片相比, Zr 基非晶合金具有较高强度和脆性断裂的力学特征, 在爆轰加载及汇聚过程中更易出现局部破碎, 进而直接影响后续侵彻和释能效果。因此, 如何通过聚焦战斗部装药结构和隔爆层结构调控, 在保证 Zr 基非晶合金脆性破片良好飞散特性的同时维持其主体完整性, 是实现其走向工程应用亟待解决的关键问题。本文针对 Zr 基非晶合金破片在环向聚焦战斗部中的飞散特性与变形破碎行为研究, 开展 $\Phi 80$ mm 圆柱形与喇叭形环向聚焦装药结构战斗部驱动 $\Phi 8$ mm $\times$ 8 mm 圆柱 Zr 基非晶合金破片飞散试验, 结合测速及回收手段获得破片在爆轰驱动下的空间分布与破碎回收试样。进一步采用 LS-DYNA 数值模拟软件, 基于开展试验结构分析装药母线形状对破片飞散特性的影响规律, 并确定兼顾破片聚焦效果与主体完整性的隔爆层厚度。研究结果为 Zr 基非晶合金破片在聚焦战斗部的工程应用提供试验依据和数据支撑。

1 聚焦战斗部爆轰驱动 Zr 基非晶合金破片飞散试验

1.1 战斗部结构

为研究战斗部对 Zr 基非晶合金破片的爆轰驱动行为, 开展了圆柱形和喇叭形聚焦装药结构下非晶破片飞散特性及完整性测试的静爆试验, 两种试验战斗部主要参数见表 1。圆柱形装药与喇叭形聚焦装药结构如图 1(a)所示。考虑到聚焦装药截面形状复杂, 铸药采用熔铸成型制备主装药。主装药材料为 B 炸药, 密度为 1.62 g/cm³, 采用上端面中心起爆方式。对于圆柱形装药, 其直径均为 80 mm, 高度为 120 mm, 装药质量为 980 g。对于喇叭形聚焦装药, 其下端直径 D_1 为 80 mm, 上端直径 D_2 为 70 mm, 装药母线曲率半径 R 为 600 mm, 装药高度 L 为 120 mm, 装药质量 M 为 775 g。

隔爆层采用聚氨酯弹性体材料一体加工成型, 整体呈对半剖分形式以便于装配, 如图 1(b)(c)所示。该结构分为内、外两层, 外层开设有破片槽用于镶嵌和固定预制破片; 内层起隔爆作用, 厚度取为 8 mm, 且内壁面与装药外壁面需保持贴合。针对圆柱装药与聚焦装药两种工况, 隔爆层外层分别沿圆周方向均匀开设 36 列和 34 列破片槽, 每一列布置 14 个破片, 将一列破片自上端盖至下端盖依次顺序编号, 对应的破片总数分别为 504 枚和 476 枚。破片材料采用密度为 6.13 g/cm³ 的 Zr 基非晶合金, 形状为 $\Phi 8$ mm $\times$ 8 mm 圆柱体, 单枚破片质量为 2.46 g。为减少爆轰产物压力泄露, 将预制破片设计为紧密排列的形式。试验前, 将破片粘贴于隔爆层外层破片槽内, 将开瓣式隔爆层与药柱进行贴合装配, 并用尼龙端盖固定上下端面, 战斗部装配结构如图 1(d)(e)所示。

表 1 试验战斗部参数

Table 1 Parameters of the warhead

编号	装药结构	装药质量/g	隔爆层厚度/mm	破片数量/枚	破片材料
C	圆柱形	980	8	504	ZrTiCuNiBe
F	聚焦形	775	8	476	ZrTiCuNiBe

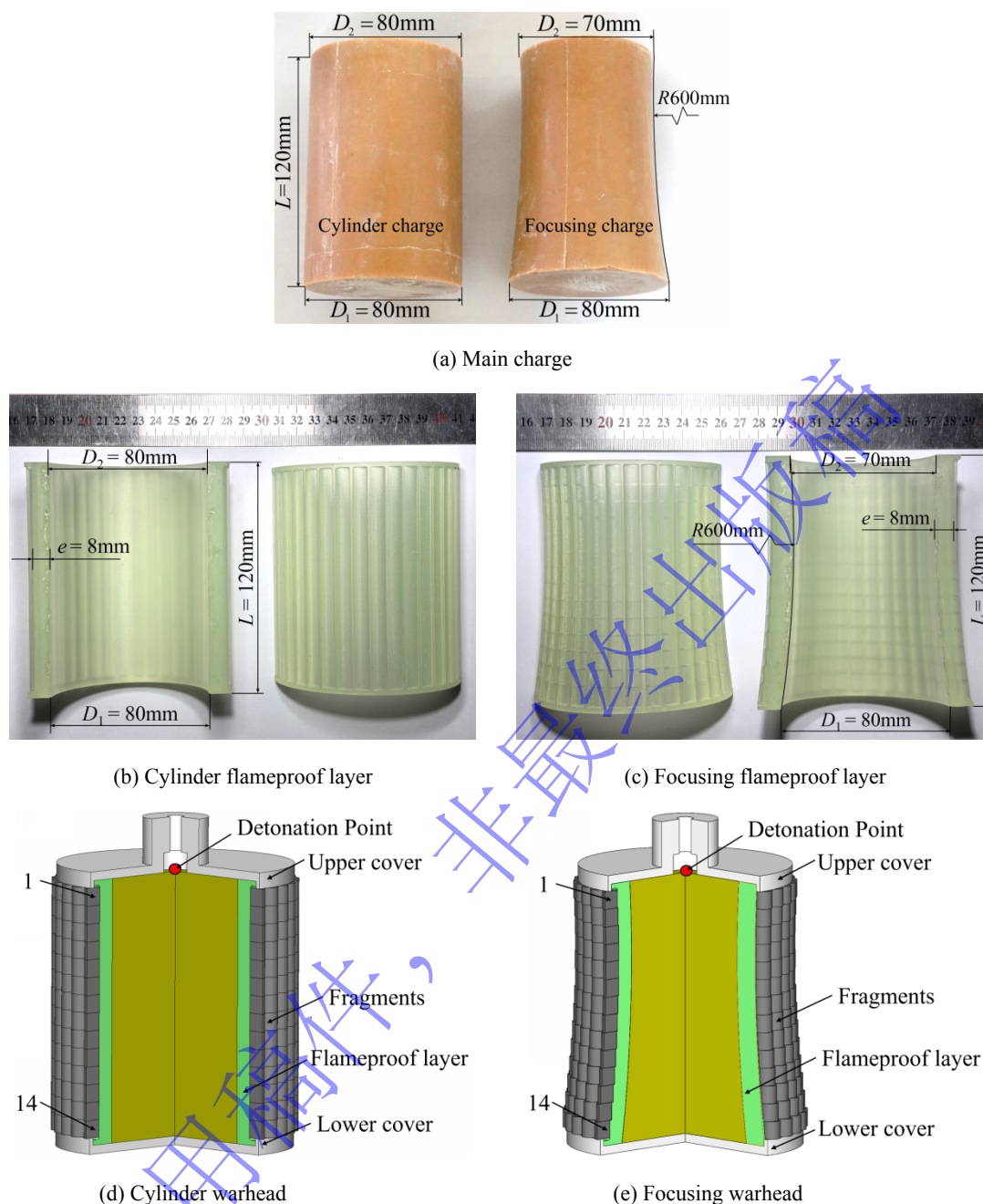
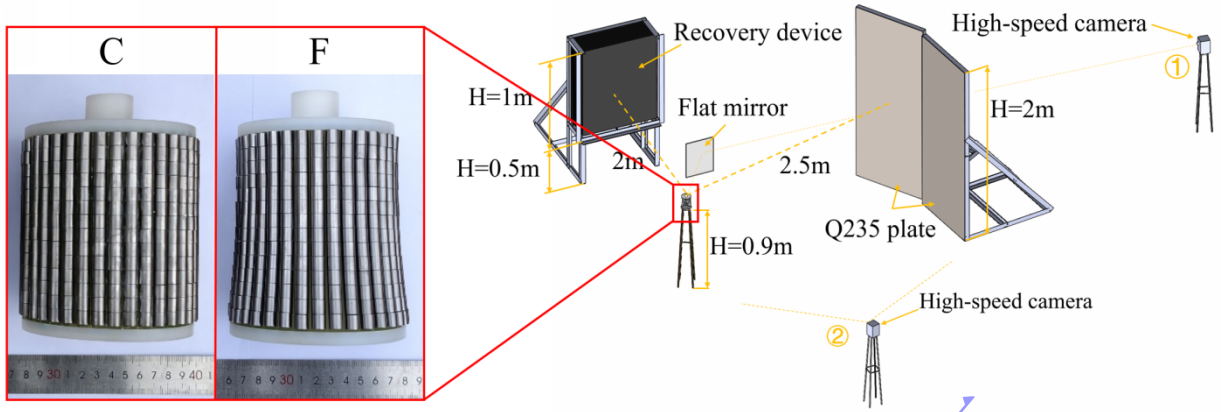


图 1 战斗部结构示意图

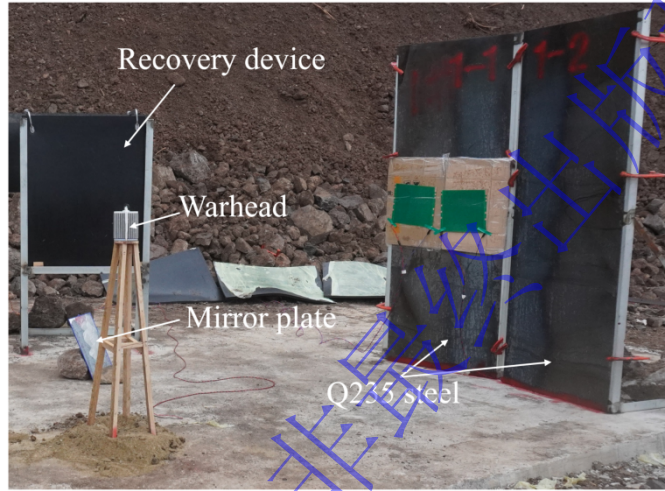
Fig.1 Structure schematic diagram of warhead

