

脉冲电流对电化学除氯的影响

李冬韵^{1,2}, 孙玉朋^{1,2}, 王长罡¹, 陈昊男¹, 唐军务³,
历峰⁴, 赵楠⁵, 郭泉忠^{1*}, 赵茹^{3*}

(1.中国科学院金属研究所, 沈阳 110000; 2.中国科技大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110000;
3.海军勤务学院, 天津 300000; 4.中铁三局集团电务工程有限公司, 天津 300000;
5.北京市昌平区河湖生态环境服务中心, 北京 102200)

摘要: **目的** 探究不同电流密度下, 直流和脉冲 2 种电流模式对钢筋混凝土电化学除氯的影响, 降低钢筋渗氯量, 减小通电后阴极产生的氢气使钢筋发生氢脆的风险, 提高除氯效率, 改善电化学除氯效率的均匀性。**方法** 通过在电流密度为 2、3、4 A/m² 的条件下, 对混凝土进行直流和脉冲电流电化学修复, 测定处理后的钢筋的释氢电流, 计算释氢总电量, 来表示钢筋渗氯量, 对比处理后强电流区和弱电流区混凝土的氯离子含量, 分析 2 种方式除氯效率的均匀性, 同时用扫描电子显微镜观察电化学除氯前后混凝土的微观结构。**结果** 计算得到不同通电电流密度下钢筋的释氢总电量和除氯效率, 脉冲电流的释氢总电量比直流电流低约 20%, 而除氯效率提高了约 10%。**结论** 增加电流密度可以提高除氯效率, 但是会增加钢筋发生氢脆的风险。相较于直流电流, 脉冲电流电化学修复可以降低钢筋渗氯量, 显著提高弱电流区的除氯效率, 从而改善除氯效率的均匀性。

关键词: 脉冲电流; 电化学除氯; 氢脆; 电流密度; 混凝土; 腐蚀

中图分类号: TV332 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)05-0150-07

DOI: 10.7643/ issn.1672-9242.2024.05.017

Effect of Pulse Current on Electrochemical Dechlorination

LI Dongyun^{1,2}, SUN Yupeng^{1,2}, WANG Changgang¹, CHEN Haonan¹, TANG Junwu³, LI Feng⁴,
ZHAO Nan⁵, GUO Quanzhong^{1*}, ZHAO Ru^{3*}

(1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Science, Shenyang 110000, China; 2. College of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Shenyang 110000, China; 3. Naval Logistics Academy, Tianjin 300000, China; 4. China Railway No.3 Engineering Group Co., Ltd., Tianjin 300000, China; 5. Beijing Changping District Rivers and lakes Ecological Environment Service Center, Beijing 102200, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the influence of direct current and pulse current on the electrochemical dechlorination of reinforced concrete at different current densities, reduce the hydrogen permeation amount and hydrogen embrittlement risks of steel bars, so as to improve the efficiency of dechlorination and the uniformity of electrochemical dechlorination efficiency.

收稿日期: 2024-04-03; 修订日期: 2024-04-25

Received: 2024-04-03; Revised: 2024-04-25

基金项目: 广州市重点研发计划项目 (2024B01J0037)

Fund: Guangzhou Key Research and Development Program(2024B01J0037)

引文格式: 李冬韵, 孙玉朋, 王长罡, 等. 脉冲电流对电化学除氯的影响[J]. 装备环境工程, 2024, 21(5): 150-156.

LI Dongyun, SUN Yupeng, WANG Changgang, et al. Effect of Pulse Current on Electrochemical Dechlorination[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(5): 150-156.

*通信作者 (Corresponding author)

The current densities of 2, 3 and 4A/m^2 were selected, and the concrete was electrochemically repaired by direct current and pulse current. The hydrogen release current of the treated steel bar was measured, and the total hydrogen release electricity was calculated to represent the hydrogen permeation amount of the steel bar. The chloride ion content of concrete in the solid current area and weak current area after treatment was compared, and the uniformity of dechlorination efficiency of the two methods was analyzed. At the same time, the microstructure of concrete before and after electrochemical dechlorination was observed by scanning electron microscope. The total hydrogen release amount and chlorine removal efficiency of steel bars with different current densities were calculated. Compared with direct current, the total amount of hydrogen released with pulse current is reduced about 20%, while the chlorine removal efficiency is improved about 10%. The results show that increasing the current density can improve the dechlorination efficiency but increase the risk of hydrogen embrittlement of steel bars. Compared with direct current, the hydrogen permeation of the steel bar is reduced by electrochemical repair with a pulse current, and the dechlorination efficiency in the weak current region is significantly improved. Thus, the uniformity of dechlorination efficiency is improved.

