

## 湿热酸雨环境对CFRP-混凝土界面剪切粘结性能影响

易富 杨纪 马泽宇 殷雨时

## Effect of hot and humid acid rain environment on shear bond properties of CFRP-concrete interface

YI Fu, YANG Ji, MA Zeyu, YIN Yushi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221107.002>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 盐溶液干湿循环对CFRP-混凝土界面粘结性能的影响

Effect of wet and dry cycles in salt solution on the interfacial bonding property of CFRP-concrete  
复合材料学报. 2018, 35(8): 2055-2064 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170829.003>

#### 硫酸盐干湿交替对碳纤维增强环氧树脂-混凝土界面粘结性能的影响

Influence of dry-wet alternation of sulfate on bonding performance of carbon fiber reinforced epoxy-concrete interface  
复合材料学报. 2018, 35(1): 16-23 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170315.003>

#### 冻融循环对CFRP-烧结粘土砖界面粘结性能影响

Effects of freeze-thaw cycles on interfacial bonding property of CFRP-sintered clay brick  
复合材料学报. 2020, 37(9): 2294-2302 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200111.002>

#### 固化剂混掺对高温下CFRP板-钢板界面黏结性能的影响

Effect of curing agent mixing on interfacial bond behavior of glued CFRP plate-steel plate at elevated temperature  
复合材料学报. 2021, 38(12): 4073-4089 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210311.005>

#### 基于深度信念网络的玄武岩纤维增强树脂复合材料耐久性预测

Durability prediction of basalt fiber reinforced polymer composite based on deep belief network  
复合材料学报. 2020, 37(2): 390-399 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190506.002>

#### 海水浸泡对FRP筋-珊瑚混凝土粘结性能的影响

Effects of sea water soaking on the bonding properties of FRP bars-coral concrete  
复合材料学报. 2018, 35(12): 3458-3465 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180211.001>



扫码关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20221107.002

# 湿热酸雨环境对 CFRP-混凝土界面 剪切粘结性能影响



分享本文

易富<sup>1</sup>, 杨纪<sup>2</sup>, 马泽宇<sup>1</sup>, 殷雨时<sup>\*3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 建筑与交通学院, 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 阜新 123000;  
3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 为研究湿热酸雨环境对碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP)-混凝土界面剪切粘结性能影响, 设计并制作了 45 个 CFRP-混凝土单剪试件, 采用机械高温干湿循环和人工配制 pH 为 1.5 的酸雨溶液来模拟湿热酸雨环境, 通过开展 CFRP-混凝土切向剪切试验, 分析了混凝土强度和腐蚀次数对界面破坏模式、剥离承载力、极限位移、荷载-位移曲线和粘结区间应变分布的影响, 建立了基于湿热酸雨影响系数的界面本构关系模型, 并提出了湿热酸雨环境腐蚀程度划分参考方法。研究表明: 随着混凝土强度提高, 界面粘结性能增强, 界面剥离位置逐步向胶层处变化; 随着腐蚀次数增长, 界面粘结性能呈现先升高后降低的变化趋势, 3 种强度混凝土对应界面剥离荷载和极限位移分别比未受到腐蚀的试件提升 3.04%、3.50%、5.78% 和 0.50%、0.49%、0.95%, 酸雨中  $\text{SO}_4^{2-}$  离子侵入混凝土表层生成膨胀性物质  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 会导致腐蚀前期界面粘结性能暂时增强; 切向剪切试验中荷载-位移曲线呈现上升、震荡、加强和下降 4 个阶段; 粘结区间上应力传递方向为从加载端传递至自由端; 文中提出基于湿热酸雨影响系数的界面本构关系模型, 与现有试验数据吻合度较好, 且精度较高, 偏于安全。相关研究成果可为高湿高热酸雨地区 CFRP 加固工程提供理论支撑和设计指导。

**关键词:** 湿热酸雨环境; CFRP; 混凝土; 界面; 剪切粘结性能; 耐久性

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)08-4757-11

## Effect of hot and humid acid rain environment on shear bond properties of CFRP-concrete interface

YI Fu<sup>1</sup>, YANG Ji<sup>2</sup>, MA Zeyu<sup>1</sup>, YIN Yushi<sup>\*3</sup>

(1. School of Architecture and Transportation, Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin 123000, China;  
2. School of Civil Engineering, Liaoning University of Engineering and Technology, Fuxin 123000, China; 3. School of Civil  
Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to study the influence of hot and humid acid rain environment on the shear bond performance of carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-concrete interface, 45 CFRP concrete single shear specimens were designed and manufactured. The hot and humid environment was simulated by mechanical high temperature dry and wet cycles and manually configured acid rain solution with pH 1.5. Through CFRP concrete shear tests, the effects of concrete strength and corrosion times on the interface failure mode, peel bearing capacity, ultimate displacement, load displacement curve and strain distribution in the bonding zone were discussed, an interfacial constitutive model based on the influence coefficient of hot and humid acid rain was established, and the reference method for the division of corrosion degree in hot and humid acid rain environment was proposed. The results show that with the increase of concrete strength, the interface bonding performance is enhanced, and the interface peeling posi-

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2022-10-14; 录用日期: 2022-10-30; 网络首发时间: 2022-11-07 14:36:39

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221107.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (51978501; 51774163)

National Natural Science Foundation of China (51978501; 51774163)

通信作者: 殷雨时, 博士, 副教授, 研究方向为混凝土耐久性和 FRP 加固理论 E-mail: [yinys@alumni.tongji.edu.cn](mailto:yinys@alumni.tongji.edu.cn)

引用格式: 易富, 杨纪, 马泽宇, 等. 湿热酸雨环境对 CFRP-混凝土界面剪切粘结性能影响 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4757-4767.

YI Fu, YANG Ji, MA Zeyu, et al. Effect of hot and humid acid rain environment on shear bond properties of CFRP-concrete interface [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8): 4757-4767 (in Chinese).

tion gradually changes to the adhesive layer. With the increase of corrosion times, the interfacial bonding performance presents a trend of increasing first and then decreasing. The corresponding interfacial peel bearing load and ultimate displacement of the three strength concretes are 3.04%, 3.50%, 5.78% and 0.50%, 0.49%, 0.95% higher than those of the uncorroded specimens, respectively.  $\text{SO}_4^{2-}$  ions in acid rain invade the concrete surface to generate expansive material  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , which will temporarily enhance the interfacial bonding performance in the early stage of corrosion. In the tangential shear test, the load displacement curve presents four stages: Rising, concussion, strengthening and falling. The direction of stress transfer in the bonding zone is from the loading end to the free end. The interfacial constitutive model of the influence coefficient of hot and humid acid rain proposed in this paper is in good agreement with the existing test data, with high accuracy and safety. The related research results can provide theoretical support and design guidance for CFRP reinforcement project in high humidity and high heat acid rain area.

