

碳纤维背板厚度对铝复合板抗侵彻性能的影响

何成龙 杨可谔 刘亚青 霍子怡 毛翔 蒲彦蓉 贾松 黄治鐸

Effect of thickness of carbon fiber backplane on penetration resistance of aluminum composite plate

HE Chenglong, YANG Kexu, LIU Yaqing, HUO Ziyi, MAO Xiang, PU Yanrong, JIA Song, HUANG Zhixin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240810.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳纤维复合靶板抗破片侵彻弹道极限

Ballistic limit velocities of carbon fiber material target plate against fragment penetration

复合材料学报. 2025, 42(2): 825–834 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240517.001>

层状复合结构抗侵彻性能试验与数值模拟

Anti-penetration performance experiment and numerical simulation on layered composite structure

复合材料学报. 2022, 39(4): 1748–1760 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210604.002>

碳化硅-超高分子量聚乙烯纤维增强树脂基复合材料复合装甲板的抗穿甲弹侵彻性能及其损伤机制

Anti-penetration performance of SiC-ultra-high molecular weight polyethylene fiber reinforced resin matrix composite armor plate against armor piercing projectile and its damage mechanism

复合材料学报. 2022, 39(10): 4908–4917 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210928.002>

热塑性树脂基体对超高分子量聚乙烯纤维复合材料力学性能和抗弹道侵彻性能的影响

Effects of thermoplastic resin matrix on mechanical properties and anti-penetration performance of ultra-high molecular weight polyethylene fiber composite

复合材料学报. 2022, 39(4): 1570–1581 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210518.011>

超高分子量聚乙烯纤维/水性聚氨酯复合材料层压板抗软钢芯弹侵彻性能及其损伤机制

Ballistic performance of ultrahigh molecular weight polyethylene fiber/waterborne polyurethane composite laminate against mild-steel core projectile and its damage mechanism

复合材料学报. 2021, 38(5): 1455–1467 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200722.003>

不同厚度比的SiC陶瓷-纤维增强树脂基复合材料装甲的损伤失效及其抗弹性能

Damage failure and ballistic performance of SiC ceramic-fiber reinforced resin-based composite armor with different thickness ratios

复合材料学报. 2025, 42(2): 1125–1139 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240508.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

碳纤维背板厚度对铝复合板抗侵彻性能的影响



分享本文

何成龙^{*1}, 杨可渭¹, 刘亚青², 霍子怡¹, 毛翔¹, 蒲彦蓉¹, 贾松¹, 黄治镡¹

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2. 中北大学 纳米功能复合材料山西省重点实验室, 太原 030051)

摘要: 碳纤维 (CF) 复合材料以其高强度、低密度而广泛应用于航空航天防护领域。为研究 CF 背板厚度对 CF/Al 复合板抗冲击效果与纤维层损伤性质的影响, 开展滑膛枪发射 8 mm 钨合金球形破片正侵彻冲击 CF/Al 复合板实验, 利用数字相关法 (DIC) 与电子计算机断层扫描 (CT) 得到复合板在不同冲击条件下的动态响应及内部破坏。基于破片侵彻 CF/Al 复合板的有限元模型, 以研究 CF 板厚度 (0.7~12.6 mm) 对 CF/Al 复合板吸能性能的影响。结果表明: Al 板在冲击作用下发生剪切破坏, 贴近 Al 板的内层纤维受到压剪破坏, 而外层纤维产生拉伸变形, 破坏裂纹沿着纤维方向延伸且分层现象显著; CF 板厚度对 Al 板机械支撑的影响呈非线性增大, CF 板增加到一定厚度后 (4.2 mm、5.6 mm、5.6 mm), 破片 (1 000 m/s、1 250 m/s、1 500 m/s) 穿透 Al 板阶段的能量吸收没有明显增强, Al 板吸收冲击动能分别为 1 008.02 J、2 061.84 J、2 868.61 J; 纤维层位置影响纤维损伤面积和纤维损伤形状的变化, 纤维损伤面积沿纤维厚度方向先减小后增大, 纤维损伤形状沿厚度方向由椭圆形变为细长形; 随着 CF 板纤维厚度的增加, 碳纤维变形程度减小, 复合板的比吸能随密度增加而线性下降。

关键词: 碳纤维; 铝复合板; 抗钨球冲击模拟; 抗侵彻行为; 损伤特性

中图分类号: O385; TB333

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2025)06-3122-13

Effect of thickness of carbon fiber backplane on penetration resistance of aluminum composite plate

HE Chenglong^{*1}, YANG Kexu¹, LIU Yaqing², HUO Ziyi¹, MAO Xiang¹, PU Yanrong¹, JIA Song¹, HUANG Zhixin¹

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi Province Key Laboratory of Functional Nanocomposites, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Carbon fiber (CF) composites are widely used in the field of aerospace protection due to their high strength and low density. To investigate the effect of CF backplate thickness on the impact resistance of Al plates, the experiments using a musket were conducted to launch an 8 mm tungsten alloy spherical projectile at CF/Al composite plates. The dynamic response and internal damage of the composite plates under different impact conditions were examined by digital image correlation (DIC) and computed tomography (CT). The effect of CF plate thickness (0.7-12.6 mm) on the energy absorption performance of CF/Al composite plate was studied based on the finite element model of fragment penetration of CF/Al composite plate. The results show that the aluminum plate is subjected to shear failure under the impact, the inner fiber is damaged with compressive shear, while the outer fiber is deformed by tensile deformation. The failure crack extends along the fiber direction and the delamination is significant. The energy absorption of Al plate does not increase significantly under the penetration of projectiles

收稿日期: 2024-06-14; 修回日期: 2024-07-17; 录用日期: 2024-07-27; 网络首发时间: 2024-08-12 09:41:00

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240810.001>

基金项目: 山西省基础研究计划资助项目 (20210302124197); 博士后科学基金 (2021M702981)

Fundamental Research Program of Shanxi Province (20210302124197); China Postdoctoral Science Foundation (2021M702981)

通信作者: 何成龙, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为爆炸冲击动力学 E-mail: hechenglong@nuc.edu.cn

引用格式: 何成龙, 杨可渭, 刘亚青, 等. 碳纤维背板厚度对铝复合板抗侵彻性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(6): 3122-3134.

HE Chenglong, YANG Kexu, LIU Yaqing, et al. Effect of thickness of carbon fiber backplane on penetration resistance of aluminum composite plate[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(6): 3122-3134(in Chinese).

(1 000 m/s, 1 250 m/s, 1 500 m/s) when the CF plate increases to a certain thickness (4.2 mm, 5.6 mm, 5.6 mm), and the impact kinetic energy of Al plate is 1 008.02 J, 2 061.84 J and 2 868.61 J, respectively. The fiber layer position affects the change of the fiber damage area and the fiber damage shape, the fiber damage area decreases firstly and then increases along the direction of fiber thickness, and the fiber damage shape changes from oval to elongated along the direction of thickness. With the fiber thickness increase, the specific energy absorption of CF/Al composite plate decreases linearly with the areal density increase.

Keywords: carbon fiber; aluminum composite plate; tungsten ball impact simulation; bullet penetration resistance; damage characteristic

碳纤维增强 (CFRP) 复合材料作为一种典型的先进轻质材料, 已经得到了全面的研究和设计^[1-2], 并广泛运用于航空工业中。随着航空工业的发展, 纤维复合板在使用过程中容易遇到各种冲击事件, 如飞机结构中使用的纤维复合板容易受到冰雹^[3]、鸟击^[4]以及冲击破片^[5]的影响。因此将纤维复合板应用于工程防护领域时, 对复合材料的综合性能要求越来越高。

碳纤维具有高模量、高刚度、高剪切强度以及与基质的良好粘附性的优点, 但碳纤维的脆性行为和低冲击损伤容限^[6]限制了其抗冲击性能, 而金属材料韧性好、抗冲击性高, 但较高的密度无法满足航空制造的轻量化要求。一种方法是开发并广泛研究了一种称为纤维增强金属层压板 (Fiber metal laminates, FML) 的结构。将纤维增强复合材料与金属板相结合, 形成一种新型的复合材料结构。金属层和复合材料层可以以任何组合堆叠, 并且通常使用高强度薄膜粘合剂进行粘合^[7-9]。增加复合板抗冲击性能的另一种方式是在层压板的前面或后面放置保护层, 从而有效吸收冲击强度^[10], 保护层通常采用铝、钛等轻质金属。相关研究表明, 复合靶板侵彻破坏分为两个阶段, 第一个阶段为剪切冲塞阶段, 该阶段以纤维的横向剪切破坏为主; 第二个阶段为背部凸起变形阶段, 以纤维拉伸变形破坏为主^[11]。由此理论一般将迎弹面选择抗剪切强的金属材料, 背弹面采用抗拉伸强的纤维材料, 这也使得纤维/金属复合板与纤维/金属板相比, 具有更好的抗冲击效果^[12]。