KEY WORDS: pulse current; electrochemical chloride removal; hydrogen embrittlement; current density; concrete; corrosion

在我国沿海地区, 钢筋混凝土结构材料的耐久性大幅降低, 主要是氯离子渗透至钢筋表面引起钢筋锈蚀造成的^[1-4]。目前, 关于保护混凝土中钢筋不受侵蚀, 延长钢筋混凝土结构的寿命的研究越来越多^[5-7]。传统的钢筋混凝土修复方法是去除氯离子侵入的混凝土, 再用砂浆重新浇筑混凝土保护层^[8]。虽然用这种方法可以有效去除氯离子, 但旧混凝土中残留的氯离子和新混凝土的电位差加剧了钢筋的腐蚀, 并且破坏了原有混凝土结构。电化学除氯是一种无损的混凝土除氯方法, 相较于传统的修复方法, 它操作方便, 所需时间短。电化学除氯的基本原理是将混凝土中的钢筋作为阴极, 混凝土表面作为阳极, 在电场的作用下, 混凝土内的氯离子向阳极方向移动, 从而达到除氯的效果^[9-12]。尽管在电化学除氯过程中不能完全去除混凝土中的氯离子, 但是通过提高除氯的效率, 也可以显著提高钢筋混凝土的使用寿命。因此, 提高除氯效率, 是相关学者关注的重点。

电流密度是影响电化学除氯效率的主要因素。电流密度直接影响到电场的强度, 电流密度越大, 离子与电荷的传输速度越快, 增加了除氯速率, 但是电流密度过大也会对钢筋混凝土造成不利影响。电化学修复过程中, 若电流密度过大, 不仅钢筋与混凝土的黏结力降低, 作为阴极材料的钢筋也会发生析氢反应, H_2 浓度过高会导致钢筋发生氢脆^[13-14]。目前的研究结果显示^[15-18], 电化学除氯时, 安全电流密度为 $1\sim 3\text{A/m}^2$ 。降低钢筋发生氢脆的风险有助于提高除氯电流密度, 延长除氯时间, 提高除氯效率。

除此之外, 除氯效率不均匀也是目前存在的问题。由于混凝土试样体积大, 以及混凝土内部结构的差异, 电化学修复会导致除氯效率不均匀。Xu 等^[19]设计了一个 3 层钢筋混凝土保护系统, 并得出结论, 混凝土中较高的电阻率使电流分布不均匀。因此, 除氯效率不均匀是电化学除氯技术亟待解决的难点。

在过去的研究中, 电化学除氯总是采用直流电源

作为氯离子迁移的驱动力, 关于脉冲电源应用于电化学除氯的研究很少。目前脉冲电流多被应用于电解水制氢和电沉积, Vincent 等^[20]将脉冲电流用于电解水制氢, 结果显示, 相同电流密度下, 脉冲电流对应的电池电压低于传统的直流电解水。Dobo 等^[21]研究发现, 相较于直流电解水制氢, 脉冲电流的效率更高。Lyu 等^[22]采用脉冲电流研究锰电沉积, 实验结果表明, 与传统的电镀技术相比, 金属 Mn 的沉积效率增长了约 15%。Ibrahim 等^[23]研究发现, 使用脉冲电流用可以产生更均匀的锌涂层。其他一些文献也报道了类似的电沉积现象, 并且认为应用脉冲电流可以使涂层分布更均匀^[24-25]。因此, 本研究创新性地将脉冲电流应用到电化学除氯技术, 通过不同电流密度的电化学除氯试验, 探讨了直流电流和脉冲电流对电化学除氯效率和钢筋渗氢量的影响, 分析了脉冲电流对提高除氯效率均匀性的作用, 探究了电化学除氯对混凝土微观结构的影响。

1 试验

1.1 试样制备

采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥制作混凝土样品。细骨料选择本地河砂, 细度模数为 2.65; 粗骨料选择最大粒度为 20 mm 的碎石, 且连续配级; 钢筋选择 Q345 带肋钢筋, 直径为 18 mm; NaCl 选用工业纯级。混凝土抗压强度设计为 C30, 混凝土的配合比见表 1。