**Keywords:** hot and humid acid rain environment; CFRP; concrete; interface; shear bonding property; durability

碳纤维增强树脂复合材料 (Carbon fiber reinforcement plastic, CFRP) 由于轻质、高效、易裁切和耐久性好等优异性能, 得到国内外工程界广泛关注和青睐<sup>[1-3]</sup>。CFRP-混凝土界面力学性能, 是保障加固效果重要因素之一<sup>[4-5]</sup>。CFRP-混凝土界面受力情况, 不仅由界面组成物质直接决定, 且受环境影响十分明显。目前, 我国已成为世界第三大酸雨区<sup>[6-8]</sup>, 国土面积三分之一受酸雨侵袭严重, 而且有逐渐蔓延之势。我国常年发生高温高湿酸雨的地域主要包括华南、华东、武汉和四川盆地等, 其“高温、高湿”环境恶劣环境对 CFRP-混凝土结构带来显著影响已不容忽视, 其对结构承载力和耐久性已产生巨大影响。

湿热环境对 CFRP-混凝土界面粘结性能影响已有一定研究, 目前普遍采用水浴模拟湿热环境, 研究结果表明其对复合结构界面粘结性能有减弱效应<sup>[9-13]</sup>。湿热环境不仅使 CFRP 布外贴加固效果变差, 且胶结纤维布的环氧树脂抗拉强度受其影响也显著降低, 弹性模量变小, 从而影响 CFRP 复材整体性能<sup>[14-15]</sup>。此外, 相比玻璃纤维增强树脂复合材料 (Glass fiber reinforcement plastic, GFRP) 布, CFRP 布在相同老化时间下力学性能退化速率更缓慢<sup>[16]</sup>; 另外, 酸雨会与水泥反应生成膨胀性物质, 酸雨浓度对 CFRP-混凝土界面粘结性能也产生重要影响<sup>[17-19]</sup>。相比于溶液 pH 值、水胶比和混凝土外掺料, 酸雨中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度对混凝土抗压强度影响十分显著<sup>[20]</sup>。关于界面相材料分析中, 研究指出相比 CFRP 弹性模量指标, 混凝土抗压强度显著影响界面粘结性能, 随着侵蚀环境 pH 值增加 (酸性环境中), 破坏位置从混凝土表层逐渐转移至粘结树脂层<sup>[21-25]</sup>。

目前关于 CFRP-混凝土结构耐久性研究, 学者们普遍开展了不同类型的单一环境场对界面劣

化研究, 少有学者开展几例复合环境对界面耐久性研究, 其研究具有地域局限性, 并未充分考虑多种劣化环境对 CFRP-混凝土界面综合影响。然而, 我国气候环境丰富多样, 高湿高热酸雨地域幅员辽阔, 开展上述复合环境下 CFRP-混凝土界面粘结性能变化规律研究, 具有较现实意义。因此, 文中从我国湿热酸雨地域气候特点出发, 以混凝土加固基体强度等级、湿热酸雨腐蚀循环次数为参数, 通过开展 CFRP-混凝土切向剪切试验, 分析了混凝土强度和腐蚀次数对界面破坏模式、剥离承载力、极限位移、荷载-位移曲线和粘结区间应变分布的影响, 并建立了基于湿热酸雨影响系数的界面本构关系模型, 提出了以上相关研究成果可为高湿高热酸雨地区 CFRP 加固工程提供理论支撑和设计指导。

## 1 试验

### 1.1 试件制作

作为加固基体的混凝土试件, 设计尺寸采用  $80\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ , 如图 1 所示。为分析混凝土强度对界面剪切粘结性能影响规律, 试验中设置 3 种强度等级混凝土, 分别为 C30、C40 和 C50。碳布采用 HICOMA-HITEX 系列碳纤维布 (南京海拓复合材料有限责任公司); 界面粘结树脂采用该公司配套的环氧树脂 AB 胶, 按质量比

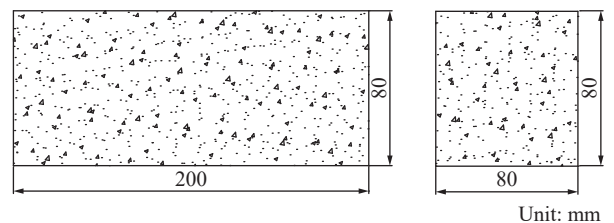


图 1 混凝土试件尺寸

Fig. 1 Size figure of concrete

A : B=2 : 1 配合使用; 为避免混凝土表面经打磨处理后裸露的粗骨料对界面粘结性能的离散影响, 采用德国勇士 00#号砂纸进行混凝土表面打磨处理。处理工艺为用砂纸去除混凝土表面砂浆浮浆, 露出坚硬而平整的砂浆层为宜。后在混凝土表面

采用画线确定粘结区域, 用滚刷轻涂一层环氧树脂胶 (厚度约 1 mm), 后粘贴 CFRP 布使其紧贴至混凝土表面, 再用滚刷反复轻碾粘结区域 4~5 遍后, 放置于干燥自然室温环境 ((20±3)°C)7 天后固化待开展耐久性试验, 加固材料性能具体见表 1 和表 2。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Mixture ratio of concrete

Specimen	Cement	Fine sand	Coarse aggregate	Water	Fly ash	Water reducer	W/C
C30	298	824	1 007	167	53	5.27	0.48
C40	335	737	1 018	164	53	9.50	0.42
C50	353	725	1 044	144	53	7.20	0.35

Note: W/C—Water to cement ratio.

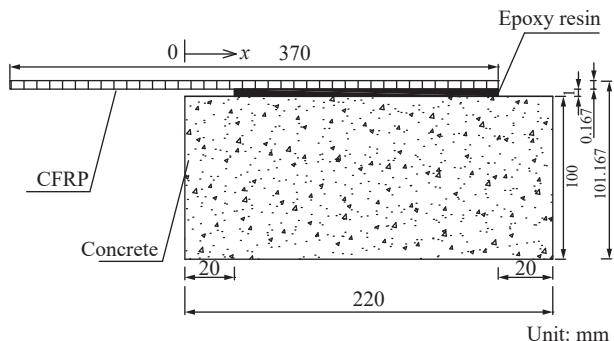
表 2 材料物理参数指标

Table 2 Material physical parameters

Material		$f_c$ /MPa	$f_t$ /MPa	$E_f$ /MPa	$t_f$ /mm	$m_f$ /(g·m <sup>-2</sup> )
Specimen	C30	35.0	5.3	—	—	—
	C40	46.0	6.4	—	—	—
	C50	57.5	7.4	—	—	—
CFRP	—	—	3 400	$2.3 \times 10^5$	0.167	300
Epoxy resin	—	—	38	$2.4 \times 10^3$	—	—

Notes:  $f_c$ —Compressive strength of concrete cube;  $f_t$ —Tensile strength of concrete, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and epoxy resin, the tensile strength of concrete is not measured in the test, so it is converted by the formula  $f_t = \frac{(f_c)^{2/3}}{2}$ ;  $E_f$ —Elastic modulus of fiber cloth and epoxy resin;  $t_f$ —Single layer thickness of fiber cloth;  $m_f$ —Mass per unit area of fiber cloth.