除了通过金属与纤维的结合增加复合板抗冲击强度, 提高纤维板防护性能的常用方法是以不同的排列方式增加更多层数^[13-17], 但它也会影响最终目标的总质量和灵活性^[18-20], 因此如何衡量厚度与防护性能之间的关系是研究的重点。一方面通过使用不同纤维的堆叠方式, 在保证厚度与质量的情况下提高抗冲击性能。Bandaru 等^[21]发现先放置 3D-A 玄武岩织物, 然后放置 2D-P 玄武

岩混合织物, 对热塑性复合材料装甲的弹道性能有显著提高, 也更有利于弹丸的变形。Wang 等^[22]发现纤维层的方向显著影响多层织物面板的能量吸收能力, 与对齐的面板相比, 倾斜的面板始终显示出更好的能量吸收能力。另一方面针对纤维厚度的文章将重点放在了研究不同种类纤维厚度与抗冲击性能之间的关系。Deng 等^[23]发现玻璃纤维编织复合材料层合板的弹道极限随厚度线性增加, 随着弹丸速度的增加, 层压板的能量吸收最初会降低, 之后逐渐稳定。Liao 等^[24]发现中厚层合板的分层损伤和内部缺陷抑制效果优于薄层合板, 在相同冲击能量下, 厚层合板的抑制效果较弱。张辰等^[25]发现层间混杂结构复合材料的抗冲击性能更优, 其中铺层形式为 I-C 的混杂复合材料抗冲击性能最佳, 冲击面为玻璃纤维时混杂结构复合材料对冲击响应区别不明显, CN-1 层内混杂结构复合材料抗冲击性能优于 CN-2 层内混杂结构复合材料。张徐梁等^[26]发现碳纤维-碳纤维增强环氧树脂 (CF-CF/EP) 样品的比能量吸收值分别比玻璃纤维-碳纤维增强环氧树脂 (GF-CF/EP) 大 36%, 比碳纤维-玻璃纤维增强环氧树脂 (CF-GF/EP) 大 12%。吴龙强等^[27]发现碳纳米管 (CNT) 纤维纱增韧样品的 I 型和 II 型层间断裂韧性分别提高 37.4% 和 41.8%。其增韧机制主要包括增韧树脂、加强碳纤维桥接及引发裂纹偏转等。

以上研究可以发现, 大量研究侧重于纤维材料本身性质、纤维叠层结构, 而对于金属板与纤维层、纤维层之间的相互作用的影响研究较少。由于纤维/金属板由金属板后一层层涂敷纤维布制作而成, 这使得纤维叠层厚度增加后, 金属板与纤维层、纤维层与纤维层之间的相互作用出现变化, 从而导致纤维/金属板受到侵彻后, 纤维层最终破坏形态及失效面积出现变化。

鉴于上述讨论, 本文以 2024 铝合金和 UT70-30 碳纤维为复合板材料, 对不同 CF 板厚度的 CF/Al 复合板进行研究。利用不同速度的破片侵彻不

同厚度的 CF/Al 复合板，通过数字图像相关法 (DIC) 与计算机断层扫描 (CT) 分析得到 CF/Al 复合板受到侵彻后的应变动态响应及内部破坏。基于 Johnson-Cook 材料模型及 Abaqus Explicit/Dynamic 求解器对应材料子程序 (User-defined Material-I Mechanical Behavior VUMAT) 编写的本构模型，分析不同 CF 板厚度下，Al 板与纤维层、纤维层之间的相互作用对吸能的影响，并对不同 CF 板厚度下的 CF/Al 复合板的球形破片侵彻过程开展数值模拟研究。

1 实验流程及数值仿真

1.1 靶板制作流程

CF/Al 复合板的 Al 板材料型号为 2024 铝合金，

是由上海合川金属材料有限公司生产的厚度为 10 mm 的 Al 板。在北京理工大学爆炸实验室使用 WDW-300 电子万能试验机对 2024 铝合金的准静态性能进行了测试。拉伸强度和压缩强度分别为 410 MPa 和 684 MPa。性能参数如下：密度为 2.7 g/cm³，泊松比为 0.33，杨氏模量为 73 GPa。

CF 板材料为单向铺设的 CFRP 布，由日本东丽公司生产，型号为 UT70-30，其经线是具有 12 000 根纤维丝的纤维束。粘结剂采用环氧树脂，环氧树脂胶 (WB-674T) 是由上海三悠树脂有限公司生产的专用于结构加固的双组分纤维粘结剂。碳布和环氧树脂胶的材料参数由上海市建筑科学研究院有限公司检测，详细材料参数见表 1。

表 1 碳布和环氧树脂的材料参数
Table 1 Material parameters of carbon cloth and epoxy resin

Material	Model	σ_b /MPa	E /GPa	λ /%	σ_f /MPa	σ_{bc} /MPa	ρ_A /(m·s ⁻²)
Carbon fiber	UT70-30	3 961	240	1.8	917	-	300
Epoxy resin	WB-674T	50	2.62	2.8	67	76	-

Notes: σ_b is the tensile strength; E is the elastic modulus; λ is elongation rate; σ_f is the flexural strength; σ_{bc} is the compressive strength; ρ_A is the areal density.

CF/Al 复合板的制作工艺如图 1 所示。首先采用砂轮磨光机 (东成 09-100S) 对铝合金表面进行打磨，以保证 UD-CFRP 片材表面与铝合金表面的连接强度。然后将 UD-CFRP 片材切割成特定尺寸 (0.25 m×0.25 m)，在铝合金表面涂上粘结剂 (WB-674T)。在室温 (23℃) 下，将预浸料按要求的堆叠顺序 [0°/90°] 铺在铝合金上，并放入设计好的模具中。利用滚轮消除胶粘剂与纤维复合材料之间的

气泡。最后，采用热压成型技术对 CF/Al 复合材料进行成形，并利用真空泵将模内压力保持在 0.6 MPa。固化过程在 135℃ 的烤箱 (L0003IDM) 中进行。

1.2 实验场地布置

破片正侵彻 CF/Al 复合板冲击实验场地布置如图 2 所示。利用口径 14.5 mm 的滑膛枪进行弹道实验，破片采用直径 8 mm，质量 4 g 的钨合金

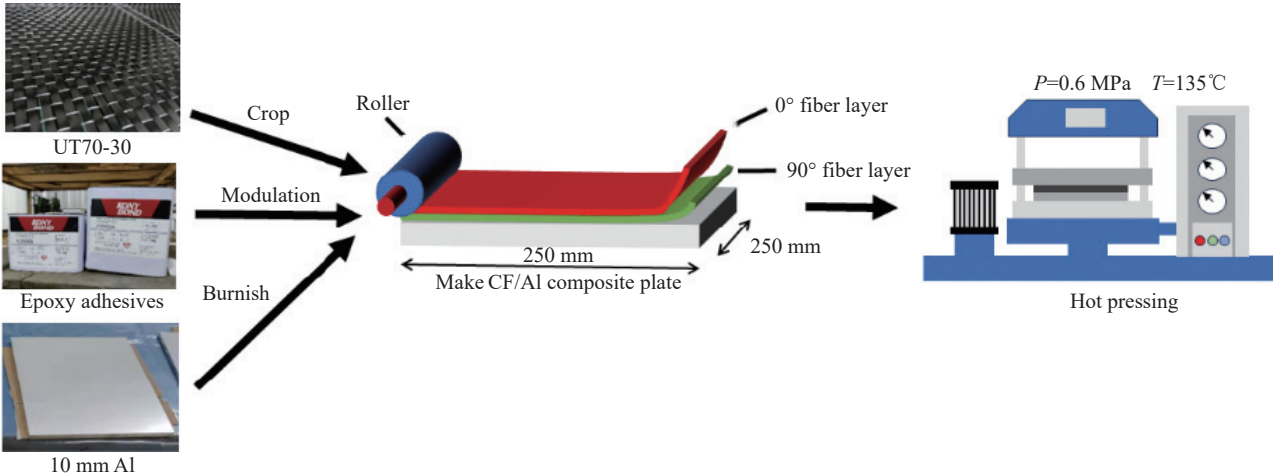
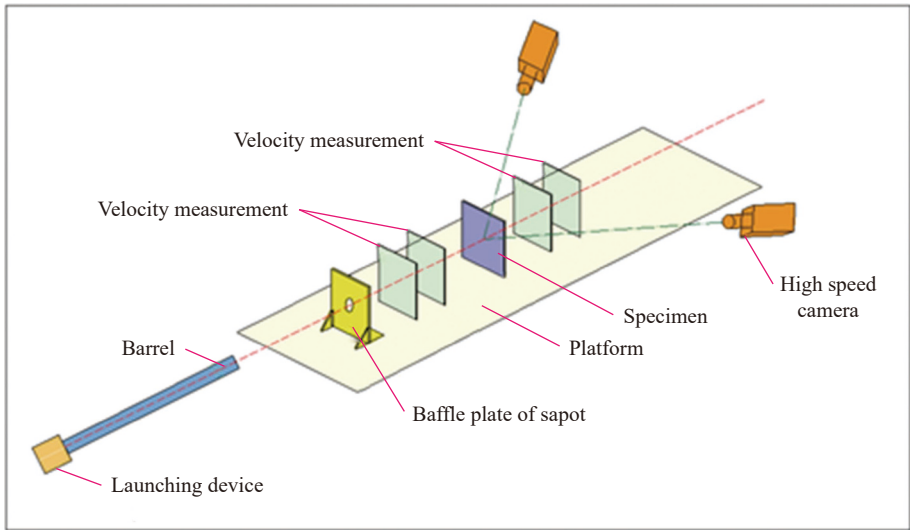


