

## 氯盐侵蚀环境下液体橡胶改性CFRP-钢界面耐久性

庞育阳 吕远晨 王强

### Durability of CFRP-steel interface modified by liquid rubber under chlorine salt erosion

PANG Yuyang, LYU Yuanchen, WANG Qiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231110.001>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 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>

##### CFRP加固钢板的粘结界面剥离破坏

Interfacial debonding failure of CFRP-strengthened steel structures  
复合材料学报. 2021, 38(12): 4090–4105 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210317.003>

##### 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>

##### 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>

##### 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.20231110.001

# 氯盐侵蚀环境下液体橡胶改性 CFRP-钢界面耐久性



分享本文

庞育阳<sup>1</sup>, 吕远晨<sup>1</sup>, 王强<sup>\*2</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 2. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:** 设计了 54 个碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP)-钢双搭接试件, 研究了液体橡胶改性剂掺量和腐蚀龄期对 CFRP-钢改性界面在高温水浴和常温干湿循环两种氯盐侵蚀作用后力学性能的影响。结果表明: 在高温水浴及常温干湿循环作用下未改性试件分别呈现 CFRP 层间剥离破坏和钢/粘结剂界面剥离破坏, 而液体橡胶改性试件可将破坏模式转变为粘结剂内聚破坏, 其中 10wt% 液体橡胶提升界面耐久性效果最优, 在高温水浴和常温干湿循环氯盐侵蚀 180 天后, 试件极限荷载保留率相较未改性试件分别提升了 28.11% 和 29.94%。基于试验结果, 建立了适用于两种氯盐侵蚀环境下的改性界面粘结-滑移模型, 模型预测结果与试验结果吻合较好。

**关键词:** 氯盐侵蚀; 液体橡胶改性; CFRP 加固钢板; 粘结-滑移关系; 耐久性

中图分类号: TB333 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2024)06-3215-13

## Durability of CFRP-steel interface modified by liquid rubber under chlorine salt erosion

PANG Yuyang<sup>1</sup>, LYU Yuanchen<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>\*2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** Fifty-four carbon fiber reinforced resin composite (CFRP)-steel double lap specimens were designed to study the effects of liquid rubber modifier content and corrosion age on the mechanical properties of CFRP-steel modified interface under the erosion of two kinds of chlorine salts: High temperature water bath and dry-wet cycles at normal temperature. The results show that under the action of high temperature water bath and dry-wet cycles at normal temperature, the unmodified specimens show CFRP interlayer stripping failure and steel/binder interface stripping failure, respectively, while the liquid rubber modified specimens could transform the failure mode into adhesive cohesion failure, among which 10wt% liquid rubber has the best effect on improving interface durability. After 180 days of high temperature water bath and dry-wet cycles chloride salt erosion at normal temperature, the ultimate load retention rates of the specimens increase by 28.11% and 29.94%, respectively, compared with that of the unmodified specimens. Based on the experimental results, modified interface bond-slip models are established which are suitable for two kinds of chlorine salt erosion environments, and the predicted results are in good agreement with the experimental results.

**Keywords:** chloride erosion; liquid rubber modification; CFRP reinforced steel plate; bond-slip relationship; durability

收稿日期: 2023-08-19; 修回日期: 2023-11-02; 录用日期: 2023-11-03; 网络首发时间: 2023-11-13 16:30:55

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231110.001>

基金项目: 国家自然科学基金 (52008377); 中国博士后科学基金 (2021M692940); 河北省自然科学基金 (E2023202048)

National Natural Science Foundation of China (52008377); China Postdoctoral Science Foundation (2021M692940); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2023202048)

通信作者: 王强, 博士, 讲师, 研究方向为 FRP 筋增强混凝土结构、3D 打印混凝土轻量化结构 E-mail: [wangqiang@hebut.edu.cn](mailto:wangqiang@hebut.edu.cn)

引用格式: 庞育阳, 吕远晨, 王强. 氯盐侵蚀环境下液体橡胶改性 CFRP-钢界面耐久性 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(6): 3215-3227.

PANG Yuyang, LYU Yuanchen, WANG Qiang. Durability of CFRP-steel interface modified by liquid rubber under chlorine salt erosion[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(6): 3215-3227(in Chinese).

碳纤维增强树脂复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 因其轻质高强、耐久性优异<sup>[1-5]</sup>, 已被尝试应用于钢结构的粘结加固领域<sup>[6-8]</sup>。CFRP 与钢板间的粘结界面作为加固体系中的薄弱环节<sup>[9-13]</sup>, 其耐久性易受到高温和腐蚀性溶液的侵入而产生显著退化<sup>[14-20]</sup>。特别是在沿海地区, 由于氯离子的侵蚀, CFRP-钢界面常出现滑移或脱胶等现象, 从而导致加固体体系失效<sup>[21-23]</sup>。

为提升 CFRP-钢板界面耐久性, 有学者提出将液体橡胶掺入粘结剂进行改性增韧。梅雪<sup>[24]</sup>采用液体橡胶对环氧树脂进行增韧改性, 并对改性树脂进行冻融、湿热和盐浸等环境下的力学性能试验, 发现改性后环氧树脂的剪切和正拉粘结强度相较于改性前均有显著增长。Pang 等<sup>[25]</sup>研究了常温环境下液体橡胶掺入环氧树脂对 CFRP 板与钢粘结性能的影响。发现 CFRP 板的脱粘应变随粘结剂中液体橡胶质量百分比的增加而减小, 最终导致 CFRP-钢试件极限荷载减小。粘结剂中液体橡胶的掺入使粘结剂的粘接能力下降, 但在其含量不超过 10wt% 的情况下, 粘结剂的粘结性能保留率可达到 87.9%~103.7%。祁彪<sup>[26]</sup>研究了冻融循环下液体橡胶改性 CFRP-钢界面耐久性能。结果表明, 经过 200 次冻融循环后, 不同液体橡胶掺量 (0wt%、5wt%、10wt%、15wt%) 下试件的极限荷载分别下降了 16%、10%、4% 和 6%。

本文采用 Pang 等<sup>[25]</sup>的方法制备液体橡胶改性 CFRP-钢界面试件, 继续开展了氯盐侵蚀环境下的 CFRP-钢界面耐久性研究。然后, 基于试验结果和理论分析, 建立了两种侵蚀环境下 CFRP-钢改性界面粘结-滑移模型, 为 CFRP 加固钢结构在氯盐侵蚀下耐久性的提升和设计提供依据。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

试验所采用的钢板为热轧 Q235B, 厚度为 20 mm, CFRP 板由天津卡本科技集团股份有限公司提供, 厚度和宽度分别为 3 mm 和 20 mm。粘结剂采用天津卡本科技集团股份有限公司生产的碳纤维板胶, 环氧树脂与固化剂的质量比为 2:1, 试件的胶层厚度均为 1 mm, 改性胶中液体橡胶的添加量按照环氧树脂胶主剂质量百分比, 分别为 0wt%、5wt%、10wt% 和 15wt%, 下文中分别用 P0、P5、P10 和 P15 表示。粘结剂拉伸试件按照 GB/T 2567—2021<sup>[27]</sup> 制作, 参考规范 GB/T 228.1—2021<sup>[28]</sup>、

ASTM D3039/D3039M—08<sup>[29]</sup>、ASTM D638—10<sup>[30]</sup> 分别对 CFRP 板、钢板和粘结剂进行性能测试, 结果如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Material	Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Young's modulus/ GPa	Elongation/ %
Q235 steel plate	272	414	199	29.40
CFRP plate	—	2 423	180	1.60
P0	—	32.37	5.17	1.17
P5	—	31.15	5.00	1.20
P10	—	27.03	4.58	1.24
P15	—	24.22	4.20	1.26

Notes: CFRP—Carbon fiber reinforced polymer; The number 0, 5, 10, 15 after P indicates the amount of liquid rubber 0wt%, 5wt%, 10wt%, 15wt% in the modified rubber layer.