1.2 试验布置及测试方案

试验布局示意图及现场照片如图 2 所示, 定义战斗部几何中心为坐标原点, 地面为高度零面。为削弱爆炸时地面反射波影响并兼顾破片飞散范围, 战斗部放置于高度为 0.9 m 的木制支架上, 试验时尽量保证战斗部端面水平。为确保至少有一列破片上靶, 在距离战斗部 2.5 m 处并排竖置两块 2000 mm $\times$ 800 mm $\times$ 3 mm 的 Q235 钢靶作为见证靶。为获得 Zr 基非晶合金破片在爆轰加载下的剩余质量, 在距原点 2 m 处布置破片回收装置, 通过 15 层 20 mm 厚的工业橡胶板实现破片软回收。为获得破片速度分布特性, 将一台高速录像机置于见证靶后, 结合地面放置的平面镜捕捉起爆时刻, 通过起爆时刻及穿靶时刻计算出破片飞散平均速度。同时, 将另一台高速录像机放置于侧面远场位置, 用于记录起爆过程和爆轰现象。



(a) Scheme of experiment layout



(b) Photo of experiment set-ups

图2 试验现场布置

Fig.2 Layout of explosion experiments

1.3 试验结果

1.3.1 破片速度分布情况

为获得不同装药结构战斗部破片速度分布规律，通过高速录像机记录的时间间隔确定破片平均速度。试验采用 77000 fps 的帧率设置，单帧时间分辨率为 12.99 μ s。将平面镜中首次出现爆炸火光的时刻定义为起爆 0 时刻，并记录破片撞击见证靶产生穿透火光时刻，根据起爆与穿靶的时间差和距离即可计算出破片的平均速度 v_{avg} 。同时考虑到，战斗部与靶面间距较长，飞行过程中由于空气阻力导致的速度衰减较为显著，破片速度衰减公式为^[25]：

$$v = v_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

其中， v_0 为破片初速； x 为破片飞行距离； α 表示破片的衰减系数，表达式为：

$$\alpha = \rho C_d A / 2m \quad (2)$$

其中， ρ 为空气密度，取 1.225 kg/m^3 ； C_d 为阻力系数，对于马赫数 $M > 3$ 的圆柱形破片，通常取 1.16^[26]； A 为破片迎风面积，取 $6.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ； m 为破片质量，取 $2.46 \times 10^{-3} \text{ kg}$ ；将上述参数代入式(2)可求出衰减系数 $\alpha = 0.018$ ；对所有破片飞行距离近似取 $x = 2.5 \text{ m}$ ，按照式(1)即可反推出爆炸驱动后的破片初始速度 v_0 。

为准确获得各位置破片的初速，需要通过位于见证靶板后方的高速录像记录到的破片着靶先后顺序及时间，结合试验后提取靶板上每列破片孔的位置，将每列破片孔与高速录像计算的破片速度一一对应。以喇叭形聚焦战斗部为例，具体实施方法如下：如图 3(a)所示，高速录像右下角区域观测到由

平面镜反射回起爆火光，记为初始 0 时刻。随着破片向前飞散，当高速录像捕捉到首个破片穿透靶板产生的光点时（如图 3(b)右侧所示），记录此时帧数间隔，结合靶板与战斗部的实际距离，可计算出首个破片的平均速度。为确定该速度对应的具体破片空间位置，对比试验后相应靶板穿孔情况（如图 3(b)左侧所示），结合高速录像中该破片在前后帧出现的其他破片相对位置，即可将穿孔位置与所测破片一一对应。按照上述方法，逐一追踪并计算后续各破片的穿靶时刻与对应位置，直至图 3(c)所示的高速录像画面记录到所有破片完成穿靶，最终获得一列着靶破片的速度分布情况。表 2 列出了圆柱形与喇叭形聚焦战斗部一列破片在高速录像中获得的平均速度数据以及经过衰减反向校准后的破片初始速度数据。

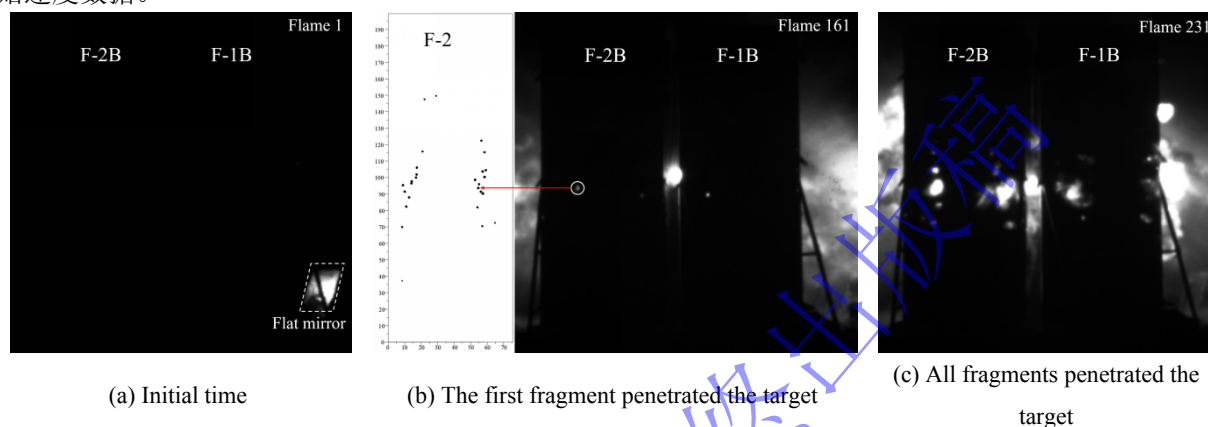


图 3 聚焦战斗部高速录像

Fig.3 High-speed photography of the focusing warhead

通过表 2 结果发现，由于两侧端盖受稀疏波影响，破片速度向两端逐渐降低。破片速度峰值出现在靠近起爆端 $1/3$ 装药长度处，圆柱形与喇叭形聚焦战斗部结构下破片最高速度分别为 1281.3 m/s 和 1213.9 m/s，速度峰值降低了 5.26%。

表 2 破片平均速度和计算初速

Table.2 Average velocity and calculated initial velocity of fragments

破片编号	v_{avg} (m/s)	v_0 (m/s)	v_{avg} (m/s)	v_0 (m/s)
1	未上靶	未上靶	未上靶	未上靶
2	1115.2	1141.4	848.7	868.6
3	1205.2	1233.5	1078.9	1104.2
4	1243.8	1273	1157.3	1184.5
5	1251.9	1281.3	1193.5	1221.5
6	1251.9	1281.3	1186.1	1213.9
7	1251.9	1281.3	1186.1	1213.9
8	1212.8	1241.3	1178.8	1206.5
9	1183.2	1211.0	1178.8	1206.5
10	1141.4	1168.2	1085.0	1110.5
11	1134.7	1161.3	1085.0	1110.5
12	1015.9	1039.7	1143.5	1170.3
13	898.3	919.4	945.3	967.5
14	未上靶	未上靶	830.3	849.8

1.3.2 破片爆轰驱动完整性及聚焦特性分析

通过距爆心 2.5 m 处的 Q235 钢见证靶上的穿孔情况，可以分析爆轰驱动下 Zr 基非晶合金破片的

完整性和飞散特性, 见证靶面穿孔情况如图 4 所示。由图 4(b)(d)所示的靶面开孔形貌细节可见, 两发试验在见证靶上产生的大部分穿孔呈规则的圆形, 直径范围为 10.2~13.3 mm, 且这类规则的主穿孔按照着靶位置和数量能够与破片初始顺序及高速录像相对应, 并标注于主孔右侧。同时, 靶面上仍可观察到少量由细小碎片撞击形成的浅坑或不规则的小孔。规则主孔表明爆轰驱动后仍具有较大剩余质量和较强侵彻能力的主体破片, 而浅坑和小孔说明破片在驱动及着靶过程中伴随一定程度局部破碎。综合上述分析, 可以认为 Zr 基非晶合金破片在爆轰驱动下发生了轻度破碎, 但破碎后的主体部分总体完整性较好, 能够实现对 3 mm 厚 Q235 钢板的侵彻破坏。

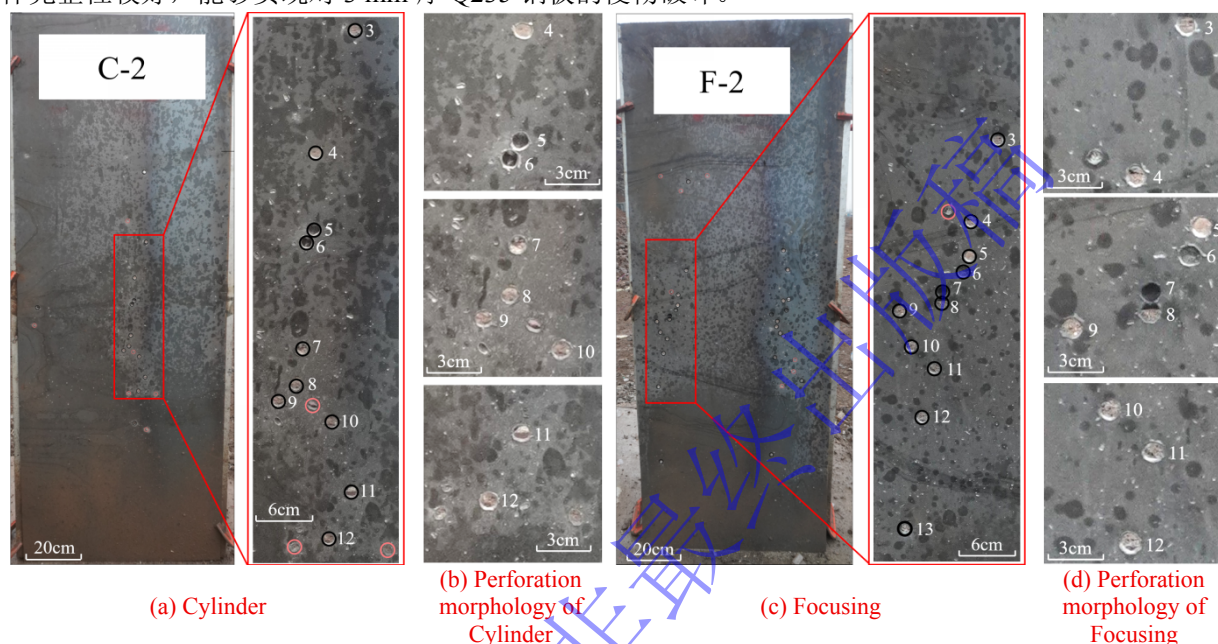
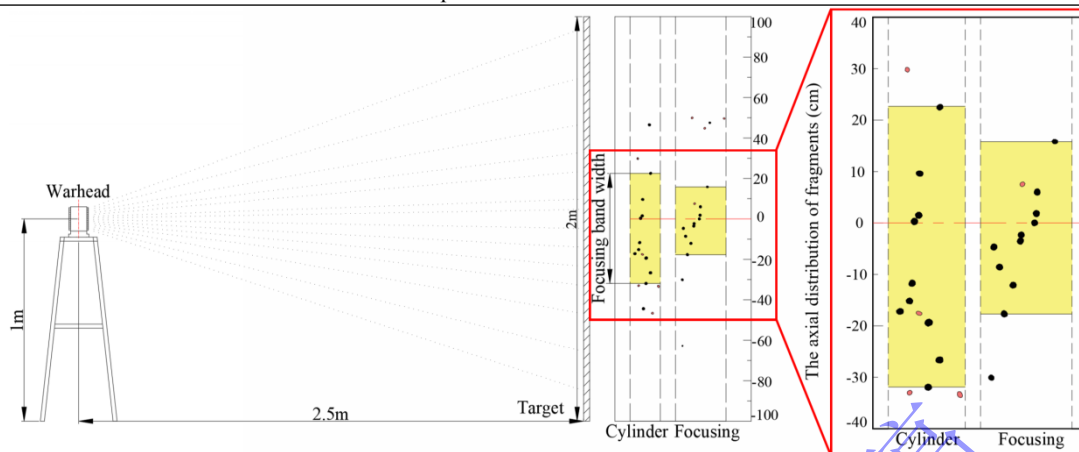


