



CFRP-钢管混凝土桩基腐蚀特性试验研究

董洪静^{1,2,3}, 谭德银^{1,2,3}, 刘志军^{1,2,3}, 庄 宁⁴

- (1. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
 2. 中交交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;
 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519000;
 4. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 海洋湿热环境下高桩码头桩基的腐蚀破坏是影响结构安全的重要因素之一, 是提升高桩码头使用寿命的瓶颈。基于室内海洋湿热环境模拟系统以及法拉第电磁感应定律, 采用外接直流电源的方法进行人工加速腐蚀; 运用半电池电势理论, 依据腐蚀越严重、电势值越高的规律对 CFRP-钢管混凝土桩基的腐蚀特性进行定量、定性研究。结果表明, 桩基腐蚀越严重, 电势值越高; 粘贴两层 CFRP 比粘贴一层 CFRP 的防腐效果更优。

关键词: 碳纤维增强复合材料(CFRP); 钢管桩; 腐蚀

中图分类号: TU 593; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0026-07

Experimental study on corrosion characteristics of CFRP-concrete filled steel tube pile foundation

DONG Hong-jing^{1,2,3}, TAN De-yin^{1,2,3}, LIU Zhi-jun^{1,2,3}, ZHUANG Ning⁴

(1.CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2.CCCC Key Lab of Environmental Protection & Safety in Foundation Engineering of Transportation, Guangzhou 510230, China;

3.Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China;

4.College of Harbor Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The corrosion damage of pile foundation is one important factor affecting the safety of structures under the humid and hot ocean environment, and it is the bottleneck of increasing the service life of piled wharves. Based on the simulation system of indoor marine humid and thermal environment and Faraday's law of electromagnetic induction, we apply the method of external DC power supply to carry out the artificially accelerated corrosion behavior, study the corrosion characteristics of CFRP-concrete filled steel tube pile foundation based on the law of more serious corrosion and higher potential value by using the theory of semi-battery electric potential. The results show that the more severe the corrosion is, the higher the potential value is. Two layers of CFRP are more effective than one layer of CFRP.

Keywords: carbon fiber reinforced composite (CFRP); steel pipe pile; corrosion

海洋高湿热环境下的桩基腐蚀问题是长期制约我国外海码头工程技术发展的一大瓶颈^[1]。CFRP(碳纤维增强复合材料)钢管混凝土桩基作为一种新型桩基结构, 由 CFRP 与薄壁钢管通过环

氧树脂黏结形成复合钢管, 并在钢管内壁浇筑混凝土而构成(图 1)。CFRP 具有优良的防腐性能, 与环氧树脂胶体结合后力学性能出色, 在桩基防腐加固方面前景广阔。CFRP 因其自身优异的性能

有望成为缓解结构腐蚀困境的重要选择, 符合国家战略需求^[2]。本文通过室内试验, 基于半电池电势理论等, 探究其腐蚀特性。

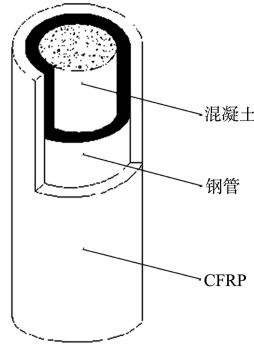


图 1 CFRP 钢管混凝土桩基构造

1 试验设计与模型制作

试验制作 12 根钢管混凝土模型桩, 桩长 1 200 mm、外径 114 mm, 混凝土强度等级 C30, 钢管平均厚度 2.7 mm, 按腐蚀程度(钢管质量损失 0%、5%、10%、15%)开展试验, 见表 1。每组桩 3 根, 分别为未粘贴 CFRP、粘贴 1 层 CFRP、粘贴 2 层 CFRP。

表 1 CFRP 钢管混凝土桩基分组

模型桩	钢管锈蚀程度(以钢管质量损失的百分数计)			
	0%	5%	10%	15%
未粘贴 CFRP	U0	U1-5	U2-10	U3-15
粘贴 1 层 CFRP	CE0	CE1-5	CE2-10	CE3-15
粘贴 2 层 CFRP	CF0	CF1-5	CF2-10	CF3-15

