

迁移阻锈剂和电沉积双效修复对钢筋耐腐蚀性能影响研究

王柱仁, 熊传胜*, 金祖权, 黄雨鑫

(青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525)

摘要: 钢筋的锈蚀极大地缩短了混凝土结构的寿命。在电迁移阻锈剂的基础上, 提出一种电迁移、电沉积双效修复方法, 以修复锈蚀钢筋, 避免二次腐蚀的发生。通过电化学阻抗谱测试、氯离子滴定法评估了双效修复效果。采用毛细吸水试验评价了双效修复对砂浆性能的影响, 采用 XRD 和 SEM 测试分析了双效修复的作用机理。结果显示, 双效修复显著降低了砂浆内部氯离子含量, 修复后钢筋耐腐蚀性能提高了 2 个数量级, 乙醇胺 + 硫酸镁展现出最好的修复效果。此外, 电沉积修复后, 砂浆致密性增强, 硫酸镁沉积作用最明显。

关键词: 钢筋; 双效修复; 耐腐蚀性能; 致密性

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2024)06-0018-08

Study of the effects of dual-effect repair on the corrosion resistance performance of steel reinforcement using electrochemical migration rust inhibitors and electrodeposition

WANG Zhuren, XIONG Chuansheng*, JIN Zuquan, HUANG Yuxin

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: The corrosion of steel reinforcement significantly shortens the lifespan of concrete structures. Based on electrochemical migration rust inhibitors, a dual-effect repair method involving the use of both electrochemical migration and electrodeposition is proposed to repair corroded steel reinforcement and prevent secondary corrosion. The dual-effect repair effects were assessed through electrochemical impedance spectroscopy tests and chloride ion titration. The impact of dual-effect repair on the mortar performance was evaluated through capillary water absorption tests. The underlying mechanisms of dual-effect repair were analyzed using XRD and SEM tests. The results demonstrate that dual-effect repair significantly reduces chloride ion content inside the mortar. The corrosion resistance of the steel reinforcement improves by two orders of magnitude after repair, with ethanolamine + magnesium sulfate exhibiting the best repair performance. Additionally, after electrodeposition repair, the mortar's compactness is enhanced, and the magnesium sulfate deposition is most pronounced.

Key words: steel reinforcement; dual-effect repair; corrosion resistance performance; compactness

收稿日期: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52379126; U22A20229); 青岛市科技计划项目(23-2-1-248-zyyd-jch)

作者简介: 王柱仁(1999—), 男, 河北沧州人。硕士, 研究方向为混凝土耐久性。E-mail: 791201260@qq.com。

* 通信作者: 熊传胜(1987—), 男, 江苏连云港人。博士, 副教授, 主要从事钢筋混凝土腐蚀与防护等方面的研究。

E-mail: xiongcs@qut.edu.cn。

在恶劣的海洋环境下,氯化物引起的钢筋腐蚀是造成钢筋混凝土结构失效的主要原因之一^[1]。钢筋腐蚀后,体积会膨胀 2~7 倍,导致混凝土开裂,缩短了混凝土使用寿命^[2]。阻锈剂被认为是抑制氯化物污染的混凝土中钢筋锈蚀的有效方法之一^[3]。然而,在实际应用中,传统阻锈剂掺杂在混凝土过程中常存在分布不均、与混凝土体系不兼容等问题。为此,学者们发明了电迁移的方法,即通电使得外部阻锈剂进入混凝土内部,来保护钢筋免受侵蚀。然而,在氯化物侵蚀严重和钢筋锈蚀严重的情况下,单一的电迁移方法往往效果不佳,这给研究人员带来了巨大的挑战。

近年来,研究人员提出一种双向电迁移的无损修复技术,该技术可以将阻锈剂迁移进钢筋-混凝土界面,又可达到去除混凝土中氯化物的作用^[4-5]。XU 等^[6]将三乙烯四胺作为迁移阻锈剂用于混凝土腐蚀修复,研究发现,修复后钢筋腐蚀电位上升,腐蚀电流密度下降。柏平等^[7]将双向电迁移技术应用于南通市某一中小型桥梁修复中,结果表明,该技术能去除保护层中 80% 的 Cl^- ,阻锈效果良好。然而,随着研究深入,双向电迁移技术也暴露出很多问题:①通电除氯和阻锈剂迁移过程中,混凝土内部孔隙、微小裂缝联通,造成内部结构孔隙粗大化;②通电结束后,混凝土仍处于氯盐外部环境,外部二次扩散和混凝土内部残存的 Cl^- 很容易造成钢筋的二次腐蚀。因此,必须采取措施来密实混凝土孔隙、减少混凝土二次腐蚀。

