

外加电流阴极保护对碳纤维织物增强海水海砂水泥基复合材料板导电性能的影响机制

洪嘉鑫 张大伟 陶冶王之 刘嘉荣

Influence mechanism of impressed current cathodic protection on the conductivity properties of carbon fabric reinforced seawater sea-sand cementitious matrix composite plates

HONG Jiaxin, ZHANG Dawei, TAO Yewangzhi, LIU Jiarong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240523.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CFRP筋与海水海砂混凝土粘结性能试验与机制分析

Experiment on bond performance between CFRP bar and seawater sea sand concrete and its working mechanism

复合材料学报. 2022, 39(3): 1194–1204 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210512.001>

海水海砂混凝土中混杂碳-玄武岩纤维筋拉伸性能退化机理及寿命预测

Degradation mechanism of tensile properties and life prediction of hybrid carbon/basalt fiber reinforced polymer bars in seawater sea-sand concrete

复合材料学报. 2024, 41(7): 3695–3706 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240523.002>

圆形CFRP-钢复合管海水海砂珊瑚混凝土柱轴压性能试验研究

Experimental study on axial compression performance of CFRP-steel composite tube filled circular seawater sea-sand coral concrete columns

复合材料学报. 2022, 39(8): 3982–3993 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210909.012>

高温后珊瑚海水海砂混凝土直剪力学性能及损伤演化

Direct shear mechanical properties and damage evolution of coral seawater sea-sand concrete after high temperature

复合材料学报. 2023, 40(7): 4128–4138 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221024.002>

海水海砂ECC梁的抗剪性能试验及有限元模拟

Experimental study and finite element analysis of seawater sea-sand engineered cementitious composites beams

复合材料学报. 2022, 39(8): 3929–3939 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210911.002>

FRP非均匀约束海水海砂混凝土方柱轴压性能

Axial compressive behavior of FRP nonuniformly wrapped seawater sea-sand concrete in square columns

复合材料学报. 2022, 39(6): 2801–2809 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210708.004>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

外加电流阴极保护对碳纤维织物增强海水海砂水泥基复合材料板导电性能的影响机制



分享本文

洪嘉鑫, 张大伟*, 陶冶王之, 刘嘉荣

(浙江大学 结构工程研究所, 杭州 310058)

摘要: 碳纤维织物增强水泥基复合材料 (CFRCM) 因兼具外加电流阴极保护 (ICCP)、结构加固修复 (SS) 和结构健康监测 (SHM) 的多功能特性而受到关注, 但目前 ICCP 对海水海砂 CFRCM 板导电性能的影响机制研究还很不足。本研究通过普通砂浆和海水海砂砂浆制备的 CFRCM 板开展模拟 ICCP 试验, 探究了 ICCP 作用对 CFRCM 导电性能的影响规律和作用机制。结果表明: CFRCM 的电阻随电量密度的增大先线性增长而后快速增长, 海水海砂砂浆 CFRCM 进入快速增长阶段所需的电量密度约为 $13 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, 大于普通砂浆 CFRCM 所需的 $6 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5 \text{ C/m}^2$; 材料的不均匀性使 CFRCM 存在导电性能劣化薄弱点, 并将影响整体电阻变化; 海水海砂环境对于减缓 ICCP 对碳纤维材料性能的劣化有积极的作用。同时基于试验结果和通电参数, 建立了 ICCP 下 CFRCM 的电阻预测模型, 计算得到海水海砂砂浆 CFRCM 经 ICCP 通电后服役期间内能够承受的最大电量密度为 $23.21 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, 高于普通砂浆 CFRCM 的 $17.21 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, 表明含氯环境可以有效延长 CFRCM 的电学使用寿命。本研究为推动兼具多功能特性的 CFRCM 的应用打下基础, 同时有助于促进海水海砂资源化利用。

关键词: CFRCM; ICCP-SS; 海水海砂; 导电性能; 预测模型

中图分类号: TU599; TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)03-1495-12

Influence mechanism of impressed current cathodic protection on the conductivity properties of carbon fabric reinforced seawater sea-sand cementitious matrix composite plates

HONG Jiaxin, ZHANG Dawei*, TAO Yewangzhi, LIU Jiarong

(Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Carbon fabric reinforced cementitious matrix (CFRCM) has attracted attention due to its multifunctional properties of impressed current cathodic protection (ICCP), structural strengthening (SS), and structural health monitoring (SHM). However, the current research on the influence mechanism of ICCP on the conductivity properties of seawater sea-sand CFRCM plates is still insufficient. This study conducted simulated ICCP tests on CFRCM plates prepared from normal mortar and seawater sea-sand mortar to investigate the influence and mechanism of conductivity properties of CFRCM under ICCP. The results indicate that the resistance of CFRCM initially shows a linear increase followed by rapid growth with the increase in charge density, and the charge density required for seawater sea-sand mortar CFRCM to enter the rapid growth stage is about $13 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, which is greater than the $6 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ required for normal mortar CFRCM; the in-homogeneity of the material causes CFRCM

收稿日期: 2024-04-01; 修回日期: 2024-05-08; 录用日期: 2024-05-15; 网络首发时间: 2024-05-24 08:47:27

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240523.002>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52078454)

National Natural Science Foundation of China (52078454)

通信作者: 张大伟, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能纤维复合材料及混凝土结构性能提升 E-mail: dwzhang@zju.edu.cn

引用格式: 洪嘉鑫, 张大伟, 陶冶王之, 等. 外加电流阴极保护对碳纤维织物增强海水海砂水泥基复合材料板导电性能的影响机制 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(3): 1495-1506.

HONG Jiaxin, ZHANG Dawei, TAO Yewangzhi, et al. Influence mechanism of impressed current cathodic protection on the conductivity properties of carbon fabric reinforced seawater sea-sand cementitious matrix composite plates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(3): 1495-1506(in Chinese).

to have weak points in the conductivity properties degradation, which will affect the overall resistance change; the seawater sea-sand environment has a positive effect on mitigating the degradation of carbon fiber material properties caused by ICCP. Meanwhile, based on experimental results and electrification parameters, resistance prediction models for CFRCM under ICCP were established. The maximum charge density that seawater sea-sand mortar CFRCM can withstand during service after ICCP electrification was calculated to be $23.21 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, which is higher than the $17.21 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ of normal mortar CFRCM, indicating that the chloride-containing environment can effectively prolong the electrical service life of CFRCM. This study lays the foundation for promoting the application of CFRCM with multifunctional properties and simultaneously contributes to the resource utilization of seawater sea-sand.

Keywords: CFRCM; ICCP-SS; seawater sea-sand; conductivity properties; prediction models

钢筋混凝土广泛应用于建筑、桥梁和港口等工程结构^[1],但淡水河砂资源紧缺对其发展构成挑战,特别是在沿海和偏远地区^[2]。使用海水海砂替代淡水河砂在新建结构中具有可行性^[3],但可能导致氯盐侵蚀引起的钢筋锈蚀,影响结构耐久性并增加维修成本^[4]。因此,提升结构力学性能、减少钢筋锈蚀并实施结构健康监测是确保混凝土工程健康发展的关键措施。

目前的研究已验证了碳纤维织物增强水泥基复合材料 (Carbon fabric reinforced cementitious matrix, CFRCM) 在结构性能提升方面的有效性^[5],同时外加电流阴极保护 (Impressed current cathodic protection, ICCP) 也被广泛用于降低钢筋腐蚀速率^[4]。鉴于碳纤维的优异力学性能和电化学稳定性,将 CFRCM 同时用作辅助阳极材料的兼具外加电流阴极保护和结构性能提升的双功能体系 (Impressed current cathodic protection-structural strengthening, ICCP-SS) 已被提出^[6-7]。既有研究表明,采用 CFRCM 的 ICCP-SS 体系能有效提升结构力学性能和耐久性。Su 等^[7-8]对腐蚀钢筋混凝土梁的研究表明双功能体系可以有效阻止钢筋的锈蚀,加固梁的抗弯承载力和疲劳寿命得到提高。Zhu 等^[6,9]的研究表明较大的电流密度有助于延缓钢筋锈蚀速率,ICCP-SS 体系使腐蚀钢筋混凝土柱的承载力提高了 40%,同时建立了与电学参数相关的承载力预测模型。Chen 等^[10]进一步研究了双功能体系下氯离子在钢筋混凝土构件内的迁移分布规律。

