

DOI: 10.11883/bzyej-2024-0278

# 锆基非晶合金破片侵彻碳纤维及后效 LY12 靶的试验研究

王志裕<sup>1</sup>, 智小琦<sup>1</sup>, 王洪伟<sup>2</sup>, 于永利<sup>3</sup>

(1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051

2. 山东银光爆破工程有限公司, 山东 枣庄 277223

3. 吉林江机特种工业有限公司, 吉林 吉林 132000)

**摘要:** 为研究锆基非晶合金破片侵彻碳纤维损伤机理和后效靶毁伤能力, 采用 12.7mm 弹道枪开展了球型锆基非晶合金破片侵彻 6mm 厚碳纤维靶和后效 2mm 厚 LY12 靶组成的叠合靶和间隔靶的弹道枪试验研究, 采用图像识别技术分析了后效 LY12 靶毁伤的面积。研究表明: 碳纤维靶毁伤面积与破片速度正相关且无明显扩孔反应, 迎弹面主要为纤维剪切破坏和压缩变形毁伤, 背弹面则主要为拉伸撕裂破坏以及层间失效。破片冲击相同设置靶板时, LY12 靶毁伤面积随速度增加而增大, 速度低于 954.7m/s 时, 间隔靶后效靶 LY12 靶毁伤面积小于叠合靶后效靶 LY12 靶毁伤面积, 随着速度提高间隔靶后效 LY12 靶的毁伤面积快速提高, 而叠合靶后效 LY12 靶的毁伤面积增长趋于平缓, 且前者远大于后者。因此, 高速撞击时, 设置间隔靶对于后效毁伤更有利。

**关键词:** 锆基非晶合金; 侵彻; 碳纤维; 毁伤能力

**中图分类号:** O385

**国标学科代码:** 13085

**文献标识码:** A

## Experimental Study of Zr-Based Amorphous Alloy Fragmentation Penetration through CFRP and Post-Effective LY12 Targets

WANG Zhi-yu<sup>1</sup>, ZHI Xiao-qi<sup>1</sup>, WANG Hong-wei<sup>2</sup>, YU Yong-li<sup>3</sup>

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shandong Yinguang Blasting Engineering Co., Ltd., Zaozhuang 277223, China;

3. Jilin Jiangji Machine Special Industry, Ltd., Jilin 132021, Jilin, China)

**Abstract:** In order to investigate the damage mechanisms of zirconium-based amorphous alloy fragments penetrating carbon fiber targets and their subsequent effects on target failure, ballistic experiments were conducted using a 12.7 mm ballistic gun. The experiments involved spherical zirconium-based amorphous alloy fragments impacting a composite target system consisting of a 6-mm thick carbon fiber laminate and a 2-mm thick LY12 alloy plate. These targets were arranged in both stacked and spaced configurations to evaluate the effects of target configuration on the damage caused by fragment impact. To quantitatively assess the subsequent damage, image recognition technology was employed to analyze the damage area of the LY12 target after impact. The results indicated that the damage area of the carbon fiber target was positively correlated with the velocity of the impacting fragment, with no significant hole expansion observed. On the front side, damage primarily resulted from fiber shear failure and compressive deformation, while the back face of the carbon fiber laminate exhibited tensile tearing and interlaminar delamination. These findings suggest that the carbon fiber target experienced a combination of mechanical damage modes, including shear and compressive deformation on the impact side, and tensile and delamination failures on the rear face, as a result of the high-velocity impact. In the case of the LY12 aluminum alloy target,

**收稿日期:** 2024-08-11; **审回日期:** 2024-11-14

**第一作者:** 王志裕 (1998-), 男, 硕士研究生, E-mail: wzy1223656840@qq.com;

**通信作者:** 智小琦 (1963-), 女, 博士, 教授, E-mail: zxq4060@sina.com。

the damage area increased with fragment velocity. When the velocity was below 954.7 m/s, the damage area on the LY12 target in the spaced configuration was smaller than that of the stacked configuration. However, as the fragment velocity increased, the damage area of the LY12 target in the spaced configuration grew rapidly, while the damage area in the stacked configuration increased more gradually. At higher velocities, the damage area in the spaced configuration was significantly larger than that in the stacked configuration. This trend suggests that for high-velocity impacts, the spaced configuration of the targets was more effective in promoting greater damage to the LY12 target.

**Keywords:** Zr-based amorphous alloys; Intrusion; Carbon fibers; Destructive capacity

活性材料作为一种新兴的功能性含能材料<sup>[1]</sup>，在高速冲击下破碎并发生剧烈的爆燃反应，同时释放大能量。活性破片与传统惰性破片相比有很大不同，如非晶合金破片高速撞击时发生自锐效应，被撞击的部分自行破碎，破片露出新的部分后继续侵入，加快了破片的氧化释能反应，增加了破片的毁伤能力。由于其优异的物理和化学性能，因此被广泛应用于含能破片<sup>[2]</sup>、药型罩<sup>[3]</sup>、穿甲弹芯<sup>[4]</sup>等领域。

铝/聚四氟乙烯 (Al/PTFE) 材料是较早的活性材料，国内外许多学者做了深入的研究。但它与非晶合金活性材料相比，后者的硬度和侵入能力更优，毁伤效能也更高。近些年有学者对非晶合金破片做了一些研究，如张云峰<sup>[5]</sup>等使用弹道枪加载锆钨合金活性材料冲击 10.7mm 均质装甲靶板，研究发现破片破碎过程伴有明显火光，反应程度随冲击压力增加而增加；尚春明<sup>[6]</sup>等采用氧弹量热法测定了锆基非晶合金材料的燃烧热，研究表明锆基非晶合金材料的燃烧热、反应速率与 Zr/Al 比值负相关，反应释放的能量主要来自于金属元素的氧化反应，反应效率随氧气压力的升高而增大，但增长速率逐渐减小；王佳敏<sup>[7]</sup>等使用 14.5mm 弹道枪和准密闭反应容器，测试锆基非晶合金破片冲击 0.5mm 厚 Q235 钢靶板在不同速度下的释能反应，研究表明，冲击释能产生的温升和超压峰值随速度增加呈先增加后缓慢减小趋势；杨林<sup>[8]</sup>等使用弹道枪加载球型 Zr<sub>77.1</sub> Cu<sub>13</sub> Ni<sub>9.9</sub> 非晶合金破片以相同速度分别侵入相同厚度的 LY12 靶板和 TC4 钛合金靶板，结合高速摄影技术分析了破片破碎后形成碎片云的毁伤过程，研究表明，破片冲击更高强度的 TC4 靶板时，发生了更严重的破碎反应，靶板上形成了范围更广的碎片云和更大的后效毁伤面积；CHEN<sup>[9]</sup>等通过弹道冲击试验研究了锆基非晶合金破片冲击不同厚度钢板，研究表明冲击速度越高，靶板越薄，冲击释能反应越剧烈，冲击波超压和能量释放率越高，而且对靶材造成径向扩孔越明显；张玉令<sup>[10]</sup>等将 W 骨架/Zr 基非晶合金复合材料破片装入弹体制成预制破片弹丸，并进行了实爆试验，研究表明足够数量的预制破片贯穿前置钢靶板后，爆燃反应的能量可以将靶板后设置的棉被与油箱均可被引燃。

综上所述，关于锆基非晶合金破片的侵入研究主要集中在金属靶板，而对于非金属靶板的研究较少，集中在对棉、汽油等易燃物的引燃特性研究。碳纤维作为热门非金属材料具有密度小、强度高和耐腐蚀等特点，现在已经广泛应用于航空航天，装甲防护等国防军事领域<sup>[11-13]</sup>。为此，本文开展球型锆基非晶合金破片侵入 6mm 厚碳纤维和 2mm 厚 LY12 靶组成的叠合靶和间隔靶的研究试验，分析锆基非晶合金破片冲击碳纤维靶的毁伤特性以及后效 LY12 靶的毁伤性能，以为该类结构材料的工程设计以及非晶活性破片的毁伤研究提供参考。

