DOI: 10.11858/gywlxb.20230764

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

贾 杰[1], 智小琦[1], 郝春杰[2], 李 劲[1], 郭 璐[1], 柳星河[1]

（1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051;
2. 晋西工业集团, 山西 太原 030027）

摘要: Zr 基非晶破片是一种新兴的活性高效毁伤元, 其着靶速度达到一定阈值时会发生燃烧反应并破碎, 从而大幅提高其后效毁伤能力。为研究 Zr 基非晶破片对碳纤维增强复合材料的侵彻破坏机理及后效毁伤能力, 利用弹道枪加载球形破片, 分别以 496.4～1 085.8 m/s、571.4～1 103.9 m/s 的速度范围撞击 8 和 6 mm 厚的碳纤维复合靶, 并布置 2 mm 厚 LY12 铝靶板作为后效靶, 以比较破片在不同工况下的后效毁伤能力。实验结果表明: 碳纤维靶受活性破片冲击时, 其迎弹面的破坏形式主要是压缩失效与剪切失效的耦合破坏, 其背弹面的破坏形式主要是拉伸失效破坏与层间的脱粘分裂; 随着破片着靶速度的提高, 碳纤维靶板的压剪耦合破坏比例逐渐增加, 拉伸断裂与分层现象逐渐减弱; 破片对于 8 和 6 mm 厚碳纤维靶的弹道极限速度分别为 351.9、264.6 m/s; 相同着靶速度下, 8 mm 厚碳纤维靶的后效毁伤面积大于 6 mm 厚碳纤维靶的后效毁伤面积, 两者之间的差异随着着靶速度的提高而逐渐减小; 破片冲击等厚度碳纤维靶时, 破片的后效毁伤能力随着靶速度的提高而增强。

关键词: Zr 基非晶合金; 碳纤维增强复合材料; 后效毁伤能力; 活性破片

中图分类号: O385 **文献标志码:** A

Zr 基非晶含能破片是近年来新兴的一种深侵彻活性高效毁伤元[1−2], 与普通铝/聚四氟乙烯含能破片相比, 能侵彻较厚的坚硬目标, 且高速撞击目标后破碎并发生快速的化学反应, 释放大量能量并产生强烈的燃烧效应, 增强对目标及其后效的毁伤能力, 使战斗部的终端毁伤效能增益[3]。

目前, 有关活性破片侵彻毁伤的研究主要以其自身撞靶反应机理以及对传统金属靶的毁伤效能为主。Chen 等[4] 通过弹道枪加载 Zr 基非晶合金破片冲击薄靶板, 发现其释能反应强度由破片的冲击速度和靶板厚度共同决定; Wei 等[5−6] 对锆基非晶合金的燃烧反应行为进行了研究, 分析了碎片大小对释能反应的影响, 发现粒径为 10 μm 以内的碎片颗粒可完全燃烧, 而粒径大于 10 μm 的碎片的燃烧反应仅限于碎片表层; 张云峰等[7] 采用弹道枪发射 W/Zr 非晶合金破片侵彻轧制均质装甲（RHA）靶, 通过高速摄影定量分析了 W/Zr 非晶合金破片侵彻时的释能反应能, 获得了破片对 10.5 mm 厚 RHA 装甲的临界侵彻速度。郭磊等[8] 从 Zr 基活性破片对间隔防护结构的冲击试验入手, 研究了 $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 非晶材料对 Q235 靶板的侵彻、靶板前后碎片云的分布特征、毁伤作用能力以及靶后超压, 建立了靶前和靶后碎片云轮廓线方程。罗普光等[9] 通过数值模拟与试验相结合的方法研究了 Zr 基非晶活性破片撞击 45 钢靶板的过程及靶后碎片云的运动特性, 发现在一定范围内活性破片对靶后目标的毁伤面积随破片撞靶速度的增加而增大。杨林等[10] 通过数值模拟与试验对比分析了 Zr 基非晶合金毁伤元侵彻

* **收稿日期:** 2023-10-22; **修回日期:** 2023-11-10
基金项目: 中北大学第 18 届研究生科技立项（20221805）
作者简介: 贾 杰（1997—）, 男, 硕士研究生, 主要从事弹箭高效毁伤研究. E-mail: 565466907@qq.com
通信作者: 智小琦（1963—）, 女, 博士, 教授, 主要从事武器毁伤与装药技术研究. E-mail: zxq4060@sina.com

LY12 和 TC4 的毁伤特性，发现破片侵彻 TC4 屏蔽靶后在 LY12 后效靶上造成的破孔面积显著大于侵彻 LY12 屏蔽靶后在 LY12 后效靶上造成的破孔面积。

综合上述研究可见，目前，国内外学者对非晶类活性破片侵靶毁伤特性的研究主要以金属靶板为主。碳纤维增强复合材料具有密度低、比强度和刚度高、抗疲劳和抗腐蚀性能强的特点，现已广泛应用于航空航天以及军事防护领域，如军用火箭发动机、导弹弹头、飞机机体、机翼、蒙皮、装甲车辆、装甲舰艇等[11−13]。本研究以碳纤维增强复合材料为靶材，并以硬铝靶作为后效靶，研究 Zr 基非晶破片撞击碳纤维增强复合材料的侵彻和破坏特性，观测后效靶状态，以期为相关武器的结构设计和毁伤研究提供可靠的基础。