注: 表中字母 U 代表未粘贴 CFRP 的桩, 字母组合 CE 代表粘贴 1 层 CFRP 的桩, 字母组合 CF 代表粘贴 2 层 CFRP 的桩; 字母后接的第 1 位数字代表组号, 第 2 位数字代表钢管理论腐蚀率, 如 U1-5 表示第 1 组未粘贴 CFRP 桩通电锈蚀至 5% 理论质量损失; 对照组定为第 4 组, 即腐蚀率为 0% 的 3 根桩。

试验用碎石粒径为 5~10 mm, 中粗砂, 制作边长为 10 cm 的立方体试块, 测得 28 d 混凝土立方体抗压强度为 36.6 MPa, 混凝土的配合比为 $m_{\text{水泥}}:m_{\text{砂}}:m_{\text{石子}}:m_{\text{水}} = 1:1.35:2.20:0.35$ 。选用无缝钢管及加拿大 Sika 公司生产的 CFRP, 其物理力学参数见表 2。

表 2 CFRP 物理力学参数

厚度/mm	抗拉强度/GPa	弹性模量/GPa	延伸率/%	密度/(t·m ⁻³)	极限拉伸应变/10 ⁻³
0.11	3.45	230	2.1	1.80	16.65

环氧树脂胶是标准碳纤维浸渍胶, 包含 A 胶和 B 胶, 渗透性和触变性都较好, 符合《混凝土结构加固设计规范》^[3], 主要成分是环氧树脂复合胶体, 其与 CFRP 粘贴后的力学性能见表 3。将 A 胶和 B 胶按照质量比 3:1 进行混合。

表 3 环氧树脂复合胶与 CFRP 粘贴后的力学性能

抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	剪切强度/MPa	弹性模量/GPa
64.6	25.9	20.8	5.6

O_2 和 H_2O 是高桩码头桩基发生锈蚀的必要条件: 大气区含 H_2O 、 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 SO_2 以及悬浮态氯化盐等, 极易在材料表面形成电解质溶液, 但水分不足, 腐蚀程度较弱; 浪溅区和潮差区是海-气交换区, 腐蚀较严重, 将浪溅区和潮差区(干湿交替区)合并作为试验研究的重点区域; 水下区又称全浸区和海泥区, 水压较大, 矿物盐溶解量开始降低, 以电化学腐蚀为主, 化学腐蚀次之; 海泥区因严重缺氧, 腐蚀缓慢。考虑 CFRP 钢管混凝土桩是复合桩, CFRP 要发挥紧箍作用, 需研究 CFRP 粘贴层数不同对试验的影响, CFRP 粘贴方案见图 2。

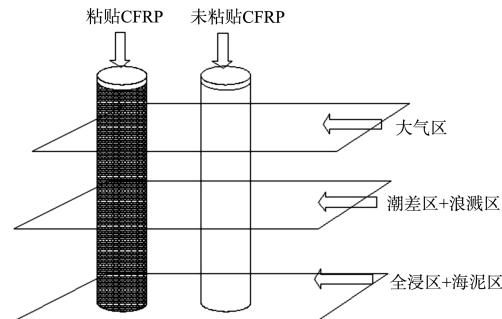


图 2 CFRP 粘贴方案

2 湿热环境室内试验模拟系统

采用自行研制的湿热环境模拟系统, 包括反应室、水位控制模块、温度控制模块、喷雾模块和造波模块。人工海水按照《船用金属材料电偶腐蚀试验方法》^[4]的规定配制^[5-6]。

2.1 湿度和温度循环设计

湿度循环设计实现过程: 玻璃箱处在设计低水位时, 下水管的电磁阀关闭, 电磁阀继电器被触发通电, 水泵工作, 将下水箱的水全部抽往上升水箱至满, 水泵自动关闭, 同时上升水箱的电磁阀被触发,

水开始从上水箱缓缓流入反应箱至设计高水位, 上水箱阀门自动关闭, 下水箱电磁阀开始触发工作, 待水位由高水位降至低水位, 一个循环完成, 周期 24 h。喷雾系统通过启动泵、计算机和 PLC 可编程逻辑控制器进行控制^[7], 每组桩的设定喷雾流量是 1.5、2.5、3.5 以及 4.5 L/min, 每 2 h 循环一次, 每次间隔 0.5 h, 腐蚀过程中玻璃箱的水位过程线如图 3 所示。温度变化范围设定在 25~60 °C, 通过石英管提供温度, 石英管平铺架设在玻璃箱顶部。人工海水的组分见表 4。