## 1 锆基非晶合金破片冲击试验

### 1.1 试验破片

试验所用锆基非晶合金破片形状为球形，尺寸为 $\Phi 9.4\text{mm}$ ，质量 3.05g，密度 7.1g/cm<sup>3</sup>，主要组成元素依次为：Zr、Cu、Ti、Al、Nb。图 1 为试验所用破片实物图。

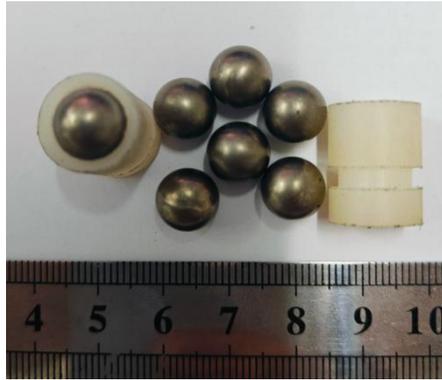
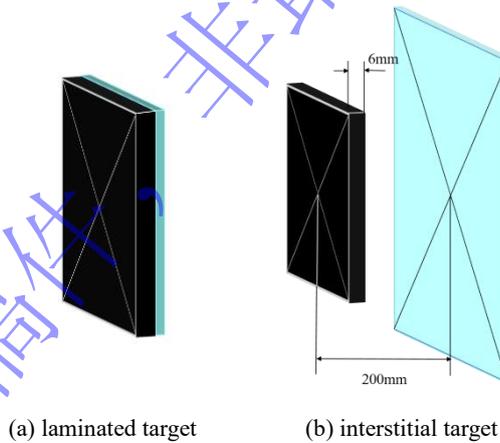


图 1 试验所用破片实物图

Fig. 1 Tested fragments

### 1.2 试验靶

试验靶及其结构示意图如图 2 所示。试验靶分为两种设置，第一种为叠合靶，迎弹面靶板材料为碳纤维，尺寸为  $160\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ ，厚度为  $6\text{ mm}$ ，后靶为与碳纤维靶同种尺寸的厚度为  $2\text{ mm}$  LY12 靶。为了使前后靶尽可能没有间隙，使用六枚  $\Phi 10\text{ mm}$  螺栓在距离靶板边沿  $10\text{ mm}$  处固定，以模仿飞机蒙皮和骨架之间的铆接连接；第二种靶为间隔靶，前靶尺寸为  $160\text{ mm}\times 120\text{ mm}$ 、厚度  $6\text{ mm}$  的碳纤维靶，后靶为  $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 、厚度  $2\text{ mm}$  的 LY12 间隔靶，前后靶间距为  $200\text{ mm}$ 。上述碳纤维靶采购自江苏博实碳纤维科技有限公司，铺层顺序为  $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$ 。前靶为激活靶，作目标防护结构，用于激活锆基非晶合金破片破碎释能反应；后靶为效应靶，等效为目标内部结构，以研究锆基非晶合金破片的后效毁伤特性。



(a) laminated target

(b) interstitial target

图 2 两种靶板的装置布置示意图

Fig. 2 Device arrangement of two target plates

### 1.3 试验原理

试验系统由  $12.7\text{ mm}$  滑膛弹道枪、测速靶、多通道测速仪、碳纤维靶板、LY12 靶板与录像机组成。锆基非晶合金破片由尼龙弹托固定与  $12.7\text{ mm}$  的药筒连接，发射后非晶合金破片在空气阻力、重力的作用下与弹托分离，按照既定弹道侵彻靶板。弹道枪与间隔靶位置固定，通过改变药筒内发射药的质量调节破片初始速度。测速仪通过测量破片穿透两层区截测速靶的时间间隔确定初始撞击速度  $V_0$ 。试验测试系统如图 3 所示。

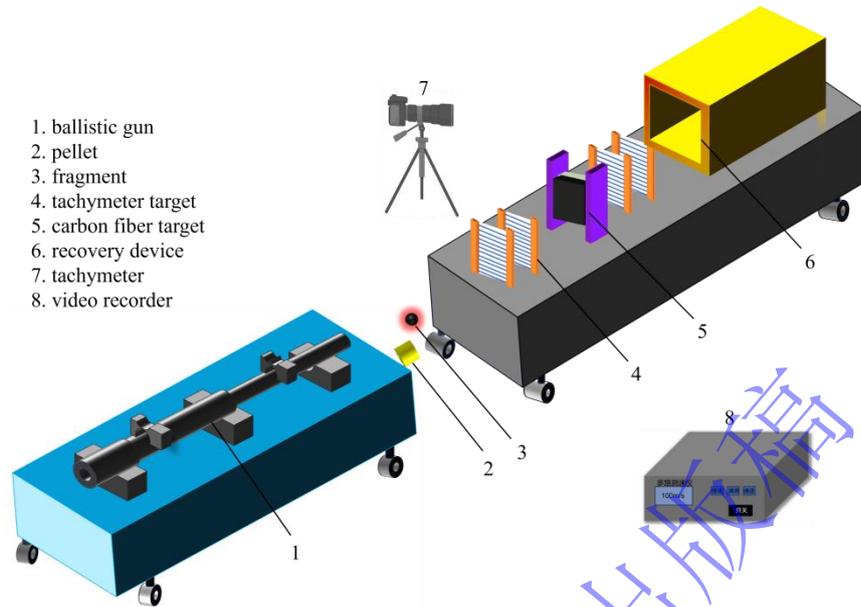


图 3 试验测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pilot test system

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验结果

试验结果的速度区间为 420.8-1169.2m/s，以便分析不同速度区间的毁伤特性。铅基非晶合金破片撞击不同试验靶的试验数据如表 1 所示。

表 1 试验结果

Table 1 Experimental results

类型	编号	初始速度 / (m/s)	碳纤维靶是否穿透	LY12 靶是否穿透
间隔靶	1	1148.7	是	是
	2	1103.9	是	是
	3	936.6	是	是
	4	862.9	是	是
	5	807.2	是	是
	6	767.5	是	是
	7	695.3	是	是
	8	619.3	是	是
	9	572.2	是	是
叠合靶	10	1169.2	是	是
	11	1049.4	是	是
	12	926.9	是	是
	13	858.1	是	是
	14	755.6	是	是
	15	734.1	是	是
	16	698.3	是	是
	17	545.4	是	是
	18	420.8	否	否

### 2.2 叠合靶试验毁伤情况

#### 2.2.1 铅基非晶合金破片冲击叠合靶中碳纤维靶的毁伤情况分析

铅基非晶合金破片撞击叠合靶中碳纤维靶板的毁伤形貌如图 4 所示，受到铅基非晶合金破片冲击时，碳纤维靶板迎弹面损伤主要以纤维和基体的剪切破坏和压缩变形为主，纤维被破片直接剪断。因此迎弹面穿

孔区域大小、形状与非晶合金破片的尺寸、横截面形状相似。背弹面则主要为拉伸撕裂破坏以及层间失效。这是因为背弹面纤维没有后续的纤维层支撑，故发生横向拉伸破坏。背弹面毁伤区域比迎弹面毁伤区域要小，这主要与背弹面紧贴 LY12 靶板，具有阻挡作用有关。

铅基非晶合金破片在撞击过程中，由于破碎释能反应和高速摩擦等原因，会产生大量的热能。这些热能通过热传导方式传递给靶板，但靶板并未发生热软化等热损伤。这种现象源于碳纤维复合材料具有良好的耐热性和热稳定性。与金属相比，碳纤维不易出现热软化效应，这使得它在高温环境下仍能保持其原有的形状和结构，也是其非常重要的优点之一。