1　试验系统与方法

试验所用破片为球形，直径为 9.4 mm，质量为 3.05 g，主要组成元素包括 Zr、Cu、Ti、Al、Nb，通过尼龙弹托将其固定，并使用 12.7 mm 口径滑膛弹道枪发射。发射后，破片在空气阻力的作用下与弹托分离，随后依次撞击碳纤维屏蔽靶以及 LY12 后效靶。根据撞击速度，测量主靶孔径和后效靶的破孔面积，以表征破片的毁伤能力。图 1 显示了试验所用的破片、弹托及测试弹体。

碳纤维屏蔽靶（购自江苏博实碳纤维科技有限公司）为准各向同性碳纤维增强树脂基复合材料 T700（YB01）。考虑到装备部件中碳纤维复合材料的常见厚度为 0.2～100.0 mm[14−15]，因此，本研究中碳纤维屏蔽靶的厚度选择 6 和 8 mm，大小为 160 mm×120 mm，靶材铺层顺序均为 [0°/45°/90°]，LY12 铝后效靶的尺寸为 300 mm×300 mm×2 mm。碳纤维屏蔽靶与 LY12 铝后效靶通过螺栓固定在靶架上，以限制其自由度，其中，在碳纤维靶与靶架的接触面上放置 1.5 mm 厚橡胶垫，以防止靶板边界受力变形，主靶与后效靶的间距为 200 mm。靶板布置如图 2 所示。表 1 列出了碳纤维复合材料的性能参数，其中：E_1 为纵向弹性模量，E_2 为横向弹性模量，G 为剪切模量，X_T 为纵向抗拉强度，X_C 为纵向抗压强度，Y_T 为横向抗拉强度，Y_C 为横向抗压强度，S_C 为层间剪切强度，ν 为泊松比，ρ 为密度。

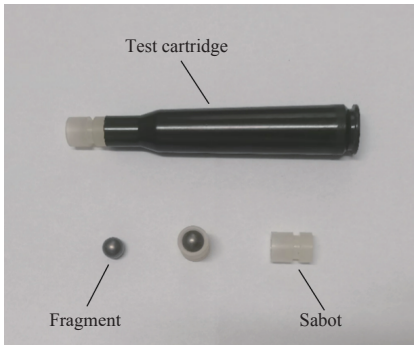


图 1　破片、弹托及测试弹体

Fig. 1　Fragment, sabot and test cartridge

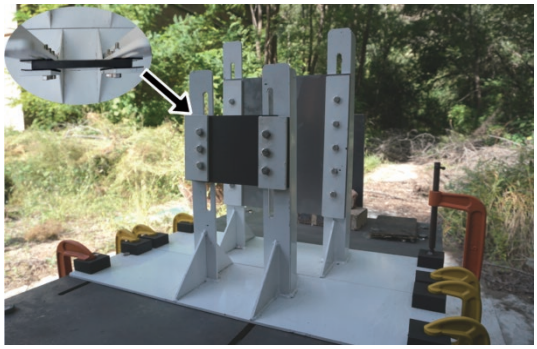


图 2　靶板布置

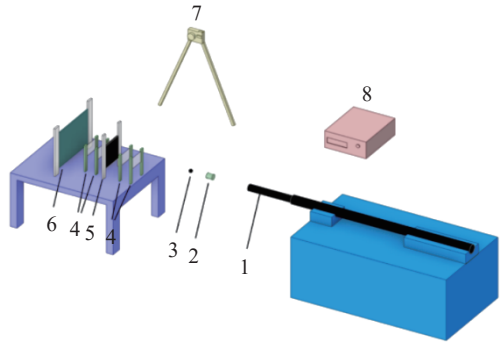
Fig. 2　Layout of target plate

表 1　碳纤维复合材料性能参数

Table 1　Performance parameters of carbon fiber composites

E_1/GPa	E_2/GPa	G/GPa	X_T/GPa	X_C/GPa	Y_T/MPa	Y_C/MPa	S_C/MPa	ν	ρ/(kg·m^{-3})
125	7.8	5.6	2.5	1.1	72	220	92	0.316	1 600

为测量破片的着靶速度以及撞击碳纤维靶后的剩余速度，在碳纤维靶板的前后分别设置测速网靶，2 组测速网靶的前后间距均为 170 mm，测速装置为 NLG202-Z 型六路测速仪，精度为 0.1 μs。在试验系统侧方架设相机，以观测不同工况下破片的反应程度。图 3 为试验系统示意图。



1. Ballistic gun;
2. Sabot;
3. Fragment;
4. Coil target;
5. Carbon fiber reinforced composite target;
6. LY12 aluminum target;
7. Camera;
8. Velocity measuring device.