按 $250\text{mm}\times 500\text{mm}\times 150\text{mm}$ 尺寸浇筑混凝土试样, 保护层厚度为 50 mm, 混凝土中的水灰比为 0.38。在混凝土内平行放置 2 根直径为 18 mm 的钢筋, 长 40 mm, 钢筋间距为 80 mm。用直径为 4 mm 的不锈钢丝连接钢筋, 并穿过混凝土背部, 作为通电导线, 连接点用环氧树脂密封, 不锈钢丝用热缩管绝缘密封。为模拟被氯盐侵害的混凝土, 将样品分层浇注,

在保护层中均匀掺入相对水泥质量分数为 3% 的 NaCl, 其余部分不掺 NaCl, 混凝土分层浇筑的模型如图 1 所示。24 h 后拆模, 然后在标准养护室中养护 28 d。

表 1 混凝土的配合比
Tab.1 Concrete mix design

成分	质量浓度
水泥	382 kg/m ³
水	145 kg/m ³
细骨料	712 kg/m ³
粗骨料	1 114 kg/m ³
NaCl	11.46 kg/m ³
水灰比	0.38

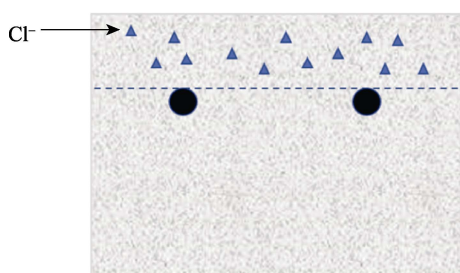


图 1 混凝土分层浇筑的模型
Fig.1 Model for layered pouring of concrete

1.2 电化学除氯

在塑料容器底部放置不锈钢网作为阳极连接电源正极, 2 根钢筋作为阴极, 通过通电导线连接电源负极。电解质溶液为饱和氢氧化钙溶液, 并且每 2 d 更换 1 次。分别使用直流电源和频率为 1 000 Hz、占空比为 80% 的脉冲方波电源作为电化学除氯的外加电源, 并将平均电流密度设置为 2、3、4 A/m², 连续通电 28 d, 确保在同一平均电流密度时不同类型电源提供相同的电荷量。

1.3 钢筋渗氢量的测定

在一定的氧化电位下对钢筋进行释氢(使渗入到钢筋表面的氢原子氧化)电流测量, 配制饱和 Ca(OH)₂ 溶液, 并用 NaOH 调节 Ph 至 13.5, 作为模拟混凝土孔隙液。Q345 钢在模拟混凝土孔隙液中的极化曲线如图 2 所示。释氢电位选择稳定钝化区, 在此电位区间既可保持钢筋表面稳定的状态, 也可将扩散至钢筋表面的活性氢原子完全氧化^[26], 因此本文将释氢电位确定为相对开路电位 200 mV。电化学修复结束后, 将钢筋阳极极化到电位 200 mV, 测量阳极极化电流所产生的总电量, 来表示钢筋表面渗氢量。恒电位释氢时氢的氧化电流形成的电量 Q 可由式(1)计算^[27]:

$$Q = \int_0^t i dt \quad (1)$$

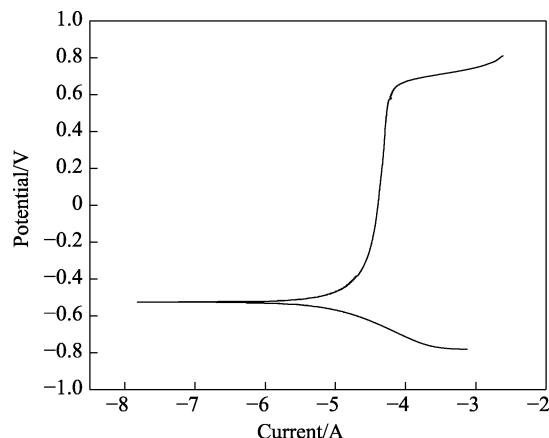


图 2 Q345 钢的极化曲线
Fig.2 Polarization curve of Q345 steel

式中: Q 为释氢形成的电量; i 为释氢时的氧化电流; t 为释氢时间。

1.4 除氯效率测定

所有混凝土样品都用直径为 30 mm 的电钻进行钻孔取样, 取样深度为 50 mm, 取样位置位于混凝土样品中钢筋的正上方, 以及两根钢筋中间, 如图 3 所示。然后使用混凝土切割机将取出的混凝土块平均分成 5 份, 每块厚度为 10 mm。最后通过化学滴定法测定水溶性氯化物浓度。