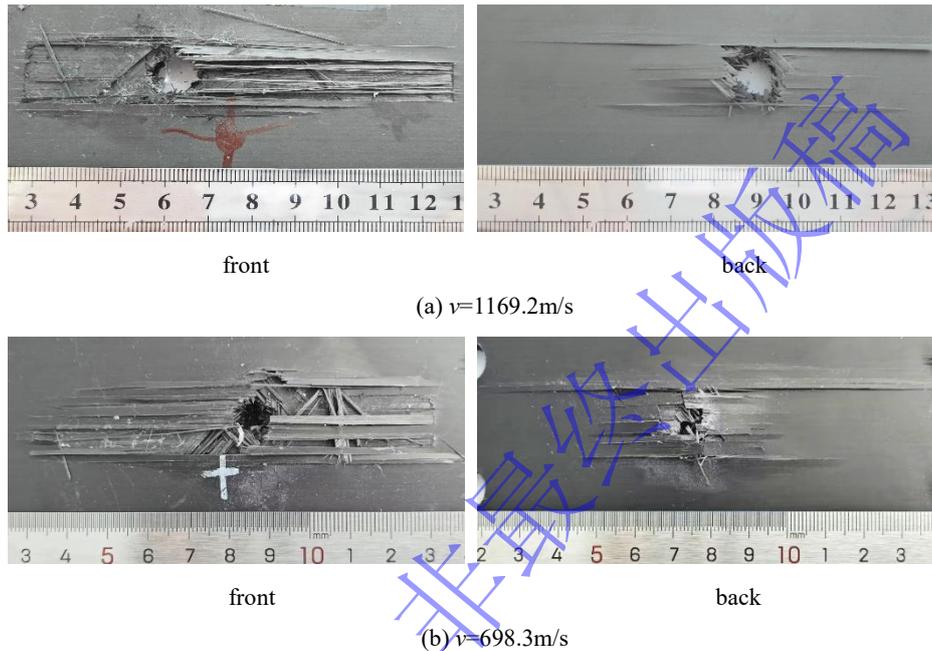


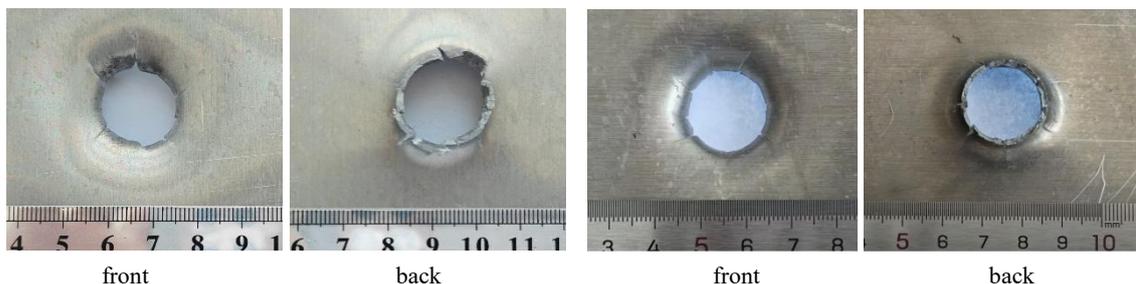
图4 碳纤维靶板的典型毁伤形貌

Fig. 4 Typical damage morphology of CFRP target plate

### 2.2.2 铅基非晶合金破片冲击叠合靶 LY12 的毁伤情况分析

铅基非晶合金破片撞击叠合靶中 LY12 靶板的毁伤形貌如图 5 所示。撞击速度分别为 1169.2m/s 和 1049.4m/s 时，LY12 靶的破坏方式均以剪切破坏为主，辅以一定的拉伸。破坏孔在靶板的正、反面均基本为圆形，孔径稍大于破片直径；撞击速度为 858.1m/s 时，破坏形式呈现多形并举情况即剪切、拉伸和撕裂同时出现。LY12 靶正面基本为圆形，径向有明显的撕裂纹，反面拉伸明显，且有部分断口产生；撞击速度为 734.1m/s 时，破坏形式主要是撕裂和拉伸。LY12 靶正、反面均为不规则裂口，径向撕裂十分明显，从背面观测，拉伸也很突出，且破孔尺寸最大；撞击速度为 698.3m/s 时，破坏方式以拉伸和径向裂纹破坏为主；撞击速度为 420.8m/s 时，破坏方式为撕裂。LY12 靶正面观测是带裂纹的较小三角孔，孔直径远小于破片直径，反面是带裂纹的鼓包撕裂，表明撞击速度较低，LY12 靶仅仅出现裂纹，破片并没有穿透 LY12 靶。

在这组试验中，非晶合金破片都发生了不同程度的破碎，穿孔周围都有不同程度的熏黑烧蚀痕迹，说明该试验条件下，铅基非晶合金破片冲击 6mm 碳纤维靶+2mmLY12 靶叠合结构靶的破碎临界速度大于 420.8m/s。



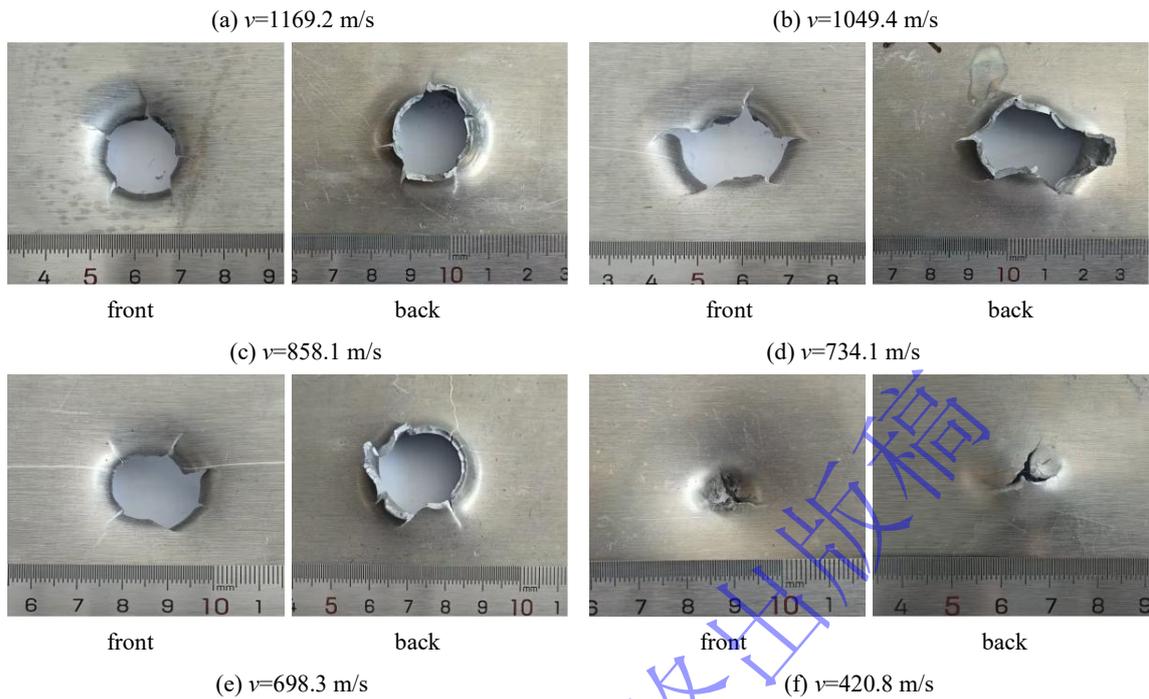


图 5 叠合靶 LY12 靶板的毁伤形貌

Fig. 5 The damaged appearance of LY12 target plate with laminated target

### 2.2.3 锆基非晶合金破片冲击叠合靶后剩余破片回收情况

为分析非晶合金破片在冲击叠合靶后的破碎情况，在叠合靶之后放置了回收装置进行了剩余破片的回收。破片回收情况如图 6 所示。当速度为 1169.2m/s 时，破片冲击叠合靶后破碎成大小不一的碎块，剩余破片与初始破片相比，表面留有明显的烧蚀痕迹，有些碎块表面附着熔融的 LY12 材料，其外部也有裂纹存在。说明破片在冲击过程中破碎，形成兼具动能和化学能的碎块云，对后续目标继续造成毁伤；随着撞击速度的降低，破片的碎裂情况逐渐减弱，主要体现在碎块数量减少，剩余质量增大；当着靶速度降至 545.4m/s 时，剩余破片破裂为几块较大的碎块，且分布了不同长度的裂纹，表面也留有一定程度的燃烧反应痕迹；当撞击速度为 420.8 m/s 时，破片没有碎裂，但是破片与靶板接触表面有熏黑的痕迹。