电沉积法是 20 世纪 90 年代由日本学者提出的一种电化学修复技术,常用于混凝土裂缝的修复^[8]。其作用原理是施加直流电流后,将 Cl^- 等腐蚀性阴离子迁移到混凝土外,同时将溶液中阳离子迁移到内部^[9-10]。由于混凝土内部呈强碱性,这些阳离子会与 OH^- 生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 等不溶性沉淀物,沉积在孔隙或裂缝处,增加混凝土的致密性^[10]。RYU 等^[11]研究了遭受 Cl^- 侵蚀 18 个月的钢筋混凝土梁试件电沉积法的修复效果,结果表明电沉积法可以使混凝土裂缝(0.5~2 mm)快速愈合。ZENG 等^[12]将十六烷基三甲基溴化稀释物作为电解液,研究了混凝土裂缝的愈合效果,结果显示,电沉积修复后试件致密性大大增强、孔隙率显著降低。

到目前为止,关于电迁移、电沉积双效修复氯离子侵蚀钢筋混凝土结构的技术报道很少,对钢筋修复效果、作用机理尚不明确。本文分别选用了 3 种电迁移阻锈剂和 3 种电沉积剂,通过电化学方法评价了双效修复后钢筋的耐蚀性能。利用氯离子滴定法、毛细吸水试验和 XRD 表征对除氯效果、砂浆致密效果、沉积产物等进行了检测。最后使用 SEM 研究了双效修复法对砂浆试件微观孔隙结构的影响。该方法有望为实际工程中腐蚀钢筋的修复提供新的思路和技术支持。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

本研究中水泥选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,其化学成分见表 1。砂选用青岛周边天然河砂。钢筋选用 $\phi 8 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ Q235 光圆钢筋,化学成分见表 2。

表 1 硅酸盐水泥的化学成分

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	LOI
21.74	5.32	3.32	62.62	1.02	2.18	0.41	0.76	1.93

注:LOI 为烧失量。

表 2 钢筋的化学成分

C	Mn	Si	Cu	S	P	Fe
0.17	0.46	0.26	0.02	0.02	0.05	99.02

1.2 砂浆试样制备

钢筋使用前用砂纸打磨至光亮,在无水乙醇中超声清洗后用蒸馏水冲洗干净。钢筋砂浆的尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$,砂浆配合比为水 200 kg/m^3 、水泥 400 kg/m^3 、砂 400 kg/m^3 ,砂浆内还掺入了 2% NaCl,室温养护 1 d 拆模。拆模后,在钢筋一端焊接导线并用环氧树脂封住,待环氧树脂固化后放

入标准养护箱中养护 28 d, 室温干燥环境养护 120 d, 砂浆试样内部结构和成品如图 1 所示。

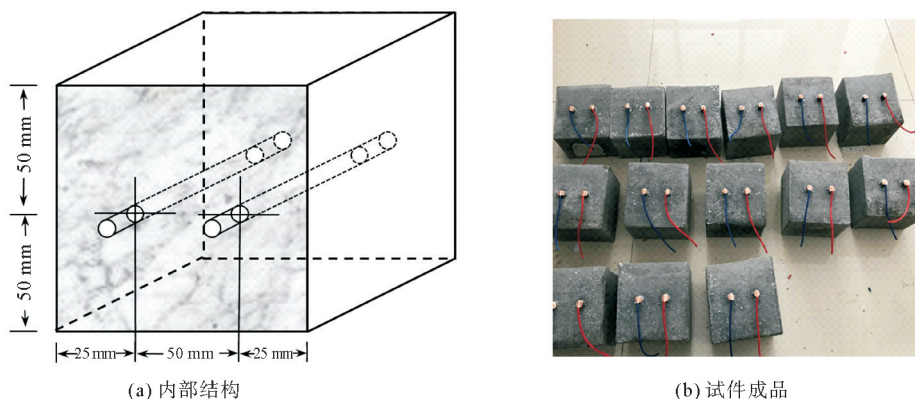


图 1 砂浆试样内部结构和成品

1.3 双效修复工艺

双效修复原理: 通入直流电流, 运用电迁移技术将钢筋砂浆内 Cl^- 迁移到外部, 同时将阻锈剂迁移到钢筋-砂浆界面。再在通电情况下, 运用电沉积技术, 在二次除氯的同时, 将沉积电解质运送到砂浆内部, 在碱性条件下形成沉淀, 封堵内部孔隙及缺陷。