### 1.2 试件设计

考虑了氯盐侵蚀的龄期 (60 天、120 天、180 天) 和腐蚀环境 (高温水浴、常温干湿) 对液体橡胶改性 CFRP-钢界面性能的影响。试件几何尺寸见图 1, 试验方案细节见表 2。试件的制作过程为: 制作试件前, 对钢板表面进行喷砂处理, 采用细砂纸对 CFRP 板粘贴面进行轻微打磨; 使用无水乙醇清洗钢板粘贴面和 CFRP 板表面, 清除砂粒。待固化 3~4 h 之后, 清除 CFRP 板两侧多余的胶, 并在室温下养护 14 天后将应变片粘贴于 CFRP 板两侧, 应变片自持载端 5 mm 处开始, 均匀设置 8 个, 间距为 25 mm。

氯盐侵蚀环境采用加速侵蚀<sup>[31]</sup>进行模拟, 采用金城海澜仪器制造厂生产的 HH-900 型恒温水浴箱添加 5% 的 NaCl 溶液实现水浴氯盐侵蚀环境。其高温环境腐蚀制度为 20℃ 氯盐溶液浸泡 11 h、50℃ 浸泡 11 h, 温度循环周期为 24 h, 每个间隔的 1 h 以 0.5℃/min 的速率调整温度, 确保恒温条件<sup>[18]</sup>。常温干湿循环环境制度设置为 20℃ 氯盐溶液浸泡 11 h, 20℃ 烘干 11 h, 一个干湿循环周期为 24 h, 每个间隔的 1 h 用于抽水和放水。

### 1.3 试验装置与加载方式

试验装置如图 2 所示, 本文试件采用上海华龙测试仪器有限公司生产的量程为 1 000 kN 的伺服液压万能试验机加载。加载制度为位移控制, 速率为 0.18 mm/min。

## 2 试验结果和分析

试件的极限荷载及失效模式等列于表 2。

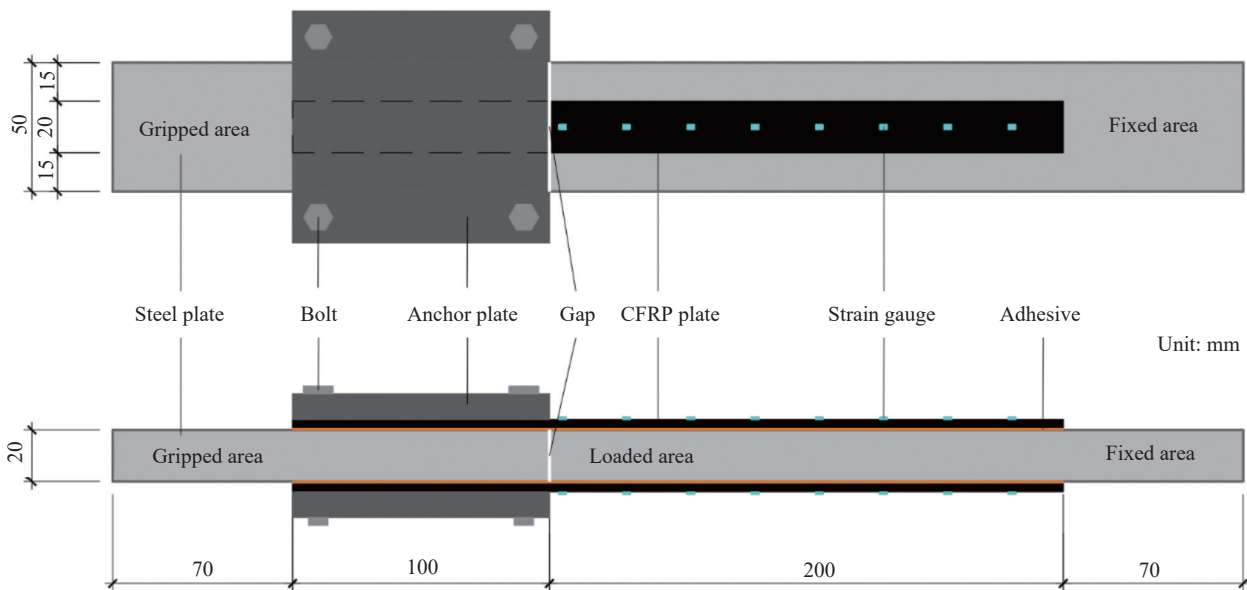


图1 试件尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen size

### 2.1 破坏模式

本文出现了粘结剂内聚破坏、CFRP层间剥离破坏、钢/粘结剂界面剥离破坏和CFRP板/粘结剂脱粘破坏。在常温未腐蚀环境下，对于未改性试件破坏模式为CFRP板层间剥离破坏，而改性试件则多为CFRP板/粘结剂脱粘和粘结剂内聚破坏，如图3所示。且随着液体橡胶掺量的增加，破坏模式由CFRP板层间剥离破坏向CFRP板/粘结剂界面混合破坏和粘结剂内聚破坏转变。这是由于掺入液体橡胶之后，粘结剂抗拉强度降低，界面破坏逐渐向粘结剂层发展<sup>[25]</sup>。

图4为高温水浴氯盐侵蚀下的破坏模式，未改性试件随着腐蚀龄期的增加，破坏模式由钢/粘结剂界面混合破坏转变为CFRP板层间剥离破坏，这是由于试件在溶液中浸泡，水分对于钢/粘结剂界面的影响小于后文的干湿循环环境中；改性试件破坏模式以粘结剂内聚破坏为主，且在粘结节点自由端附近的小区域存在少量CFRP层间剥离破坏。

图5为常温干湿循环氯盐侵蚀下的破坏模式。未改性试件均为钢/粘结剂界面剥离破坏，而改性试件呈现出钢/粘结剂界面混合破坏，且随着腐蚀龄期的增加，粘结剂出现渗水并逐渐脱粘。干湿循环氯盐侵蚀下会导致水分渗入粘结剂/钢界面，进而影响胶体与钢板之间的粘结。

### 2.2 极限荷载

高温水浴氯盐侵蚀下腐蚀龄期和液体橡胶掺

量对试件极限荷载的影响如图6所示。总体上，未改性试件和5wt%、10wt%液体橡胶掺量的改性试件的极限荷载随腐蚀龄期增加先上升后下降，15wt%液体橡胶掺量试件的极限荷载随腐蚀龄期增加而下降；60天后，未改性试件和5wt%、10wt%液体橡胶掺量改性试件的极限荷载分别上升4.95%、11.80%和12.71%，10wt%液体橡胶掺量对于试件极限荷载提升效果最优。极限荷载上升是由于水分进入粘结剂后促进了后固化，而15wt%液体橡胶掺量试件的极限荷载下降了3.68%，则是由于过高的掺量引起了液体橡胶团聚降低了界面粘结性能<sup>[25, 32]</sup>；120天和180天后，改性试件相较于未改性试件的极限荷载保留率分别提升了24.91%和28.11%，这是由于橡胶颗粒能够与粘结剂分子链产生交联作用，延缓水分在粘结剂中的扩散速度<sup>[24]</sup>。

常温干湿循环氯盐侵蚀下腐蚀龄期和液体橡胶掺量对试件极限荷载的影响如图7所示。在60天、120天和180天后，改性试件的极限荷载保留率相比未改性试件分别提升了10.46%、32.88%和29.94%。改性试件有效延缓了CFRP-钢试件在常温干湿循环氯盐侵蚀下对极限荷载产生的不利影响。

### 2.3 CFRP板表面应变分布

#### 2.3.1 常温未腐蚀试件

图8为常温未腐蚀CFRP板表面应变分布。荷载加载过程中，CFRP板应变分布主要集中在

表 2 试件参数和试验结果

Table 2 Scheme of test program and results

Specimen	Exposure time/d	Liquid rubber content/wt%	Ultimate load/kN	Average load/kN	Failure mode	Specimen	Exposure time/d	Liquid rubber content/wt%	Ultimate load/kN	Average load/kN	Failure mode
A0-0-1			88.90		b	B120-10-1			85.86		a
A0-0-2		0	91.47	87.22	b	B120-10-2	120	10	88.20	84.84	a
A0-0-3			81.29		b	B120-10-3			80.45		a
A0-5-1			84.01		a+d	B180-0-1			59.10		b
A0-5-2		5	76.23	78.63	a+d	B180-0-2		0	58.97	58.36	b
A0-5-3			75.65		a+d	B180-0-3			57.02		b
A0-10-1		0	81.89		a	B180-10-1	180		73.73		a
A0-10-2		10	75.15	76.79	a	B180-10-2		10	70.53	72.97	a
A0-10-3			73.33		a	B180-10-3			74.66		a
A0-15-1			79.33		a	C60-0-1			82.31		c
A0-15-2		15	76.13	76.20	a	C60-0-2		0	70.83	77.63	c
A0-15-3			73.15		a	C60-0-3			79.75		c
B60-0-1			89.19		a+c	C60-10-1	60		74.22		a+c
B60-0-2		0	88.65	91.54	a+c	C60-10-2		10	75.89	76.38	a+c
B60-0-3			96.77		a+c	C60-10-3			79.02		a+c
B60-5-1			87.79		a+c	C120-0-1			53.45		c
B60-5-2		5	88.81	87.91	a+c	C120-0-2		0	56.37	54.83	c
B60-5-3			87.12		a+c	C120-0-3			54.67		c
B60-10-1		60	84.67		a	C120-10-1	120		71.14		a+c
B60-10-2		10	89.51	86.55	a	C120-10-2		10	75.06	73.52	a+c
B60-10-3			85.48		a	C120-10-3			74.35		a+c
B60-15-1			76.63		a	C180-0-1			49.04		c
B60-15-2		15	69.08	73.39	a	C180-0-2		0	50.80	49.70	c
B60-15-3			74.47		a	C180-0-3		180	49.26		c
B120-0-1			73.56		b	C180-10-1			65.02		a+c
B120-0-2	120	0	71.93	74.64	b	C180-10-2		10	66.76	66.75	a+c
B120-0-3			78.43		b	C180-10-3			68.46		a+c