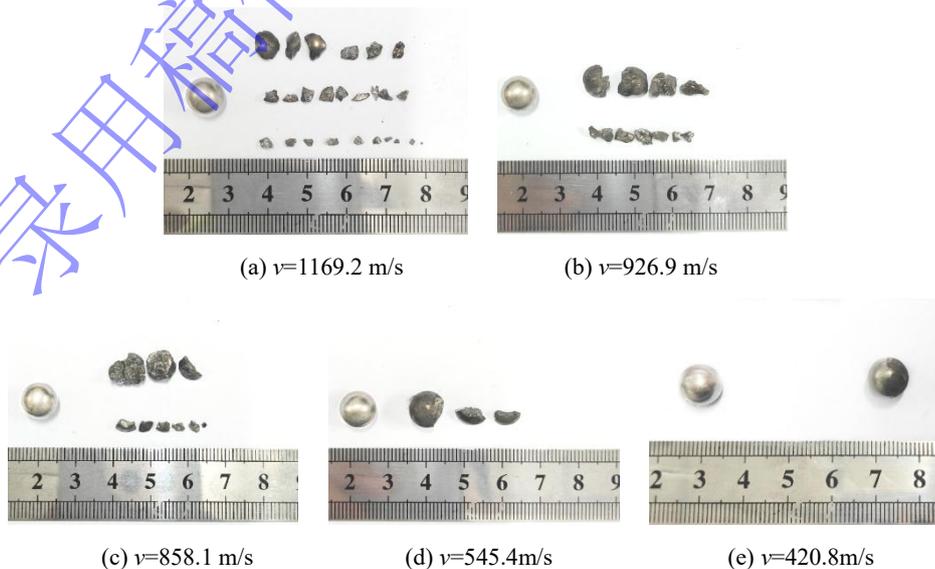


图 6 剩余破片回收情况

Fig. 6 Recovery of remaining fragments

## 2.3 间隔靶试验毁伤情况分析

### 2.3.1 锆基非晶合金破片冲击间隔靶碳纤维靶的毁伤情况分析

锆基非晶合金破片撞击间隔靶中碳纤维靶板的毁伤形貌如图 7 所示。破片高速冲击导致碳纤维复合材料表面产生局部应力集中，形成应力波。应力波在碳纤维复合材料中传播的速度非常快，对碳纤维材料的内部结构产生强烈的冲击作用<sup>[17]</sup>。随着冲击速度的增加，靶板承受的压力和剪切力也不断增加，碳纤维靶板中的纤维出现断裂，基体材料也发生塑性变形和失效，靶板产生穿孔。穿孔大小、形状与非晶合金破片的尺寸、形状相似。靶板迎弹面主要表现为纤维断裂和基体压缩失效，无明显凹陷变形；背弹面以纤维拉伸损伤为主，且有明显的凸出变形。背弹面毁伤区域比迎弹面毁伤区域要大，这与背弹面后没有任何支撑有关，且发生较大程度的横向拉伸破坏。

当速度相差不超过 5% 范围的情况下，间隔靶与叠合靶中的碳纤维毁伤形式相同，但是毁伤面积明显不同。当撞击间隔靶和叠合靶的速度分别为 695.3 m/s、698.3 m/s 时，间隔靶碳纤维靶背弹面凸起程度比叠合靶中凸起程度明显大，且间隔靶中碳纤维靶的背弹面毁伤面积与穿孔面积更大；间隔靶和叠合靶撞击速度分别为 1148.7 m/s、1169.2 m/s 时，间隔靶背弹面纤维分层面积比叠合靶中分层面积更大。说明靶板材质和厚度相同时，球型锆基非晶合金破片冲击间隔靶的毁伤能力更强。

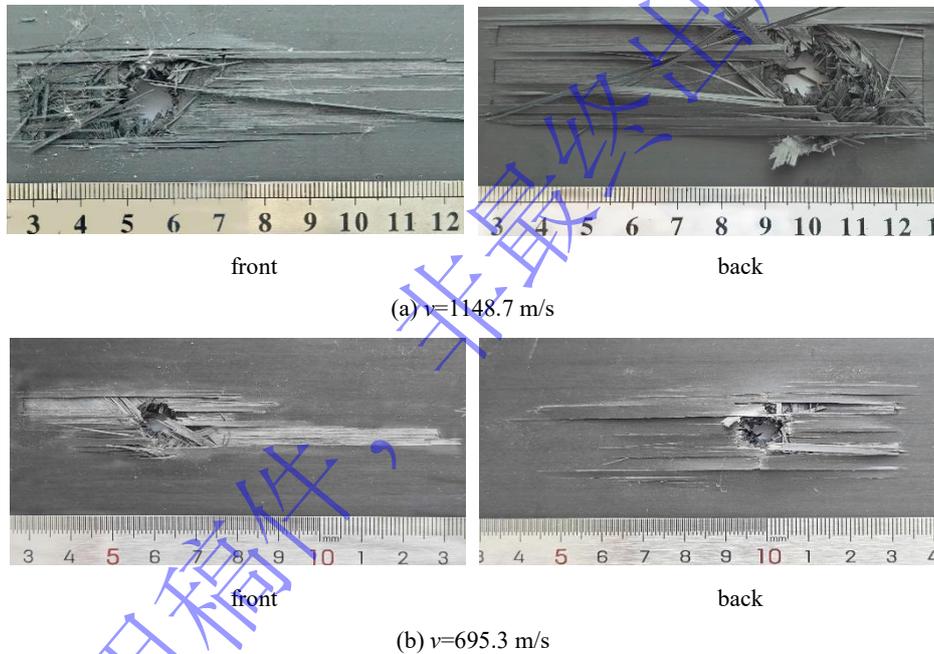


图 7 间隔靶碳纤维靶毁伤情况

Fig. 7 Carbon fiber damage in interstitial target

### 2.3.2 锆基非晶合金破片冲击间隔靶 LY12 靶板的毁伤情况分析

图 8 为锆基非晶合金破片撞击间隔靶中 LY12 靶板的毁伤形貌。撞击速度为 1148.7m/s-936.6 m/s 时，靶板损坏模式为撕裂和拉伸为主，穿孔形状不规则，穿孔面积远远大于破片横截面积，且在贯穿孔周围有明显的烧蚀熏黑痕迹和小碎块侵坑，背面外翻变形。只是随着撞击速度的降低，LY12 靶的撕裂面积减小，但形状均为不规则；撞击速度为 695.3m/s，572.2m/s 时，破片穿孔模式为延展性扩孔破坏，破片在 LY12 靶板上留下了较为规整的近圆形贯穿孔，穿孔直径略大于破片直径，并且在穿孔边缘留有烧蚀熏黑痕迹，背面有明显的延展性凸起，说明破片碎裂不严重，且有大碎块存在。

从以上不同速度下 LY12 靶毁伤形貌可以推断，LY12 毁伤面积与破片撞击速度正相关。在穿孔周围都有不同程度的烧蚀熏黑痕迹，说明间隔靶试验中非晶合金破片都发生了不同程度的破碎。同时表明，该试验条件下球型锆基非晶合金破片冲击间隔靶的破碎临界速度小于 572.2m/s。

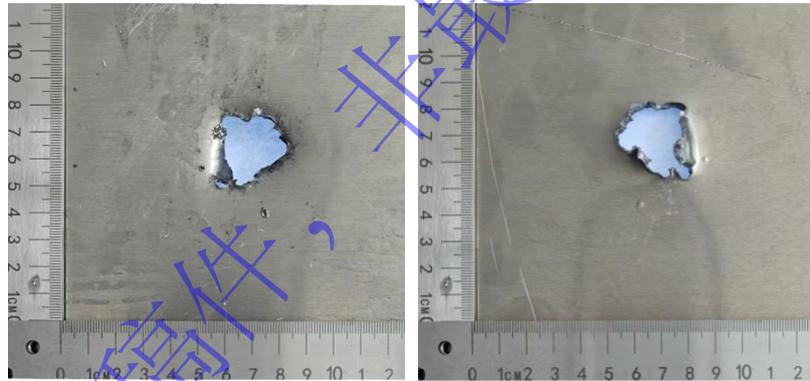
当速度相差不超过 5% 的范围情况下，分析间隔靶与叠合靶中 LY12 毁伤情况可知：间隔靶和叠合靶撞击速度分别为 695.3 m/s、698.3 m/s 时，穿孔形状均近似为圆形，靶板正面均有凹陷变形，但是叠合靶的