图 1 碳纤维 (CF)/Al 靶板制作流程

Fig. 1 Carbon fiber (CF)/Al target fabrication process



(a) Schematic diagram of the smoothbore gun test system



(b) Experimental diagram



(c) NLG202G-Z velocity tester



(d) Bullet butts

图2 实验场地布置

Fig. 2 Experimental site layout

球。发射药采用制式药，装填药量在 10~37 g，破片初速在 800~1 500 m/s。

采用两台高速摄像机 (SONY) 观测复合板动态响应，拍摄速度 15 000 fps/s，利用 LED 照明设备 (SL-200W) 保障光照强度条件。采用断通靶和 NLG202-Z 型六路电子测时仪对破片初速、末速进行测量，通过同步触发器使得击发破片时同时触发测试设备实验场地布置。破片配置尼龙弹托，尼龙弹托与枪膛为过盈配合，膛内与破片共同加速运动，能够保持破片姿态的稳定性。靶板平面应与弹道枪中心轴线垂直，并调整至适度的射击

距离，以保证破片与弹托及时分离。

CF/Al 复合板四周通过夹具完全固定，用螺栓固定在实验平台上，如图 3(a) 所示。应变计算区域尺寸为 200 mm×200 mm，像素约为 320 px × 320 px，如图 3(b) 所示。散斑图的质量对测量结果的准确性有很大影响。散斑图案的随机分布、适当的密度、良好的对比度以及每个散斑的大小至少应为 3 个像素是至关重要的^[28-29]。散斑直径略大于 2 mm，散斑主要分布在 200 mm×200 mm 的矩形区域内。利用 Match ID 软件计算 von Mises 应变场，子集为 17，步长为 6。

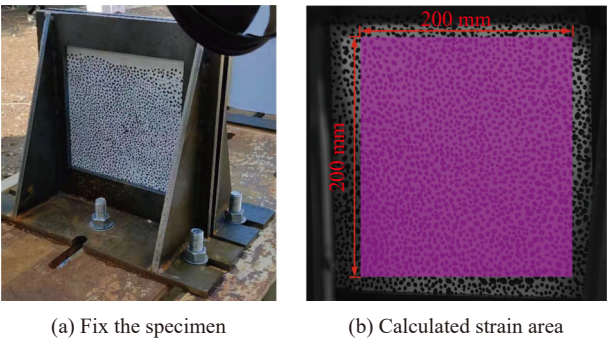


图3 靶板固定方式与高速相机拍摄示意图

Fig. 3 Target plate fixing method and schematic diagram of high-speed camera shooting

1.3 数值模拟模型

通过 Abaqus/Explicit 对实验工况进行数值模拟，并对数值模拟结果与实验结果进行分析以探究 CF/Al 复合板抗破片冲击性质。建立破片侵彻 CF/Al 复合板模型如图 4，包括 Al 板、粘接层和 CF 板，靶板长宽均为 250 mm，Al 板厚度为 10 mm。CF/Al 复合板全局采用 5 mm 大小的结构化网格，CF 板按 0°/90°交替叠层建模，层间采用 Cohesive 接触。在保证计算精度的情况下提高计算效率，对弹靶接触区域进行局部加密^[30-31]，通过多次调试，加密处采用 1 mm×1 mm×1 mm 网格，8 mm 直径破片网格采用 0.8 mm 时能有效保证模型计算效率和计算精度。CF 板由单向铺设的碳纤维束构成，故沿纤维方向将网格大小细化为 1 mm。

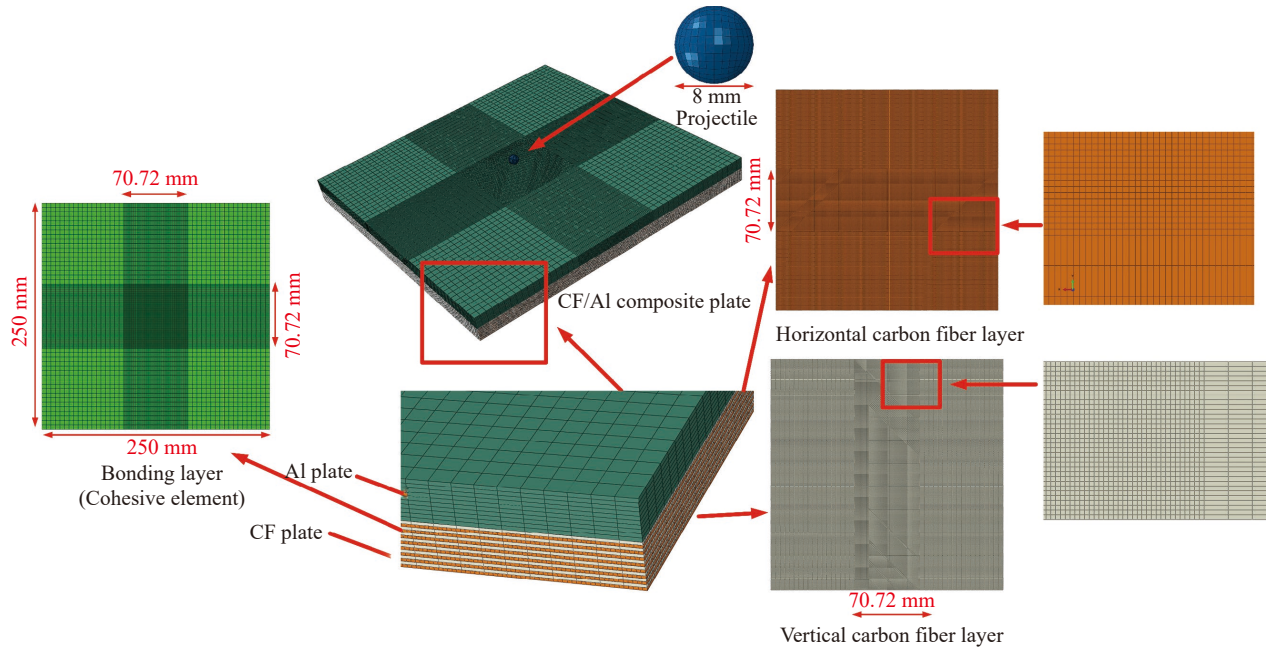


图4 复合材料靶板仿真模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a composite target simulation model

最小计算时长为 0.03 ms，最大计算时长为 0.1 ms。

1.4 材料模型

铝合金靶板与钨合金破片采用 Johnson-Cook 材料模型，其中铝合金材料参数来源于参考文献 [32]，钨合金材料参数来源于参考文献 [33]。

CFRP 的材料损伤起始、演化和失效行为由 Abaqus 用户子程序 VUMAT 定义，纤维增强树脂复合材料的应力-应变关系采用柔性应力-应变矩阵，失效判断准采用 Hashin 3D 失效准则，具体参数如表 2 所示。

数值模拟中粘合剂材料采用内聚力 (Cohesive) 材料模型，材料模型参数来源于文献 [34]，本构模型采用双线性模型，Cohesive 初始损伤准则采用二次名义应力准则 (Quads Damage)。

2 高速冲击下复合板响应及失效研究

2.1 破片速度衰减规律

通过设置与实验相同破片初速以及靶板厚度以模拟实验情况，对比破片速度衰减情况以及能量衰减情况判断数值模拟模型的可靠性。结果如表 3 所示 (表 3 中如 4CF/Al 中 Al 表示复合板迎弹面为 Al 板，4CF 表示背弹面为四层碳纤维组成的碳纤维板)。从表 3 可知，随着纤维背板厚度的增加，有效增加了靶板的抗侵彻能力，而对比数值模拟数据与实验数据，可以发现两者存在误差波动，误差都在 5% 以内，在允许误差范围内。这

表 2 CF 力学参数
Table 2 CF mechanical parameters

Parameter	Value
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 796.4
E_{11}/GPa	253.338
E_{22}/GPa	4.814
E_{33}/GPa	4.814
ν_{12}	0.3
ν_{13}	0.3
ν_{23}	0.3
X_t/MPa	3 621
X_c/MPa	2 624
Y_t/MPa	26.25
Y_c/MPa	56.50
Z_t/MPa	26.25
Z_c/MPa	56.50
S_{12}/MPa	69.70
S_{13}/MPa	2.86
S_{23}/MPa	2.86

Notes: ρ is the density; E_{11} , E_{22} , E_{33} are the moduli of elasticity in the axial, tangential and normal directions; ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} are the Poisson's ratio; X_t , Y_t , Z_t are ultimate tensile strength; X_c , Y_c , Z_c are ultimate compressive strength; S_{12} , S_{13} , S_{23} are ultimate shear stress.

