

文章编号: 1005-0523(2025)05-0104-09



CFRP层合板火烧后拉伸行为及失效机理研究

雷祖祥, 张和, 潘锐, 王李福

(华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 为了研究CFRP层合板火烧后的拉伸行为及失效机理, 对3种不同铺层的CFRP层合板进行了火烧后的拉伸试验。采用红外热像仪进行热稳定性监控, 并通过SEM进一步分析了火烧温度、纤维铺层对CFRP层合板热解行为的影响, 最后通过载荷-位移、应力-应变曲线和失效形貌研究了其抗拉强度及失效机理。试验表明: CFRP层合板在高温火烧时发生了热解行为和质量损失, 损伤主要包括基体分解、纤维/基体界面脱粘和分层。与400℃相比, 600℃下试件的质量损失成倍增加, 损伤程度更为严重。 $\pm 45^\circ$ 层合板的曲线趋势相近, 但强度差异最明显, 这是由于其性能高度依赖于树脂和纤维/基体黏结。对比高温火烧后的强度, 0° 层合板最高, $0^\circ/90^\circ$ 层合板次之, $\pm 45^\circ$ 层合板最低, 且 0° 层合板的退化率最小。

关键词: CFRP; 铺层角度; 热损伤; 静态拉伸; 失效机理

中图分类号: TB332

文献标志码: A

本文引用格式: 雷祖祥, 张和, 潘锐, 等. CFRP层合板火烧后拉伸行为及失效机理研究[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(5): 104-112.

Experimental Investigation on Tensile Behavior and Failure Mechanism of CFRP Laminates After Fire Exposure

Lei Zuxiang, Zhang He, Pan Rui, Wang Lifu

(School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To investigate the tensile behavior and failure mechanism of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites after fire exposure, tensile tests were conducted on three different layups of CFRP laminates subjected to fire exposure. Thermal stability was monitored using an infrared thermal imager, followed by microstructural analysis via SEM to investigate the effects of burn temperature and fiber lay-up on the pyrolysis behavior of CFRP laminates. Finally, their tensile strength and failure mechanisms were evaluated through load-displacement curves, stress-strain curves, and failure morphologies. The results show that CFRP laminates subjected to high-temperature exposure exhibit significant pyrolysis and mass loss, and their damage mechanisms include matrix decomposition, fiber/matrix interface debonding, and interlaminar delamination. Compared to 400℃, specimens exhibit a twofold increase in mass loss and more severe damage at 600℃. A similar trend in curves and a significant difference in strength are found in $\pm 45^\circ$ laminates, whose mechanical performance depends greatly on the resin properties and fiber/matrix adhesion. The ranking of tensile strength for specimens after fire exposure is as follows: 0° laminate, $0^\circ/90^\circ$ laminate, and $\pm 45^\circ$ laminate. Furthermore, the 0° laminate experiences the smallest degradation rate.

收稿日期: 2025-02-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(12172130); 江西省自然科学基金重点项目(20232ACB201007)

Key words: CFRP; fiber layup; thermal damage; static tensile test; failure mechanisms

Citation format: LEI Z X, ZHANG H, PAN R, et al. Experimental investigation on tensile behavior and failure mechanism of CFRP laminates after fire exposure[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42 (5): 104–112.

目前,由于需要更轻质高强及抗腐蚀的材料,大量航空航天零部件要求从传统的金属结构向碳纤维增强树脂复合材料(CFRP)转换^[1-3]。尤其是在飞机机翼、航天器外壳等高性能结构中,CFRP凭借其优异的性能优势,正在进入越来越多的领域,并发挥着不可替代的作用^[4-6]。然而,面对高温和火灾等极端条件时,CFRP的热稳定性和力学性能就显得至关重要。在航空航天部件的设计中,合理选择和优化CFRP的铺层角度,不仅能提升材料的抗热损伤能力,还能保证其在火灾等高温环境下的安全性。

在长期服役过程中,复合材料难免会暴露于极端恶劣环境中,如CFRP布用于钢筋混凝土梁的抗剪加固面^[7],或航空航天领域中经受的高温、火灾、冲击和动态载荷等^[8-10]。这种极端和恶劣的环境严重影响着材料的完整性,进而影响结构的长期可靠性,甚至导致灾难性失效。CFRP的各种损伤模式从微观至宏观层依次由树脂微裂纹、纤维-树脂界面脱粘、横向裂纹、分层以及纤维断裂等组成^[11-15]。因此在火灾暴露环境下研究复合材料的力学性能与损伤机理是很有必要的。

复合材料在不同的应用场景中,采用不同的纤维取向、铺层顺序,会表现出不同的热解行为及力学性能。针对不同纤维取向的层合板对受火温度影响,Kobayashi等^[16]研究得出不同的纤维取向会对CFRP在高温下火焰的传播以及热行为产生显著的影响,尤其是铺层角度调控着材料的热解速率。Wang等^[17]研究了在火灾下层压玻璃的热行为,得出层间厚度与结构设计对复合材料的热传递及裂纹行为有着重要的影响。针对不同铺层对于拉伸性能的影响,Karthick等^[18]探究了不同的纤维取向对天然纤维复合材料的拉伸性能和弯曲行为,并且发现了纤维的排列对复合材料的力学行为有着重大的作用。Quade等^[19]研究了碳纤维复合材料的纤维铺层和黏合剂选择对嵌入镍钛合金材料的拉伸性能影响。