图 3　试验系统示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the test system

2　试验结果与分析

2.1　Zr 基非晶破片对 2 种厚度碳纤维靶的弹道极限

Zr 基非晶球形破片撞击不同厚度碳纤维靶及后效铝靶的试验数据如表 2 所示，其中：撞击 8 mm 厚碳纤维靶试验共 7 发，撞击 6 mm 厚碳纤维靶试验共 5 发。

表 2　试验数据

Table 2　Test data

Target plate thickness/mm	Test No.	Impact velocity/(m·s^{-1})	Residual velocity/(m·s^{-1})	Perforation diameter/mm
8	1	1 085.8	764.9	10.17
	2	1 008.9	688.3	9.89
	3	904.3	530.6	9.68
	4	790.3	515.7	9.80
	5	691.1	443.2	9.64
	6	679.7	411.6	9.75
	7	496.4	123.1	9.56
6	8	1 103.9	931.5	10.14
	9	936.6	724.6	10.07
	10	767.5	590.7	9.85
	11	695.3	537.1	9.67
	12	571.4	442.6	9.57

由表 2 可知，破片侵彻碳纤维靶造成的穿孔直径与破片直径基本相当，虽然撞击速度较高的破片形成的穿孔直径稍大，但当破片速度提高 118.7% 时，穿孔直径仅增大 6.4%。这是由于碳纤维具有较高的热稳定性和抗高温性能，相较于金属靶板，不会表现出明显的热软化效应，且碳纤维所具有的组织结构特点使得破片对碳纤维靶板的径向挤压作用与金属靶存在显著差异。

利用 Recht 等[16] 的公式处理破片的初始速度 v_i 和剩余速度 v_r 数据，可得到 Zr 基非晶破片对于 2 种厚度碳纤维复合材料靶的弹道极限速度。

$$v_r=\begin{cases}0 & 0\leqslant v_i\leqslant v_{50}\\ a\sqrt{v_i^2-v_{50}^2} & v_i>v_{50}\end{cases} \tag{1}$$

式中：v_{50} 为弹道极限速度；a 为拟合参数，$a=m_p/(m_p+m_{pl})$，m_p 及 m_{pl} 分别为破片质量和冲塞质量。v_{50} 和 a 可通过试验数据由最小二乘法拟合得到。表 3 给出了通过拟合得到的破片侵彻碳纤维靶板的弹道极限速度及拟合参数。图 4 给出了 Zr 基非晶破片侵彻碳纤维靶板的初始速度与剩余速度的关系曲线。

表 3　Zr 基非晶破片对碳纤维靶板的弹道极限速度及拟合参数

Table 3　Ballistic limits and fitting parameters of zirconium-based amorphous fragments on carbon fiber composite targets

Target plate thickness/mm	a	v_{50}/(m·s^{-1})
8	0.69	351.9
6	0.84	264.6

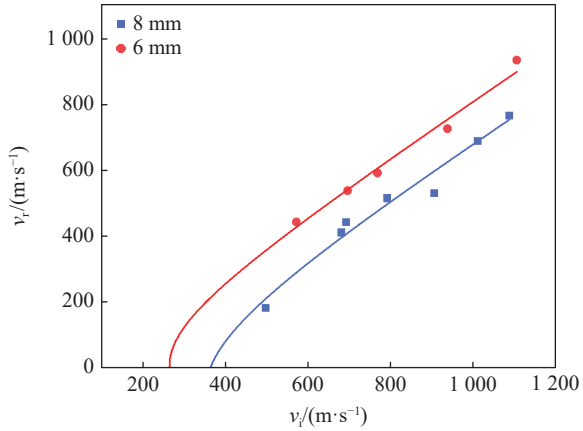


图 4　Zr 基非晶破片侵彻碳纤维靶板的初始速度与剩余速度的关系曲线

Fig. 4　Initial velocity versus residual velocity curves for zirconium-based amorphous fragments penetrating a carbon fiber composite target

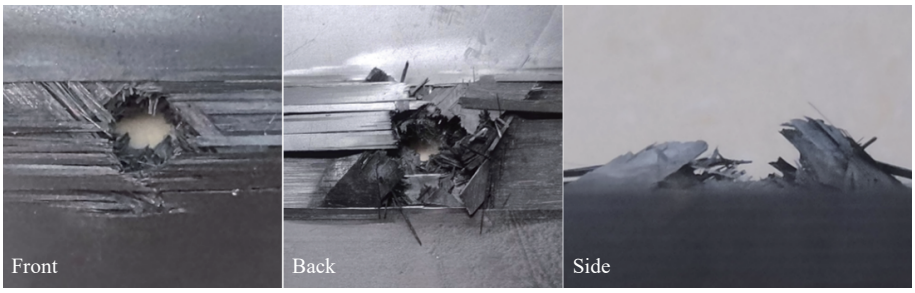
从表 3 和图 4 中可以看出，3.05 g 的 Zr 基非晶破片穿透 6 mm 厚碳纤维靶的弹道极限速度为 264.6 m/s，穿透 8 mm 厚碳纤维靶的弹道极限速度为 351.9 m/s，弹道极限速度提高了 33%，但靶厚度也提高了 33.3%。可见，Zr 基非晶球形破片侵彻碳纤维复合靶的弹道极限速度随着靶板厚度的增加基本呈线性增加趋势，从图 4 也可以看出这一规律。