Notes: Rules of specimen label "\*\*\*\*-\*\*\*-\*\*\*": Characters before the first "-"—Chloride corrosion environments and corrosion time; Characters between the two "-"—Liquid rubber content; Character after the second "-"—Serial number of the specimen in each group; A—Normal temperature control group; B—High temperature water bath chloride environments; C—Normal temperature wet-dry cycles chloride environments; Failure modes: a—Cohesion failure in adhesive; b—CFRP plate delamination; c—Steel and adhesive debonding failures; d—CFRP plate and adhesive debonding failure.

CFRP 板端部，随着荷载增加，峰值应变和剪应力的传递范围也增大。当荷载达到稳定后，开始进入剥离阶段，此时荷载基本保持不变。在 0wt% 和 5wt% 液体橡胶掺量的试件中，CFRP 板端部的峰值应变达到最大剥离应变后，界面发生剥离现象。而在 10wt% 和 15wt% 液体橡胶掺量的试件中，CFRP 板峰值应变开始向自由端传递，表明界面剪应力传递范围增加，界面的延性明显提高。随着液体橡胶掺量的增加，界面峰值应变先减小后小幅上升，而 10wt% 液体橡胶掺量对应界面的剪应力传递范围最大。

### 2.3.2 高温水浴氯盐侵蚀试件

图 9 为高温水浴氯盐侵蚀下 CFRP 板表面应变分布。在未剥离阶段所有类型试件规律与常温未

腐蚀试件相同。在剥离阶段，10wt% 液体橡胶掺量改性试件具有最高的剥离应变，并且在改性试件中界面剪应力传递范围增大有利于提高界面延性。随着腐蚀龄期的增长，未改性试件的剥离过程变短，120 天和 180 天后，未改性试件的最大剥离应变减小，改性试件的最大剥离应变基本不变，在远离 CFRP 板端部的粘结区域均存在更大的界面剪应力。

### 2.3.3 常温干湿循环氯盐侵蚀试件

图 10 为常温干湿循环下 CFRP 板表面应变分布。在未剥离阶段所有类型试件规律与常温未腐蚀和高温水浴氯盐侵蚀下的试件相同。在腐蚀 60 天后，所有试件在剥离阶段均出现剪应力向自由端传递的现象，随着腐蚀时间变长，钢/粘结剂界



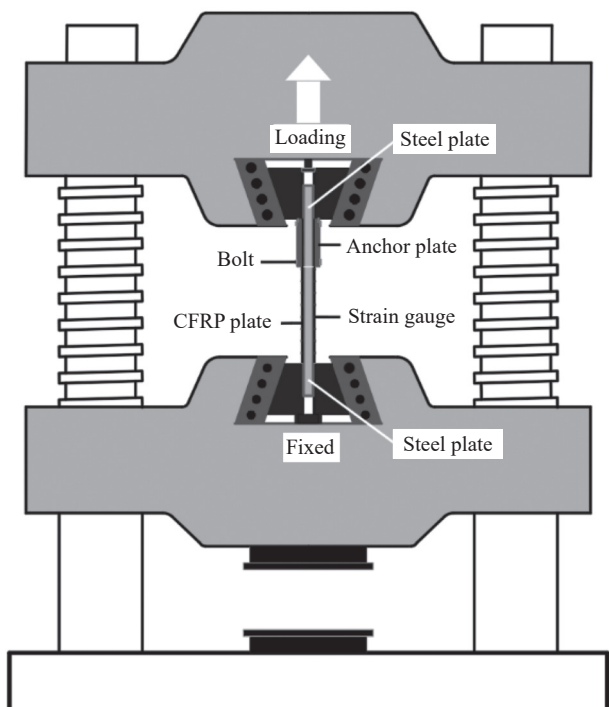


图2 试验装置  
Fig. 2 Experimental setup

面损伤逐渐累积, 导致 CFRP 板应变出现快速下降。120 天和 180 天后, 未改性试件中 CFRP 板应变在 5 mm 位置处出现下降, 其他位置应变均匀上升的情况; 改性后的试件剪应力向自由端传递, 剥离应变的增大。由 CFRP 板应变分布及最大剥离应变的变化规律可知, 远离加载端的粘结区域均存在更大的界面剪应力。液体橡胶改性界面剪应力传递范围提高, CFRP-钢界面粘结性能保留

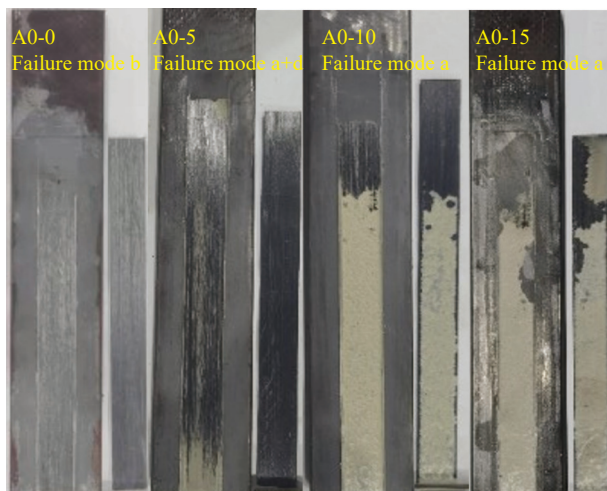


图3 常温未腐蚀 CFRP-钢界面破坏模式  
Fig. 3 Failure mode of CFRP-steel interface without corrosion at normal temperature

率提升。

## 2.4 粘结-滑移关系

### 2.4.1 界面粘结-滑移关系的确定方法

本文对 CFRP 板应变进行差分 and 积分获取粘结界面的剪应力和相对滑移<sup>[33-35]</sup>, 由前文试验结果和分析并结合下式计算界面剪应力与 CFRP-钢试件界面的相对滑移得到典型试件 B120-0-1 的粘结-滑移曲线:

$$\tau(x) = t_f E_f \frac{d\varepsilon_f(x)}{dx} \tag{1}$$

式中:  $\tau(x)$  是  $x$  位置处界面剪应力;  $t_f$  是 CFRP 板的厚度;  $E_f$  是 CFRP 板的弹性模量;  $\varepsilon_f(x)$  是  $x$  位置处 CFRP 板应变。

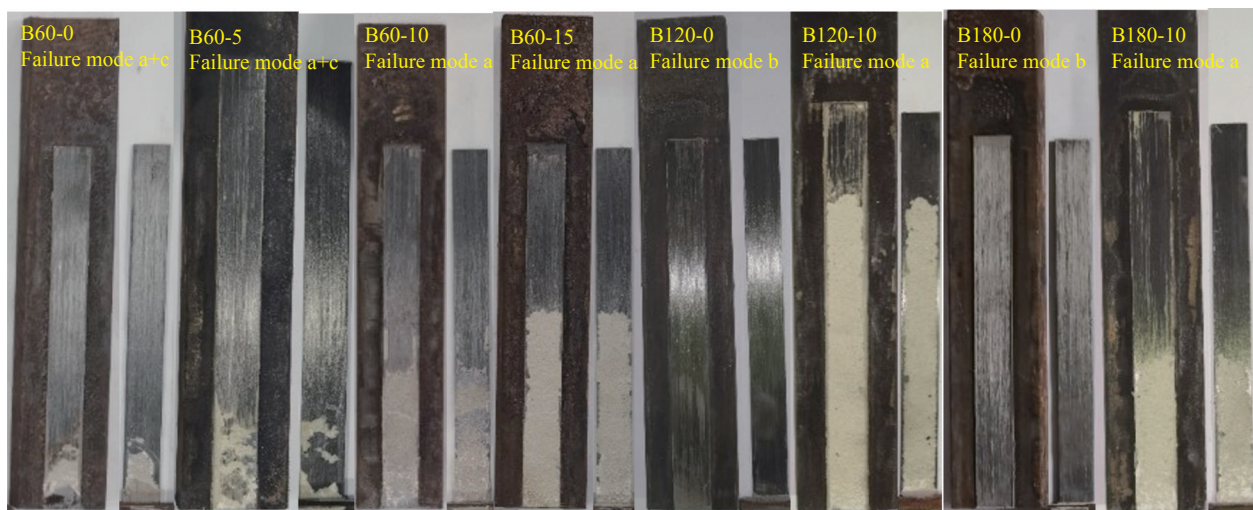


图4 高温水浴氯盐侵蚀下 CFRP-钢界面破坏模式  
Fig. 4 Failure mode of CFRP-steel interface after high temperature water bath chloride erosion

