

DOI: 10.11918/202304069

# 湿热老化对 FRP-钢胶接节点力学性能的影响

姜旭, 齐昊, 强旭红, 孙凯

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为进一步研究湿热老化对纤维增强复合材料(FRP)-钢胶接节点力学性能的影响,在现有试验的基础上,采用轮盘加载装置,分别从6个加载条件对湿热老化处理后的FRP-钢胶接节点进行一系列加载测试,研究了湿热老化对FRP-钢胶接节点的极限破坏荷载、破坏模式、刚度以及强度破坏准则的影响,并将结果与未老化胶接节点进行比较。试验结果表明:在剪切和拉伸荷载作用下,湿热老化显著降低了FRP-钢胶接节点的极限破坏荷载,分别降至11.0 kN和41.9 kN;在组合荷载作用下,湿热老化对极限破坏荷载的影响较小;老化与未老化FRP-钢胶接节点的强度破坏准则曲线彼此接近;对于拉伸和拉伸/剪切组合荷载条件,湿热老化改变了FRP-钢胶接节点的破坏模式,即从FRP夹芯板和结构胶粘贴层之间的部分界面破坏到覆盖整个结构胶粘结区域的FRP分层破坏和纤维断裂破坏的组合;在6个加载条件下,湿热老化均明显降低了FRP-钢胶接节点的刚度。因此,在设计及使用FRP-钢胶接节点时,应该充分考虑湿热老化对FRP-钢胶接节点力学性能的影响,避免其发生结构破坏。

**关键词:** 胶接节点; 湿热老化; 极限破坏荷载; 破坏模式; 刚度

中图分类号: U448.38

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)11-0026-10

## Mechanical behavior of FRP-steel adhesively-bonded joints under hygrothermal ageing

JIANG Xu, QI Hao, QIANG Xuhong, SUN Kai

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to further investigate the effects of hygrothermal ageing on the mechanical behavior of fiber reinforced polymer (FRP)-steel adhesively-bonded joints, based on existing studies, a series of loading tests were carried out on the hygrothermal ageing-treated FRP-steel adhesively-bonded joints by using a roulette wheel loading device, respectively, from six loading conditions, to study the effects of hygrothermal ageing on the ultimate failure loads, failure modes, stiffness and strength failure criteria of the FRP-steel adhesively-bonded joints, comparing results with the unaged adhesively-bonded joints. The results show that hygrothermal ageing significantly reduces the ultimate failure loads of the FRP-steel adhesively-bonded joints to 11.0 kN and 41.9 kN under shear and tensile loading, respectively. Under combined loading, the effect of hygrothermal aging on the ultimate failure loads was less pronounced. The strength failure criteria curves of the aged and unaged FRP-steel adhesively-bonded joints are close to each other. For tensile and tensile/shear combined loading conditions, hygrothermal aging altered the failure modes of FRP-steel adhesively-bonded joints, transitioning from partial interfacial failure between the FRP core plate and the structural adhesive layer to a combination of FRP delamination failure covering the entire structural adhesive bonding area and fiber fracture failure. Hygrothermal ageing significantly reduced the stiffness of the FRP-steel adhesively-bonded joints under all six loading conditions. Therefore, the effects of hygrothermal ageing on the mechanical behavior of FRP-steel adhesively-bonded joints should be fully considered when designing and using FRP-steel adhesively-bonded joints to avoid their structural damage.

**Keywords:** adhesively-bonded joints; hygrothermal ageing; ultimate failure loads; failure modes; stiffness

纤维增强复合材料(FRP)桥面板因其轻质高强、易于安装、耐久性好等特点,被广泛应用于国内

外的桥梁工程之中。FRP桥面板通常分为夹芯板和空腔模块板。FRP桥面板与钢结构组合形成组合梁

收稿日期: 2023-04-25; 录用日期: 2023-08-06; 网络首发日期: 2024-10-31

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20241031.1310.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52278207); 广东省重点领域研发计划(2019B111106002); 上海市自然科学基金(21ZR1466100); 中央高校基本业务费(22120210574)

作者简介: 姜旭(1982—),男,副教授,博士生导师

通信作者: 强旭红, qiangxuhong@tongji.edu.cn

结构共同参与结构受力,其与钢梁之间通过结构胶粘贴形成胶接节点。FRP-钢胶接节点降低了桥梁整体自重,同时使荷载的传递更为均匀,还可以提供更好的、长期的使用性能。因此,FRP-钢胶接节点具有广阔的应用前景。

尽管 FRP 复合材料和结构胶粘剂被越来越多地应用于民用基础设施,但是其耐用性和长期性能仍有待研究。在此类基础设施的自然寿命中,FRP 夹芯板和粘合缝通常暴露于恶劣和多变的环境中,如温度和湿度的巨大变化。在湿热复合环境中,潮湿和温度的升高会导致 FRP 和结构胶等复合材料发生诸如水解、胶接节点破坏等变化,造成结构的力学性能退化,严重威胁结构的安全。因此,“湿热”耦合作用能降低 FRP 复合桥的使用寿命<sup>[1-5]</sup>,该类作用也被认为是降低聚合材料性能最严酷的环境条件。对于结构胶胶接节点耐久性的研究有助于更好地了解长时间使用后胶接结构的力学性能发展模式,有助于更广泛地推广结构胶在工业领域中的应用。因此,针对使用结构胶进行连接的结构耐久性 & 长时间暴露于湿热环境后力学性能的研究一直是相关领域的热点。

对于 FRP 复合材料和结构胶的拉伸、层间剪切和弯曲性能,文献中已有许多关于吸湿作用对 FRP 复合材料和结构胶力学性能影响的研究<sup>[1,4-10]</sup>。Mcbagonluri 等<sup>[11]</sup>指出吸收的水分会引起基体开裂、纤维基质脱胶和玻璃纤维腐蚀,从而降低 FRP 复合材料的强度和刚度;Hu 等<sup>[12]</sup>研究指出,在饱和水蒸气条件下,经过 70 °C 老化 24 h 后,未涂覆纤维/聚乳酸复合材料试件的抗张强度为未老化试件的 85.4%;Bowditch 等<sup>[13]</sup>的研究显示,与未暴露的干燥试件相比,块状环氧树脂基粘附试件浸入水中 2 000 h 后,破坏应力降低了 77%;Knox 等<sup>[14]</sup>研究得出,胶粘剂块状样品在 30 °C 和 100% 湿度下老化 84 d 后,拉伸应力降低了 20%,弹性模量降低了 10%。