为得到 CFRP-混凝土界面粘贴区域的应变分布, 在 CFRP 的表面沿长度方向粘贴 6 个电阻应变片 (5 mm×3 mm), 布置见图 2 和图 3 所示。



x—Horizontal distance from the free end

图 2 CFRP 粘贴区域图示

Fig. 2 Bond area position graphic of CFRP

## 1.2 模拟制度

### 1.2.1 模拟湿热效应

首先, 将 CFPP-混凝土试件完全浸泡在水溶液中 24 h 后取出; 其次, 用干布将试件表面水分擦干净后立即放置于加热炉中升温, 为了加速湿热效应效果, 采用逐渐升温至 65°C 后恒温 40 min

的升温体制, 如图 4 所示; 最后取出试件, 自然状态冷却至室温 (22°C), 用干布擦干表面水分, 将试件放入预先已调配好的酸雨溶液中开展酸雨环境侵蚀模拟。

### 1.2.2 模拟酸雨环境

经调研, 我国湿热酸雨地区 pH 值年平均普遍在 4.5~5.0 之间 [6-8,26-27]。为了加速模拟酸雨侵蚀效应, 实验室配制 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 HNO<sub>3</sub> 摩尔比 9 : 1 的人工酸雨溶液 (pH=1.5), 见表 3。由于 HNO<sub>3</sub> 具有

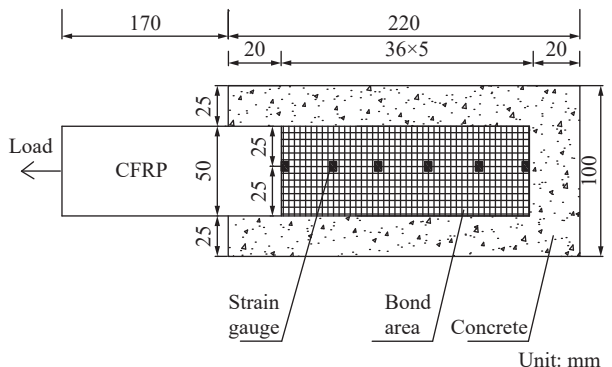


图 3 CFRP 布上应变片布置图示

Fig. 3 Strain gauges position graphic pasted on CFRP

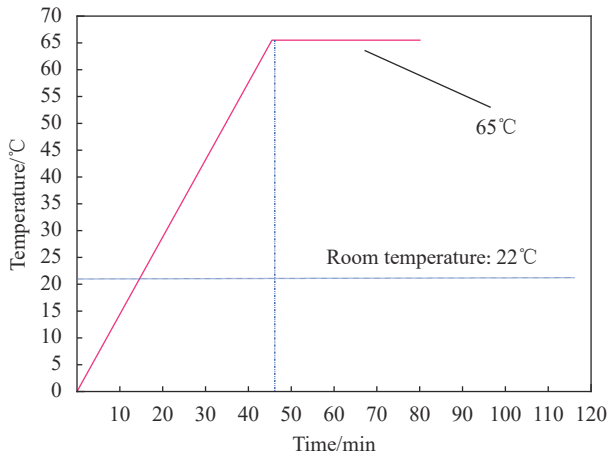


图4 CFRP-混凝土试件升温曲线

Fig. 4 Increase temperature curve of CFRP-concrete specimens

挥发性，侵蚀溶液用塑料薄膜密封，每隔 48 h 对酸雨溶液进行硝酸滴定，维持 pH 值恒定。试件在溶液侵蚀 2 天后，取出置入加热炉中开展湿热环境再模拟(从第二腐蚀循环开始试件不需在水溶液中浸泡 24 h)。酸雨腐蚀现场见图 5。

1.2.3 侵蚀制度

定义所有 CFRP-混凝土试件经上文所述湿热

表 3 酸雨溶液配制

Table 3 Acid rain solution mixturement

pH value	98% sulfuric acid content/(g·L <sup>-1</sup> )	65% nitric acid content/(g·L <sup>-1</sup> )	Mole ratio H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : HNO <sub>3</sub>
1.5	63.24	7.12	9:1

40 L



图5 CFRP-混凝土试件酸雨侵蚀模拟环境

Fig. 5 Acid rain corrosion environment of CFRP-concrete specimens

与酸雨腐蚀操作全过程一次为一个腐蚀周期循环。为了研究侵蚀环境循环周期次数对界面剪切粘结性能影响规律，分别设置 0(未腐蚀)次、10 次、20 次、30 次和 40 次循环周期，试验开展工况见表 4 所示。

表 4 酸雨侵蚀试验工况

Table 4 Test conditions of acid rain corrosion

Number	Specimen/block	Corrosion cycle time	Corrosive environment
$f_i-0$	3×3	0	Non corrosive
$f_i-10$	3×3	10	High temperature and humidity acid rain environment
$f_i-20$	3×3	20	
$f_i-30$	3×3	30	
$f_i-40$	3×3	40	
$i=30, 40, 50$	Total: 45	-	

Notes: In the expression  $f_i-a$ ,  $i$  represents three concrete strength grades, C30, C40 and C50 respectively;  $a$  represents the number of corrosion cycles. For example,  $f_{30}-10$  represents the C30 CFRP-concrete specimen subjected to 10 corrosion cycles.

1.3 试验过程

采用 MTS 万能试验机 (MTS81003052522, 美国 MTS 公司) 对 CFRP-混凝土试件进行加载，试验设备中通过设置球铰结构来解决非偏心受拉问题，同时配合纤维布夹头来实现纤维布切向稳定张拉，另外，通过在纤维布夹头端固定位移计量测加载端位移，加载试验装置见图 6 所示。