目前对不同铺层的CFRP层合板受火后的拉伸性能的研究比较少。因此,本文针对CFRP探究了不同铺层、不同受火温度对其拉伸性能影响。此外,结合火灾场景模拟,在考虑铺设角度的基础上通过静态拉伸试验分析其受火后力学性能的变化情况。揭示了CFRP在受火后的损伤演变规律和失效机理,为复合材料在工程中的设计优化提供参考依据。

1 CFRP层合板受火后拉伸试验

1.1 试验材料

本研究选用的试件原料为图1所示的高性能碳纤维T700S-12K和环氧树脂EI2001组成的预浸料。预浸料由上海伽材新材料科技有限公司供应,纤维体积含量高达70%,具体参数如表1所示。该环氧树脂具有高玻璃化转变温度和良好的抗变形性能,即使高温下也能保持良好的物理和化学性能。

1.2 试件制备

如图1所示,将预浸料裁剪成 0° 、 90° 、 $+45^\circ$ 和 -45° 方向的纤维,然后按照表2中的铺层方案进行铺设(在表2中,不同铺层方式的表示如下: $[0^\circ/90^\circ]$ 表示预浸料按 0° 方向和 90° 方向依次铺设,形成一个铺层组; $[\pm 45^\circ]$ 采用相同原则,以 $+45^\circ$ 和 -45° 方向交替铺设; $[0^\circ]$ 则表示仅含有 0° 方向的铺层。此外,

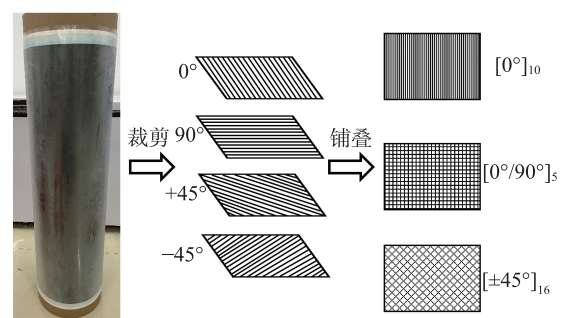


图1 碳纤维复合材料预浸料及堆叠方式

Fig. 1 CFRP prepreg and stacking configurations

表1 纤维和树脂的材料属性

Tab.1 Material property of fiber and resin

T700S-12K		EI2001	
密度	1.8 g/cm ³	弯曲强度	85 MPa
拉伸强度	4 900 MPa	拉伸强度	62 MPa
拉伸模量	230 GPa	比重	1.21~1.23
伸长率	2.1%	玻璃转化温度	120~130 ℃
纤维直径	7 μm	断裂伸长率	2%
比热容	752 J/(kg·K)	凝胶时间	2~3 min
泊松比	0.22	黏度	200~300 Pa·s

表2 铺层方案

Tab.2 Stacking configuration

名称	铺层方式	试件尺寸
0°	[0°] ₁₀	250 mm×25 mm×1.7 mm
0°/90°	[0°/90°] ₅	250 mm×25 mm×1.9 mm
±45	[±45°] ₁₆	250 mm×25 mm×5.4 mm

下标 10, 5, 16 分别为对应铺叠组的层数), 铺叠好的材料置于模具中固定并放入热压机中成型, 热压成型工艺流程如下。

温变阶段: 首先温度逐渐升高, 一般为 25 min, 此阶段是为了达到加热原材料所需的温度。加压维持阶段: 当达到目标温度 145 ℃ 后施加压力, 并且保持压强在 0.6 MPa, 维持时间为 80 min, 通过高温高压使它成型固化, 此阶段是热压成型的最关键阶段。温度下降阶段: 加压维持 80 min 后, 使温度逐渐下降至 100 ℃。手动卸载阶段: 当温度达到 100 ℃ 时, 模具可从热压机中卸载。板材成型过后, 将其切割成如表 2 所示的尺寸, 拉伸试验前对试件端部进行铝片的加固。铝片尺寸为 65 mm×25 mm×3 mm。铝片表面采用凹凸处理, 并用砂纸打磨试件夹持区, 然后将铝片用热固型胶膜粘贴在试件端部, 固定后放入 120 ℃ 的烘箱高温固化 12 h。最后, 实验前在试件表面喷涂散斑, 以便后续采用数字图像相关技术进行应变监测。

1.3 火烧装置及方法

试验中使用丁烷喷枪对拉伸试件进行火烧处理, 利用红外热像仪对试件表面的温度变化进行实时监控。本研究选取 400 ℃ 和 600 ℃ 作为火烧试验温度, 分别对应实际建筑火灾的中等温度阶段和高温阶段。Wang 等^[17]在研究玻璃纤维复合材料的热解行为时发现, 高于 400 ℃ 的温度会显著加速树脂基体的降解, 而 600 ℃ 作为临界温度, 会导致材料

