研究论文|Research Article
热带海岛工程|Tropical Island Engineering

Open Access

引用格式:李昆锦, 陈天宇, 赵菲, 等. 热带海洋环境下 GFRP 纤维−树脂界面早期性能研究 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(4): 364−372.

Citation: Li Kunjin, Chen Tianyu, Zhao Fei, et al. Characterization of early-stage performance of fiber-resin interface in GFRP exposed to tropical ocean environment[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(4): 364−372.

热带海洋环境下 GFRP 纤维−树脂界面早期性能研究

李昆锦[1,2], 陈天宇[1,2], 赵　菲[1,2]✉, 王　立[1,2], 周　智[1,2]✉

(1. 热带海洋工程材料及评价全国重点实验室, 海南 海口 570228;
2. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228)

摘　要: 针对热带海洋环境下 GFRP 早期服役性能演化规律不明晰的问题, 开展了原位暴露(大气、潮汐、浸泡)与加速老化(紫外、盐雾、紫外+盐雾耦合、紫外+凝露循环)相对应的对比研究。通过宏观力学测试与微观表征手段, 揭示了不同环境下纤维−树脂界面粘结性能的退化规律及劣化机理。研究结果表明: GFRP 筋在含紫外辐射影响的环境下, 层间剪切强度均呈现先升后降的变化规律; GFRP 筋的层间剪切强度受紫外+盐雾耦合环境的影响最显著, 紫外+盐雾 40 d 试件强度下降 18.19%; 通过 FTIR 与 SEM 分析验证了树脂基体在后固化、水解和分子链断裂等协同作用下, 纤维−树脂界面由致密状态逐渐转变为粗糙并伴随脱粘的结构特征。

关键词: GFRP 筋; 热带海洋环境; 层间剪切强度; 微观结构; 性能演化

中图分类号: TB332　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004-1729(2026)04-0364-09

DOI: 10.65658/j.hndk.2026021301　　CSTR: 32403.14.hndk.2026021301

Characterization of early-stage performance of fiber-resin interface in GFRP exposed to tropical ocean environment

Li Kunjin[1,2], Chen Tianyu[1,2], Zhao Fei[1,2]✉, Wang Li[1,2], Zhou Zhi[1,2]✉

(1. State Key Laboratory of Tropical Ocean Engineering Materials and Materials Evaluation, Haikou 570228, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The early-stage service performance evolution of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars in tropical marine environments remains insufficiently understood. To address this, a comparative study was conducted using in-situ exposure tests (atmospheric, tidal, and seawater immersion) alongside accelerated aging tests (ultraviolet radiation, salt spray exposure, UV+salt spray coupling, and UV+condensation cycling). Macroscopic mechanical testing combined with microstructural characterization was employed to reveal the degradation behavior and deterioration mechanisms of the fiber-resin interfacial bonding under various environmental conditions. The results indicate that in environments involving UV radiation, the interlaminar shear strength (ILSS) of GFRP bars initially increase and then decrease. The UV+salt spray coupled environment has the most pronounced effect on ILSS, leading to an 18.19% reduction after 40 days of exposure. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and

Received: 2026−02−13; **Revised:** 2026−02−28; **Accepted:** 2026−02−28.
✉ **Corresponding author(s):** Zhao Fei, E-mail: zfhw2006@163.com; Zhou Zhi, E-mail: zhizhou@hainanu.edu.cn.

Scanning Electron Microscope (SEM) analyses verify that, due to the synergistic effects of post-curing, hydrolysis, and molecular chain scission of the resin matrix, the fiber-resin interface gradually transitions from a dense state to a rough structure accompanied by debonding.

Keywords: GFRP bars; tropical ocean environment; interlaminar shear strength; microstructure; performance evolution

0 引 言

随着海洋工程与沿海基础设施建设的持续推进,结构材料在高温、高湿、高盐及强紫外等严苛热带海洋环境中长期耐久性问题日益突出。在典型热带海洋环境中,海水海砂混凝土因其属地化优势而具有广阔应用前景,但其高氯离子 Cl^-含量易引发传统钢筋严重锈蚀,从而降低结构的服役寿命。纤维增强聚合物(fiber reinforced polymer, FRP)筋因其质量轻、比强度高及优异的耐 Cl^-腐蚀性能,被认为是替代钢筋、提升海洋环境下结构耐久性的有效途径之一[1]。然而,在原位暴露服役条件下,FRP 筋长期承受多因素环境耦合作用,其基本力学性能演化规律及长期性能仍有待系统研究。FRP 筋及相关 FRP 构件已广泛应用于海洋工程结构中,如拉挤型材[2]、拉索体系[3]、外部加固构件[4] 和维护结构[5] 等。在典型热带海洋环境下,FRP 材料及其组成构件长期处于高湿度、盐雾沉积、高温及紫外辐射等复杂耦合环境作用,其长期力学性能稳定性成为影响结构安全与服役寿命的重要因素[6]。