另一方面,开展结构健康监测 (Structural health monitoring, SHM) 有助于预防结构损伤和减少风险事件发生。碳纤维具有力阻效应,在受载时其电阻会随着应变变化而改变,据此效应可实现对自身变形和损伤的自感知与自监测^[11]。相较于嵌入或外贴式传感器如光纤光栅、压电陶瓷

等,将碳纤维用作自监测材料具有与混凝土相容性好、成本低、耐久性好、传感体积大等优点^[12]。针对连续碳纤维束^[13]和碳纤维增强聚合物 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)^[14]力阻效应的研究表明,其电阻会随应变增加而增长,但受碳纤维单丝的弹性变形、断裂和搭接变化的影响结果具有一定离散性^[13]。此外,相关研究显示 CFRCM 的力阻效应与干碳纤维束和 CFRP 有相似性^[11]。目前,碳纤维用于结构的自监测技术已被开发。Luan 等^[15]将连续碳纤维作为长规格传感器应用于 3D 打印聚合物结构中,通过测量电阻实现了不同加载位置处外部荷载的实时监测。Yang 等^[16]的研究表明利用 CFRP 的电阻变化可以有效监测构件变形及裂缝发展等信息。Goldfeld 等^[12,17]进行了碳-玻璃纤维混合织物增强混凝土梁四点弯曲试验研究,通过对电阻-应变关系进行标定,进一步验证了碳纤维用于构件层次自监测的有效性。

综上可知,CFRCM 已被证实具备 ICCP-SS 与 SHM 的多功能特性。虽然延缓了钢筋锈蚀,但相关研究显示 ICCP-SS 体系可能导致 CFRCM 的材料性能出现下降^[18-21]。尤其值得注意的是 CFRCM 的力阻效应特性与其电学性能密切相关^[22],因此 ICCP 作用对 CFRCM 导电性能的影响将进一步影响其在 SHM 方面的效果。目前关于 ICCP 对 CFRCM 力学性能影响的研究较为集中^[18-20],然而关于电学性能影响的研究较少^[21],缺乏对电阻变化情况的研究。此外,海水海砂环境下 ICCP 作用对 CFRCM 导电性能的影响机制研究还很不足。

本研究旨在探究 ICCP 作用对 CFRCM 导电性能的影响规律和作用机制,特别是在海水海砂环境下。对普通砂浆和海水海砂砂浆制备的 CFRCM 板进行了模拟 ICCP 试验,分析了 CFRCM 的电阻变化情况。通过对试件纤维表面微观形貌的观察,讨论了阳极极化对 CFRCM 导电性能的影响机制。

基于试验结果和通电参数，建立了 CFRCM 通电后的电阻预测模型。本研究为推动兼具多功能特性的 CFRCM 的应用打下基础，同时有助于促进海水海砂资源化利用。

1 试验方案

1.1 原材料

碳纤维束来自无锡市优特佳公司，单束碳纤维束含 12 000 根直径 7 μm 的单丝，其弹性模量、极限伸长率、抗拉强度和体积电阻率分别为 230 GPa、1.5%、3 530 MPa 和 $1.7\times10^{-3}\ \Omega\cdot\text{cm}$ 。

水泥基胶凝材料包括普通砂浆 (Normal mortar, NM) 和海水海砂砂浆 (Seawater sea-sand mortar,

SM) 两种，配合比如表 1 所示。其中，参考 Wu 等^[5]的研究设计普通砂浆配合比，将 0.5~1 mm 粒径的 ISO 标准砂 (中级) 和 0~0.5 mm 粒径的细砂按照 2 : 1 的质量比配制。表 2 展示了海砂的颗粒级配和含水率，考虑到海砂级配差异，适当提高水灰比以保证砂浆流动度相同。海水中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Ca^{2+} 的含量分别为 14.81、1.82、15.74、1.51、1.21 和 6.35 g/L，测得 pH 值为 8.02。根据与普通砂浆具有相同抗压和抗折强度的原则设计海水海砂砂浆配合比。依据规范《水泥胶砂强度检验方法 (ISO) 法》GB/T 17671—2021^[23] 开展砂浆强度测试，普通砂浆和海水海砂砂浆 28 d 抗压强度平均值分别为 40.0 MPa 和 38.9 MPa。

表 1 两种砂浆配合比
Table 1 Mix proportions for two types of mortar

Mortar types	Cement (P.O 42.5)/g	Water/g	Sand/g	Redispersible powder (Wacker Chemie AG 4115N)/g	Water reducing agent (MasterGlenium SKY 8860)/g
NM	100	45	200	1.5	0.15
SM	100	55	207.3	1.5	0.2

Notes: NM represents normal mortar, and SM represents seawater sea-sand mortar.

表 2 海砂颗粒级配和含水率
Table 2 Particle size distribution and moisture content of sea-sand

Sieve residue rate for different particle sizes/%						Fineness modulus	Moisture content/%
4.8 mm	2.4 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.2 mm		
0.4	6.7	19.5	34.5	66	96.2	2.2	3.65

通过导电电极捕捉 CFRCM 板在 ICCP 过程中的电阻信息。非海水环境所用的导电铜胶电极由双组份环氧树脂基铜粉导电胶和 0.08 mm 厚铜片构成，海水环境所用的银浆电极则由导电银浆和 316 不锈钢片构成。铜粉导电胶和导电银浆均由深圳市鑫威电子材料有限公司提供。

1.2 试验参数

为准确评估 ICCP 进行程度，采用电量密度 Q 进行表征^[9]，其被定义为 CFRCM 中碳纤维束与基体界面每单位面积上所受的电荷总量，单位为 C/m^2 ，计算式如下：

$$Q = i_a t \tag{1}$$

其中： i_a 表示 ICCP 试验阳极电流密度 (A/m^2)； t 表示 ICCP 试验通电时长 (s)。

基于此，设定主要试验参数包括砂浆类型及通电环境 (ME)、电流密度 (I) 和通电时长 (D)，试验组别详见表 3。试件编号形如“ME-I-D”，其中砂浆类型及通电环境的两个字母含义如下：

NM 表示普通砂浆且通电环境为饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液；SM 表示海水海砂砂浆且通电环境为海水配制的饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液。所有试件的碳纤维束嵌固长度 L_e (即 CFRCM 板试件长度) 均为 410 mm。例如，NM-I100-D30 表示一组基体为普通砂浆的 CFRCM 板试件，通电环境为饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液，被施加了电流密度为 $100\ \text{mA}/\text{m}^2$ 且通电时间为 30 d 的外加电流。同一试件编号下包含 8 个平行试件，试件总数为 128 个，试验结果取各组平行试件的平均值，ICCP 通电结束后开展电子扫描显微镜观察。

1.3 试件制备

根据表 3 的试验组别制备试件。首先提前制作导电电极，电极布置情况如图 1 所示，每个试件包含 2 个外置测量电极 (0 和 5)、4 个内置测量电极 (1-4) 和 1 个通电联合电极，分别用来测量 CFRCM 板整体和各区段电阻变化以及实现多束碳纤维束同时通电。制作银浆电极时在纤维底部放置

表 3 试验组别
Table 3 Experimental scheme

Specimen numbers	ME	$I/$ (mA·m ⁻²)	D/d	$Q/$ (10 ⁵ C·m ⁻²)	Specimen numbers	ME	$I/$ (mA·m ⁻²)	D/d	$Q/$ (10 ⁵ C·m ⁻²)
NM-N		-	-	0	SM-N		-	-	0
NM-I50-D30	Normal mortar-saturated Ca(OH) ₂ solution	50	30	1.30	SM-I75-D40	Seawater sea-sand mortar-saturated Ca(OH) ₂ solution prepared with seawater	75	40	2.59
NM-I100-D30		100	30	2.59	SM-I100-D30		100	30	2.59
NM-I150-D30		150	30	3.89	SM-I150-D40		150	40	5.18
NM-I200-D30		200	30	5.18	SM-I200-D30		200	30	5.18
NM-I300-D24		300	24	6.22	SM-I300-D32		300	32	8.29
NM-I400-D24		400	24	8.29	SM-I400-D24		400	24	8.29
					SM-I500-D32		500	32	13.39
					SM-I600-D32		600	32	16.07

Notes: ME represents mortar type and electrification environment; I represents current density; D represents electrification duration; Q represents charge density.