图 4 试验后见证靶照片

Fig.4 Photo of witness target after test

为对比不同装药结构战斗部破片飞散特性差异, 在图 4(a)(c)中将主体破片造成的主孔用黑色圆圈圈出, 将小碎片造成的小孔用红色圈出。从整体着靶情况来看, 单列破片设计数量为 14 枚, 圆柱形装药结构共有 12 枚破片上靶, 两端各有 1 枚破片未上靶; 聚焦装药结构共有 13 枚破片上靶, 仅上端 1 枚破片未上靶。由图 4(a)(c)右侧区域局部放大图可见, 相较于圆柱形装药结构, 喇叭形聚焦装药结构的破片着靶位置分布更为集中, 在同一靶面尺寸范围内, 两种结构对应的实际着靶破片数量分别为 11 枚与 10 枚。

为定量表征装药结构对破片环向飞散汇聚能力, 考虑到大于战斗部中心区域 70% 的端部破片受两侧稀疏波影响显著, 飞散角显著增大, 不宜作为聚焦破片纳入统计^[27]; 同时, 单列破片总数 70% 约对应连续 10 枚主体破片, 足可代表密集区域内的主要有效毁伤破片。因此, 本文定义在 2.5 m 爆心处, 在见证靶上同列破片中连续 10 个主孔所对应的最小轴向距离作为该列破片聚焦带宽度, 如图 5(a)所示。图 5(b)则展示了两发试验见证靶上单列破片的穿孔位置分布, 黄色区域表示了满足条件的 10 个主体破片开孔组成的聚焦带区域。据此计算, 圆柱形装药结构与喇叭形聚焦装药结构对应的聚焦带宽度分别为 54.4 cm 和 33.5 cm。结果表明, 喇叭形装药结构对破片飞散具有显著的汇聚效果, 相较于圆柱形装药结构, 聚焦带宽度缩减 38.4%。因为聚焦母线形状改变了爆轰波对破片的加载方向, 增大了爆轰波对破片压力的轴向分量, 从而使得破片具有汇聚飞散的特性。总的来说, 喇叭形聚焦装药能够以较小的速度损失换来更显著的破片汇聚效果。



(a) The scattering trajectory diagram of fragments

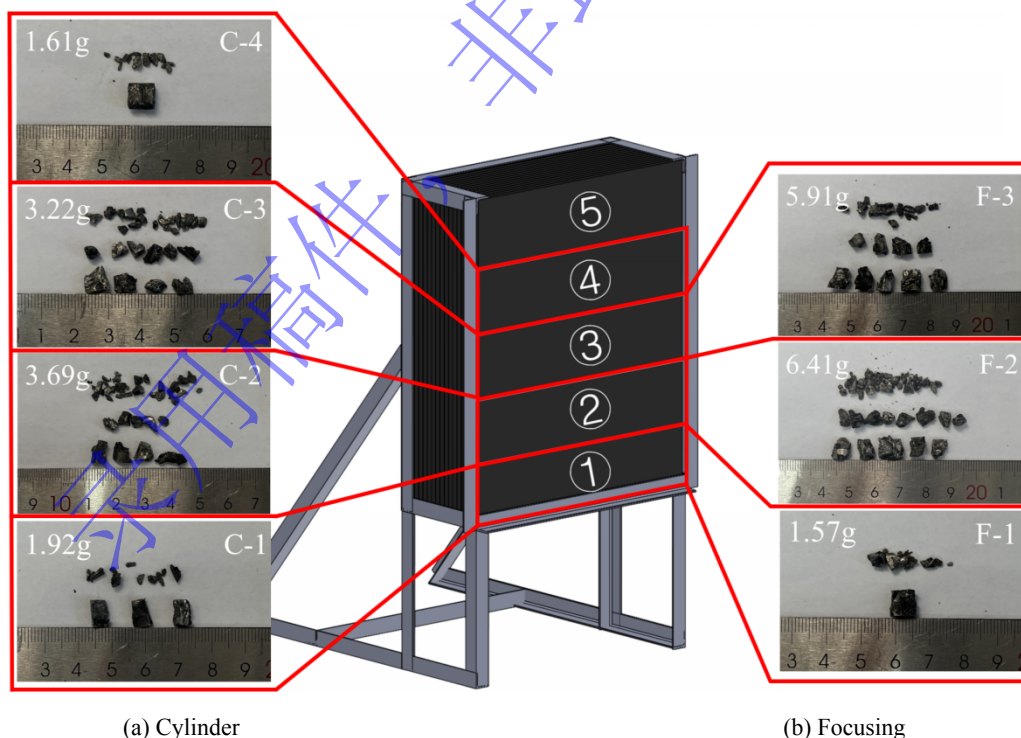
(b) The axial distribution of fragments of two charge types

图5 破片飞散过程及轴向着靶位置分布

Fig.5 The scattering trajectory and the axial distribution of fragments

1.3.3 破片回收结果分析

为进一步获得 Zr 基非晶合金破片在两种战斗部爆轰加载条件下的剩余质量, 试验时将回收橡胶靶均匀分为 5 个区域, 每个区域宽度为 20 cm, 由下至上按 1~5 依次编号, 并统计各区域回收碎片总质量。每发试验回收到 1 到 2 列破片, 圆柱形和喇叭形聚焦装药结构下回收破片形貌以及质量分布情况如图 6(a)(b)所示。可以发现, 圆柱形装药破片主要集中在 1~4 区, 其中从区域 2、3 回收的破片总质量较大, 区域 1、4 破片总质量较小。而聚焦形装药的破片大多数集中在 2、3 区域, 仅在区域 1 收到少许碎片, 符合聚焦装药使破片汇聚飞散的性质。



(a) Cylinder

(b) Focusing

图6 圆柱和聚焦战斗部回收破片形貌以及质量分布情况

Fig.6 The morphology and mass distribution of recovered fragments of cylinder and focusing warhead

从回收形貌上来看, Zr 基非晶合金破片的破碎程度存在差异, 回收样品中发现在靠近两端的 C-4 及 F-1 区域中存在个别较完整的大块破片, 其余回收样品则由若干大尺度块状碎片以及部分小碎片所

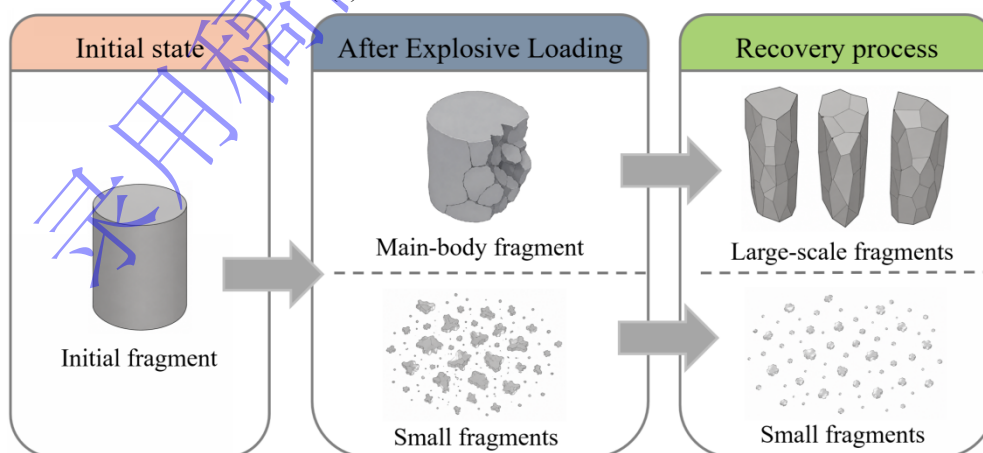
构成。在回收靶 C-1 区域中同一弹坑中回收到三枚块状碎片及部分小碎片。这三枚块状碎片部分保留了初始圆柱破片的几何特性，包括较平整的圆柱侧面和上下端面，且这三枚块状碎片能够拼凑成圆柱破片的基本结构，可以说明这三块碎片来源于同一初始破片，如图 7(a1)(a2)所示。进一步观察到，三块碎片外表面附着有黑色的回收橡胶，主要分布在三块碎片的下半部圆柱面以及底面上，而顶面和断口面则保持有基本金属光泽，如图 7(a3)所示。该现象表明这三块碎片在回收前仍以较大主体破片的形式飞散并以底面着靶。在进入回收橡胶后，由于高速侵彻产生的高回收阻力，橡胶附着于破片底部及下半部圆柱面上，同时主体破片又发生断裂；随后，侵彻速度降低导致回收阻力降低，断口面和背靶面才未附着有明显橡胶介质。若该破片是在爆轰加载过程中完全破碎并以分散碎片的形式进入回收介质中则难以形成三块可拼接且橡胶附着位置具有一致性的块状碎片。