2 结果与分析

2.1 混凝土强度对 CFRP-混凝土界面粘结性能的影响

2.1.1 破坏形态

为了分析混凝土强度对界面剪切粘结性能影

响，观察试件界面破坏后形貌状态，见图 7 所示。可以看到，随着混凝土强度等级提升，界面剥离

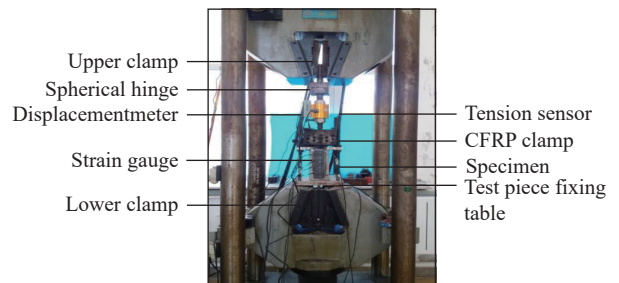


图 6 CFRP-混凝土切向剪切试验系统

Fig. 6 Tangential shear test system of CFRP-concrete specimens



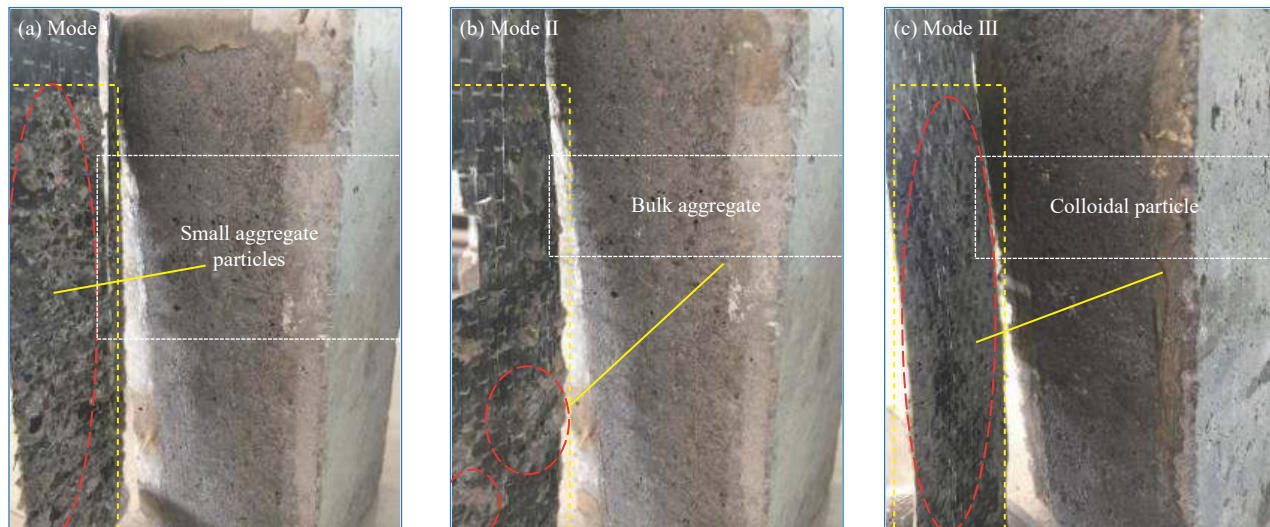


图7 CFRP-混凝土试件破坏模式

Fig. 7 Failure modes of CFRP-concrete specimens

位置从混凝土表层逐步转移至胶层处。界面破坏形态分别对应为小块骨料颗粒(模式 I)、大块骨料(模式 II)和胶体颗粒(模式 III)3种模式。具体表现为界面剥离后 CFRP 布粘附的混凝土骨料颗粒逐渐减少。这说明强度较高混凝土对界面粘结性能有增强作用,当混凝土表层切向抗拉强度高于胶层剪切破坏强度时,此时胶层先被拉断,因而随着混凝土强度等级提高,界面剥离位置逐步向胶层处变化。

2.1.2 剥离荷载

试验中发现不同腐蚀循环次数下(含未腐蚀)混凝土强度等级对界面剥离荷载具有相同规律,因此以未受腐蚀(0次循环)为例,考察混凝土强度对界面剥离荷载和极限位移影响规律,见表5所示。

表5 CFRP-混凝土切向剪切试验数值  
Table 5 Interfacial shear test data between CFRP and concrete

Strength grade	Peel load/kN	Ultimate displacement/mm
C30	6.89	2.02
C40	7.15	2.05
C50	7.78	2.10

随着混凝土强度等级提升,关注于界面剥离荷载和极限位移变化, C50 和 C40 相对于 C30 混凝土分别提升 3.77%、12.92% 和 1.49%、3.96%。可见,混凝土强度对界面粘结性能影响十分明显,这与 Hadigheh 等<sup>[1]</sup>的研究结论中混凝土强度对界面粘结性能影响比较显著是一致的。这是由于随

着混凝土强度等级提升,混凝土表层对界面粘结性能贡献作用更明显,而相对 C30 混凝土, C50 混凝土表层更紧致且强度更高所致。

2.2 腐蚀次数对 CFRP-混凝土界面粘结性能的影响

2.2.1 破坏形态

对经过湿热酸雨腐蚀后的 CFRP-混凝土界面开展切向剪切试验,界面剥离破坏后,观察界面形貌,见图8所示。

随着腐蚀循环次数的增长,界面剥离开所附带的混凝土量逐渐增多。这是由于混凝土在受到湿热酸雨环境侵蚀后,界面处混凝土表层变得疏松,混凝土表层抗拉强度降低,当弱于界面胶层抗拉强度时,混凝土首先被拉断所致。

2.2.2 界面参数

CFRP-混凝土界面重要的3个参数分别为界面剥离荷载  $P_u$ 、剥离荷载对应的局部位移  $S_0$  和极限位移  $S_f$ 。实际桥梁加固工程中更关注界面抗滑移能力,即界面极限位移值  $S_f$ ,因此表6给出不同混凝土强度等级在腐蚀循环次数下的界面剥离荷载  $P_u$  和极限位移  $S_f$ 。

随着腐蚀次数增长,界面粘结性能呈现先升高后降低的变化趋势。当腐蚀次数达到10个循环时,界面粘结性能最大,且高于未受到腐蚀的试件界面。3种强度混凝土对应界面剥离荷载和极限位移比未受腐蚀的试件分别提升 3.04%、3.50%、5.78% 和 0.50%、0.49%、0.95%,另外,随着混凝土强度等级提高,试件耐腐蚀性增强,表现为在第10次循环时对界面性能提升效果更明显。此外,当

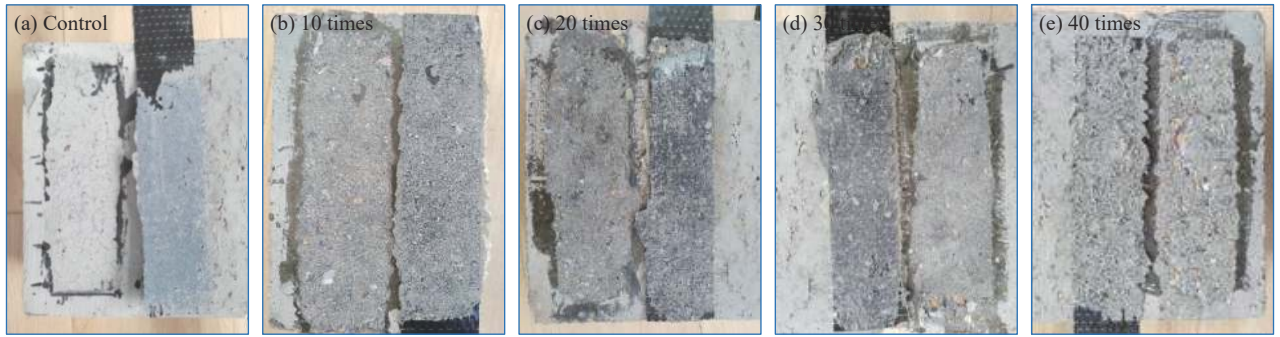


图8 不同腐蚀循环次数下 CFRP-混凝土试件界面破坏形态

Fig. 8 Interfacial failure patterns under different corrosion times of CFRP-concrete specimens

表6 CFRP-混凝土试件剥离荷载与极限位移

Table 6 Peel load and ultimate displacement of CFRP-concrete specimen

Strength grade	Corrosion time	$P_u$ /kN				$S_f$ /mm			
		1	2	3	Average	1	2	3	Average
C30	0	6.89	6.86	6.92	6.89	1.88	1.92	2.26	2.02
	10	6.54	6.99	7.77	7.10	1.95	1.99	2.15	2.03
	20	6.19	6.35	6.45	6.33	1.45	1.62	1.37	1.48
	30	4.03	3.88	4.15	4.02	1.43	1.41	1.45	1.43
	40	4.03	3.89	4.05	3.99	1.25	1.30	1.35	1.30
C40	0	6.95	7.07	7.43	7.15	1.91	2.07	2.17	2.05
	10	6.56	6.72	8.93	7.40	2.43	1.62	2.14	2.06
	20	6.65	6.98	5.66	6.43	0.81	2.24	1.75	1.60
	30	3.09	5.49	—	4.29	1.28	1.70	—	1.49
	40	4.24	4.39	4.32	4.32	—	1.37	1.35	1.36
C50	0	7.05	7.77	8.52	7.78	2.10	2.24	1.97	2.10
	10	8.20	8.45	8.04	8.23	2.10	2.33	1.93	2.12
	20	6.99	7.13	6.55	6.89	1.95	1.80	1.89	1.88
	30	4.99	4.77	4.55	4.77	1.71	1.75	1.88	1.78
	40	4.10	4.70	4.85	4.75	1.60	1.70	1.80	1.70

Notes: "—" in the table indicates that no valid data is collected due to test error, human operation and other reasons;  $P_u$ —Peel load;  $S_f$ —Ultimate displacement.