单片 316 不锈钢片，涂覆导电银浆后用热风枪固化 1 min，并在表面涂覆一层环氧树脂以隔绝氯离子。制作导电铜胶电极时将涂覆导电铜胶的两片铜片夹住纤维束并用凤尾夹固定 6 h。导电电极制作流程如图 2 所示。

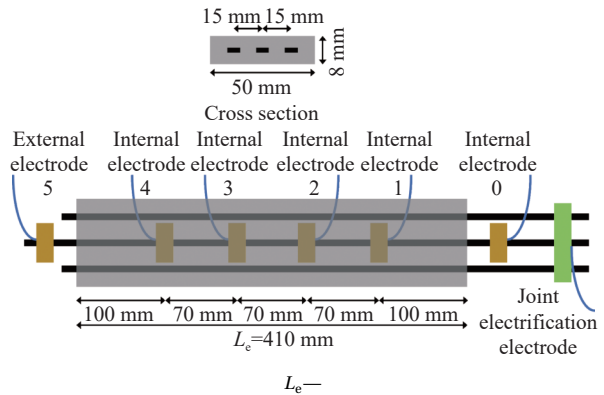


图 1 导电电极布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electrode arrangement

随后进行 CFRCM 板试件的浇筑，流程如图 3 所示。采用分层浇筑法依次浇筑 4 mm 厚下层砂浆、放置预制电极的 3 束纤维束组、浇筑 4 mm 厚上层砂浆。覆膜洒水养护 2 d 后拆模，在温度 20℃、相对湿度 95% 的标准养护环境中继续养护 28 d。浇筑时各组平行试件以整体浇筑 CFRCM 面板的形式存在。

最后进行 ICCP 通电装置的制作。参考 Zhu^[21] 的研究，阳极为碳纤维束，阴极为 3 mm 厚钢板，各组平行试件通过通电联合电极并联同时进行通电，使用免钉胶将亚克力框架固定到试件表面，并根据表 3 的试验组别将不同试件对应的通电溶液装入装置内。图 4 展示了 ICCP 装置的实物图及通电示意图。

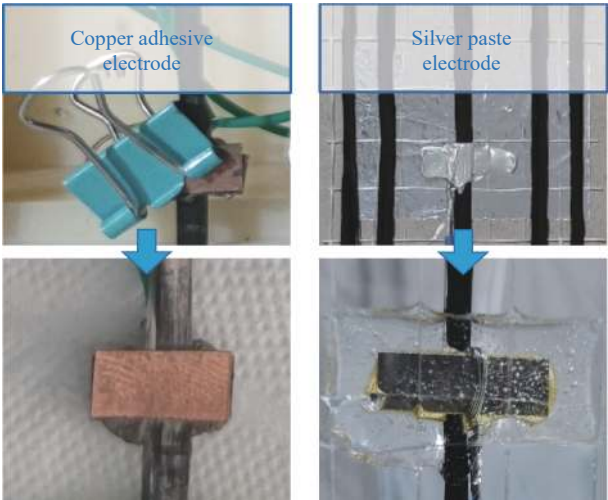


图 2 导电电极制作流程

Fig. 2 Fabrication process for conductive electrodes

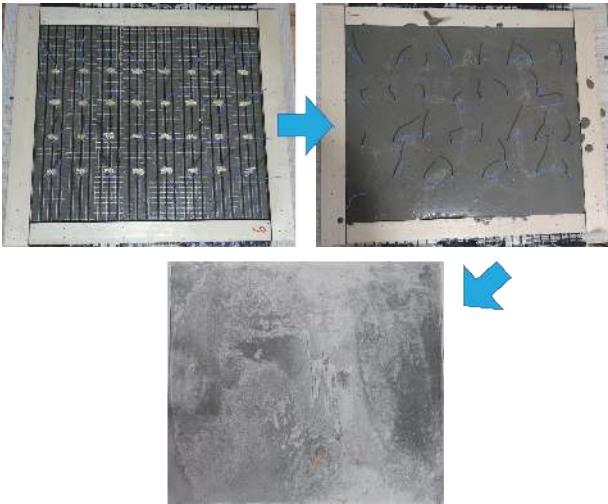
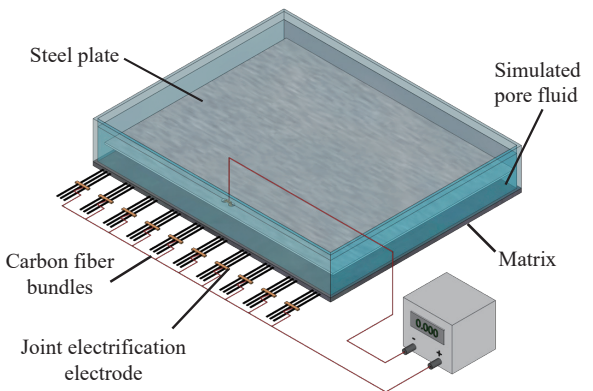


图 3 碳纤维织物增强水泥基复合材料 (CFRCM) 板试件浇筑流程

Fig. 3 Casting process for carbon fabric reinforced cementitious matrix (CFRCM) plate specimens



(a) Physical diagram of ICCP device of CFRCM plates



(b) Schematic diagram of ICCP device of CFRCM plates

图 4 外加电流阴极保护 (ICCP) 装置实物图及通电示意图

Fig. 4 Physical and electrification schematic diagram of impressed current cathodic protection (ICCP) devices

1.4 试验及测试方法

试验时根据表 3 的试验参数向 ICCP 通电装置施加外加直流电 (采用武汉艾德杰公司提供的四通道 10 mA 恒流直流电源), 此时与通电电极相接的阴、阳极将同通电装置内溶液形成闭合电路, 由此建立起稳定的 ICCP 保护系统。

使用电阻变化量 ΔR 和电阻变化率 $\Delta R/R$ 评估 CFRCM 导电性能^[24], 后者计算式如下:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R' - R_0}{R_0} \times 100\% \tag{2}$$

其中: R_0 为基准电阻 (Ω); R' 为变化后的电阻 (Ω)。

测量试件电阻需排除接触电阻的影响, 因此基于伏安法测电阻原理, 采用四电极测量法。测试时向两侧导电电极输入 1 mA 的恒定直流电流, 同时使用利利普公司提供的 NDM2041 四位半台式万用表测量试件两端的电压值, 根据欧姆定律即可计算被测段电阻。测量频率为 2~4 d。