双效修复试验装置如图 2 所示, 装置中砂浆试件中钢筋作为阴极, 钛网作为阳极, 电源采用限压 200 V、限流 1 A 的恒流电源。电迁移试验选用乙醇胺、三乙烯四胺、1,6-己二胺作为电解质, 配置的电解质溶液浓度为 1 mol/L, 电流密度设置为 3 A/m^2 , 通电 15 d。

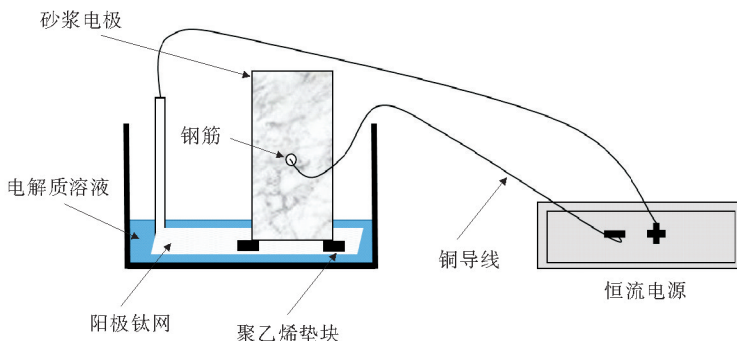


图 2 双效修复试验装置示意

电沉积试验装置不变, 选用 0.25 mol/L 硫酸锌、硫酸镁、硝酸铈电解质溶液, 电流密度设置为 2 A/m^2 , 通电 20 d。

1.4 电化学监测

为了检验双效修复后钢筋耐蚀性能, 使用电化学工作站(上海辰华 CHI600)经典的三电极体系对修复后砂浆试样进行电化学阻抗谱测试(EIS)。该体系中钢筋砂浆试块为工作电极, 铂片为对电极, 饱和甘汞电极为参比电极, 电解液选择饱和的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液。EIS 测试分别在电迁移 15 d 和电迁移 15 d+电沉积 20 d 后进行, 频率范围为 0.01 Hz~100 kHz。

1.5 氯离子滴定试验

为了验证电迁移、电沉积双效修复法的除氯盐效果, 采用了氯离子滴定法测试修复后的砂浆试件中 Cl^- 含量。将不同深度砂浆试件磨粉后, 过 0.8 mm 筛, 烘箱中烘干至干燥后装袋备用。每层深度样品取 5 g 置于密封容器中, 加入 50 mL 去离子水, 晃动均匀后静置 24 h, 采用 AgNO_3 滴定测试溶液 Cl^- 含量。

1.6 毛细吸水试验

毛细吸水试验能反应出材料的密实程度^[13]。将电迁移 15 d 后的钢筋砂浆试件和电迁移 15 d+电沉

积 20 d 双效修复后的钢筋砂浆试件放置于干燥箱中干燥 5 d,烘干温度为 60 °C。将干燥的钢筋砂浆四周涂刷石蜡,质量记录为 m_0 ,随后放入清水中浸泡 72 h,擦干表面水分,质量记录为 m_1 。毛细吸水率 V :

$$V = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \quad (1)$$

1.7 微观表征

使用 XRD(Bruker D8-Advance)分析电沉积测试后沉积产物的种类。电沉积 20 d 后,在钢筋砂浆与电解质溶液接触最底部取样,磨后用烘干箱烘干。扫描角度 5~80°,速度为 2 (°)/min。在 15 kV 电压下,使用 SEM(Hitachi TM3000)对修复前后砂浆底部微观结构进行观察,测试前对样品进行了喷金处理。

2 结果与分析

2.1 电化学阻抗谱(EIS)

修复后电化学交流阻抗谱如图 3 所示,其中 Z_{re} 表示阻抗谱实部, Z_{im} 表示阻抗谱虚部。一般来说,容抗弧半径越大意味着样品耐腐蚀性能越好^[14-15]。图 3(a)显示了电迁移通电 15 d 后测试结果,可以明显看到,相比于空白已腐蚀试件,在电迁移修复 15 d 后,砂浆试件的容抗弧半径均有了较大的提升,其中选用乙醇胺作为阻锈剂的砂浆试件容抗弧半径最大,表明其修复效果最好。图 3(b)—(d)显示了双效修复后的交流阻抗谱测试结果,可以看到,在电沉积修复后,容抗弧半径均有一定程度的上升。这是因为电沉积通电过程使阻锈剂继续向内部迁移,进一步增强了钢筋的耐蚀性,减缓了腐蚀的发生。

