

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.042



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



强电场作用下早龄期混凝土的氯离子迁移特征

金立兵¹, 王培胜¹, 毛江鸿², 樊玮洁³, 何建明⁴

(1. 河南工业大学土木工程学院, 郑州 450001; 2. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065;
3. 浙大宁波理工学院土木建筑工程学院, 浙江宁波 315100; 4. 浙江广天构件集团股份有限公司,
浙江宁波 315000)

摘要: 电化学除氯技术能有效降低混凝土结构中的有害氯离子, 降低混凝土结构失效风险。采用强电场方式对混凝土结构进行电化学除氯, 并在不同的早龄期时间介入 40、80、120 min 的强电场作用, 测试了内部氯离子含量变化和分布特征, 并对通电后养护 28 d 试件进行回弹强度试验。研究表明: 早龄期介入强电场作用能显著提高除氯效率, 达到相同除氯效果时的作业时间约为传统电化学方法的 1/300; 氯离子分布特征表明, 自由氯离子分布较传统电化学参数作用时更均匀, 结合氯离子仍然存在保护层中间堆积现象; 强电场作用后进行标准养护, 回弹测试结果表明, 强电场对混凝土的保护层宏观强度无明显影响。

关键词: 混凝土结构; 电化学除氯; 养护期; 强电场; 结构耐久性

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)04-0186-07

Characteristics of chloride ion migration in early-age concrete under strong electric field

JIN Libing¹, WANG Peisheng¹, MAO Jianghong², FAN Weijie³, HE Jianming⁴

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, P. R. China; 2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, P. R. China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo Tech University, Ningbo 315100, Zhejiang, P. R. China; 4. Zhejiang Guangtian Component Group Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, P. R. China)

Abstract: Electrochemical chloride extraction can effectively eliminate harmful chloride ions of concrete structures and reduce the failure risk of concrete structures. The electrochemical dechlorination of concrete structure was carried out by means of strong electric field, and the strong electric field action of 40 min, 80 min and 120 min was involved in different early ages. The change and distribution characteristics of internal chloride content were tested, and the springback strength test was carried out on the specimens cured for 28 days after

收稿日期: 2021-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(51878610、51638013、51509084); 宁波市科技重大专项(2020Z056); 河南省科技攻关计划(212102110191)

作者简介: 金立兵(1976-), 男, 博士, 教授, 主要从事混凝土结构与储仓结构研究, E-mail: jinlb@haut.edu.cn。

毛江鸿(通信作者), 男, 博士, 研究员, E-mail: jhmao@scu.edu.cn。

Received: 2021-12-26

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51878610, 51638013, 51509084); Ningbo Science and Technology Major Project (No. 2020Z056); Henan Science and Technology Research Program (No. 212102110191)

Author brief: JIN Libing (1976-), PhD, professor, main research interests: concrete structure and silo structure, E-mail: jinlb@haut.edu.cn.

MAO Jianghong (corresponding author), PhD, professor, E-mail: jhmao@scu.edu.cn.

electrification. The results show that the chlorine removal efficiency can be significantly improved by the intervention of strong electric field at an early age, and the working time is about 1/300 of the traditional electrochemical methods when reaching the same chlorine removal effect. The distribution characteristics of chloride ions show that the distribution of free chloride ions is more uniform than that of traditional electrochemical parameters, and the bound chloride ions still have the phenomenon of accumulation in the middle of the protective layer. The standard curing is carried out after the action of strong electric field, and the rebound test results show that the strong electric field has no obvious effect on the macroscopic strength of the concrete protective layer.

