

DOI:10.11918/201907224

混凝土梁电化学修复后的耐久性能及力学特征

张 军¹, 金伟良², 毛江鸿¹, 龙江兴^{1,2}, 樊玮洁¹

(1. 浙大宁波理工学院 土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100; 2. 浙江大学 结构工程研究所, 杭州 310058)

摘 要: 电化学修复技术可对耐久性劣化的混凝土结构进行耐久性提升, 然而也会引起黏结性能降低、混凝土孔隙结构改变、钢筋氢脆等负面效应, 进而影响构件整体的服役性能。为探明电化学除氯和双向电迁处理后混凝土梁的耐久性能及力学性能, 本文结合氯离子含量梯度变化和弱极化曲线等对比分析了电化学修复后梁的抗腐蚀性能, 结合荷载挠度曲线、钢筋与混凝土应变、裂缝分布等对比分析了静力力学性能。研究结果表明: 电化学修复能有效去除钢筋表面氯离子, 使钢筋恢复钝化, 但钢筋笼内氯离子迁移效率相对较低; 通电参数选取较小时电化学修复不影响混凝土梁的刚度和承载能力, 但通电电量较大时承载能力减小, 延性退化较为明显。基于试验结果, 本文建议电化学修复采用的通电参数需综合考虑耐久性提升效果及对力学性能损伤作用, 以满足结构耐久性和安全性的要求。

关键词: 钢筋混凝土梁; 耐久性; 双向电迁; 电化学除氯; 静力性能

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)08-0072-09

Durability enhancement and mechanical properties of concrete beams after electrochemical rehabilitation

ZHANG Jun¹, JIN Weiliang², MAO Jianghong¹, LONG Jiangxing^{1,2}, FAN Weijie¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University Ningbo Institute of Technology, Ningbo 315100, Zhejiang, China; 2. Institute of Structural Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Electrochemical rehabilitation technology is an effective method to improve the durability of chloride ion contaminated concrete structures. However, negative effects such as reduction of bonding performance, pore structure changes of concrete, and hydrogen embrittlement of steel bar are induced simultaneously, leading to the service performance deterioration of the monolithic component. In order to explore the durability enhancement and mechanical properties of concrete beams after electrochemical chloride extraction and bidirectional electromigration, the corrosion resistance properties of concrete beam after electrochemical rehabilitation were analyzed by combining chloride ion content gradient and potentiodynamic polarization curves, and the static mechanical properties were investigated through load-deflection curves, strain of steel and concrete, and crack distribution of concrete. Results show that electrochemical rehabilitation could effectively remove the surface chloride ions of steel bar and restore the passivation of steel bar, but the extraction of the chloride ions inside steel cage was difficult. When small electrification parameters were selected, electrochemical rehabilitation hardly affected the stiffness and load bearing capacity of the beam, while the bearing capacity decreased when the amount of electricity increased, and the ductility degradation became more obvious. In order to meet the requirements of durability and structural safety, it is suggested that effects of durability enhancement and impacts on mechanical properties deterioration should be comprehensively taken into consideration when selecting electrification parameters for electrochemical rehabilitation.

Keywords: reinforced concrete beam; durability; bidirectional electromigration; electrochemical chloride removal; static mechanical properties

氯盐侵蚀引起锈胀开裂是钢筋混凝土结构耐久性问题中最主要的“顽疾”^[1]。电化学修复技术不仅可去除混凝土保护层中的氯离子, 在电解质溶液中

掺入阻锈剂时还可提升钢筋的阻锈性能^[2-4], 是防止结构锈胀开裂、提升混凝土结构耐久性的重要方法。目前, 电化学修复方法主要包括电化学除氯^[5]、电渗阻锈^[6]、双向电迁^[7]及其他新型联合修复方法^[8-9]。其中, 电化学除氯技术研究较早且应用广泛, 近年提出的双向电迁技术在排除氯离子的同时还将阻锈剂迁移至钢筋表面, 表现出较好的应用前景。

尽管电化学修复技术可有效除氯阻锈, 其在实际工程应用中仍存在问题。一方面, 由于实际构件内

收稿日期: 2019-07-29

基金项目: 国家自然科学基金(51638013, 51820105012, 51578490, 51878610); 浙江省自然科学基金(LY18E080003, LQ19E080011); 宁波市自然科学基金(2017A310313)

作者简介: 张 军(1988—), 男, 博士, 讲师;

金伟良(1961—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 毛江鸿, jhmao@nit.zju.edu.cn

部钢筋分布复杂,电化学修复过程中形成的不均匀电场将影响氯离子的排除效果,已有电化学修复效果研究主要集中在钢筋布置单一的小试块,应用于实际混凝土构件时必然存在差异,如 Arya 等^[10]对内置 1~3 根受力钢筋的试块进行除氯效率的研究,发现水平布置钢筋数量越多,形成的阴极区域越大;在恒定电流密度的作用下形成的电场分布越广,除氯效率也就越高. 另一方面,电化学方法在提升混凝土结构耐久性的同时,对钢筋混凝土本身也会带来一些负面影响,如钢筋-混凝土黏结力降低^[11]、混凝土强度降低^[12]、混凝土孔隙结构改变^[13]、钢筋氢脆^[14]等,如 Buenfeld 等^[15]进行了电化学除氯后混凝土试件的拉拔试验,发现钢筋与混凝土间的黏结强度明显降低. Ihekawaba 等^[16]的研究表明,电流密度增大会导致阳离子在阴极区积聚从而使混凝土产生软化现象:当电流密度为 3 A/m² 时,尽管除氯效率达到了 70%,但黏结强度的损失也达到了 58%. Siegwart 等^[17]对电化学修复后的预应力筋进行拉伸试验,发现析氢反应产生的氢原子渗入钢筋后不影响钢筋的强度,但对钢筋的塑性影响较大. 谢振康^[18]进行了电化学修复后普通钢筋的慢速率拉伸试验,结果表明钢筋的屈服强度、极限强度及对应的变形变化很小,氢致塑性降低主要表现在钢筋的颈缩阶段. 现有研究均已表明电化学修复会对钢筋混凝土材料及界面性能造成不利影响,因此,也必然影响构件的整体力学性能,但目前相关研究却十分匮乏. 张鑫等^[19]对混凝土梁进行了电化学除氯,结果表明电化学除氯能有效抑制钢筋锈蚀,但受弯试验结果显示混凝土梁的承载能力显著下降. Swamy 等^[20]对不同水灰比的混凝土梁进行电流密度为 1 A/m² 的电化学修复,发现构件内复杂的钢筋网将

导致部分氯离子聚集且难以排除,梁的抗弯承载力变化不大;该文认为电流密度较小时承载力变化较小,大电流密度和长期的除氯处理对构件承载力的影响还有待研究.