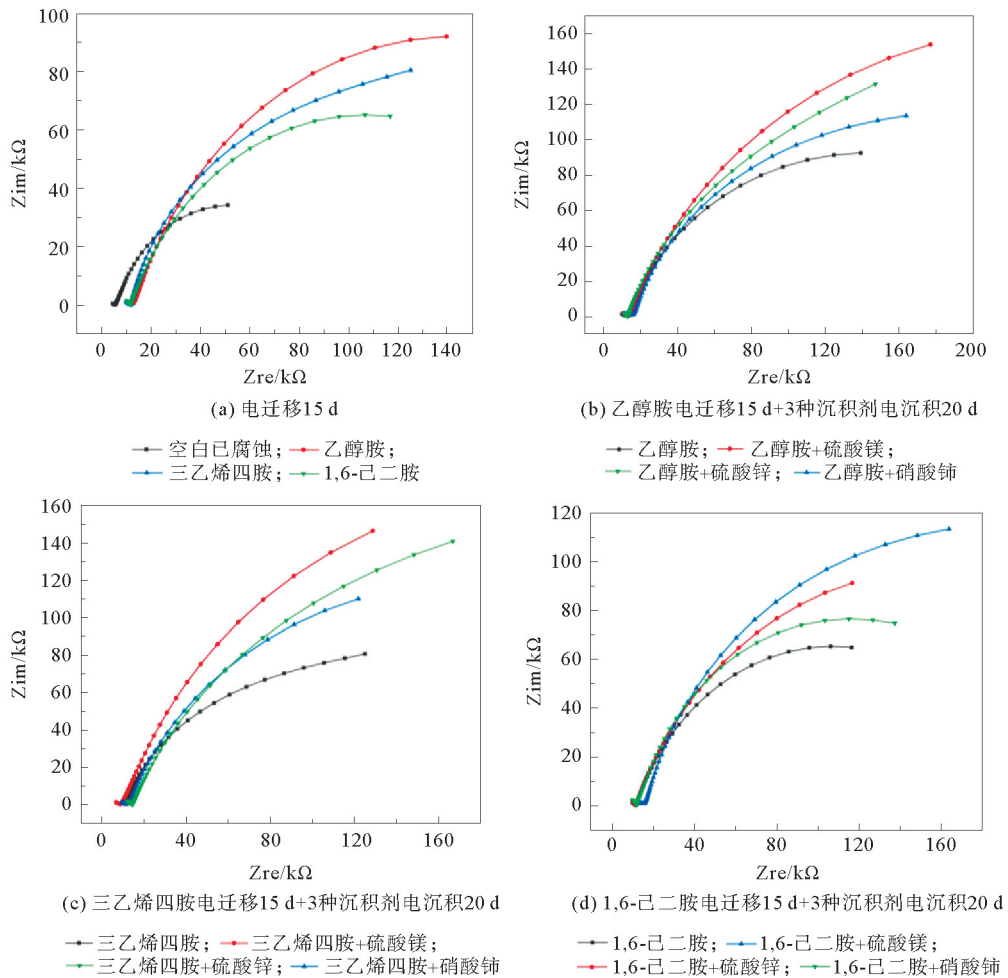


图 3 通电修复后电化学交流阻抗谱

从图 3 中可以清晰地观察到 2 个容抗弧,故用 2 个时间常数的等效电路(图 4)进行拟合。由于钢筋

表面的非均匀性,用恒相位原件(CPE)来代替理想电容。使用 ZsimpWin 软件进行拟合,拟合数据如表 3 所示。

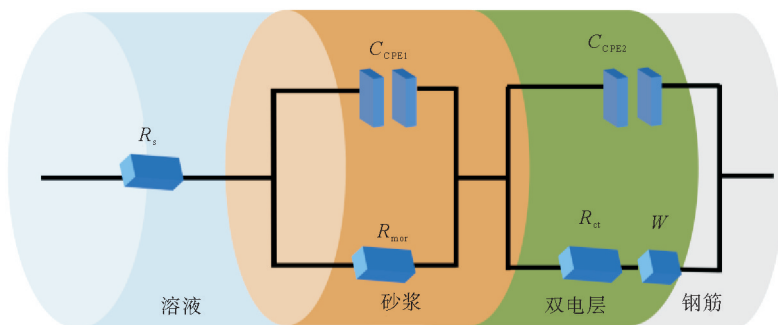


图4 等效拟合电路

R_s —溶液电阻; R_{mor} —砂浆电阻; C_{CPE1} —砂浆电容; R_{ct} —电荷转移电阻; C_{CPE2} —双电层电容; W —扩散阻抗

