

唐文龙, 曹峰, 易金, 等. 保护层剥离行为对 CFRP 加固锈蚀钢筋混凝土梁性能的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 225-234. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.018

TANG Wenlong, CAO Feng, YI Jin, et al. The influence of protective layer debonding on the performance of CFRP-strengthened corroded reinforced concrete beams[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 225-234. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.018

保护层剥离行为对 CFRP 加固锈蚀钢筋 混凝土梁性能的影响

唐文龙¹, 曹峰¹, 易金^{2,3}, 钟立恒³, 夏海龙³

(1. 中交二公局第七工程有限公司, 广西南宁 530220; 2. 桂林理工大学广西绿色建材与建筑工业化重点实验室, 广西桂林 541004; 3. 桂林理工大学土木工程学院, 广西桂林 541004)

摘要:【目的】合理且准确地阐述碳纤维增强基复合材料(CFRP)在加固锈蚀钢筋混凝土受弯构件时的力学行为和破坏机理, 对于深入研究并提升 CFRP 加固技术在增强锈蚀钢筋混凝土结构的力学性能和耐久性方面至关重要。【方法】结合声发射监测技术对不同锈蚀程度的钢筋混凝土梁进行了 CFRP 加固后的抗弯性能试验研究, 通过综合分析挠度、钢筋应变、碳纤维应变以及声发射信号特征等关键指标, 揭示了 CFRP 加固锈蚀钢筋混凝土梁的力学特征。【结果】结果表明: CFRP 加固效果与钢筋的锈蚀程度紧密相关, 在加固方法确定的情况下, 随着钢筋锈蚀率的增加, 由于钢筋与混凝土之间的粘结性能退化, 导致“拉拱”效应加剧, CFRP 的加固效果逐渐降低。【结论】混凝土保护层的剥离与脱落使 CFRP 与混凝土的“拉拱”效应比钢筋表现更为显著, 对试验梁的整体力学性能产生了更大的影响。此外, 声发射监测信号特征与力学试验指标相结合, 能够更全面地反映试验梁在各个受力阶段的力学响应, 为 CFRP 加固锈蚀钢筋混凝土结构的评估和设计提供了有力的技术支持。

关键词: 锈蚀钢筋混凝土; 碳纤维; 声发射; “拉拱”效应; 变形; 力学性能

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.018

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0225-10



The influence of protective layer debonding on the performance of cfpr-strengthened corroded reinforced concrete beams

TANG Wenlong¹, CAO Feng¹, YI Jin^{2,3}, ZHONG Liheng³, XIA Hailong³

(1. CCCS-SHB Seventh Engineering Co., Ltd., Nanning 530220, Guangxi, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Green Building Materials and Construction Industrialization, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-08-18; 录用日期: 2024-09-27; 网络出版日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178194); 广西自然科学基金项目(2024GXNSFGA010002); 广西绿色建材与建筑工业化重点实验室项目(桂科能 22-J-21-15)

作者简介: 唐文龙(1988—), 男, 工程师, 学士, 主要从事混凝土材料与结构研究。E-mail: 490480339@qq.com

通信作者: 易金(1991—), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事海洋混凝土材料与结构研究。E-mail: tyijin16@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] Reasonably and accurately describing the mechanical behavior and failure mechanism of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) when used to reinforce corroded steel-bar concrete bending members is crucial for in-depth research and improvement of CFRP reinforcement technology in enhancing the mechanical performance and durability of corroded steel-bar concrete structures. [Methods] Acoustic emission monitoring technology was employed to conduct bending performance tests on steel-bar concrete beams with different degrees of corrosion which reinforced by CFRP. By comprehensively analyzing key indicators such as deflection, rebar strain, carbon fiber strain, and characteristics of acoustic emission signals, the mechanical characteristics of CFRP-reinforced corroded steel-bar concrete beams were revealed. [Results] The result showed that the effect of CFRP reinforcement was closely related to the degree of corrosion of the steel-bar. Under a determined reinforcement method, as the corrosion rate of the steel-bar increased, the “tension arch” effect was intensified due to the degradation of the bond performance between the steel-bar and concrete, leading to a gradual decrease in the reinforcement effect of CFRP. [Conclusion] The spalling and detachment of the concrete cover made the “tension arch” effect between CFRP and concrete more significant than that of the steel-bar, which had a greater impact on the overall mechanical performance of the test beams. In addition, combining the characteristics of acoustic emission monitoring signals with mechanical test indicators could more comprehensively reflect the mechanical response of the test beams at various loading stages, providing strong technical support for the evaluation and design of CFRP-reinforced corroded steel-bar concrete structures.

Keywords: corroded steel-bar concrete; CFRP; acoustic emission (AE); “tension arch” effect; deformation; mechanical properties

0 引言

钢筋混凝土结构在服役过程中,可能由于多种原因而达不到预期的使用寿命,除了自身设计的抗力不足以及使用过程中荷载条件的不利变化,混凝土结构的耐久性不足也是一个重要原因^[1]。在影响混凝土结构耐久性的因素中,钢筋锈蚀对结构性能的退化影响最为显著^[2]。钢筋由于有害介质的侵蚀,在长度方向上形成随机分布的腐蚀坑,导致有效截面积减少^[3]。此外,腐蚀产物的体积膨胀还可能引起混凝土保护层的开裂甚至脱落,这会进一步恶化钢筋与混凝土之间的粘结性能,影响建筑结构的正常使用,甚至导致承载能力的丧失,严重威胁到建筑结构的安全性和适用性^[4-5]。特别是在沿海和近海区域,由于高温、高湿和高盐雾的环境条件,钢筋锈蚀引发的耐久性问题尤为突出^[6-7]。

在当前建筑领域,对已经损坏的混凝土结构进行修复和加固已成为一项至关重要的工作^[8]。研究显示,通过施加外部约束的修复技术能够有效地恢复混凝土构件的原始承载力和韧性^[9-10]。纤维增强复合材料(FRP),因其轻质、高强度、耐腐蚀、施工方便以及良好的抗疲劳性和可设计性等优势,在土木工程中得到了广泛的应用和研究,被认为是继混凝土和钢材之后的第三大建筑材料^[11]。外贴碳纤维增强复合材料(CFRP)片材加固混凝土结构是加固领域中一种常见的方法,近年来,加固修复海工结构也经常采用这种方法,其加固效果已经得到了国内外学者和工程界的广泛认可^[12]。然而,对于那些因钢筋锈蚀而需要