综上所述,电化学修复技术虽然可有效提升氯盐侵蚀钢筋混凝土结构的耐久性能,但目前对钢筋布置复杂的混凝土构件的除氯阻锈效果及对构件整体力学性能的影响尚不明确. 电化学修复技术应用对象为受氯盐侵蚀的混凝土构件,而混凝土构件的力学性能是钢筋/混凝土材料性能与界面黏结性能的综合表现. 本文选取电化学除氯及双向电迁技术进行混凝土构件层面的研究,结合氯离子、氮元素含量分布和钢筋极化特征分析电化学修复后混凝土梁的耐久性提升效果,并开展修复后混凝土梁的静载试验,获取不同通电参数下构件的承载力、延性等整体力学性能指标的变化. 研究结果可为电化学修复技术应用于实际混凝土结构提供参考.

1 试验概况

1.1 试件设计

试验设计混凝土强度等级为 C30,混凝土材料采用 42.5 号普通硅酸盐水泥、中砂和 5~16 mm 连续级配粗骨料,配合比为水:水泥:砂:石=210:382:651:1157;预掺 3% NaCl(相对水泥质量)以模拟构件已遭受氯盐侵蚀;测得的 28 d 标准立方体试块抗压强度为 37.5 MPa. 为保证梁的破坏模式为弯曲破坏,底部受拉纵筋采用 HRB335 钢筋,直径为 14 mm;箍筋及上部架立筋为 HPB300 钢筋,箍筋间距 100 mm,保护层厚度 25 mm. 在浇筑过程中插入一片 70×100 mm 的薄钢板,作为极化曲线测量的辅助电极. 梁的尺寸及配筋见图 1.

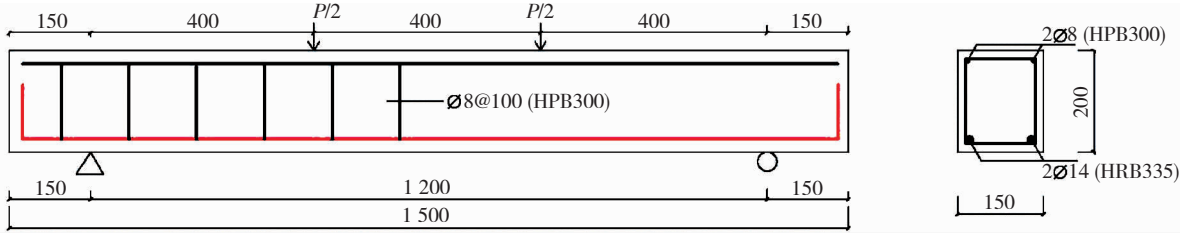


图 1 试件几何尺寸及配筋图(mm)

Fig. 1 Geometry and reinforcement details of specimens (mm)

1.2 试验步骤

1.2.1 电化学修复过程

对梁进行不同通电参数的电化学修复,其中,空白对照梁 L0 不作电化学处理, LB 表示双向电迁修复的梁, LE 表示电化学除氯修复的梁. 三乙烯四胺(TETA)已被试验证实具有良好的迁移性能和阻锈效果^[21],本试验中双向电迁修复采用 1 mol/L 的三

乙烯四胺溶液作为阳极液;电化学除氯修复的阳极液为饱和氢氧化钙溶液. 通电电流密度为 1、3、5 A/m²,通电时间为 7、14、28 d. 具体参数见表 1.

电化学修复方案见图 2. 为模拟实际工程的电化学修复,梁的侧面和底面布置不锈钢网作为阳极. 为消除电化学修复过程对锚固区的影响,电化学修复范围在跨径 1200 mm 内. 通电采用恒定电流密度

控制方式,将内部钢筋笼引出的导线接入外部电源负极,外部不锈钢网接入电源正极,通电过程中定期监测并更换阳极液,确保其 pH 值大于 10.

表 1 试件除氯参数

Tab. 1 Chloride removal parameters of specimens			
梁编号	修复方式	电流密度/(A/m ²)	通电时间/周
L0	—	—	—
LB1 - 2	双向电迁	1	2
LB3 - 2	双向电迁	3	2
LB5 - 2	双向电迁	5	2
LB3 - 1	双向电迁	3	1
LB3 - 4	双向电迁	3	4
LE3 - 2	电化学除氯	3	2
LE3 - 4	电化学除氯	3	4

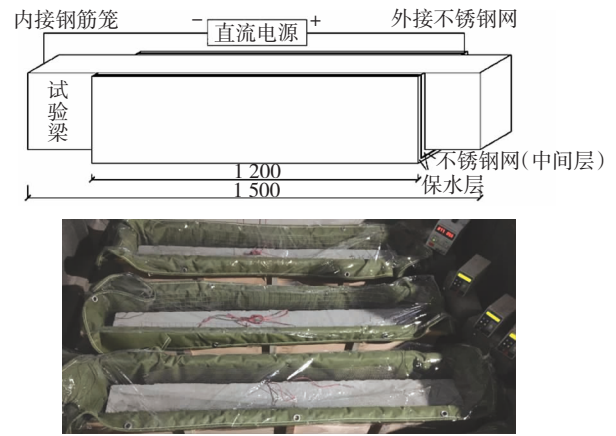


图 2 试验梁电化学修复方案及实施图

Fig. 2 Details of electrochemical rehabilitation of test beams

1.2.2 耐久性提升效果检测

1)极化状态测试:梁电化学修复前以及通电完成后放置 45 d 以去极化^[22],使用美国 Gamry 公司的电化学工作站 Reference 600 对修复后的梁腐蚀体系进行弱极化曲线测量以评定其耐久性提升效果. 试验采用三电极体系,内部钢筋笼作为工作电极,梁内预埋钢片作为辅助电极,参比电极饱和甘汞电极 (SCE),设定弱极化曲线的扫描范围为 +0.07 ~ -0.07 V(vs. SCE),测试过程见图 3.

2)氯离子及氮元素含量分布测试(含量指氯离子/氮元素与混凝土的质量百分比):为研究电化学修复后混凝土梁残余氯离子的分布特征,对梁进行氯离子含量分布测试. 双向电迁在除氯的同时将阻锈剂迁至钢筋表面,试验对钢筋表面氮元素含量进行测试,以此推算出阻锈剂含量^[20]. 测试部位见图 4,钻孔方向分别为梁侧面横向钻进和梁底面竖向钻进,钻孔位置依次为靠近纵筋区域(A 区和 D 区)、靠近箍筋区域(B 区和 E 区)、远离钢筋区域(C 区和 F 区),采用 12 mm 钻头每 10 mm 一层进行取样分析. 用

0.3 mm 筛子筛分后使用 RCT 测试氯离子含量,用 0.075 mm 筛子筛分后借助 Italy Thermofinnigan Flash EA1112 有机元素分析仪测试阻锈剂含量.