表3 电迁移修复及电沉积双效修复后拟合参数

模式		$R_s/$	$C_{CPE1}/$	$R_{mor}/$	$C_{CPE2}/$	$R_{ct}/$	$W/$
电迁移	电沉积	$(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$(\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	$(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
空白已腐蚀		6.56	1.64×10^{-7}	5.81×10^4	1.50×10^{-4}	5.42×10^3	2.50×10^{-3}
乙醇胺(15 d)	—	8.64	3.49×10^{-5}	1.42×10^4	3.66×10^{-7}	2.70×10^5	4.04×10^{-5}
三乙烯四胺(15 d)	—	7.15	3.83×10^{-5}	1.21×10^4	3.43×10^{-8}	1.90×10^5	5.17×10^{-5}
1,6-己二胺(15 d)	—	6.91	3.15×10^{-5}	1.18×10^4	4.67×10^{-8}	1.45×10^5	6.60×10^{-5}
乙醇胺(15 d)	硫酸镁(20 d)	8.30	2.85×10^{-5}	4.43×10^4	1.36×10^{-7}	4.71×10^5	1.03×10^{-5}
乙醇胺(15 d)	硫酸锌(20 d)	8.20	3.03×10^{-5}	3.35×10^4	2.19×10^{-8}	2.87×10^5	2.70×10^{-5}
乙醇胺(15 d)	硝酸铈(20 d)	8.17	2.92×10^{-5}	3.27×10^4	2.06×10^{-6}	2.74×10^5	2.63×10^{-5}
三乙烯四胺(15 d)	硫酸镁(20 d)	6.94	3.38×10^{-5}	3.62×10^4	2.04×10^{-7}	3.56×10^5	1.24×10^{-5}
三乙烯四胺(15 d)	硫酸锌(20 d)	7.26	2.80×10^{-5}	3.39×10^4	3.18×10^{-8}	3.49×10^5	3.13×10^{-5}
三乙烯四胺(15 d)	硝酸铈(20 d)	7.65	4.43×10^{-5}	2.73×10^4	1.09×10^{-6}	3.28×10^5	3.53×10^{-5}
1,6-己二胺(15 d)	硫酸镁(20 d)	6.65	2.92×10^{-5}	3.40×10^4	2.06×10^{-6}	2.44×10^5	4.63×10^{-5}
1,6-己二胺(15 d)	硫酸锌(20 d)	7.16	4.05×10^{-5}	3.38×10^4	4.63×10^{-9}	2.64×10^5	5.53×10^{-5}
1,6-己二胺(15 d)	硝酸铈(20 d)	7.12	2.35×10^{-5}	2.19×10^4	4.23×10^{-8}	1.84×10^5	5.42×10^{-5}

从表3可以看到,与空白已腐蚀试件相比,电迁移15 d后 R_{ct} 值增加了约2个数量级,表明在电迁移修复后钢筋耐腐蚀性能增强,这归因于电迁移后阻锈剂到达钢筋表面,吸附成膜,抑制了电荷转移^[16]。此外,在电沉积通电20 d后,样品的 R_{ct} 值继续增加,表明电沉积法能起到进一步修复的作用。在所有试件中,乙醇胺+硫酸镁双效修复组 R_{ct} 值最大,展现出最好的修复效果。值得注意的是,电迁移15 d后3组试件的 R_{mor} 值都发生下降,这可能是由于电迁移过程中离子迁移使得“通道”被扩大所导致。在经过电沉积20 d后,样品 R_{mor} 值又发生上升现象,表明3种沉积电解质均起到了密实砂浆孔隙、堵塞离子传输通道的作用。其中硫酸镁组 R_{mor} 值增值最大,说明其沉积效果最佳。

2.2 双效修复除盐效果

图5显示了电迁移修复15 d和电迁移15 d+电沉积20 d双效修复后的砂浆试件内 Cl^- 质量摩尔浓度随保护层厚度增加的变化曲线。如图5(a)所示,电迁移修复15 d后, Cl^- 含量明显低于空白组,从外到内呈现下降趋势。此外,钢筋附近 Cl^- 含量也明显下降,这些现象证明了电迁移良好的除氯效果。值得注意的是,由于通电后 Cl^- 会发生整体向外迁移,内侧 Cl^- 向外迁移聚集到砂浆试件表层,这使得外侧含量仍然比较高。在经过电沉积修复20 d后(图5(b)),砂浆内 Cl^- 含量进一步降低,钢筋表面砂浆几乎没有