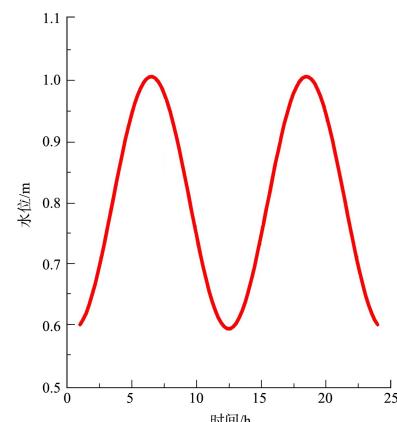


图 3 室内模拟潮位过程线

表 4 人工海水组分

化合物	NaCl	MgCl ₂	Na ₂ SO ₄	CaCl ₂	KCl	NaHCO ₃	KBr	H ₃ BCO ₃	SrCl ₂	NaF
浓度/(g·L ⁻¹)	24.530	5.200	4.090	1.160	0.695	0.201	0.101	0.027	0.025	0.003

2.2 桩基加速腐蚀系统设计

外加直流电可以实现室内加速腐蚀, 钢筋锈蚀速度与阴极-阳极的表面积比有关联: 表面积比越高, 锈蚀速度越快^[8]。

2.2.1 外加直流电加速锈蚀原理

钢管混凝土桩基锈蚀是钢管的锈蚀, 本质是电化学腐蚀, O₂ 和 H₂O 作为腐蚀发生的必要条件。通电系统首先要解决的是辅助电极(阴极)以形成原电池系统, 目的是使钢管作为纯粹工作电极(阳极)产生溶解反应^[9]:



钢管被氧化失去电子并以二价铁的形式进入水体, 辅助电极表面发生还原反应:



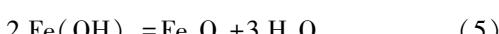
游离态的 Fe²⁺ 与 OH⁻ 相互结合成难溶的 Fe(OH)₂, 即:



在 O₂ 充足的条件下, Fe(OH)₂ 会结合 H₂O 发展成 Fe(OH)₃, 即:



Fe(OH)₃ 一旦脱水就会转变成疏松、多孔状的 Fe₂O₃, 即铁锈:



采用法拉第定律, 即在原电池基础上外加电流使得与直流电源正极相连的阳极电位远高于其自身平衡电位的数值, 使与电源负极相连的阴极

电位远低于其自身平衡电位的数值^[10], 该定律广泛应用于通电加速锈蚀试验。根据法拉第电解原理可知, 在设定的不同时刻, 桩基钢管因外加直流电源而发生的理论质量损失如下:

$$m_1 = M_i S_a T / (ZF) \quad (6)$$

式中: m_1 为理论腐蚀的钢筋质量(g); M 为铁的摩尔质量(g/mol); S_a 为钢管的横截面积(cm²); i 为外加电流密度(A/cm²); T 为通电时间(s); Z 为在锈蚀发生过程中进行交换的化学价; F 为法拉第常数, 为 96 500 C/mol。

根据式(6), 设置外加直流电源的电流为 166.9 mA, 即电流密度是 180 μ A/cm², 钢管等效直径换算是 2.46 cm, 依次计算通电系统和钢管锈蚀量之间的定量关系。

2.2.2 加速锈蚀电路系统设计

直流电源持续工作时间理论上不超过 12 h, 配备 2 台以保障不间断通电。电流密度的确定目前来说依然依据室内试验经验进行选取^[11], 即电流大小为 166.9 mA, 电流密度为 180 μ A/cm²。