针对钢-FRP 胶接节点,Karbhari 等<sup>[15]</sup>的研究指出,钢-CFRP 节点在 65 °C 热水中暴露 14 d 后,其粘结强度显著降低;Nguyen 等<sup>[16]</sup>研究了不同的恶劣环境条件对钢-CFRP 双搭接节点的影响,其中海水环境条件显著降低了钢-CFRP 节点的粘结强度和刚度,并增加了暴露量;Dawood 等<sup>[17]</sup>对一系列钢-CFRP 胶粘双搭接节点进行了长达 6 个月的环境耐久性评估,结果发现胶合强度显著降低。上述文献关于钢-FRP 粘接节点的试验大多是在拉伸荷载下

针对单搭接或双搭接节点进行的,在组合荷载下进行的试验非常有限。但在实际工程中,胶接节点结构多处于复合受力模式,即处于拉伸、剪切荷载组合作用受力条件下,因此,研究湿热老化后不同拉剪组合荷载下 FRP-钢胶接节点的力学性能,明确湿热老化对 FRP-钢胶接节点的破坏模式,制定湿热老化后 FRP-钢胶接节点的强度失效准则,对于更准确地设计胶接节点的结构构造,将 FRP-钢胶接节点更好地运用于诸如桥梁等具有较长寿命及可能处于极端恶劣环境中的结构而言都是至关重要的。但是,目前的研究中缺少与之有关的试验及有效的试验数据,这对于 FRP-钢胶接节点的推广是致命的。

本文以湿热老化前后 FRP 夹芯板和钢梁之间胶接节点的力学性能为重点,对湿热老化处理后胶接节点进行试验研究。将胶接节点试件浸入湿热环境中 4 个月,经过湿热老化处理后,利用特定的拉伸/剪切加载装置进行了 6 个角度加载条件下的一系列加载测试,得到老化后胶接节点的力学性能和破坏模式;针对矢量分离的拉伸应力和剪切应力,得出老化后胶接节点的强度破坏准则;与未老化的胶接节点在破坏模式、极限破坏荷载、刚度以及强度破坏准则方面进行比较,讨论湿热老化对胶接节点力学性能的影响。

## 1 试验过程

FRP-钢胶接节点试件的制作、试验装置、传感器布置、加载过程与文献[18]中未老化 FRP-钢胶接节点的力学性能试验一致。为了进行比较,表面预处理方法同样采用喷砂(SB)方法。表 1 为试验试件的相关参数,试件编号中“A”字符表示样品经过了湿热老化处理。每个加载条件准备了 3 个复制的试件,共计准备了 18 个试件。

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of specimens

试件编号	加载条件/ (°)	湿热老化 处理	表面处理 方法	试件 数量
S-SB-A-01 ~ 03	90(剪切)	是	喷砂	3
T-SB-A-01 ~ 03	0(拉伸)	是	喷砂	3
18°-SB-A-01 ~ 03	18	是	喷砂	3
36°-SB-A-01 ~ 03	36	是	喷砂	3
54°-SB-A-01 ~ 03	54	是	喷砂	3
72°-SB-A-01 ~ 03	72	是	喷砂	3

将胶接节点试件在恒温 20 ℃ 和相对湿度 50% 条件下进行常温固化, 然后将其浸入温度为 40 ℃ 的水中, 这被认为是 FRP-钢组合桥梁实际使用过程中典型的湿热环境。FRP 不会在结构胶允许使用的最高温度下发生软化<sup>[19]</sup>, 因此本文不考虑 FRP 的软化问题。为了使模拟环境更接近真实环境, 将试件放入盛有水的水箱中模拟湿热老化。水箱放置于温度为 42 ℃ 的恒温箱中, 在此条件下, 经过温度计测量, 恒温箱中水温为 40 ℃。湿热老化过程的时间共计 4 个月。为了模拟 FRP 夹芯板的真实应用状况, 试件置于老化环境之前, 先使用环氧树脂涂料 Sikafloor156 将 FRP 夹芯板的 4 个表面密封。涂料完全固化后, 在涂料上再涂一层防水胶带, 以确保水分不能渗透到 FRP 夹芯板的表面。

由于试验用的 FRP 夹芯板是从整个桥面板上切下来的, 在实际使用过程中, FRP 夹芯板的边缘表

面均被密封以防水, 因此, 环境中的大部分水分应通过 FRP 夹芯板的顶部和底部表面扩散到其内部。同样, 芯材(基础木材)的水分也不应直接从环境中而是应从 FRP 夹芯板中吸收。因此, 在湿热老化过程中, 芯材(基础木材)不能暴露在湿热老化条件下。

湿热老化后的胶接节点试件见图 1。试件由 FRP 夹芯板、结构胶粘贴层和钢板组成。试件被固定在钢支架上。对于经湿热老化处理后的试件, 为了简化钢支架的制作过程, 将钢支架拆分为两个部分, 然后通过 9 个螺栓将两部分组装在一起形成钢支架, 如图 1(b) 所示。试件胶接面积为 90 mm × 90 mm, 上面是一块 190 mm × 90 mm 的 FRP 夹芯板, 下面是 190 mm × 90 mm 钢板块, 通过 4 个螺孔连接至加载设备。图 1(c)、1(d) 为胶接节点试件组装完成的状态。结构胶型号为 BUFA-BONDING PASTE740-0110。



图 1 经湿热老化处理后的试件

Fig. 1 Specimens after hygrothermal ageing

试件的加载装置如图 2 所示。拉剪加载装置见图 2(a)。该加载设备可提供 0°(纯拉)、18°、36°、54°、72°和 90°(纯剪)6 种加载工况, 通过改变加载角度, 实现不同比例的拉伸和剪切荷载组合作用。通过 4 个位移传感器(DS-01 ~ DS-04)测量胶接节点的变形, 见图 2(b)。加载装置布置见图 2(c)。

加载装置的两侧固定两个 LVDT 传感器, 用于测量上下半圆形拉剪加载装置之间的位移, 检查加载的平均分布情况。两个 LVDT 具体的试验加载过程和传感器布置方案与文献[18]中未老化胶接节点试验一致。