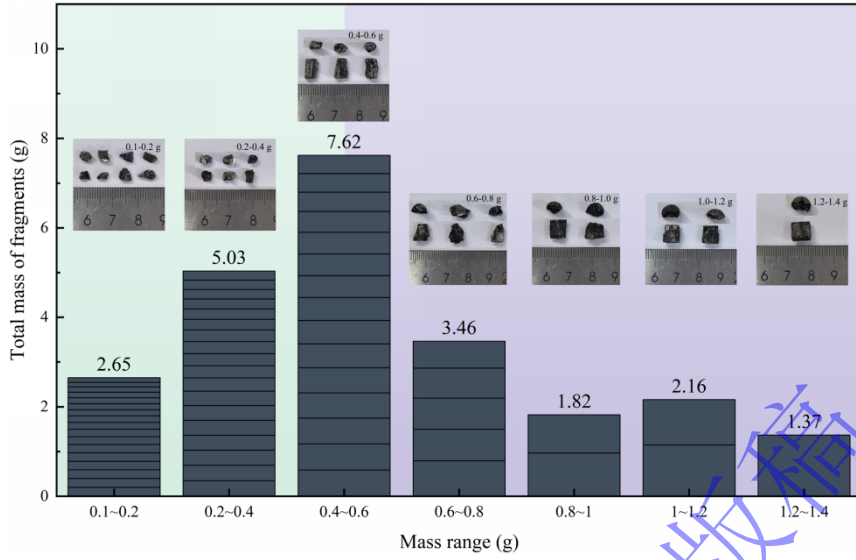
图 7 取自 C-1 区域的三枚块状碎片组合情况

Fig.7 The combination of three massive fragments taken from C-1 zone

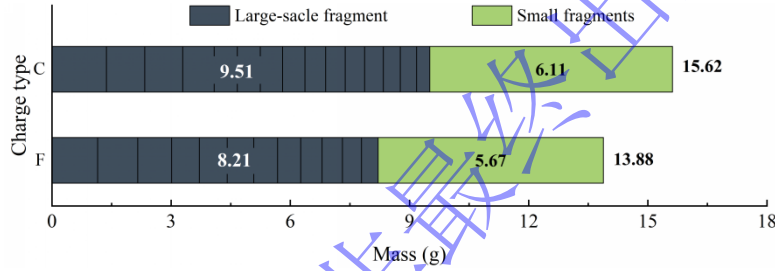
因此，结合见证靶上的开孔及回收试样形貌可以推断，爆轰加载过程中的 Zr 基非晶合金破片发生轻度破碎，但仍具有较大剩余质量及较好主体完整性的；而在进入橡胶靶回收介质后由于受到较大的阻力进一步断裂为若干大尺度块状碎片；其中回收的小碎片则来源于爆轰加载阶段的局部破碎以及回收过程中的二次破碎，过程如图 8(a)所示。



(a) Fragment fragmentation evolution process diagram



(b) Quality statistics and main top view morphology of fragments in different mass ranges



(c) Recovered fragment mass distribution

图 8 破片回收质量情况

Fig.8 Fragment recovered mass situation

为定量表征 Zr 基非晶合金破片在爆炸加载后的整体破碎程度，定义剩余破片质量占总质量之比 η_m 为

$$\eta_m = \frac{\sum m_i (m_i \geq m_c)}{M_r} \quad (3)$$

式中， m_i 为单个碎片质量； m_c 为统计阈值质量； M_r 为破片总质量。

首先，需要统计着靶前主体破片的质量占比，对所有回收碎片按不同质量区间进行质量统计及其典型碎片的正俯视形貌，如图 8(b)所示。从统计结果和典型形貌可以看出，0.1~0.4 g 区间的小质量碎片主要表现为细小颗粒或不规则碎块；当碎片质量大于 0.4 g 后逐渐表现出越来越大的块状特征。其中 0.4~0.6 g 区间质量占比最高，可以视为大尺度块状碎片向细小碎片过渡的主要质量区间。结合图 7 所示来自回收靶 C-1 区域的三枚块状碎片质量均略高于 0.5 g，说明 0.4~0.6 g 区间能够覆盖大尺度块状碎片的质量。因此选取该区间中值 0.5 g 作为大尺度块状碎片的统计阈值 m_c ，大于该值的碎片视为由主体破片在回收过程中断裂形成的大尺度块状碎片，低于该值则主要表现为细碎的颗粒或碎末形态。通过剩余破片质量占比 η_m 可以建立试验与数值模拟之间关于破碎程度的定量对比标准，如图 8(c)所示，统计圆柱形和喇叭形聚焦战斗部 η_m 相当，分别为 60.9%和 58.2%，说明在同一隔爆层厚度下 Zr 非晶合金破片的整体破碎程度相近。

2 聚焦战斗部驱动 Zr 基非晶破片作用过程数值模拟方法

2.1 战斗部有限元模型

利用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件分别建立如图 9 所示的试验圆柱形和聚焦形战斗部有限元模型, 战斗部结构简化为由主装药、上下端盖、隔爆层及预制破片组成, 采用 cm-g- μ s 单位制。主装药、空气采用结构-任意拉格朗日 (S-ALE) 算法, 通过设置 S-ALE 关键字自动实现网格生成、网格填充以及流固耦合算法。S-ALE 域沿装药轴向长度设置为 2 倍装药尺寸, 径向宽度设置为 4 倍装药尺寸, 该范围能够覆盖所有破片由爆轰加载直至破片速度达到峰值并趋于稳定的整个过程, 并在空气域边界设置无反射流出条件。上下端盖、隔爆层、破片采用 Lagrange 算法, 三者之间设置侵蚀接触, 且 Lagrange 网格需与 Euler 网格之间设置 S-ALE 流固耦合。

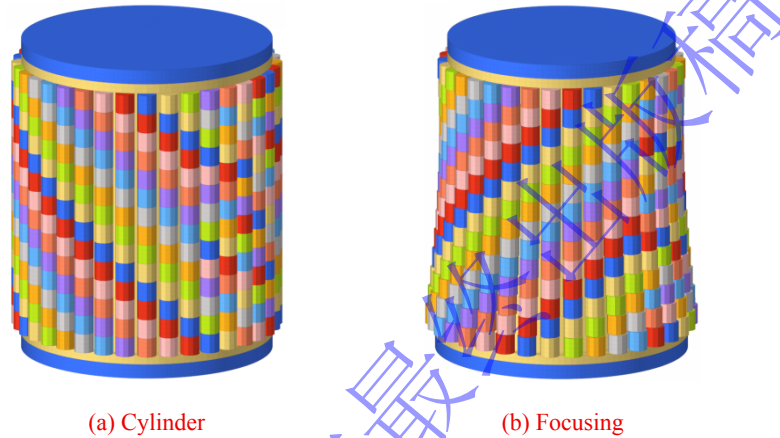


图 9 战斗部有限元模型

Fig.9 Warhead finite element model

2.2 材料模型及参数

数值模拟中主装药为 B 炸药, 采用 HIGH_EXPLOSIVE_BRUN 爆轰模型, 爆轰过程采用 JWL 状态方程描述, 相关材料见表 3。空气采用 Null 材料模型以及线性多项式状态方程, 相关材料参数见表 4。

表 3 B 炸药参数

Tab.3 Parameters of Comp.B explosive^[28]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D_{\text{CJ}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1.62	7426	26.5	542	7.68	4.5	1.2	0.34

表 4 空气参数

Tab.4 Parameters of Air^[29]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
1.29×10^{-3}	0	0	0	0	0.4	0.4	0

端盖尼龙采用随动硬化塑性模型以及 GRUNEISEN 状态方程, 相关材料参数见表 5。隔爆层用聚氨酯弹性体 TPU, 采用流体弹塑性本构模型及 GRUNEISEN 状态方程描述, 相关材料参数见表 6。

表 5 尼龙参数

Tab.5 Parameters of Nylon^[30]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	PR	σ_Y/GPa	Gruneisen				
				$C_g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0
1.13	2.7	0.375	0.12	2570	1.85	0	0	1.08

表 6 聚氨酯弹性体参数

Tab.6 Parameters of TPU^[31]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/MPa	σ_Y/MPa a	EH/MPa	Gruneisen				
				$C_g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	S_1	S_2	S_3	γ_0
1.13	2.7	4	3.5	2477	1.692	0	0	1.07

Zr 基非晶合金破片采用适用于脆性材料的 JH-2 模型，表 7 为 Zr 基非晶材料参数。

表 7 Zr 基非晶合金参数

Tab.7 Parameters of Zr-based bulk amorphous^[32]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	ν	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	β	D_1	D_2
6.133	0.35	114.3	268.5	1386	1.0	0.21	1.75

$P_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	$\sigma_{\text{HEL}}/\text{GPa}$	T/GPa	A	B	C	M	N
4.5	6.15	0.57	0.79	0.258	0.0173	0.59	0.82

2.3 网格敏感性分析

为评估网格尺寸对主要计算结果的影响，进一步开展圆柱装药结构下不同网格尺寸计算结果的对比计算，并统计破片最大速度以及大尺度碎片质量占比 η_m ，如图 10 所示。由图可知，当网格尺寸大于 2 mm 时，数值模拟计算结果碎网格尺寸变化较明显，说明较粗网格会对破片质量统计和速度结果产生较大影响；当网格尺寸由 2 mm 加密至 1 mm 时，计算结果趋于收敛。对于 2 mm 网格，单枚 $\Phi 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 圆柱破片由 84 个单元离散，平均每个单元代表质量约 0.03 g，基本能够表征破片宏观变形破碎趋势。综合考虑计算机的计算效率及计算结果准确性，选取 2 mm 网格尺寸开展后续计算。