3 试验结果分析

3.1 桩基表面腐蚀宏观形貌特征

根据钢管理论腐蚀率将腐蚀过程分成 3 个阶段: 腐蚀率 0%~5%、5%~10% 和 10%~15%。观察不同腐蚀阶段的 CFRP 材料的光泽颜色变

化、盐渍附着、劣化开裂以及鼓包等表观形态的变化规律、钢管腐蚀和 CFRP 材料的腐蚀形态。分别比较不同腐蚀阶段下, 未粘贴 CFRP

和粘贴 CFRP 的模型桩表面腐蚀宏观形貌特征, 见图 4~6。



图 4 腐蚀率 5% 的模型桩锈层宏观形貌



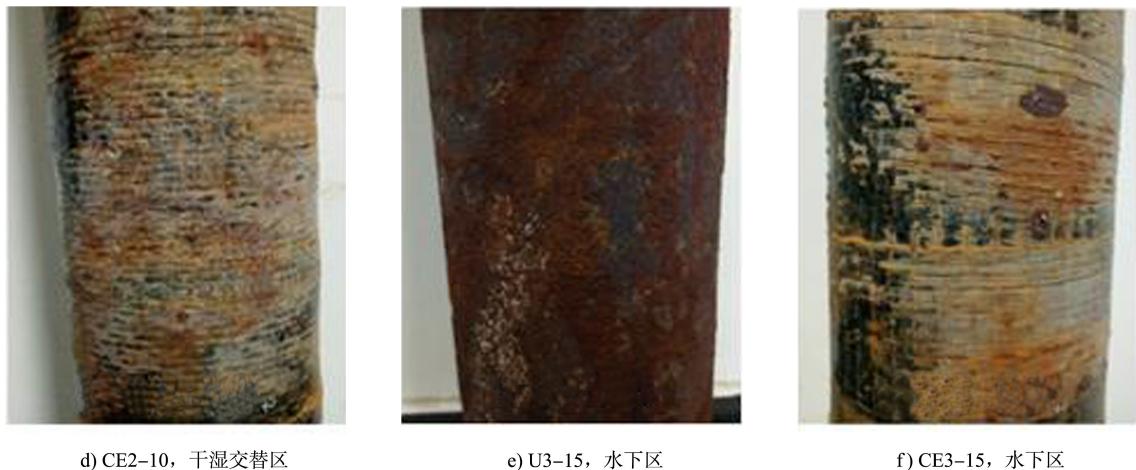


图 5 腐蚀率 10% 的模型桩锈层宏观形貌



图 6 腐蚀率 15% 的模型桩锈层宏观形貌

由图 4 可见, 桩基表面腐蚀不明显, 局部有白色晶体析出; 由图 5 可见, 模型桩表面开始出

现不同程度腐蚀, 但整体不显著, 尤其是未粘贴 CFRP 和粘贴 1 层 CFRP 的模型桩; 由图 5 可见,

模型桩腐蚀严重。CFRP 层数的增加, 模型桩在达到理论 15% 的腐蚀率时表面鼓包劣化现象得到有效控制, CFRP 的紧箍、封闭效果得到有效发挥。结果表明, 模型桩腐蚀形貌基本遵循: 表面白色盐渍附着→局部出现少量铁锈→铁锈大量出现及表面鼓包的演变规律。

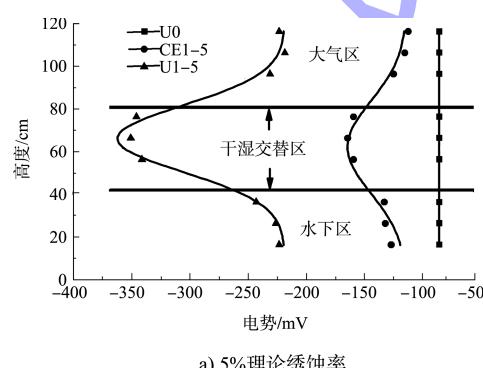
3.2 半电池电势分析

不施加外加电流时, 一般对金属材料的测定可以依据额外设置的参照电极得到, 测得的电势值即是参照电极和待测金属之间的电压差, 该电压差称之为半电池电势, 又叫腐蚀电势^[12-13]。本文采用 ASTM C876-80^[14] 所推荐的临界数值(表 5)作为钢管锈蚀判定标准, 大小以绝对值为准。