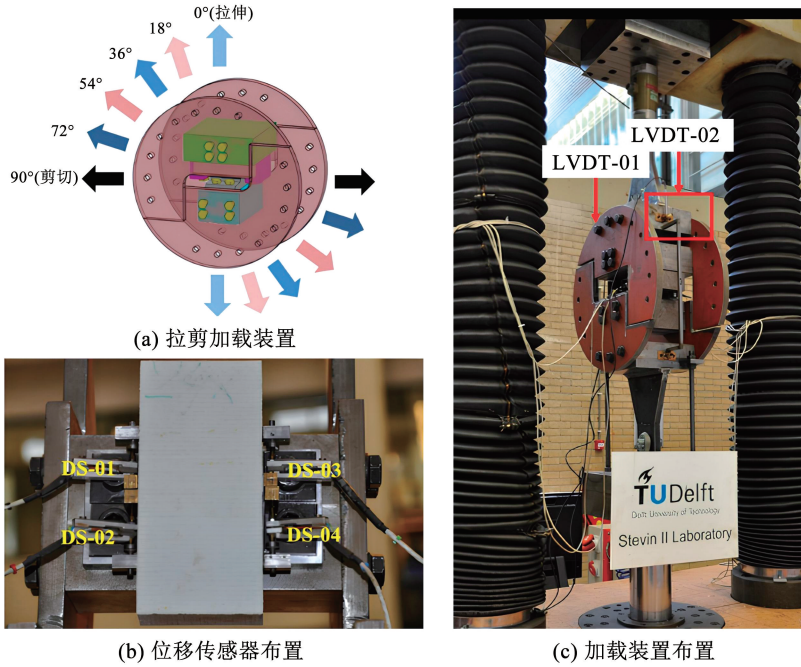


图 2 加载装置

Fig. 2 Loading devices

## 2 试验结果

### 2.1 不同荷载作用下胶接节点的破坏模式

#### 2.1.1 剪切荷载

对于经湿热老化处理的胶接节点,在剪切荷载下,其破坏是脆性的,没有任何可见的破坏迹象或纤维断裂的声音警告。图 3 为剪切荷载下胶接节点的破坏模式。由图 3 可以看出,胶接节点的破坏模式是结构胶粘贴层中的内聚破坏,其破坏位置位于结构胶粘贴层与钢支架之间的界面相邻处。说明喷砂表面预处理方法可产生良好的粘接质量,即使在湿热老化环境中,结构胶粘贴层和钢表面之间也能保持一致,吸收的水分不会显著降低胶粘层和钢支撑之间的界面强度。由图 3 还可以看出,在 S-SB-A-01 试件中,距钢支架边缘一小段距离处有一条断裂起始线(白色)。根据有限元分析得到钢支架与结构胶粘贴层之间的界面应力分布<sup>[20-21]</sup>,剪应力峰值处于屈服线相同的位置处。说明整个胶接节点的破坏从该位置开始,并发展到附近,以触发胶接节点的最终破坏。然而,与 S-SB-A-01 试件明显不同的是, S-SB-A-03 试件表面没有明显的断裂起始线,而是在整个胶接节点的右下角处有一个很大的结构胶断裂初始区域,说明结构胶的破坏首先出现在右下角,随着荷载的增加,破坏逐渐向结构胶粘贴层中间扩展,直至结构胶粘贴层区域的其余部分无法承受荷

载,导致整个胶接节点发生破坏。S-SB-A-03 试件的破坏模式可能是由于结构胶粘贴层的局部不均匀性造成的。此外, S-SB-A-02 试件的断裂起始线和断裂初始区域均在钢支架的表面上,并且较为清晰,这种破坏模式可能是 S-SB-A-01 和 S-SB-A-03 破坏模式的组合。表 2 为湿热老化后 FRP-钢胶接节点极限荷载。显然, S-SB-A-01 试件的破坏模式最为理想,得到了最高的剪切荷载极限承载力(49.5 kN)。

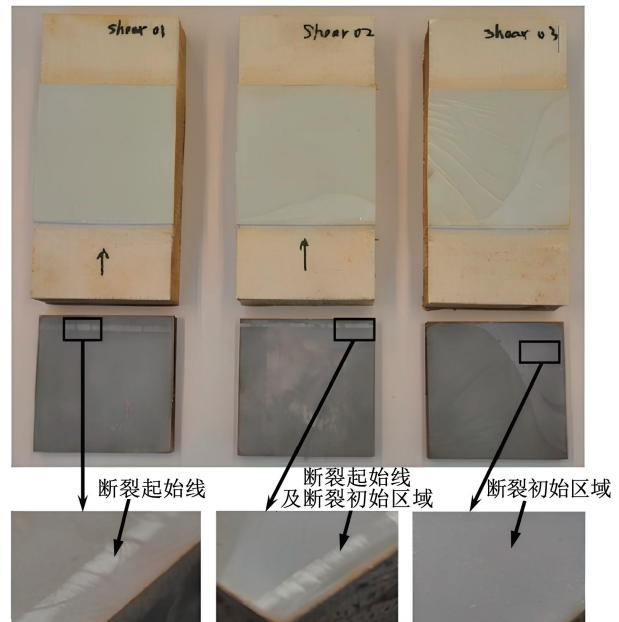


图 3 剪切荷载下胶接节点的破坏模式

Fig. 3 Failure modes of adhesively-bonded joints under shear loading

表 2 湿热老化后 FRP-钢胶接节点极限破坏荷载

Tab. 2 Ultimate failure loads of FRP-steel adhesively-bonded joints after hygrothermal ageing

加载条件/(°)	01 试件极限破坏荷载/kN	02 试件极限破坏荷载/kN	03 试件极限破坏荷载/kN	平均值/kN	偏差/%
0(拉伸)	9.2	11.7	12.0	11.0	16.4
18	12.1	11.5	10.8	11.5	6.1
36	13.5	14.9	13.7	14.0	6.4
54	13.9	14.6	—	14.3	2.8
72	26.5	26.4	23.8	25.6	7.0
90(剪切)	49.5	37.7	38.4	41.9	18.1

### 2.1.2 拉伸荷载

拉伸荷载作用下,胶接节点的破坏情况见图 4。由图 4 可以看出,湿热老化后胶接节点的断裂区域均匀分布,几乎覆盖整个粘合区域。胶接节点的破坏模式是 FRP 分层破坏和 FRP 夹芯板表面纤维断裂破坏两种破坏模式的结合,两种破坏模式见图 5。3 个试件的最终破坏不会突然发生,当施加的荷载接近极限破坏荷载时,均会出现来自纤维断裂或 FRP 分层的警告。在达到极限破坏荷载后,由于 FRP 夹芯板的逐渐分层,胶接节点仍然有一些残余的承载能力。