图 3 动电位极化曲线测试

Fig. 3 Potentiodynamic polarization curve test

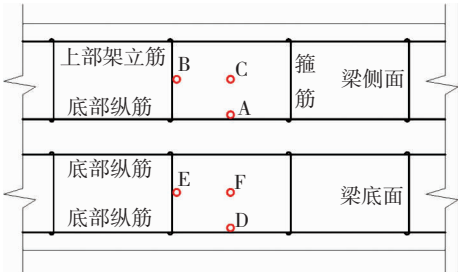


图 4 钻孔取粉位置示意

Fig. 4 Drilling powder position of test beams

1.2.3 静载试验

试验采用三分点加载方式,净跨 1200 mm,剪跨 400 mm,见图 1 和图 5. 电化学修复后梁表面进行清洗并粉刷白浆以便观察裂缝;支座及跨中布置位移计,在跨中沿高度方向布置混凝土应变片. 此外,浇筑前在纵筋跨中位置粘贴应变片. 正式加载前先进行预加载,确保试验装置及试件各部分处于正常状态.

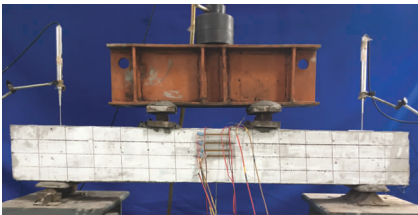


图 5 试验梁加载现场图

Fig. 5 Loading site of test beams

2 电化学修复后耐久性提升效果

2.1 Cl⁻ 和 N 元素分布特征

由于梁内部钢筋布置复杂,外表面(阳极)与内部钢筋(阴极)之间形成不均匀电场,混凝土内部氯离子向阳极迁移后,残余氯离子呈现不均匀分布. 限于篇幅,本文仅对 B 区混凝土进行不同通电参数下混凝土内氯离子含量的分布特征分析,见图 6. 相比于试件 L0,经过电化学修复后的梁内部氯离子含量均有所降低,钢筋附近氯离子去除效率达到 64% ~ 93%;随电流密度和通电时间的增加,除氯效率也不

断提高.此外,由于钢筋与外部阳极之间的电场强度分布不均匀,钢筋附近电场强度最大,氯离子含量沿深度方向均呈先减小后增大的分布特征,靠近钢筋处氯离子含量大幅度降低,表明电化学修复可有效去除混凝土保护层中的氯离子.但是,图 6 中 30 ~ 60 mm 深度处氯离子含量逐渐增加,表明钢筋笼内部的氯离子迁移受阻,这与 Garces 等^[23]、Chang 等^[24]的研究结果相符,由于电化学修复过程中梁内部钢筋笼具有相同的电位,钢筋笼内氯离子需绕过外层钢筋向外迁移,导致钢筋笼包围的混凝土内氯离子迁移效率较低.图 7 也显示了类似的分布特征,由于 A 区和 D 区贯穿钢筋附近,其整体氯离子含量较低;而 C 区和 F 区远离钢筋区域,除氯效率最低,但该区域钢筋层(20 ~ 30 mm)处除氯效率仍可达 60%.图 8 显示了双向电迁和电化学除氯两种不同修复方式下残余氯离子分布情况,结果表明相同通电参数下二者除氯效率无明显差别.

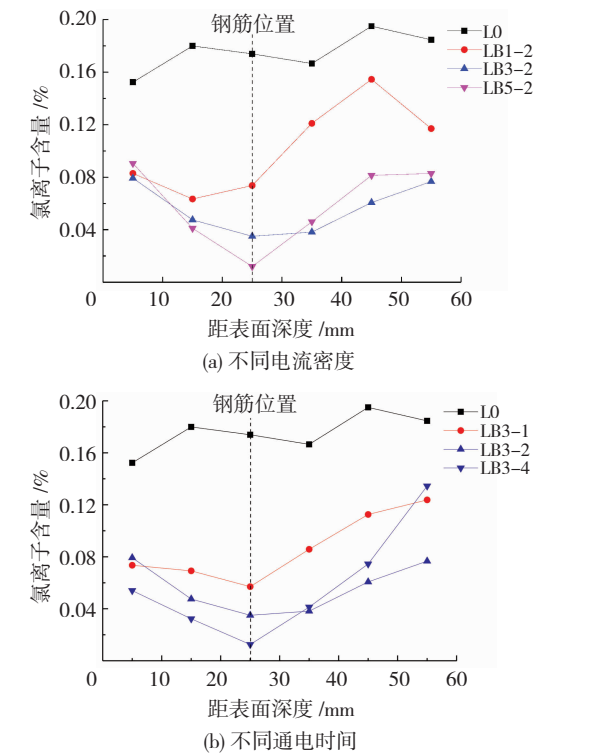


图 6 不同通电参数下 B 区氯离子含量分布
Fig.6 Chloride ion content distribution in section B under different electrification parameters

双向电迁将氯离子迁出的同时,电迁移型阻锈剂被迁至钢筋表面还可阻止钢筋再次腐蚀.表 2 列出了不同通电参数下双向电迁修复梁纵筋表面阻锈剂与氯离子残留量的比值,发现二者的摩尔比(TETA/Cl⁻)均大于 1,且电流密度和通电时间越大,迁至钢筋表面的阻锈剂越多.已有研究表明,当钢筋表面阻锈剂与氯离子的摩尔比大于 1 时,阻锈剂对钢筋能起到良好的阻锈效果^[21].相比电化学除

氯,双向电迁技术能同时起到除氯及阻锈作用,阻锈剂的迁入有效提高了钢筋抵御再劣化的能力^[25],符合浙江省工程建设标准《混凝土结构耐久性技术规范》^[26]阻锈基团与氯离子浓度比不应小于 1 的规定,可有效维持梁的长期阻锈效果.