证明该铝合金材料模型与碳纤维材料模型对破片的吸能性能与实验所用铝合金材料与碳纤维材料基本一致。

图 5 为破片末速与数值模拟破片末速的对比,从图中可以发现,厚度为 12.7 mm 的 CF/Al 复合板在 1 010.14 m/s 初速破片侵彻下动能吸收量要小于在 1 378.16 m/s 初速破片侵彻下的动能吸收量。这是由于冲击强度会导致材料应变率增大,材料强度极限随着应变率的提高而增大,这说明冲击速度增大导致材料动能吸收量增加。

2.2 CF/Al 复合板破坏分析

CT 测试得到的破片侵彻后的孔壁破坏形态如图 6 所示。可见,CF/Al 复合板的迎弹面 Al 板在破片侵彻过程中,在冲击作用下孔壁由于压剪失

效呈现毛刺状的不规则孔壁(图 6(a1)、图 6(b1))。背弹面 CF 板出现了两种破坏形态,由于纤维层由纤维束构成,内层纤维出现不规则的纤维断裂,及轻微分层现象。最外层纤维层在压缩载荷下出现纤维压缩破坏,这使得断面与加载方向呈现约 45°,且外层纤维由于拉伸破坏发生较大分层(图 6(a1))。

对比相同工况的数值模拟结果可以发现(图 6(a2)、图 6(b2)),该数值模拟模型能较好地模拟 Al 板受到破片侵彻后产生的冲塞效应及压剪破坏产生的毛刺状不规则孔壁。不同铺层方向的纤维结构使得纤维破坏裂纹沿着不同方向拓展,不同铺层方向的纤维层在弹道冲击下具有不同的弯曲刚度系数,这种力学性能的不匹配会在层间界面上产生不均匀的应力分布,最终导致分层。而随着弯曲变形的增加,层间剪应力促进了分层裂纹的扩展^[35-36]。

2.3 碳纤维自由面破坏分析

8CF/Al 复合板受到初速为 1 007 m/s 的破片侵彻时纤维板背面破坏响应如图 7 所示,侵彻动态响应以纤维板背面出现变化的前一刻为 0 μs 。67 μs 时纤维自由面轻微突起,134 μs 时破片贯穿 8CF/Al 复合板,强度相对较低的基质先受到破坏,在弹孔周围出现沿着纤维方向的裂纹。201 μs 后,被破片冲击而剪断的纤维随着拉伸作用而向外扩散,部分基质及纤维碎片随着破片一起向外飞溅。这说明单向铺设的碳纤维板在受到破片冲击时,仅有受到冲击的局部范围出现较大变形,其他部分变形程度较小。

各个厚度纤维复合板背面破坏如图 8(a1)~图 8(d1)所示,通过观察纤维板背面破坏情况可以发现,单向编织碳纤维受到破片侵彻后,纤维自由面主要出现纤维断裂,基质破坏产生的纤维

表 3 侵彻靶板数值模拟与实验数据对比
Table 3 Comparison of penetration target simulation and experimental data

Structure	Thickness/mm	Initial velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Terminal velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		Error/%
			Simulation	Experience	
Al	10.02	1 027.49	823.83	844.88	2.5
Al	10.01	861.67	682.44	658.75	3.6
Al	10.01	1 020.48	822.30	835.62	1.6
Al	10.01	1 283.26	1 043.31	1 093.19	4.6
Al	10.00	1 091.24	879.88	856.74	2.7
4CF/Al	12.72	1 010.14	784.35	794.27	1.3
4CF/Al	12.70	1 378.16	1 065.34	1 193.97	1.1
6CF/Al	14.20	1 048.13	798.47	777.00	2.8
8CF/Al	15.50	1 006.73	670.38	679.29	1.3
10CF/Al	17.20	975.60	621.53	610.66	1.8
12CF/Al	18.40	954.95	577.39	574.30	0.5

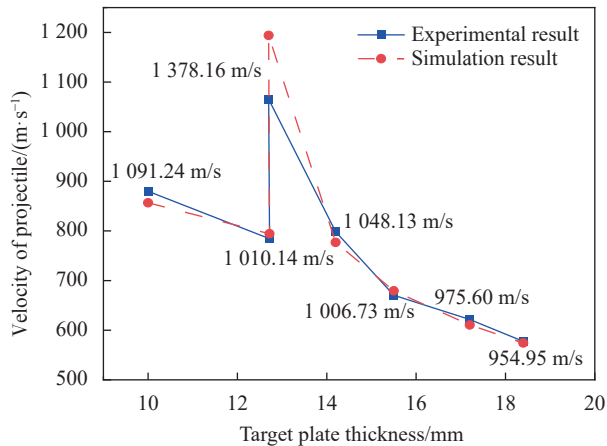


图5 破片末速与数值模拟破片末速的对比

Fig. 5 Comparison of projectile velocity and numerical simulation of projectile velocity

布撕裂。4种厚度的CF/Al复合板纤维破坏弹孔直径分别为27 mm、26.5 mm、25 mm、25 mm，最大直径相差2 mm，相差8%。

4种厚度复合板的两条基质破坏裂纹平均长度分别为112.5 mm、148 mm、210 mm、215.6 mm，由此可见，随着碳纤维厚度增加，基质裂纹逐渐增大。同时，随着厚度增加，12CF/Al复合板受到初速为985.2 m/s的破片侵彻时，基质破坏范围相对于6CF/Al、8CF/Al、10CF/Al复合板明显增加。说明较厚的纤维层增大了破片的侵彻阻力和侵彻时间，从而使得碳纤维板拉伸破坏程度增大。

相同工况的数值模拟图如图8(a2)~图8(d2)所示，从图中可以发现，纤维失效形状与实验所得纤维失效形状十分符合，实验所得弹孔直径分别为27 mm、26.5 mm、25 mm、25 mm，数值模拟

所得弹孔直径为27 mm、27 mm、25 mm、26 mm，两者基本一致。但数值模拟裂纹长度相对于实验所得裂纹长度较短，这是由于实验中所测裂纹长度为基质破坏裂纹长度，而强度较高的纤维的破坏范围要远低于基质破坏范围，数值模拟中的损伤破坏判定标准综合了基质失效与纤维失效，因此其裂纹长度小于实验中所得基质破坏裂纹。

3 CF板厚度对抗侵彻性能影响研究

3.1 CF板厚度对Al面板的机械支撑

1 250 m/s初速冲击下22.6 mm复合板内部应力变化过程如图9所示。在破片撞击复合板4 μs后，破片部分进入Al板，冲击应力波从Al板向CF板传播。随着破片继续侵彻，12 μs时破片到达Al板与CF板结合面，Al板发生凸起变形，弹孔孔壁由于Al板压剪失效呈现毛刺状失效。16 μs时CF板发生凸起变形，外层纤维产生较大的拉伸变形。另外，自由表面的拉伸作用使得纤维层之间的基体失效，进而产生分层、剥离破坏。由此可见，破片侵彻Al板时出现绝热剪切及冲塞效应，在Al板后涂敷纤维层可以提高对Al板的机械支撑，从而阻碍破片对Al板的冲塞运动，增加在侵彻Al板阶段消耗的动能。

通过比较破片冲击Al板过程中的动能损失(Al板吸收冲击动能)以研究CF板厚度对Al面板支撑性的影响。所得结果如图10所示，CF板厚度增加后，1 000 m/s、1 250 m/s、1 500 m/s(图10(a)~图10(c))速度破片穿透Al板时损失的动能呈现先快速增大至阈值，后逐渐在阈值附近上下波动的