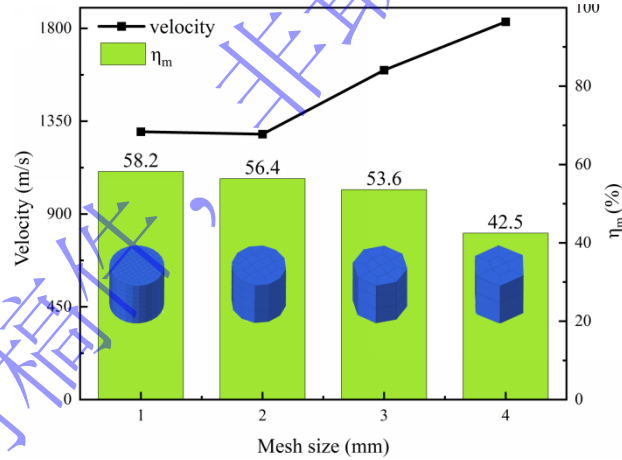


图 10 网格敏感性分析

Fig.10 Mesh size sensitivity analysis

2.4 数值模拟方法准确性验证

为验证数值模拟对破片飞散特性的准确性，提取了数值模拟与试验获得的轴向破片速度分布以及不同破片占比所对应的飞散角，如图 11 所示。由图可见，在聚焦带范围内，破片速度的最大相对误差为 9.58%，不同破片占比飞散角的最大差值为 2.2° ，数值模拟结果与试验结果吻合良好。

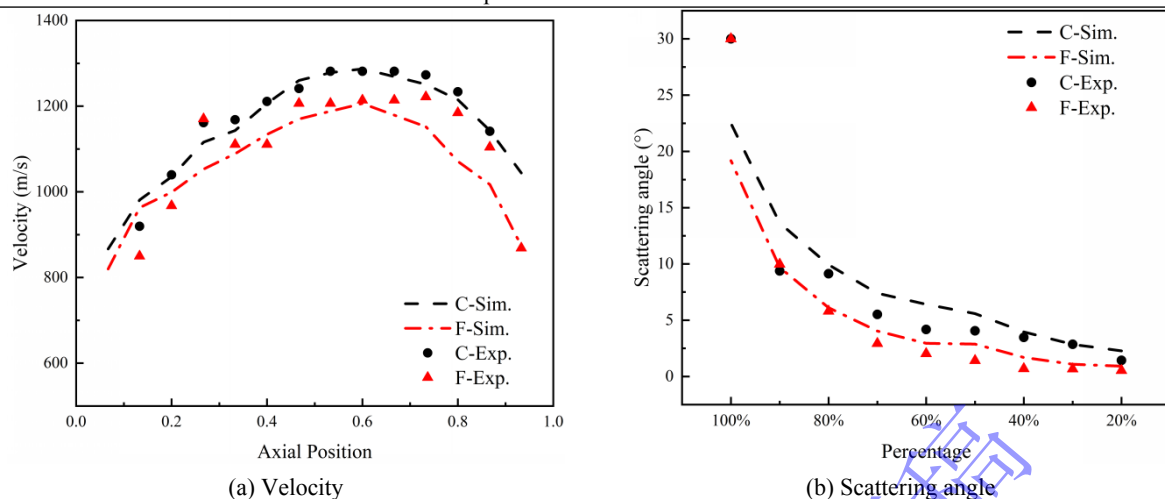


图 11 本文数值模拟结果与试验结果对比

Fig.11 Comparison between numerical simulation and experimental results

为验证数值模拟对破片宏观破碎程度的表征能力, 本文通过剩余破片质量占比 η_m 以及破片典型形貌作为试验与数值模拟结果的对比指标。如图 12 所示。圆柱形与聚焦形装药结构下数值模拟统计得到的 η_m 与试验结果吻合较好, 最大误差不超过 7.5%; 同时, 选取同一区域内的试验回收得到典型大尺度碎片与数值模拟所得破片, 形貌特征基本一致。上述对比结果表明, 本文建立的数值模拟模型具有较高准确性, 可供开展后续爆炸驱动 Zr 基非晶合金破片作用过程及影响因素分析。

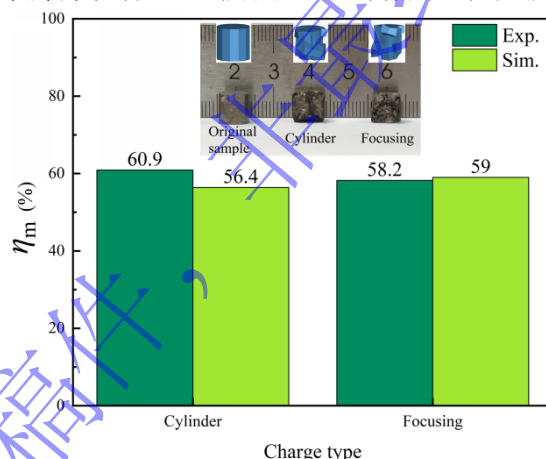


图 12 回收试样与数值模拟大尺度碎片质量占比 η_m 及破片形貌对比

Fig.12 Comparison of η_m and fragment morphology between recovered samples and numerical simulation

3 聚焦战斗部驱动 Zr 基非晶破片作用特性影响规律分析

3.1 装药母线形状对破片飞散特性的影响

装药母线形状是破片聚焦杀伤的主要影响因素, 不同母线形状对 Zr 基非晶合金破片飞散特性作用规律尚不明晰。因此, 本节主要通过前文建立准确的数值模拟模型, 针对不同装药母线聚焦半径和不同上端装药直径对 Zr 基非晶合金破片飞散特性的影响进行分析, 确定装药母线形状对破片飞散特性以及聚焦带分布的影响规律。

为研究不同装药母线形状对破片飞散特性的影响, 设计了如图 13(a)所示上下端直径相等的马鞍形聚焦装药结构, 以及如图 13(b)所示不同上端直径的喇叭形聚焦装药结构。随后分别开展了不同聚焦母线曲率半径的马鞍形装药结构和不同上端直径的喇叭形装药结构条件下破片飞散特性研究。

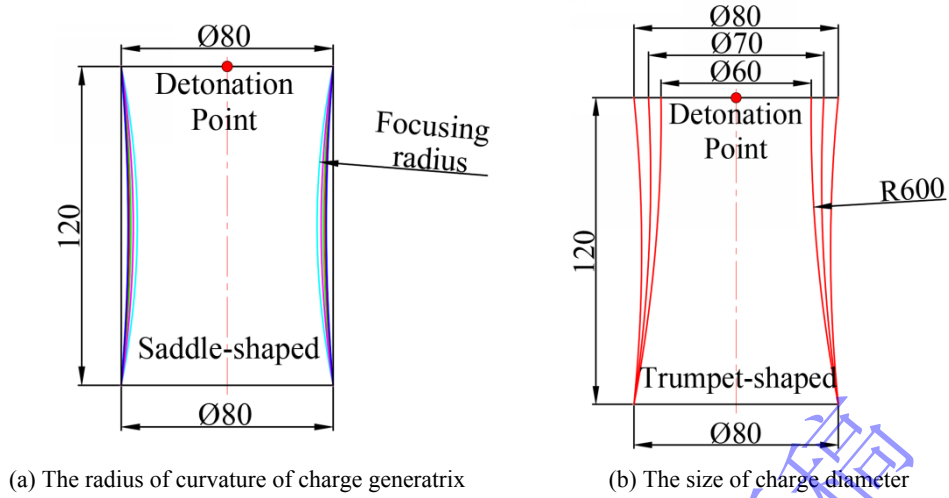


图 13 仿真工况示意图

Fig.13 Schematic diagram of simulation conditions

图 14 分别给出了两端直径均为 80 mm 的马鞍形装药在典型聚焦曲率半径条件下 (R300(80)、R400(80)、R500(80)、R600(80)、R700(80)、Cylinder(80)) 破片速度及不同破片占比飞散角曲线。结果表明, 随着聚焦母线曲率半径增大, 破片速度整体呈增大趋势, 其中曲率半径 300 mm 较于圆柱装药的破片最大速度损失 7.7%。随着聚焦母线曲率半径的减小, 70% 占比破片对应的飞散角总体呈现先减小后增大的趋势。曲率半径 600 mm 结构下 70% 破片飞散角达到最小值, 为 4.5° , 相较于圆柱装药的 7.4° , 破片汇聚飞散角减小 39.2%。表明聚焦装药结构在略微牺牲破片速度的同时, 能够显著减小破片整体飞散角。

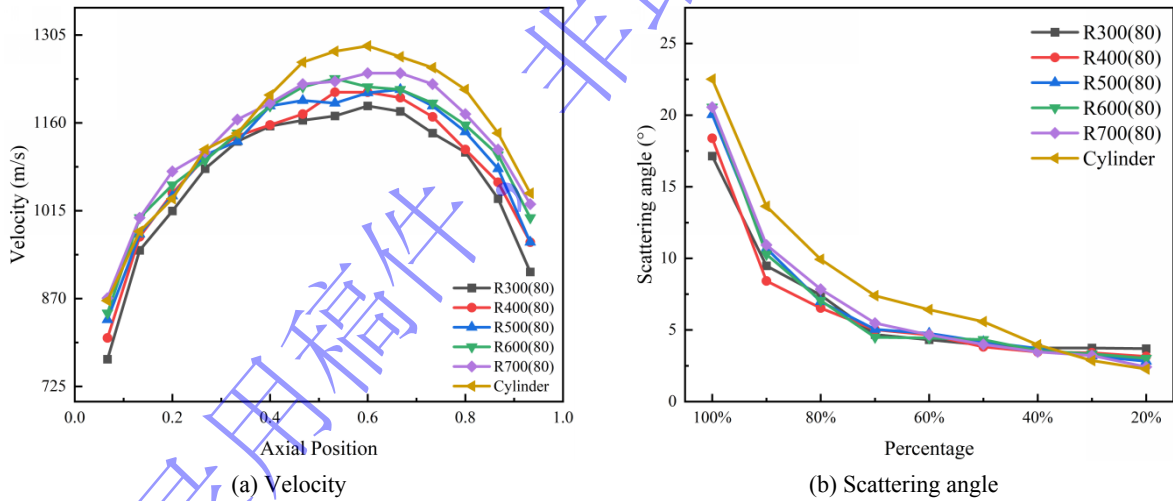


图 14 马鞍形装药下不同曲率半径的破片飞散特性曲线

Fig.14 Fragment scattering characteristic curves of saddle-shaped charge under different radii of curvature