已有研究普遍认为,原位暴露环境下 FRP 材料的长期性能劣化主要受树脂基体水解及纤维–树脂界面脱黏影响,而非纤维本体的化学破坏,其中水分侵入引起的树脂塑化、界面弱化及玻璃化转变温度变化被认为是主导机理之一[7]。de Almeida Santos da Silva 等[8] 在盐雾湿热加速老化条件下研究了 GFRP–环氧体系的吸湿行为与结构演化规律,结果表明盐雾环境主要通过促进水分滞留和扩散而加速 FRP 性能劣化。此外,紫外辐射会引发环氧或乙烯基类树脂的光氧化反应,导致分子链断裂及表层微裂纹产生[9]。Ci 等[10] 对环氧树脂及其拉挤复合材料开展紫外辐射老化研究发现,紫外辐射暴露条件下,树脂重量和硬度呈现先增加后降低的变化趋势,老化 2 500 h 后复合材料弯曲强度和冲击强度分别下降了 6.0% 和 12.8%。现有 FRP 材料耐久性的研究多集中于单一环境因素作用下的性能演化,例如湿热环境、盐雾环境及紫外辐射环境,针对多环境耦合作用的研究仍相对有限。有研究表明,多环境耦合作用通过加速水分扩散、强化界面损伤或改变树脂后固化行为,从而引发更加复杂甚至非单调的力学性能退化特征[11]。此外,现有研究在试验时间设置上普遍采用较大的时间间隔,例如 1、3、6、12 个月或更长[12],这使得 FRP 材料在服役早期阶段的性能退化特征往往被简化为“初始—稳定—长期”的粗略趋势,而数天至数十天尺度内可能发生的快速退化或性能重排过程缺乏清晰刻画。无论是在湿热环境、盐雾环境抑或原位暴露环境下,FRP 材料及其胶黏或界面体系均可能在加速老化(或原位暴露)初期经历显著的性能变化,该阶段既可能由水分塑化和界面弱化主导[13],也可能伴随后固化效应的作用,从而导致 FRP 材料力学性能呈现非单调演化特征。但由于试验初期取样点稀疏,这一早期退化阶段的规律尚未得到系统分析。

综上所述,本文以环氧树脂基玻璃纤维增强聚合物(glass fiber reinforced polymer, GFRP)筋为研究对象,开展热带海洋大气环境、热带海洋潮汐环境、热带海洋浸泡环境、紫外环境、盐雾环境、紫外+盐雾耦合环境、紫外+凝露循环环境 7 种典型环境下 GFRP 筋的层间剪切性能退化试验,探明原位暴露环境及加速老化环境作用下 GFRP 筋层间剪切性能在服役初期的退化规律,并结合傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)和扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)等微观分析手段,揭示不同环境作用下层间剪切性能的劣化机理。弥补现有研究在 GFRP 材料早期性能退化及多环境耦合作用方面的不足,为后续长期原位暴露试验提供理论基础及数据依据。

1 试验设计

1.1 试验材料 试验采用公称直径为 12.00 mm 的 GFRP 筋,由智性科技南通有限公司提供。GFRP 筋采

用拉挤工艺制备,表面设有横肋结构,肋间距为12.00 mm,肋深为0.72 mm。材料纤维体积分数为65%。通过排水法测得试样平均直径为11.17 mm,GFRP筋的基本力学性能如表1所示。

表1 材料基本力学性能

筋材	公称直径/mm	实测直径/mm	弹性模量/GPa	层间剪切强度/MPa
GFRP筋	12.00	11.17	37.63	37.39

1.2 试验环境 对于腐蚀问题,不仅需要考虑单一因素影响,还需结合实际服役过程中各因素的耦合作用。基于此,如表2所示设计2类7种试验环境,3种原位暴露环境,4种加速老化环境。原位暴露试验场地位于海南大学暴露实验站(110.3° E, 20° N)。紫外环境参考文献[14]进行设置,老化时长根据中国南海某岛礁日均照射时长进行设计。盐雾环境参考文献[15]进行设计。

表2 原位暴露环境和加速老化环境设计

环境		老化工况	腐蚀特点	龄期数
原位暴露环境	大气环境	湿热老化、紫外辐射	盐雾沉积、温湿度变化、紫外辐射	13
	潮汐环境	干湿交替、紫外辐射	含盐量大、潮汐作用	13
	浸泡环境	浸水及离子侵蚀	含盐量、温度变化、弱碱性	13
加速老化环境	紫外环境	60 ℃紫外辐射(0.76 W·(m²·nm)⁻¹)	模拟潮汐区作用	13
	盐雾环境	35 ℃中性盐雾腐蚀环境	模拟浸泡区作用	13
	紫外+盐雾耦合环境	紫外辐射8 h后盐雾16 h	模拟最高强度加速环境	13
	紫外+凝露循环环境	紫外辐射8 h后凝露16 h	模拟大气区作用	13

注:原位环境1~7 d阶段每2 d取样一次,随后10~30 d阶段每5 d取样一次,30~75 d阶段每15 d取样一次;加速环境1~7 d阶段取样龄期为1、2、4、5和6 d,随后10~30 d阶段每5 d取样一次,30~50 d阶段每10 d取样一次。所有环境的8 d和9 d龄期均未取样。