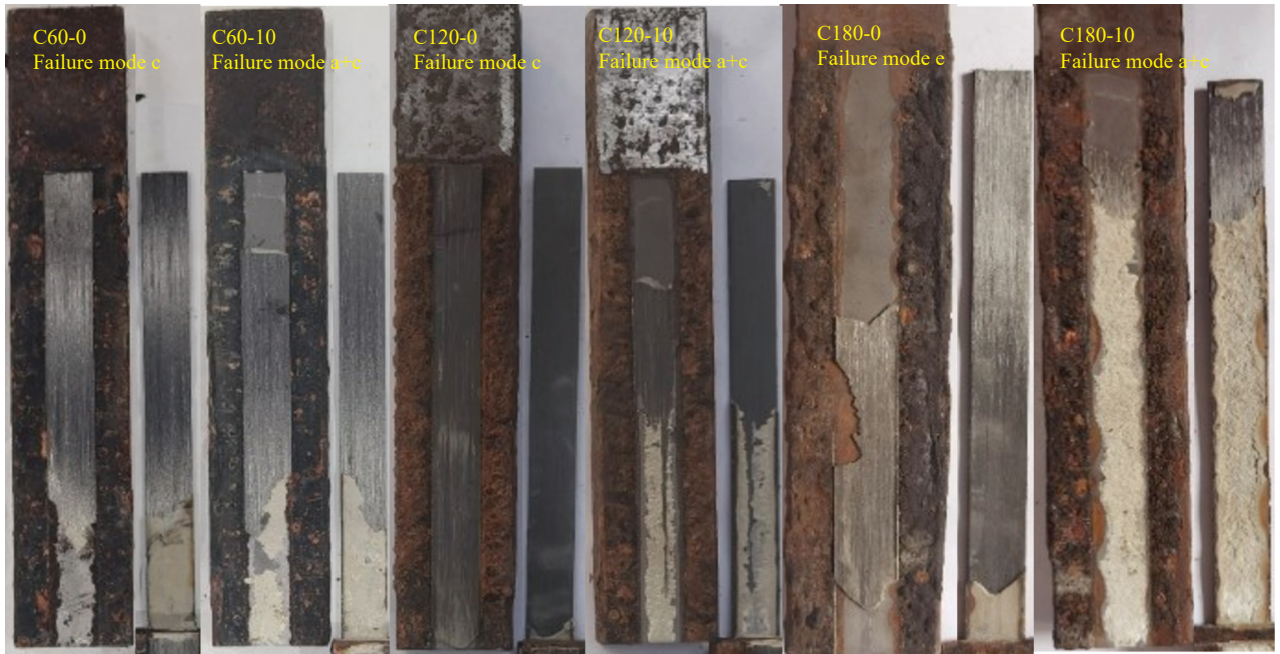


图5 常温干湿循环下的 CFRP-钢界面破坏模式

Fig. 5 Failure mode of CFRP-steel interface after normal temperature wet-dry cycles

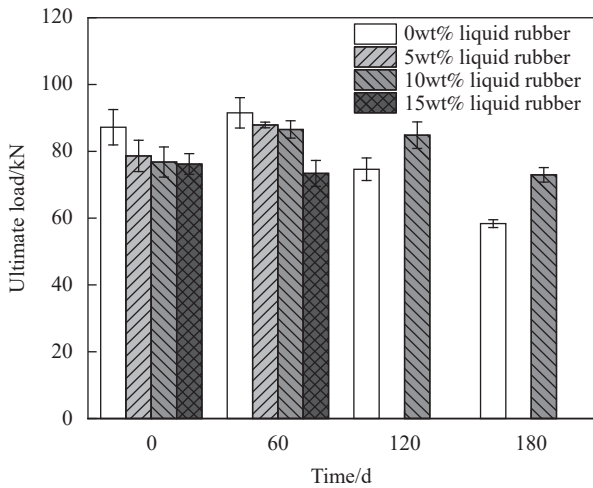


图6 高温水浴氯盐侵蚀下 CFRP-钢试件极限荷载

Fig. 6 Ultimate load of CFRP-steel specimens after chlorinated salt erosion in high temperature water bath

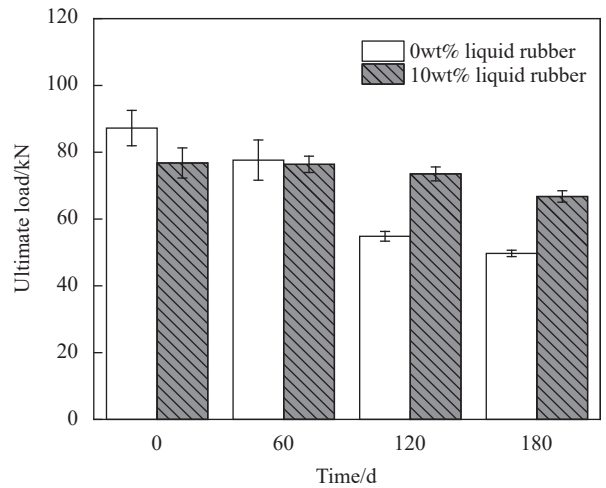


图7 常温干湿循环下 CFRP-钢试件极限荷载

Fig. 7 Ultimate load of CFRP-steel specimens after normal temperature wet-dry cycles

CFRP-钢试件界面的相对滑移:

$$S(x_{i+1/2}) = U_{CFRP}(x_{i+1/2}) - U_{steel}(x_{i+1/2}) \quad (2)$$

式中:  $S(x_{i+1/2})$  是第  $i$  个应变片和第  $i+1$  个应变片中间位置处的相对滑移;  $U_{CFRP}(x_{i+1/2})$  和  $U_{steel}(x_{i+1/2})$  分别是第  $i$  个应变片和第  $i+1$  个应变片中间位置处的 CFRP 板滑移和钢板滑移。

#### 2.4.2 高温水浴氯盐侵蚀下界面粘结-滑移关系

未改性试件破坏模式随腐蚀龄期的增加发生改变,且在界面达到最大剪应力后发生破坏,未

能得到完整的粘结-滑移关系曲线,故本文不再讨论。而改性试件在高温水浴氯盐侵蚀下发生内聚破坏,可以利用式(1)与式(2)得到试件 B120-10-1 的粘结-滑移曲线,剪应力出现上升-不变-下降的趋势。