LY12 靶孔周围有明显的径向裂纹，而间隔靶基本没有，表明撞击 LY12 靶时速度损失不同，导致 LY12 靶毁伤模式发生变化，且间隔靶中 LY12 靶毁伤面积要比叠合靶中毁伤面积小，但非晶合金破片均发生释能反应并留有侵坑和烧蚀痕迹；间隔靶和叠合靶撞击速度分别为 1148.7 m/s、1169.2m/s 时，铝板的毁伤模式不同，且间隔靶 LY12 靶的毁伤面积远远大于叠合靶中 LY12 靶的毁伤面积。这表明，撞击速度基本相同时，非晶合金破片对后效的毁伤，有一定的距离时更能发挥其优势。主要原因是非晶合金破片撞击前靶后发生化学反应需要一定时间，而间隔靶正好满足这一要求。但是间隔距离的设置，与破片性能、尺寸、前靶性能及厚度、后效铝板厚度等因素密切相关。



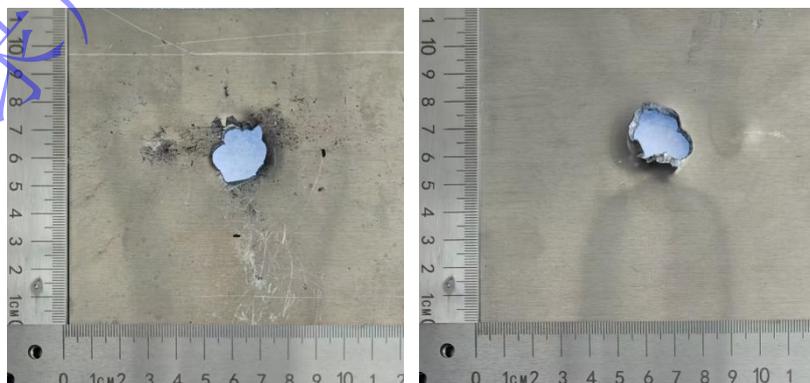
front back

(a)  $v=1148.7\text{m/s}$



front back

(b)  $v=1103.9\text{m/s}$



front back

(c)  $v=936.6\text{m/s}$

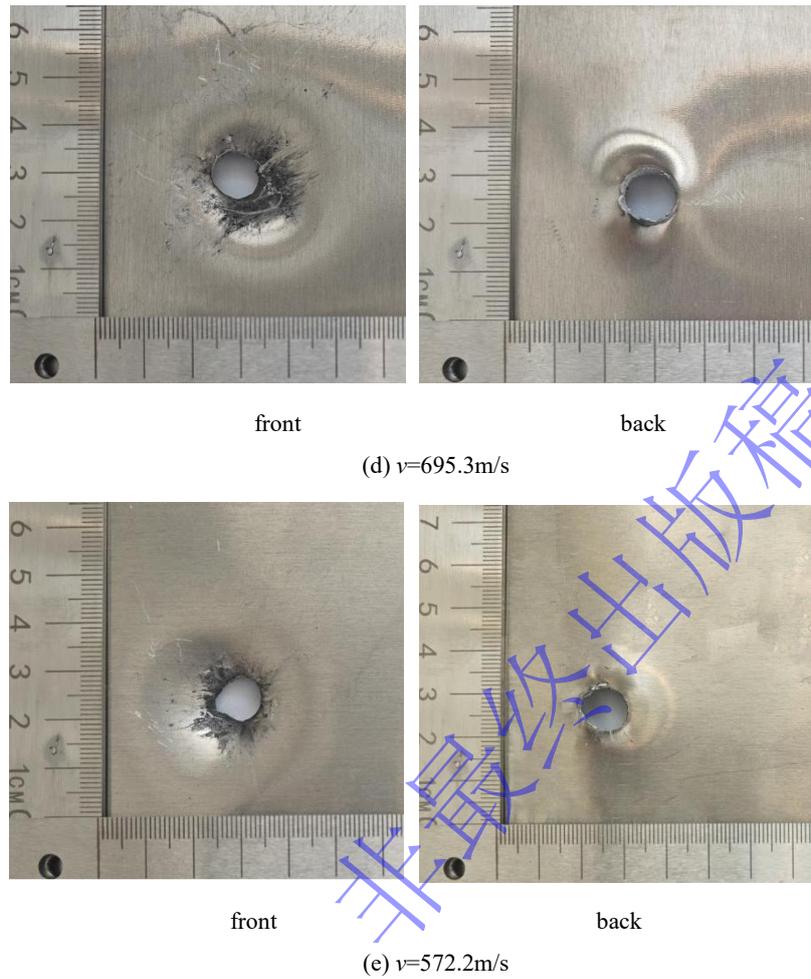


图 8 间隔靶 LY12 靶板的毁伤形貌

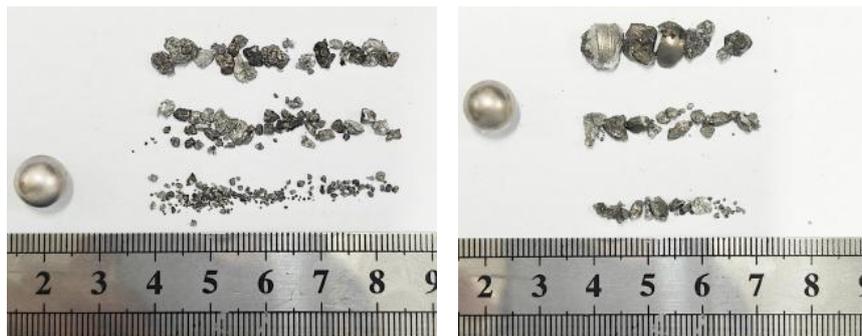
Fig. 8 The damage morphology of interstitial target LY12 target

### 2.3.3 锆基非晶合金破片冲击间隔靶后剩余破片回收情况

通过在靶后设置回收装置，对剩余破片进行了回收，以此分析间隔靶情况下破片不同速度时的破碎程度，破片回收情况如图 9 所示。

速度为 1148.7m/s 时，破片二次冲击 LY12 靶之后破碎成大量的碎块，碎块表面均有不同程度烧蚀痕迹，且碎块尺寸均小于 5mm；速度为 936.6m/s 时，LY12 靶板的冲塞因破片燃烧反应产生的高温，破片碎块与冲塞相互附着在一起，但破片未与靶板接触的部分仍有金属光泽，说明破片仅是撞击接触部分发生氧化释能反应；速度为 572.2m/s 时，破片破碎程度更低，破片与靶板接触部分发生细微破碎，并产生裂纹。

从上述情况中可以看出，当速度为 572.2-1148.7m/s 之间，破片破碎程度与着靶速度成正相关，破片与靶板接触部分更容易发生破碎和化学反应，未接触部分易产生裂纹。