加固的混凝土构件来说,锈蚀钢筋的材质变化、横截面积减少、锈蚀产物层的存在,以及因锈蚀引起的混凝土保护层开裂甚至脱落等因素的相互作用^[13-14],使得锈蚀钢筋混凝土结构和 CFRP 加固后的锈蚀钢筋混凝土结构的受力状态、破坏机理和形态变得更加复杂^[15]。尽管许多专家和学者在 CFRP 加固锈蚀钢筋混凝土构件的承载机理、刚度和承载力计算等方面进行了大量研究,并取得了显著成果,但仍有许多问题尚未得到满意的解决^[16-17]。

外贴 CFRP 片材的抗拉强度和所使用粘合胶层的抗剪强度通常都高于混凝土本身的抗剪强度。CFRP 片材加固是通过混凝土保护层来传递应力的。然而,钢筋的锈蚀往往会削弱混凝土保护层与整体结构之间的黏结性能。因此,在 CFRP 与混凝土的结合面上,常见的破坏形式是混凝土保护层的剥离^[18],这种剥离行为不可避免地会削弱 CFRP 加固的效果。此外,钢筋混凝土梁在 CFRP 加固后,其损伤破坏特征和机理也会发生显著变化。目前,关于混凝土保护层剥离行为对 CFRP 加固锈蚀钢筋混凝土构件工作性能的影响的研究相对较少。为了深入分析这一问题,本文通过结合声发射监测技术和力学试验方法,对不同锈蚀程度的钢筋混凝土梁进行 CFRP 加固后的抗弯试验研究,重点探讨在受力过程中保护层剥离行为对 CFRP 片材加固锈蚀钢筋混凝土梁的力学行为和耗能能力的影响,旨在为 CFRP 加固技术在海洋环境下钢筋混凝土结构工程中的应用提供关键的试验数据和理论支持。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验梁尺寸为 1 300 mm×70 mm×150 mm, 梁纵筋保护层厚度为 25 mm, 如图 1 所示, 共计 13 根, 按照梁的主拉纵筋锈蚀率分为 7 个系列, 编号 O、A、B、C、D、E、F, 理论锈蚀率分别为 0%、3%、6%、9%、12%、15%、18%。其中除 O 组外, 每个系列含 2 根梁, 每组选取一根试验梁采用碳纤维布加固。

混凝土的设计强度等级为 C30, 其配合比为水泥、砂、石子和水的重量比为 1 : 1.71 : 3.15 : 0.49。经过 28 天的标准养护, 实测抗压强度 f_{cu} 为 32.32 MPa。受拉纵筋采用直径 14 mm 的 HRB400 钢筋, 采用内贴片法共粘贴 7 片应变片以测量钢筋应变: 首先, 对钢筋线切割对半剖开, 然后在剖面上铣出了宽度分别为 5 mm 和 2.5 mm 的纵向凹槽; 再将应变片粘贴在这些凹槽内, 并使用环氧树脂进行填充; 最后, 将两半钢筋合并, 如图 2 所示。架立筋采用的是直径 10 mm 的 HRB400 钢筋, 箍筋为直径 6 mm 的 HRB335 钢筋; 所使用的 CFRP 布厚度 0.167 mm, 其抗拉强度 f_{cf} 为 3 000 N/mm²。

1.2 试验过程

本试验通过外加电流法对混凝土梁中的纵筋进行

人工锈蚀, 依据法拉第定律控制通电时间, 以此获得不同锈蚀程度的试验梁。加速锈蚀处理完成后, 在梁的底部粘贴了 1 片尺寸为 1 100 mm×70 mm 的 CFRP 布进行加固。分别在梁两端弯剪区域, 以 50 mm 的间隔各粘贴了 3 片宽度为 30 mm 的碳纤维 U 型箍。同时, 为了测量在受弯试验中 CFRP 的应变情况, 在梁底部的纵向 CFRP 布上粘贴了 5 片应变片, 位置及编号如图 1 所示。完成抗弯试验后, 破型取出钢筋以实测锈蚀率。

如图 3 所示, 试验梁采用了三分点加载方式, 跨度设定为 1 200 mm。加载采用荷载控制, 在加载初期, 每级增加 1.5 kN, 在加载后期, 每级增加 0.5 kN。测定的数据包括: 荷载、加载点及跨中点的挠度、钢筋的应变以及 CFRP 的应变。试验过程通过声发射仪进行了全程监测, 收集并分析了声发射的信号特征, 以探究 CFRP 加固锈蚀混凝土梁的力学性能与声发射信号之间的相关性。

1.3 声发射参数设置

本试验采用了美国 PAC 公司生产的 SAMOS-48 型声发射仪进行监测。试验前, 通过在随机选择的三根试验梁上进行了十次断铅实验, 确定监测阈值为 40 dB。利用时差定位法, 测得混凝土中声波传播速度为 2 950 m/s。结合文献[19], 制定了如表 1 所

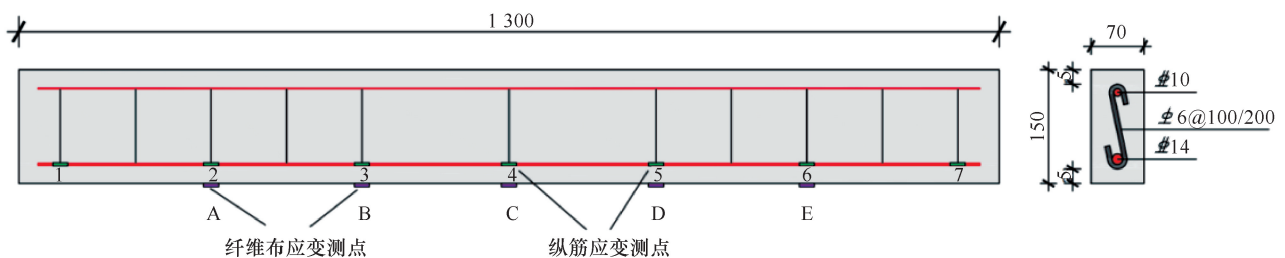


图 1 试验梁配筋图及应变测点(单位: mm)

Fig. 1 Reinforcement detailing of test beam and location of the strain gauges (Unit: mm)