1.3 力学性能试验 FRP筋力学性能评价指标方面,相较于拉伸或弯曲性能,层间剪切性能(interlaminar shear strength, ILSS)对树脂基体及纤维−树脂界面劣化更为敏感,被认为是评估直接暴露FRP材料环境耐久性的重要指标之一[16−17]。试件达到设定老化龄期后参考文献[18],进行层间剪切试验。采用100 kN万能试验机进行加载。试样长度取5倍直径,加载跨度为4倍直径,加载速率为1.3 mm·min^{-1}。取每组5个试样的平均值作为结果,层间剪切强度:

$$S_H = \frac{0.849P}{d^2} \tag{1}$$

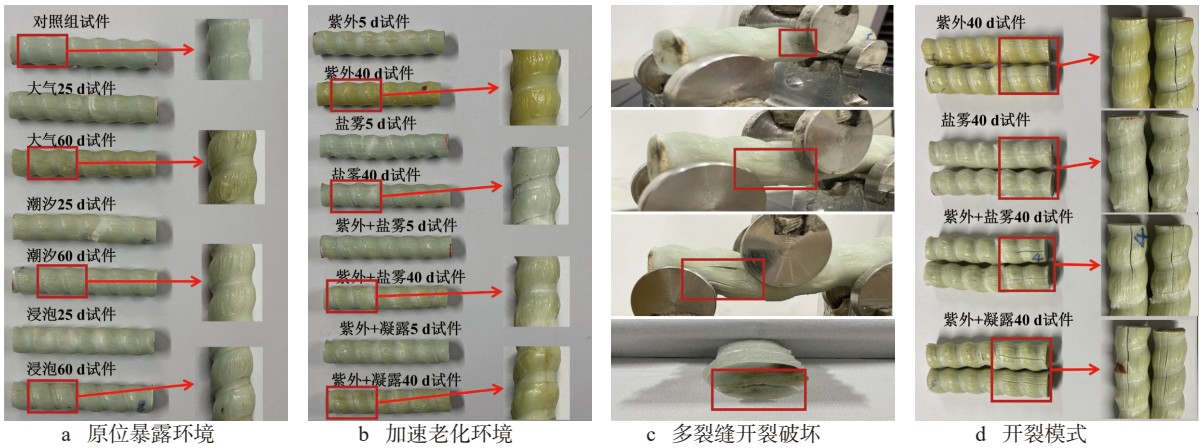
其中,P为弹性阶段峰值荷载,N;d为试件实测直径,mm。

1.4 傅里叶变换红外光谱 为研究不同环境作用下GFRP筋环氧树脂基体的降解机制,采用FTIR光谱仪(Thermo Scientific iS5)进行分析。测试方式为衰减全反射(attenuated total reflection, ATR)模式,扫描波数范围为400~4 000 cm^{-1},分辨率为4 cm^{-1},每个样品累计扫描64次取平均值。

1.5 扫描电子显微镜 使用热场发射扫描电镜(JSM−IT800)表征GFRP筋在不同环境老化前后纤维−树脂界面微观形态损伤情况。测试试样取自层间剪切试验后产生裂纹的筋材表面区域,受老化环境作用最显著部分。

2 结果与讨论

2.1 GFRP筋表观形貌与破坏模式 原位暴露环境及加速老化环境下GFRP筋的表面形貌特征如图1a和图1b所示。由图1a可知,大气环境和潮汐环境下的试件表面光泽度呈不同程度的下降;浸泡环境下,试样表面肋部出现凸起、肋间界限加深的现象,可能与GFRP筋吸水膨胀性有关[19]。由图1b可知,紫外环境下的试件表面颜色变化最明显,盐雾环境下的试件表面颜色几乎无变化,紫外+凝露循环环境和紫外+盐雾耦合环境下的试件表面颜色变化介于前两种试件之间。此外,大气60 d试件表面可观察到较明显的局部树脂脱落现象,潮汐60 d试件表面也有轻微树脂脱落现象,而其他环境下的试件未见树脂脱落现象。

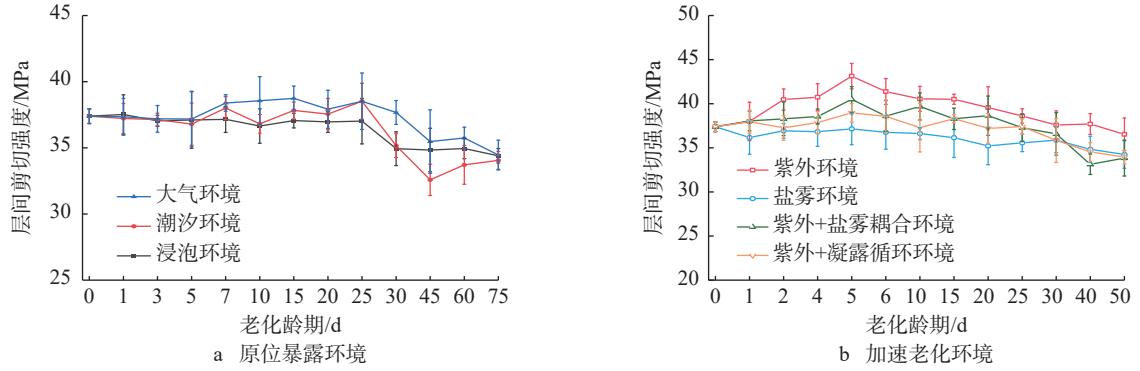


a 原位暴露环境　b 加速老化环境　c 多裂缝开裂破坏　d 开裂模式

图 1　GFRP 筋表观形貌与破坏模式

由图 1c 的加载现象可知，随着荷载逐渐增加，首先在加载点处横截面中性轴附近发生局部层间开裂，随后裂缝由加载点向支座方向扩展，直至裂缝贯穿试件截面，紧接着承载力骤降并发生整体破坏。从图 1d 可以看出，含紫外辐射作用的试样表面裂缝更为明显且尺度较大，而盐雾环境下裂缝特征表现较弱。