由前文可知 10wt% 液体橡胶掺量提升界面粘结性能保留率效果最优,本文对具有相同破坏模式的改性试件随腐蚀龄期变化的粘结-滑移关系进行统一分析。

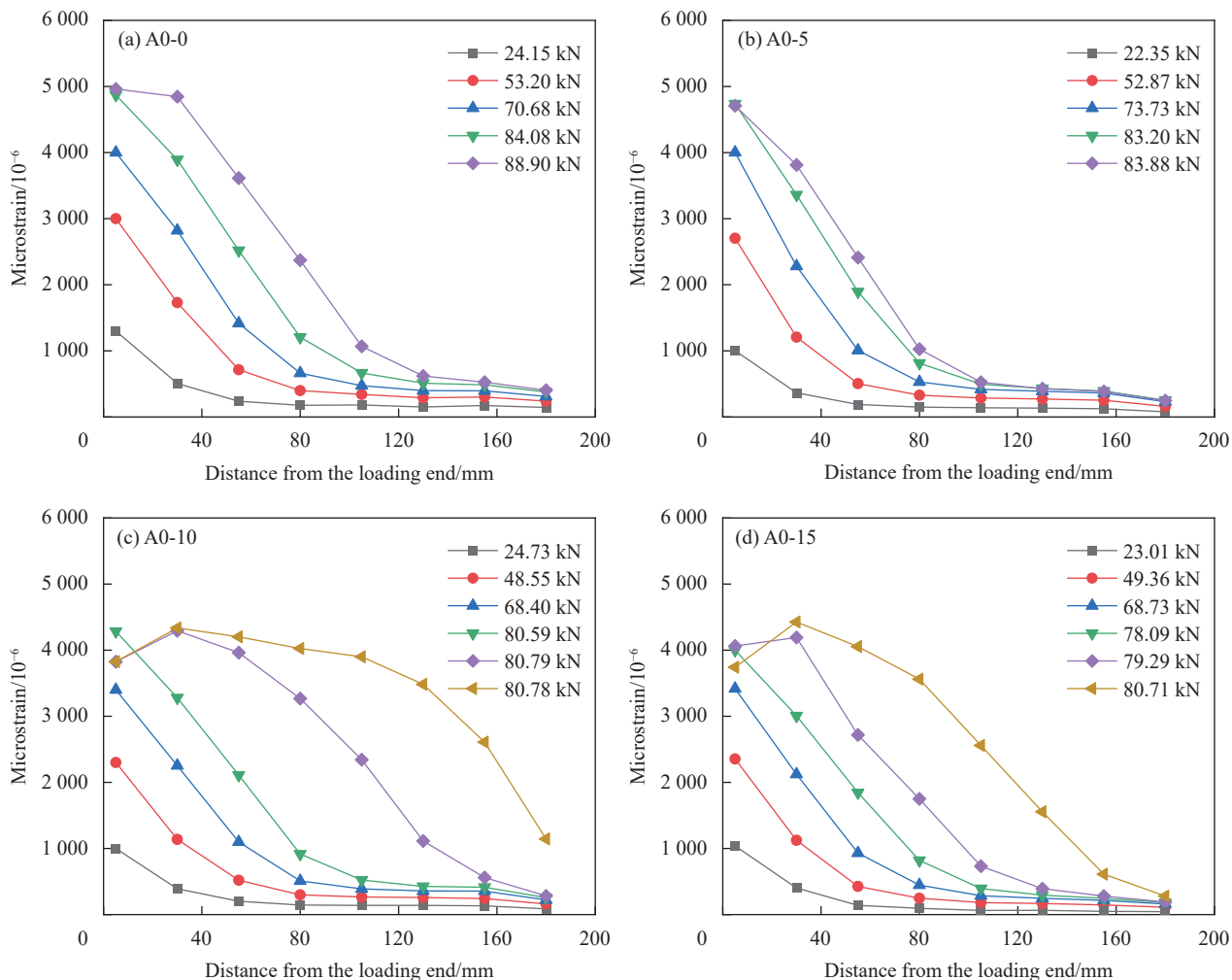


图 8 常温未腐蚀 CFRP 板表面应变分布

Fig. 8 Strain distributions on CFRP plates without corrosion at normal temperature

图 11 是不同腐蚀龄期下改性界面典型的粘结-滑移关系, 分为 3 个阶段: 初始阶段, 界面剪应力与相对滑移线性增加; 平台阶段, 剪应力基本不变而相对滑移增加; 下降阶段, 界面剪应力随着相对滑移的增加逐渐减小到 0。

界面粘结-滑移关系简化为三折线模型, 其关系式如下:

$$\tau = \begin{cases} \tau_{\max} \frac{S}{S_1}, & S < S_1 \\ \tau_{\max}, & S_1 < S < S_2 \\ \tau_{\max} \frac{S_f - S}{S_f - S_2}, & S_2 < S < S_f \\ 0, & S > S_f \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\tau$  是界面局部剪应力;  $S$  是界面相对滑移值;  $\tau_{\max}$  是界面最大剪应力;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_f$  是界面相对滑移值的特征点。

由图 11 和式 (3) 可知, 三折线粘结-滑移模型

主要由界面最大剪应力和 3 个界面相对滑移值的特征点这 4 个关键参数来定义。基于不同腐蚀龄期作用下改性试件的粘结-滑移关系, 采用分段线性拟合, 得到了关键参数值, 判定系数  $R^2$  的平均值为 0.9442。现有研究表明<sup>[36]</sup>, 界面断裂能决定了界面的极限荷载, 其为粘结-滑移曲线对  $x$  轴的积分面积, 两者关系可由下式表示:

$$P_u = 2b_f \sqrt{2G_f E_f t_f (1 + \xi)} \quad (4)$$

式中:  $b_f$  是 CFRP 板的宽度;  $G_f$  是界面的断裂能;  $\xi$  是 CFRP 板和钢板的刚度比, 即  $t_f b_f E_f / 0.5 t_s b_s E_s$  ( $t_s$ 、 $b_s$ 、 $E_s$  分别为钢板的厚度、宽度和弹性模量)。将试验得到的界面断裂能代入式 (4) 中即可求得试件的极限荷载预测值, 表 3 列出了基于试验数据拟合得到的粘结-滑移关系中的关键参数值和极限荷载预测值。极限荷载试验值与预测值比值的平均值为 0.96, 变异系数为 0.02。



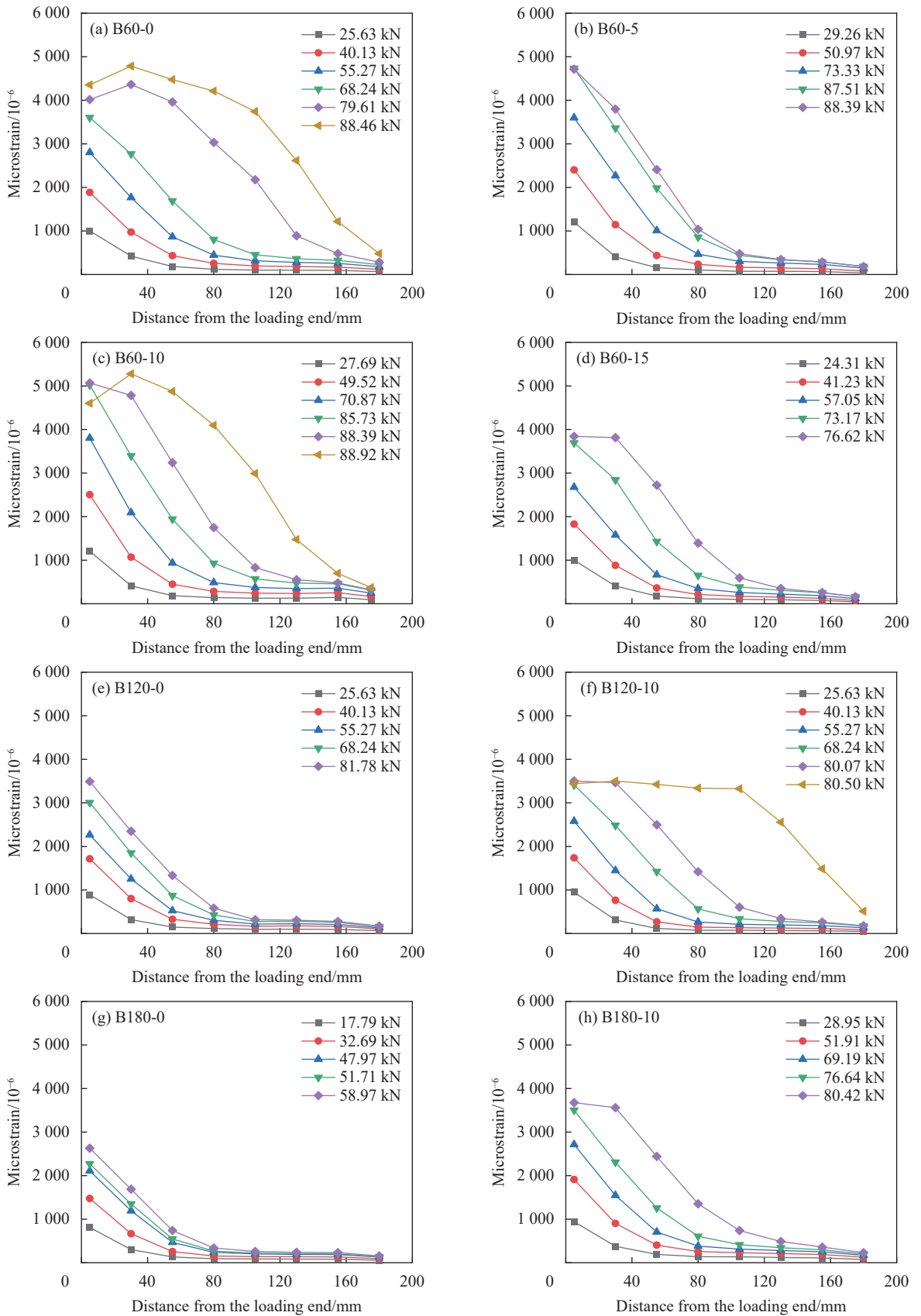


图9 高温水浴氯盐侵蚀下CFRP板表面应变分布

Fig. 9 Strain distributions on CFRP plates after chlorinated salt erosion after high temperature water bath