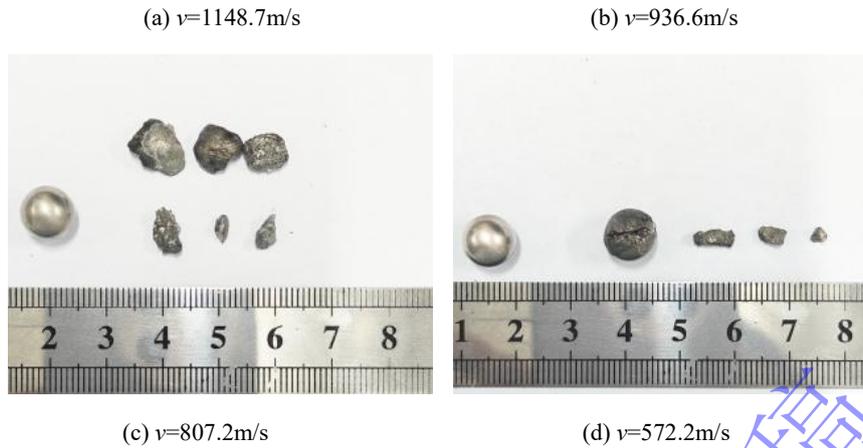


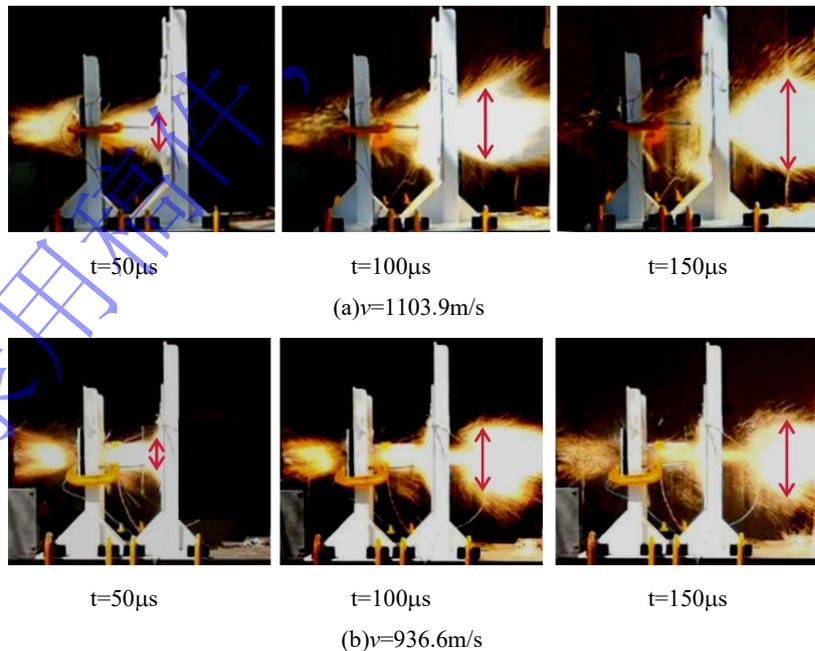
图 9 剩余破片回收情况

Fig. 9 Recovery of remaining fragments

## 2.4 锆基非晶合金破片冲击不同设置靶板录像帧分析

锆基非晶合金破片撞击不同设置靶板的摄像帧如图 10 所示，以进一步分析不同设置靶板时球形锆基非晶合金破片毁伤效应。相同设置靶板的不同速度下，可以明显看出随着速度的增加，火光亮度和纵向扩展距离明显增加，非晶合金破片的化学释能反应更加剧烈。说明非晶合金破片在撞击碳纤维前靶过程中发生释能反应，导致其分解为大小不一具有动能和化学能的碎块组成碎块云。碎块云继续撞击后靶，速度低时碎块撞击 LY12 靶可能二次破碎，但释能反应相对较少；速度高时破片二次破碎，碎块尺寸更小，火光亮度大，化学释能反应更充分。

同时还发现，靶板设置对破片破碎形成碎块云的散布范围和碎块分布密度也有一定影响。在叠合靶设置时，碎块的散布范围较小，碎块分布较为密集，火光径向扩展距离较小；而在间隔靶试验时，碎块散布范围较大，分布较为分散，火光径向距离较大。



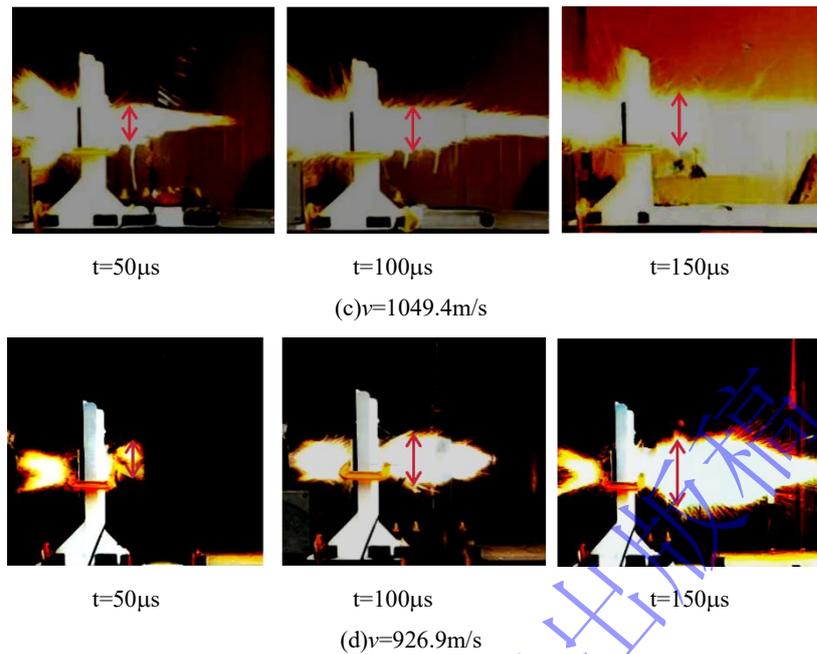
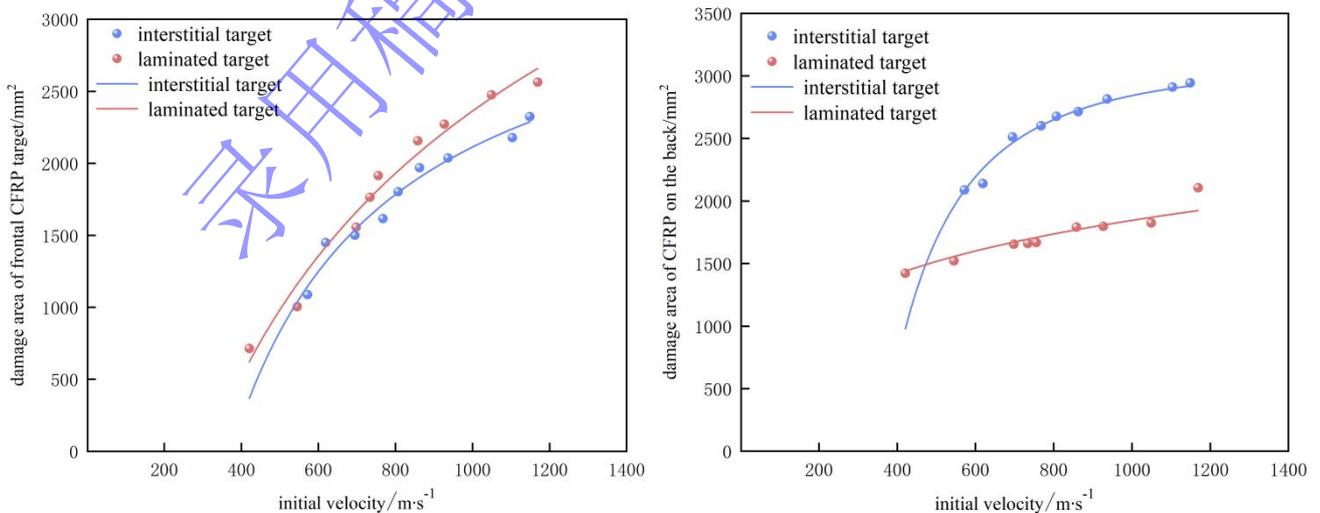


图 10 不同设置靶板的典型摄像帧

Fig. 10 Typical camera frames for different target plate settings

### 3 靶板毁伤面积分析

为分析非晶合金破片对不同设置靶中碳纤维靶板的毁伤情况，分别对两种设置靶中碳纤维靶的正面及背面毁伤面积与撞击速度的关系进行了拟合。从图 11 可见，随着撞击速度的提高，间隔靶和叠合靶中碳纤维靶板毁伤面积均在增大。相同速度下，叠合靶中碳纤维靶板正面毁伤面积大于间隔靶的。这是由于在高速冲击过程中，叠合靶中碳纤维靶板与 LY12 靶板紧密贴合，导致应力波在碳纤维靶正面的作用时间增长，且衰减幅值减弱所致；当撞击速度相同时，间隔靶中碳纤维靶背面毁伤面积大于叠合靶，这与叠合靶结构密不可分，在破片侵彻叠合靶过程中，后面紧贴的 LY12 靶板阻滞了碳纤维靶板背弹面的拉伸和变形，进而减弱了背弹面纤维的损坏和基体毁伤。



(a) Area of damage on the face of the CFRP target

(b) Area of damage on the back of the CFRP target

图 11 两种设置靶中撞击速度与碳纤维靶毁伤面积关系图

Fig.11 Plot of impact velocity versus area of carbon fibre target damage for two target settings