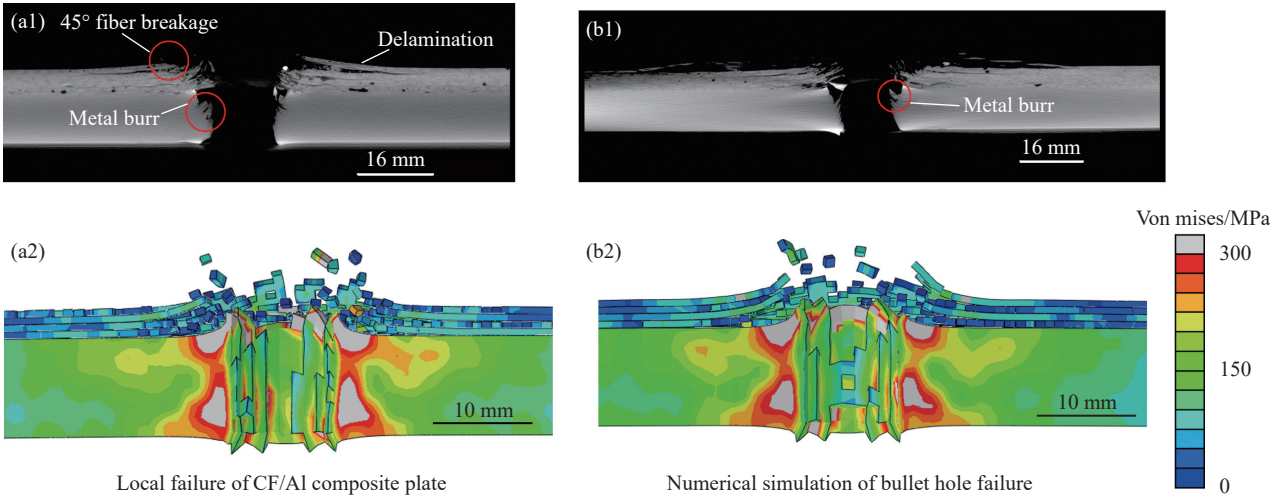


图6 CF/Al复合板弹孔破坏图

Fig. 6 Bullet hole failure diagram of CF/Al composite pane

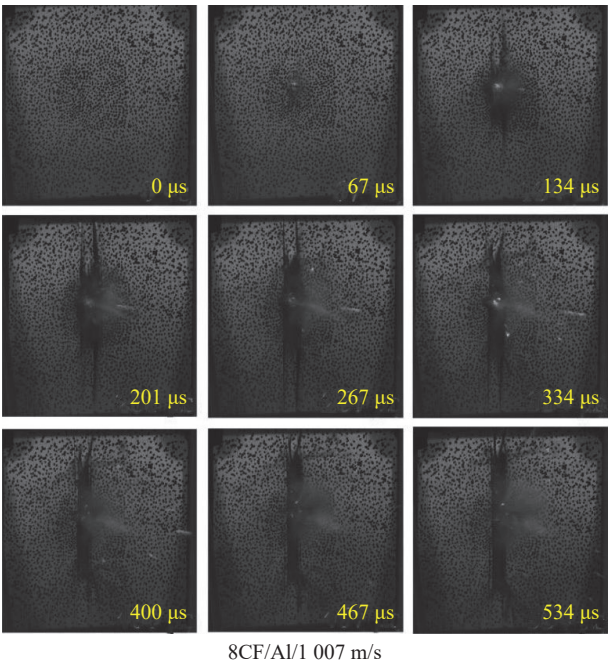


图 7 纤维板背面破坏动态响应

Fig. 7 Dynamic response of fiber plate back surface failure

规律。其中 1 000 m/s、1 250 m/s、1 500 m/s 初速的破片侵彻 Al 板时损失的动能在分别涂敷了 6 层、8 层、8 层时达到阈值，Al 板吸收冲击动能分别为 1 008.02 J、2 061.84 J、2 868.61 J。CF 板厚度对 Al 板的抗冲击增强效应呈现非线性递增趋势，到

达峰值后继续增加背板厚度，铝板吸收动能在阈值附近上下波动，波动过程中，最大值与最小值吸能差值仅为 17.61 J、30.87 J、25.85 J，远小于到达 Al 板吸能阈值时的动能吸收增长量 (179.1 J、422.41 J、416.56 J)。这说明继续增加背板厚度对 Al 板的吸能增加作用不显著。

3.2 纤维层失效面积变化规律

受到破片冲击时，碳纤维主要通过剪切失效、拉伸失效的方式吸收破片冲击动能。由此通过比较碳纤维层中纤维失效面积可以判断各层能量吸收情况。不同速度下 16CF/Al 复合板的最大纤维失效面积，最小纤维失效面积及最外层纤维失效形态如图 11 所示。相关研究表明^[37]，决定纤维层失效面积的因素与冲击强度有关，越大的冲击强度，纤维失效面积越大。通过图 11 发现，1 000 m/s、1 250 m/s、1 500 m/s 初速的破片侵彻 16CF/Al 复合板时，最大纤维层失效面积位于第一层，为 1 024 mm²、1 314 mm²、1 465 mm²，最小纤维失效面积的纤维层分别位于第十层、第九层、第十三层，纤维失效面积为 261 mm²、371 mm²、316 mm²。最外层纤维失效面积分别为 321 mm²、656 mm²、726 mm²。较高的冲击强度及 Al 板受到侵彻后的凸起使得金属与纤维结合层失效面积较

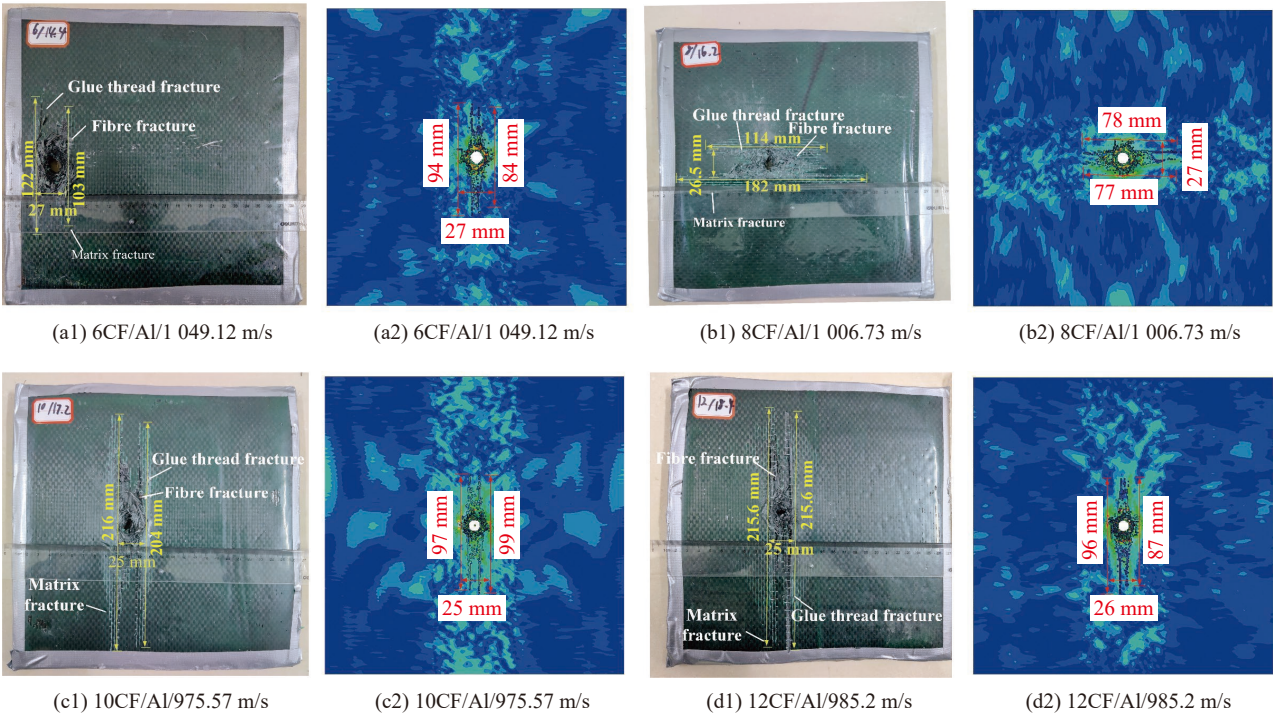


图 8 纤维板背面破坏: ((a1)-(d1)) 实验图; ((a2)-(d2)) 数值模拟图

Fig. 8 Fiber plate back surface failure: ((a1)-(d1)) Experimental diagram; ((a2)-(d2)) Numerical simulation diagram

大。位于 CF 板中部的纤维层由于破片冲击强度降低，且受到前后纤维层约束，使得纤维失效面积最小。随着 Al 板及其他纤维层对其约束力的减弱，最外层纤维得到充分拉伸，使得最外层失效面积较中间纤维层失效面积更大。

CF 板由正交铺设的单向碳纤维层组成，由于不同层方向的裂纹存在相互作用，且相邻层之间

不同层方向的作用更为明显^[38]。为消除纤维铺设方向对结果的影响，对正交铺设的两层纤维的纤维失效面积取平均值得到结果如图 12。

金属层与纤维层结合面的纤维损伤面积最大，这是由于金属纤维结合层受到的冲击强度大于其他纤维层，同时，Al 板在弹丸的冲击下表现出明显的凸变形，导致纤维层的变形程度较大。由于

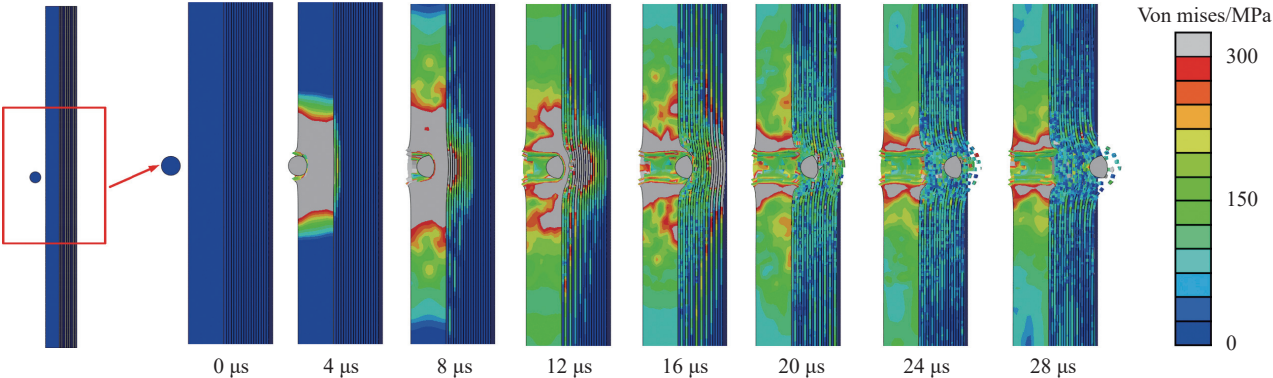


图 9 1250 m/s 冲击速度下的破片侵彻 18CF/Al 复合板应力云图

Fig. 9 Projectile penetration of 18CF/Al composite plate at impact velocity of 1250 m/s