2 试验结果

2.1 CFRCM 板整体电阻变化结果

设置了两种砂浆类型的试验组别探究 ICCP 对 CFRCM 板导电性能的影响, 包含普通砂浆 CFRCM 板 (简称为 NM 组) 和海水海砂砂浆 CFRCM 板 (简称为 SM 组)。根据图 1 的电极布置情况, 采用测点 0~5 间的电阻 R_{05} 来计算试件整体电阻变化率。根据图 5 的 CFRCM 板整体导电性能变化情况可知, 两种砂浆类型试件的电阻变化形式基本相同, 均随着电量密度的增加导电性能不断降低, 电阻的增长可分为线性增长和快速增长两个阶段。具体而言, 当电量密度小于一定值时, 电阻变化率近

似线性增长; 而当电量密度超过一定值时, 此时电量密度只需小幅增加, 电阻变化率便将出现快速增长。NM 组和 SM 组进入快速增长阶段所需的电量密度分别约为 $6 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 和 $13 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, 相较于 NM 组, 此时 SM 组所需的电量密度更大。由图还可知, SM 组普遍需要经受更大的电量密度才能实现与 NM 组相同的电阻变化率, 例如电阻变化率均为 50% 时, NM 组所需的电量密度约为 $5 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, 而 SM 组则要达到 $7 \times 10^5 \sim 9 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 。

图 6 展示了不同砂浆种类对 CFRCM 板导电性能变化的对比结果。可知, 电量密度相同时 SM 组的导电性能劣化程度远小于 NM 组, 而 SM 组的测量电极因氯离子腐蚀使得在电量密度 $Q = 2.592 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 时二者电阻相差不大。基于上述结果, 可认为海水海砂砂浆具有缓解 ICCP 对 CFRCM 板导电性能劣化的作用, 下一节将详细讨论其作用机制。

图 7 展示了电量密度 Q 相同的 CFRCM 板的电阻变化率对比情况。图中相同颜色但不同底纹的柱状图表示电量密度相同的一组试件, 但其电流密度和通电时长均不同。图中可以看出, 相同电量密度下, 即使电流密度和通电时长均不同, 但同组试件的电阻变化率基本相似, 差值均在 5% 左右。这说明在电流密度小于 400 mA/m^2 时, 相较于单独的电流密度或通电时长, 二者的乘积即电量密度 Q 更适合作为 CFRCM 板导电性能变化的影响因素, 这符合 Sun 等^[25] 所提出的等电量密度设计原则。

2.2 CFRCM 板各区段电阻变化结果

CFRCM 板在 ICCP 期间同时记录了各区段的

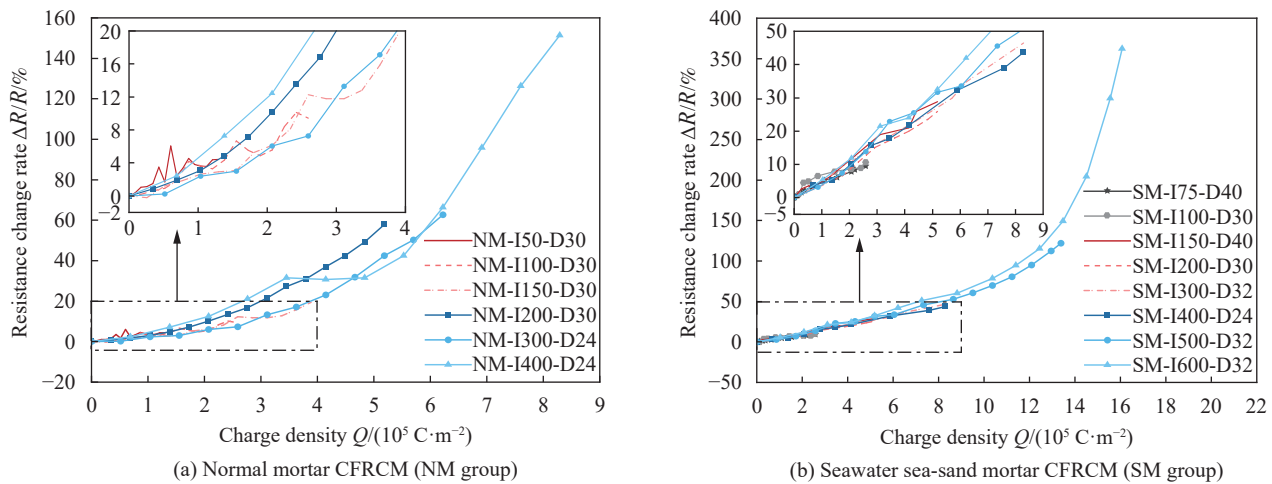


图5 ICCP 作用下 CFRCM 板整体导电性能变化曲线

Fig. 5 Change curves of overall conductivity properties of CFRCM plates under ICCP

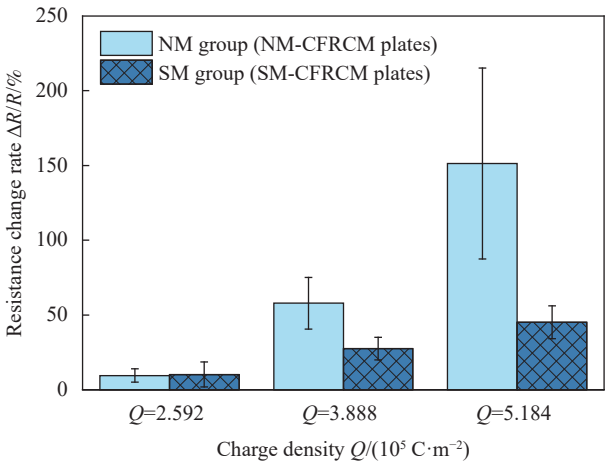


图6 不同砂浆种类对 CFRCM 板导电性能变化的对比结果

Fig. 6 Comparison of changes in conductivity properties of CFRCM plates with different mortar types

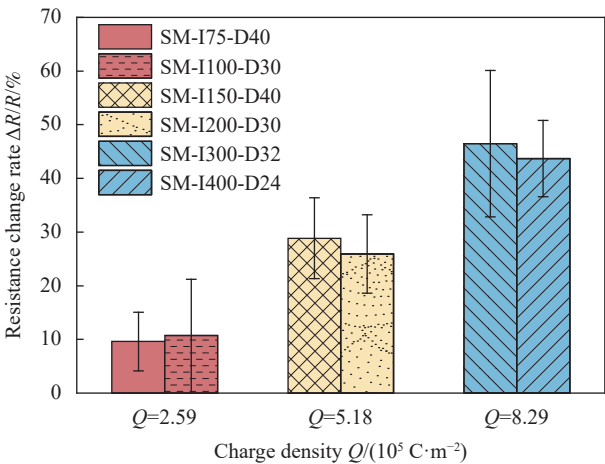


图7 电量密度 Q 相同的 CFRCM 板的导电性能变化情况

Fig. 7 Changes in conductivity properties of CFRCM plates with the same charge density Q

电阻变化情况，根据图 1 的电极布置情况，分别采用测点 0-1、测点 1-2、测点 2-3、测点 3-4 和测点 4-5 间的电阻 R_{01} 、 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{34} 和 R_{45} 来表示。此外，对内置测量电极出现部分损坏的区段进行相邻区段合并测量，例如 R_{01} 和 R_{12} 区段的测量值之和用 R_{02} 来表示。

本节以海水海砂砂浆 CFRCM 板 (SM 组) 为例，展示了不同电阻变化率下试件各区段电阻变化量的面积堆叠图，详见图 8。图中面积占比的大小反映了该区段对整体电阻变化的贡献程度。由图可知，不同电阻变化率下各区段电阻均随电量密度的增大而增长，且增长总量与整体电阻增长基本一致，部分试件存在微小偏差可能是测量误差所致。细部图展示了各区段电阻变化量的绝对值曲线，由图可知，当电阻变化率和电量密度均较小时，各区段电阻增长量差别不大；然而随着电阻变化率和电量密度的增大，某一特定区段的电阻增长量会突然上升，反应在面积堆叠图上则显示为该区段的面积占比会突然增大，例如电阻变化率分别为 270% 和 625% 的试件所对应的 R_{35} 和 R_{23} 区段，此时该区段的电阻变化成为决定整体电阻变化的主要影响因素。造成这种现象的原因主要与 CFRCM 材料的特性有关：一方面，由于生产、运输、加工等因素，组成碳纤维束的单丝的表面和内部可能会存在各种初始缺陷，同时缺陷分布沿纤维长度方向上是不均匀的，具有一定的随机性^[13]；另一方面，砂浆基体中水泥颗粒浸润纤维束沿其纵向和横向也是不均匀的，同时浇筑、养护等因素使得砂浆基体不可避免地存在随机微