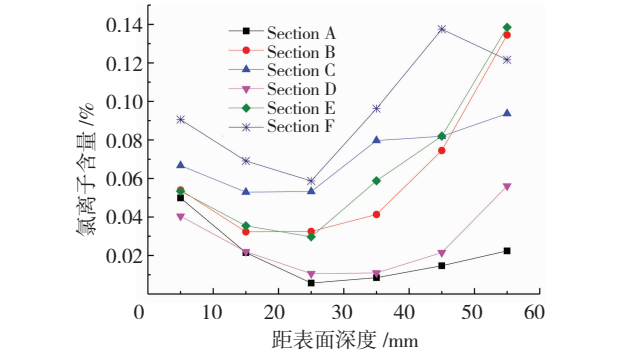


图 7 不同取样位置氯离子含量分布
Fig.7 Chloride ion content distribution at different sampling locations

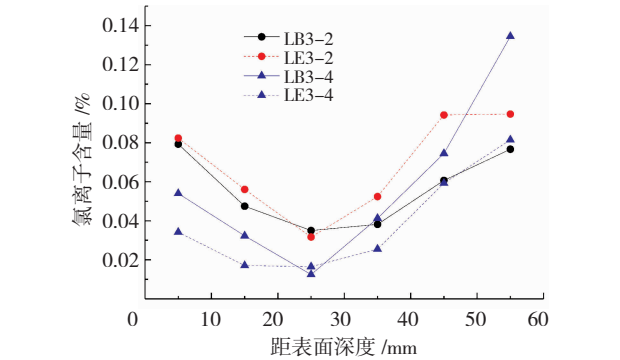


图 8 不同电化学修复方式下 B 区氯离子含量分布
Fig.8 Chloride ion content distribution in section B under different electrochemical rehabilitation methods

表 2 双向电迁后钢筋表面阻锈剂与氯离子摩尔比
Tab.2 TETA/Cl⁻ on surface of steel bars after bidirectional electromigration

梁编号	阻锈剂/(mol/g)	氯离子/(mol/g)	TETA/Cl ⁻
LB1-2	1.594 × 10 ⁻⁴	1.246 × 10 ⁻⁴	1.28
LB3-2	1.780 × 10 ⁻⁴	5.915 × 10 ⁻⁵	3.01
LB5-2	2.019 × 10 ⁻⁴	4.028 × 10 ⁻⁵	5.01
LB3-1	1.528 × 10 ⁻⁴	9.634 × 10 ⁻⁵	1.59
LB3-4	2.712 × 10 ⁻⁴	3.634 × 10 ⁻⁵	7.46

2.2 钢筋极化特征

极化曲线是分析金属腐蚀速率的重要方法,显示了钢筋的腐蚀程度及活化状态,其中强极化对腐蚀体系扰动过大,而线性极化的近似处理会产生一定误差^[27].因此本文采用弱极化曲线分析电化学修复前后梁内部钢筋的活化状态,进而评价电化学修复后梁抵御再劣化的能力,见图 9.由于构件浇筑时预掺氯盐,梁 L0 的弱极化曲线表明内部钢筋已处于一定的活化状态,腐蚀风险较高.除氯处理后梁的弱

极化曲线明显上移,表明其开路电位上升;阳极极化区段斜率显著增大,说明梁内钢筋活性降低,耐久性提升效果明显^[28],且通电时间越长、电流密度越大,上述变化越明显.原因是随着通电量的增加,钢筋表面氯离子含量持续降低,同时作为阴极的钢筋附近氢氧根离子增加促进钢筋处于钝化状态.

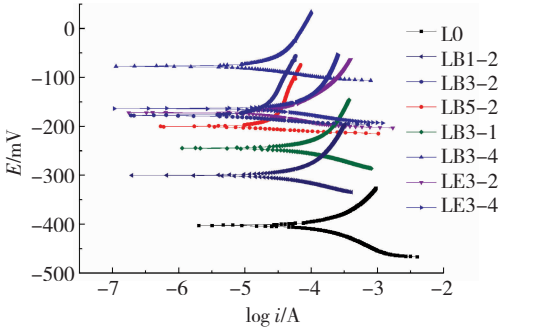


图 9 试验梁动电位极化曲线

Fig. 9 Potentiodynamic polarization curves of test beams

Miranda 等^[29]对比除氯前后的混凝土试件发现单纯凭借开路电位判断钢筋的腐蚀状态并不严谨,需结合腐蚀电流密度等电化学参数进行综合评定.本文对弱极化曲线进行拟合分析,得到了通电前后梁腐蚀体系的开路电位 E_{corr} 和腐蚀电流密度 I_{corr} ,具体数值见表 3. 各梁为同批次浇筑,通电前腐蚀状态相近, E_{corr} 在 -400 mV 左右, I_{corr} 约为 $0.18\text{ }\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$. 经过不同通电参数的电化学除氯和双向电迁处理后,大部分梁的 E_{corr} 均上升至 -300 mV 以上, I_{corr} 下降到 $0.1\text{ }\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 以下. Hornbostel 等^[30]、Millard 等^[31]认为 I_{corr} 低于 $0.1\text{ }\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时钢筋腐蚀速率非常低,且中国冶金部标准规定开路电位大于 -250 mV 时,钢筋腐蚀风险低. 此外,对比相同通电参数下的双向电迁和电化学除氯修复后梁的腐蚀参数发现,双向电迁梁 LB3-2 和 LE3-4 相比于电化学除氯梁 LE3-2 和 LE3-4 的开路电位更大,腐蚀电流密度更小,阳极极化曲线斜率更大,表现出良好的钝化状态. 原因在于双向电迁将阻锈剂电迁移至钢筋表面,通过抑制钢筋的电极过程,使钢筋恢复钝

化^[31]. 因此,电化学除氯及双向电迁能有效抑制梁内部钢筋的腐蚀,且双向电迁将阻锈剂迁移至内部钢筋表面,增强钢筋钝化状态,有效提升了梁抵御氯离子侵蚀的能力和耐久性性能.

表 3 通电前后的腐蚀参数

Tab. 3 Corrosion parameters before and after electrification

梁编号	通电前		通电后	
	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$I_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$I_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
LB1-2	-414	0.171	-300.0	0.112
LB3-2	-385	0.182	-172.0	0.063
LB5-2	-397	0.179	-200.5	0.058
LB3-1	-408	0.196	-244.7	0.092
LB3-4	-324	0.168	-77.3	0.057
LE3-2	-392	0.173	-163.7	0.079
LE3-4	-376	0.185	-177.8	0.066

3 电化学修复后梁的力学性能

3.1 裂缝分布特征

梁裂缝分布见图 10,统计纯弯段(灰色区域)裂缝数目及宽度(0.8 倍屈服荷载)发现,未进行电化学修复的梁 L0 在受弯过程中裂缝发展更为饱满,裂缝数目多、间距小;梁 LB1-2、LB3-2 和 LB5-2 的裂缝分布稀疏,且随着通电电流密度的增加,裂缝间距加大. LB3-1、LB3-2、LB3-4、LE3-2 和 LE3-4 也有同样的变化特征. 混凝土裂缝分布的变化原因可从钢筋混凝土黏结性能变化角度分析:梁开裂后,两条裂缝间的混凝土回缩会受到钢筋-混凝土界面黏结力的约束,钢筋的部分应力传递给该区段的混凝土后继续协同工作,当混凝土应力再次增大至混凝土的抗拉强度,两条裂缝间的混凝土产生新裂缝,最终形成多条裂缝^[32]. 电化学修复后钢筋与混凝土界面软化及析氢反应导致钢筋与混凝土间的黏结力降低^[15,33],混凝土与钢筋协同受力性能受到削弱,裂缝产生后混凝土回缩受到的摩阻力减小,钢筋传递给混凝土的应力更小,难以形成新的裂缝,最终呈现出构件整体裂缝间距增加.