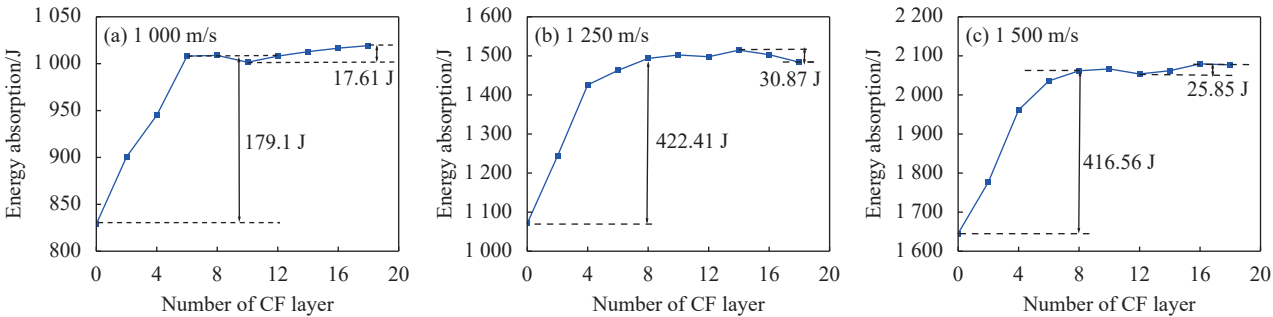


图 10 侵彻 Al 板消耗动能随 CF 背板厚度增加变化曲线

Fig. 10 Variation curves of kinetic energy consumed by penetrating aluminum plate with the increase of CF backplate thickness

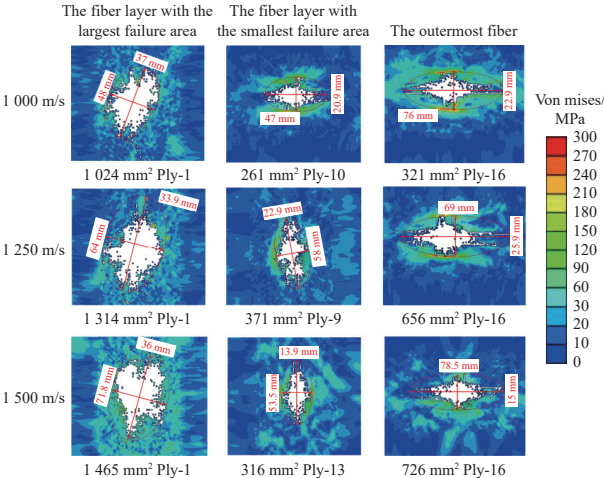


图 11 16CF/Al 复合板纤维失效

Fig. 11 Fiber failure of 16CF/Al composite plate

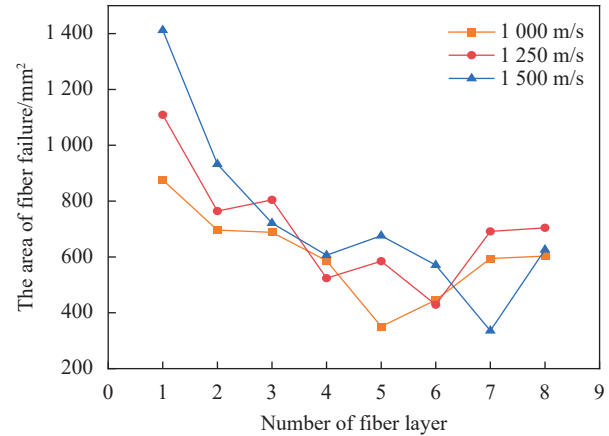


图 12 16CF/Al 复合板纤维层纤维失效面积沿厚度方向变化趋势

Fig. 12 Variation trends of fiber failure area along the thickness direction in 16CF/Al composite laminates

相邻纤维和铝板的限制，位于纤维板中间的纤维层不能通过充分变形吸收能量，导致纤维损伤区域最小。但随着层间抗剪强度的降低，纤维层在拉应力作用下的变形程度增大，纤维破坏裂纹沿纤维方向延伸，使得纤维损伤面积沿厚度方向缓慢增大。因此，沿纤维厚度方向，纤维损伤面积先减小后增大。

3.3 纤维失效形状规律

纤维失效形状通过 X 射线 CT 扫描获得，如图 13。纤维失效区域随着纤维层位置，表现出不同破坏形状。位于 CF 板中部的纤维层受到前后纤维及 Al 板约束，这使得纤维层受到破片冲击时，碳纤维无法充分拉伸破坏，呈现近似于椭圆状(图 13(a1)、图 13(b1))。位于自由面的纤维层受到破片冲击时受到充分的拉伸破坏，较高的冲击强度使得纤维失效裂纹沿着纤维铺设方向扩展(图 14(c1))。类似的失效形状也出现在数值模拟中(图 13(a2)~图 13(c2))，验证了数值模拟能有效预测高速冲击下纤维层失效形状。

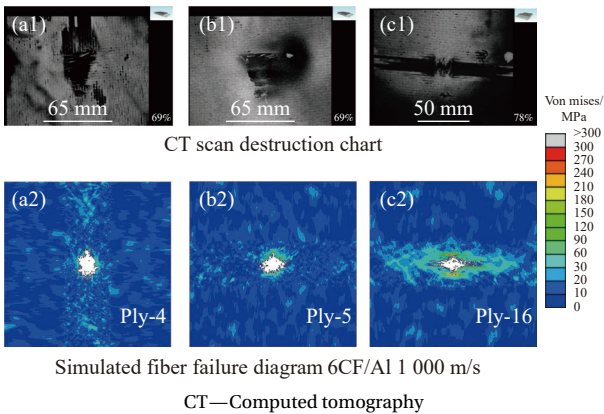


图 13 6CF/Al 复合板受到 1 000 m/s 初速破片冲击下的纤维破坏形状
Fig. 13 Fiber damage shape of 6CF/Al composite plate under the impact of 1 000 m/s initial velocity projectile

为了解不同冲击初速的破片冲击 CF/Al 复合板时，纤维失效区域形状与冲击强度及纤维所在位置的关系。通过下式计算费雷特直径 (Ferret ratio):

$$\text{Ferret ratio} = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} \tag{1}$$

其中： $F_{\max}$ 为最大费雷特直径 (Major Feret diameter)； $F_{\min}$ 为最小费雷特直径 (Minor Feret diameter)。这是区域伸长率的基本测量方法。对于各向同性区域，Ferret 比率接近 1，而对于强伸长区域，则为 0。

圆形系数 (Circular shape factor, CSF) 评估纤

维损伤区域形状^[39] 如下式所示:

$$\text{CSF} = \frac{4A}{\pi F_{\max}^2} \tag{2}$$

其中， A 为纤维损伤面积。这是基于区域面积和主要 Feret 直径的圆形度的测量。对于完整的圆，CSF 是 1，对于更细长的形状，CSF 趋近于 0。

由于 CF 板由正交铺设的单向碳纤维层组成，不同的纤维铺设方向使得圆形系数存在波动，为消除纤维铺设方向对结果的影响，对正交铺设的两层纤维的圆形系数取平均值得到结果如图 14。从图中可以发现 Al 板与 CF 板界面层的纤维层失效形状的圆形系数最大，分别为 0.53、0.46、0.40。最外层纤维圆形系数最小，为 0.15、0.12、0.08。1 000 m/s、1 250 m/s、1 500 m/s 初速的破片冲击下，纤维层破坏形状的圆形系数都表现出了随着厚度方向逐层递减的趋势。这表明在纤维层与金属层相互作用下，内层纤维破坏形状更趋近于圆形，外层纤维层所受约束逐渐减小，纤维层破坏形状逐渐细长，破坏性质趋近于强拉伸性质。

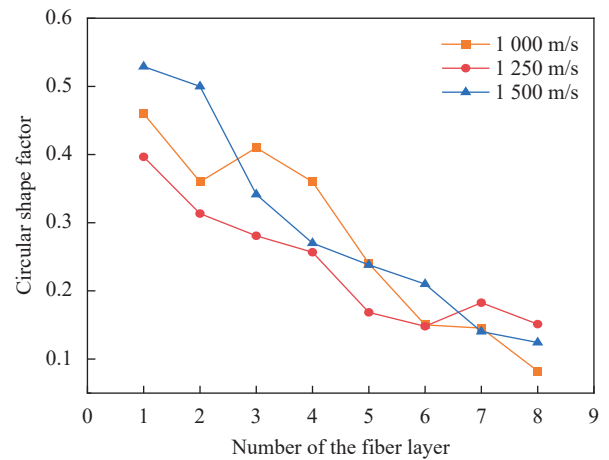


图 14 纤维失效形状沿厚度方向变化趋势
Fig. 14 Fiber failure shape changes along the thickness direction