为进一步对比马鞍形装药结构在不同聚焦曲率半径下的聚焦带差异和破片分布情况, 图 15(a)给出了破片轴向着靶位置及聚焦带分布情况。可以看出, 随聚焦母线曲率半径的减小, 聚焦带呈逐渐减小的变化趋势。这是由于聚焦装药母线改变了爆轰波对破片的入射方向, 破片在受到来自爆轰波压力时会产生偏向曲率中心侧的轴向分量, 这导致了不同轴向位置破片的速度方向被调整向同一区域汇聚, 最终在靶面形成聚焦带。随着曲率半径减小, 破片速度轴向分量增大, 聚焦带宽度相应减小; 但曲率半径过小时, 破片在飞散过程中发生过度汇聚以致相互挤压, 进而造成着靶位置重合的现象。因此, 为定量表征聚焦带内破片分布的均匀性, 引入间距变差系数 (Coefficient of variation, CV)。CV 定义为相邻破片间距的标准差与间距均值之比, 可用于反映破片在聚焦带内的离散分布特征, CV 值越大,

表明破片间隔分布越不均匀。图 15(b)展示了破片轴向间距变差系数以及聚焦带宽度随聚焦母线曲率半径的变化曲线。结果表明, 间距变差系数大体上随聚焦母线曲率半径的减小而逐渐增大, 这说明聚焦装药结构在减小聚焦带宽度的同时也会加剧聚焦带内破片分布的不均匀性。尤其是当聚焦母线曲率半径小于 500 mm 时, 尽管聚焦带宽度较小, 但破片间距不均和轴向分布并不均匀, 因此聚焦带中破片会发生过度汇聚的情况。

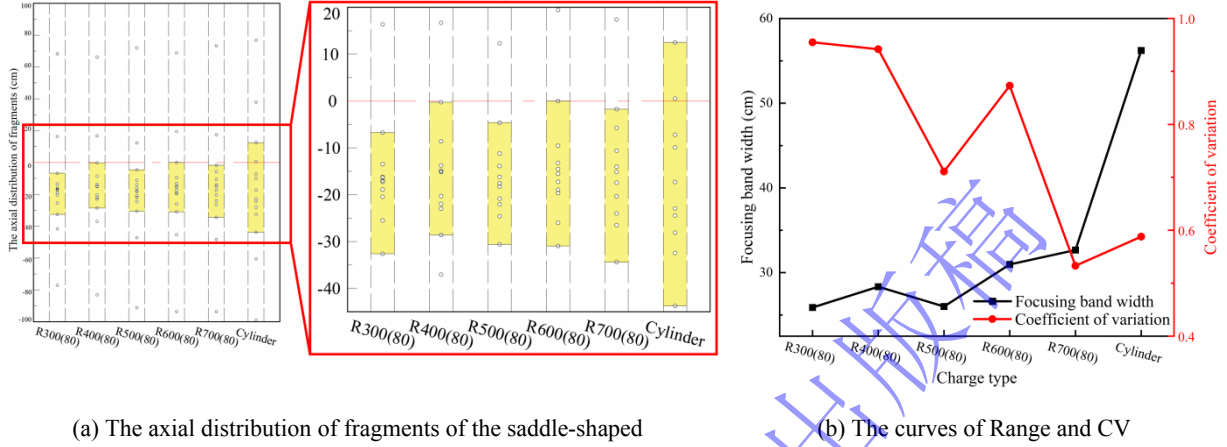


图 15 不同曲率半径下的破片着靶情况

Fig.15 The targeting situation under different curvature radii

图 16 分别给出了聚焦母线曲率为 600 mm 的喇叭形装药的三种上端直径条件下 (R600(60)、R600(70)、R600(80)) 破片速度及不同破片占比的飞散角曲线。结果表明, 随着上端直径的减小, 破片速度整体呈下降趋势, 其中当上端直径为 70 mm 和 60 mm 时, 破片平均速度较上端直径 80 mm 的结构分别减小 4.1% 和 9.9%; 随着上端直径的减小, 70% 占比破片对应的飞散角也逐渐减小, 其中当上端直径为 60 mm, 破片飞散角整体保持较低水平。

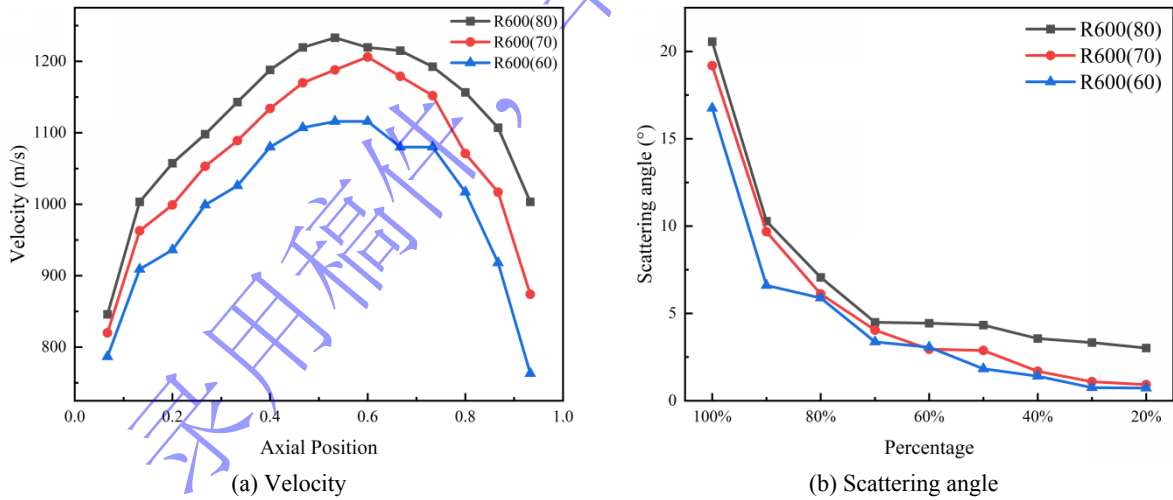


图 16 喇叭形装药下不同上端直径的破片飞散特性曲线

Fig.16 Fragment scattering characteristic curves of trumpet-shaped charge under different upper-end diameters

图 17(a)给出了喇叭形装药结构在不同小端直径条件下破片轴向着靶位置及聚焦带分布情况。可以看出, 随着上端直径减小, 破片聚焦带整体由靶面中心线以下向上移动。这是因为上端直径减小后, 母线曲率圆心向上端侧移动, 破片所受爆轰加载压力也随之朝向曲率圆心, 从而导致破片飞散总体上趋向于曲率圆心汇聚, 因此聚焦带相应向上端侧偏移。图 17(b)展示了聚焦带宽度及破片轴向间距变差系数 CV 随上端直径变化曲线。结果表明, 随上端直径的减小, 破片聚焦带宽度逐渐增大, 但破片轴向间距变差系数先减小后增大, 在上端直径为 70 mm 时为最小值。由此可见, 在母线曲率半径保持不

变的条件下,适当减小上端直径,能够在轻微损失破片速度的前提下,减小破片聚焦带宽度并使破片聚焦带汇聚于靶面中心,显著改善破片的聚焦带分布情况,提升破片汇聚综合性能。

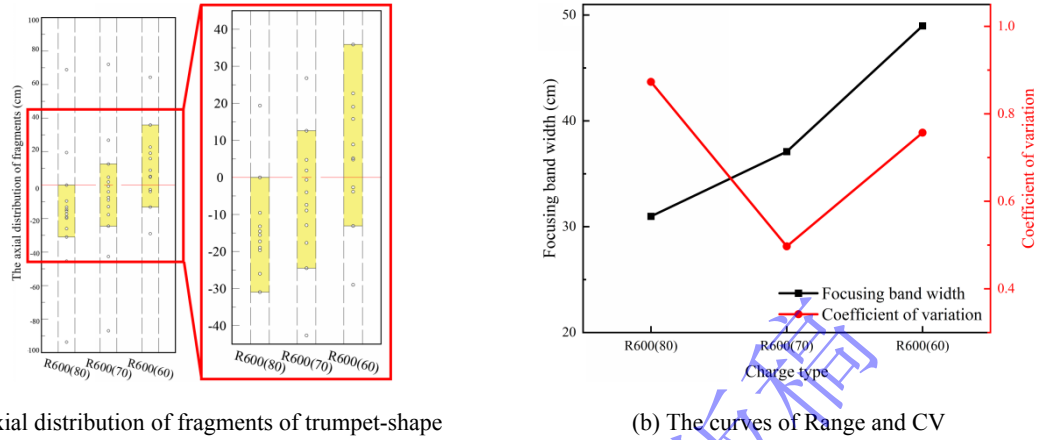


图 17 不同上端直径的破片着靶情况

Fig.17 The targeting situation under different upper-end diameters

3.2 隔爆层厚度对破片破碎行为的影响

Zr 基非晶合金破片在爆轰加载后保持主体相对完整是其实现有效侵彻和后续释能毁伤的重要前提。通过增加隔爆层厚度,可降低爆轰波对破片的峰值冲击载荷并改善受载均匀性,从而减小破片在驱动过程中的破碎程度^[33]。因此,本节通过增加隔爆层厚度的方式,探究 Zr 基非晶合金在聚焦战斗部中的破碎行为与飞散特性,确定了保证破片相对完整驱动的最佳隔爆层厚度。

为探究 Zr 基非晶合金破片在爆炸能量加载下的破碎行为,在保证装药母线曲率和其他结构参数不变的条件下,通过增设隔爆层沿直径方向的厚度,建立了 1 mm、3 mm、5 mm、8 mm 和 10 mm 隔爆层厚度 (R600(70)-1 mm、3 mm、5 mm、8 mm、10 mm) 的数值模拟模型。

图 18 给出了 10 μ s 时刻 5 种隔爆层厚度下破片受载压力云图。结果表明,起爆后爆轰波在炸药内迅速传播,隔爆层受到爆轰产物的高压作用被压实并传递至破片层。随着隔爆层厚度增加,短暂减缓了冲击波抵达破片层的时间,同时由于隔爆层的缓冲作用,降低了冲击波峰值载荷。当隔爆层厚度为 1mm 时破片受到冲击波压力最高,为 23.8 GPa;当隔爆层厚度增加至 10 mm 时,破片受到压力最低,仅为 14.8 GPa,降低了 37.8%。此外,随着隔爆层厚度增大,破片受冲击波加载区域也逐渐加宽,这使得破片受载更加均匀。由此可见,隔爆层是通过在炸药与破片层之间增加缓冲介质,降低了冲击波的峰值压力,从而减小了爆轰波对 Zr 基非晶合金破片的局部破坏作用。