2.2　Zr 基非晶破片对碳纤维靶及后效靶的破坏情况

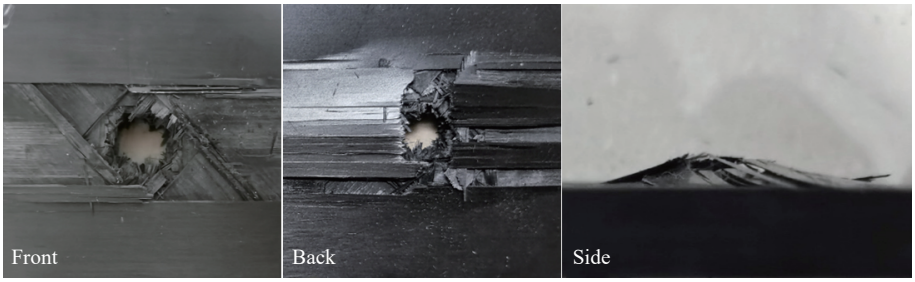
图 5 给出了碳纤维靶的典型破坏形态。球形 Zr 基非晶破片对碳纤维复合靶侵彻破坏时，靶板的迎弹面和背弹面表现出不同的损伤形式：迎弹面的破坏形式主要是对纤维的剪切以及对靶板的压缩；背弹面则主要表现为碳纤维的拉伸破坏，即撕裂断口，且背弹面的破坏程度远大于迎弹面，在背弹面出口处出现明显的分层脱粘以及凸起区域。这主要是由于迎弹面是受压缩波及剪切作用，而背弹面主要是受拉伸波的拉断破坏。对比图 5(a) 与图 5(b) 发现，随着破片着靶速度的提高，靶板背部的凸起程度逐渐减弱，这是由于破片着速增加导致碳纤维靶板的压剪耦合破坏的比例增大，而拉伸断裂与分层脱粘的比例逐渐减小。

图 6 给出了 8 mm 厚碳纤维靶试验中 LY12 铝后效靶的毁伤形态。从图 6(a)～图 6(e) 可以看出，破片以较高的速度（如 1 085.8、1 008.9、904.3 m/s）击穿 8 mm 厚碳纤维靶后，对后效铝靶造成的破孔呈不规则形状，损伤形式较为复杂。在靶板中心区域，由于受破片的冲击作用，其局部受力超过强度极限而形成贯穿孔洞；在贯穿孔洞边缘，伴有撕裂、断裂损伤以及局部区域的塑性变形，致使铝板向后呈花瓣状；除大孔外，周边还有小孔产生。这是因为 Zr 基非晶破片以较高速度撞击 8 mm 厚碳纤维靶后，破片发生碎裂，除大块剩余破片造成较大贯穿孔洞外，部分小碎片也具备足以击穿后效靶的动能，所以后效靶上出现孔径较小的侵孔。

当破片的着靶速度降低时，对后效靶的毁伤显著降低。如图 6(f) 所示，当破片以 679.7 m/s 击穿 8 mm 厚碳纤维靶后，在后效靶上造成 2 个较小的破孔，在 2 个破孔之间有明显的凹坑与熏黑痕迹。而当破片着靶速度降低至 496.4 m/s 时，破片未能击穿后效靶，仅造成一个小凹坑，且无熏黑痕迹。这表明球形 Zr 基非晶合金破片侵彻 8 mm 厚碳纤维靶的临界反应速度阈值在 496.4～679.7 m/s 之间。



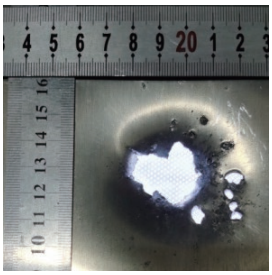
(a) v=571.4 m/s



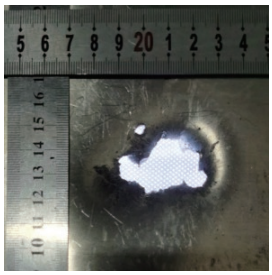
(b) v=1 008.9 m/s

图 5　碳纤维靶的典型破坏状态

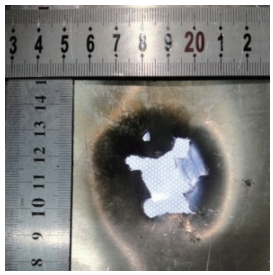
Fig. 5　Typical damage state of carbon fiber composite targets