2.2　GFRP 筋的层间剪切强度退化规律分析　不同环境下不同龄期的 GFRP 筋层间剪切强度如图 2 所示。7 种环境作用下层间剪切强度变化存在差异，其变化规律并非均为单调下降，而是呈现出一定的阶段性波动特征，反映出不同环境对树脂基体及纤维和树脂的界面粘结作用不同。但原位暴露环境下强度变化规律与加速老化环境下强度变化规律总体趋势一致。



a 原位暴露环境　b 加速老化环境

图 2　不同环境下试件的层间剪切强度

由图 2a 可知，大气环境和潮汐环境中，试件强度随老化时间增加而先升后降。大气 25 d 试件强度为 38.50 MPa，经计算较对照组（强度 37.39 MPa）试件提升 2.97%，60 d 试件强度为 35.75 MPa，经计算较 25 d 试件强度下降 7.14%。潮汐 25 d 试件强度为 38.52 MPa，经计算较对照组试件强度提升 3.02%，60 d 试件强度为 33.71 MPa，经计算较 25 d 试件强度下降 12.49%。浸泡 25 d 试件强度为 37.02 MPa，经计算较对照组试件强度下降 0.99%，60 d 试件强度为 34.95 MPa，经计算较对照组试件强度下降 6.53%。整体来看，浸泡环境下试件强度随老化时间增加而下降，与现有关于海水浸泡对 FRP 筋强度影响的研究结论一致，长期水分侵入不仅会持续削弱纤维和树脂界面的粘结性能，而且导致树脂基体水解[20]。

由图 2b 可知，紫外环境下，试件层间剪切强度随老化时间先升后降，5 d 试件强度为 43.13 MPa，经计算较对照组（强度 37.39 MPa）试件提升 15.35%，40 d 试件强度为 37.70 MPa，经计算较 5 d 试件强度下降 12.59%。盐雾环境下，5 d 试件强度为 37.15 MPa，经计算较对照组试件强度降低 0.64%，40 d 试件强度为 34.83 MPa，经计算较对照组试件强度下降 6.86%。紫外+盐雾耦合环境下，5 d 试件强度为 40.50 MPa，经计算较对照组试件强度提升 8.32%，40 d 试件强度为 33.13 MPa，经计算较 5 d 试件强度下降 18.19%。紫外+凝露循环环境下，5 d 试件强度为 38.97 MPa，经计算较对照组试件强度提升 4.23%，40 d 试件强度为

34.54 MPa, 经计算较 5 d 试件强度下降 11.38%。由数据分析结果可知, 紫外+盐雾耦合环境下的试件相较于单一环境下的试件, 5 d 试件强度提升幅度更小, 主要与紫外环境后固化作用和盐雾环境水解作用之间的竞争关系有关, 40 d 试件强度下降幅度更大, 则是因为紫外环境和盐雾环境之间的协同劣化作用。

由大气环境和潮汐环境下试件强度先升后降的规律可知, 大气环境下 GFRP 筋的劣化行为主要受到紫外辐射及早晚凝露作用的共同影响; 潮汐环境中, 水面对紫外辐射的反射及多路径散射作用, 可能进一步增加了 GFRP 筋实际承受的有效紫外辐射剂量, 从而使潮汐环境下 25 d 试件强度提升幅度和 60 d 试件强度下降幅度均为 3 种原位环境中最大。而浸泡环境中 GFRP 筋主要受水分与盐分长期作用, 其强度退化规律与盐雾环境相似。

2.3 GFRP 筋 FTIR 分析 GFRP 筋 FTIR 测试结果如图 3 所示。各特征吸收峰强度随环境类型变化与暴露时间增加而变化, 反映出树脂基体在不同环境下存在后固化、脱水和水解等多种作用的协同影响[21], FTIR 特征峰强度变化规律与层间剪切强度变化趋势具有良好相关性。3 358 cm^{-1} 附近的宽峰主要对应 N—H 的伸缩振动吸收峰[22−23] 与 O—H 的伸缩振动吸收峰[24] 的叠加峰, 是表征环氧树脂固化程度与水解行为的重要特征峰。2 921 cm^{-1} 附近的宽峰主要对应 C—H 伸缩振动吸收峰[25−26], 是树脂基体分子链断裂的直接表征。