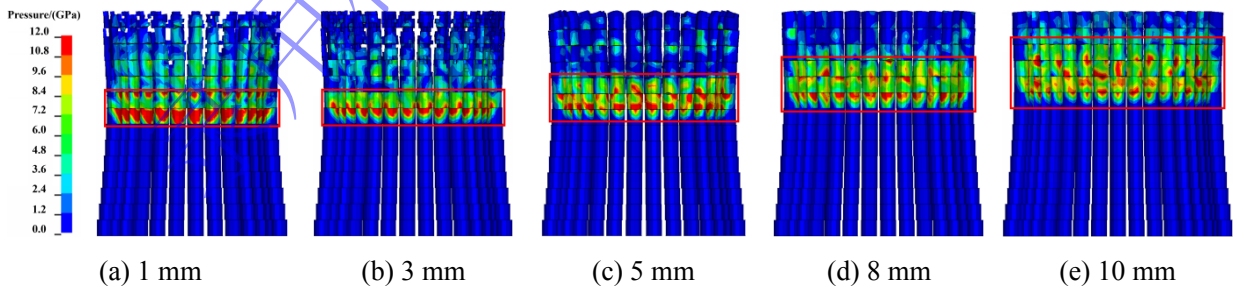


图 18 5 种隔爆层厚度下破片在 10 μ s 时刻受载压力云图

Fig.18 The pressure cloud diagram of the fragment at 10 μ s under 5 kinds of flameproof layer thickness

图 19 给出了 5 种隔爆层厚度下破片加速结束时的变形情况。其中图 19(a)(b)表示在 1 mm 和 3 mm 隔爆层厚度下,破片均发生严重的破碎,几乎没有完整破片,说明 Zr 基非晶合金破片在薄隔爆层保护下难以保持其基本形貌,难以实现对目标的有效毁伤。如图 19(c)所示,5 mm 隔爆层对破片起到一定保护作用,但仍有部分破片在爆轰加载下发生破碎。如图 19(d)(e)所示,在隔爆层厚度增加至

8 mm、10 mm 时，绝大多数破片的迎靶面能够保持相对完整的形貌。需要说明的是，在数值模拟中的单元删除并不等同于材料的微观断裂过程，采用 JH-2 损伤模型是为表征 Zr 基非晶合金脆性破片的宏观破碎趋势。当破片受到高冲击压力作用后，破片网格塑性应变大于阈值时，相应的网格单元就会被删除，从而模拟破片在加载过程中发生的破碎。因此，图 19 主要用于比较不同隔爆层厚度下破片主体完整性的相对变化，并非精确预测全部小碎片形貌。

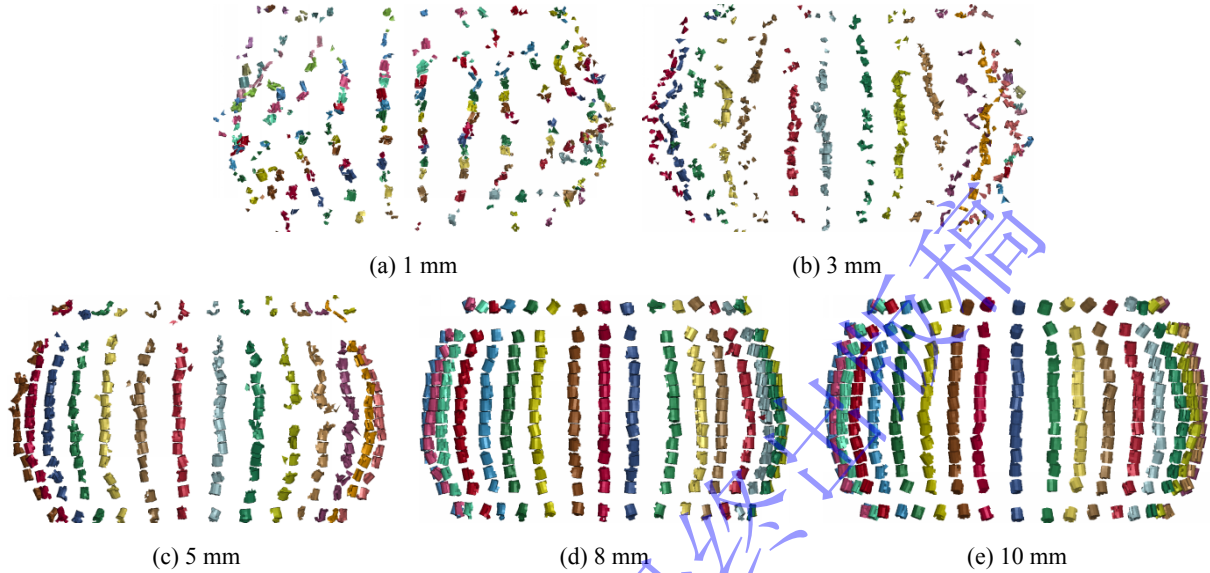


图 19 不同隔爆层厚度下破片变形情况

Fig.19 Fragments deformation under different-thickness flameproof layer

由于 1 mm 和 3 mm 隔爆层下 Zr 基非晶破片严重破损，因此仅统计 5 mm、8 mm、10 mm 结构下大尺度剩余碎片质量占比 η_m 。图 20 给出了不同隔爆层厚度下大块破片质量占比曲线，由图可知，随着隔爆层厚度不断增加， η_m 也随之增加。在 5 mm 至 10 mm 区间， η_m 与隔爆层厚度大致呈线性关系，说明增大隔爆层厚度可有效提高破片主体保留程度。

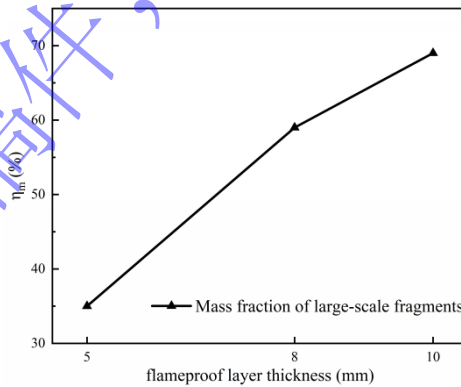


图 20 不同隔爆层厚度下大尺度碎片质量占比 η_m

Fig.20 The mass fraction of large-scale fragments η_m under different-thickness flameproof layer

为探究不同隔爆层厚度下 Zr 基非晶合金破片飞散特性，图 21 给出了 5 mm、8 mm、10 mm 三种隔爆层厚度下破片飞散特性曲线。由于 1 mm 和 3 mm 隔爆层下 Zr 基非晶合金破片破损过于严重，无法提取有效的飞散特性参数，此处不予讨论。从图 21(a)破片速度曲线可以看出，隔爆层厚度增加会降低破片速度，5 mm 隔爆层下破片速度最高，为 1314 m/s；在 8 mm 和 10 mm 厚度下速度分别为 1206 m/s 和 1152 m/s，降低了 9.0% 和 14.1%。由图 21(b)破片飞散角曲线可以看出，隔爆层厚度增加，降低了爆轰波强度，从而改善破片的受力环境，起到适当减小破片飞散角的作用。

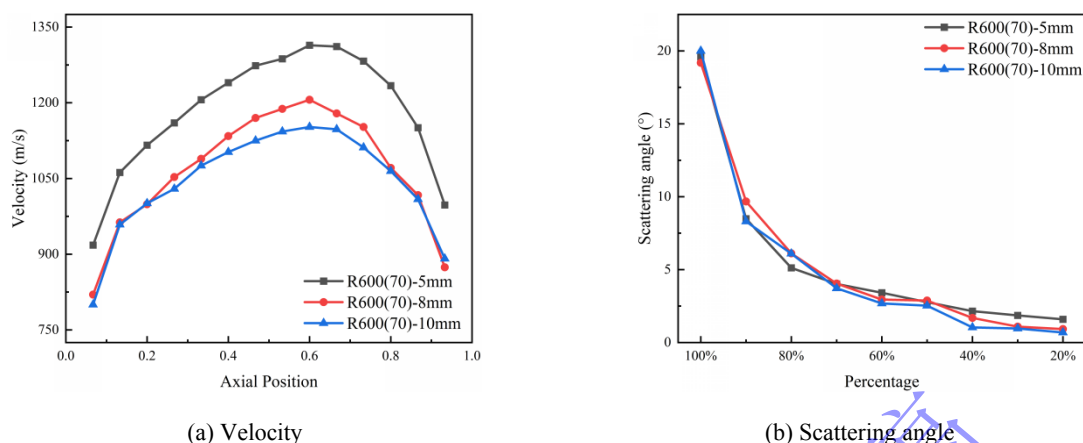


图 21 不同隔爆层厚度下破片飞散特性曲线

Fig.21 Fragment scattering characteristic curves under different thickness of flameproof layer

4 结论

为了研究 Zr 基非晶合金破片在环向聚焦装药结构下的爆轰驱动行为, 本文开展了 $\Phi 80$ mm 圆柱形与喇叭形环向聚焦装药结构战斗部驱动 $\Phi 8$ mm $\times$ 8 mm 圆柱 Zr 基非晶合金破片飞散试验, 并在试验结果基础上验证数值模拟模型的准确性。通过数值模拟研究了装药母线形状和隔爆层厚度对破片飞散特性与变形破碎行为的影响规律。针对本文试验和数值模拟条件下, 得出如下主要结论:

(1) 喇叭形聚焦装药能够显著改善 Zr 基非晶合金破片的飞散汇聚特性, 并可在适当隔爆层厚度下保持破片主体相对完整。试验使用曲率半径为 600 mm 聚焦装药相较于圆柱形装药结构, 破片最大速度降低 5.26%, 但聚焦带宽度缩减 38.4%; 在 8 mm 隔爆层厚度下, Zr 基非晶合金破片虽发生轻度破碎, 但主体破片仍可贯穿 3 mm 厚 Q235 钢靶。