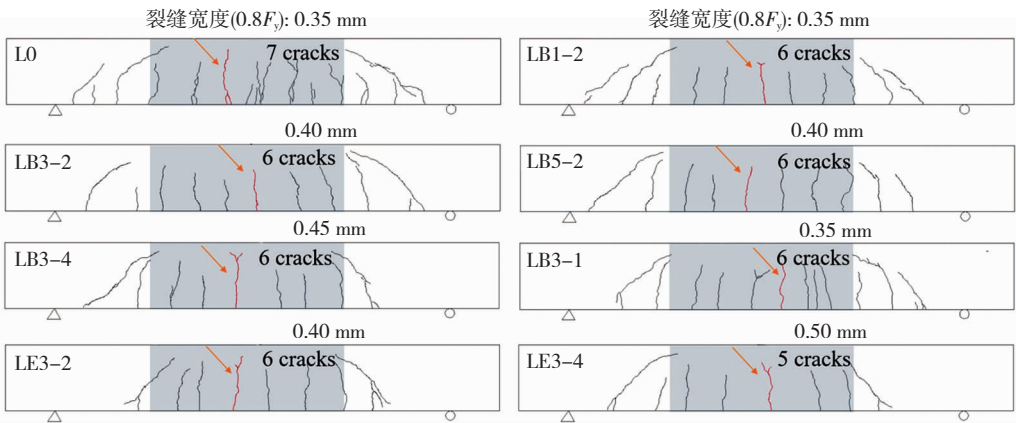


图 10 试验梁裂缝分布

Fig. 10 Cracks distributions of test beams

经过电化学除氯修复后的梁 LE3-2、LE3-4 相对于相同通电参数的双向电迁梁 LB3-2、LB3-4 的裂缝宽度更大,裂缝数目相对较少,原因是双向电迁技术采用电迁移型阻锈剂作为阳极液,阻锈基团迁至钢筋表面抑制析氢反应,界面黏结力受氢气膨胀应力的影响降低^[34]。

3.2 钢筋应变与混凝土正截面应变

加载过程中不同通电时间 & 不同除氯方式的梁荷载-纵筋应变曲线见图 11。钢筋屈服荷载与对应的荷载-挠度曲线的屈服点位置较为符合,屈服前呈线性且斜率不随通电参数和除氯方式而发生变化,表明双向电迁及电化学除氯不影响构件内部纵筋的弹性模量。

图 12 给出了不同电流密度下双向电迁梁在加载过程中的混凝土应变(开裂导致应变片断裂后部分数据点缺失)。电化学修复后梁在加载过程中跨中截面拉、压区应变呈现较好的线性关系,表明通电后梁仍符合平截面假定。

3.3 荷载-挠度曲线

图 13 给出了混凝土梁进行电化学修复前后的荷载-挠度曲线对比。其中,图 13(a)、(b)表明对比组梁 L0 与双向电迁梁 LB 在加载初期荷载挠度曲线均呈近似线性增长,且通电参数较小时梁刚度

未发生明显变化,但 5 A/m² 电流密度下梁刚度发生明显退化。图 13(c)对比了双向电迁和电化学除氯两种电化学修复方式的梁荷载挠度曲线,两类梁在弹性工作阶段的整体刚度及承载能力相差较小。

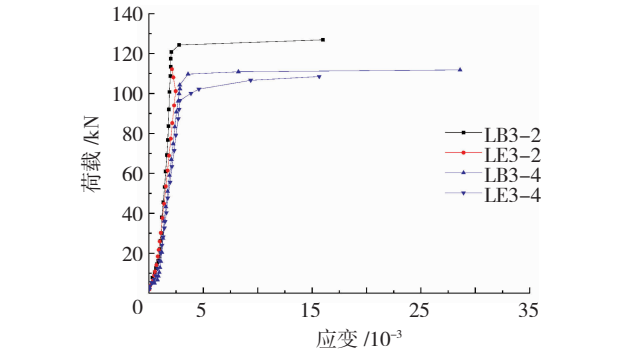


图 11 荷载-纵筋应变曲线

Fig. 11 Load-strain curves of longitudinal bar

表 4 给出了荷载挠度曲线中提取出的构件力学参数, F_y 为屈服荷载, F_u 为极限荷载。采用较小的通电参数时,电化学修复前后梁的屈服承载力和极限承载力变化不大,但通电参数选取过大会对构件的承载能力造成一定影响。相比于 L0, 电化学修复后梁的延性均有所减小,且电流密度和通电时间越大,位移延性系数越小。而双向电迁与电化学除氯梁延性退化幅度无明显差异。