由于非晶合金破片撞击 LY12 靶板形成的毁伤区域形状不规则，难以直接测量其面积大小，故使用

MATALB 中图像采集处理功能，将试验破孔图像转化为简单的黑白图像，以便更好的观察和分析毁伤区域的情况<sup>[18]</sup>。如图 12 所示，利用图像滤波、边缘检测、二值化等处理方法，将彩色图像转化为灰度图像。将灰度图像中大于或等于设定阈值的像素设置为白色（通常为 0），小于设定阈值的像素设置为黑色（通常为 255）。获得黑白二值图像，通过测量图像中各个像素的亮度值，可以计算出毁伤区域的面积大小。

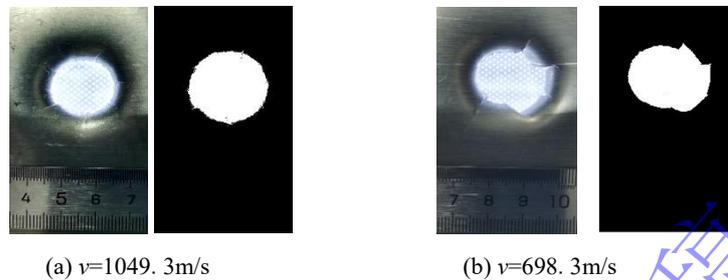


图 12 二值化结果

Fig.12 Binarization result

表 2 为通过二值法得到 LY12 靶毁伤面积结果。由表 2 试验数据可知，叠合靶试验中，非晶合金破片速度为 420.8m/s 时，它对 6mm 碳纤维靶造成贯穿之后并未对 LY12 靶造成穿透。对比叠合靶试验中 LY12 靶毁伤面积，不难发现破片速度由 698.3m/s 增加到 1169.2m/s 时，LY12 靶毁伤面积由 150.6mm<sup>2</sup>增大到 317.4mm<sup>2</sup>，增幅为 110.8%。而间隔靶试验组中，695.3 m/s 增加至 1148.7m/s 时，LY12 靶的毁伤面积由 156mm<sup>2</sup>增加至 508.2mm<sup>2</sup>，增幅为 225.8%。

表 2 不同设置靶板中 LY12 靶毁伤面积

Table 2 Destruction area of LY12 targets at different set

类型	编号	初始速度/m/s	LY12 毁伤面积/mm <sup>2</sup>	
间隔靶	1	1148.7	508.2	
	2	1103.9	439.2	
	3	936.9	312.4	
	4	862.9	206.9	
	6	767.5	176.6	
	7	695.3	150	
	9	572.2	80.7	
	叠合靶	10	1169.2	317.4
		11	1049.4	310.6
12		933.6	290.9	
13		858.1	269.3	
15		734.1	377.5	
16		698.3	156.6	
17		545.4	75.3	
18		420.8	0	

图 13 为锆基非晶合金破片速度和 LY12 靶毁伤面积之间的曲线拟合结果。试验中，420.8m/s 破片并未穿透 LY12 靶板，因此，在数据分析中，并未将其纳入拟合曲线。点 A 为着靶速度为 734.1m/s，靶后 LY12 靶毁伤面积为 377.5mm<sup>2</sup>时的结果。造成面积的突然增加与破片破碎之后形成碎块的质量和尺寸密切相关，尤其是其中最大碎块的面积。此外破片在破碎为碎块时，可能存在一定的飞散角，导致碎块并未在靶板中心贯穿，而是在中心边沿处穿透靶板，造成毁伤面积显著增加。

仔细观察曲线发现，在碳纤维靶厚度不变的条件下，当锆基非晶破片的速度达到其破碎临界速度时，随着速度的增加破片对 LY12 靶造成的毁伤面积也不断增大。从图 13 中可以看出，当撞击速度低于 954.7m/s(图 13 中紫色标记点)时，相同撞击速度下，叠合靶中 LY12 后效靶的毁伤面积更大。但当撞击速度高于这个值后，后效 LY12 靶的毁伤面积间隔靶的急剧增大，而叠合靶的趋于平缓。说明非晶合金在此试验条件下，破碎程度加剧，间隔距离的增加导致形成的碎块云分散，分布范围更广，对 LY12 靶整体毁伤面积增加。这意味着，在高速撞击作用下，为了使非晶合金破片发挥更好的毁伤效果，设置间隔靶有助于碎片的径向扩散，从而增强对后续靶标的毁伤能力。

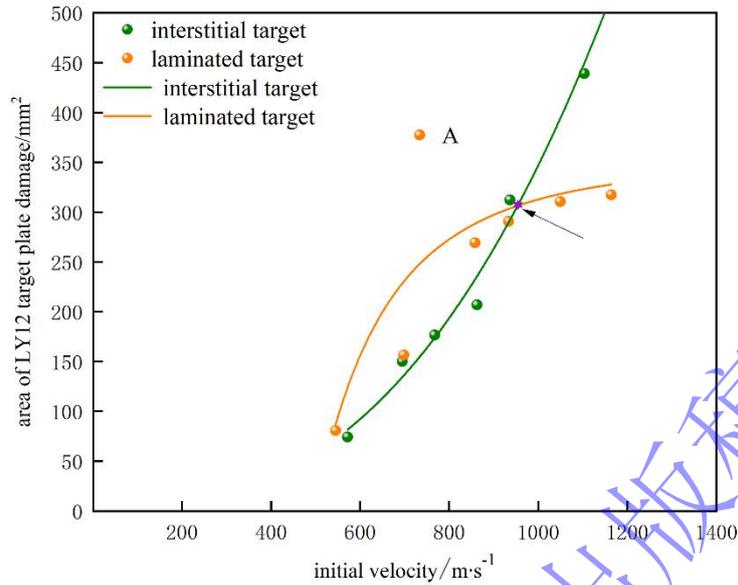


图 13 破片速度和 LY12 靶毁伤面积曲线拟合

Fig. 13 Fitting of fragmentation velocity and LY12 target damage area curves

## 4 结论

利用 12.7mm 弹道枪加载球型锆基非晶合金破片冲击间隔靶和叠合靶试验, 对破片冲击碳纤维的毁伤特性和对后效靶 LY12 靶毁伤能力展开研究, 得出以下结论:

(1) 球型锆基非晶合金破片冲击碳纤维靶板, 迎弹面主要为纤维和基体的剪切破坏和压缩变形失效, 毁伤, 背弹面则主要为纤维拉伸撕裂破坏以及层间脱落。球型锆基非晶合金破片冲击 6mm 厚碳纤维发生破碎速度阈值应在 420.8-545.5m/s 之间。

(2) 随着撞击速度的提高, 间隔靶和叠合靶中的碳纤维靶板毁伤面积均随之增加。在相同撞击速度下 (大于 600m/s), 叠合靶中碳纤维靶迎弹面毁伤面积大于间隔靶中碳纤维靶迎弹面毁伤面积, 而其背弹面毁伤面积小于间隔靶中碳纤维靶背弹面毁伤面积。随着撞击速度的提高, 叠合靶后效 LY12 靶的毁伤面积呈缓慢增大趋势, 而间隔靶后效 LY12 靶的毁伤面积呈快速增长趋势。速度低于 954.7m/s 时, 间隔靶后效靶 LY12 靶板毁伤面积小于叠合靶中 LY12 靶毁伤面积。

(3) 非晶合金破片在撞击靶板过程中发生破碎, 在高速冲击条件下 (速度大于 695.5m/s), 形成具有动能和化学能的碎块云, 叠合靶条件下, 非晶合金破片穿透 LY12 靶板主要依靠动能毁伤; 间隔靶条件下, 破片侵彻 LY12 靶板由动能和化学能共同作用, 其中化学能引发的扩孔效应占主导地位。

## 参考文献

- [1] 张先锋,赵晓宁.多功能含能结构材料研究进展[J].含能材料,2009,17(06):731-739. DOI:10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.021. ZHANG X F, ZHAO X N. Review on Multifunctional Energetic Structural Materials[J]. Journal of Energetic Materials, 2009,17(06): 731-739. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.06.021.
- [2] Xu F Y, Zheng Y F, Yu Q B, et al. Experimental study on penetration behavior of reactive material projectile impacting aluminum plate[J].International Journal of Impact Engineering, 2016, 95(Sep.):125-132. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.05.007.
- [3] Walters W P, Kecskes L J, Pritchett J E. Investigation of a Bulk Metallic Glass as a Shaped Charge Liner Material [R]. Investigation of a Bulk Metallic Glass as a Shaped Charge Liner Material, 2006.U.S. Army Research Laboratory
- [4] Conner R D, Dandliker R B, Scruggs V. Dynamic deformation behavior of tungsten-fiber/metallic-glass matrix composites[J].International Journal of Impact Engineering, 2000, 24(5):435-444. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00176-1.