腐蚀至第 10 循环时,  $SO_4^{2-}$  离子侵入混凝土表层生成了膨胀性物质  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ , 由于膨胀性  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  填充了混凝土表层裂隙, 改善了混凝土表层结构, 因此提升了 CFRP-混凝土界面粘结性能。

### 2.2.3 荷载-位移曲线

为分析不同腐蚀次数下界面荷载-位移曲线变化规律, 由于荷载-位移曲线在不同强度混凝土下具有相似性, 因此以 C40 混凝土-CFRP 试件说明问题。

图 9 为不同腐蚀次数下 CFRP-混凝土试件荷载-位移曲线。可以看到, 经过 10 次腐蚀的界面粘结性能要普遍高于其他试件。总体来说, 荷载-位移曲线呈现上升、震荡、加强和下降 4 个阶段。这是由于界面在初始张拉过程中, 混凝土、胶层和纤维布均处于弹性变形状态, 因此曲线呈现直线上升状; 由于粘结区间环氧树脂胶涂厚度局部不均匀或 CFRP-混凝土界面下粗骨料分散不均

匀带来的影响<sup>[10,20-21]</sup>, 曲线出现震荡段; 后随着加载持续增加, 界面仍可继续受载, 曲线继续上升;

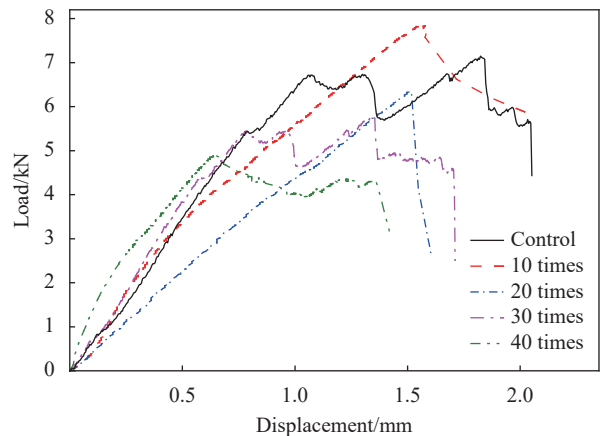


图9 不同腐蚀次数下 CFRP-混凝土试件荷载-位移曲线

Fig. 9 Load-displacement curves of CFRP-concrete specimen under different corrosion times

当界面出现局部剥离时, 界面开始逐步丧失承载力, 直至最后拉断破坏, 曲线呈现急剧下降趋势。  
 2.2.4 粘结区域应变片分布规律

图 10 为不同腐蚀次数下 CFRP 应变分布。可以发现, 应变在粘结区间上连续分布。当加载机施加切向荷载后, 距离加载端较近的应变片首先响应, 随着距加载端距离增长, 应变片数值逐渐降低, 表明粘结区间上应力传递方向为加载端至自由端; 另外, 随着腐蚀循环次数的增加, 总体

上粘结剪应力逐渐降低; 在荷载-位移曲线弹性上升段 (荷载等级  $\leq 75\%P_u$ ), CFRP 应变主要在加载端附近发展; 强化段 (荷载等级  $>75\%P_u$ ) 各测点应变随着距加载端距离增大而显著提高, 此时 CFRP-混凝土界面对应破坏模式为胶层破坏或 CFRP 布少带有砂浆或小颗粒粗骨料破坏; 加载至接近  $P_u$  时, CFRP 布从加载端起伏状剥离, 加载至剥离荷载时距加载端最近处应变值达到  $2.35 \times 10^{-3} \sim 4.38 \times 10^{-3}$ , 此时 CFRP 布已从界面处剥离。

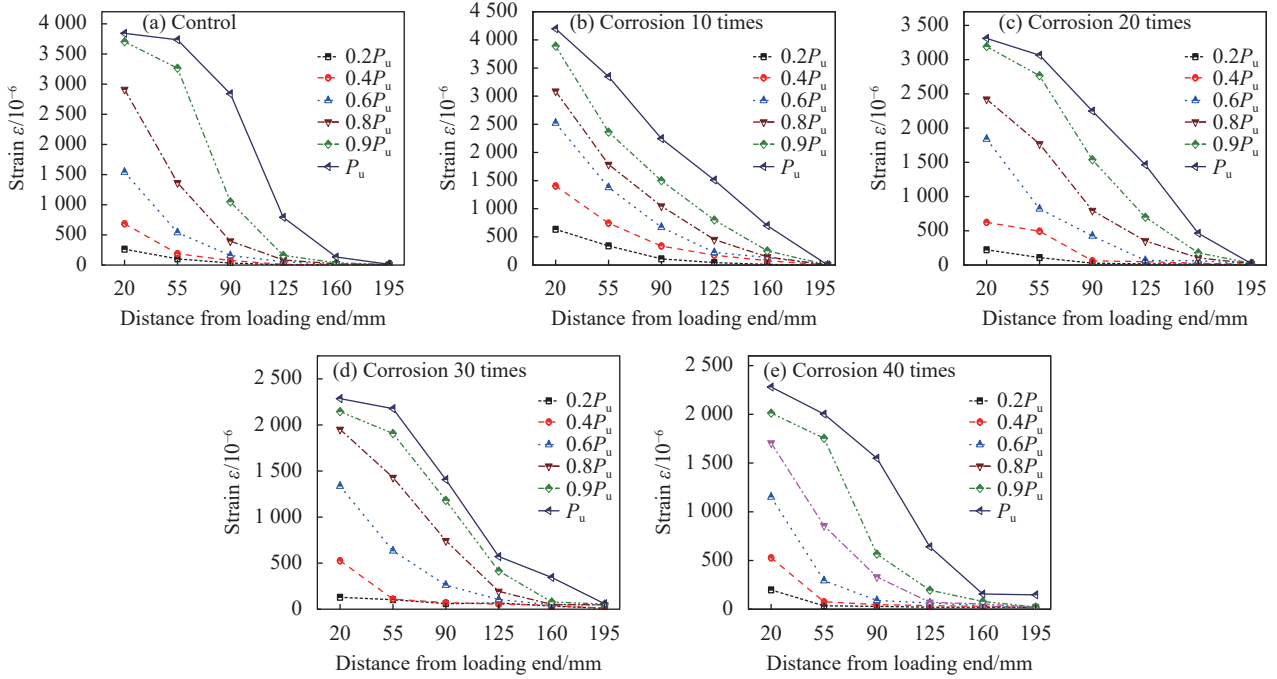


图 10 不同腐蚀次数下 CFRP 应变分布

Fig. 10 Strain distribution of CFRP under different corrosion time

### 3 湿热酸雨环境影响因子的 CFRP-混凝土界面粘结强度模型

目前, CFRP-混凝土界面粘结强度模型中较常用的是陆新征<sup>[10]</sup>建立的界面粘结-滑移本构关系, 如下式表示:

$$\tau = \tau_{\max} \sqrt{\frac{s}{s_0}} \quad (s \leq s_0) \quad (1)$$

其中:  $\tau$  为界面间粘结应力;  $s$  为 CFRP-混凝土界面局部滑移量;  $\tau_{\max}$ 、 $s_0$  分别为 CFRP-混凝土界面最大粘结应力和最大粘结应力对应的局部滑移量。

$$\tau_{\max} = \alpha\beta_L\beta_w f_t \quad (2)$$

$$s_f = 2G_f / \tau_m = 2G_f / \alpha\beta_L\beta_w f_t \quad (3)$$

$$G_f = \frac{P_u^2}{2b_f^2 E_f t_f} \quad (4)$$

其中:  $G_f$  为界面断裂能;  $f_t$  为混凝土抗拉强度;  $P_u$  为界面剥离荷载;  $E_f$  为纤维布弹性模量;  $t_f$  为纤维布厚度;  $\alpha$  为试验回归系数;  $\tau_m$  为 FRP-混凝土界面粘结强度 (MPa);  $s_f$  为 FRP-混凝土界面最大滑移量 (mm);  $b_f$  为 FRP 片材宽度 (mm)。