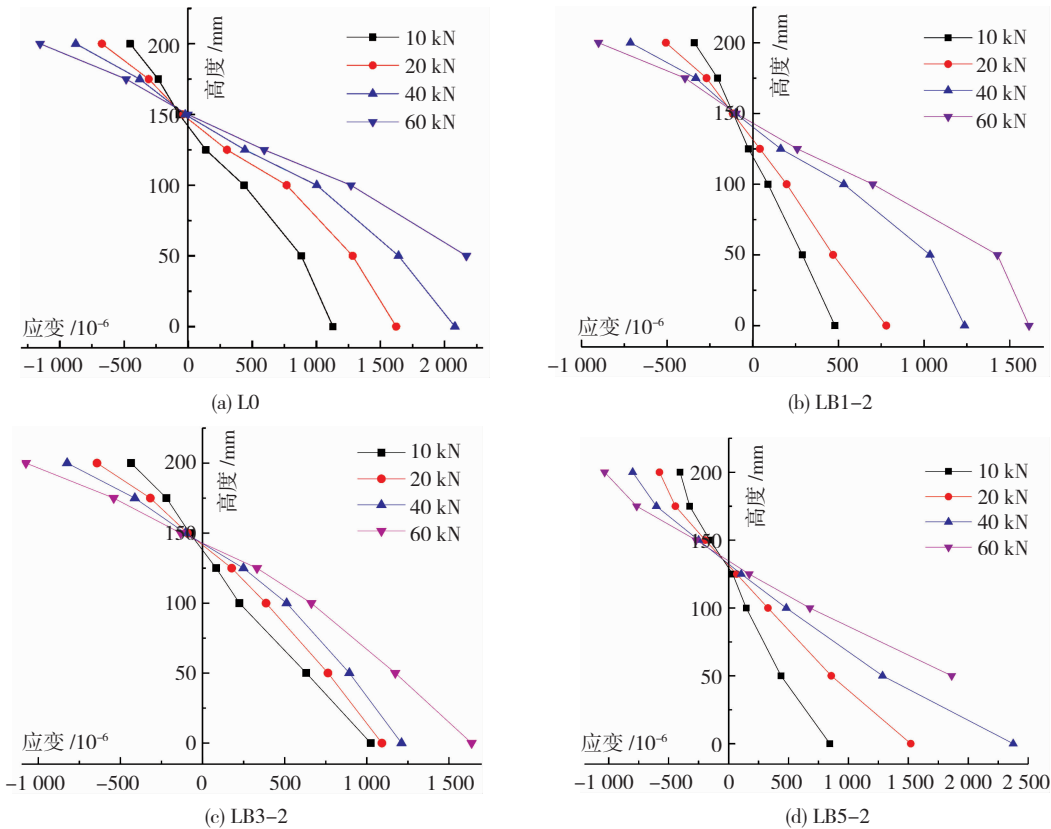


图 12 不同电流密度下 LB 梁跨中正截面应变

Fig. 12 Normal-section strain of LB beams under different current densities

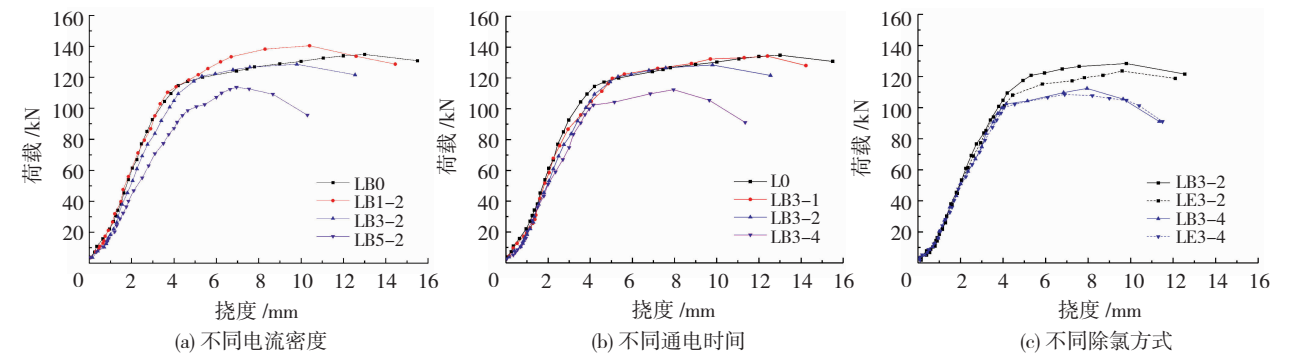


图 13 荷载 - 挠度曲线
Fig. 13 Load-deflection curves

表 4 静载试验结果 Tab.4 Static load test results					
梁编号	F_y/kN	F_u/kN	ω_y/mm	ω_u/mm	μ
L0	108	139	4.55	12.98	2.85
LB1-2	113	140	4.08	10.40	2.55
LB3-2	114	129	4.48	9.90	2.21
LB5-2	101	113	4.90	7.12	1.45
LB3-1	110	135	4.42	12.41	2.81
LB3-4	103	112	4.28	8.07	1.89
LE3-2	108	123	4.47	9.68	2.17
LE3-4	102	109	4.29	7.06	1.65

综合 3.1 节分析,电化学修复致黏结性能劣化导致钢筋与混凝土协同工作能力下降,相同外荷载作用下构件的变形增加,表现为裂缝分布特征的改变,此时纵筋变形增加,承担更大的拉应力,导致构件屈服承载力、极限承载力及延性的降低。

3.4 延性结果分析与讨论

已有研究均认为电化学修复不会对钢筋的强度造成影响,但修复过程中钢筋表面发生析氢反应,产生的氢气渗透进入钢筋内部,最终导致钢筋氢致塑性降低^[14,17-18,35]。由于梁构件屈服后变形能力与内部纵筋的变形性能直接相关,本文对比分析了通电参数对钢筋塑性与梁延性的影响规律。混凝土构件的延性可用位移延性系数 μ 表征,通电后钢筋塑性降低程度可用断裂能比 Z 表征^[36],表达式为:

$$\mu = \omega_u / \omega_y, \tag{1}$$
$$Z = W / W_0 \times 100\%. \tag{2}$$

式中: ω_y 为构件屈服时位移值, ω_u 为构件破坏时的位移值, Z 为断裂能比, W_0 为钢筋的断裂能, W 为电化学修复后钢筋的断裂能。断裂能为金属材料拉伸断裂前吸收的能量,其值等于应力应变曲线包围的面积。

将文献[37]得到的电化学修复后钢筋断裂能比与本文得到的位移延性系数进行数据拟合,见图 14,横坐标 φ 表示通电量,为通电时间和电流密度

的乘积,拟合方程为:

$$\mu = -6.09 \times 10^{-4} \varphi + 2.88, \tag{3}$$
$$Z = -8.12 \times 10^{-3} \varphi + 99.14. \tag{4}$$

由图 14 可见,梁位移延性系数和钢筋的断裂能比都与电化学修复过程中的通电量呈线性关系,且相关性较好。表明电化学修复后钢筋塑性和构件延性的劣化程度均与通电量呈负线性相关。中国 JTS 153-2-2012《海港工程钢筋混凝土结构电化学防腐技术规范》^[38] 建议的通电量为 720 ~ 2 880 Ah/m²,美国工程师防腐协会 SP 0107-2017《钢筋混凝土结构电化学再碱化和电化学除氯》^[39] 则建议取 600 ~ 1 500 Ah/m²。当采用规范中较大的通电参数时,由图 14 可知混凝土构件的延性将发生明显退化。因此,实际工程结构采用电化学修复技术时,应根据结构服役特点,综合考虑耐久性提升效果及其延性退化程度,不宜选取过大的通电参数。