- [5] 张云峰,罗兴柏,刘国庆,等. W/ZrNiAlCu 亚稳态合金复合材料破片对 RHA 靶的侵彻释能特性[J].爆炸与冲击, 2020, 40(2):7. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0065.  
ZHANG Y F, LUO X B, LIU G Q, et al. Invasive energy release characteristics of W/ZrNiAlCu sub-stable alloy composite breakers on RHA targets[J].Explosion and Shock Waves,2020, 40(2):7. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0065.
- [6] 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. DOI: 10.11943/CJEM2019219.  
SHANG C N, SHI D M, ZHANG Y F et al. Combustion energy release characteristics of Zr-based amorphous alloys[J].Journal of Energetic Materials,2020,28(06):564-568. DOI: 10.11943/CJEM2019219.
- [7] 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, CHA X et al. Impact energy release characteristics of ZrTiCuNiBe amorphous alloy and its tungsten wire reinforced composites[J].Transactions of Beijing Institute of Technology,2023,43(10):1036-1046. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.084.
- [8] 杨林,于述贤,范群波.Zr<sub>77.1</sub>Cu<sub>13</sub>Ni<sub>9.9</sub> 非晶合金破片侵彻 LY12 铝合金及 TC4 钛合金靶板毁伤后效及机理对比研究[J].北京理工大学学报,2023,43(04):417-428. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.092.  
YANG L, YU S X, Fan Q B. Comparative study on the destructive after-effects and mechanism of Zr<sub>77.1</sub>Cu<sub>13</sub>Ni<sub>9.9</sub> amorphous alloy fragment infiltration on LY12 aluminum alloy and TC4 titanium alloy target plates[J].Transactions of Beijing Institute of Technology,2023,43(04):417-428. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.092.
- [9] Chen Xi, Du Chengxin, Cheng Chun, Du Zhonghua, Pan Nianqiao. Impact-induced chemical reaction behavior of ZrTiNiCuBe bulk metallic glass fragments impacting on thin plates[J]. Material in Tehnologije,2018,52(6). DOI: 10.17222/mit.2018.089.
- [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.DOI: 10.11883/bzycj-2019-0303.  
ZHANG Y L, SHI D M, ZHANG Y F, et al. Investigation of penetration ability and aftereffect of Zr-based metallic glass reinforced porous W matrix composite fragments [J].Explosion and Shock Waves,2021,41(05):58-66. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0303.
- [11] 李建利,赵帆,张元,等.碳纤维及其复合材料在军工领域的应用[J].合成纤维, 2014(3):4. DOI: CNKI:SUN:HXCXW.0.2014-03-008.  
LI J, ZHAO F, ZHANG Y, et al. Application of carbon fiber and its composites in military industry [J]. Synthetic Fiber in China, 2014(3):4. DOI: CNKI:SUN:HXCXW.0.2014-03-008.
- [12] 黄亿洲,王志瑾,刘格菲.碳纤维增强复合材料在航空航天领域的应用[J].西安航空学院学报,2021,39(05):44-51. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9233.2021.05.009.  
HUANG Y Z, WANG Z J, LIU G F. Application of carbon fiber reinforced composite in aerospace [J]. Journal of Xi'an Aeronautical Institute, 2021,39(05):44-51. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9233.2021.05.009.
- [13] 李健,洪术华,沈金平.复合材料在海洋船舶中的应用[J].机电设备,2019,36(4):57-59. DOI: 10.16443/j.cnki.31-1420.2019.04.013.  
LI J, HONG S H, SHEN J P. Applications of composite materials on marine ships [J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2019,36(4):57-59. DOI: 10.16443/j.cnki.31-1420.2019.04.013.
- [14] 周杰,何勇,何源,等.AI/PTFE/W 反应材料的准静态压缩性能与冲击释能特性[J].含能材料,2017,25(11):903-912. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.004.  
ZHOU Jie, HE Yong, HE Yuan et al. Quasistatic compressive properties and impact energy release characteristics of AI/PTFE/W reactive materials Chinese [J]. Journal of Energetic Materials 2017,25(11):903-912. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.11.004.
- [15] 罗普光,毛亮,魏晨扬,等.锆基非晶活性材料动态力学性能及本构关系[J].含能材料,2021,29(12):1176-1181. DOI: 10.11943/CJEM2021068.  
LUO P G, MAO L, WEI C Y, et al. Dynamic mechanical properties and Constitutive relations of Zr-based amorphous reactive material [J].Journal of Energetic Materials, 2021,29(12):1176-1181. DOI: 10.11943/CJEM2021068.
- [16] 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(9):2-40. DOI: 1

- 0.11883/bzycj-2023-0189.  
HOU X W, ZHANG X F, XIONG W, et al. Research progress on impact energy release characteristics of reactive disordered alloy and its application in kill elements [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 43(9):2-40. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0189.
- [17] 杜宁,张先锋,熊玮,等. 爆炸驱动典型活性材料能量释放特性研究[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(4):41-50. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0239.  
DU N, ZHANG X F, XIONG W, et al. Energy-release characteristics of typical reactive materials under explosive loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(4):41-50. DOI: 2021, 29(10):1008-1018.
- [18] 王震鸣. 复合材料结构力学[J]. *力学进展*, 2012, 16(2):202-209. DOI: 10.6052/1000-0992-1986-2-j1986-024.  
Wang Z M. Structural mechanics of composite materials[J]. *Advances in Mechanics*, 2012, 16(2):202-209. DOI: 10.6052/1000-0992-1986-2-j1986-024.
- [19] 贾杰,智小琦,郝春杰,等. Zr基非晶破片对碳纤维复合靶及后效铝靶的侵彻试验研究[J]. *高压物理学报*, 2024, 38(2):127-136. DOI: 10.11858/gywlyxb.20230764.  
JIA J, ZHI X Q, HAO C J, et al. Experimental study on the penetration of Zr-based amorphous fragment into carbon fiber composite target and post-effect aluminum target [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(2):127-136. DOI: 10.11858/gywlyxb.20230764.
- [20] 罗锐恒,智小琦,张姚瑶. Zr基非晶合金反应材料的力学性能与冲击烧蚀特性[J]. *金属功能材料*, 2023, 30(03):83-92. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-8192.20230037.  
LUO R H, ZHI X Q, ZHANG Y Y. Mechanical properties and impact ablation characteristics of Zr-based amorphous alloy reactive materials[J]. *Metallic Functional Materials*, 2023, 30(03):83-92. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1005-8192.20230037.
- [21] Aktas M, Karakuzu R, Arman Y. Compression-after impact behavior of laminated composite plates subjected to low velocity impact in high temperatures[J]. *Composite Structures*, 2009, 89(1):77-82. DOI: 10.1016/j.compstruct.2008.07.002.
- [22] Nan Z, Guangming Z, Xiumei G, et al. High-velocity impact damage and compression after impact behavior of carbon fiber composite laminates: Experimental study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 181:104749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104749>.
- [23] Thorsson S I, Sringeri S P, Waas A M, et al. Experimental investigation of composite laminates subject to low-velocity edge-on impact and compression after impact[J]. *Composite Structures*, 2017, 186(FEB.):335-346. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.11.084.
- [24] Kim Y A, Woo K, Cho H, et al. High-Velocity Impact Damage Behavior of Carbon/Epoxy Composite Laminates[J]. *International Journal of Aeronautical & Space Sciences*, 2015, 16(2):190-205. DOI: 10.5139/IJASS.2015.16.2.190.