图 5 FRP 分层与 FRP 夹芯板表面纤维断裂

Fig. 5 FRP delamination and surface fibre fracture on FRP sandwich panel

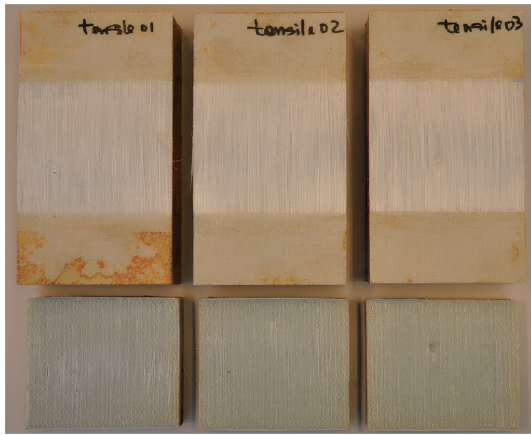


图 4 拉伸荷载下胶接节点的破坏模式

Fig. 4 Failure modes of adhesively-bonded joints under tensile loading

由表 2 可以看出,3 个试件的拉伸极限破坏荷载的平均值为 11.0 kN。其中,T-SB-A-02 和 T-SB-A-03 试件的数值十分接近,分别为 11.7 kN 和 12.0 kN;T-SB-A-01 试件的拉伸极限破坏荷载偏小,为 9.2 kN,这是因为 T-SB-A-01 试件受 FRP 分层的影响更大。在拉伸荷载下,FRP 分层和 FRP 夹芯板表面纤维断裂两种破坏模式的占比主导了节点的拉伸极限荷载,FRP 夹芯板表面纤维断裂的占比越大,胶接节点的拉伸极限承载力越高。

### 2.1.3 组合荷载

组合荷载作用下胶接节点破坏模式见图 6。在 18°、36°和 54°拉剪组合加载条件下,老化的胶接节点的破坏模式是 FRP 分层和纤维断裂两种破坏模式的结合,这与在拉伸荷载作用下试件的破坏模式相同,并且纤维断裂区域始终完全覆盖整个粘合区域。对于 72°加载条件,72°-SB-A-01 试件的破坏模式是结构胶粘贴层的内聚破坏,与剪切荷载作用下试件的破坏模式相同,而且在 72°-SB-A-01 试件的钢表面可以清晰地观察到由于结构胶破坏导致的剩余结构胶,见图 6(d)。在 72°加载条件下,破坏模式从 FRP 分层破坏转变为结构胶粘贴层中的内聚破坏,拉剪组合荷载中的剪切荷载在 72°-SB-A-01 试件的破坏荷载中占主导地位。72°-SB-A-02 和 72°-SB-A-03 试件的破坏模式与 18°、36°和 54°组合荷载作用下的破坏模式相同,为 FRP 分层和纤维断裂两种破坏模式的结合。在 72°加载工况下,3 个试件中同时出现了剪切荷载为主导(72°-SB-A-01)和拉伸荷载为主导(72°-SB-A-02 和 72°-SB-A-03)的破坏模式,说明 72°荷载角加载条件可能是拉伸剪切结合比的边际加载角,从而将破坏模式从典型的拉伸荷载破坏模式转换为典型的剪切荷载破坏模式。

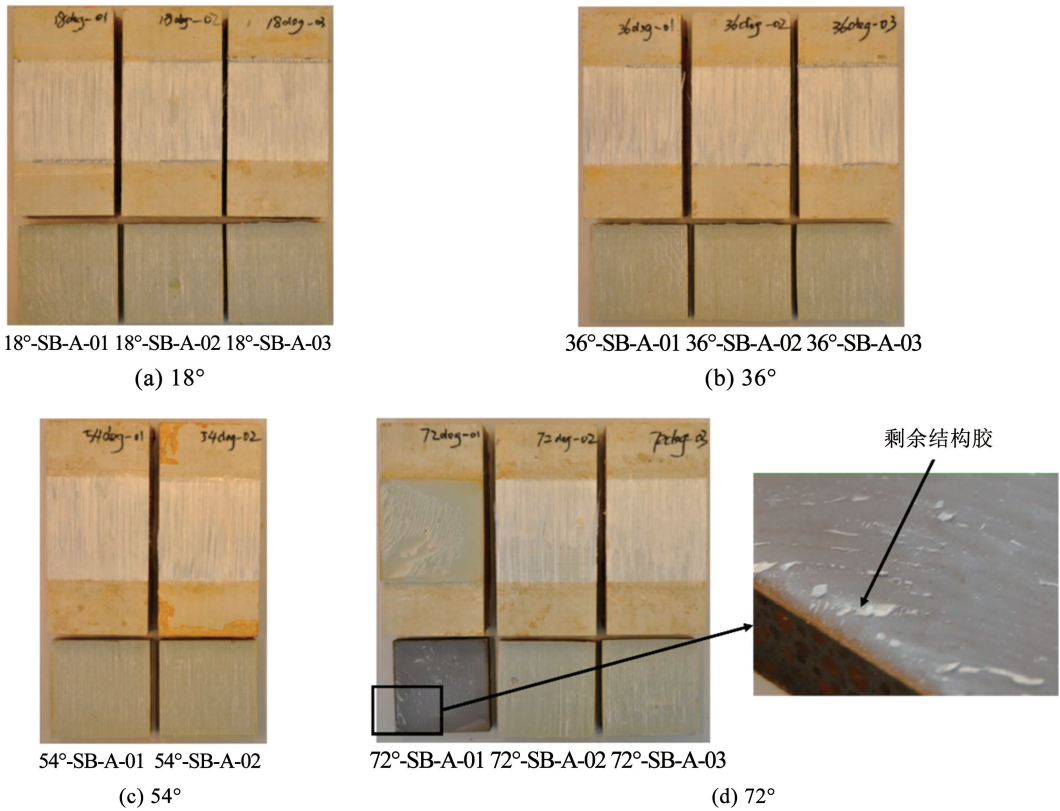


图 6 组合荷载作用下胶接节点的破坏模式

Fig. 6 Failure modes of adhesively-bonded joints under combined loading

由表 2 可以看出:在拉伸(0°)荷载条件下,胶接节点的承载能力最低,平均极限破坏荷载为 11.0 kN。而在剪切(90°)荷载条件下,胶接节点具有最高的承载能力,平均极限破坏荷载为 41.9 kN。这两个加载条件的偏差相对较大,分别为 16.4% 和 18.1%。其原因可能与制作加工胶接节点试件时产生的偏差,如结构胶粘贴层的厚度、喷砂处理加工的差异有关。对于 4 种组合的荷载条件(18°、36°、54°、72°),承载能力介于拉伸荷载和剪切荷载条件之间,随着荷载角从 18°增大至 72°,平均荷载从 11.5 kN 逐渐增加至 25.6 kN,这 4 组试验结果的偏差基本一致,均在 7.0% 之内。