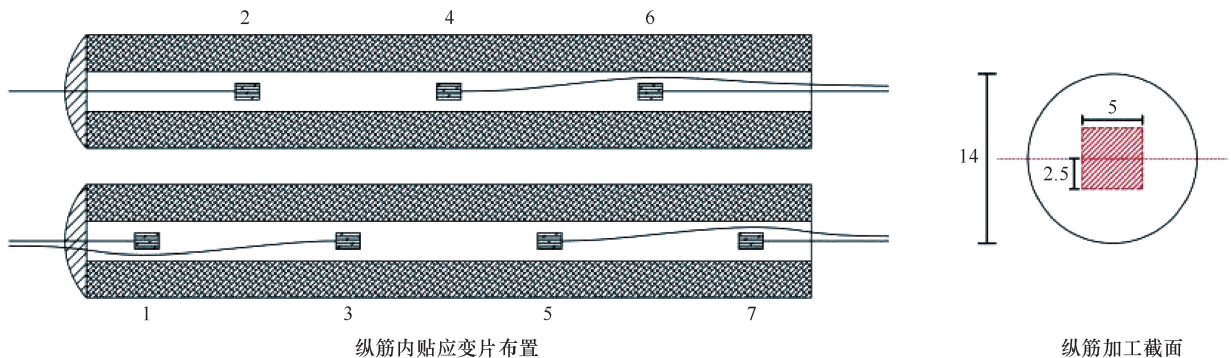


图 2 主拉纵筋剖面加工处理与内贴应变片布置(单位: mm)

Fig. 2 Reinforcement processing on the inside surface and internal strain gauges arrangement (Unit: mm)

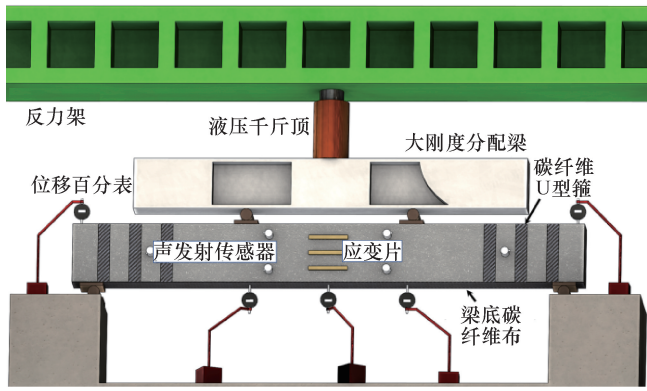


图3 CFRP 加固方案和加载方式

Fig. 3 CFRP strengthening design plan and the loading ways

表1 声发射检测参数设置

Table 1 Acoustic emission testing parameter settings

参数	数值	参数	数值
前置放大器增益/dB	40	采样长度/个	1 024
阈值/dB	40	峰值定义时间/ μs	80
滤波范围/kHz	1~400	撞击定义时间/ μs	160
采样速率/MHz	3	撞击闭锁时间/ μs	250
前触时间/ μs	50	定位波速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	2 950

列的声发射参数配置, 以确保监测的精确性和稳定性。

2 结果及分析

2.1 加固效果

梁承载力计算公式为

$$F_u = 6M_u/l \quad (1)$$

考虑钢筋锈蚀过程中屈服强度的降低和横截面积的减小情况, 未经 CFRP 加固的锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力计算值根据公式^[20]

$$M_{u1} = T_u \left(h_0 - \frac{T_u}{2\alpha_1 f_c b} \right) \quad (2)$$

$$\eta \leq 5\%, \quad T_u = (1 - 1.608\eta) (1 - \eta) f_{y0} A_{s0} \quad (3)$$

$$\eta > 5\%, \quad T_u = (0.962 - 0.848\eta) (1 - \eta) f_{y0} A_{s0} \quad (4)$$

式中, M_{u1} 为未加固的锈蚀梁抗弯承载力; T_u 为纵筋拉力的合力; f_{y0} 为未锈蚀纵筋屈服强度; A_{s0} 为未锈蚀纵筋截面面积; α_1 为混凝土受压区等效矩形应力图系数(取 1.0); f_c 为混凝土轴心抗压强度; b 为梁截面宽度; h_0 为截面有效高度; η 为锈蚀率。

经 CFRP 布加固的锈蚀钢筋混凝土梁受弯承载力计算值根据公式^[21]

$$M_{u2} = f_y A_s \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + \phi f_{cf} A_{cf} \left(h - \frac{x}{2} \right) \quad (5)$$

对于公式(5), 也考虑钢筋锈蚀过程中屈服强度的降低和横截面积的减小情况, 其中

$$f_y A_s = \alpha_1 f_c \left(1 - \sqrt{1 - 2 \frac{M_{u1}}{\alpha_1 f_c b h_0^2}} \right) b h_0 \quad (6)$$

$$x = \frac{f_y A_s + \phi f_{cf} A_{cf}}{\alpha_1 f_c b} \quad (7)$$

式中, M_{u2} 为 CFRP 布加固的锈蚀梁抗弯承载力; f_y 为锈蚀纵筋屈服强度; A_s 为锈蚀纵筋截面面积; x 为等效受压区高度; ϕ 为 CFRP 布折减系数(取 $\phi = 0.491$ ^[21]); f_{cf} 为 CFRP 布抗拉强度; A_{cf} 为 CFRP 布截面面积。

根据公式(1)~(7), 计算出各试验梁的承载力理论值。主要的试验梁参数及试验结果如表 2 所列, 可以看出, 随着锈蚀率的增加, 钢筋混凝土梁的受弯承载力逐渐降低。例如, 锈蚀率为 3% 的梁 A₀, 其承载力为 27 kN, 与未锈蚀的梁 O₀ 相比下降了 12.9%。而对于锈蚀率达到 18% 的严重锈蚀梁 F₀, 其承载力仅为 13.5 kN, 与梁 O₀ 相比承载力下降了 56.5%。这主要是由于钢筋锈蚀导致其力学性能降低, 同时, 钢筋与混凝土之间的粘结应力受到削弱损失, 从而降低了钢筋混凝土梁的受弯承载力。

CFRP 加固技术显著提升了不同锈蚀程度的混凝土梁的抗弯承载力, 验证了该技术在增强锈蚀钢筋混凝土梁承载能力方面的有效性。根据表 2 数据, 当钢筋锈蚀率较低时, 梁承载力试验值略高于理论预测值, 符合预期加固效果。

值得注意的是, 尽管所有试验梁采用了相同的 CFRP 加固方式和用量, 理论上加固效果的提升量应一致, 且锈蚀率较高的梁承载力提升的百分比应该更高。但实际情况却与之相反: A 组加固梁理论上的承载力提升 42%, 实际仅提升 20%; F 组理论上应提升 61%, 实际仅提升 17%。这表明试验值与理论值之间存在较大偏差, 并且随着锈蚀率的增加, 偏差也相应增大。其主要原因在于, 随着锈蚀率的增加, 钢筋自身性能降低, 同时纵向裂缝的发展进一步削弱了锈蚀混凝土梁的整体工作性能。在荷载增加的过程中, 混凝土保护层与纵向 CFRP 可能发生剥离脱落, 导致 CFRP 无法充分发挥加固作用。试验中观察到, 高锈蚀率的梁出现了 U 型箍因剪切力剥离, 以及底部纵向 CFRP 与保护层整体剥离脱落的现象, 使得在 CFRP 在未达到其极限拉应力时梁就先发生了破坏, 加固效果未能达到预期, 如图 4 所示。因此, 在进行理论计算时, 应充分考虑混凝土保护层剥离行为对加固效果的影响, 并考虑适当增加 U 型箍等辅助措施,