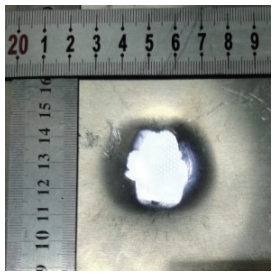
(a) v=1 085.8 m/s



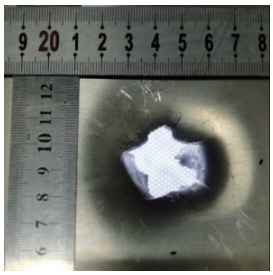
(b) v=1 008.9 m/s



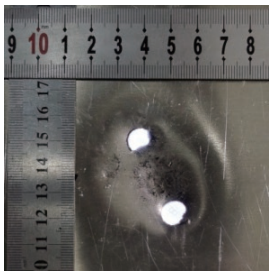
(c) v=904.3 m/s



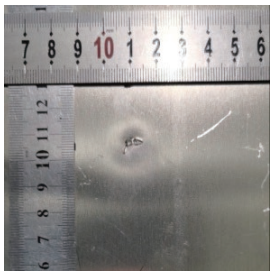
(d) v=790.3 m/s



(e) v=691.1 m/s



(f) v=679.7 m/s

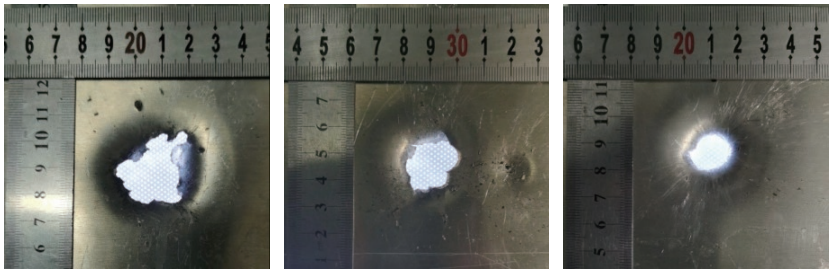


(g) v=496.4 m/s

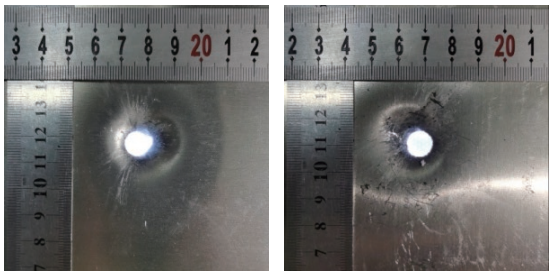
图 6　8 mm 厚碳纤维靶试验的后效靶毁伤形态

Fig. 6　Post-effect target damage patterns for 8 mm thick carbon fiber composite target tests

图 7 给出了 6 mm 厚碳纤维靶试验中 LY12 铝靶的毁伤形态。对比图 6 和图 7 发现，6 mm 厚碳纤维靶试验中高着速破片对后效靶的破孔形状与 8 mm 厚碳纤维靶试验类似。值得注意的是，如图 7(a)、图 7(b) 所示，破片以相近速度贯穿 6 mm 厚碳纤维靶后，未在后效靶贯穿孔洞周围造成小侵孔。当破片着靶速度分别降低至 695.3、571.4 m/s 时，破片在后效靶上造成一个较为规整、直径较小的贯穿孔洞。在 6 mm 厚碳纤维靶试验中，破片在后效靶冲击点附近均留下了一定的熏黑烧蚀痕迹，说明破片撞击碳纤维靶后均与氧气发生了不同程度的燃烧反应。以上结果表明，球形 Zr 基非晶合金破片侵彻 6 mm 厚碳纤维靶的临界反应速度阈值低于 571.4 m/s。



(a) v=1 103.9 m/s　(b) v=936.6 m/s　(c) v=767.5 m/s



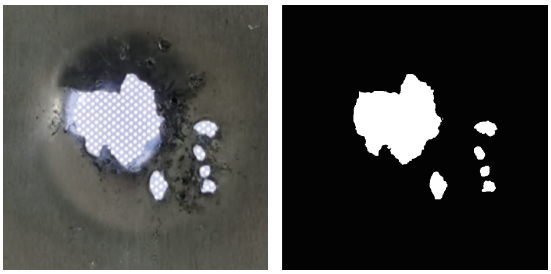
(d) v=695.3 m/s　(e) v=571.4 m/s

图 7　6 mm 厚碳纤维靶试验的后效靶毁伤形态

Fig. 7　Post-effect target damage patterns for 6 mm thick carbon fiber composite target tests

进一步对比 2 组不同厚度靶板试验发现，破片以 496.4 m/s 撞击 8 mm 厚靶板时未发生反应，以 571.4 m/s 撞击 6 mm 厚靶板时发生了反应，而 8 mm 厚碳纤维靶板的面密度更高，相同速度撞击时破片内部应力相较于 6 mm 厚碳纤维靶试验组更高，破片更易发生反应，因此，推断破片以 496.4 m/s 撞击 6 mm 厚靶板不会发生反应，而破片以 571.4 m/s 撞击 8 mm 厚靶板发生反应。由此得出，球形 Zr 基非晶破片侵彻 8 mm 厚靶板的临界反应速度低于 6 mm 厚靶板，而破片侵彻 2 种厚度靶板的临界反应速度范围进一步缩小至 496.4～571.4 m/s。

由于破片对后效靶造成的破孔不规则，难以直接测量其面积，因此，基于二值法，用 MATLAB 编程对图片进行处理。如图 8 所示，在二值化过程中，将像素点的灰度值与设定的阈值进行比较，如果灰度值低于阈值，则将该像素点灰度设为零，并分配到目标区域，否则设为 255，并分配到背景区域[17]。二值化处理后，目标区域内所有像素点的灰度值均相同，而背景区域内的像素点的灰度值也相同，由此得出不同灰度占比的面积，从而精确计算后效靶的破孔面积。