内部微裂纹急剧增多, 从而显著削弱结构完整性。因此, 这两种温度不仅处于 CFRP 的热降解温度区间, 同时也符合工程应用背景。3 种铺层的试件都进行了持续 10 min 的火烧处理, 每一组进行 3 个平行测试。为减少实验误差, 试验过程中在试件端部 10 cm 处采用不锈钢夹固定, 以确保喷枪高度的一致性, 并保持喷枪口与试件之间的水平距离为 3 cm。同时, 固定调节火焰强度的旋钮, 以维持火焰的强度稳定。每次实验中, 火焰应覆盖试件的宽度, 并对称地多出 1 cm, 从而保证受火面积一致。

在火烧之前, 将试件放入 80 ℃ 烘箱中烘烤 3 h, 取出后, 用电子秤称重; 将层合板火烧后的质量变化作为参数, 火烧结束后再次称其质量。可得到层合板质量损失率计算如下

$$W = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W 为试件的质量变化率, %; M_0 为试件的初始质量, g; M 为试件火烧后的质量, g。

1.4 拉伸试验

按照 ASTM D3039 聚合物基复合材料拉伸性能的标准试验方法, 试验装置包括 250 kN 动静伺服万能试验机和数字图像相关技术 (DIC)。试件在试验机上用 5 MPa 的夹持力固定, 并进行位移控制, 加载速度为 1.25 mm/min。当试件的变形达到工作段长度的 15% 或实时载荷降至峰值的 20% 时, 实验停止。3 种不同铺层的试件分别设置未火烧、400 ℃ 和 600 ℃ 火烧的对照组。

采用 DIC 去监测试件表面应变和破坏行为, 并通过观察散斑的变化, 可以精确测得试件表面变形和应变。采集速度为 2 Hz, 最后用 MatchID-2D 软件分析即可获取应变场。试件的极限拉伸强度为

$$\sigma = \frac{F}{b \times h} \quad (2)$$

式中: σ 为 CFRP 试件的极限拉伸强度, MPa; F 为试件的极限承载力, N; b 为试件的宽度, mm; h 为试件的厚度, mm。

2 CFRP 层合板受火过程分析

2.1 受火后损伤形貌

受火状态下, 层合板由于环氧树脂基体热解而造成质量损失和性能劣化。在受火区域的基体大部分分解成碳和挥发物, 而靠近热源的区域形成较薄的热解区, 基体逐渐降解从而形成高密度的裂纹

与孔隙。

图2(a)为 0° 层合板在 400°C 和 600°C 受火后的损伤形貌。在 400°C 时, 0° 层合板损伤区域呈椭圆形,背面损伤较轻,侧面无明显变化,损伤主要由环氧树脂的热解引起。而 600°C 下,损伤区域明显增大且呈矩形,并伴随有明显的碳化现象,背面损伤明显加剧,侧面受火区的厚度明显增加,主要是由于受火处树脂严重缺乏及热膨胀使得厚度显著增加。

图2(b)为 $\pm 45^\circ$ 层合板受火后的损伤形貌。该损伤区域形态与 0° 层合板相似。区别在于: 400°C 下,局部的分层被发现;而 600°C 下,分层现象严重,损伤主要体现在层间分层、基体裂纹和纤维/基体界面裂纹。

图2(c)为 $0^\circ/90^\circ$ 层合板受火后的损伤形貌。相比于 0° 层合板, $0^\circ/90^\circ$ 层合板分层较严重,但是其表面损伤痕迹较轻,说明 $0^\circ/90^\circ$ 交叉铺层可以有效抵抗热量的传输,这对优化防火设计有着较好的经济价值。

2.2 质量损失

质量变化可以在宏观上体现层合板的损伤程度。对比未火烧试件,3种铺层火烧(400°C , 600°C)试件的具体的厚度及质量变化如表3所示。数据表明, 600°C 高温火烧下: 0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 $0^\circ/90^\circ$ 层合板厚度增加幅度依次为88.2%、41.3%、75.4%,且 0° 层合板质量损失最大,平均损失为6.52%, $\pm 45^\circ$ 层合板质量损失最小,平均损失为2.26%, $0^\circ/90^\circ$ 层合板居中,平均损失为3.04%。总体而言 0° 层合板质量损失及厚度增幅最大, $\pm 45^\circ$ 层合板最小, $0^\circ/90^\circ$ 层合板居中。

主要原因在于, 0° 层合板的纤维仅沿 0° 方向铺设,火烧作用下的热膨胀主要集中在未受纤维约束的垂直方向,因此其厚度膨胀幅度最为显著。而 $\pm 45^\circ$ 层合板因纤维间相互交错形成网络状支撑结构,表现出较强的热稳定性和抗厚度膨胀能力,因此在同样的火烧条件下,厚度增加幅度最小。相较于 0° 层合板, $0^\circ/90^\circ$ 层合板纤维也呈交错分布,但纤维交错的支撑效果不如 $\pm 45^\circ$ 层合板高,所以火烧后的厚度增加幅度仍会略大于 $\pm 45^\circ$ 层合板。

由表3数据可知,3种层合板在 600°C 下的质量损失率均显著高于 400°C 。特别是 0° 层合板在 600°C 时的质量损失率更为显著。这种现象的主要原因是高温下,试件会发生局部失效现象,如树