Cl⁻ 的存在。这表明电沉积修复能进一步除盐,抑制钢筋二次腐蚀的发生。

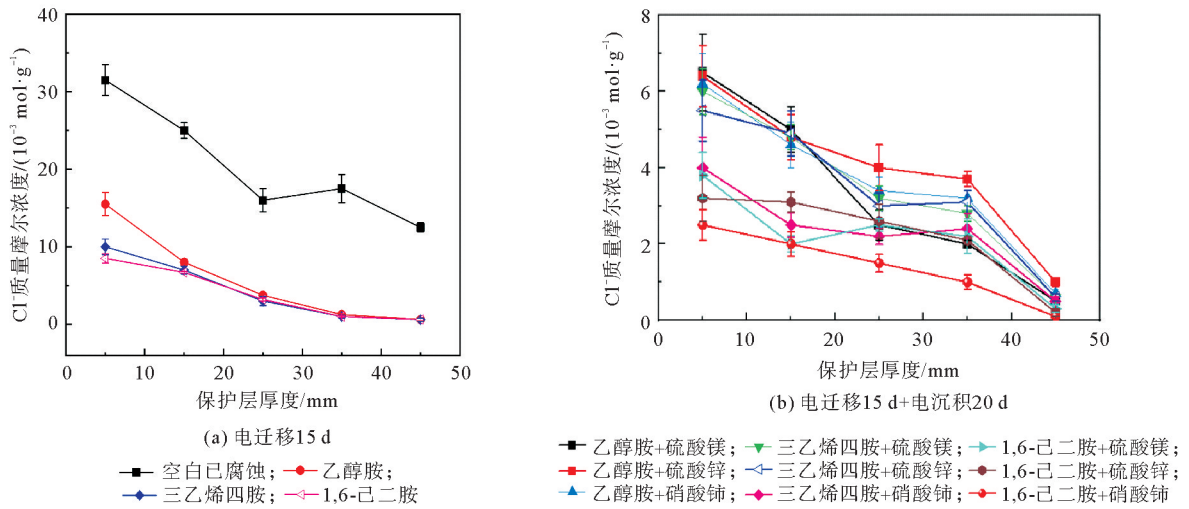


图 5 修复前后砂浆试件内 Cl⁻ 质量摩尔浓度

2.3 毛细吸水试验

图 6 显示了电迁移修复及电迁移、电沉积双效修复前后砂浆试件浸泡 72 h 毛细吸水率。电迁移修复后,砂浆的吸水率上升。这说明电迁移过程扩大了离子传输通道,增加了砂浆的孔隙率。然而,在经过电沉积修复后毛细吸水率明显下降,这是因为电沉积修复法使砂浆试件孔隙率下降,致密程度上升。此外,对比几组试件来看,使用硫酸镁时毛细吸水率最低,表明硫酸镁作为电解液沉积效果最好。硝酸铈致密效果最差,但仍存在密实效果。