将式 (4) 代入式 (3), 得到:

$$s_f = P_u^2 / \alpha\beta_L\beta_w b_f^2 E_f t_f \quad (5)$$

定义  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  分别为湿热酸雨环境对  $\tau_{\max}$  和  $s_f$  的影响系数, 代入式 (2) 和式 (5) 得到:

$$\tau_{\max} = \gamma_1 \alpha\beta_L\beta_w f_t \quad (6)$$

$$s_f = \gamma_2 P_u^2 / \alpha\beta_L\beta_w b_f^2 E_f t_f \quad (7)$$

其中:  $\beta_L$ 、 $\beta_w$  分别为界面粘结宽度影响系数和长度影响系数<sup>[10]</sup>, 计算公式如下:

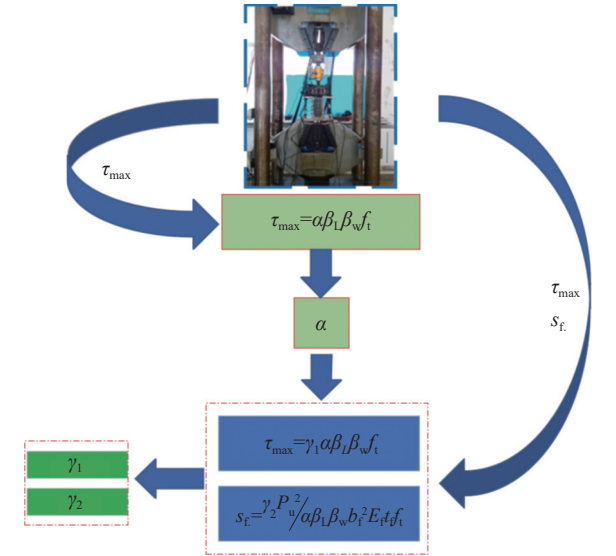


$$\beta_w = \sqrt{\frac{2.25 - \frac{b_f}{b_c}}{1.25 + \frac{b_f}{b_c}}} \quad \beta_L = \sqrt{\frac{2.25 - \frac{L_f}{L_c}}{1.25 + \frac{L_f}{L_c}}} \quad (8)$$

其中： $L_f$ 为 CFRP 粘结长度； $b_c$ 为混凝土断面宽度。

为了定义湿热酸雨腐蚀 CFRP-混凝土结构损伤等级，客观评定当前损伤环境类别，定义无恶劣环境影响系数  $\gamma = 1.0$ ，且随着环境恶化  $\gamma$  逐渐减小，且  $0 < \gamma \leq 1.0$ 。因此对于粘结强度  $\tau_{max}$ 、最大滑移量  $s_f$  的两个方程中，相应无环境劣化状态下  $\gamma_1 = 1.0$ 、 $\gamma_2 = 1.0$ 。根据试验数据采集结果 ( $\tau_{max}$ )，结合式 (2)、式 (8)，得到试验回归系数  $\alpha$ ；将  $\alpha$  代入 10 次、20 次、30 次和 40 次湿热酸雨腐蚀下的界面试验结果数据中 ( $\tau_{max}$ 、 $s_f$ )，同时结合式 (6) 和式 (7) 得到相应腐蚀龄期下的环境影响系数分别为  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ ，流程如图 11 所示。以 C30 混凝土为例，分析界面重要参量 ( $\tau_{max}$ 、 $s_f$ ) 与  $\alpha\beta_L\beta_w f_t$  之间的关系，如图 12 所示。

可以明显看到，基于湿热酸雨影响系数  $\gamma$  建立的  $\tau_{max}$ 、 $s_f$  的关系模型，与试验数据吻合度非常好，判定系数在 0.91~0.98 之间，而回归后计算的湿热酸雨环境影响系数在 0.53~0.87 之间。因此基于环境影响系数试做以界定，以 0.51~0.60 之间为硫酸盐重度腐蚀 I 类环境；以 0.61~0.70 之间为

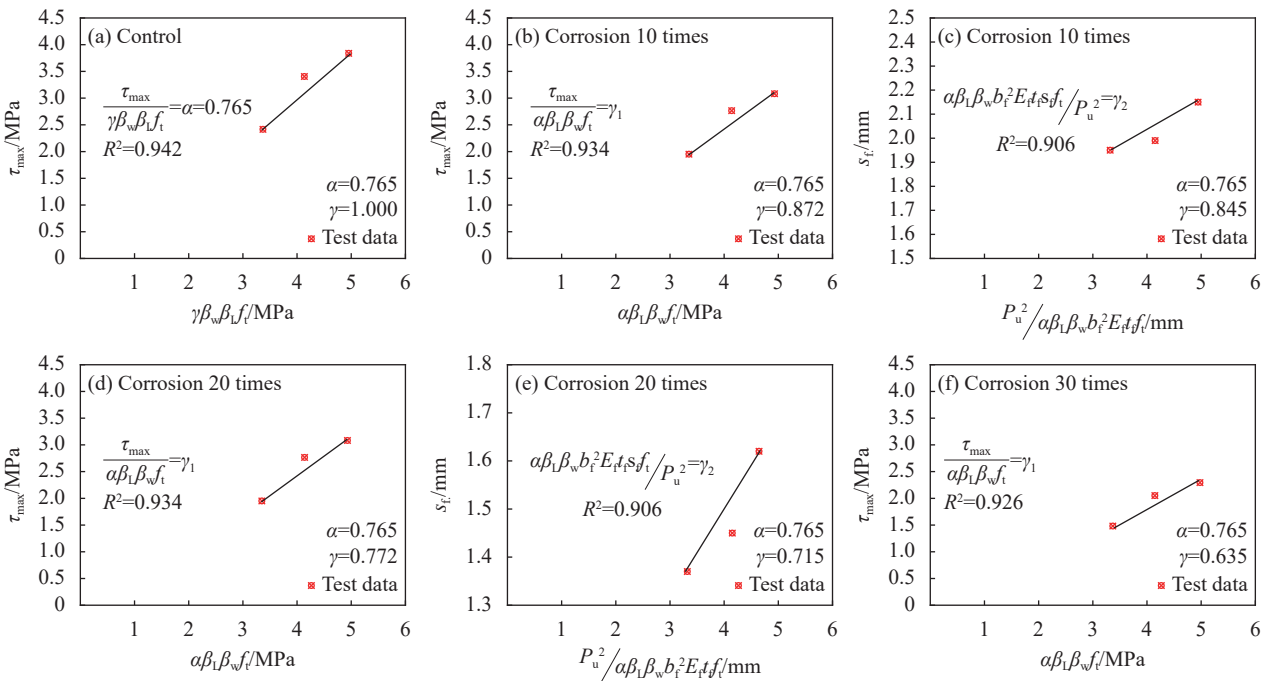


$\tau_{max}$ —Interfacial bonding strength between FRP and concrete;  
 $\alpha$ —Statistical regression coefficient of experimental data;  $\beta_L$ ,  
 $\beta_w$ —Interfacial FRP length influence coefficient and width influence  
coefficient;  $f_t$ —Tensile strength of concrete;  $P_u$ —Interfacial peeling  
bearing capacity;  $b_f$ —Width of FRP sheet;  $E_t$ —Elastic modulus of FRP  
sheet;  $\gamma_1$ —Based parameter  $\tau_{max}$  deterioration factor of humid hot acid  
rain;  $s_f$ —Based parameter  $s_f$  deterioration factor of humid hot acid rain