(a) Original image　(b) Image after binarization

图 8　二值化处理过程

Fig. 8　Binarization process

表 4 给出了图像处理后计算得出的后效靶破孔面积(S_{hole})。由表 4 可知：在 8 mm 厚碳纤维靶试验中，当破片着靶速度为 496.4 m/s 时，其贯穿碳纤维靶后未击穿后效靶，因此，后效靶破孔面积为零；而当破片着靶速度由 679.7 m/s 提升至 1 085.8 m/s 时，后效靶的破孔面积由 213.8 mm^2 增加至 528.1 mm^2，增幅 145.1%。在 6 mm 厚碳纤维靶试验中，当破片的着靶速度由 571.4 m/s 提升至 1 103.9 m/s 时，后效靶的破孔面积由 80.7 mm^2 增加至 439.2 mm^2，增幅 444.5%。

图 9 给出了破片着靶速度与后效靶破孔面积的关系，其中 7 号试验破片未发生反应，未将其作为数据点纳入拟合曲线。从图 9 可以看出：在试验速度范围内，碳纤维靶等厚条件下，球形 Zr 基非晶破片的着靶速度达到自身反应速度阈值后对后效靶造成的破孔面积随破片着靶速度的提高而增大；8 mm 厚碳纤维靶试验组的后效破孔面积总体大于 6 mm 厚碳纤维靶试验组，主要原因在于 8 mm 厚碳纤维靶的面密度大于 6 mm 厚碳纤维靶，使得破片在相同速度下撞击厚靶时的反应程度大于薄靶；随着破片着

靶速度的提高，8 mm 厚试验组的曲线趋于平缓，而 6 mm 厚试验组的曲线曲率仍不断增加，说明破片在此速度范围内撞击 6 mm 厚碳纤维靶时，其激活程度随着着靶速度的增加仍处于快速增长阶段，而撞击 8 mm 厚碳纤维靶时，其自身破碎已经趋于完全。

表 4　计算得出的后效靶破孔面积

Table 4　Calculated area of broken holes in the post-effect target

Target plate thickness/mm	No.	S_{hole}/mm^2	Target plate thickness/mm	No.	S_{hole}/mm^2
8	1	528.1	6	8	439.2
	2	493.9		9	312.4
	3	457.5		10	156.0
	4	432.2		11	89.5
	5	367.6		12	80.7
	6	213.8			
	7	0			

试验 Test 5 与 Test 11、Test 4 与 Test 10、Test 3与 Test 9、Test 1 与 Test 8 的着靶速度相对偏差分别为 0.6%、3.0%、3.6%、1.7%，均低于 5%，可将其作为着靶速度分别为 690、780、920 和 1 100 m/s 的近似等速对照组，进一步比较相同着靶速度击穿不同厚度碳纤维靶后的后效毁伤效能。

图 10 给出了对照试验组中破片侵彻不同厚度碳纤维靶后在后效靶上造成的破孔面积。对照结果显示，当着靶速度分别为 690、780、920 和 1 100 m/s 时，8 mm 厚碳纤维靶试验中的后效靶破孔面积相较于 6 mm 厚碳纤维靶试验分别增加了 310.6%、177.0%、46.4% 以及 20.2%，即随着着靶速度的提高，破片击穿 2 种屏蔽靶后对后效靶造成的破孔面积差值逐渐减小，靶板厚度对破片破碎的影响逐渐减弱。这是由于当着靶速度提升时，8 mm 厚碳纤维靶试验组的破片破碎相较于 6 mm 厚碳纤维靶试验组更加剧烈，部分粒径微小的碎片不具备击穿后效铝靶的动能，因此，随着着靶速度的提升，破片击穿不同厚度碳纤维靶后的后效毁伤效能差异逐渐减小。

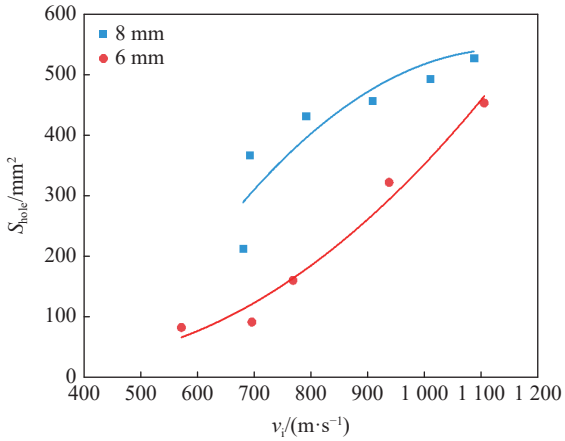


图 9　不同厚度碳纤维工况下破片着靶速度与后效靶破孔面积的关系

Fig. 9　Relationship between the fragmentation speed and the post-effect target broken hole area under different thicknesses of carbon fiber composite conditions