(2) 聚焦母线曲率半径和上端直径对于破片聚焦带及带内破片分布均存在最优区间。聚焦母线曲率半径过小会导致破片在更窄的聚焦带内间距分布更不均匀, 出现过度汇聚以致相互挤压的情况, 而过大又会降低聚焦效果; 适当减小上端直径不仅可使聚焦带向靶面中心区域移动, 还能改善聚焦带内破片分布的均匀性, 但上端直径过小又会降低破片速度和降低聚焦性能;

(3) 数值模拟结果表明, 增加隔爆层厚度可降低破片所受冲击波峰值压力, 改善破片受载环境, 从而提高 Zr 基非晶合金破片主体完整性。在本文所用的试验和数值模拟条件下, 8 mm 隔爆层可较好兼顾破片速度、聚焦飞散性能和主体完整性; 隔爆层厚度为 5 mm 时, 部分破片破碎严重, 大尺度块状破片质量占比较低; 隔爆层厚度取 10 mm 时破片完整性进一步提高, 但破片速度损失增大。

参考文献

- [1] 李向荣, 刘宗伟, 周世海. 聚焦战斗部与普通杀爆战斗部毁伤效能比较[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(05): 100-102. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2010.05.034.
- [2] LI X R, LIU Z W, ZHOU S H. Comparison of Damage Effectiveness between Focused Warhead and Ordinary Blast-Fragmentation Warhead[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(5): 100-102. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdx.2010.05.034.
- [3] 崔瀚, 张国新. 定向战斗部研究现状及展望[J]. 飞航导弹, 2019, (03): 84-89. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.20180272.
- [4] CUI H, ZHANG G X. Research Status and Prospect of Directional Warhead[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(3): 84-89. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.20180272.
- [5] 刘俞平, 冯成良, 王绍慧. 定向战斗部研究现状与发展趋势[J]. 飞航导弹, 2010, (10): 88-93. DOI: 10.16338/j.issn.1009-

- 1319.2010.10.010.
- LIU Y P, FENG C L, WANG S H. Research Status and Development Trend of Directional Warhead[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2010(10): 88-93. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.2010.10.010.
- [4] 郑雄伟, 陈进, 袁宝慧, 等. 防空反导活性破片前沿技术研究综述[J]. 飞航导弹, 2013, (09): 91-94. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.2013.09.026.
- ZHENG X W, CHEN J, YUAN B H, et al. Review of Frontier Technology of Active Fragments for Air Defense and Anti-Missile[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2013(9): 91-94. DOI: 10.16338/j.issn.1009-1319.2013.09.026.
- [5] 张云峰, 方龙, 魏欣, 等. Zr 基非晶合金破片冲击破碎反应机制研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(01): 86-97.
- ZHANG Y F, FANG L, WEI X, et al. Study on Impact Fragmentation Reaction Mechanism of Zr-Based Amorphous Alloy Fragments[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(1): 86-97.
- [6] 尚春明, 施冬梅, 张云峰, 等. Zr 基非晶合金毁伤研究进展[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(07): 182-186.
- SHANG C M, SHI D M, ZHANG Y F, et al. Research Progress on Damage of Zr-Based Amorphous Alloys[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(7): 182-186.
- [7] 侯先苇, 张先锋, 熊玮, 等. 活性无序合金冲击的释能特性及在毁伤元中应用研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(09): 4-42.
- HOU X W, ZHANG X F, XIONG W, et al. Research Progress on Energy Release Characteristics of Active Disordered Alloys under Impact and Their Application in Damage Elements[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(9): 4-42.
- [8] 王佳敏, 张先锋, 查旭, 等. ZrTiCuNiBe 非晶合金及其钨丝增强复合材料的冲击释能特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(10): 1036-1046. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.084.
- WANG J M, ZHANG X F, ZHA X, et al. Impact Energy Release Characteristics of ZrTiCuNiBe Amorphous Alloy and Its Tungsten Wire Reinforced Composite[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(10): 1036-1046. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.084.
- [9] 罗普光, 毛亮, 李国杰, 等. 锆基非晶活性破片侵靶特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(03): 42-6.
- LUO P G, MAO L, LI G J, et al. Study on Target Penetration Characteristics of Zr-Based Amorphous Active Fragments[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(3): 42-46.
- [10] 张玉令, 施冬梅, 张云峰, 等. W 骨架/Zr 基非晶合金复合材料破片侵彻能力与后效研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(05): 58-66.
- ZHANG Y L, SHI D M, ZHANG Y F, et al. Research on Penetration Ability and Aftermath of W Skeleton/Zr-Based Amorphous Alloy Composite Fragments[J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(5): 58-66.
- [11] LI X, HUANG G Y, GUO Z W, et al. The fragments distribution of the nonaxisymmetric directional-focusing warhead[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2478(7).
- [12] 李翔宇, 张绍兴, 李振铎, 等. 轴向和环向双聚焦破片战斗部壳体形状设计[J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32(02): 64-8.
- LI X Y, ZHANG S X, LI Z D, et al. Shell Shape Design of Axial and Circumferential Dual-Focus Fragment Warhead[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2018, 32(2): 64-68.
- [13] 苗春壮, 梁增友, 邓德志, 等. 曲率半径对聚焦战斗部影响的数值仿真[J]. 兵工自动化, 2018, 37(12): 93-96.
- MIAO C Z, LIANG Z Y, DENG D Z, et al. Numerical Simulation of Influence of Curvature Radius on Focused Warhead[J]. Ordnance Industry Automation, 2018, 37(12): 93-96.
- [14] 张绍兴, 李翔宇, 丁亮亮, 等. 聚焦式战斗部破片轴向飞散控制技术[J]. 高压物理学报, 2018, 32(01): 140-147.
- ZHANG S X, LI X Y, DING L L, et al. Axial Dispersion Control Technology of Focused Warhead Fragments[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(1): 140-147.
- [15] LIU W, CAO L, LI X, et al. Research on the Effect of Inner Lining on Fragment Scattering Characteristics of Fragmentation Warhead[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2478(12).

- [16] 刘伟, 梁争峰, 阮喜军, 等. 波形控制器对杀伤战斗部破片飞散特性影响研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(02): 76-88.
LIU W, LIANG Z F, RUAN X J, et al. Effect of Waveform Controller on Fragment Dispersion Characteristics of Fragmentation Warhead[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(2): 76-88.
- [17] 马正伟, 熊玮, 邓宇轩, 等. 爆轰驱动聚焦战斗部预制破片作用过程及飞散特性数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2025, 45(06): 568-579. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2024.161.
- MA Z W, XIONG W, DENG Y X, et al. Numerical Simulation of Action Process and Dispersion Characteristics of Preformed Fragments of Detonation-Driven Focused Warhead[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2025, 45(6): 568-579. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2024.161.
- [18] INOUE A, ZHANG T, MASUMOTO T. Preparation of bulky amorphous Zr-Al-Co-Ni-Cu alloys by copper mold casting and their thermal and mechanical properties [J]. Materials Transactions, JIM, 1995, 36(3): 391-8.
- [19] 王杰, 张宏伟, 王爱民, 等. 一种新型锆钛合金的动态力学行为研究[J]. 金属学报, 2012, 48(5): 636-640.
WANG J, ZHANG H W, WANG A M, et al. Study on Dynamic Mechanical Behavior of a New Type of Zr-Ti Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012, 48(5): 636-640.
- [20] 刘晓俊, 任会兰, 宁建国. Zr-W 多功能含能结构材料的制备及动态压缩特性[J]. 复合材料学报, 2016, 33(10): 2297-2303. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160315.001.
- LIU X J, REN H L, NING J G. Preparation and Dynamic Compression Characteristics of Zr-W Multifunctional Energetic Structural Material[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(10): 2297-2303. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20160315.001.
- [21] 张云峰, 罗兴柏, 施冬梅, 等. 动态压缩下 Zr 基非晶合金失效释能机理[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 35-42.
ZHANG Y F, LUO X B, SHI D M, et al. Failure Energy Release Mechanism of Zr-Based Amorphous Alloy under Dynamic Compression[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 35-42.
- [22] 尚春明, 施冬梅, 张云峰, 等. Zr 基非晶合金的燃烧释能特性[J]. 含能材料, 2020, 28(06): 564-568.
SHANG C M, SHI D M, ZHANG Y F, et al. Combustion Energy Release Characteristics of Zr-Based Amorphous Alloy[J]. Energetic Materials, 2020, 28(6): 564-568.
- [23] LUO P G, WANG Z C, JIANG C L, et al. Experimental study on impact-initiated characters of W/Zr energetic fragments [J]. Materials and Design, 2015, 84: 72-78. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.107.
- [24] WANG C T, HE Y, JI C, et al. Investigation on shock-induced reaction characteristics of a Zr-based metallic glass [J]. Intermetallics, 2018, 93: 383-388. DOI: 10.1016/j.intermet.2017.11.004.
- [25] SHI Y P, HUANG G Y, ZHOU T, et al. Dynamic Response of Uncoupled Thin-Walled Shell and Fragments under Internal Explosive Loading[J]. Thin-Walled Structures, 2025, (223)114370. DOI: 10.1016/j.tws.2025.114370.
- [26] 张先锋, 李向东, 沈培辉, 等. 终点效应学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017: 145-146.
- [27] DHOTE K.D., MURTHY K.P.S., RAJAN K.M., et al. Quantification of projection angle in fragment generator warhead[J]. Defence Technology, 2014, 10(2):177-183.
- [28] Dynamics C. Release 14.0 documentation for ANSYS AUTODYN[R]. 2011: 150-151.
- [29] 邓宇轩, 张先锋, 刘闯, 等. 起爆方式对椭圆截面战斗部破片速度分布的影响[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(10): 98-112.
DENG Y X, ZHANG X F, LIU C, et al. Effect of Initiation Mode on Fragment Velocity Distribution of Elliptical Cross-Section Warhead[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(10): 98-112.
- [30] MA Y, HE Y, WANG C T, et al. Influence of lining materials on the detonation driving of fragments[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(3): 1337-1350.
- [31] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 675-676.
- [32] SHI J, HUANG Z X, ZU X D, et al. Research on non-cohesive jet formed by Zr-based amorphous alloys[J]. Sci Rep-Uk, 2023, 13(1): 4149.
- [33] 马正伟. 爆炸能量定向驱动活性金属破片变形行为及飞散特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2025: 76-78.

录用稿件，
非最终出版稿