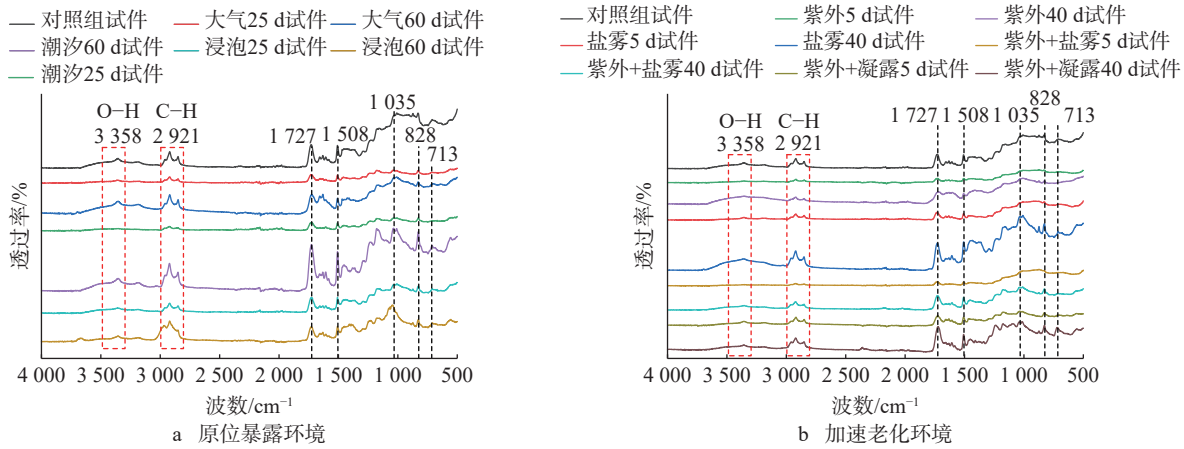


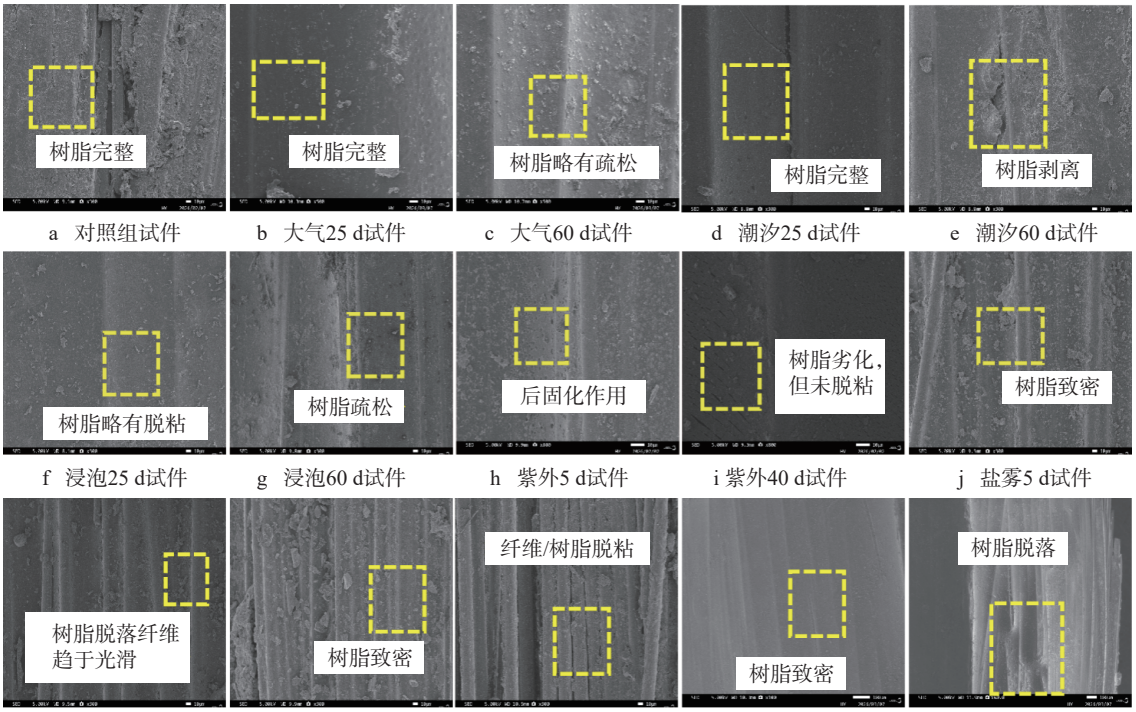
图 3 FTIR 分析图谱

与对照组试件相比, 大气 25 d 试件各吸收峰明显减弱, 表现出明显的后固化与脱水特征。与大气 25 d 试件相比, 大气 60 d 试件 3 358 cm^{-1} 和 2 921 cm^{-1} 对应的吸收峰增强, 表明树脂吸水及水解断链反应增强, 对应 GFRP 筋的层间剪切强度大幅降低。潮汐环境下试件的吸收峰强度变化规律与大气环境下试件的吸收峰强度变化规律较为一致, 也表现为潮汐 25 d 试件各吸收峰减弱, 但潮汐 60 d 试件 3 358 cm^{-1} 和 2 921 cm^{-1} 对应的吸收峰增强。与浸泡 25 d 试件相比, 浸泡 60 d 试件 2 921 cm^{-1} 对应的吸收峰增强, 说明浸泡 60 d 试件比浸泡 25 d 试件劣化程度更大。