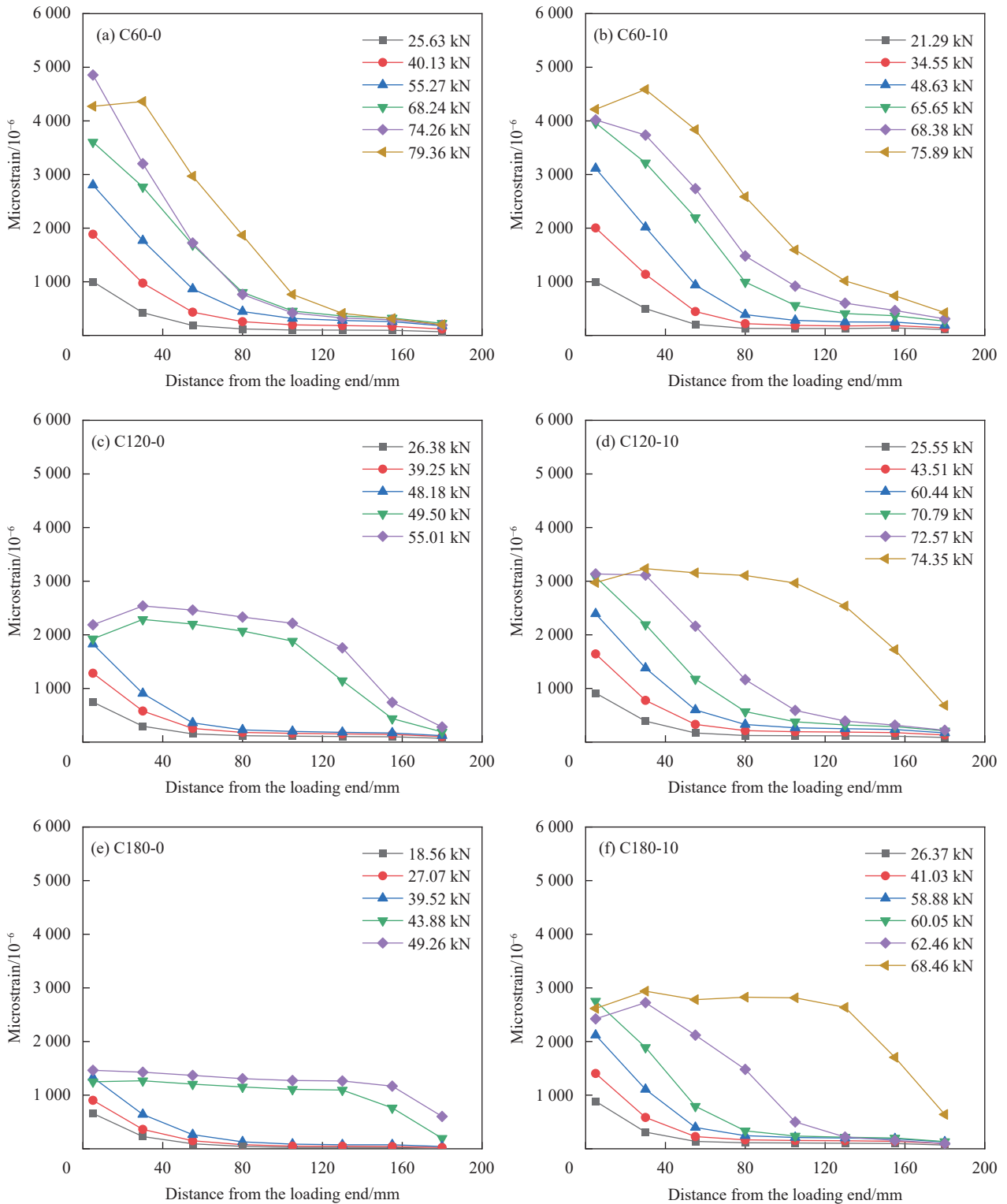


图 10 常温干湿循环下 CFRP 板表面应变分布

Fig. 10 Strain distribution on CFRP plates after wet-dry cycles at normal temperature

### 2.4.3 常温干湿循环氯盐侵蚀下界面粘结-滑移关系

常温干湿循环氯盐侵蚀与高温水浴氯盐侵蚀

类似, 本文对具有相同破坏模式的 10wt% 液体橡胶掺量 CFRP-钢界面随腐蚀龄期变化的粘结-滑移关系进行统一分析。

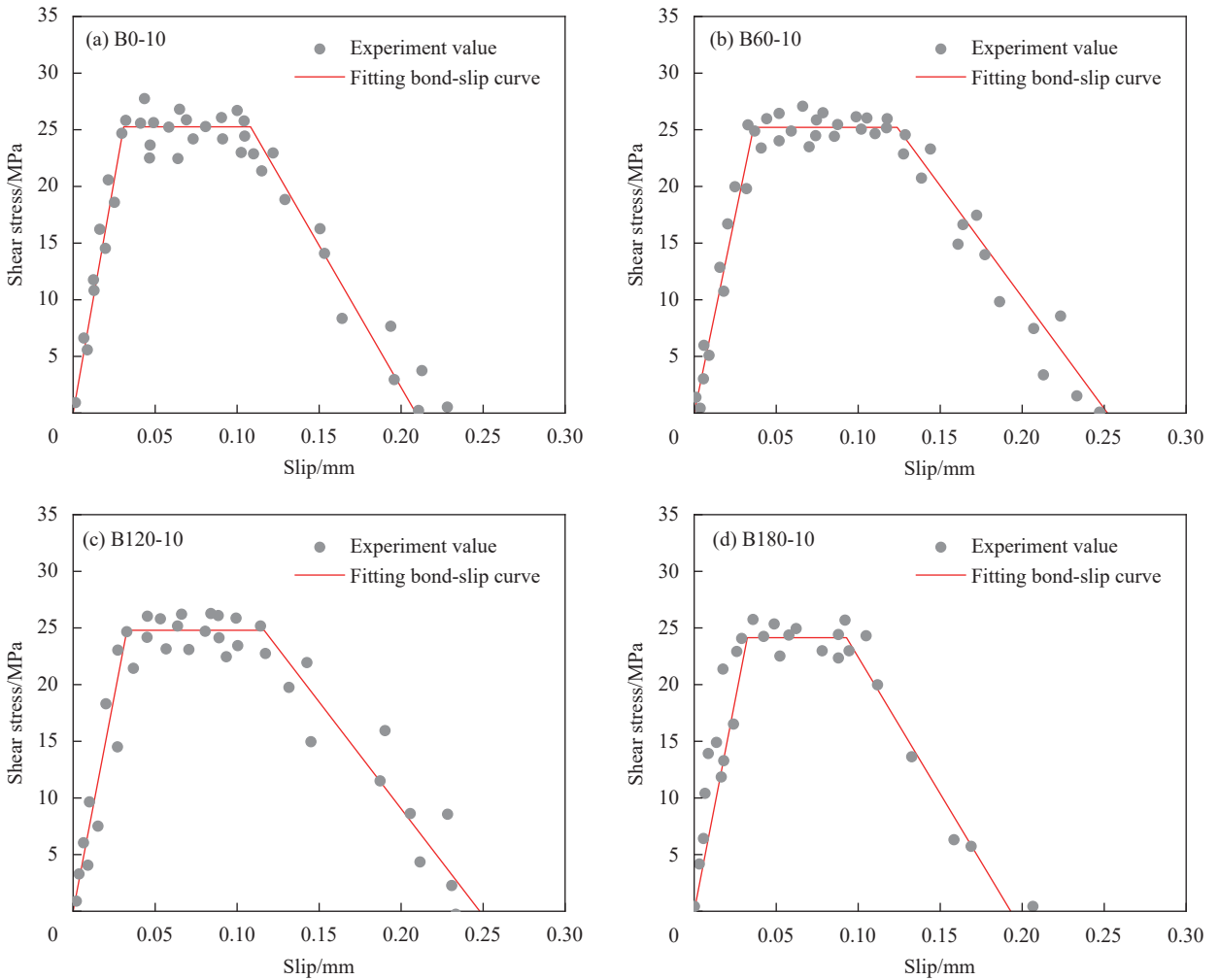


图 11 高温水浴环境下典型 CFRP-钢改性界面的粘结-滑移关系

Fig. 11 Bond-slip relationship of typical CFRP-steel modified interface after high temperature water bath

表 3 高温水浴下 CFRP-钢改性界面模型参数

Table 3 Model parameters of CFRP-steel modified interface after high temperature water bath