3.4 CF/Al 复合板吸能性能变化规律

4CF/Al 复合板厚度为 12.72 mm，8CF/Al 复合板厚度为 15.50 mm，统一采用厚度为 10 mm 的前置铝板。对速度为 1 000 m/s 左右的破片冲击下的 4CF/Al 复合板与 8CF/Al 复合板的动态响应进行 DIC 分析，并对相同工况进行数值模拟，得到 DIC 分析图(图 15(a1)、图 15(b1)) 与数值模拟应力云图(图 15(a2)、图 15(b2))。通过 4CF/Al 复合板与 8CF/Al 复合板的 DIC 分析云图可以发现，纤维受到破片冲击，纤维自由面在 67 μs 时出现纤维凸

起，破片在 134 μs 时穿透靶板，拉伸作用下破坏变形沿着纤维方向继续扩展，对非纤维铺设方向的破坏范围有限。数值模拟应力云图显示了破片冲击过程中应力传播过程，应力波传播过程与 DIC 分析显示的纤维破坏变形过程类似，应力波沿着纤维铺设方向传播，非纤维铺设方向应力波传播范围有限。这是由于碳纤维层由单向纤维束铺设而成，另外一个方向是由特制的高强度热熔

胶线固定，纤维束之间的缝隙由环氧树脂填充。CF 板受到破片冲击时，纤维束之间冲击载荷的传递主要通过环氧树脂基质作为媒介，纤维的高波阻抗导致应力波在纤维中的传播范围远大于环氧树脂中的传播范围。因此，环氧树脂基体的低波阻抗限制了应力波在纤维束之间的传播范围，导致纤维仅局部变形，纤维板较低的变形程度限制了纤维层的整体抗冲击性能。

为研究 CF 板厚度对 CF/Al 复合板吸能性能的影响，对 1 000 m/s、1 250 m/s、1 500 m/s 的钨球破片侵彻 CF/Al 复合板进行数值模拟。根据实验所得数据，如表 3，碳纤维层平均厚度分别为 0.68 mm、0.675 mm、0.7 mm、0.6875 mm、0.72 mm、0.7 mm。因此数值模拟中单层碳纤维层采用 0.7 mm 厚度，通过正交叠层方式铺层，最厚样本为 18CF/Al 复合板，总厚度为 22.6 mm。

通过比吸能方法^[40](Specific energy absorption, SEA) 对不同背板厚度的吸能效果展开分析，比吸能公式如下式：

$$J_s = \frac{J_b}{\rho_A}$$

(3)

其中： J_s 为单位面密度吸收弹体动能； J_b 为靶板吸收的弹体动能； ρ_A 为靶板的面密度。

将 1 000 m/s、1 250 m/s、1 500 m/s 初速的破片侵彻下靶板比吸能随厚度变化的数据进行线性拟合，所得曲线如图 16。从图 16(a)~图 16(c) 可知，1 000 m/s、1 250 m/s、1 500 m/s 初速的破片侵彻下，CF/Al 复合板的比吸能随着面密度增加呈现线性下降趋势。结果表明增加 CF/Al 复合板的 CF 板厚度可以增加复合板的抗冲击性能，但会减小单位面密度吸收的冲击动能，从而减小复

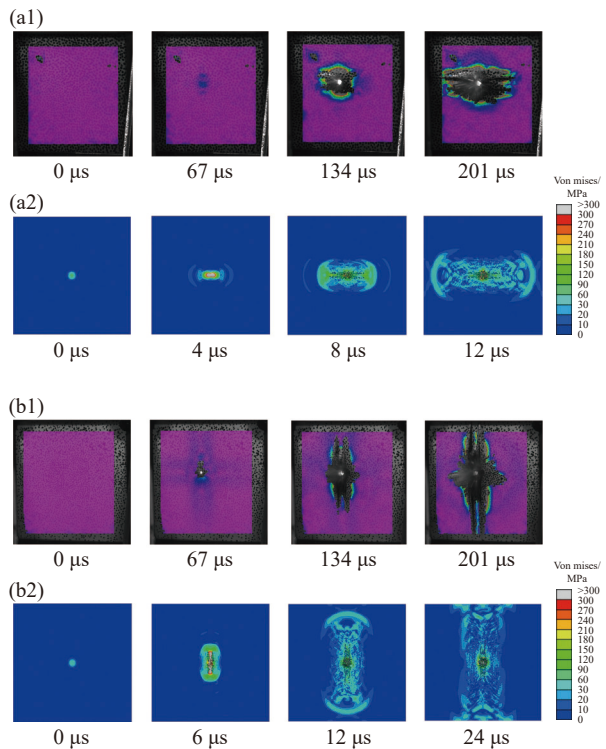


图 15 4CF/Al (1 010 m/s) (a) 与 8CF/Al (1 008 m/s) (b) 复合板 DIC 分析 ((a1), (b1)) 及应力传播 ((a2), (b2))

Fig. 15 Digital image correlation (DIC) analysis ((a1), (b1)) and stress propagation ((a2), (b2)) of 4CF/Al (1 010 m/s) (a) and 8CF/Al (1 008 m/s) (b) composite plates

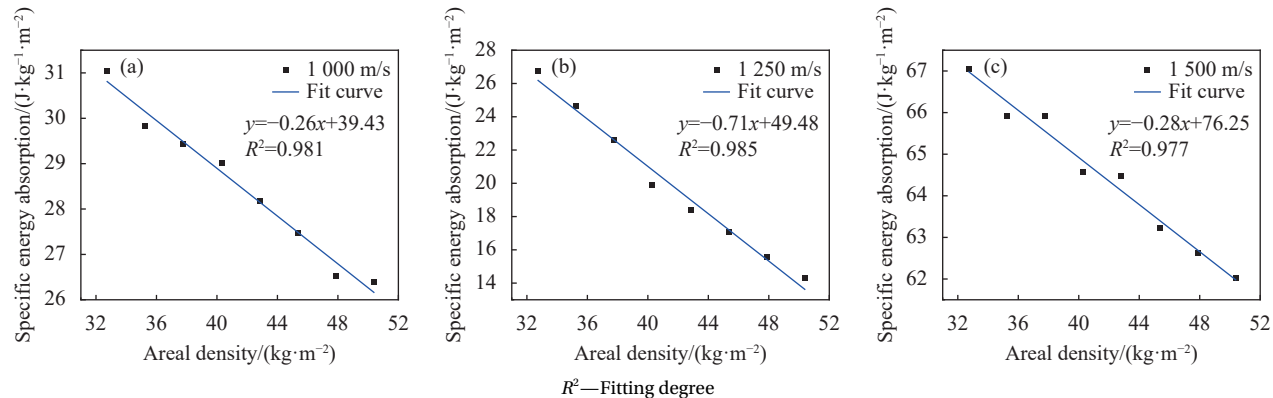


图 16 CF/Al 复合板面比吸能随面密度变化趋势

Fig. 16 Trend of specific energy absorption of CF/Al composite surface with variation of surface density

合板的吸能效率。

4 结论

为研究碳纤维 (CF) 板厚度对 Al 板抗冲击效果的影响,开展滑膛枪发射 8 mm 钨合金球形破片冲击 CF/Al 复合板实验,通过基于 Abaqus 用户子程序 VUMAT 编写的 UT70-30 碳纤维的本构模型及金属 J-C 损伤本构模型进行数值模拟,得出以下结论:

(1) CF 板厚度对 Al 板机械支撑的影响呈非线性增大,CF 板增加到一定厚度后(4.2 mm、5.6 mm、5.6 mm),破片(1 000 m/s、1 250 m/s、1 500 m/s)穿透 Al 板阶段的能量吸收没有明显增强,此时,Al 板吸收冲击动能分别为 1 008.02 J、2 061.84 J、2 868.61 J;

(2) 铝板的凸变形和相邻纤维层的限制对纤维层的变形程度有影响,使纤维损伤面积沿纤维厚度方向先减小后增大;

(3) 纤维层破坏形状的圆形系数 (CSF) 沿厚度方向减小,在纤维层和金属层的约束下,内部纤维损伤形状趋于椭圆形,而外层纤维层上的层间剪切强度逐渐降低,导致最外层纤维相对位移较大,纤维损伤形状趋于细长形状;

(4) CF 板扩散冲击能量的范围受到环氧树脂基质扩散的限制,仅有局部纤维受到破坏,无法发挥整体的纤维层抗侵彻效果,CF/Al 复合板的比吸能随着面密度增加呈现线性下降趋势。

参考文献:

[1] 肇研,孙铭辰,张思益,等.连续碳纤维增强高性能热塑性复合材料的研究进展[J].复合材料学报,2022,39(9): 4274-4285.
ZHAO Yan, SUN Mingchen, ZHANG Siyi, et al. Advance in continuous carbon fiber reinforced high performance thermoplastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4274-4285(in Chinese).

[2] 曹建凡,白树林,秦文贞,等.碳纤维增强热塑性复合材料的制备与性能研究进展[J].复合材料学报,2023,40(3): 1229-1247.
CAO Jianfan, BAI Shulin, QIN Wenzhen, et al. Research progress on preparation and properties of carbon fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1229-1247(in Chinese).