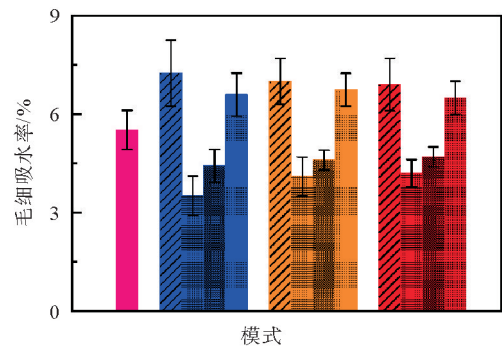


图 6 浸泡72h后砂浆试件毛细吸水率

2.4 XRD 表征

图 7 为双效修复法沉积产物 XRD 图谱。

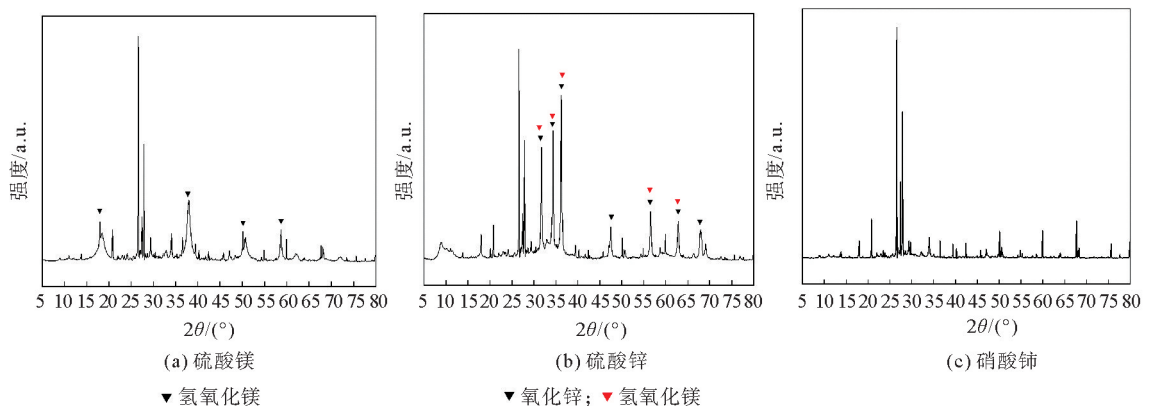


图 7 双效修复法沉积产物 XRD 图谱

如图 7(a)所示,在与标准比色卡比对后发现了氢氧化镁峰,说明了硫酸镁沉积产物的主要成分为氢氧化镁,其可以起到封堵砂浆孔隙,增大砂浆密实度的作用。硫酸锌沉积产物则检测出 2 种产物(图 7(b)),分别为氢氧化锌和氧化锌。值得注意的是,硝酸铈作为电解液电沉积后并未发现明显的沉积产物

(图 7(c)),这可能与沉积产物主要浮于砂浆表面,渗入试件深度有限有关。

2.5 SEM 表征

图 8 为砂浆试件外侧保护层修复前后表面形貌 SEM 图。通电前,空白已腐蚀试件(图 8(a))表面遍布针状结构,显示出明显的孔隙特征。在电迁移修复后,试样表面呈网状结构,孔隙特征更加明显。这可能与 2 个方面原因导致:①通电迁移过程中,离子传输通道被拓宽,阴极析氢反应产生的 H_2 也会使砂浆孔隙增大;②通电使 C-S-H 凝胶结构发生变化,由密实的针状结构变为相对密实的网状结构,造成了密实度下降。

在电沉积修复 20 d 后,硫酸镁和硫酸锌组(图 8(c)(d))孔隙显著减少,表面充满簇状结构。这说明电沉积后,砂浆试件外侧保护层中产生了沉积产物。结合 XRD 及毛细吸水试验结果,可以确定沉积产物的生成是造成结构密实度增加的主要原因。砂浆表面形貌改变的原因可能有 2 种:①生成的沉积产物依附于孔隙,针网状 C-S-H 凝胶结构被覆盖;②C-S-H 凝胶结构再次发生改变,生成大粒子状凝胶粒子。而硝酸铈组(图 8(e))表面并未显示出沉积痕迹,仍然存在大量孔隙特征。结合 XRD 结果,说明硝酸铈作为电沉积电解液时,在砂浆试件外侧保护层中并未生成明显沉积产物或沉积产物只沉积于钢筋砂浆保护层外侧,并未沉积到砂浆内部。

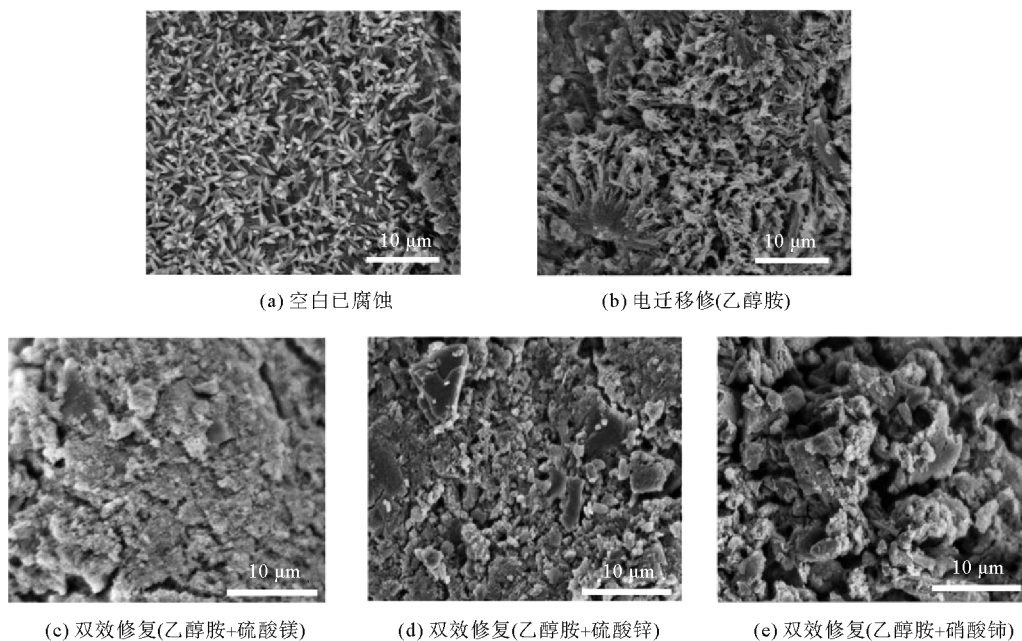


图 8 砂浆试件外侧保护层修复前后表面形貌 SEM 图

3 结论

本文主要研究了双效修复对砂浆试件结构及性能的影响。通过电化学试验、氯离子滴定法分析了该修复方法对砂浆试件耐腐蚀能力的提升效果,通过毛细吸水试验、XRD 测试及 SEM 测试分析了该修复方法对砂浆试件密实度的影响,主要结论如下:

1) 对于腐蚀后的钢筋砂浆,双效修复除氯效果明显,修复后钢筋容抗弧半径增大,耐腐蚀性能提高了 2 个数量级。其中,乙醇胺+硫酸镁组阻抗弧最大,修复效果最好。

2) SEM 及毛细吸水试验结果显示,电迁移修复后,钢筋砂浆孔隙率增大。电沉积后,使用硫酸镁和硫酸锌作为电解液的试验组微观孔隙得到密实,而硝酸铈试验组孔隙率改变不明显。

3) 通过 XRD 表征发现,硫酸镁作为沉积电解液,沉积产物主要为氢氧化镁;硫酸锌作为电解液时,沉积产物主要为氧化锌和氢氧化锌;硝酸铈作为电解液时,没有观测到明显沉积产物,沉积产物分布在钢筋砂浆保护层表面和最外侧空隙中。

参考文献(References):

- [1] MUNDRA S, CRIADO M, BERNAL S A, et al. Chloride-induced corrosion of steel rebars in simulated pore solutions of alkali-activated concretes[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017, 100: 385-397.
- [2] MARTIN U, BASTIDAS D M. Stress corrosion cracking failure analysis of AISI 1018 carbon steel reinforcing bars in carbonated and chloride contaminated environment[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2023, 147: 107159.
- [3] LIU Y Q, GUAN X D, SHI J J. Synergistic inhibition of molybdate and phytate on chloride-induced corrosion of carbon steel in simulated concrete pore solutions[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2024, 145: 105366.
- [4] MAO J H, XU J, ZHANG J, et al. Recycling methodology of chloride-attacked concrete based on electrochemical treatment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 340: 130822.
- [5] LU X Y, SHI Z H, ZHU R, et al. A comparison study of constant current and square wave current in the bidirectional electromigration rehabilitation on chloride-contaminated concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 409: 134216.
- [6] XU C, JIN W L, WANG H L, et al. Organic corrosion inhibitor of triethylenetetramine into chloride contamination concrete by electro-injection method[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 115: 602-617.
- [7] 柏平, 张建东, 许晨, 等. 双向电渗技术在沿海地区小型桥梁中的应用[J]. *现代交通技术*, 2017, 14(5): 50-52.
BAI Ping, ZHANG Jiandong, XU Chen, et al. Application of bi-directional electro-migration rehabilitation method in coastal small bridges[J]. *Modern Transportation Technology*, 2017, 14(5): 50-52.
- [8] JIANG Z W, SUN Z P, WANG P M. Mechanism on rehabilitation of cracks in reinforced concrete using electrodeposition technique[J]. *Journal of Tongji University*, 2004, 32(11): 1471-1475.
- [9] RYU J S. An experimental study on the repair of concrete crack by electrochemical technique[J]. *Materials and Structures*, 2001, 34: 433-437.
- [10] ZHU Z Y, CHU H Q, JIANG S, et al. Improvement in the microbially induced corrosion resistance of concrete sewers using electrodeposition[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 134: 104803.
- [11] RYU J S, OTSUKI N. Crack closure of reinforced concrete by electrodeposition technique[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(1): 159-164.
- [12] ZENG Y X, ZUO Q Y, JIANG S, et al. Effect of CTAB on the healing of concrete cracks repaired by electrodeposition and the durability of repaired concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 326: 126757.
- [13] WANG Y Y, WANG W Z, WANG D J, et al. Study on the influence of sample size and test conditions on the capillary water absorption coefficient of porous building materials[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43: 103120.
- [14] LUO Y B, ZHU W, SU Z J, et al. Formation and characterization analysis of a chromium-free conversion coating on Mg alloy prepared in a Mo-Mn-V based weak acid solution[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 458: 129313.
- [15] WANG D Q, MING J, SHI J J. Enhanced corrosion resistance of rebar in carbonated concrete pore solutions by Na_2HPO_4 and benzotriazole[J]. *Corrosion Science*, 2020, 174: 108830.
- [16] 张弘港, 赵建锋, 彭昊. 锈蚀钢筋-混凝土黏结性能退化试验研究[J]. *青岛理工大学学报*, 2023, 44(5): 1-10.
ZHANG Honggang, ZHAO Jianfeng, PENG Hao. Experimental study on degradation of bond performance between corroded reinforcement and concrete[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*, 2023, 44(5): 1-10.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)