Specimen	$\tau_{max}/\text{MPa}$	$S_1/\text{mm}$	$S_2/\text{mm}$	$S_f/\text{mm}$	$G_f/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	$P_{u,exp}/\text{kN}$	$P_{u,pre}/\text{kN}$	$P_{u,exp}/P_{u,pre}$
B0-10-1	25.16	0.0309	0.109	0.210	3.62	81.89	83.27	0.98
B0-10-2	25.06	0.0308	0.108	0.209	3.60	75.15	83.04	0.91
B0-10-3	25.26	0.0309	0.108	0.205	3.56	73.33	82.58	0.89
B60-10-1	25.21	0.0362	0.124	0.252	4.28	84.67	90.55	0.94
B60-10-2	25.12	0.0352	0.123	0.259	4.36	89.51	91.39	0.98
B60-10-3	25.16	0.0358	0.123	0.258	4.35	85.48	91.28	0.94
B120-10-1	24.93	0.0335	0.115	0.245	4.07	85.86	88.30	0.97
B120-10-2	24.80	0.0328	0.117	0.248	4.11	88.20	88.73	0.99
B120-10-3	24.85	0.0330	0.114	0.247	4.08	80.45	88.41	0.91
B180-10-1	24.14	0.0324	0.093	0.193	3.06	73.73	76.56	0.96
B180-10-2	24.28	0.0318	0.088	0.187	2.97	70.53	75.43	0.93
B180-10-3	24.32	0.0320	0.095	0.182	2.98	74.66	75.55	0.99

Notes:  $\tau_{max}$ —Interface maximum shear stress;  $S_1$ ,  $S_2$  and  $S_f$ —Characteristic points of the relative slip value of the interface;  $G_f$ —Fracture energy of the interface;  $P_{u,exp}$ —Experimental value of bearing capacity;  $P_{u,pre}$ —Predicted value of bearing capacity.

图 12 为常温干湿环境下典型 CFRP-钢改性界面的粘结-滑移关系曲线。常温干湿循环氯盐侵蚀

下的改性界面的粘结-滑移曲线仍遵循上述三折线模型，由表 4 可知 4 个关键参数值试验结果与模

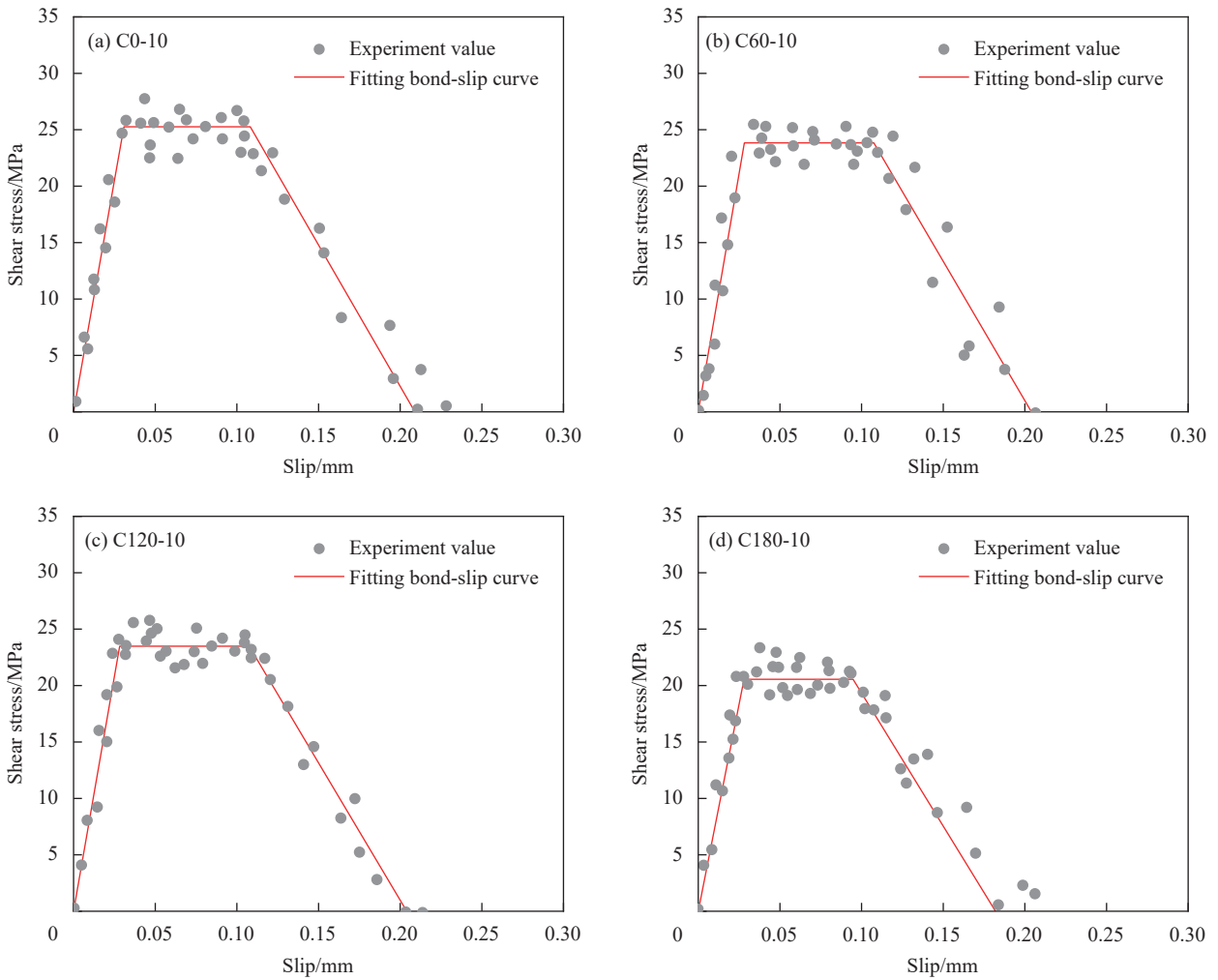


图 12 常温干湿环境下典型 CFRP-钢改性界面的粘结-滑移关系

Fig. 12 Bond-slip relationship of typical CFRP-steel modified interface after normal temperature wet-dry cycles

表 4 常温干湿循环下 CFRP-钢改性界面模型参数

Table 4 Model parameters of CFRP-steel modified interface after normal temperature wet-dry cycles

Specimen	$\tau_{max}/\text{MPa}$	$S_1/\text{mm}$	$S_2/\text{mm}$	$S_f/\text{mm}$	$G_f/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	$P_{u,exp}/\text{kN}$	$P_{u,pre}/\text{kN}$	$P_{u,exp}/P_{u,pre}$
C60-10-1	23.88	0.0284	0.107	0.198	3.31	74.22	79.63	0.93
C60-10-2	23.84	0.0283	0.108	0.204	3.38	75.89	80.46	0.94
C60-10-3	23.86	0.0283	0.106	0.205	3.37	79.02	80.35	0.98
C120-10-1	23.45	0.0281	0.100	0.191	3.08	71.14	76.81	0.93
C120-10-2	23.48	0.0280	0.101	0.194	3.15	75.06	77.68	0.97
C120-10-3	23.51	0.0280	0.102	0.195	3.16	74.35	77.80	0.96
C180-10-1	20.56	0.0281	0.095	0.182	2.59	65.02	70.44	0.92
C180-10-2	20.53	0.0280	0.096	0.181	2.56	66.76	70.03	0.95
C180-10-3	20.58	0.0279	0.096	0.179	2.54	68.46	69.75	0.98

型预测结果吻合较好,  $R^2$  的平均值为 0.9134。极限荷载预测值与试验值平均比值为 0.94, 变异系数为 0.03。

### 3 结论

(1) 在高温水浴氯盐侵蚀下, 未改性试件的破坏模式为碳纤维增强树脂复合材料 (CFRP) 层间剥

离破坏, 界面性能尚未充分发挥, 而掺液体橡胶的改性 CFRP-钢试件破坏模式为粘结剂内聚破坏, 界面剪应力分布更加均匀, 传递范围增大, 界面延性得到提升。在腐蚀龄期达到 120 天和 180 天后, 改性试件极限荷载保留率分别提升了 24.91% 和 28.11%。



(2) 在常温干湿循环氯盐侵蚀下, 未改性试件的破坏模式为钢/粘结剂界面剥离破坏, 液体橡胶改性试件破坏模式为粘结剂内聚破坏和钢/粘结剂界面混合破坏。改性试件的界面剪应力分布与高温水浴环境下的改性试件相似, 在腐蚀龄期 60 天、120 天和 180 天后, 改性试件的极限荷载保留率比未改性试件分别提升了 10.46%、32.88% 和 29.94%。