### 2.2 湿热老化胶接节点强度破坏准则

为了更清晰地认识到拉伸荷载和剪切荷载的组合效应,依据每种荷载条件的荷载角,在矢量上将总的破坏荷载分为剪切荷载和拉伸荷载,得到胶接节点极限剪切荷载和极限拉伸荷载图,如图 7 所示。横轴为施加在老化胶接节点上的剪切荷载,纵轴为拉伸荷载。由图 7 可以发现:在 0°(拉伸)、18°和 36°荷载下,老化试件的矢量分离拉伸荷载彼此接近,说明在这 3 个荷载条件下,矢量分离的拉伸荷载主导了破坏荷载;对于 54°和 72°荷载条件,湿热老化胶接节点的破坏模式是拉伸荷载和剪切荷载的组合引发老化的胶接节点的最终破坏,而不仅仅是矢量

分离的拉伸荷载;对于 90°纯剪切加载条件,湿热老化胶接节点的破坏模式是结构胶粘贴层中的内聚破坏。

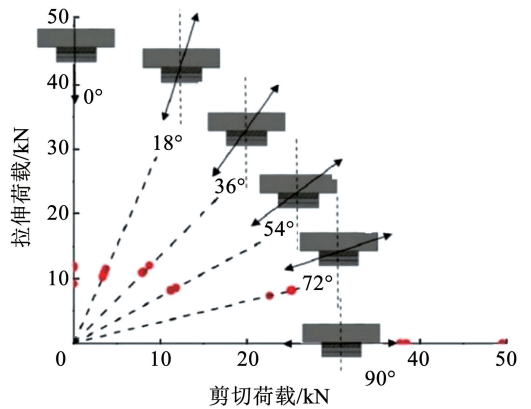


图 7 湿热老化后胶接节点极限剪切荷载和极限拉伸荷载

Fig. 7 Ultimate shear load and ultimate tensile load of adhesively-bonded joints after hygrothermal ageing

为了研究湿热老化的胶接节点的破坏准则,将图 7 中的极限荷载依据交接面积计算出平均拉伸应力和平均剪切应力后,采用椭圆函数通过最小二乘法对平均拉伸应力和平均剪切应力进行曲线拟合,拟合数据包括所有老化试件的测试结果。老化胶接节点的最佳拟合剪切拉伸破坏准则为

$$\left(\frac{\sigma}{1.3}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{4.6}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

式中： $\sigma$  为平均拉伸应力， $\tau$  为平均剪切应力。

湿热老化后胶接节点的强度破坏准则预测曲线见图 8。

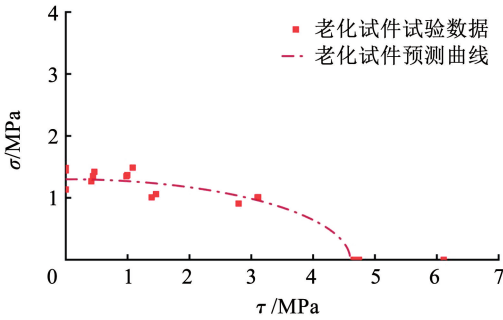


图 8 湿热老化后胶接节点的强度破坏准则

Fig. 8 Strength failure criteria of adhesively-bonded joints after hygrothermal ageing

### 3 湿热老化前后 FRP-钢胶接节点力学性能比较

#### 3.1 极限破坏荷载和破坏模式

表 3 为在 6 个加载条件下未老化<sup>[18]</sup> 和老化试件的极限破坏荷载比较。由表 3 可知，对于拉伸和剪切荷载条件，未老化胶接节点试件所达到的破坏

表 3 湿热老化前后 FRP-钢胶接节点极限破坏荷载比较

Tab. 3 Comparison of ultimate failure loads of FRP-steel adhesively-bonded joints before and after hygrothermal ageing

加载条件/(°)	极限破坏荷载/kN		偏差/%	
	未老化处理试件 <sup>[18]</sup>	老化处理试件	未老化处理试件 <sup>[18]</sup>	老化处理试件
0(拉伸)	17.4	11.0	7.9	16.4
18	11.9	11.5	6.7	6.1
36	12.5	14.0	16.5	6.4
54	16.8	14.3	5.6	2.8
72	23.3	25.6	14.3	7.0
90(剪切)	69.3	41.9	34.0	18.1

图 9 为未老化<sup>[18]</sup> 与老化的胶接节点的矢量分离拉伸和剪切破坏荷载比较。图 10 为基于极限破坏荷载得到的未老化<sup>[18]</sup> 与老化的胶接节点的剪切拉伸破坏准则。其中，预测曲线采用椭圆函数通过最小二乘法进行拟合得到。未老化试件预测曲线为

$$\left(\frac{\sigma}{1.54}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{9.59}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

针对未老化拟合曲线一致性不足问题，仅选择 4 个组合荷载的测试结果作为基本曲线拟合数据，进一步修正未老化荷载曲线。未老化试件修正预测曲线为

$$\left(\frac{\sigma}{1.41}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{3.18}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

荷载明显高于老化的试件。在拉伸荷载下，未老化试件胶接节点的极限破坏荷载比老化试件的高出 58.1%；剪切荷载下，未老化试件胶接节点的极限破坏荷载比老化试件的高出 65.4%，说明 FRP 夹芯板和结构胶粘贴层中吸收的水分倾向于使胶接节点的力学性能变差。在一些工况中（36° 和 72° 加载条件），老化试件胶接节点的极限破坏荷载甚至略微高于未老化试件，这种结果可能归因于后固化机理。后固化是通过加快交联过程并正确排列聚合物分子，以加速材料固化并且提高材料某些物理性能的过程，其通常发生在材料处于室温条件固化之后。本试验中，湿热老化环境（40 °C-水）提供了较高的温度以对 FRP 夹芯板和结构胶粘贴层进行后固化，从而增加了胶接节点的承载能力。对于剪切荷载条件，后固化的作用不是很明显。其原因可能是在剪切荷载下，胶接节点的破坏模式是结构胶粘贴层中的内聚破坏，因此，后固化作用对剪切荷载的作用有限。与后固化进行的改进相比，吸收的水分在降低结构胶的机械性能方面更为显著。此外，除拉伸荷载外，在其他所有荷载条件下，老化试件的偏差均低于未老化试件，这也说明后固化机理改善了胶接节点结构胶的粘结质量，降低了结果偏差。