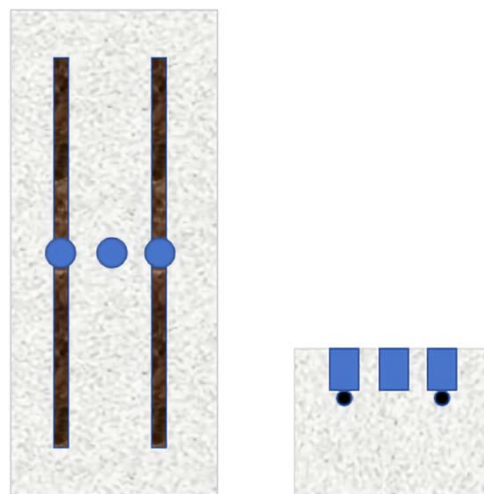


图 3 取样位置
Fig.3 Sampling positions

氯离子去除效率的计算公式如式(2)所示。

$$Z_i = \frac{A - B_i}{A} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Z_i 为采样区氯离子去除效率; A 为初始水溶性氯离子含量, B_i 为采样区剩余氯离子含量。

1.5 扫描电镜测试

电化学除氯结束后, 将钢筋附近的混凝土抛光,

随后用扫描电子显微镜 (SEM) 观察混凝土的微观结构。

2 结果与讨论

2.1 钢筋的渗氢量

由于氢释放时间需要较长时间, 释氢时间设计为 1 h。钢筋的渗氢量表示为释氢的电荷量。钢筋的释氢电流曲线如图 4 所示, 释氢 1 h 通过钢筋的总电量见表 2。可以看出, 在电化学除氯过程中, 同种通电方式, 随着电流密度的增加, 释氢 1 h 通过钢筋的总电量增加。主要原因是电流增加, 钢筋 (阴极) 析氢反应 ($2\text{H}_2\text{O}+2\text{e}^-\rightarrow 2\text{OH}^-+\text{H}_2\uparrow$) 的速度增加, 产生的氢气增加, 导致钢筋渗入更多的氢。在同种电流密度的情况下, 脉冲电流产生的释氢总电量总是低于直流电流。通电电流密度为 2、3、4 A/m^2 时, 脉冲电流的释氢总电量比直流电流分别低 17.31%、19.39%、21.41%。这是因为在钢筋表面发生了耗氧反应和析氢反应, 这 2 种反应相互竞争, 混凝土内部的氧气有限, 钢筋发生耗氧反应消耗氧气, 而氧气扩散到钢筋表面需要时间。在使用直流电进行电化学除氯的过程中, 由于氧气时刻被消耗, 钢筋处氧含量降低, 浓差极化抑制了耗氧反应, 更多的电子参与析氢反应。在使用脉冲电流进行电化学除氯的过程中, 在电流开启时间内, 氧气被消耗, 在关闭时间, 氧气扩散到钢筋表面, 浓差极化被抑制, 更多的电子参与耗氧反应, 析氢反应产生的氢气减少。混凝土内部储存的氧气含量是一定的, 通电电流密度为 2 A/m^2 时, 耗氧反应速度较慢, 消耗氧气较少, 浓差极化不明显, 2 种电流的释氢总电量差距较小。随着通电电流密度增加, 耗氧反应速度增加, 浓差极化作用增大, 2 种电流的释氢总电量差距增大。可以看出, 脉冲电流电化学除氯可以显著降低钢筋渗氢量, 减少钢筋发生氢脆的风险。

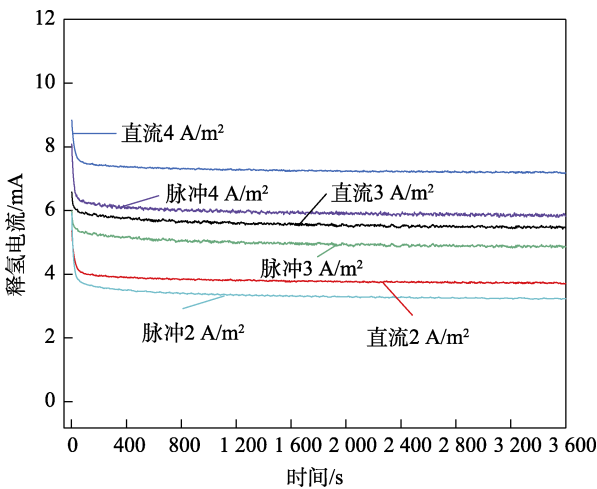


图 4 钢筋的释氢电流曲线
Fig.4 Hydrogen release current curves of steel bars

表 2 通过钢筋的总电量
Tab.2 Quantity of electric charge through steel bars

电流模式/(A·m ⁻²)	电量/C
2 (直流)	12.82
2 (脉冲)	10.59
3 (直流)	20.11
3 (脉冲)	16.21
4 (直流)	30.41
4 (脉冲)	23.90