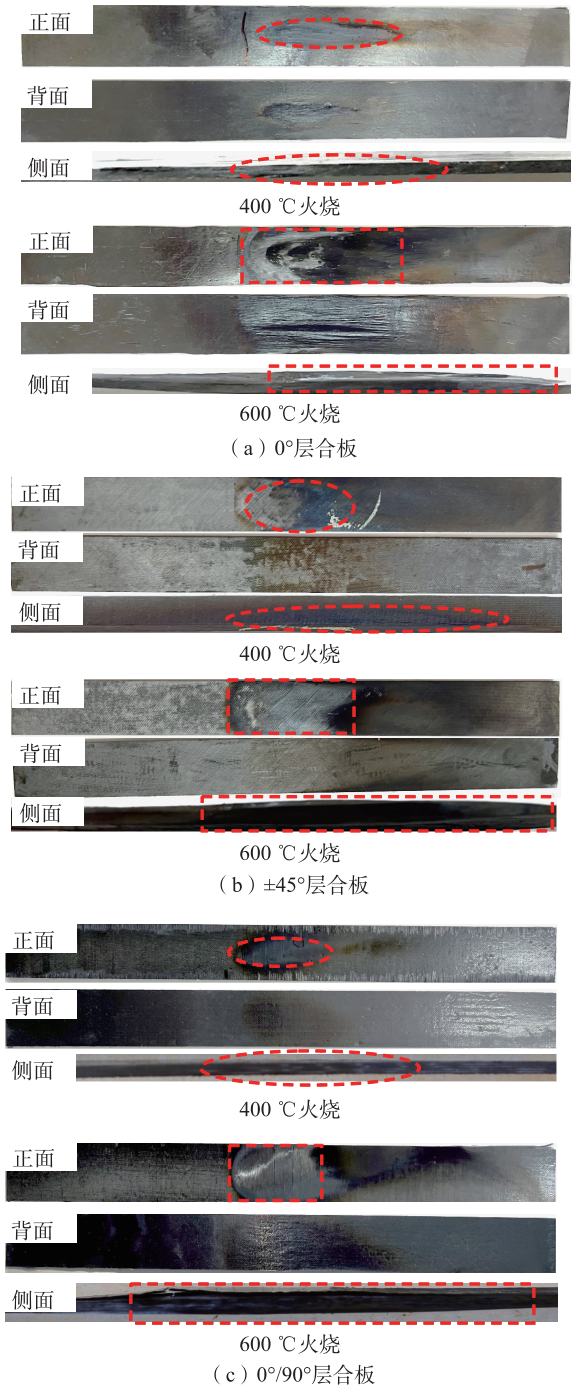


图2 层合板受火后的损伤形貌图

Fig. 2 Damage morphology of laminates after fire exposure

脂的剧烈烧蚀和分层等。一旦树脂部分受到严重烧蚀,就会导致局部区域的脱粘或分层,进而快速增加质量损失率,造成 600°C 火烧条件下质量损失率远高于 400°C 的现象。

2.3 CFRP层合板受火后微观分析

图3为碳纤维层合板受火后SEM图像(其中图

表3 试件受火后的厚度、质量损失

Tab.3 Thickness and mass loss of specimen after fire

铺层 类型	400 ℃		600 ℃	
	厚度/mm	质量损失	厚度/mm	质量损失
0°	2.3	0.72%	3.2	6.57%
	2.4	1.40%	3.2	6.52%
	2.3	1.43%	3.2	6.47%
±45°	6.7	0.36%	7.6	1.78%
	6.7	0.36%	7.7	2.50%
	6.7	0.36%	7.6	2.49%
0°/90°	2.9	0.49%	3.3	2.29%
	2.7	0.44%	3.3	4.74%
	2.8	0.59%	3.4	2.08%

3(a)、图3(b)、图3(c)均为放大300倍)。图3(a)为0°层合板受火后图像,在400℃下,树脂基体部分降解,基体分布不均且出现孔洞;在600℃下,纤维间的树脂大量消失,表面覆盖有明显的基体残渣。图3(b)为±45°层合板,在400℃下,基体未受火区域完好地包覆在纤维上,火损伤区则表现为纤维脱粘,脱粘的纤维表面被基体残渣覆盖;在600℃下,看不到未损伤区域,整体损伤程度更大;图3(c)为0°/90°层合板,在400℃下,树脂基体开始退化,基体对纤维的黏结力变弱,在某些区域有基体残渣和空隙;在600℃下,空隙更加明显,纤维表面破坏更加严重。

图3(d)为放大4 000倍下的碳纤维受火后SEM图像,在400℃下,纤维表面保持完整;而在600℃下,纤维表面出现了沿纤维方向排列的浅凹槽。这些凹槽并非由加热引起,而是原纤维本身就存在,且被尺寸涂层掩盖。但是,经过高于500℃的火烧后,碳纤维的表面由于氧化发生了明显的质量损失,导致纤维均匀变薄而显露出凹槽。

3 拉伸试验结果与讨论

使用DIC数据绘制载荷-位移曲线和应力-应变曲线(如图4和图5所示)。不同温度条件下,3种试件的平均极限拉伸强度、强度退化率和模量退化率见表4。图4(a)和图5(a)分别为0°层合板在不同火烧条件下的载荷-位移曲线和应力-应变曲线。从载荷-位移关系可以看出,各试件初始刚度相同,从2 mm处开始出现差异。其中600℃试件与其他试件的曲线不同,斜率下降最大,最后在3.5 mm左右失效;而未火烧和400℃试件的曲线出现了荷载