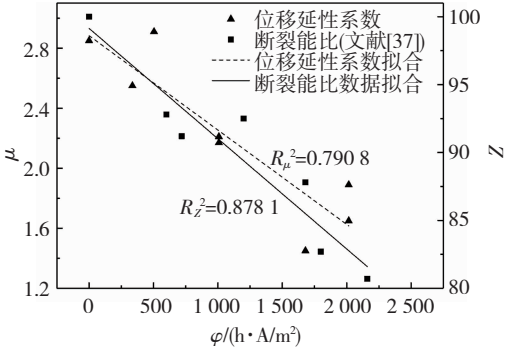


图 14 不同通电量下的 μ 与 Z
Fig. 14 μ and Z under different φ

4 结 论

1) 双向电迁及电化学除氯对内置钢筋网的混凝土梁具有较好的修复效果:电化学修复能有效去除钢筋表面氯离子,但梁内不同区域残余氯离子存在差异,钢筋笼内氯离子迁出效率相对较低;电化学修复后梁的开路电位上移、腐蚀电流密度减小,钢筋恢复钝化,耐久性提升效果显著;双向电迁在除氯的同时将阻锈剂迁至钢筋表面,进一步提升了结构抵

御耐久性再劣化的能力。

2) 电化学除氯和双向电迁均会对钢筋 - 混凝土黏结性能产生负面影响, 电化学修复后梁虽仍符合平截面假定, 但加载过程中混凝土裂缝间距增大, 裂缝数目有所减少, 且电化学除氯较双向电迁对裂缝分布的影响更大。

3) 电化学修复不仅导致钢筋塑性降低, 还会导致钢筋 - 混凝土黏结性能劣化: 这两种负面效应使混凝土梁的力学性能在一定程度上发生改变; 通电参数选取较小时, 电化学修复对梁力学性能的影响较小, 但较大通电量下梁的刚度、极限承载力和延性都有所退化, 构件延性系数与通电量呈负线性相关性。因此, 电化学修复采用的通电参数的选择需综合考虑耐久性提升效果及力学性能损伤, 以满足结构服役性能的要求。由于相关试验研究较少, 本文研究结果有待进一步验证。

4) 电化学修复对遭受氯盐侵蚀的实际构件具有较好的修复效果, 且合理的通电参数对其静力力学性能影响较小。应用电化学修复的工程结构在服役时还可能承受疲劳作用, 因此还需对电化学修复后构件的疲劳性能开展相关试验研究。

参考文献

[1] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社, 2014
JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. Durability of concrete structure[M]. Beijing: Science Press,2014

[2] ELSENER B. Long-term durability of electrochemical chloride extraction[J]. Materials & Corrosion,2008, 59(2):91. DOI: 10. 1002/maco. 200804165

[3] 徐建芝,丁铸,邢峰. 钢筋混凝土电化学脱盐修复技术研究现状[J]. 混凝土, 2008(9):22
XU Jianzhi, DING Zhu, XING Feng. Research status of electrochemical chloride extraction on steel reinforced concrete[J]. Concrete, 2008(9):22. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002 - 3550. 2008. 09. 008

[4] XU Chen, JIN Weiliang, WANG Hailong, et al. Organic corrosion inhibitor of triethylenetetramine into chloride contamination concrete by eletro-injection method [J]. Construction and Building Materials, 2016, 115:602. DOI: 10. 1016/j. conbuildmat. 2016. 04. 076

[5] 李森林,范卫国,蔡伟成,等. 电化学脱盐处理现场试验研究[J]. 水运工程, 2004(12):1
LI Senlin, FAN Weiguo, CAI Weicheng, et al. A study on electrochemical desalination field test [J]. Port & Waterway Engineering, 2004(12):1. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002 - 4972. 2004. 12. 001

[6] 唐军务,李森林,蔡伟成,等. 钢筋混凝土结构电渗阻锈技术研究[J]. 海洋工程, 2008, 26(3):83
TANG Junwu, LI Senlin, CAI Weicheng, et al. Investigation of inhibitor electromigration anticorrosion technology on reinforced

concrete[J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(3):83. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005 - 9865. 2008. 03. 014

[7] 金伟良,黄楠,许晨,等. 双向电渗对钢筋混凝土修复效果的试验研究——保护层阻锈剂、氯离子和总碱度的变化规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(9):1586
JIN Weiliang, HUANG Nan, XU Chen, et al. Experimental research on effect of bidirectional electromigration rehabilitation on reinforced concrete—Concentration changes of inhibitor, chloride ions and total alkalinity [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(9):1586. DOI: 10. 3785/j. issn. 1008 - 973X. 2014. 09. 007

[8] 王卫仑,徐金霞,高国福,等. 电化学除氯法和二 - 甲基乙醇胺电渗透的联合修复技术[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014,12(6):535
WANG Weilun, XU Jinxia, GAO Guofu, et al. Remediation technology created by combining electrochemical removal of chloride with electroosmosis of N, N'-dimethylaminoethanol[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014,12(6):535. DOI: 10. 3876/j. issn. 10001980. 2014. 06. 013

[9] 单鸿猷,徐金霞,蒋林华. 电化学除氯和硅酸根电迁移法的联合修复研究[J]. 材料导报,2016, 30(14):1
SHAN Hongyou, XU Jinxia, JIANG linhua. Remediation method of combining electrochemical chloride removal with electro-migration of silicate ion[J]. Materials Review, 2016, 30(14): 1. DOI: 10. 11896/j. issn. 1005 - 023X. 2016. 14. 001

[10] ARYA C, SA'ID-SHAWQI Q, VASSIE P R W. Factors influencing electrochemical removal of chloride from concrete[J]. Cement & Concrete Research, 1996, 26(6):851. DOI: 10. 1016/0008 - 8846(96)00067 - 1

[11] CHANG J J. Bond degradation due to the desalination process[J]. Construction and Building Materials, 2003, 17(4):281. DOI: 10. 1016/S0950 - 0618(02)00113 - 7

[12] 郭育霞,贡金鑫,尤志国. 电化学除氯后混凝土性能试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(6):863
GUO Yuxia, GONG Jinxin, YOU Zhiguo. Experimental study of characteristics of concrete experienced electrochemical extraction of chlorides[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(6):863. DOI: 10. 7511/dlglxb200806015

[13] 孙文博,高小建,杨英姿,等. 电化学除氯处理后的混凝土微观结构研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(10): 1108
SUN Wenbo, GAO Xiaojian, YANG Yingzi, et al. Microstructure of concrete after electrochemical chloride extraction treatment[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(10):1108