Keywords: concrete structure; electrochemical chloride extraction; maintenance period; strong electric field; durability of structures

氯盐侵蚀会导致钢筋锈蚀和混凝土锈胀开裂,危害混凝土结构耐久性能并降低服役寿命,造成较大社会影响和经济损失^[1]。电化学除氯技术(Electrochemical Chloride Extraction, ECE)可以有效降低混凝土保护层内的氯盐含量,提高混凝土碱性并恢复钢筋钝化状态^[2-3]。目前,该技术通过在混凝土表面铺设阳极材料构建电场的方式进行现场实施,已在桥梁、厂房等耐久性防治方面取得规模应用^[4]。电化学除氯效率与通电参数密切相关,学者们对此开展了大量试验研究,如 Fajardo 等^[5]、Marcotte 等^[6]、de Almeida Souza 等^[7]均以 1 A/m² 的电流密度分别通电 21、56、61 d,除氯效率分别为 50%、73.6% 和 80%;屈锋等^[8]采用 2 A/m² 通电 28 d 后的除氯效率达到 60%,许晨等^[9]以 3 A/m² 通电发现达到相同除氯效率仅需 15 d。电流密度和通电时长是影响电化学除氯效率的关键因素,且通电时长随电流密度的增大而缩短。然而,受限于实际结构较厚的保护层以及安全电压,在电化学除氯技术的工程应用中所能达到的电流密度较小,所需通电时间也较长。方英豪等^[10]对沿海港区码头的横梁等构件进行了 2 A/m² 通电 30 d 的电化学除氯试验,除氯效率达 74.8%;毛江鸿等^[11]对保护层厚度为 55 mm 的桥梁承台进行电化学修复,使用 48.0 V 安全电压通电 85 d 后除氯效率才达到 65%。较长的通电时长带来工程应用的困难,因此,有必要探究能在较短时长内完成大幅除氯的电化学参数。

此外,混凝土电阻与内部孔隙结构相关,对电化学除氯效率也有较大影响,已有研究表明,在混凝土电阻较小时,介入电场作用可提升电化学除氯效率。高谦^[12]在混凝土早龄期采用 3 A/m² 通电 14 d,发现电化学除氯效率达 75%,保护层孔隙结构得到改善。李明明等^[13]在混凝土早龄期开展了常规电流密度的电化学试验,发现 3 A/m² 通电 3 d 时的除氯效率接近 60%。可以看出,由于早龄期混凝土内部微孔隙相对发达,结构内部微观致密性较差^[14],在此

时介入电化学作用可以显著提高除氯效率,结合强电场作用有望在提高除氯效率的同时大幅降低通电时长。

中国沿海建筑在施工期受建筑材料或外部环境水中氯离子含量超标影响而引起的耐久性质质量事故现象常有发生^[15-16],电化学除氯可作为一种解决上述工程问题的技术手段。笔者在混凝土早龄期介入强电场作用进行电化学除氯试验,并分别测试了除氯效率、氯离子分布特征和混凝土回弹强度。

1 试验设计

1.1 试验方案

混凝土结构除氯效率提升与电流密度增大密切相关,且氯离子在通电前期的迁移能效比较高^[17]。为了研究不同养护期介入强电场对除氯效果的影响,电流密度选择 45 A/m² 并设置 3 种不同通电时长。由于混凝土养护 7 d 后水化完成度较高^[18],此后的混凝土阻抗较大,不利于提升保障除氯效率,因此选择在养护期电阻较小的 3、5、7 d 分别进行试验,试验分组如表 1 所示。

表 1 试验分组
Table 1 Test grouping

试件编号	养护时间/d	通电时长/min
ECE-3-40	3	40
ECE-3-80	3	80
ECE-3-120	3	120
ECE-5-40	5	40
ECE-5-80	5	80
ECE-5-120	5	120
ECE-7-40	7	40
ECE-7-80	7	80
ECE-7-120	7	120