突然下降后继续上升的现象。

在600℃条件下,CFRP层合板表现出显著不同的性能退化:拉伸强度退化率为29.2%,而拉伸模量仅下降6.7%。这种差异的主要原因是:600℃高温下,树脂基体发生剧烈热解,导致其自身模量大幅降低,同时树脂热解也削弱了纤维与基体之间的黏结强度,从而显著降低了载荷传递效率,直接导致拉伸强度的大幅下降。然而,碳纤维具有极高的热稳定性,其内在模量在高温下变化较小,且纤维体积分数较高使得整体模量主要受纤维性能主导。因此,即便树脂大部分失效,整体模量仍然仅出现约6.7%的退化。由此可见,CFRP复合材料在高温环境下呈现出“强度大幅下降而模量变化较小”的现象,其根本原因在于热解后的树脂对界面传力的破坏效应明显,而纤维的刚性保持较高水平。

对于受火试件,温度越高,试件强度和刚度越低,主要是树脂基体的降解程度不同所致。结合图6所示0°层合板的破坏形貌,其破坏主要为基体降解和纤维断裂,并且伴有纤维拔出;600℃时,纤维发生全截面断裂。由于0°层合板的纤维全部沿拉伸方向铺设,即便火烧导致基体严重受损,纤维仍能在一定程度上保持其固有强度。

图4(b)和图5(b)分别为±45°层合板受火后的载荷-位移曲线和应力-应变曲线。不同温度条件下的试件曲线趋势类似,且表现出较强的非线性破坏行为。随着火烧温度的增加,应力和应变都大幅下降。因为树脂是火烧的主要热解对象,而±45°层合板的拉伸强度主要依赖于树脂和纤维/基体的黏结强度。其中,400℃和600℃下受火后的强度分别下降了63.0%、89.0%。结合图7的破坏形貌,其失效以基体开裂、层间分层、剪切破坏为主。±45°层合板在高温下基体逐渐降解,特别是600℃下基体几乎完全降解,纤维/基体界面脱粘。拉伸时,裂纹迅速扩展,导致层间剥离现象加剧,加速了剪切失效。

图8的破坏形貌显示,0°/90°层合板发生净截面断裂,破坏模式主要表现为纤维断裂和基体裂纹。

综上所述,CFRP层合板在火烧后力学性能的变化主要受纤维承载方向及失效模式影响。试件在受火烧影响后,尤其在600℃时,材料的树脂基体降解和界面脱粘会导致纤维的承载能力下降,此

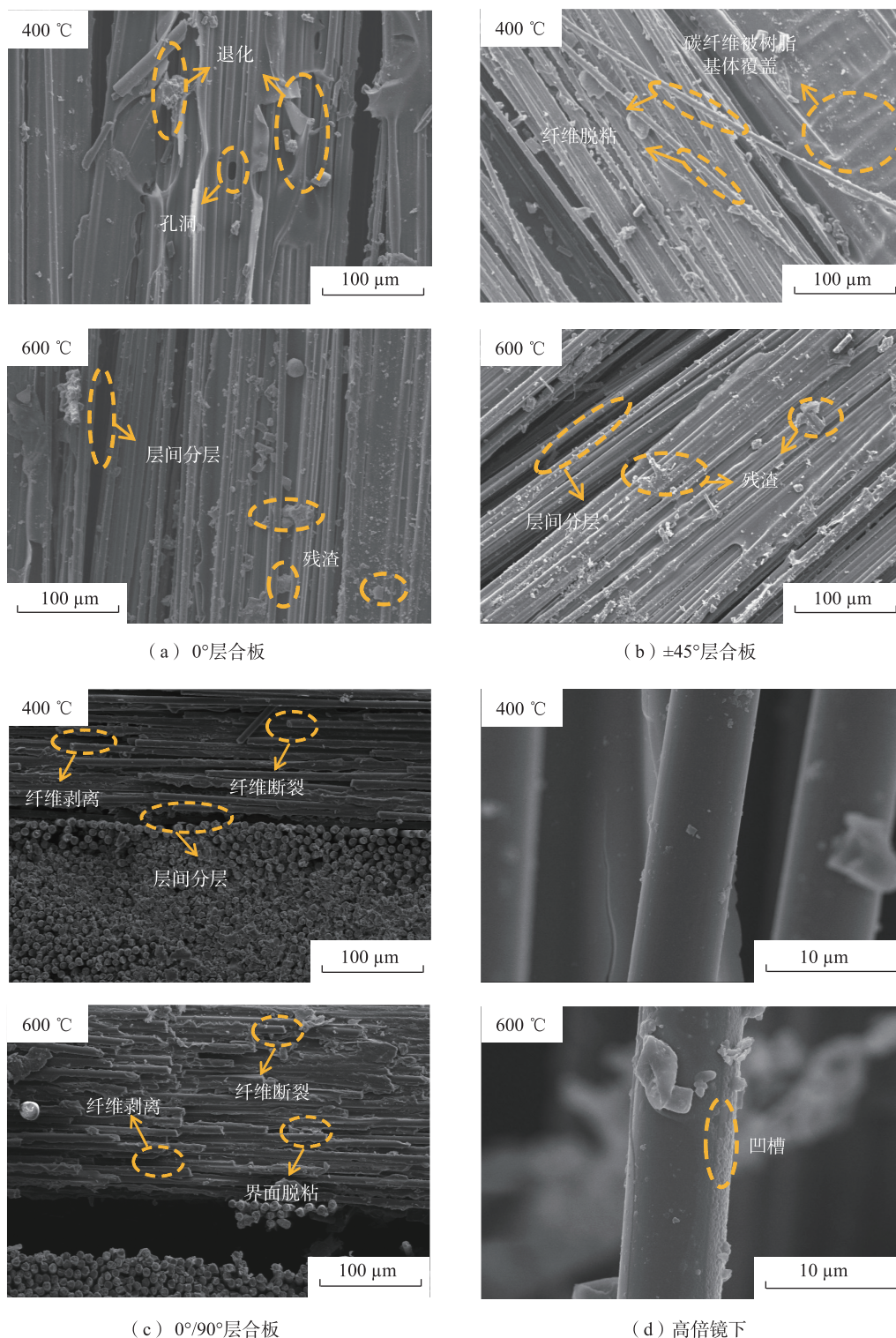
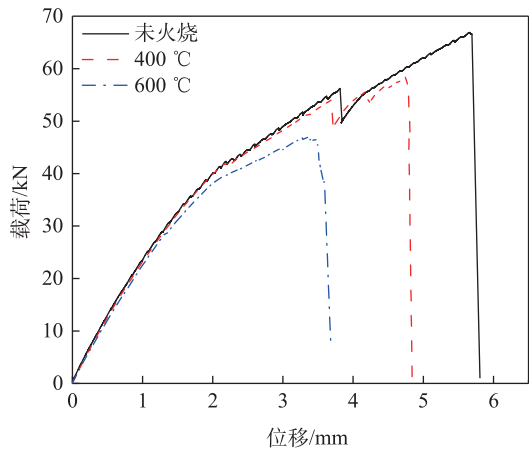