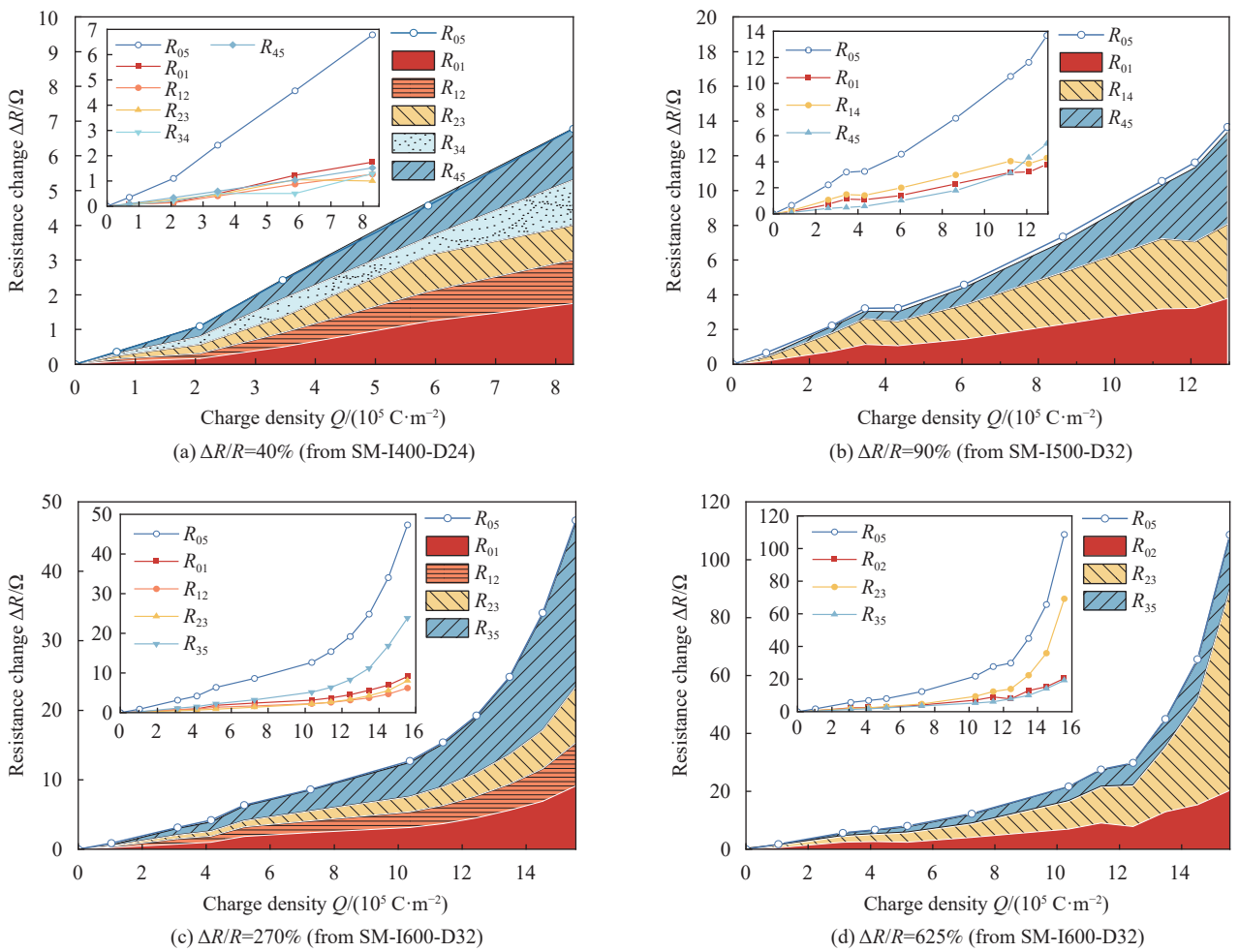


图 8 不同电阻变化率下 CFRCM 板各区段电阻变化情况 (SM 组)

Fig. 8 Changes in resistance of each section of CFRCM plates at varying resistance change rates (SM group)

小孔隙，造成纤维束同孔隙液的接触情况呈现一定的离散性^[1]。CFRCM 材料的不均匀性使其自身存在潜在的性能薄弱点，在 ICCP 作用下薄弱点处导电性能的劣化程度相较其他区域有增大的趋势。较小的电量密度下，上述效应尚不明显，各区段间的导电性能劣化情况相对一致；但在较大的电量密度下，薄弱点附近区段的电阻增长迅速，导电性能的劣化程度明显大于其他区段。

3 ICCP 对 CFRCM 导电性能的影响机制分析
3.1 ICCP 作用下 CFRCM 纤维表面微观形貌

ICCP 试验完成后，选取几组具有通电参数代表性的试件进行切片，使用电子扫描显微镜 (SEM) 观察了纤维表面微观形貌。图 9 展示了普通砂浆和海水海砂砂浆 CFRCM 板经 ICCP 通电后纤维表面微观形貌。

由图 9(a)~图 9(c) 可知，对于 NM 组即普通砂浆 CFRCM 板，随着 ICCP 的持续进行，纤维表面

微观形貌从光滑、完整 (图 9(a)) 逐渐变为愈发明显的粗糙、破损、劣化现象。当电量密度增长到 $5.18 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 时 (图 9(b))，观察到部分纤维表面存在局部损伤，以及由局部微裂缝沿着纤维纵、横向不断扩展所形成的纵向和横向宏观裂缝。同时，部分横向宏观裂缝会沿着纤维横截面继续发展，形成贯穿损伤，造成皮-芯分离状态，碳纤维丝外部皮层结构完全断开，而内部芯层结构显露出来。由于皮层结构导电能力优于芯层结构^[26]，纤维表面的局部损伤和裂缝将降低皮层结构的导电能力，随着皮-芯分离状态的发生，皮层结构的导电能力进一步丧失，两种因素共同导致 CFRCM 板的导电性能明显下降，此时电阻变化率增大至 0.57。当电量密度继续增长到 $8.29 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 时 (图 9(c))，横向宏观裂缝和皮-芯分离状态大量出现在纤维表面，同时裂缝的深度进一步增加使得碳纤维丝的断裂情况增多，原有导电通路进一步