表 2 试验结果

Table 2 Test results

编号	$\eta/\%$	是否加固	承载力试验值 F_{us}/kN	承载力理论值 F_u/kN	F_{us}/F_u	$\Delta F_{us}/\text{kN}$	$\Delta F_u/\text{kN}$
Oo	0	否	31	30.1	1.03	—	—
Ao	3	否	27	22.9	1.18	5.5	9.7
Ac		是	32.5	32.6	1.00		
Bo	6	否	25	21.5	1.16	8.0	9.9
Bc		是	33	31.4	1.05		
Co	9	否	24	20.4	1.18	5.5	10.1
Cc		是	29.5	30.5	0.97		
Do	12	否	22.5	19.3	1.17	7.0	10.2
Dc		是	29.5	29.5	1.00		
Eo	15	否	19	18.3	1.04	5.0	10.3
Ec		是	24	28.6	0.84		
Fo	18	否	14.5	17.2	0.78	2.5	10.5
Fc		是	17	27.7	0.61		



图 4 CFRP 剥离形态

Fig. 4 The stripping pattern of CFRP

以提高加固效果。

通过观察试验现象发现, 锈蚀率较低的 A 组梁与未锈蚀梁破坏形态相似。根据试验梁的荷载-挠度曲线可知, 如图 5 所示, 曲线显示出明显的屈服阶段, 表明梁具有一定程度的延性破坏特性。相反, 锈蚀率较高的 F 组梁在未加固时, 挠度增长迅速且缺乏明显的屈服阶段, 表现出脆性破坏特征。这反映出钢筋锈蚀导致的粘结性能退化, 会在一定程度上降低混凝土梁的延性。

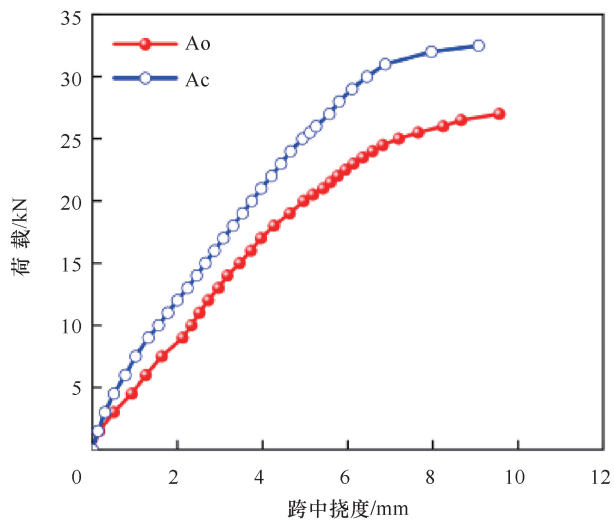
经 CFRP 加固后, F 组梁的挠度增长随着荷载的增加而减缓, 似乎出现了屈服现象, 脆性特征有所改善。但由于钢筋锈蚀率高, 构件性能退化严重, 挠度增长仍然较快。此外, 随着锈蚀率的增加, 在相同的荷载增量下, 试验梁的承载力减小, 荷载-挠度曲线斜率降低。这说明锈蚀引起的膨胀压力导致混凝土保护层沿钢筋开裂, 降低了混凝土对钢筋的握裹力, 削弱了主筋的拉杆作用。在加载后期, 试验梁的受力机制中“梁行为”更加明显, 裂缝快速发展, 有效压区高度迅速减小, 这不仅降

低了试验梁的极限承载力, 也显著降低了刚度。采用 CFRP 加固可以有效补偿锈蚀梁在受力机制中的拉杆作用缺失。因此, 在相同荷载下, CFRP 加固梁的挠度明显小于未加固的试验梁, 且随着加载进行, 这种效果更加显著。这表明 CFRP 加固技术在提高锈蚀钢筋混凝土梁的延性和承载力方面发挥了重要作用。

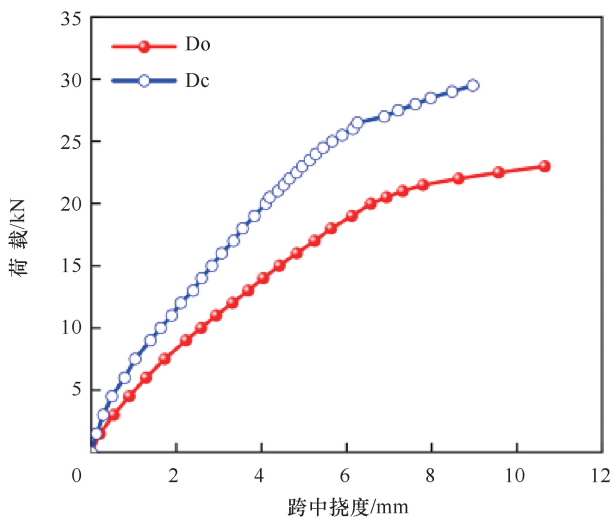
2.2 声发射信号特征与力学性能关系

声发射监测结果揭示了不同锈蚀率对试验梁声发射活动的影响, 如图 6 所示。可以观察到两个主要现象。(1) 声发射事件总数的下降趋势: 随着试验梁中钢筋锈蚀率的增加, 声发射事件的总数呈现递减趋势。这可能反映了锈蚀导致混凝土内部损伤的减少, 或能量释放方式的变化。(2) 声发射事件分布规律的变化: 不同锈蚀率的试验梁在不同应力阶段产生的声发射事件分布不一致。具体来说, 低锈蚀率的 A 组试验梁在声发射事件数变化曲线上有明显的拐点, 显示出两个明显的峰值。未加固梁的第一个峰值出现在应力水平约 0.2 倍时, 这对应于混凝土梁的初始裂缝形成阶段。而 CFRP 加固梁的第一个峰值则出现在应力水平约 0.4 倍时, 表明 CFRP 加固能有效抑制加载初期的裂缝发展。对于较高锈蚀率的 D 组和 F 组试验梁, 声发射事件数变化曲线平缓, 没有明显的拐点, CFRP 加固与未加固梁的第一峰值都出现在应力水平约 0.4 倍时, 但与低锈蚀率梁相比, 声发射事件数减少, 峰值起伏变缓。