2.2 除氯效率

除氯后剩余的自由氯离子含量如图 5 所示。电化学处理前, 试样的自由氯离子含量为 6.12 kg/m^3 , 低于初始总氯离子浓度 (6.95 kg/m^3)。这是因为在养护期间, 部分游离的氯离子转化为了结合氯化物。样品的除氯效率如图 6 所示。将混凝土层分为 2 个区域: 一个是位于钢筋正上方的强电流区, 另一个是位于钢筋之间的弱电流区。在电化学除氯处理期间, 通过强电流区中的电流较大, 通过弱电流区中的电流较小。在所有混凝土样品中, 观察到相同的除氯效率趋势, 钢筋附近除氯效率达到 70% 以上, 而混凝土表面附近的除氯效率约 40%。这表明钢筋附近的氯离子向外移动, 而对于混凝土表面, 在除氯的同时, 内部氯离子也在向混凝土表面移动, 导致除氯效率很低。因此, 越靠近钢筋所在平面, 除氯效率越高。无论是直流电除氯, 还是脉冲电除氯, 在电流密度为 4 A/m^2 时, 除氯效率最高, 电流密度为 2 A/m^2 时, 除氯效率最低。这是因为氯离子在混凝土中以扩散和迁移的方式运动, 其中电迁移是主要的运动方式^[28], 随着电流密度增加, 氯离子迁移的驱动力增大, 提高了除氯效率。

观察强电流区的除氯效率可以看出, 脉冲电流的除氯效率比直流电流略高, 而对于弱电流区, 脉冲电流的除氯效率显著高于直流电流。这是因为混凝土是一种具有大量微观双电层结构的多相材料, 双电层主要存在于孔壁与孔隙溶液的界面, 导致了电化学除氯过程中微观区域电场强度分布出现差异。介电常数和双电层有效表面积大的区域称为缺陷区域。采用直流电除氯时, 双电层对电流阻碍较大, 微观阻抗分布不均匀, 通过缺陷区域的电流很小。氯离子在混凝土中分布均匀, 缺陷区的除氯效率可以忽略不计, 大量电流集中作用在电阻小的区域, 导致除氯不均匀, 除氯效率低。双电层对脉冲电流的阻碍不大, 脉冲电流除氯效率高。通过弱电流区的电流较弱, 双电层对直流电流阻碍作用在此区域尤为明显, 因此弱电流区的直流电流除氯效率很低, 对于混凝土整体, 直流电流除氯效率不均匀。脉冲电流可以显著提高电化学除氯的均匀性。