与对照组试件相比, 紫外 5 d 试件各吸收峰明显减弱, 表明紫外环境初期对树脂基体具有促进后固化作用。紫外辐射及其热效应可激活未充分反应的环氧基与胺基, 促进交联反应, 消耗体系中的—NH 官能团, 表现为 3 358 cm^{-1} 对应吸收峰减弱甚至消失, 故而层间剪切强度升高; 同时脱水过程中羟基与烷基发生脱氢缩合协同脱水, 表现为 2 921 cm^{-1} 附近的吸收峰强度降低。与盐雾 5 d 试件相比, 盐雾 40 d 试件在 3 358 cm^{-1} 附近的吸收峰明显增强, 表明树脂基体中羟基含量增加。高湿和 Cl^- 侵蚀作用加速水分扩散, 使酯基和醚基等官能团发生水解反应, 生成大量羟基和羧基等亲水基团, 并破坏交联网络结构, 从而导致材料力学性能逐步劣化。在紫外+盐雾耦合环境中 FTIR 谱图呈现阶段性特征, 5 d 时 3 358 cm^{-1} 和 2 921 cm^{-1} 对应的吸收峰均趋于消失, 表明早期以后固化与脱水为主; 40 d 后 2 个吸收峰增强, 说明水解反应逐渐占主导作用。同样情况也可以在紫外+凝露循环环境中 FTIR 谱图看到, 5 d 时 3 358 cm^{-1} 和 2 921 cm^{-1} 对应的吸收峰均趋于消失, 40 d 后 2 个吸收峰增强。吸收峰先减弱后增强的变化规律可以解释层间剪切强度先升后降的变化规律。

综上所述，在含紫外辐射影响的环境中，试件早期以固化与脱水为主，强度短期提升；在盐雾环境和浸泡环境中，树脂水解与分子链断裂过程始终占据主导地位，表现为 O—H 和 C—H 对应的吸收峰增强，力学性能衰减。3 358 cm^{-1} 与 2 921 cm^{-1} 对应的吸收峰的变化规律从微观结构层面揭示了 GFRP 筋层间剪切强度退化机理。基于试验结果，本文将暴露初期前 25 d 界定为 GFRP 筋的早期服役阶段，用以表征其由初始状态向劣化阶段过渡的关键时期。

2.4 GFRP 筋 SEM 分析 不同环境下，GFRP 筋表面微观结构呈现出不同差异，其演化规律与层间剪切强度变化趋势具有良好对应关系，如图 4 所示。



a 对照组试件 b 大气25 d试件 c 大气60 d试件 d 潮汐25 d试件 e 潮汐60 d试件

f 浸泡25 d试件 g 浸泡60 d试件 h 紫外5 d试件 i 紫外40 d试件 j 盐雾5 d试件

k 盐雾40 d试件 l 紫外+盐雾5 d试件 m 紫外+盐雾40 d试件 n 紫外+凝露5 d试件 o 紫外+凝露40 d试件

图 4 不同环境下 GFRP 筋表面微观形貌及主要特征

图 4a 显示对照组试件的纤维覆盖有大量树脂，整体结构致密，表明初始状态下纤维−基体界面结合良好。

由图 4b 和图 4c 可知，大气 25 d 试件表面树脂完整，大气 60 d 试件表面树脂略微疏松。

由图 4d 和图 4e 可知，在潮汐 25 d 试件表面仍保持一定致密性，仅出现由干湿交替引起的轻微表面粗糙化现象；当暴露时间延长至 60 d 后，试件表面可观察到树脂剥离现象，表明周期性干湿交替加剧了吸水、水解及分子链断裂过程，导致结构稳定性下降[27]。

由图 4f 和图 4g 可知，浸泡 25 d 试件表面树脂与纤维略微脱粘，浸泡 60 d 试件树脂基体被侵蚀，表现为树脂粗糙，纤维间树脂疏松。高湿及 Cl^- 侵蚀环境加速水分向材料内部扩散，促进树脂水解反应，破坏交联网络结构，导致致密结构变得疏松[28]。

由图 4h 可知，紫外 5 d 试件表面更致密平整，仅观察到轻微浅表侵蚀特征。紫外环境早期以固化与脱水作用为主导，树脂基体交联程度提高、结构趋于致密，与层间剪切强度在该阶段出现提升的规律一致。由图 4i 可知，树脂表面劣化程度随着紫外辐射时间延长至 40 d 时较明显，局部区域出现裂纹，但尚未出现纤维−基体界面脱粘现象，表明此时以氧化作用分子链断裂为主导，与层间剪切强度下降规律一致。

由图 4j 和图 4k 可知，盐雾 5 d 试件表面树脂与纤维略微脱粘，未见树脂疏松；盐雾 40 d 试件纤维表面树脂被侵蚀，纤维趋向光滑。高湿及 Cl^- 侵蚀环境加速水分扩散，促进树脂水解脱落，该现象也在相关研究中被观察到。

由图 4l 和图 4m 可知，紫外+盐雾 5 d 试件表面树脂和纤维结合良好，仍附着较多树脂；紫外+盐雾耦

合40 d试件的树脂基体与纤维界面劣化脱粘,纤维表面覆盖树脂减少。

由图4n和图4o可以看出,紫外+凝露5 d试件表面树脂致密,紫外+凝露40 d试件表面树脂脱落,纤维趋于光滑。

综合SEM结果发现,不同环境下GFRP筋表面微观损伤模式不同。含紫外辐射影响的环境对试件的作用,早期以固化与脱水作用为主,使试件表面结构趋于致密,对应力学性能阶段提升。随龄期延长,氧化降解和水解反应逐渐占主导作用,强度逐渐下降。在劣化过程中,紫外辐射引起的分子链断裂与水分引起树脂水解存在协同作用,表现为强度大幅降低。而在盐雾环境和浸泡环境中,树脂水解与分子链断裂过程始终占据主导地位,表面损伤持续累积。SEM结果从微观形貌层面印证了FTIR分析中,不同环境存在后固化、脱水、水解等多种作用的协同影响。