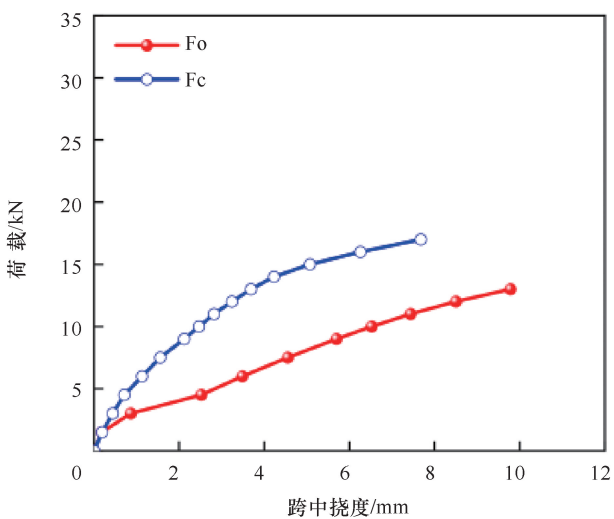
在加载后期, 所有试验梁的声发射事件数都突然增加。A、D 组未加固梁的曲线斜率比加固梁的大, 这表明钢筋锈蚀会使梁从延性破坏转变为脆性破坏。CFRP 加固可以延缓裂缝的发展, 从而提高锈蚀混凝土



(a) A组



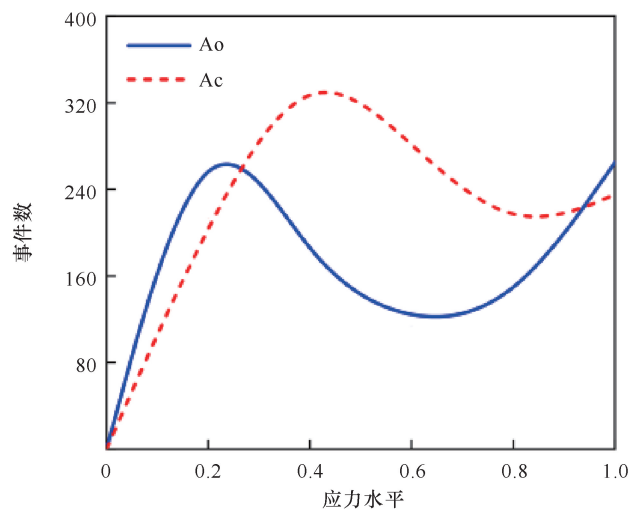
(b) B组



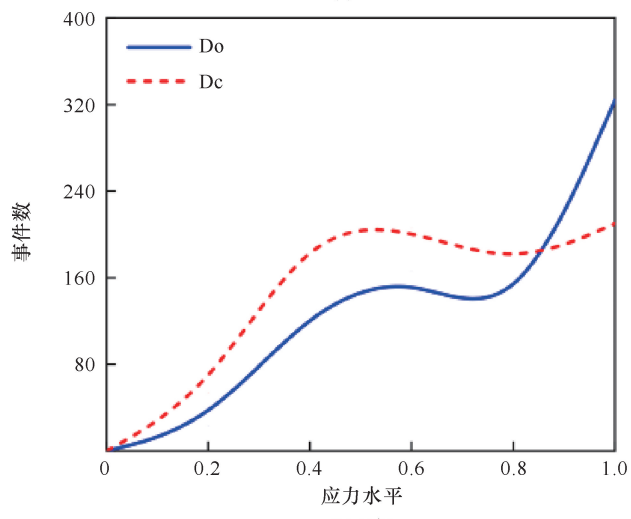
(c) C组

图5 CFRP 加固试验梁与未加固试验梁荷载-挠度曲线对比

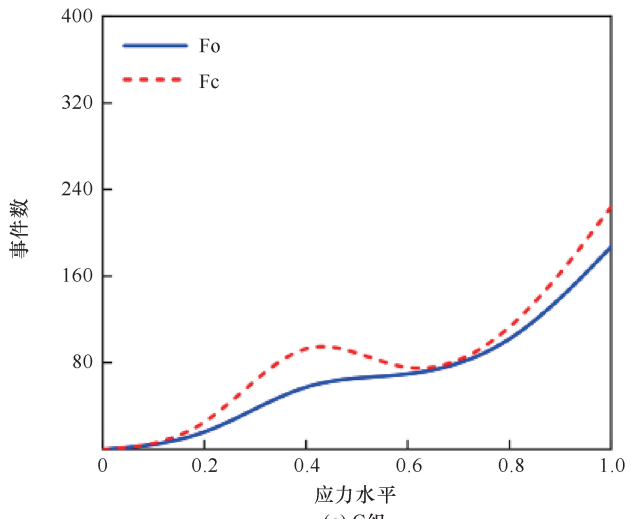
Fig. 5 Compare the load-deflection curves of test beams strengthened with CFRP with the beams without strengthening



(a) A组



(b) B组



(c) C组

图6 应力-事件发生数曲线

Fig. 6 Stresses-number of events curves

土梁的延性。然而, 对于 F 组梁, 在加载后期, 加固与未加固曲线的斜率较大且基本相同, 这表明高锈

蚀率的混凝土梁即使经过 CFRP 加固, 但由于受到保护层的剥离行为的影响, 二者都表现出脆性破坏特征, 加固效果并不显著。

钢筋混凝土梁在受荷载作用下的变形与荷载大小及梁体自身的刚度紧密相关。当荷载达到一定水平后, 部分由荷载施加的能量会通过混凝土开裂的形式释放^[22]。因此, 混凝土开裂时释放的能量与梁的承载力之间存在关联性。从表 2 和图 7 可以看出, 随着锈蚀率的增加, 锈蚀梁的能量释放趋势与承载力变化一致, 声发射监测能有效反映梁的承载力变化。

钢筋锈蚀会降低梁的抗弯刚度和延性, 减少混凝土开裂时的能量释放。对于高锈蚀率的试验梁, 其受弯时裂缝数量减少但宽度增大, 导致弹性波数量和总能量降低, 能量释放率下降。因此, 随着锈蚀率增加, 梁的能量耗散能力减弱, 影响了其承载力和结构完整性。