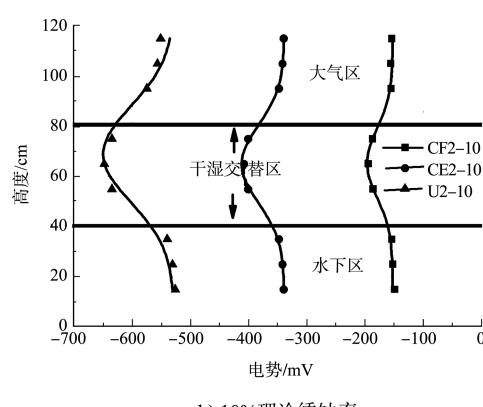
表 5 半电池点位-锈蚀倾向判别

电势值 E_{cor}	锈蚀状态
$E_{cor} < -350 \text{ mV}$	超过 90% 的可能性结构内钢筋已出现活化锈蚀现象
$-350 \text{ mV} \leq E_{cor} \leq -200 \text{ mV}$	该区钢筋的锈蚀状态未明
$E_{cor} > -200 \text{ mV}$	该区钢筋只有 10% 的可能性已发生活化锈蚀

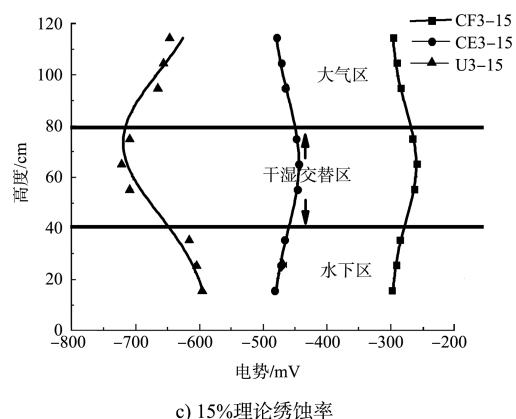
根据 12 根模型桩的检测数据, 电势值随腐蚀进程而降低, 见图 7。



a) 5%理论锈蚀率



b) 10%理论锈蚀率



c) 15%理论锈蚀率

图 7 模型桩半电池电势值

未粘贴 CFRP 的模型桩, 对应理论腐蚀率为 0%、5%、10% 和 15%, 浪溅区和潮差区(干湿交替区)的电势值依次为 -80、-345、-639 以及 -709 mV。电势值呈下降趋势, 钢管在达到 5% 理论锈蚀率时明显锈蚀。大气区的腐蚀程度明显高于水下区, 比干湿交替区的腐蚀程度弱, 全浸区在 5% 理论腐蚀率时表面腐蚀形态不明显, 达到 10% 理论腐蚀率时比较明显, 进入高风险腐蚀态。干湿交替区由于周期性的湿热交替环境, 腐蚀所需的 Cl^- 、 O_2 和 H_2O 等充足, 表现出明显的高活性腐蚀态。

粘贴 1 层 CFRP 的模型桩, 实测干湿交替区电势值在理论腐蚀率 5%、10% 和 15% 时分别为 -157、-403、-432 mV, 对比未粘贴 CFRP 的情况提高 188、236、277 mV。在理论锈蚀率 5% 时, 干湿交替区段的钢管在 CFRP 包裹下其锈蚀速度缓慢, 风险低于 10%, 模型桩表面有盐渍附着, 无明显鼓包, 但大气区和水下区腐蚀程度均不明显。对比未粘贴 CFRP 的模型桩, 粘贴 1 层 CFRP 的桩基电势值在不同区段的差值在缩小, 只在达到理论腐蚀率 15% 时才出现干湿交替区的电势值明显高于其他区段的情况, 远小于未粘贴 CFRP 的模型桩。分析可知, CFRP 作为高强、耐腐蚀材料, 能有效阻隔空气和水分。电势值沿桩身分布的曲线斜率明显低于未粘贴 CFRP 的曲线斜率。干湿交替区较大气区和水下区虽腐蚀介质充足, CFRP 的阻隔作用削弱了这种优势, 使彼此差距在