3 结 论

本文基于原位暴露环境和加速老化环境条件下GFRP筋层间剪切性能的试验结果,对7种环境下GFRP筋的界面劣化行为进行了分析,结论如下:

(1)GFRP筋在含紫外辐射的原位暴露及加速老化环境下,层间剪切强度均呈现先升后降的非单调变化规律。如大气环境下25 d试件强度较对照组试件强度提升2.97%,60 d试件强度较25 d试件强度下降7.14%;紫外环境下5 d试件强度较对照组试件强度提升15.35%,40 d试件强度较5 d试件强度下降12.59%。

(2)紫外+盐雾耦合环境存在显著的竞争与协同机制。在强度提升阶段,紫外+盐雾5 d试件强度较对照组提升8.31%,紫外5 d试件强度较对照组提升15.35%,紫外+盐雾5 d试件强度提升幅度明显小于紫外5 d试件强度,表明盐雾的水解作用削弱了紫外的后固化作用。在强度下降阶段,紫外+盐雾40 d试件强度较紫外+盐雾5 d试件强度降低18.19%,盐雾40 d试件强度较对照组降低6.86%,紫外+盐雾40 d试件强度降低幅度明显大于盐雾40 d试件强度,说明紫外氧化与水解作用之间存在协同劣化作用。

(3)不同暴露环境下GFRP筋的微观损伤特征与层间剪切强度的变化规律具有良好相关性。盐雾5 d试件与浸泡25 d试件、紫外5 d试件与潮汐25 d试件在FTIR特征峰强度变化规律上相关性较高;盐雾40 d试件与浸泡60 d试件在C—H吸收峰强度上接近,表明水解劣化程度较相似。SEM结果进一步表明,强度提升阶段树脂与纤维结合致密,强度下降阶段则出现树脂粗糙化及树脂–纤维脱粘现象。

参考文献:

[1] 吴智深, 刘加平, 邹德辉, 等. 海洋桥梁工程轻质、高强、耐久性结构材料现状及发展趋势研究 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 31−40.
Wu Z S, Liu J P, Zou D H, et al. Status quo and development trend of light-weight, high-strength, and durable structural materials applied in marine bridge engineering[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(3): 31−40.

[2] Bazli M, Ashrafi H, Oskouei A V. Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 99: 203−215.

[3] Yang Y Q, Wang X, Wu Z S. Damping behavior of hybrid fiber-reinforced polymer cable with self-damping for long-span bridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(7): 05017005.

[4] Wang X, Shi J Z, Wu G, et al. Effectiveness of basalt FRP tendons for strengthening of RC beams through the external prestressing technique[J]. Engineering Structures, 2015, 101: 34−44.

[5] 刘长源. 预应力BFRP板外贴加固RC梁抗弯性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
Liu C Y. Study on the bending performance of steel reinforced concrete beams strengthened by prestressed and externally bonded BFRP plates[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.

[6] 陈阳, 胡翔, 吴泽媚, 等. 海洋环境下FRP增强混凝土构件结构劣化和性能退化的研究综述 [J]. 材料导报, 2023, 37(18): 21120052.
Chen Y, Hu X, Wu Z M, et al. Review on the deterioration of FRP reinforced concrete structures subjected to marine