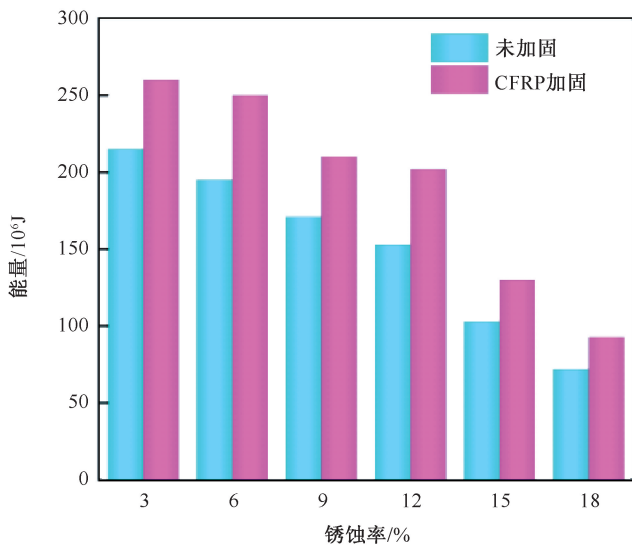


图 7 声发射能量随锈蚀率变化

Fig. 7 The AE energy change with corrosion rate

2.3 钢筋与 CFRP 应变分析

锈蚀是导致钢筋与混凝土之间粘结性能退化以及混凝土梁受力模型转化的关键因素^[23-24]。在本试验中, 低锈蚀梁的钢筋应变值与弯矩值呈现良好的线性关系, 如图 8 所示, 在弯矩较大的区段钢筋应变也较大, 反之亦然。因此, 这类梁的受力性能分析可以按照未锈蚀梁的受力模型进行。然而, 高锈蚀梁在加载初期钢筋应变与弯矩值尚匹配, 随着荷载增加, 两端钢筋应变增长速度明显加快。例如, Fc 试验梁的 2[#]、3[#]钢筋应变值随加载过程递增。这是由于钢筋锈蚀引

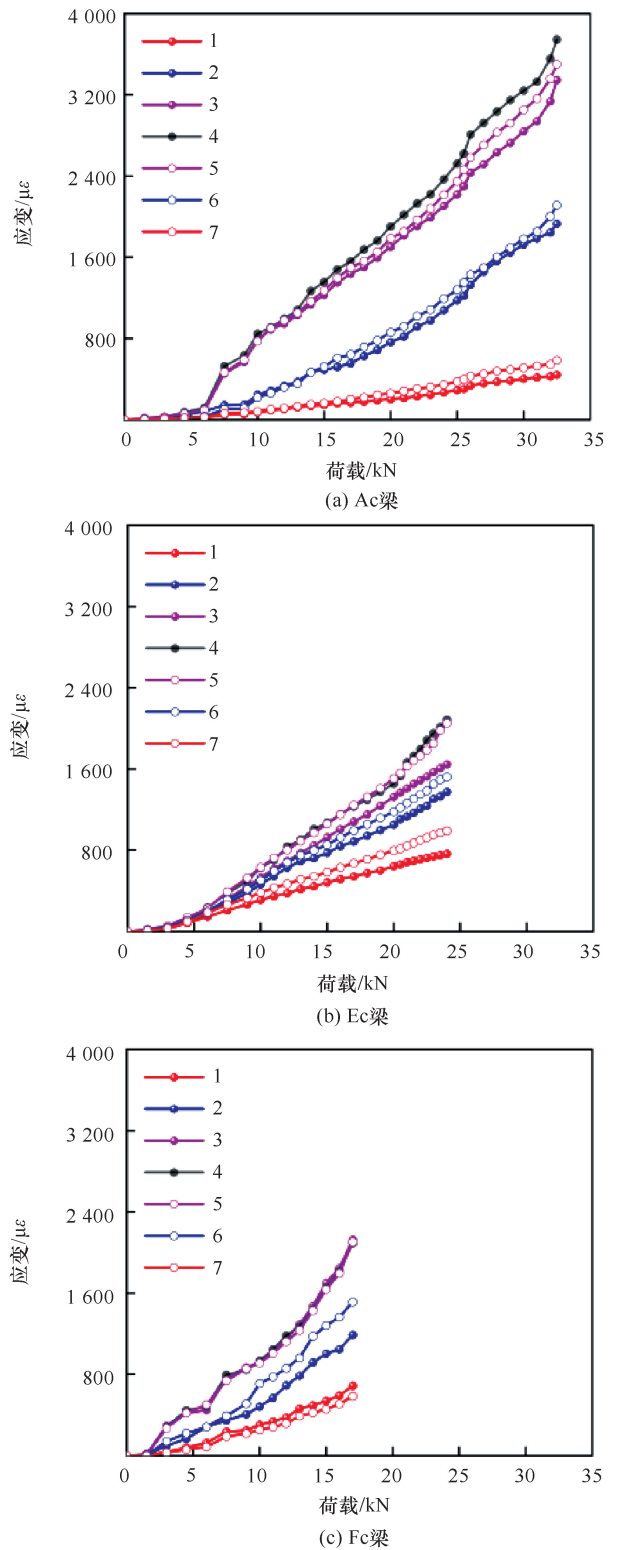


图 8 试验梁纵筋荷载-应变曲线

Fig. 8 Load-strain curves of the test beam longitudinal bars

起的混凝土裂缝导致钢筋与混凝土粘结面退化和粘结力减弱。随着荷载增加, 钢筋需要更多的粘结段参与工作以获得更大的粘结力, 导致应力从跨中向两端传递, 形成“拉拱”效应^[25]。

上述分析表明, 钢筋与混凝土粘结面的退化会加剧锈蚀梁的“拉拱”效应, 锈蚀程度越高, 效应越显著。同时, 箍筋对纵筋的约束作用能够在一定程度上抑制纵筋的滑移, 使混凝土梁在整体上仍然维持三分点受力状态, 阻碍了应力向两端传递的趋势。可见, 箍筋的约束效果对于维持结构的整体性能和延性具有重要作用, 尤其是在锈蚀严重时更为明显。

粘贴在混凝土梁底部保护层上的 CFRP, 受钢筋锈胀裂缝和保护层脱落的影响较大, 这影响了其与混凝土梁的整体工作性能。加载后期, 梁两端的 CFRP 应变快速上升, 拉杆作用显著, 如图 9 所示。例如, 在试验梁 Ec 的 A# 位置, CFRP 应变增长迅速, 接近或超过纯弯段应变, 这主要是由于梁底部保护层脱落导致 CFRP 与梁体分离, 拉力依赖两端 U 型箍的粘结力, 引起应变激增。但试验发现, 并非所有加固梁的

CFRP 应变都急剧上升。如试验梁 Fc 的 A# 位置, CFRP 应变在持续增长后下降, 这是因为 U 型箍在一定高度范围内遭受了剪切变形, 减弱了对保护层与纵向 CFRP 的整体约束, 导致 CFRP 发生滑移和应力重分布。