[3] 刘凯.冰冲击载荷作用下碳纤维复合材料层合板响应机理[D].长沙:中南大学,2023.
LIU Kai. Response mechanism of carbon fiber composite laminates under ice impact[D]. Changsha: Central South University, 2023(in Chinese).

[4] CHEN L B, LIN X Y, BAI R S. Anti-bird-strike behavior of M40J carbon fiber reinforced plastic laminates[J]. Composite Structures, 2024, 339: 118094.

[5] ZHANG N, ZHOU G M, GUO X M. 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.

[6] SANCHEZ-GALVEZ V, GALVEZ F, SANCHEZ R, et al. A new analytical model to simulate high-speed impact onto composite materials targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 108: 322-333.

[7] RATHNASABAPATHY M, MOURITZ A P, ORIFICI A C. Impact-under-load damage tolerance of a fibre metal laminate[J]. Composite Structures, 2022, 287: 115368.

[8] WEI S, ZHANG X, LI Y, et al. Study of the dynamic response and damage evolution of carbon fiber/ultra-thin stainless-steel strip fiber metal laminates under low-velocity impact[J]. Composite Structures, 2023, 330: 117772.

[9] JAKUBCZAK P, PODOLAK P, DROZDZIEL-JURKIEWICZ M. The assessment of the compressive strength of fibre metal laminates after low-velocity impact[J]. Composite Structures, 2023, 320: 117208.

[10] YUAN K, LIU K, WANG Z, et al. An investigation on the perforation resistance of laminated CFRP beam and square plate[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 157: 103967.

[11] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials[C]//AIP Conference Proceedings. New York: American Institute of Physics, 1994: 981-984.

[12] WEI G, HAO C, AI J Y, et al. Effect of lamination sequence and warhead shape on impact resistance of fiber-metal laminates[J]. Polymer Composite, 2023, 44(12): 8510-8528.

[13] OBERG E K, DEAN J, CLYNE T W. Effect of inter-layer toughness in ballistic protection systems on absorption of projectile energy[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76: 75-82.

[14] YANG Y, CHEN X. Investigation of energy absorption mechanisms in a soft armor panel under ballistic impact[J]. Textile Research Journal, 2017, 87(20): 2475-2486.

[15] YANG Y, CHEN X. Investigation on energy absorption efficiency of each layer in ballistic armour panel for applications in hybrid design[J]. Composite Structures, 2017, 164: 1-9.

[16] DONG Y, ZI F, YANG L, et al. Research on anti-penetration performance of composite armor of steel/composite materials[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(28): 7035-7050.

[17] ZHU Y H, MA J, FAN Z Q, et al. Ballistic impact performance and blunt injury assessment of ceramic/UHMWPE laminate composite body armor[J]. Journal of Materials

- [Research and Technology](#), 2024, 29: 1703-1728.
- [18] ZHOU Y S, ZHENG C S. Impact resistance performance and structural optimization of lightweight composite target plate[J]. [Polymer Composites](#), 2024, 45(7): 6482-6497.
 - [19] KARAHAN M, KUS A, EREN R. An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics[J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2008, 35: 499-510.
 - [20] LIU J, LONG Y, JI C, et al. Influence of layer number and air gap on the ballistic performance of multi-layered targets subjected to high velocity impact by copper EFP[J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2017, 112: 52-65.
 - [21] BANDARU A K, AHMAD S, BHATNA-GAR N. Ballistic performance of hybrid thermoplastic composite armors reinforced with Kevlar and basalt fabrics[J]. [Composites Part A: Applied Science and Manufacturing](#), 2017, 97: 151-165.
 - [22] WANG Y, CHEN X, YOUNG R, et al. A numerical study of ply orientation on ballistic impact resistance of multi-ply fabric panels[J]. [Composites Part B: Engineering](#), 2015, 68: 259-265.
 - [23] DENG Y F, WANG Y T, CAI X F, et al. Influence of thickness on impact resistance of glass fiber woven composite laminates[J]. [Journal of Applied Polymer Science](#), 2023, 140(27): e53791.
 - [24] LIAO B, ZHOU J, AI S, et al. Comparison of laminate thickness on the low velocity impact behaviors for Z-pinned composite laminates[J]. [International Journal of Mechanical Sciences](#), 2021, 204: 106567.
 - [25] 张辰, 饶云飞, 李倩倩, 等. 碳纤维-玻璃纤维混杂增强环氧树脂复合材料低速冲击性能及其模拟 [J]. [复合材料学报](#), 2021, 38(1): 165-176.
ZHANG Chen, RAO Yunfei, LI Qianqian, et al. Low-velocity impact behavior and numerical simulation of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites[J]. [Acta Materiae Compositae Sinica](#), 2021, 38(1): 165-176(in Chinese).
 - [26] 张徐梁, 阳玉球, 阎建华, 等. 碳纤维-玻璃纤维混杂增强环氧树脂三维编织复合材料薄壁圆管压溃吸能特性与损伤机制 [J]. [复合材料学报](#), 2021, 38(9): 2814-2821.
ZHANG Xuliang, YANG Yuqiu, YAN Jianhua, et al. Crushing energy absorption characteristics and damage mechanism of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy 3D braided composite thin-walled circular tube[J]. [Acta Materiae Compositae Sinica](#), 2021, 38(9): 2814-2821(in Chinese).
 - [27] 吴龙强, 欧云福, 茅东升, 等. 取向碳纳米管纤维纱插层碳纤维/环氧树脂复合材料的层间性能及增韧机制 [J]. [复合材料学报](#), 2023, 40(10): 5611-5620.
WU Longqiang, OU Yunfu, MAO Dongsheng, et al. Interlaminar properties and toughening mechanisms of aligned carbon nanotube fiber[J]. [Acta Materiae Compositae Sinica](#), 2023, 40(10): 5611-5620(in Chinese).
 - [28] REU P. All about speckles: Speckle size measurement[J]. [Experimental Techniques](#), 2014, 38(6): 1-2.
 - [29] REU P. All about speckles: Aliasing[J]. [Experimental Techniques](#), 2014, 38(5): 1-3.
 - [30] ZHANG F, LIN Y, WU J A, et al. Comparison of stacking sequence on the low-velocity impact failure mechanisms and energy dissipation characteristics of CFRP/Al hybrid laminates[J]. [Polymer Composites](#), 2022, 43(8): 5544-5562.
 - [31] MEGERI S, NAIK G N. Numerical studies of the low velocity impact behaviour on hybrid fiber metal laminates[J]. [Materials Today: Proceedings](#), 2021, 44(1): 1860-1864.
 - [32] 刘铁, 史洪刚, 程新, 等. 钨合金帽型试样的绝热剪切带数值模拟研究 [J]. [兵器材料科学与工程](#), 2008, 227(2): 75-79.
LIU Tie, SHI Honggang, CHENG Xin, et al. Numerical simulation for adiabatic shear bands of WHA in hat specimen[J]. [Ordnance Materials Science and Engineering](#), 2008, 227(2): 75-79(in Chinese).
 - [33] 王雷, 李玉龙, 索涛, 等. 航空常用铝合金动态拉伸力学性能探究 [J]. [航空材料学报](#), 2013, 33(4): 71-77.
WANG Lei, LI Yulong, SUO Tao, et al. Mechanical behavior of commonly used aeronautical aluminum alloys under dynamic tension[J]. [Journal of Aeronautical Materials](#), 2013, 33(4): 71-77(in Chinese).
 - [34] HAN Q, LI H, CHEN X, et al. Impact resistant basalt fiber-reinforced aluminum laminate with Janus helical structures inspired by lobster and mantis shrimp[J]. [Composite Structures](#), 2022, 291: 115551.
 - [35] SHARMA A P, KHAN S H. Influence of metal layer distribution on the projectiles impact response of glass fiber reinforced aluminum laminates[J]. [Polymer Testing](#), 2018, 70: 320-347.
 - [36] GAO Y, SHI L, LU T, et al. Ballistic and delamination mechanism of CFRP/aluminum laminates subjected to high velocity impact[J]. [Engineering Fracture Mechanics](#), 2024, 295: 109797.
 - [37] BLAND P W, DEAR J P. Observations on the impact behaviour of carbon-fibre reinforced polymers for the qualitative validation of models[J]. [Composites Part A: Applied Science and Manufacturing](#), 2001, 32(9): 1217-1227.
 - [38] TALREJA R, SINGH C V. Damage and failure of composite materials[M]//Micro-damage Mechanics. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 235-280.
 - [39] NUNES L M, PACIORNIK S, D'ALMEIDA JRM. Evaluation of the damaged area of glass-fiber-reinforced epoxy-matrix composite materials submitted to ballistic impacts[J]. [Composites Science and Technology](#), 2004, 64(7-8): 945-954.
 - [40] DONG Y L, YANG L H, JIN Z Q, et al. Experimental and numerical analysis of ballistic impact response of fiber-reinforced composite/metal composite target[J]. [Composite Structures](#), 2022, 294: 115776.