environment[J]. Materials Reports, 2023, 37(18): 21120052.
[7] Sousa J M, Correia J R, Gonilha J, et al. Durability of adhesively bonded joints between pultruded GFRP adherends under hygrothermal and natural ageing[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 158: 475−488.
[8] De Almeida Santos Da Silva G, D'Almeida J R M, Cardoso D C T. Investigation on moisture absorption behavior on GFRP and neat epoxy systems in hygrothermal salt fog aging[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 272: 111214.
[9] Naveen R, Kumar M, Ramesh M, et al. An investigation on effect of ultraviolet (UV) rays on mechanical properties of epoxy laminates[J/OL]. Materials Today: Proceedings, 2023.[2026-01-10].DOI:10.1016/j.matpr.2023.06.257.
[10] Ci S Z, Wang B M, Di C R, et al. Effect of ultraviolet aging on properties of epoxy resin and its pultruded fiber-reinforced composite[J]. Polymers, 2025, 17(3): 294.
[11] Huang S L, Yan L B, Kasal B, et al. Moisture diffusion and tensile properties of epoxy-based and polyurethane-based flax-glass hybrid FRP under hygrothermal and weathering environments[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 267: 111049.
[12] Al-Salloum Y A, El-Gamal S, Almusallam T H, et al. Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 45(1): 835−844.
[13] Raman R K S, Guo F Y, Al-Saadi S, et al. Understanding fibre-matrix degradation of FRP composites for advanced civil engineering applications: an overview[J]. Corrosion and Materials Degradation, 2020, 1(1): 27−41.
[14] GB/T 16422.3—2022 塑料 实验室光源暴露试验方法 第 3 部分: 荧光紫外灯 [S].
GB/T 16422.3—2022 Plastics: methods of exposure to laboratory light sources: Part 3: fluorescent UV lamps[S].
[15] GB/T 10125—2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验 [S].
GB/T 10125—2021 Corrosion tests in artificial atmospheres: salt spray tests[S].
[16] Sakuraba H, Manalo A, Alajarmeh O, et al. Durability assessment of GFRP bars in concrete exposed to field environment based on interlaminar shear strength[J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 22: e04599.
[17] Jiang Z, Zhang B, Zhao C Y, et al. Long-term shear performance of prestressed GFRP bars in accelerated seawater aging: role of alkalinity reduction in concrete matrix[J]. Construction and Building Materials, 2025, 463: 140039.
[18] ASTM D4475—21 Standard test method for apparent horizontal shear strength of pultruded reinforced plastic rods by the short-beam method[S].
[19] 高婧, 刘雨薇, 徐鹏海, 等. 海水浸泡 CFRP 筋性能退化试验及其退化机理 [J]. 材料导报, 2025, 39(14): 24070052.
Gao J, Liu Y W, Xu P H, et al. Test on degradation of seawater-immersed CFRP bars and analysis on the degradation mechanism[J]. Materials Reports, 2025, 39(14): 24070052.
[20] Lu Z Y, Su L Z, Tan S R, et al. Long-term shear performance of bare and cement mortar-coated BFRP bars in corrosive environments[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237: 117658.
[21] Moller J C, Berry R J, Foster H A. On the nature of epoxy resin post-curing[J]. Polymers, 2020, 12(2): 466.
[22] 李丹, 苏晓声, 张驰. 二维红外相关光谱在双氰胺固化环氧树脂体系中的应用 [J]. 应用化学, 2015, 32(11): 1275−1282.
Li D, Su X S, Zhang C. Application of two-dimensional Fourier transform infrared correlation spectroscopy on dicyandiamide-epoxy network[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2015, 32(11): 1275−1282.
[23] 魏丹, 夏正斌, 谢德龙, 等. 新型紫外线固化环氧树脂/丙烯酸酯改性水性聚氨酯的合成与性能 [J]. 化工学报, 2012, 63(4): 1264−1273.
Wei D, Xia Z B, Xie D L, et al. Preparation and properties of novel UV-curable waterborne epoxy and acrylate modified polyurethane[J]. CIESC Journal, 2012, 63(4): 1264−1273.
[24] Deng K L, Cheng H, Suo H Y, et al. Aging damage mechanism and mechanical properties degradation of 3D orthogonal woven thermoset composites subjected to cyclic hygrothermal environment[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 140: 106629.
[25] 王自柯, 段建新, 赵军, 等. FRP 筋在不同腐蚀环境下的层间剪切性能劣化试验 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(4): 2031−2042.
Wang Z K, Duan J X, Zhao J, et al. Experimental study on the degradation of interlaminar shear performance of FRP bars in different corrosive environments[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(4): 2031−2042.
[26] Deng K L, Luo B, Suo H Y, et al. Characterization of material degradation mechanism of carbon fiber reinforced epoxy resin composites under ultraviolet radiation and salt-fog synergistic environment[J]. Polymer Composites, 2024, 45(1): 805−824.
[27] Li H L, Zhang K F, Fan X T, et al. Effect of seawater ageing with different temperatures and concentrations on static/dynamic

mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 173: 106910.
[28] Lu Z Y, Xie J H, Zhang H, et al. Long-term durability of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) sheets and the epoxy resin matrix under a wet–dry cyclic condition in a chloride-containing environment[J]. Polymers, 2017, 9(12): 652.

作者贡献声明

李昆锦负责设计实验方案、数据采集、数据分析和撰写初稿。陈天宇负责数据采集和数据分析。赵菲负责设计实验方案。王立负责对论文提出关键修改意见和逻辑调整。周智提供学术指导、方向把握、提供实验设备和经费支持。

利益冲突声明

作者声明,不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文的英文题名、摘要和关键词采用 DeepSeek 翻译生成,并进行了部分修改。

伦理声明

不适用:本文未涉及人类或动物的实验。

电子补充材料

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2026021301。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据,可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到热带海洋工程材料及评价全国重点实验室自主研究课题(STOEM99403917、STOEM99407718)和海南省自然科学基金高层次人才项目(520RC549)支持。

This work was supported by the Independent Research Projects of the State Key Laboratory of Tropical Marine Engineering Materials and Evaluation (STOEM99403917, STOEM99407718), and Hainan Provincial Natural Science Foundation of China (520RC549).

作者简介

李昆锦(2000—),男,海南海口人,海南大学2023级土木水利硕士研究生。E-mail: 1137800145@qq.com。

陈天宇(1999—),男,海南海口人,海南大学2025级土木工程博士研究生。E-mail: 25110814000002@hainanu.edu.cn。

赵　菲(1972—),女,江西上饶人,博士,海南大学副教授,研究方向:纤维增强复合材料(FRP)结构、装配式混凝土结构、既有建筑物鉴定与加固。主持和参与国家级、省级及横向等科研、教改项目10余项,以第一作者或通信作者在国内外重要学术期刊和会议上发表论文10余篇。E-mail: zfhw2006@163.com。

王　立(1997—),男,四川成都人,海南大学2024级土木工程博士研究生。E-mail: wl77@hainanu.edu.cn。

周　智(1973—),男,湖南永州人,博士,海南大学二级教授,博士生导师。研究方向:工程多灾害安全监测与智能防护、热带海岛工程智能建造与运维、FRP材料及海岛工程应用等。E-mail: zhizhou@hainanu.edu.cn。

(责任编辑:高　喆,英文校对:张海滨)

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).
© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.