由此可见, 混凝土保护层的剥离显著影响了 CFRP 加固效果, 改变了锈蚀钢筋混凝土梁的受力形式和界面关系。如图 10 所示, 在加载初期, 尽管锈蚀钢筋与混凝土的粘结力降低, 但由于箍筋的存在, 仍维持了锈蚀钢筋混凝土梁的受力模型在一定程度上保持“梁”的受力形态。但在加载后期, 尤其是接近极限荷载时, 底部粘贴 CFRP 的混凝土保护层脱落, CFRP 与混凝土的关系更倾向于“拱”的效应, 当 CFRP 的作用在两端锚固较好时逐渐表现为明显的“拉杆”特征。因此, CFRP 加固高锈蚀率钢筋混凝土梁的力学性能分析和极限承载力计算变得非常复

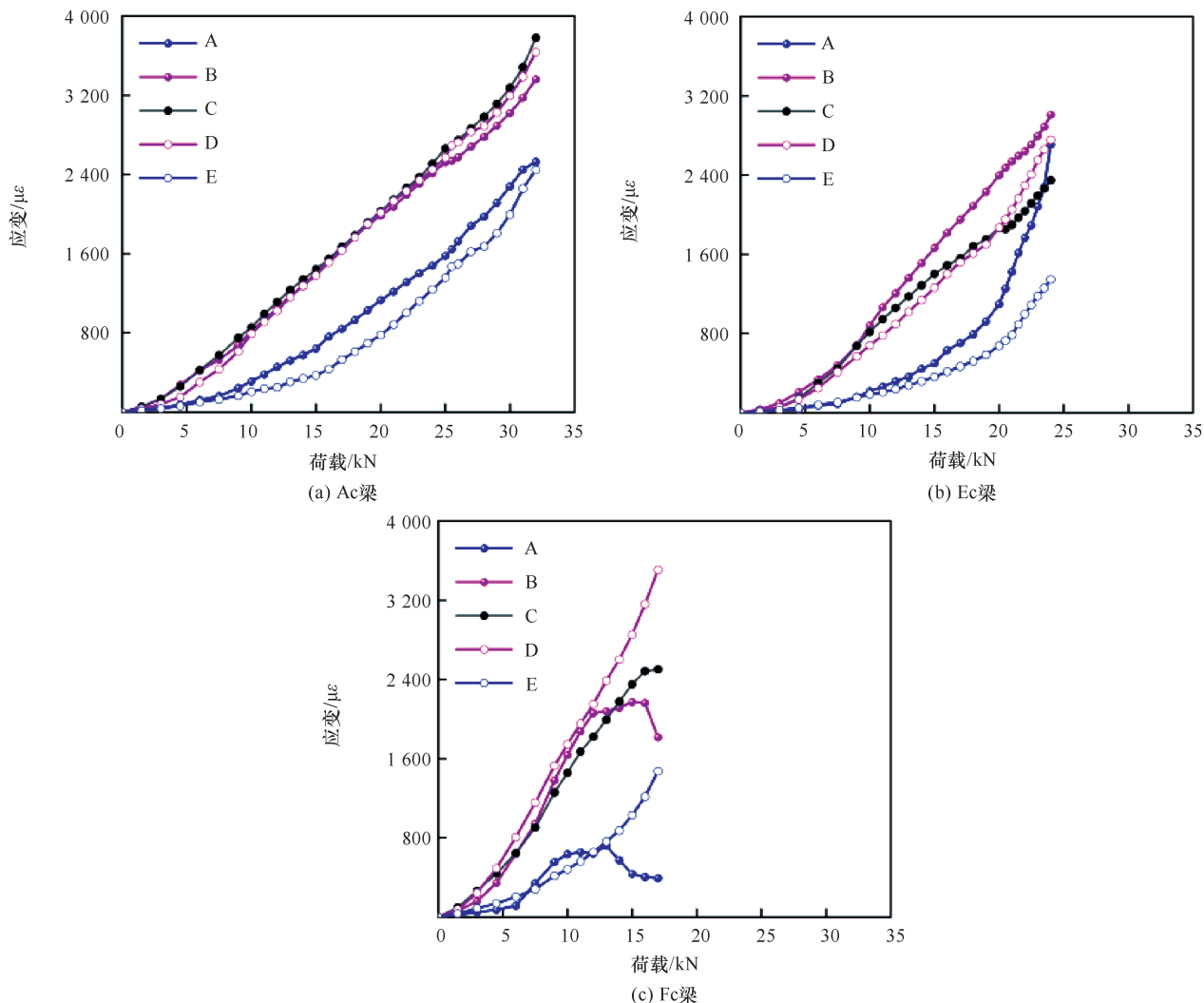


图 9 试验梁底部 CFRP 荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves of the test beam CFRP

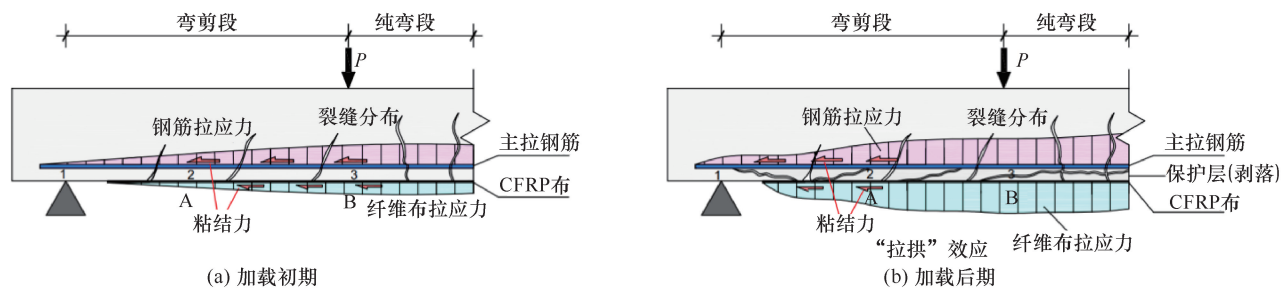


图 10 界面关系演化示意

Fig. 10 Schematic diagram of interface relations

杂, 且具有较大的离散性。这要求在进行加固设计和计算时, 必须综合考虑这些因素, 确保结构安全和可靠。

3 结论

(1) CFRP 加固技术可以在一定程度上提高锈蚀混凝土梁的抗弯承载力与刚度, 并使其破坏形式趋于延性, 工作性能得到显著改善。但随着锈蚀率的增大, 加固增益效果呈降低趋势。

(2) 梁在受力过程中, 由声发射采集的不同锈蚀率混凝土梁的能量与承载力变化具有协调一致性, 同时, 通过分析声发射事件的数量和分布, 可以对梁的内部损伤状态和变形能力进行评估。因此, 声发射监测不仅可以作为评估结构性能的一种手段, 还可以帮助理解材料退化对结构行为的影响。

(3) 因锈胀引发保护层沿筋开裂, 严重劣化了钢筋与混凝土之间的粘结性能, 使得在受荷过程中梁体内部开裂发生次数减少, 整体吸能能力降低。而 CFRP 可有效弥补因锈蚀造成拉杆作用退化, 提高锈蚀梁的耗能能力。

(4) 钢筋与混凝土粘结面的退化能加强锈蚀梁的“拉拱”效应, 锈蚀率越高, “拉拱”效应越明显; 在加载后期接近极限荷载时, 保护层的剥离、脱落行为使 CFRP 与混凝土的关系“拱”效应更加明显, 导致加固梁变形变大, 并降低其承载力, 受力状态更加复杂, 破坏形态也难以预判。

参考文献 (References):

[1] TANG S W, YAO Y, AANDRADE C, et al. Recent durability studies on concrete structure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 78: 143-154.