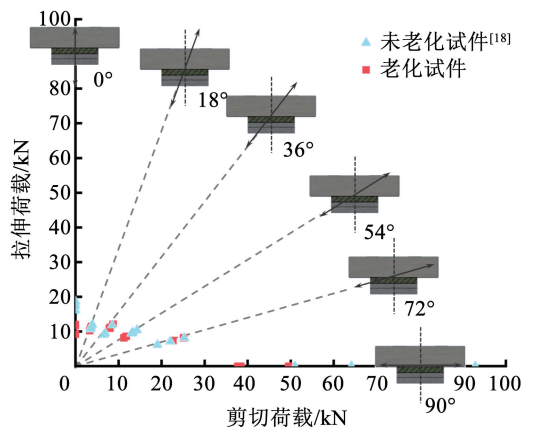


图 9 湿热老化前后 FRP-钢胶接节点极限破坏荷载比较

Fig. 9 Comparison of ultimate failure loads of FRP-steel adhesively-bonded joints before and after hygrothermal ageing

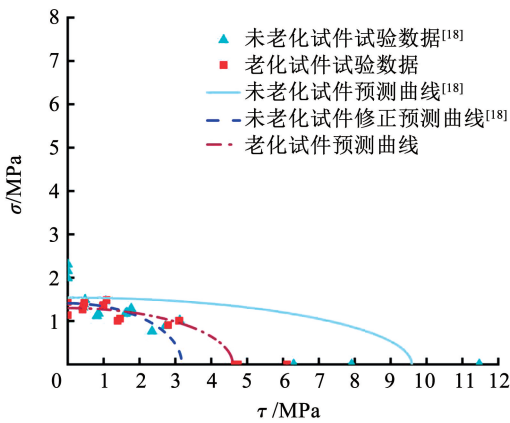


图 10 湿热老化前后 FRP-钢胶接节点剪切拉伸破坏准则比较

Fig. 10 Comparison of shear tensile failure criteria of FRP-steel adhesively-bonded joints before and after hygrothermal ageing

由图 10 可知,在以拉伸荷载为主的区域中,未老化试件的修正预测破坏准则曲线略高于老化试件。相反,在剪切荷载为主的区域中,老化试件的预测破坏准则曲线高于未老化试件的修正预测曲线。通常,4 个月的湿热老化不会显著降低胶接节点的承载能力。湿热老化后 FRP 夹芯板的强度损失相对较大<sup>[22]</sup>,由此推测吸收的水分倾向于降低 FRP 夹芯板和结构胶的力学性能,而后固化过程则趋于提高 FRP 夹芯板和结构胶以及连接接触面的力学性能。当胶接节点暴露于湿热老化环境(40 °C-水)中时,这两种机理是同时发生的。胶接节点的破坏承载力和破坏模式是由主导的机理(吸湿或后固化)控制。

胶接节点破坏荷载没有明显损失的另一个原因可能是整个结构胶粘贴层的应力峰值的重分布。可以推测,试件经过 4 个月的湿热老化后,结构胶粘贴层末端的水分含量较高,而向中间区域水分含量逐渐降低。吸湿会降低 FRP 夹芯板和结构胶的刚度<sup>[23]</sup>,这意味着对于湿热老化后的胶接节点,FRP 夹芯板和暴露于水中的结构胶的刚度低于中间区域的干燥材料。相应地,根据局部刚度差异,应力峰值将移向结构胶粘贴层的中间区域。通常,应力峰值被认为是胶接节点失效的起因。然而,应力峰值的这种重新定位不应该触发整个胶接节点的过早破坏,而仅改变裂纹的起始位置。

在剪切荷载下,老化与未老化<sup>[18]</sup>试件的破坏模式是相同的,即位于钢支撑表面附近的结构胶粘贴层的内聚破坏。断裂起始线的位置彼此靠近。如上所述,老化试件的破坏荷载明显低于未老化试件的破坏荷载。说明在剪切荷载下,结构胶由于吸收的

水分引起的力学性能退化远大于后固化过程的性能改善。

对于其他 5 个角度加载条件,老化与未老化试件的破坏模式是不同的。未老化胶接节点的破坏模式是部分纤维断裂或局部 FRP 分层破坏以及 FRP 夹芯板与结构胶粘贴层之间界面破坏的组合<sup>[18]</sup>。界面断裂是由于 FRP 夹芯板和结构胶粘贴层两者之间的粘结质量不足。但是,经过 4 个月的湿热老化后,胶接节点的最弱平面移向了 FRP 夹芯板。老化试件的破坏模式肯定是 FRP 分层破坏,即 FRP 夹芯板的厚度方向上纤维层间破坏。图 11 为拉伸荷载下未老化<sup>[18]</sup>与老化试件的破坏模式。由图 11 可以看出,与未经湿热老化的胶接节点相比,老化后的胶接节点的破坏界面上 FRP 分层和纤维断裂的区域分布更均匀,几乎覆盖了整个粘合区域。如上所述,在 36°和 72°加载条件下,老化的胶接节点的承载能力不会显著降低,甚至会略有增加。说明湿热老化环境的高温使胶接节点后固化,进而显著改善了 FRP 夹芯板与结构胶粘贴层之间的粘合质量;此外,节点吸收的水分对结构胶粘贴层的削弱作用相对较小。由此,老化试件的破坏平面转换为 FRP 夹芯板平面。此外,湿热老化试件经历更为均匀的 FRP 分层破坏模式的另一个原因是吸收的水分降低了 FRP 夹芯板的贯穿厚度的力学性能,从而促使 FRP 板层离。

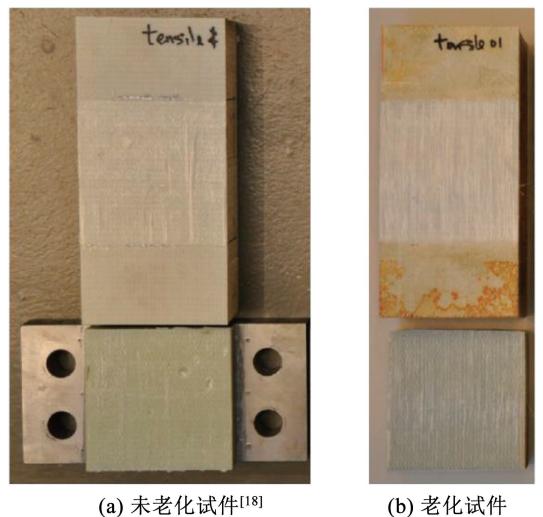


图 11 拉伸荷载下未老化与老化试件的破坏模式

Fig. 11 Failure modes of unaged and aged specimens under tensile loading

### 3.2 荷载-位移曲线

图 12 为 6 个加载条件下,4 个位移传感器测量得到的老化与未老化<sup>[18]</sup>胶接节点试件的荷载-位移曲线。位移传感器的负值表示 FRP 夹芯板与钢支架之间的平均水平相对变形位移,而正值则表示