图3 碳纤维受火后SEM图

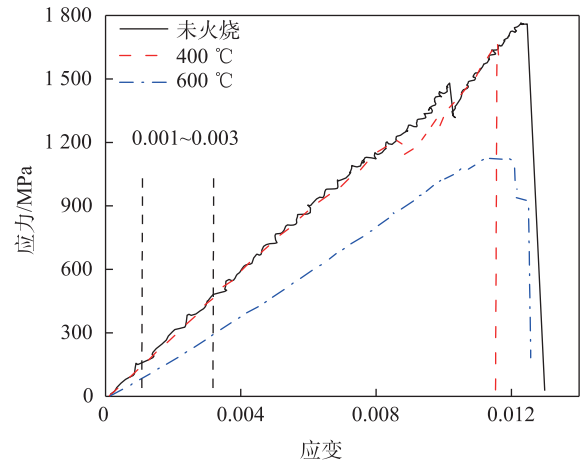
Fig. 3 SEM images of carbon fiber after exposure to fire

时其拉伸性能主要受纤维方向影响,最终导致不同层合板的断裂模式差异。此外,0°层合板和0°/90°

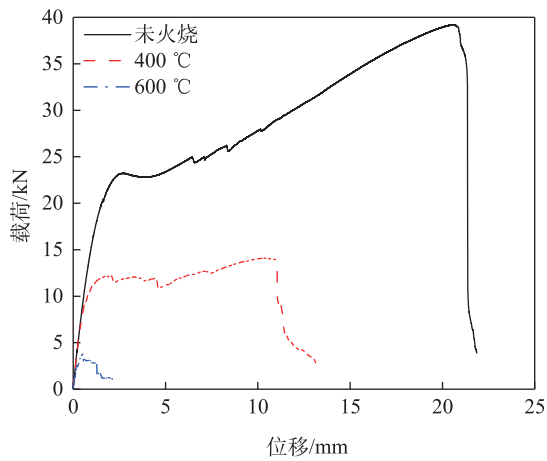
层合板在600 °C高温下表现出的“强度大幅下降而模量变化较小”的现象更为显著(其整体模量受0°