短时间内不是很明显,当腐蚀率达到理论设定的15%时,干湿交替区局部区域出现鼓包且表面锈蚀产物开始出现积聚形态。

粘贴2层CFRP的模型桩,在理论腐蚀率10%和15%时,大气区和干湿交替区的电势值相较于未粘贴CFRP的桩组分别提高了449、475 mV,相较于粘贴1层CFRP的模型桩分别提高了213、189 mV。在相同腐蚀条件和腐蚀时间下,CFRP粘贴层数的增加(1、2层)会提高电势值。加速腐蚀过程中表现出的腐蚀趋势与粘贴1层CFRP的模型桩趋势相近,CFRP粘贴层数不同引起的区别主要在腐蚀时间上,即电势值上大小不同、趋势一致。总体来说,粘贴CFRP提高电势值、对钢管桩防腐蚀起延缓作用。

根据试验结果,CFRP粘贴层数不同,腐蚀规律相似,为了量化桩基力学性能和腐蚀程度之间的关联性,有必要进行腐蚀程度划分。将0%~5%腐蚀率定义为一般腐蚀,腐蚀程度较低,腐蚀速率增长较快;将5%~10%腐蚀率定义为中等腐蚀,腐蚀程度继续加快,腐蚀已经明显影响桩基的力学性能,是腐蚀发生的主要阶段;将超过10%腐蚀率时定义为严重腐蚀,桩基本不能满足承载力安全使用要求,腐蚀也趋于稳定直至结构完全破坏。不同腐蚀程度下模型桩的电势-腐蚀率关系见图8。

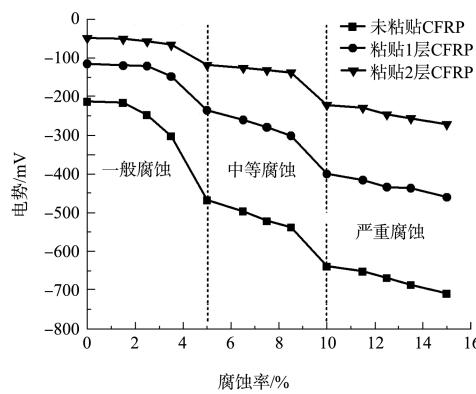


图8 电势-腐蚀率关系

4 结语

1) 湿热环境室内模拟试验系统能有效实现干湿交替循环控制,外加直流电源加速桩基锈蚀系

统实测可行,对后期开展更广泛的室内模拟试验提供技术支持和参考。

2) 半电池电势理论能定量研究CFRP-钢管混凝土桩基的腐蚀程度,其遵循腐蚀越严重、电势值越高的规律。

3) CFRP对钢管混凝土桩基的防腐效果显著;粘贴2层CFRP相较于粘贴1层CFRP对桩身电势值提高显著,在腐蚀率处于5%~10%时更明显。

参考文献:

- [1] 张志明,杨国平.我国沿海深水港口建设技术进展、发展趋势和面临的关键技术问题[J].水运工程,2011(S1):57-63.
- [2] 吴澎,曹凤帅.我国深水港口建设技术进展[C]//中国海洋学会海洋工程分会.第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,2013: 12-18.
- [3] 四川省建筑科学研究院,山西八建集团有限公司.混凝土结构加固设计规范:GB 50367—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [4] 中国船舶重工集团公司第七二五研究所,北京科技大学.船用金属材料电偶腐蚀试验方法:GB/T 15748—2013[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [5] 曹乃宁.油气输送腐蚀管道剩余寿命预测研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [6] 江旭,柳伟,路民旭.钢铁海洋大气腐蚀试验方法的研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2007, 19(4): 282-286.
- [7] 孔明慧.滨海地区城市埋地管道腐蚀剩余寿命预测及安全评价研究[D].大连:大连交通大学,2015.
- [8] XUE W C, ZENG L, TAN Y. Experimental studies on bond behaviour of high strength CFRP plates [J]. Composites (part B), 2008, 39(4): 592-603.
- [9] SHAWAF A A. Modelling wet lay-up CFRP-steel bond failures at extreme temperatures using stress-based approach[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2011, 31(6): 416-428.
- [10] KALFAT R, MAHAIDI R A. Investigation into bond behaviour of a new CFRP anchorage system for concrete utilising a mechanically strengthened substrate [J]. Composite structures, 2010, 92(11): 2738-2746.