[2] 李克非, 廉慧珍, 邸小坛. 混凝土结构耐久性设计原则、方法与标准 [J]. *土木工程学报*, 2021, 54(10): 64-71.

LI Kefei, LIAN Huizhen, DI Xiaotan. Durability design of concrete structures: principle, method and standard [J]. *China Civil*

Engineering Journal, 2021, 54(10): 64-71.

- [3] ZHANG W, ZHOU B, GU X, et al. Probability distribution model for cross-sectional area of corroded reinforcing steel bars [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(5): 822-832.
- [4] BLOMFORS M, ZANDI K, LUNGGREN K, et al. Engineering bond model for corroded reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2018, 156: 394-410.
- [5] 姜超, 丁豪, 顾祥林, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁正截面受弯破坏模式及承载力简化计算方法 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(6): 1-10.
- JIANG Chao, DING Hao, GU Xianglin, et al. Bending failure modes and simplified bending capacity calculation methods for normal cross-sections of corroded Rc beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(6): 1-10.
- [6] GONG W, YU H, MA H, et al. A comprehensive assessment of durability and service life prediction of concrete structures in the simulated tidal zone of the South China Sea considering measures to enhance concrete durability [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 76: 107194.
- [7] MA C-K, APANDI N M, SOFRIE C S Y, et al. Repair and rehabilitation of concrete structures using confinement: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 133: 502-515.
- [8] PANJEHPOUR M, FARZADNIA N, DEMIRBOGA R, et al. Behavior of high-strength concrete cylinders repaired with CFRP sheets [J]. *Journal of civil Engineering and Management*, 2016, 22(1): 56-64.
- [9] HARAJLI M H. Cyclic response of concrete members with bond-damaged zones repaired using concrete confinement [J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(5): 937-951.
- [10] NIU H, KARBHARI V M, WU Z. Diagonal macro-crack induced debonding mechanisms in FRP rehabilitated concrete [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2006, 37(7/8): 627-641.
- [11] XIAO Y. Applications of FRP composites in concrete columns [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2004, 7(4): 335-343.
- [12] WANG L, ZHANG Y, LIU Y. Experimental investigation on flexural behaviors of cyclic overloading PRC beams strengthened with prestressed CFRP fabric [J]. *Structures*, 2021, 33: 2713-2723.
- [13] YE Z, ZHANG W, GU X. Deterioration of shear behavior of corroded reinforced concrete beams [J]. *Engineering Structures*, 2018, 168: 708-720.

- [14] TRIANTAFYLLOU G G, ROUSAKIS T C, KARABINIS A I. Analytical assessment of the bearing capacity of RC beams with corroded steel bars beyond concrete cover cracking [J]. *Composites Part B*, 2017, 119: 132-140.
- [15] YANG J, HAGHANI R, BLANKSVÄRD T, et al. Experimental study of FRP-strengthened concrete beams with corroded reinforcement [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: 124076.
- [16] BAI Yulei, DAI Jianguo, SHARMA A, et al. Stiffness-based design-oriented compressive stress-strain model for large-rupture-strain (LRS) FRP-confined concrete [J]. *Composite Structures*, 2019, 223: 110953.
- [17] CHELLAPANDIAN M, PRAKASH S S, SHARMA A. Experimental investigation of the effectiveness of hybrid FRP-strengthened RC columns on axial compression-bending interaction behavior [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(4): 04019025.
- [18] 王振波, 周潮, 王家赫, 等. 高延性水泥基材料(ECC)开裂后渗透性研究综述[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(6): 59-64.
WANG Zhenbo, ZHOU Chao, WANG Jiahe, et al. Summary of research on the permeability of Engineered Cementitious Composites (ECC) after cracking[J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(6): 59-64.
- [19] 欧阳利军, 陆洲导, 赵艳林, 等. 混凝土结构声发射检测参数设置研究 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2008, 30(5): 37-41.
OUYANG Lijun, LU Zhoudao, ZHAO Yanlin, et al. The setting of acoustic emission detecting parameters in concrete structure [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2008, 30(5): 37-41.
- [20] 余丹. 锈蚀钢筋混凝土梁的承载力试验及有限元模拟研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2013.
YU Dan. Bearing Capacity of Corroded Reinforced Concrete Beams and Finite Element Simulation [D]. Nanning: Guangxi University, 2013.
- [21] 杜海强. 碳纤维布加固混凝土梁抗弯承载力研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007.
DU Haiqiang. Research on the Bending Capacity of Concrete Beams Reinforced with CFRP Sheet [D]. Changsha: Central South University, 2007.
- [22] CARNÌ D L, SCURO C, LAMONACA F, et al. Damage analysis of concrete structures by means of acoustic emissions technique [J]. *Composites Part B*, 2016, 115: 79-86.
- [23] 张艺博, 郑山锁, 董立国, 等. 往复荷载作用下锈蚀钢筋与混凝土黏结性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(2): 237-248.
ZHANG Yibo, ZHENG Shansuo, DONG Ligu, et al. Experimental study on bond behavior of corroded reinforcements in concrete under reversed cyclic loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(2): 237-248.
- [24] 何化南, 陈西娴, 杨漫漫. 不同钢筋位置下锈蚀钢筋混凝土梁粘结性能分析 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2023, 44(10): 1720-1731.
HE Huanan, CHEN Xixian, YANG Manman. Analysis of bond-slip performance between corroded steel bars and concrete at different positions of steel bars [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2023, 44(10): 1720-1731.
- [25] 王磊, 张鑫, 钟立恒, 等. 锈蚀钢筋混凝土梁的力学性能及拱效应分析 [J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(1): 24-30.
WANG Lei, ZHANG Xin, ZHONG Liheng, et al. Analysis of mechanical properties and arch effect of corroded reinforced concrete beams [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2017, 38(1): 24-30.

(责任编辑 王璐)