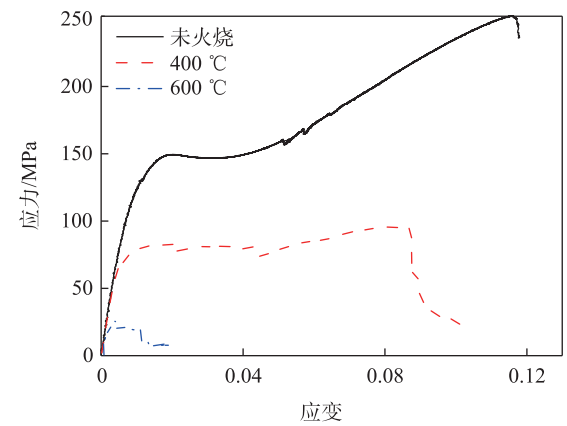
(a) 0°层合板



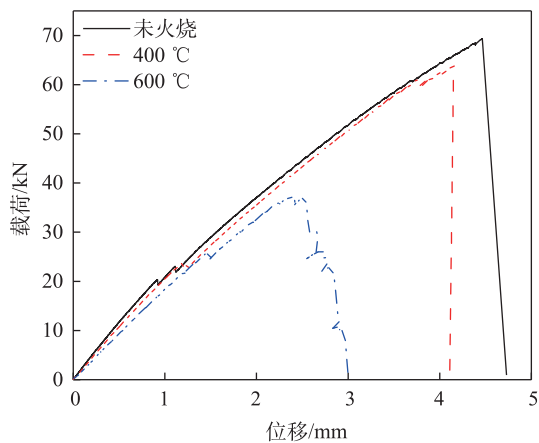
(a) 0°层合板



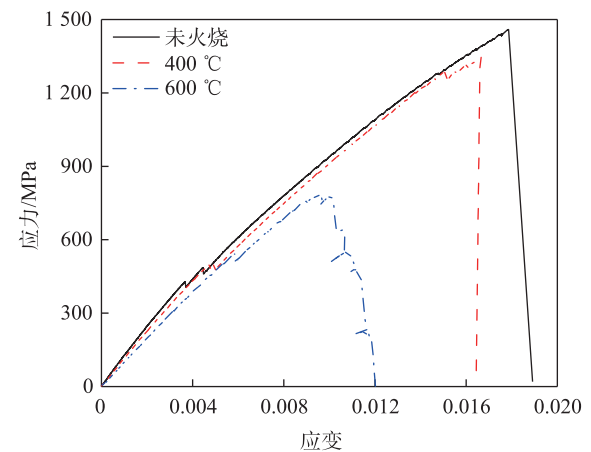
(b) ±45°层合板



(b) ±45°层合板



(c) 0°/90°层合板



(c) 0°/90°层合板

图4 不同层合板受火后拉伸载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve of different laminate under tensile tests

图5 不同层合板受火后拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of different laminate under tensile tests

纤维主导所致)。根据最新的复合材料力学理论,这一现象可解释为树脂基体的降解导致界面黏结强度

急剧减弱,使得材料的强度受到重大影响;而由于纤维的高热稳定性,整体模量的变化相对较小。

表4 拉伸性能对比
Tab.4 Comparison of tensile property

铺层类型	温度/℃	平均极限拉伸强度/MPa	拉伸强度退化率	拉伸模量退化率
0°	0	1 685.5	—	—
	400	1 546.4	8.3%	1.6%
	600	1 193.3	29.2%	6.7%
±45°	0	252.8	—	—
	400	93.5	63.0%	5.5%
	600	27.7	89.0%	72.4%
0°/90°	0	1 447.7	—	—
	400	1 337.3	7.6%	6.3%
	600	760.3	47.5%	14.6%

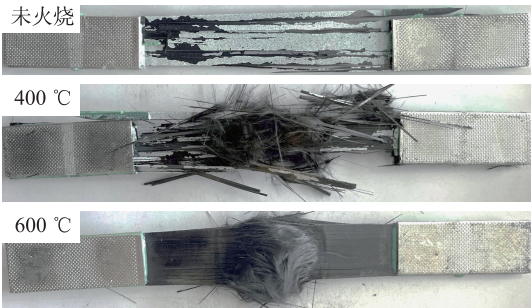


图6 0°层合板试件拉伸破坏形貌
Fig. 6 Tensile fracture morphology of 0° laminates

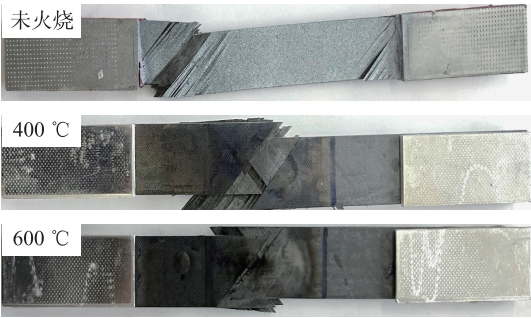


图7 ±45°层合板试件拉伸破坏形貌
Fig. 7 Tensile fracture morphology of ±45° laminates

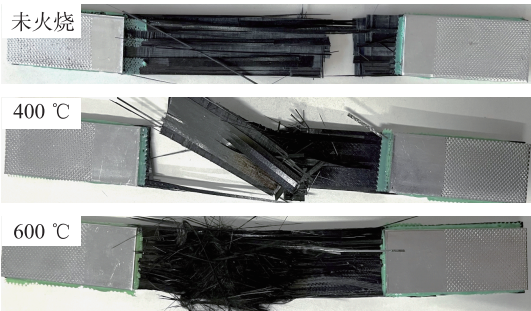


图8 0°/90°层合板试件拉伸破坏形貌
Fig. 8 Tensile fracture morphology of 0°/90° laminates

4 结论

1) 3种铺层的CFRP层合板在高温火烧时均发生了热解行为,600℃时更为严重,火损伤主要包括基体分解、纤维/基质界面脱粘和分层。

2) CFRP层合板火烧后的力学性能受铺层方式的影响。在3种铺层中,0°层合板的拉伸强度最高,0°/90°层合板其次,±45°层合板最低。0°层合板因纤维主导承载、对基体依赖较低,退化率最小,而±45°层合板由于依赖基体进行应力传递,火烧后力学性能下降最为严重。