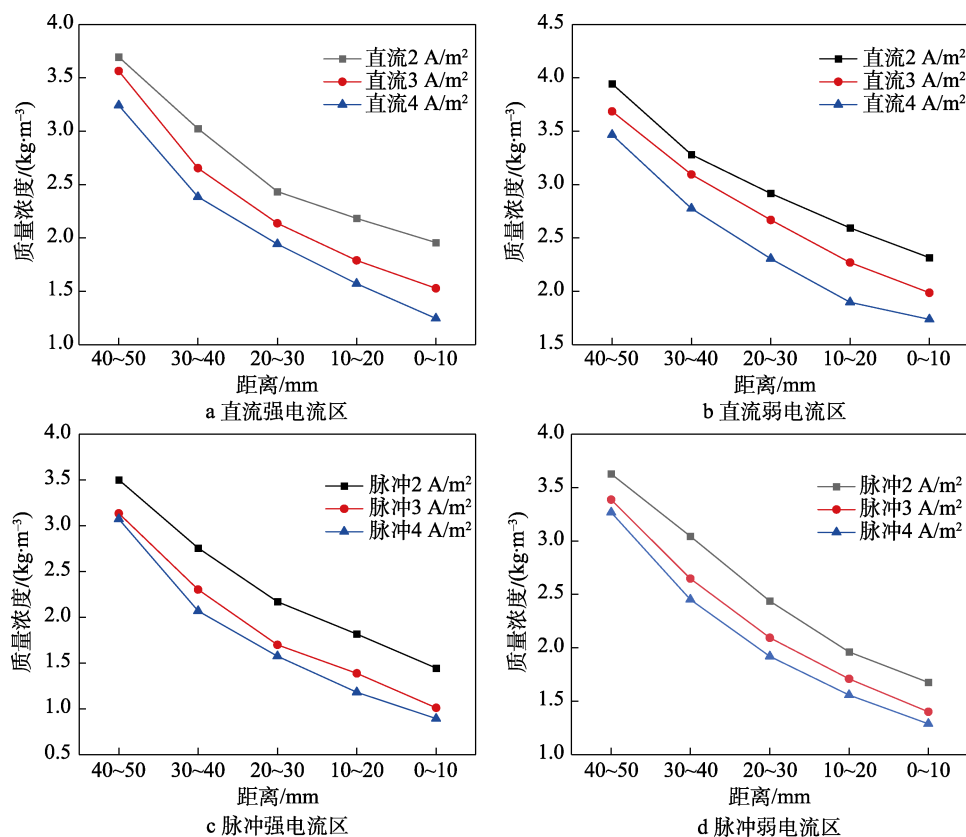


图5 除氯后剩余的自由氯离子含量

Fig.5 Content of water-soluble chloride ions in concrete after dechlorination: a) DC strong current region; b) DC weak current region; c) pulse strong current region; d) pulse weak current region

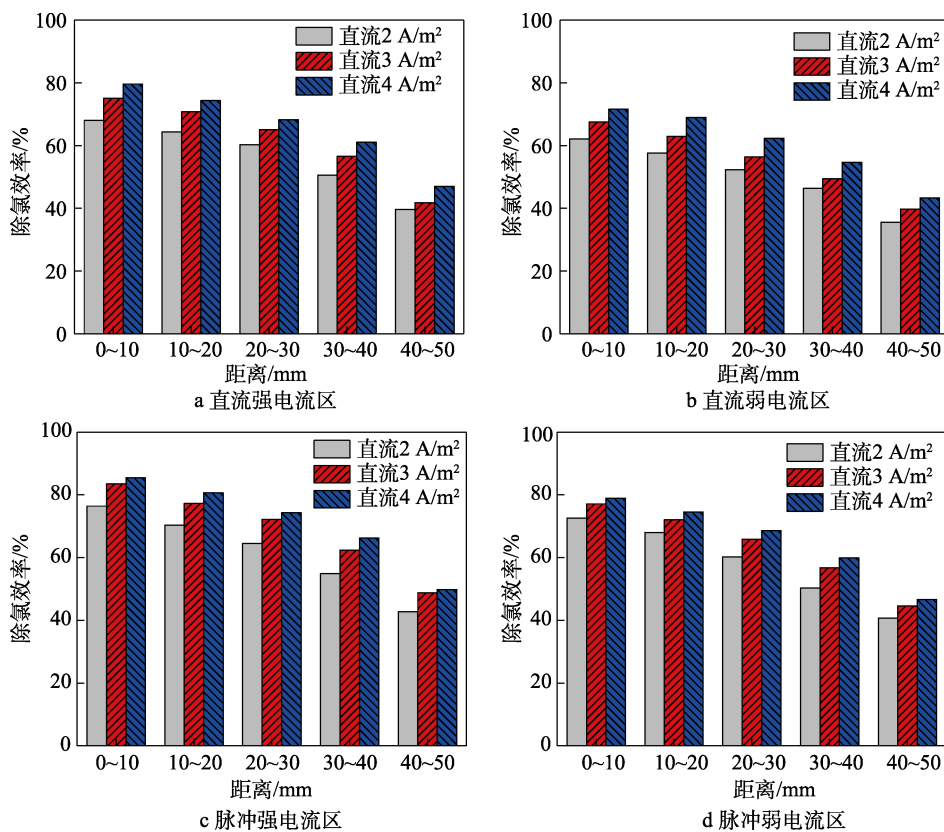
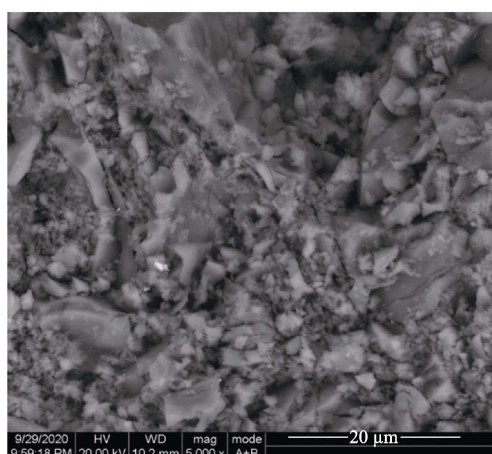