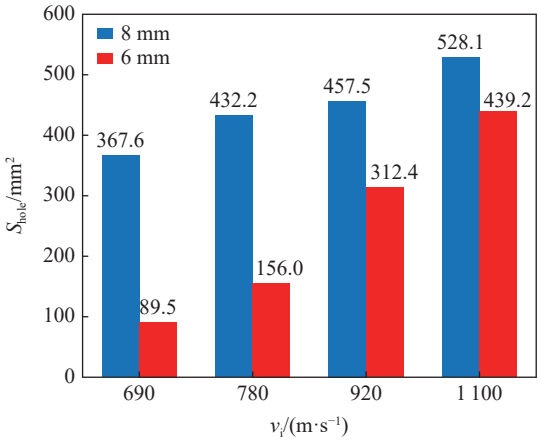
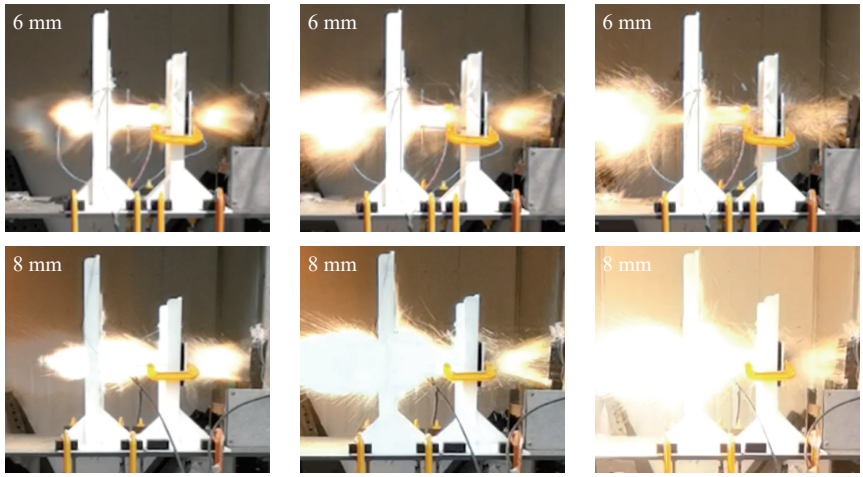


图 10　对照试验组中破片侵彻不同厚度碳纤维后在后效靶上造成的破孔面积

Fig. 10　Area of broken holes in the post-effect target caused by broken pieces penetrating different thicknesses of carbon fiber composite targets in the control test group

图 11 给出了破片以 1 100 m/s 侵彻不同厚度碳纤维靶的分时图像。从图 11 可以看出，破片侵彻 8 mm 厚碳纤维靶所产生的火光亮度更高，喷溅范围更广，说明破片的反应程度更高。



(a) t=50 μs　(b) t=150 μs　(c) t=200 μs

图 11　破片以 1 100 m/s 侵彻不同厚度碳纤维靶的图像

Fig. 11　Video frames of fragments penetrating carbon fiber composite targets of different thicknesses at 1 100 m/s

3　结　论

利用弹道枪试验对 Zr 基非晶球形破片侵彻碳纤维复合材料的侵彻破坏机理以及后效毁伤能力进行了研究，得到以下结论。

(1) Zr 基非晶球形破片作用下，碳纤维复合材料的迎弹面主要发生纤维的压剪耦合破坏，背弹面主要发生纤维的拉伸断裂以及纤维层间的分层脱粘；随着破片着靶速度的提高，其对碳纤维靶板的压剪破坏作用占比增加，拉伸断裂破坏与分层脱粘的占比减小，靶板背部的凸起减小。

(2) Zr 基非晶球形破片对碳纤维靶无明显扩孔效应，其对 8、6 mm 厚碳纤维复合材料靶板的弹道极限速度分别为 351.9、264.6 m/s，破片击穿碳纤维靶板的弹道极限速度小于破片发生燃烧反应的速度阈值，破片侵彻 8 mm 厚靶板的临界反应速度低于 6 mm 靶板，而破片侵彻 2 种厚度靶板的临界反应速度在 496.4～571.4 m/s 之间。

(3) 在碳纤维等厚度条件下，着靶速度达到破片发生反应的速度阈值后，破片对 LY12 铝后效靶的破孔面积随着靶速度的提高而增大，相同着靶速度下，破片冲击 8 mm 厚碳纤维靶的后效破孔面积大于 6 mm 厚碳纤维靶，但随着着靶速度的提高，靶板厚度对破片发生反应的影响减弱，两者的后效毁伤效能差异逐渐减小。

参考文献：

[1] TOGO H, ZHANG Y, KAWAMURA Y, et al. Properties of Zr-based bulk metallic glass under shock compression [J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 449: 264–268.

[2] MATTERN N, KUEHN U, HERMANN H, et al. Thermal behavior and glass transition of Zr-based bulk metallic glasses [J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 375: 351–354.

[3] QIAO J W, ZHANG Y, LI J H, et al. Strain rate response of a Zr-based composite fabricated by Bridgman solidification [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2010, 17(2): 214–219.

[4] CHEN X, DU C X, CHENG C, et al. Impact-induced chemical reaction behavior of ZrTiNiCuBe bulk metallic glass fragments impacting on thin plates [J]. Materiali in Tehnologije, 2018, 52(6): 737–743.

[5] WEI H Y, YOO C S. Kinetics of small single particlecombustion of zirconium alloy [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(2): 1–13.

[6] WEI H Y, YOO C S. Dynamic responses of reactive metallic structures under thermal and mechanical ignitions [J]. Journal of Materials Research, 2012, 27(21): 2705–2717.

［7］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): 023301.
ZHANG Y F, LUO X B, LIU G Q, et al. Penetration and energy release effect of W/ZrNiAlCu metastable reactive alloy composite rragment against RHA target [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(2): 023301.