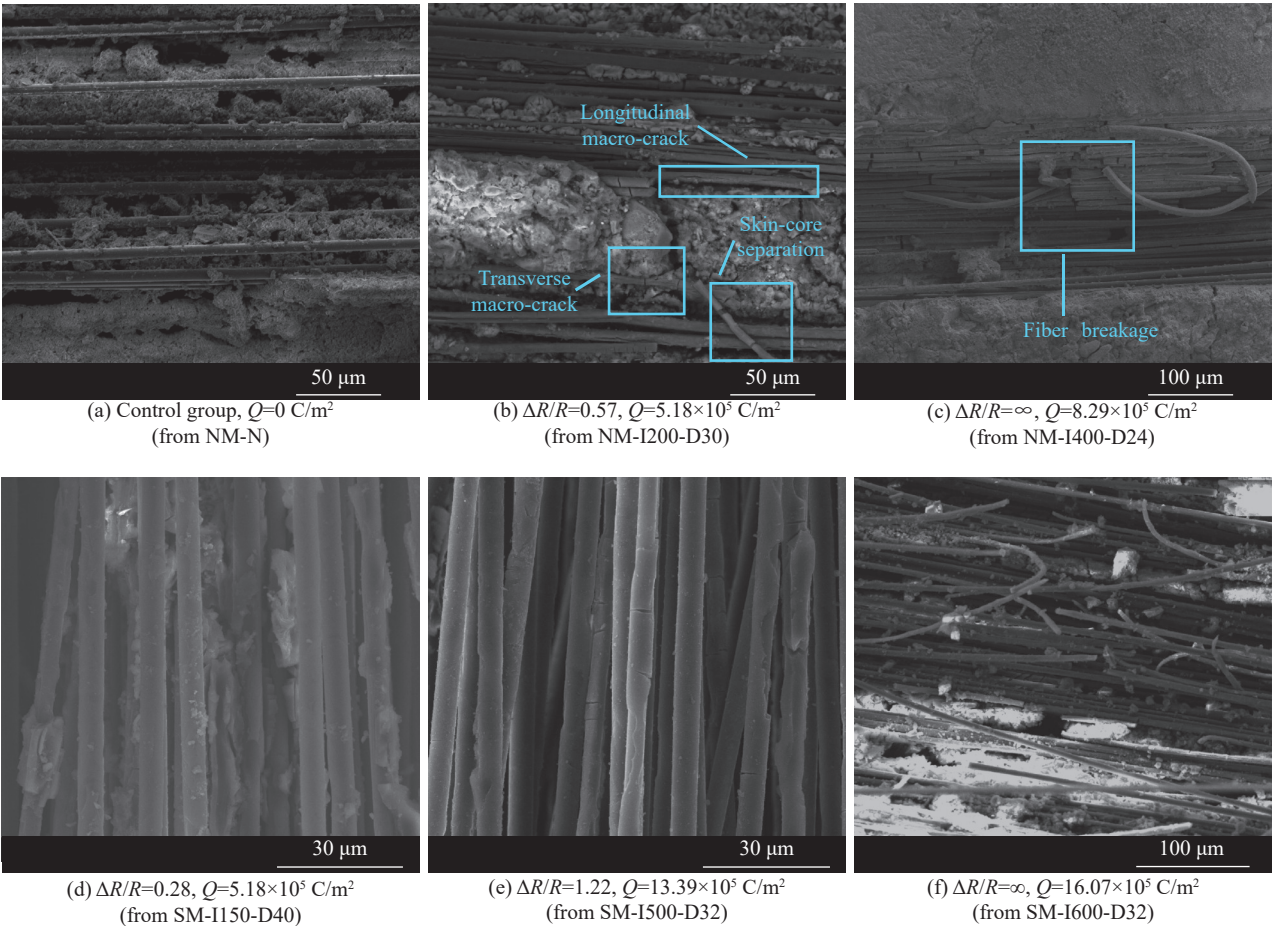


图9 CFRCM 板经 ICCP 通电后纤维表面微观形貌

Fig. 9 Micromorphologies of fiber surface of CFRCM plates under ICCP

减少，最终造成电阻基本无法测量。

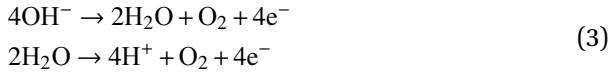
由图 9(d)~图 9(f) 可知，对于 SM 组即海水海砂砂浆 CFRCM 板，其纤维表面微观形貌变化类似于 NM 组，随着电量密度的增加，损伤、开裂、断裂等情况逐渐出现在纤维表面。对比图 9(b) 和图 9(d) 可知，当电量密度均为 $5.18 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 时，相较于 NM 组，SM 组的电阻变化率和纤维表面损伤情况均较小。随着电量密度增大到 $13.39 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 时 (图 9(e))，纤维劣化情况加深，局部损伤与横向宏观裂缝逐步产生，但对比图 9(c) 可知，此时 SM 组具有更高的电量密度，却有更低的电阻变化率和纤维劣化程度。当电量密度继续增长到 $16.07 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 时 (图 9(f))，与 NM 组类似，SM 组纤维表面开裂加剧并伴随着断裂情况的增加，电阻基本无法测量。

综上分析可知，普通砂浆和海水海砂砂浆 CFRCM 板经 ICCP 通电后，损伤、开裂、皮-芯分离和断裂等情况随着电量密度的增加逐渐出现在

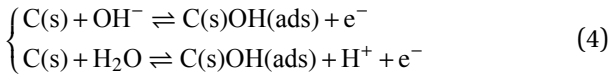
纤维表面，加剧了纤维劣化并降低了导电能力，随着原有导电通路的减少，CFRCM 最终将不再具备导电能力。此外，相较于普通砂浆 CFRCM，电量密度相同时海水海砂砂浆 CFRCM 纤维劣化程度更低。

3.2 ICCP 作用下 CFRCM 导电性能劣化机制

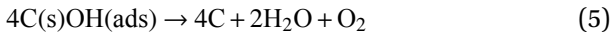
当 CFRCM 用于 ICCP-SS 体系时，在外加电流的作用下，电子将从作为辅助阳极材料的碳纤维一侧流向作为阴极的钢板一侧，钢板附近的电位将会下降，引起钢板锈蚀的相关化学反应将被抑制^[27]。而在阳极一侧，对于淡水河砂混凝土，其孔隙液呈碱性，将发生如下式所示析氧反应：



此时与孔隙液相接触的碳纤维也将和 OH^- 离子发生如下所示的极化反应：



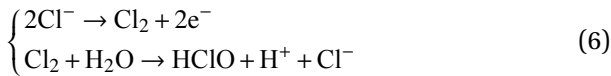
因阳极氧化而形成碳-羟基自由基^[21, 25]。一部分自由基会进一步氧化, 另一部分则可能直接降解。碳纤维优异的导电性源于其沿长丝方向的类石墨片状结构^[26], 自由基的氧化将形成一系列能与碳纤维微观结构结合但又不具导电性的官能团, 包括酮基、羰基、羧基等, 这将破坏碳纤维原本类石墨片状结构的平行晶面状态, 延长或阻断离域 π 电子的运动路径, 进而影响碳纤维的导电性能^[28]。而自由基的降解将促使碳纤维溶解析出游离碳原子, 该过程如下所示:



这表明碳纤维微观结构被破坏, 降低了导电性能。随着自由基的不断氧化与降解, 上述反应朝消耗碳纤维的方向发展。

结合 SEM 图像可知, 碱性环境下阳极极化反应的持续发生和碳-羟基自由基的不断消耗使得碳纤维的劣化情况愈发显著。首先从微观层面上, 自由基的氧化和降解使得碳纤维不再保持原有的类石墨微观结构, 微观缺陷随极化反应的进行逐渐演变为宏观层面上的微裂缝。随后, 微裂缝进一步向碳纤维初始缺陷处扩展, 局部损伤、横向与纵向宏观裂缝等情况随之逐渐出现在纤维表面, 一定程度上降低了皮层结构的导电能力。随着劣化程度的加深, 纤维表面开裂增加, 部分横向宏观裂缝沿纤维横截面继续发展, 形成贯穿损伤, 造成皮层与芯层结构的完全分离, 由于皮层结构导电能力的丧失, 碳纤维的导电通路仅依靠导电能力较差的芯层结构维持着, 致使其导电性能下降明显, 所测得电阻持续增大。最后, 裂缝的深度进一步加深使得碳纤维大量断裂, 电阻基本无法测量。

对于海水海砂混凝土, 由于其孔隙液中氯离子含量较高, 因此阳极一侧同时还将发生与氯离子相关的电极反应^[29], 该过程如下所示:



氯离子失去电子生成氯气, 部分氯气溶于孔隙液并与之反应生成次氯酸和次氯酸盐。由于孔隙液中富含 OH^- 离子, H^+ 离子会与之反应形成 H_2O , 因此上述反应朝生成次氯酸和次氯酸盐的方向发展。