平均竖向变形位移。由图 12 可以看出,老化试件的荷载 - 位移曲线相较于未老化试件而言,其形态更为曲折,说明位移对荷载的敏感性更大。

图 12(a) 为拉伸荷载加载条件下胶接节点的荷载 - 位移曲线。由图 12(a) 可以看出:老化试件胶接节点的刚度明显低于未老化的试件;达到破坏荷载后,老化试件的曲线没有立即下降,而是继续保持平稳,然后逐渐下降。这种现象是由于 FRP 分层破坏模式引起的。

图 12(b) ~ 12(e) 为拉剪组合加载条件下老化与未老化的胶接节点的荷载 - 位移曲线。由图 12(b) 可以看出,对于 18° 加载条件,未老化与老化试件之间在垂直方向 (正值区域) 的刚度差异比在水平方向上更显著,原因是荷载在拉力方向上的

分离程度更大。由图 12(e) 可以看出,对于 72° 加载条件,情况则完全相反。水平方向的刚度差与垂直方向的刚度差相比,未老化试件与老化试件之间的“负值区”更为显著,原因是荷载在剪切方向上的间距更大。由图 12(b) ~ 12(e) 可以看出,老化胶接节点的竖向变形曲线在达到破坏荷载后均会经历一个平稳期,说明老化试件的胶接节点在这些加载条件下的破坏模式与拉伸荷载加载条件的破坏模式相同 (均为 FRP 分层破坏)。

图 12(f) 为剪切荷载加载条件下胶接节点的荷载 - 位移曲线。由图 12(f) 可以看出:老化胶接节点的刚度有所下降;老化与未老化胶接节点的荷载 - 位移曲线的变化趋势相似,证明两者的破坏模式相同,均为结构胶粘贴层发生的内聚破坏。

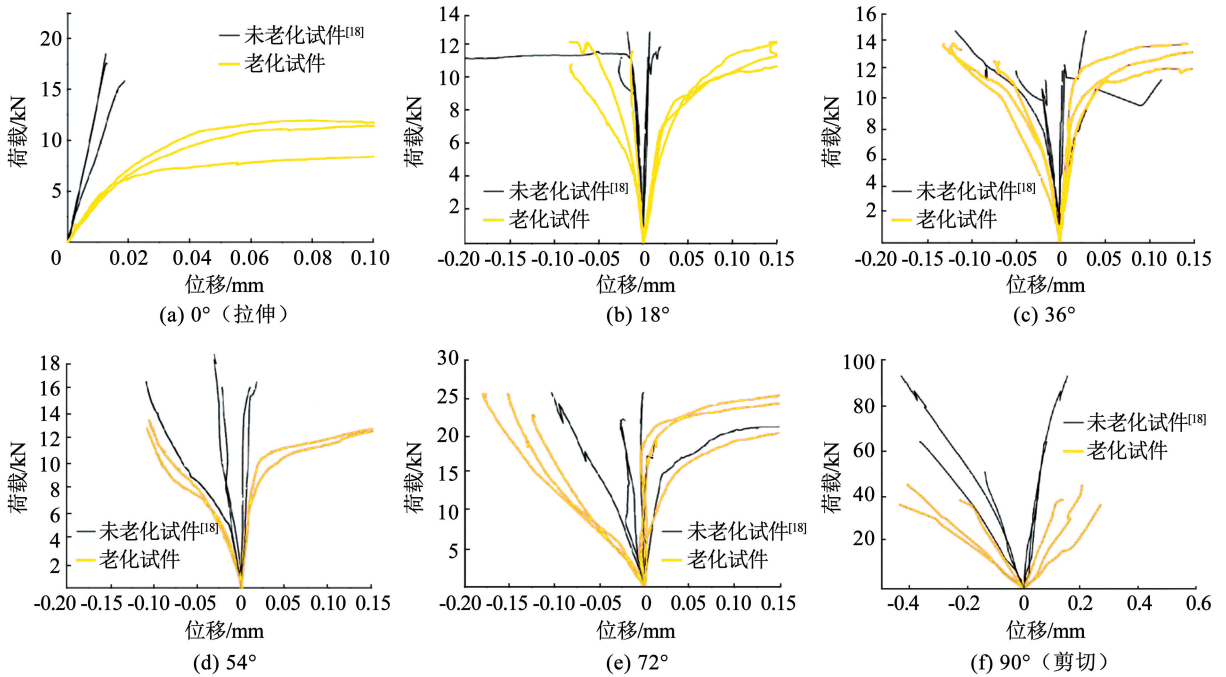


图 12 未老化与老化胶接节点荷载 - 位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of unaged and aged adhesively-bonded joints

综上所述,6 种加载条件下,老化试件的刚度均低于未老化试件的刚度。此外,未老化胶接节点负变形的绝对值远大于正变形,说明沿结构胶粘贴层的变形分布差异巨大,且直接施加荷载的一侧比另一侧承担更多的荷载。但是,对于老化的试件,负变形曲线的斜率与正变形曲线的斜率彼此相对接近,说明老化的胶接节点中的变形分布更加平衡,也说明结构胶粘贴层的刚度由于吸收的水分而降低,导致结构胶粘贴层具有更大的柔度,进而使得荷载更容易从直接施加荷载的一侧转移到另一侧。

#### 4 结 论

通过对湿热老化处理前后 FRP-钢胶接节点进

行的试验研究,可以得到以下结论:

1) 在破坏模式方面,拉伸和拉伸/剪切组合加载条件下,湿热老化作用改变了胶接节点的破坏模式,即从 FRP 夹芯板和结构胶粘贴层之间的部分界面破坏到覆盖整个结构胶粘结区域的 FRP 分层破坏和纤维断裂破坏的组合;在剪切加载条件下,湿热老化作用没有改变胶接节点的破坏模式。剪切荷载加载条件下,湿热老化胶接节点的破坏是脆性的,其破坏模式为结构胶粘贴层中的内聚破坏;拉伸荷载加载条件下,湿热老化胶接节点的破坏模式是 FRP 分层破坏和 FRP 夹芯板表面纤维断裂破坏的结合;18°、36°和 54°加载条件下,湿热老化胶接节点的破坏模式是 FRP 分层破坏和纤维断裂破坏的组合,其