图 11 基于湿热酸雨劣化因子界面参数回归

Fig. 11 Regression of interfacial parameters based on humid and hot acid rain deterioration factor

硫酸盐严重腐蚀 II 类环境；以 0.71~0.80 之间为硫酸盐一般腐蚀 III 类环境；以 0.81~0.90 之间为硫酸盐轻微腐蚀 IV 类环境，腐蚀环境分类对应混凝土表面湿热酸雨腐蚀情况如表 7 所示。



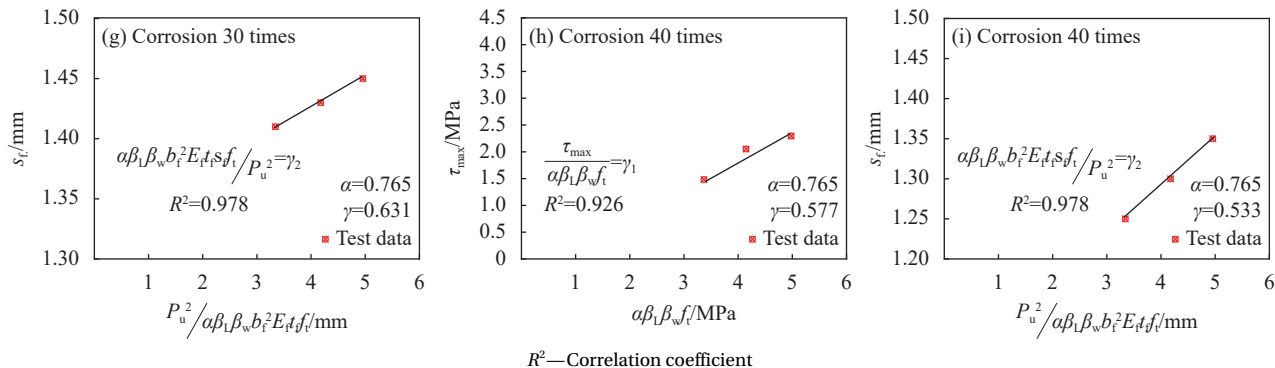


图 12 参量 ( $\tau_{max}$ ,  $s_f$ ) 和 ( $\alpha, \beta_w, \beta_L, f_i$ ) 之间的关系

Fig. 12 Relationships between parameters ( $\tau_{max}$ ,  $s_f$ ) and ( $\alpha, \beta_w, \beta_L, f_i$ )

对本文提出的模型精确度与现有其他模型进行比对分析, 如表 8 所示。可以看到, 本文提出的模型中, 试验值与预测值吻合度相对其他模型较好, 具有一定的安全储备。目前其他模型得到的试验值和预测值数据分散性较大, 过高或过低估计界面粘结性能, 尤其基于 Wu<sup>[28]</sup> 试验数据下的 Neubauer

和 Rostasy 模型, 计算值是预测值的 13 倍之多, 误差较大, 且过于保守估计, 造成 CFRP 用材极大浪费。因此本文提出的基于湿热酸雨环境影响系数建立了 CFRP-混凝土界面本构模型, 与现有试验数据吻合度较好, 精度较高, 偏于安全, 更利于 CFRP-混凝土耐久性加固设计借鉴使用。

表 7 腐蚀环境对应混凝土表面腐蚀程度

Table 7 Corrosion degree of concrete surface corresponding to corrosion environment





I category	II category	III category	IV category
Severe corrosion	Harsh corrosion	Moderate corrosion	Slight corrosion
			

表 8 本文模型与现有模型精确度比对

Table 8 Accuracy comparison between new and existed models

Data source	Proposed model	Lu <sup>[10]</sup>	Neubauer & Rostasy <sup>[33]</sup>	Monti et al <sup>[34]</sup>
	Test/Predict	Test/Predict	Test/Predict	Test/Predict
Wu et al <sup>[28]</sup>	4.29	6.98	13.14	12.27
Takeo et al <sup>[29]</sup>	2.23	3.50	5.55	5.68
Tan <sup>[30]</sup>	1.82	2.91	4.56	4.52
Ren <sup>[31]</sup>	1.66	2.68	3.76	3.78
Ueda et al <sup>[32]</sup>	2.67	4.12	6.48	6.47

### 4 结论

(1) 混凝土强度对界面剪切粘结性能作用明显。随着混凝土强度等级提升, 界面剥离位置从混凝土表层逐步转移至胶层处, 试件耐腐蚀性增强; 3 种强度混凝土对应界面剥离荷载和极限位移比未受腐蚀的试件分别提升 3.04%、3.50%、5.78%

和 0.50%、0.49%、0.95%。

(2) 湿热酸雨腐蚀环境对碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP)-混凝土界面切向粘结性能影响呈现非同向变化规律。随着环境腐蚀次数增长, 界面粘结性能呈现先升高后降低的变化趋势。酸雨中  $SO_4^{2-}$  离子侵入混凝土表层生成膨胀性物质  $CaSO_4$ ,