[14] MAO Jianghong, JIN Weiliang, ZHANG Jun, et. al. Hydrogen embrittlement risk control of prestressed tendons during electrochemical rehabilitation based on bidirectional electromigration[J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 582. DOI: 10. 1016/ j. conbuildmat. 2019. 04. 008

[15] BUENFELD N R, BROOMFIELD J P. Influence of electrochemical chloride extraction on the bond between steel and concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2000, 52(2):79. DOI: 10. 1680/ macr. 2000. 52. 2. 79

[16] IHEKWABA N M, HOPE B B. Mechanical properties of anodic and cathodic regions of ECE treated concrete [J]. Cement & Concrete Research, 1996, 26(5):771. DOI: 10. 1016/S0008 - 8846(96)85014 - 9

[17] SIEGWART M. Influence of electrochemical chloride extraction on

- the performance of prestressed concrete under dynamic loading conditions[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18(18):800. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(800)
- [18] 谢振康. 双向电迁移修复致钢筋氢含量变化及其对力学性能的影响[D]. 杭州:浙江大学, 2019
XIE Zhenkang. Hydrogen concentration changes and its effect on mechanical properties of reinforcement bars after bidirectional electromigration rehabilitation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019
- [19] 张鑫, 耿欧, 刘颖凤. 混凝土受弯构件中钢筋锈蚀修复方法评价[J]. *混凝土*, 2015(6):22
ZHANG Xin, GENG Ou, LIU Yingfeng. Evaluation on repair methods of reinforcement corrosion in flexural concrete member[J]. *Concrete*, 2015(6):22. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2015.06.006
- [20] SWAMY R N, MCHUGH S. Effectiveness and structural implications of electrochemical chloride extraction from reinforced concrete beams[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2006, 28(8):722. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.05.012.
- [21] 章思颖. 应用于双向电渗技术的电迁移型阻锈剂的筛选[D]. 杭州:浙江大学, 2012
ZHANG Siying. A study of corrosion inhibitors for bidirectional electromigration rehabilitation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012
- [22] 金伟良, 郭柱, 许晨. 电化学修复后钢筋极化状态分析[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2013, 33(1):78
JIN Weiliang, GUO Zhu, XU Chen. Polarization analysis of reinforced after electrochemical repair[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2013, 33(1):78
- [23] GARCÉS P, SÁNCHEZ DE ROJAS M J, CLIMENT M A. Effect of the reinforcement bar arrangement on the efficiency of electrochemical chloride removal technique applied to reinforced concrete structures[J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(3):531. DOI: 10.1016/j.corsci.2005.02.010
- [24] CHANG C C, YEIH W, CHANG J J, et al. Effects of stirrups on electrochemical chloride removal efficiency[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 68(4):692. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.091
- [25] KUBO J, TANAKA Y, PAGE C L, et al. Application of electrochemical organic corrosion inhibitor injection to a carbonated reinforced concrete railway viaduct[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 39(2):2. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.010
- [26] 浙江省住房和城乡建设厅. 混凝土结构耐久性技术规程: DB 33/T 1128—2016[S]. 杭州: [s. n.], 2016
Zhejiang Provincial Housing and Urban-Rural Construction Department. Technical specifications for durability of concrete structures: DB 33/T 1128—2016[S]. Hangzhou: [s. n.], 2016
- [27] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008
CAO Chunan. Principles of electrochemistry of corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008
- [28] 许晨, 金伟良, 王传坤. 混凝土中钢筋脱钝的电化学弱极化判别方法[J]. *交通科学与工程*, 2009, 25(4):31
XU Chen, JIN Weiliang, WANG Chuankun. Distinguishing the depassivation of rebar in concrete with weak polarization method[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2009, 25(4):31. DOI: 10.3969/j.issn.1674-599X.2009.04.006
- [29] MIRANDA J M, COBO A, OTERO E, et al. Limitations and advantages of electrochemical chloride removal in corroded reinforced concrete structures[J]. *Cement & Concrete Research*, 2007, 37(4):596. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.01.005
- [30] HORNBOSTEL K, LARSEN C K, GEIKER M R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate—A literature review[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2013, 39(3):60. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.019
- [31] MILLARD S G, LAW D, BUNGEY J H, et al. Environmental influences on linear polarisation corrosion rate measurement in reinforced concrete[J]. *NDT & E International*, 2001, 34(6):409. DOI: 10.1016/S0963-8695(01)00008-1
- [32] 舒士霖. 钢筋混凝土结构[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003
SHU Shilin. Reinforced concrete structure[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003
- [33] 韦江雄, 王新祥, 郑靓, 等. 电除盐中析氢反应对钢筋—混凝土粘结力的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, 31(12):30
WEI Jiangxiong, WANG Xinxiang, ZHENG Liang, et al. Research on the hydrogen evolution reaction and its effect on the bond strength between reinforcement and concrete during electrochemical chloride extraction[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, 31(12):30
- [34] SIEGWART M, MCFARLAND B J, LYNESS J F, et al. Application of inhibitors to reduce the hydrogen uptake of steel during electrochemical chloride extraction[J]. *Corrosion*, 2002, 58(3):257. DOI: 10.5006/1.3279877
- [35] 金伟良, 伍茜西, 毛江鸿, 等. 电化学修复过程氢致钢筋塑性降低的影响与控制试验研究[J]. *海洋工程*, 2017, 35(5):88
JIN Weiliang, WU Xixi, MAO Jianghong, et al. Experiential study on the effect of hydrogen-induced plasticity decrease and control in the process of electrochemical repair of reinforced concrete[J]. *The Ocean Engineering*, 2017, 35(5):88. DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2017.05.010.
- [36] 常娥, 闫永贵, 李庆芬, 等. 阴极极化对 921A 钢海水中氢脆敏感性的影响[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2010, 30(1):84
CHANG E, YAN Yonggui, LI Qingfen, et al. Effects of cathodic polarization on the hydrogen embrittlement sensitivity of 921A steel in sea water[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2010, 30(1):84
- [37] 李腾. 电化学修复后混凝土结构中受力钢筋氢脆评估与控制试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017
LI Teng. Experimental study on evaluation and control of hydrogen embrittlement of steel bars in concrete structures after electrochemical repair[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [38] 中华人民共和国交通运输部. 海港工程钢筋混凝土结构电化防腐技术规范: JTS 153-2—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012
Ministry of Transport of the PRC. Technical specification for electrochemical anticorrosion of reinforcement concrete structures in harbour and marine engineering: JTS 153-2—2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012
- [39] NACE. Electrochemical realkalization and chloride extraction for reinforced concrete: SP 0107—2017[S]. [S. l.]: NACE International, 2017