纤维断裂区域覆盖整个结构胶粘结区域;72°加载条件的破坏模式为结构胶粘贴层的内聚破坏。

2)在受力性能方面,拉伸荷载下湿热老化胶接节点具有最低的极限承载力(11.0 kN),剪切荷载下老化胶接节点的极限承载力最高,达到41.9 kN。与未老化胶接节点相比,湿热老化作用显著降低了胶接节点在剪切和拉伸荷载下的极限破坏荷载;但是,对于拉伸/剪切组合加载条件,湿热老化的影响不是特别明显,原因是后固化机制改善了 FRP 夹芯板与结构胶粘贴层之间的粘结质量。6 种加载条件下,湿热老化作用均使胶接节点的刚度下降,并且使胶接节点的变形分布更加均衡。

3)在破坏准则方面,通过矢量分离拉伸与剪切破坏荷载,采用椭圆曲线得到了湿热老化试件胶接节点的剪切拉伸破坏预测曲线。未老化与老化的胶接节点的破坏准则曲线彼此接近,原因是相较于湿热老化对胶接节点的削弱作用而言,后固化对结构胶粘贴层受力性能的增强作用更为显著。

## 参考文献

- [1] ROBERT M, ROY R, BENMOKRANE B. Environmental effects on glass fiber reinforced polypropylene thermoplastic composite laminate for structural applications[J]. *Polymer Composites*, 2010, 31(4): 604. DOI:10.1002/pc.20834
- [2] DALY H B, BRAHIM H B, HFAIED N, et al. Investigation of water absorption in pultruded composites containing fillers and low profile additives[J]. *Polymer Composites*, 2007, 28(3): 355. DOI: 10.1002/pc.20243
- [3] KARBHARI V M, XIAN G J. Hygrothermal effects on high VF pultruded unidirectional carbon/epoxy composites: moisture uptake[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2009, 40(1): 41. DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.07.003
- [4] SHAO Yixin, KOUADIO S. Durability of fiberglass composite sheet piles in water[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2002, 6(4): 280. DOI: 10.1061/(ASCE)10900268(2002)6:4(280)
- [5] BANK L C, GENTRY T R, BARKATT A. Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures-environmental-effects [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1995, 14(6): 559. DOI:10.1177/073168449501400602
- [6] NOGUEIRA P, RAMÍREZ C, TORRES A, et al. Effect of water sorption on the structure and mechanical properties of an epoxy resin system[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, 80(1): 71. DOI:10.1002/1097-4628(20010404)80:1
- [7] EARL J S, SHENOI R A. Hygrothermal ageing effects on FRP laminate and structural foam materials [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004, 35(11): 1237. DOI: 10.1016/j.compositesa.2004.04.007
- [8] LOH W K, CROCOMBE A D, WAHAB M M A, et al. Modelling anomalous moisture uptake, swelling and thermal characteristics of a rubber toughened epoxy adhesive [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2005, 25(1): 1. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2004.02.002
- [9] HAQUE A, MAHMOOD S, WALKER L, et al. Moisture and temperature induced degradation in tensile properties of kevlar graphite epoxy hybrid composites [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1991, 10(2): 132. DOI:10.1177/073168449101000202
- [10] AKAY M, MUN S K A, STANLEY A. Influence of moisture on the thermal and mechanical properties of autoclaved and oven-cured Kevlar-49/epoxy laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 1997, 57(5): 565. DOI:10.1016/S0266-3538(97)00017-1
- [11] MCBAGONLURI F, GARCIA K, HAYES M, et al. Characterization of fatigue and combined environment on durability performance of glass/vinyl ester composite for infrastructure applications [J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(1): 53. DOI: 10.1016/S0142-1123(99)00100-0
- [12] HU R H, SUN Minyoung, LIM J K. Moisture absorption, tensile strength and microstructure evolution of short jute fiber/poly lactide composite in hygrothermal environment[J]. *Materials and Design*, 2010, 31(7): 3167. DOI:10.1016/j.matdes.2010.02.030
- [13] BOWDITCH M R. The durability of adhesive joints in the presence of water [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1996, 16(2): 73. DOI:10.1016/0143-7496(96)00001-2
- [14] KNOX E M, COWLING M J. Durability aspects of adhesively bonded thick adherend lap shear joints [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2000, 20(4): 323. DOI:10.1016/S0143-7496(99)00063-9
- [15] KARBHARI V M, SHULLEY S B. Use of composites for rehabilitation of steel structures-determination of bond durability [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1995, 7(4): 239. DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:4(239)
- [16] NGUYEN T C, BAI Yu, ZHAO Xiaoling, et al. Durability of steel/CFRP double strap joints exposed to sea water, cyclic temperature and humidity [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(5): 1834. DOI:10.1016/j.compstruct.2012.01.004
- [17] DAWOOD M, RIZKALLA S. Environmental durability of a CFRP system for strengthening steel structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(9): 1682. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.023
- [18] 姜旭, 孙凯, 强旭红, 等. 拉剪组合荷载下 FRP-钢胶接连接力学性能[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2022, 49(9): 42  
JIANG Xu, SUN Kai, QIANG Xuhong, et al. Mechanical behavior of FRP-to-steel adhesively-bonded joint under tensile/shear combined loading [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2022, 49(9): 42. DOI:10.16339/j.cnki.hdxbskb.2022096
- [19] 王晓璐, 查晓雄, 张旭琛. 高温下 FRP 筋与混凝土的粘结性能 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2013, 45(6): 8  
WANG Xiaolu, ZHA Xiaoxiong, ZHANG Xuchen. Bond behavior of FRP rebar and concrete at elevated temperature [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 45(6): 8
- [20] JIANG X, KOLSTEIN M H, BIJLAARD F S K. Study on mechanical behaviors of FRP-to-steel adhesively-bonded joint under tensile loading [J]. *Composite Structures*, 2013, 98: 192. DOI:10.1016/j.compstruct.2012.10.045
- [21] JIANG X, KOLSTEIN M H, BIJLAARD F S K. Experimental and numerical study on mechanical behavior of an adhesively-bonded joint of FRP-steel composite bridge under shear loading [J]. *Composite Structures*, 2014, 108(1): 387. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.09.045
- [22] NARDONE F, LUDOVICO M D, BASALO F J D C Y, et al. Tensile behavior of epoxy based FRP composites under extreme service conditions [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(3): 1468. DOI:10.1016/j.compositesb.2011.08.042
- [23] SILVA M A G, CIDADE M T, BISCAIA H, et al. Composites and FRP-strengthened beams subjected to dry/wet and salt fog cycles [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(12): 04014092. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001008