图6 样品的除氯效率

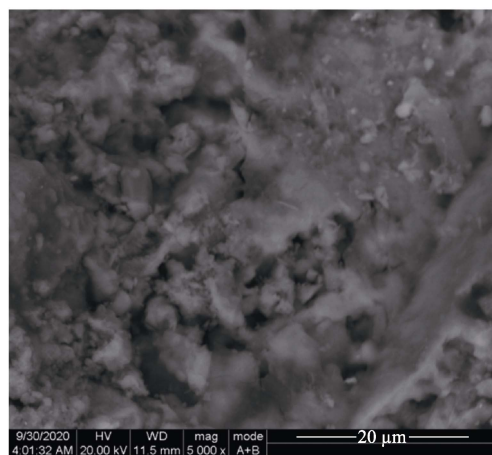
Fig.6 Efficiency of chloride removal of samples: a) DC strong current region; b) DC weak current region; c) pulse strong current region; d) pulse weak current region

2.3 混凝土的微观组织结构

除氯前后钢筋附近混凝土的微观组织结构如图 7 所示。从图 7a 可以看出, 在没有进行除氯处理的混凝土样品中, 存在大量明显的薄片状 I 型 C-S-H 结晶盐, 同时由于试样中掺入了氯盐, 形成了大量笼状 II 型 C-S-H。另外, 还有少量六方板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和针棒状的钙矾石。从图 7b 可以看出, 电化学处理后, 混凝土中的 II 型 C-S-H 几乎消失, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 增多, 孔隙数量明显增多, 孔径减小。



a 未除氯



b 除氯后

图 7 混凝土的微观组织结构

Fig.7 Microstructure of concrete: a) before dechlorination; b) after dechlorination

3 结论

1) 与直流电相比, 脉冲电流修复混凝土钢筋的氢渗透量减少, 抑制了氢脆的发生。

2) 脉冲电流可以提高电化学除氯效率, 并且除氯效率更均匀。

3) 电化学除氯后, 钢筋混凝土界面 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体相对增多, II 型 C-S-H 含量减少, 孔隙增多。

参考文献:

- [1] BAGHABRA AL-AMOUDI O S. Attack on Plain and Blended Cements Exposed to Aggressive Sulfate Environments[J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(3/4): 305-316.
- [2] ELSENER B. Long-Term Durability of Electrochemical Chloride Extraction[J]. Materials and Corrosion, 2008, 59(2): 91-97.
- [3] CHEEWAKET T, JATURAPITAKKUL C, CHALEE W. Initial Corrosion Presented by Chloride Threshold Penetration of Concrete up to 10 Year-Results under Marine Site[J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 693-698.
- [4] 王玮. 混凝土中钢筋锈蚀与结构耐久性研究[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(36): 50-53.
WANG W. Study on Corrosion of Steel Bars in Concrete and Structural Durability[J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(36): 50-53.
- [5] FARZAD M, SADEGHNEJAD A, RASTKAR S, et al. A Theoretical Analysis of Mechanical and Durability Enhancement of Circular Reinforced Concrete Columns Repaired with UHPC[J]. Engineering Structures, 2020, 209: 109928.
- [6] SHEN L, JIANG H, CAO J D, et al. The Effect of Electro-Migrating 3-Aminopropyltriethoxysilane on the Improvement of the Reinforced Concrete Durability[J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 101-110.
- [7] SHAN H Y, XU J X, WANG Z Y, et al. Electrochemical Chloride Removal in Reinforced Concrete Structures: Improvement of Effectiveness by Simultaneous Migration of Silicate Ion[J]. Construction and Building Materials, 2016, 127: 344-352.
- [8] ISSA C A, DEBS P. Experimental Study of Epoxy Repairing of Cracks in Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(1): 157-163.
- [9] 李崇智, 叶国林, 孙浩, 等. 钢渣混凝土的电化学除氯效果[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(12): 13-17.
LI C Z, YE G L, SUN H, et al. Electrochemical Chloride Extraction Effect of Steel Slag Concrete[J]. Corrosion & Protection, 2021, 42(12): 13-17.
- [10] 毛江鸿, 金伟良, 张华, 等. 海砂混凝土建筑的耐久性提升技术及应用研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2015, 35(6): 563-570.
MAO J H, JIN W L, ZHANG H, et al. Technology for Enhancing Durability of Structures of Sea-Sand Concrete and Its Application[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2015, 35(6): 563-570.
- [11] 高小建, 赵志曼, 孙文博. 钢筋混凝土电化学除氯原理与研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(5): 98-101.
GAO X J, ZHAO Z M, SUN W B. Mechanism and Research Progress of Electrochemical Chloride Extraction on Steel-Reinforced Concrete[J]. Materials Review, 2007, 21(5): 98-101.
- [12] 李树鹏, 金祖权, 熊传胜. 钢筋混凝土电化学除氯技术