2H<sub>2</sub>O, 使腐蚀次数达到 10 个循环时界面粘结性能暂时增强。

(3) 切向剪切试验中荷载-位移曲线呈现上升、震荡、加强和下降 4 个阶段, 粘结区间上应力传递方向为从加载端传递至自由端。

(4) 基于湿热酸雨影响系数的界面本构关系模型与现有试验数据吻合度较好, 且精度较高, 偏于安全, 可为 CFRP-混凝土耐久性加固设计借鉴使用。

## 参考文献:

- [1] HADIGHEH S A, KE F H, KASHI S M. 3D acid diffusion model for FRP-strengthened reinforced concrete structures: Long-term durability prediction[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 261: 120548.
- [2] 江胜华, 姚国文, 刘超越, 等. 湿热环境作用下 CFRP 加固钢筋混凝土梁的抗弯性能[J]. *西南交通大学学报*, 2020, 55(1): 175-183.  
JIANG Shenghua, YAO Guowen, LIU Chaoyue. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP under hydrothermal environment[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2020, 55(1): 175-183(in Chinese).
- [3] 李登华, 林浩, 崔东霞, 等. 碳纤维复合材料单向板耐候性及湿热老化性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2018, 36(4): 535-540.  
LI Denghua, LIN Hao, CUI Dongxia, et al. Weathering resistance and damp heat aging performance of carbon fiber composite one-way board[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2018, 36(4): 535-540(in Chinese).
- [4] 李杉. 环境与荷载共同作用下 FRP 加固混凝土耐久性[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.  
LI Shan. Durability of concrete strengthened with FRP under environmental and loading conditions[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [5] LUAN H Y, FAN Y F, CHEN A, et al. Exploratory experimental study on flexural behavior of CFRP-reinforced concrete beams subjected to acidic loading effect[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2018, 21(14): 2184-2197.
- [6] 王苗, 吕桅桅, 王凯, 等. 武汉市酸雨变化特征及影响因子分析[J]. *气象*, 2019, 45(2): 282-289.  
WANG Miao, LYU Weiwei, WANG Kai, et al. Analysis on change characteristics and influencing factors of acid rain in Wuhan[J]. *Meteorology*, 2019, 45(2): 282-289(in Chinese).
- [7] 廖洁. 武汉市酸雨地区分布规律的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.  
LIAO Jie. Study on the distribution law of acid rain in Wuhan[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004(in Chinese).
- [8] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(5): 527-532.  
ZHANG Xinmin, CHAI Fahe, WANG Shulan, et al. Research progress of acid precipitation in China[J]. *Research of Environmental Science*, 2010, 23(5): 527-532(in Chinese).
- [9] MAHDIKHANI M, BAMSHAD O, SHIRVANI M. Mechanical properties and durability of concrete specimens containing nano silica in sulfuric acid rain condition[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 929-935.
- [10] 陆新征. FRP-混凝土界面行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.  
LU Xinzhen. Study on FRP concrete interface behavior[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004(in Chinese).
- [11] 邹今航, 叶斌, 陈永贵. 湿热环境下碳纤维增强复合材料加固钢筋混凝土梁的耐久性试验[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(33): 13839-13846.  
ZOU Jinhang, YE Bin, CHEN Yonggui. Durability performance experiment of reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced ploymer under wet-thermal environments[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(33): 13839-13846(in Chinese).
- [12] 余建伟, 杨勇新, 贾彬, 等. 湿热环境下碳纤维增强复合材料的耐久性试验研究[J]. *工业建筑*, 2017, 47(8): 175-178, 193.  
YU Jianwei, YANG Yongxin, JIA Bin, et al. Durability test of carbon fiber reinforced composites in hot and humid environments[J]. *Industrial Construction*, 2017, 47(8): 175-178, 193(in Chinese).
- [13] 薛维培, 刘晓媛, 姚直书, 等. 不同损伤源对玄武岩纤维增强混凝土孔隙结构变化特征的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(9): 2285-2293.  
XUE Weipei, LIU Xiaoyuan, YAO Zhishu, et al. Effects of different damage sources on pore structure change characteristics of basalt fiber reinforced concrete[J]. *Acta Materialia Composita Sinica*, 2020, 37(9): 2285-2293(in Chinese).
- [14] XUE W P, LIU X Y, JING W, et al. Experimental study and mechanism analysis of permeability sensitivity of mechanically damaged concrete to confining pressure[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 134: 106073.
- [15] 罗毅, 张翔, 郭馨艳. 湿热环境下预应力 CFRP 加固 RC 梁疲劳性能数值分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(10): 70-77.  
LUO Yi, ZHANG Xiang, GUO Xinyan. Numerical analysis of fatigue performance of prestressed CFRP reinforced RC beams in hydrothermal environment[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49(10): 70-77(in Chinese).
- [16] 万先虎. 高温干湿交替环境下 FRP-混凝土界面黏结性能的耐

- 久性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- WAN Xianhu. Study on durability of FRP concrete interface bonding performance under high-temperature dry wet alternate environment[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2013(in Chinese).
- [17] DU J, QU M, ZHANG Y, et al. Simulated sulfuric and nitric acid rain inhibits leaf breakdown in streams: A microcosm study with artificial reconstituted fresh water[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 196: 110535.
- [18] LU C F, WANG W, ZHOU Q S, et al. Mechanical behavior degradation of recycled aggregate concrete after simulated acid rain spraying[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121237.
- [19] 周昌林, 朱哲明, 朱爱军. 酸雨腐蚀对混凝土材料断裂特性的影响[J]. *工程科学与技术*, 2019, 51(1): 144-151.
- ZHOU Changlin, ZHU Zheming, ZHU Aijun. Effect of acid rain corrosion on fracture properties of concrete materials[J]. *Engineering Science and Technology*, 2019, 51(1): 144-151(in Chinese).
- [20] SUI L L, LUO M S, YU K Q, et al. Effect of engineered cementitious composite on the bond behavior between fiber reinforced polymer and concrete[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 775-788.
- [21] WU Z S, KIM Y J, DIAB H, et al. Recent developments in long-term performance of FRP composites and FRP-concrete interface[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2010, 13(2): 891-903.
- [22] 曹琛, 郑山锁, 胡卫兵. 酸雨环境下混凝土结构性能研究综述[J]. *材料导报*, 2019, 33(11): 1869-1874.
- CAO Chen, ZHENG Shansuo, HU Weibing. Summary of research on concrete structure performance under acid rain environment[J]. *Materials Reports*, 2019, 33(11): 1869-1874(in Chinese).
- [23] PAN Z Y, WANG S, LIU Y C, et al. The hydration pore structure and strength of cement-based material prepared with waste soaking solution from acetic acid treatment of regenerated aggregates[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 866-874.
- [24] RAGOUG R, METALSSI O O, BARBERON F, et al. Durability of cement pastes exposed to external sulfate attack and leaching: Physical and chemical aspects[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 116: 134-145.
- [25] 朵润民. 冻融循环和湿热环境下CFRP-高强混凝土粘贴界面耐久性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- DUO Runmin. Study on durability of CFRP high-strength concrete bonding interface under freeze-thaw cycles and humid and hot environments[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015(in Chinese).
- [26] 陈梦成, 罗晶, 许开成. 江西省酸雨特征分析及预测模型[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(10): 167-170.
- CHEN Mengcheng, LUO Jing, XU Kaicheng. Characteristic analysis and prediction model of acid rain in Jiangxi province[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 37(10): 167-170(in Chinese).
- [27] 方五军, 李伟文, 曹文昭. 深圳地区混凝土结构耐久性评定及影响因素分析[J]. *工业建筑*, 2020, 50(6): 117-122.
- FANG Wujun, LI Weiweng, CAO Wenzhao. Durability assessment and influence factor analysis of concrete structures in Shenzhen[J]. *Industrial Building*, 2020, 50(6): 117-122(in Chinese).
- [28] WU Z S, ISLAM S M, SAID H. A three-parameter bond strength model for FRP-concrete interface[J]. *Journal of Reinforced Plastic and Composite*, 2009, 28(19): 2309-2323.
- [29] TAKEO K, MATSUSHITA H, MAKIZUMI T, et al. Bond characteristics of CFRP sheets in the CFRP bonding technique[J]. *Japan Concrete Institution*, 1997, 1(1): 1599-1604.
- [30] 谭壮. GFRP布加固混凝土梁受力性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2022.
- TAN Zhuang. Experimental research for RC beam strengthened with GFRP[D]. China: Tsinghua University, 2002(in Chinese).
- [31] 王文伟. 纤维复合材料加固钢筋混凝土梁抗弯性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- WANG Wenwei. Research on flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with fiber composite materials[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003(in Chinese).
- [32] UEDA T, SATO Y, ASANO Y. Experimental study on bond strength of continuous carbon fiber sheet[J]. *ACI*, 1999, 63(3): 407-416.
- [33] NEUBAUER U, ROSTASY F S. Design aspects of concrete structures strengthened with externally bonded CFRP plates[J]. *ECS Public*, 1999, 2(1): 109-118.
- [34] MONTI M, RENZELI M, LUCIANI P. FRP adhesion in uncracked and cracked concrete zones[J]. *International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures*, 2003, 6(1): 183-192.