(3) 高温水浴及常温干湿循环氯盐侵蚀下液体橡胶改性试件的粘结-滑移关系均为三折线形状, 根据试验结果建立了统一模型, 并分别对其关键参数进行标定, 为 CFRP 加固钢结构在氯盐侵蚀下耐久性的优化设计提供依据。

### 参考文献:

- [1] WANG H T, LIU S S, ZHU C Y, et al. Experimental study on the flexural behavior of large-scale reinforced concrete beams strengthened with prestressed CFRP plates[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2022, 26(6): 04022076.
- [2] ZHAO X L, ASCE F, BAI Y, et al. Effect of dynamic loading and environmental conditions on the bond between CFRP and steel: State-of-the-art review[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2014, 18(3): 318-320.
- [3] YU Q Q, WU Y F. Fatigue retrofitting of cracked steel beams with CFRP laminates[J]. *Composite Structures*, 2018, 192: 232-244.
- [4] HU L L, LI M Y, YILIYAER T, et al. Strengthening of cracked DH36 steel plates by CFRP sheets under fatigue loading at low temperatures[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 243: 110203.
- [5] 李趁趁, 于爱民, 高丹盈, 等. 侵蚀环境下 FRP 条带加固锈蚀钢筋混凝土圆柱轴心受压试验 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(8): 2015-2028.  
LI Chenchen, YU Aimin, GAO Danying, et al. Experimental study on axial compression of corroded reinforced concrete columns strengthened with FRP strips under erosion environment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(8): 2015-2028(in Chinese).
- [6] WANG H T, BIAN Z N, CHEN M S, et al. Flexural strengthening of damaged steel beams with prestressed CFRP plates using a novel prestressing system[J]. *Engineering Structures*, 2023, 284: 115953.
- [7] AL-MOSAWE A, AL-MAHAIDI R. Performance of CFRP-steel joints enhanced with bidirectional CFRP fabric[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 197(10): 72-82.
- [8] WANG Q, ZHU H, TENG F, et al. Experimental and analytical studies of the bond between ribbed CFRP bar and aluminum alloy additional ribs anchorage[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 290: 109504.
- [9] PANG Y Y, LI Z Q, WANG Q, et al. Durability of the liquid rubber-modified CFRP-steel interface under freeze-thaw cycles[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(2): 1067-1081.
- [10] BORRIE D, AL-SAAD S, ZHAO X L, et al. Effects of CNT modified adhesives and silane chemical pretreatment on CFRP/steel bond behaviour and durability[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273: 121803.
- [11] 李传习, 柯璐, 陈卓异, 等. CFRP-钢界面粘结性能试验与数值模拟 [J]. *复合材料学报*, 2018, 35(12): 3534-3546.  
LI Chuanxi, KE Lu, CHEN Zhuoyi, et al. Experimental and numerical simulation of interfacial bonding properties of CFRP-steel[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(12): 3534-3546(in Chinese).
- [12] HE J, XIAN G. Debonding of CFRP-to-steel joints with CFRP delamination[J]. *Composite Structures*, 2016, 153: 12-20.
- [13] 李传习, 高有为, 王孝耀, 等. 自研高性能胶胶粘 CFRP-钢界面性能的温度影响机制 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(2): 925-936.  
LI Chuanxi, GAO Youwei, WANG Xiaoyao, et al. Effect mechanism of temperature on the interface properties of CFRP-steel bonded by self-developed adhesive[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(2): 925-936(in Chinese).
- [14] 李传习, 曹先慧, 柯璐, 等. 高温对结构加固用环氧黏结剂力学性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3): 642-649.  
LI Chuanxi, CAO Xianhui, KE Lu, et al. Effects of high temperatures on the mechanical properties of epoxy adhesives for structural strengthening[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3): 642-649(in Chinese).
- [15] 陈卓异, 彭彦泽, 李传习, 等. 高温下双搭接钢-CFRP 板胶界面力学性能试验 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(2): 449-460.  
CHEN Zhuoyi, PENG Yanze, LI Chuanxi, et al. Experimental study for the adhesive interface mechanical properties of double lapped steel CFRP plate at high temperature[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(2): 449-460(in Chinese).
- [16] ZHANG J Y, QI D X, ZHOU L W, et al. A progressive failure analysis model for composite structures in hygrothermal environments[J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 331342.
- [17] YANG Y, BISCAIA H, SILVA M A G, et al. Monotonic and quasistatic cyclic bond response of CFRP-to-steel joints after salt fog exposure[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 168: 532-549.
- [18] NGUYEN T C, BAI Y, ZHAO X L, et al. Durability of steel/CFRP double strap joints exposed to sea water, cyclic tem-

- perature and humidity[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(5): 1834-1845.
- [19] BORRIE D, LIU H B, ZHAO X L, et al. Bond durability of fatigued CFRP-steel double-lap joints pre-exposed to marine environment[J]. *Composite Structures*, 2015, 131: 799-809.
- [20] DAWOOD M, RIZKALLA S. Environmental durability of a CFRP system for strengthening steel structures[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24: 1682-1689.
- [21] 余倩倩, 赵翊舟, 高瑞鑫. 海洋大气环境对 CFRP-钢界面粘结性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2022, 39(11): 5148-5157.  
YU Qianqian, ZHAO Yizhou, GAO Ruixin. Effect of marine atmosphere on the bond behaviour of CFRP-steel interface[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(11): 5148-5157(in Chinese).
- [22] WANG Y, ZHENG Y, LI J, et al. Experimental study on tensile behaviour of steel plates with centre hole strengthened by CFRP plates under marine environment[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018, 84: 18-26.
- [23] WANG Y, LI J, DENG J, et al. Bond behaviour of CFRP/steel strap joints exposed to overloading fatigue and wetting/drying cycles[J]. *Engineering Structures*, 2018, 172: 1-12.
- [24] 梅雪. CFRP 加固混凝土用粘结材料的增韧及耐久性研究 [D]. 北京: 清华大学, 2005.  
MEI Xue. Study on the toughening and durability of adhesive materials used for strengthening concrete structure with CFRP[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005(in Chinese).
- [25] PANG Y Y, LI Z Q, WANG Q, et al. Effects of the liquid rubber modified adhesive on the bond-slip response of the CFRP-steel interface[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 66: 105857.
- [26] 祁彪. CFRP-钢界面改性及冻融环境作用下耐久性研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2022.  
QI Biao. CFRP-steel interface modification and durability under freeze-thaw environment[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2022(in Chinese).
- [27] 中国建筑材料联合会. 树脂浇铸体性能试验方法: GB/T 2567—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
China Federation of Building Materials. Test method for the performance of resin castings: GB/T 2567—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021(in Chinese).
- [28] 中国钢铁工业协会. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
China Iron and Steel Association. Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021(in Chinese).
- [29] American Society for Testing Materials. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039/D3039M—08[S]. West Conshohocken: ASTM, 2008.
- [30] American Society for Testing Materials. Standard test method for tensile properties of plastics: ASTM D638—10[S]. West Conshohocken: ASTM, 2010.
- [31] 张庆章, 黄庆华, 张伟平, 等. 海水潮汐区混凝土氯盐侵蚀加速试验方法研究 [J]. *结构工程师*, 2010, 26(3): 145-153.  
ZHANG Qingzhang, HUANG Qinghua, ZHANG Weiping, et al. Study on accelerated chloride penetration testing methods for concrete in tidal zone[J]. *Structural Engineer*, 2010, 26(3): 145-153(in Chinese).
- [32] 谢建军, 黄凯, 贺国京, 等. 水中固化环氧树脂胶黏剂制备与性能研究 [J]. *化学与黏合*, 2014, 36(1): 5-10.  
XIE Jianjun, HUANG Kai, HE Guojing, et al. Preparation and properties of epoxy resin adhesive cured in water[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2014, 36(1): 5-10(in Chinese).
- [33] 庞育阳. 极端服役环境下 CFRP-钢界面粘结性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.  
PANG Yuyang. Study on the bond behavior of CFRP-steel interfaces under extreme service environment[D]. Nanjing: Southeast University, 2019(in Chinese).
- [34] PANG Y, WU G, WANG H, et al. Experimental study on the bond behavior of CFRP-steel interfaces under quasi-static cyclic loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 140: 426-437.
- [35] PANG Y, WU G, WANG H, et al. Bond-slip model of the CFRP-steel interface with the CFRP delamination failure[J]. *Composite Structures*, 2021, 256: 113015.
- [36] WU Z, YUAN H, NIU H. Stress transfer and fracture propagation in different kinds of adhesive joints[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, 128(5): 562-573.