3) 在失效模式中,0°层合板火烧后的失效模式发生了变化,除了未火烧时的纤维断裂外,还伴随了大量纤维拔出。对于0°/90°层合板,其主要损伤形式为净截面断裂,表现为纤维断裂和基体裂纹,火烧后在拉伸过程中可观察到部分纤维拔出;±45°层合板发生沿纤维方向的断裂,损伤模式主要包括层间剪切、分层和基体裂纹。在火烧后的拉伸过程中,断裂处的分层现象更加明显。

参考文献:

[1] LI A J, MAO Q Z, LI J K, et al. Review on methodologies of fatigue property prediction for carbon fiber reinforced polymer[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 284: 111659.

[2] 孙厚礼, 孙琳, 王晓波, 等. 碳纤维三维编织-铺层混合结构复合材料管的轴向压缩性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(8): 4084-4093.

SUN H L, SUN L, WANG X B, et al. Axial compressive property of carbon fiber 3D braided-unidirectional hybrid tubes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(8): 4084-4093.

[3] YAMAMOTO G, KOIZUMI K, NAKAMURA T, et al. Tensile-strength-controlling factors in unidirectional carbon fiber reinforced plastic composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2021, 140: 106140.

[4] YANG Z, JIANG R S, ZUO Y J. Riveting damage behavior and mechanical performance assessments of CFRP/CFRP single-lap gasket-riveted joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 149: 107253.

[5] CHEN C H, LIU W K, GAO Y X, et al. An imaging method for marine targets in corner reflector jamming scenario

- based on time-frequency analysis and modified clean technique[J]. Remote Sensing, 2025, 17(2): 310.
- [6] LONG G X, SUN Y M, SHANG Z Q, et al. Aerodynamic performance and wind-induced response of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) cables[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 8154.
- [7] 黄志刚, 林俊, 黄卫国, 等. CFRP布抗剪加固预加载RC梁的力学性能研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(3): 37-44.
- HUANG Z G, LIN J, HUANG W G, et al. Study on the mechanical properties of preloaded RC beams shear-strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(3): 37-44.
- [8] ZHAO W, LIAN C C, ZHANG W X, et al. Test and simulation of high temperature resistant polyamide composite with single lap single bolt connection[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 206: 112649.
- [9] BHAT A, BUDHOLIYA S, ARAVIND RAJ S, et al. Review on nanocomposites based on aerospace applications [J]. Nanotechnology Reviews, 2021, 10(1): 237-253.
- [10] LIZCANO M, WILLIAMS T S, SHIN E E, et al. Aerospace environmental challenges for electrical insulation and recent developments for electrified aircraft[J]. Materials, 2022, 15(22): 8121.
- [11] MORITA N, MINO Y, YOSHIKAWA N, et al. Versatile fatigue strength evaluation of unidirectional CFRP specimen based on micro-stress analysis of resin[J]. Composite Structures, 2021, 276: 114539.
- [12] 王雅娜, 任素娥, 张琴, 等. 2.5D机织复合材料经向和纬向振动疲劳行为对比[J]. 复合材料学报, 2023, 40(1): 109-118.
- WANG Y N, REN S E, ZHANG Q, et al. Comparison of vibration fatigue behaviors of 2.5D woven composites in warp and weft directions[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(1): 109-118.
- [13] ZHANG H, SUN J, RUI X B, et al. Delamination damage imaging method of CFRP composite laminate plates based on the sensitive guided wave mode[J]. Composite Structures, 2023, 306: 116571.
- [14] HAN X, YE J R, XU J, et al. A fully-coupled damage modelling of hygrothermally aged CFRP open-hole laminate under quasi-static tensile loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2025, 313: 110653.
- [15] ZHANG Y F, ZHOU Z G, PAN S D, et al. Comparison of failure modes and damage mechanisms of CFRP and C/C composite joints under out-of-plane loading[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(4): 623-632.
- [16] KOBAYASHI Y, MATSUMOTO K, MATSUKAWA N, et al. Opposed-flow flame spread over carbon fiber reinforced plastic with different carbon fiber orientations[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2023, 39(3): 3899-3907.
- [17] WANG Y, HU J Y. Performance of laminated glazing under fire conditions[J]. Composite Structures, 2019, 223: 110903.
- [18] KARTHICK P, VIJAYA RAMNATH B M, PALANIKUMAR K. Investigation of the mechanical behavior of acacia: raffia natural fiber composite[J]. Polymers, 2023, 15 (15): 3249.
- [19] QUADE D, JANA S, MORSCHER G, et al. The effects of fiber orientation and adhesives on tensile properties of carbon fiber reinforced polymer matrix composite with embedded nickel-titanium shape memory alloys[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 114: 269-277.



通信作者:雷祖祥(1986—),男,教授,博士,博士生导师,德国洪堡学者,江西省双千计划人才,研究方向为岩土工程及复合材料。E-mail:zxlei@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:熊玲玲)