对比式 (4) 和式 (6) 可知, 碳纤维的极化反应与氯离子的电极反应均不断失去电子并生成 H^+ 离

子, 二者同时存在且相互竞争, 使得碳纤维极化反应所承担的极化电流将被氯离子电极反应所部分分担, 从而降低了碳纤维的电极电位, 减少了其化学活性。此外, 氯离子电极反应的产物不会破坏碳纤维微观结构, 亦不影响其导电性能, 因此含氯环境对于减缓 ICCP 对碳纤维材料性能的劣化有积极的作用。针对 ICCP 作用下 CFRP 的相关研究也得到了同样的结论, 相较于 $NaCl$ 与 $Ca(OH)_2$ 混合溶液和饱和 $Ca(OH)_2$ 溶液, 在 3.5% $NaCl$ 溶液中 CFRP 具有更低的反应电压和更佳的力学性能^[30]。在外加电流的作用下, 阳极附近氯离子含量持续增加, 进一步减缓了碳纤维的劣化, 其效果更为显著。

4 ICCP 作用下 CFRCM 电阻预测模型

前文研究结果表明, ICCP 会造成 CFRCM 板的导电性能出现不同程度的下降, 为了量化描述 ICCP 作用所产生的影响, 需建立 ICCP 作用下 CFRCM 电阻预测模型。Gong 等^[13] 在其研究中提出了碳纤维束在非受力状态下的电阻 R 计算公式, 详见下式, 该公式综合考虑了纤维初始缺陷和搭接不确定性的影响:

$$R = \frac{R_f}{N_e} = \frac{\rho L}{A_f N (1 - \eta + \lambda \eta)} \quad (7)$$

其中: R_f 、 ρ 、 L 和 A_f 分别为碳纤维单丝的电阻、电阻率、长度和横截面面积; N_e 、 N 、 η 和 λ 分别为单束碳纤维中能够形成导电通路的有效碳纤维单丝数量、碳纤维单丝总数、单束碳纤维断裂率和等效搭接率。

根据 Gong 等^[13] 的研究, 对于非受力状态下碳纤维束, 其初始断裂率与初始等效搭接率是非变量, 若上式经过移项, 公式左边以试件长度 L_e 与电阻 R 之比表示, 公式右边则可近似视为一个定值。考虑将 L_e/R 作为因变量, 对其开展曲线拟合, 则可得到如下式和图 10 所示 ICCP 下两种砂浆类型 CFRCM 板的电阻预测拟合结果:

$$\frac{L_e}{R} = \begin{cases} -1.495Q + 25.731, \text{NM-CFRCM} \\ -1.211Q + 28.112, \text{SM-CFRCM} \end{cases} \quad (8)$$

由拟合结果可知, L_e/R 和电量密度之间具有比较明显的线性关系。当电量密度为零时, 即在未进行 ICCP 的情况下, L_e/R_0 的取值在 25.731 到 28.112 之间, 该值是非变量, 与电量密度无关, 而仅与 CFRCM 自身材料特性有关, 通过计算试件长度与初始电阻之比即可得到该值。进一步对

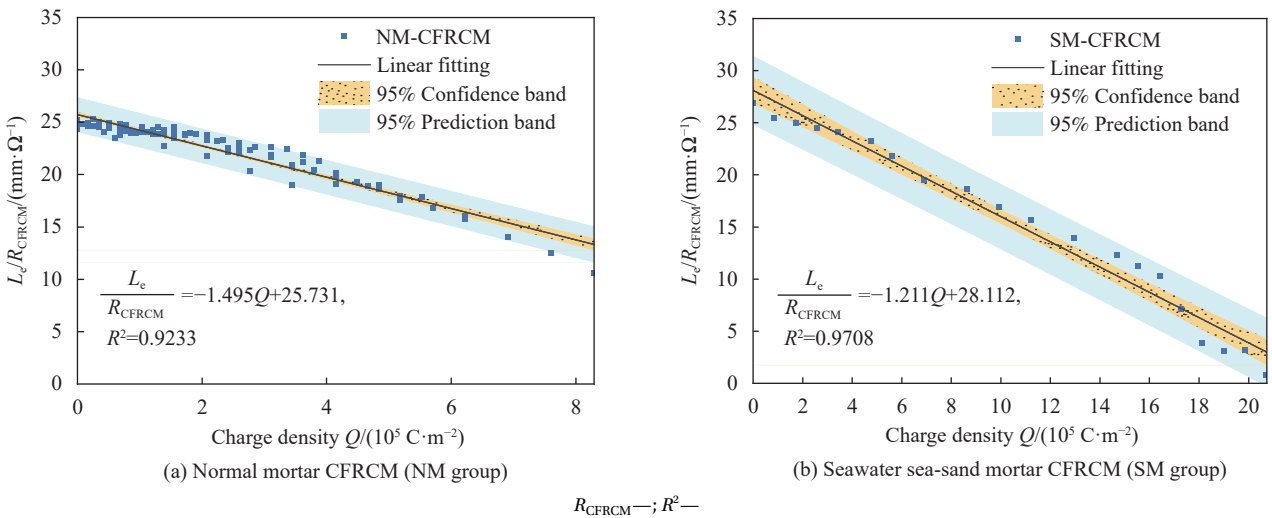


图 10 ICCP 作用下两种砂浆类型 CFRCM 板的电阻预测拟合结果

Fig. 10 Resistance prediction fitting results for CFRCM plates of two mortar types under ICCP

式 (8) 进行移项, 即可得到如下式所示 ICCP 作用下 CFRCM 的电阻预测公式:

$$R = \frac{L_e}{k_{R-ICCP}Q + \zeta},$$

in this paper, $\zeta = \frac{\overline{L_e}}{R_0} = \begin{cases} 25.731 \\ 28.112 \end{cases}$ (9)

$$k_{R-ICCP} = \begin{cases} -1.495, \text{NM-CFRCM} \\ -1.211, \text{SM-CFRCM} \end{cases}$$

其中: L_e 为试件长度; k_{R-ICCP} 被定义为 CFRCM 经 ICCP 通电后导电性能劣化系数, 其绝对值大小表明导电性能劣化程度; $\zeta = \frac{\overline{L_e}}{R_0}$ 被定义为与 CFRCM 自身材料特性相关的非变量, 通过计算试件长度与初始电阻之比可得。

图 11 展示了 ICCP 下两种砂浆类型 CFRCM 的电阻预测模型对比结果, 直线斜率反映了导电性能劣化速率, 可知, ICCP 作用下普通砂浆 CFRCM 的劣化速率大于海水海砂砂浆 CFRCM, 这是由于含氯环境对于减缓 ICCP 对 CFRCM 材料性能的劣化有积极的作用。此外, 图中电阻预测模型与横坐标轴的交点表示 CFRCM 经 ICCP 通电后服役期间内能够承受的最大电量密度 Q_{life} , 即当接近该值时, 导电性能将迅速减弱或彻底丧失^[21]。对于普通砂浆 CFRCM, 本研究中计算得到的 Q_{life} 为 $17.21 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, 与 Zhu^[21] 的研究结果约为 $15.01 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 相近, 验证了本研究提出的电阻预测模型的合理性。同时计算得到海水海砂砂浆 CFRCM 的 Q_{life} 为 $23.21 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, 明显高于普通砂浆 CFRCM, 说明含氯环境可以有效延长 CFRCM 的