［8］郭磊, 王传婷, 何勇, 等. $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ 活性破片对间隔防护结构破坏特性研究 [J]. 航天器环境工程, 2020, 37(6): 582–588.
GUO L, WANG C T, HE Y, et al. The failure characteristics of spacing protective structures impacted by $Zr_{55}Cu_{30}Ni_5Al_{10}$ active fragments [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(6): 582–588.

［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(3): 42–46.
LUO P G, MAO L, LI G J, et al. Research on damage characteristics of Zr-base amorphous reactive fragment after impact target [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(3): 42–46.

［10］杨林, 于述贤, 范群波. $Zr_{77.1}Cu_{13}Ni_{9.9}$ 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]. 北京理工大学学报自然版, 2023, 43(4): 417–428.
YANG L, YU S X, FAN Q B. Damage effect and mechanism of $Zr_{77.1}Cu_{13}Ni_{9.9}$ bulk metallic glasses fragment penetrating LY12 aluminum alloy and TC4 titanium alloy target plate [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(4): 417–428.

［11］张佐光, 霍刚, 张大兴. 纤维复合材料的弹道吸能研究 [J]. 复合材料学报, 1998, 15(2): 74–81.
ZHANG Z G, HUO G, ZHANG D X. Ballistic energy absorption study of fiber composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1998, 15(2): 74–81.

［12］黄晨光, 施媚梧, 段祝平. 头盔用复合材料抗侵彻性能研究进展 [J]. 力学进展, 2000, 30(2): 239–251.
HUANG C G, SHI M W, DUAN Z P. Review on the dynamic behaviors and penetration of the composite shelmet under impact loading [J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(2): 239–251.

［13］孙浩伟, 李涛. 碳纤维及其复合材料在国外军民领域的应用 [J]. 纤维复合材料, 2005, 22(3): 65−67.
SUN H W, LI T. Application of carbon fiber and its composites in overseas military and civil fields [J]. Fiber Composites, 2005, 22(3): 65−67.

［14］黄涛, 陈威, 彭帅, 等. 典型舱室在战斗部内爆下的载荷及毁伤特性试验研究 [J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 167–176.
HUANG T, CHEN W, PENG S, et al. Testing investigation on load and damage characteristic of typical cabins under warhead internal blast [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 167–176.

［15］王兆纶. 大型舰船功能毁伤评估方法研究 [D]. 北京: 军事科学院, 2023.
WANG Z L. Research on evaluation methods for functional damage of large warships [D]. Beijing: Academy of Military Sciences, 2023.

［16］RECHT R F, IPSON T W. Ballistic perforation dynamics [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1963, 30(3): 384–390.

［17］张猛, 王金华, 俞森彬, 等. 自适应阈值二值法提取湍流火焰前锋面结构 [J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(3): 212–217.
ZHANG M, WANG J H, YU S B, et al. Flame front tracking of turbulent premixed flames using adaptive threshold binarization [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(3): 212–217.

Experimental Study on the Penetration of Zr-Based Amorphous Fragment into Carbon Fiber Composite Target and Post-Effect Aluminum Target

JIA Jie[1], ZHI Xiaoqi[1], HAO Chunjie[2], LI Jin[1], GUO Lu[1], LIU Xinghe[1]

（1. *College of Mechatronics Engineering*, *North University of China*, *Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*;
2. *Jinxi Industries Group*, *Taiyuan* 030027, *Shanxi*, *China*）

Abstract: Zr-based amorphous fragment is an emerging active and efficient destructive element, which will undergo a deflagration reaction and fragmentation when its impact velocity reaches its threshold. The deflagration reaction and fragmentation could greatly increase its behind-armor destructive capability. In

order to study the penetration damage mechanism and behind-armor destructive capability of Zr-based amorphous fragments on carbon fiber reinforced composites, a ballistic gun was used to load the spherical fragments to impact 8 and 6 mm thick carbon fiber composite targets at velocities ranging from 496.4 m/s to 1 085.8 m/s and 571.4 m/s to 1 103.9 m/s, respectively. Then a 2 mm thick LY12 aluminum target plate was arranged behind the target to measure the damage capability under different working conditions. The test results showed that the mainly failure mode of strike face was a coupling failure mode of compression failure and shear failure, and the main failure mode of its back face was a coupling failure mode of tensile failure and the de-sticky splitting of the layer. With the increase of the impact velocity, the proportion of the compression and shear coupling damage of the carbon fiber composite target plate was gradually increased, and the phenomenon of tensile breakage and delamination was gradually decreased. The ballistic ultimate velocities of the fragment for 8 and 6 mm thick carbon fiber composite target were 351.9 and 264.6 m/s, respectively. Behind-armor damage area of the fragment impacted on the 8 mm thick carbon fiber composite target was larger than that of the 6 mm thick carbon fiber target under the same impact velocity. The difference of behind-armor damage area impacted on 8 and 6 mm thick carbon fiber composite targets decreased with the increase of the impact velocity. The behind-armor damage ability of the fragment impacting on the carbon fiber composite target increased with the increase of the impact velocity.

Keywords: Zr-based amorphous alloy; carbon fiber reinforced composites; behind-armor damage capacity; active fragment