- 研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 25-33.
- LI S P, JIN Z Q, XIONG C S. Research Status of Electrochemical Chloride Extraction Technology of Reinforced Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(1): 25-33.
- [13] DE ALMEIDA SOUZA L R, DE MEDEIROS M H F, PEREIRA E, et al. Electrochemical Chloride Extraction: Efficiency and Impact on Concrete Containing 1% of NaCl[J]. Construction and Building Materials, 2017, 145: 435-444.
- [14] 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): 257-266.
- [15] 高小建, 郑秀梅, 杨英姿. 电化学参数对混凝土除氯效率的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2010, 32(5): 579-584.
- GAO X J, ZHENG X M, YANG Y Z. Influence of Electrochemical Parameters on Chloride Extraction Efficiency[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32(5): 579-584.
- [16] 张嘉新, 高小建, 朱卫中. 外电场作用下混凝土中离子的迁移与分布规律研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(8): 9-14.
- ZHANG J X, GAO X J, ZHU W Z. Research on Ion Migration and Distribution Rules of Concrete under External Electric Field[J]. China Concrete and Cement Products, 2012(8): 9-14.
- [17] ZHU J H, WEI L L, WANG Z H, et al. Application of Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Anode in Electrochemical Chloride Extraction of Steel-Reinforced Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 275-283.
- [18] ELSENER B, ANGST U. Mechanism of Electrochemical Chloride Removal[J]. Corrosion Science, 2007, 49(12): 4504-4522.
- [19] XU J, YAO W. Current Distribution in Reinforced Concrete Cathodic Protection System with Conductive Mortar Overlay Anode[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(6): 2220-2226.
- [20] VINCENT I, CHOI B, NAKOJI M, et al. Pulsed Current Water Splitting Electrochemical Cycle for Hydrogen Production[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(22): 10240-10248.
- [21] DOBÓ Z, PALOTÁS Á B. Impact of the Voltage Fluctuation of the Power Supply on the Efficiency of Alkaline Water Electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(28): 11849-11856.
- [22] LYU K X, MA B Z, CHEN Y Q, et al. Efficient and Clean Manganese Electrowinning in an Anion-Exchange Membrane Electrolyzer by Pulse Current Electrodeposition Method[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 318: 128611.
- [23] IBRAHIM S, BAKKAR A, AHMED E, et al. Effect of Additives and Current Mode on Zinc Electrodeposition from Deep Eutectic Ionic Liquids[J]. Electrochimica Acta, 2016, 191: 724-732.
- [24] BI J L, YAO L Y, AO J P, et al. Pulse Electro-Deposition of Copper on Molybdenum for Cu(In, Ga)Se₂ and Cu₂ZnSnSe₄ Solar Cell Applications[J]. Journal of Power Sources, 2016, 326: 211-219.
- [25] KHOSROW-POUR F, AGHAZADEH M, DALVAND S, et al. Large Scale and Uniform La(OH)₃ Nanorods Prepared by Template-Free Pulsed Electrodeposition Method[J]. Materials Letters, 2013, 104: 61-63.
- [26] 王会祥, 王常青. 直流和方波脉冲电流作用下不锈钢析氢的电化学研究[J]. 化工管理, 2017(34): 80-83.
- WANG H X, WANG C Q. Electrochemical Study of Hydrogen Evolution of Stainless Steel under the Action of Direct Current and Square Wave Pulse Current[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(34): 80-83.
- [27] 刘向录, 张德平, 董泽华, 等. 电化学氢通量法用于油气管线在线腐蚀监测[J]. 化工学报, 2014, 65(8): 3098-3106.
- LIU X L, ZHANG D P, DONG Z H, et al. Amperometric Hydrogen Permeation Flux Method for Online Corrosion Monitoring of Oil and Gas Pipelines[J]. CIESC Journal, 2014, 65(8): 3098-3106.
- [28] SHI W, DONG Z H, KONG D J, et al. Application of Wire Beam Electrode Technique to Investigate Initiation and Propagation of Rebar Corrosion[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 48: 25-33.