电学使用寿命。

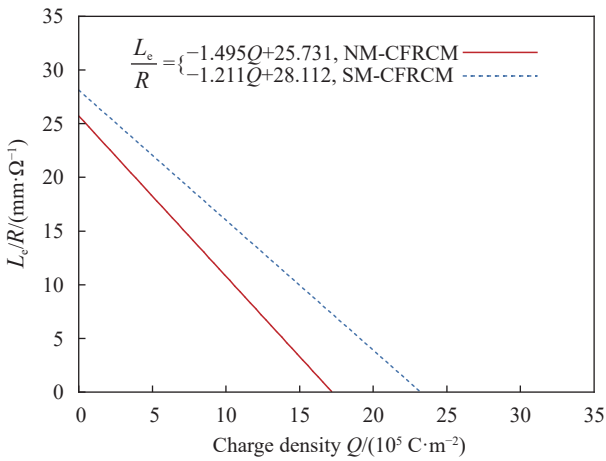


图 11 两种砂浆类型 CFRCM 经 ICCP 通电后的电阻预测模型对比结果

Fig. 11 Comparison of resistance prediction models for CFRCM of two mortar types under ICCP

5 结论

- (1) ICCP 作用下 CFRCM 的电阻随电量密度的增大先线性增长而后快速增长, 呈现两阶段变化特征。海水海砂砂浆 CFRCM 进入快速增长阶段所需的电量密度约为 $13 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5 \text{ C/m}^2$, 大于普通砂浆 CFRCM 所需的 $6 \times 10^5 \sim 8 \times 10^5 \text{ C/m}^2$ 。
- (2) 材料的不均匀性使 CFRCM 存在导电性能劣化薄弱点, 并将影响整体电阻变化。在较大的电量密度下, 薄弱点附近区段的电阻增长量明显大于其他区段。
- (3) 碱性环境中存在浓度较高的氯离子可以分担反应电流, 降低阳极电位, 减小碳纤维化学活

性,同时氯离子电极反应的产物不会破坏碳纤维类石墨微观结构,亦不影响其导电性能,因此海水海砂环境对于减缓 ICCP 对碳纤维材料性能的劣化有积极的作用。

(4) 基于试验结果和通电参数,建立了 ICCP 作用下 CFRCM 的电阻预测模型,结果表明海水海砂砂浆 CFRCM 导电性能劣化速率更低,其服役期间内能够承受的最大电量密度为 $23.21\times 10^5\text{C/m}^2$,高于普通砂浆 CFRCM 的 $17.21\times 10^5\text{C/m}^2$,因此含氯环境可以有效延长 CFRCM 的电学使用寿命。

参考文献:

[1] XIE Z Y, ZHANG D W, WU X, et al. Fatigue performance of prefabricated composite T-beams under cyclic overloading: An experimental study[J]. *Structural Concrete*, 2023, 25(3): 1900-1918.

[2] AHMED A, GUO S, ZHANG Z, et al. A review on durability of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced seawater sea sand concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 256: 119484.

[3] DHONDY T, REMENNIKOV A, SHIEKH M N. Benefits of using sea sand and seawater in concrete: A comprehensive review[J]. *Australian Journal of Structural Engineering*, 2019, 20(4): 280-289.

[4] BYRNE A, HOLMES N, NORTON B. State-of-the-art review of cathodic protection for reinforced concrete structures[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2016, 68(13): 664-677.

[5] WU Y, XIE Z, ZHANG D, et al. Uniaxial tensile behavior of anchored carbon fabric-reinforced cementitious matrix plates[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(8): 4023251.

[6] ZHU J, SU M, HUANG J, et al. The ICCP-SS technique for retrofitting reinforced concrete compressive members subjected to corrosion[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 669-679.

[7] SU M, ZENG C, LI W, et al. Flexural performance of corroded continuous RC beams rehabilitated by ICCP-SS[J]. *Composite Structures*, 2020, 232: 111556.

[8] SU M, WEI L, LIANG H, et al. Fatigue behaviour and design of corroded reinforced concrete beams intervened by ICCP-SS[J]. *Composite Structures*, 2021, 261: 113295.

[9] ZHU J, WANG Z, SU M, et al. C-FRCM jacket confinement for RC columns under impressed current cathodic protection[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(2): 4020001.

[10] CHEN J, WANG J, ZHU J, et al. Study on the corroded hol-

low section RC columns strengthened by ICCP-SS system[J]. *Buildings*, 2021, 11(5): 197.

[11] GONG Y, XIE Z, CHEN G, et al. Influence of cementitious material infiltration on piezoresistive effect of carbon fiber bundle[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2023, 35(7): 4023173.

[12] GOLDFELD Y, QUADFLIEG T, BEN-AAROSH S, et al. Micro and macro crack sensing in TRC beam under cyclic loading[J]. *Journal of mechanics of materials and structures*, 2017, 12(5): 579-601.

[13] GONG Y, XIE Z, LIU J, et al. Research on piezoresistive effect and random model of carbon fiber bundle[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2023, 23(2): 128.

[14] LIU R, XU Z, YIN J, et al. A coupled mechanical and electrical model concerning piezoresistive effect of CFRP materials[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 96: 125-135.

[15] LUAN C, YAO X, SHEN H, et al. Self-sensing of position-related loads in continuous carbon fibers-embedded 3D-printed polymer structures using electrical resistance measurement[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 994.

[16] YANG C Q, WU Z S. Self-structural health monitoring function of RC structures with HCFRP sensors[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, 17(10): 895-906.

[17] GOLDFELD Y, YOSEF L. Electrical-structural characterisation of smart carbon-based textile reinforced concrete beams by integrative gauge factors[J]. *Strain*, 2020, 56(4): e12344.

[18] FENG R, ZHANG J, ZHU J, et al. Experimental study on interface bonding fatigue behavior of C-FRCM composites in ICCP[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 259: 119660.

[19] FENG R, ZHANG J, ZHU J, et al. Experimental study on the behavior of carbon-fabric reinforced cementitious matrix composites in impressed current cathodic protection[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264: 120655.

[20] SU M, WEI L, ZHU J, et al. Combined impressed current cathodic protection and FRCM strengthening for corrosion-prone concrete structures[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2019, 23(4): 4019021.

[21] ZHU M. Bond behavior and degradation mechanisms of multi-functional fabric reinforced cementitious matrix (MFRCM) composites used for ICCP-SS[D]. City: Hokkaido University, 2020.

[22] LIU J, ZHANG D, TAO Y, et al. A pull-out equivalent telescopic layered failure model of carbon fiber bundles in seawater sea-sand cementitious matrix[J]. *Engineering Structures*, 2024, 308: 118052.

- [23] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method of cement mortar strength (ISO method): GB/T 17671—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [24] KANG B, HANNAWALD J, BRAMESHUBER W. Electrical resistance measurement for damage analysis of carbon yarns[J]. *Materials and Structures*, 2011, 44: 1113-1122.
- [25] SUN H, WEI L, ZHU M, et al. Corrosion behavior of carbon fiber reinforced polymer anode in simulated impressed current cathodic protection system with 3% NaCl solution[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 538-546.
- [26] RAPHAEL N, NAMRATHA K, CHANDRASHEKAR B N, et al. Surface modification and grafting of carbon fibers: A route to better interface[J]. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 2018, 64(3): 75-101.
- [27] HU J, LI S, LU Y, et al. Efficiency of electrochemical extraction of chlorides in fly ash concrete using carbon fibre mesh anode[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 249: 118717.
- [28] POLTAVTSEVA M, EBELL G, MIETZ J. Electrochemical investigations of carbon-based conductive coatings for application as anodes in ICCP systems of reinforced concrete structures[J]. *Materials and Corrosion*, 2015, 66(7): 627-634.
- [29] ZENG C, MOHAMED I M, YU H, et al. Enhancement of the corrosion inhibition of carbon fibre via the effect of the chloride ions on its anodic corrosion[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264: 120682.
- [30] ZHU J, ZHU M, HAN N, et al. Electrical and mechanical performance of carbon fiber-reinforced polymer used as the impressed current anode material[J]. *Materials*, 2014, 7(8): 5438-5453.