1.2 试验设计

采用直径 150 mm、高度 420 mm 的钢筋混凝土

圆柱试件,保护层厚度为30 mm,纵筋和箍筋分别为直径8、6 mm的HPB300钢筋,试件设计如图1所示。

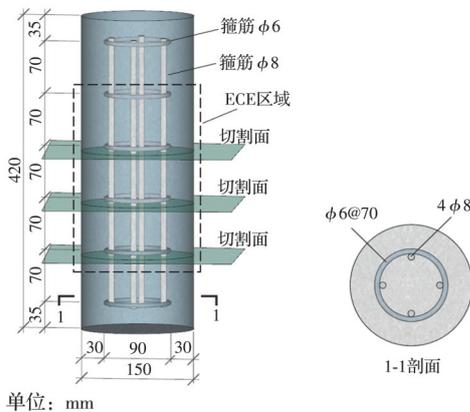


图1 试件尺寸示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen size

为保证初始氯离子含量一致,在同一构件中进行相同养护期下不同通电时长的试验。通电处理的位置选择圆柱中部高度为210 mm的区域以清除试件端部浇筑不均匀带来的试验误差。在每个区段通电时长完成后,使用双刀岩石切割机进行切割,并在试件底部用速凝胶密封后进行下一区段通电时长的试验。

1.3 试验材料

试件采用C30混凝土,水灰比为0.52,材料选用P·O42.5级水泥,粗骨料为粒径5~20 mm的碎石。混凝土配合比如表2所示。

表2 混凝土配合比
Table 2 Concrete mix

kg/m ³			
水	水泥	砂	石子
213	410	638	1 086

试件采用天然河沙、自来水拌和,并预掺水泥质量分数3%的分析纯氯化钠^[19]。试件养护3、5、7 d后进行钻孔取粉,测试得到初始自由氯离子含量分别为0.900%、0.883%及0.879%(占胶凝材料质量分数),初始结合氯离子含量分别为0.195%、0.212%及0.227%(占胶凝材料质量分数)。

2 试验过程

2.1 电化学除氯过程

电化学除氯技术以混凝土内钢筋为阴极,外置不锈钢网或者钛板等材料作为阳极,通过外加直流电源形成电场^[20]。电场驱使混凝土内部负电荷的氯离子向外迁移,电解液中的正电荷离子向内迁移,并在阴极处发生 $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ 。OH⁻的

持续产生和迁移使电化学除氯后混凝土的碱性升高,钢筋钝化状态恢复,可有效降低氯盐侵蚀造成的钢筋锈蚀。采用MP30020D型号稳压直流电源进行强电场电化学除氯试验,最大输出电压300 V,最大输出电流20 A,可满足钢筋通过45 A/m²电流密度所需的电流值,试验布置如图2所示。

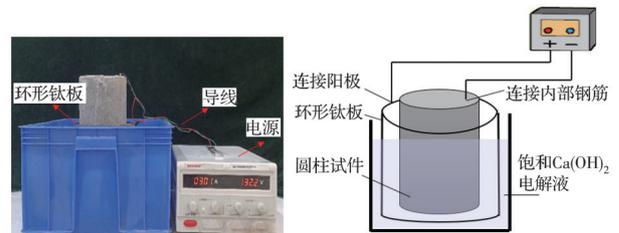


图2 电化学除氯布置图

Fig. 2 Electrochemical dechlorination layout

2.2 氯离子浓度测试

为研究不同养护期介入强电场电化学除氯效果,对混凝土柱进行取粉测试,采用8 mm钻头沿单根纵筋方向钻入3个孔取粉并将钻出的粉混合均匀,取粉时垂直于纵筋且每隔5 mm为一层进行转孔取粉,取粉示意图如图3所示。

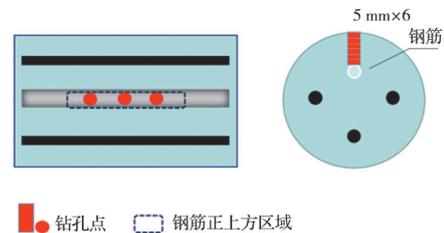


图3 钻孔取粉示意图

Fig. 3 Schematic of drilling hole for powder extraction

处于养护期的混凝土内部存在大量自由氯离子,且有相当部分自由氯离子在向结合态氯离子转化。为研究强电场对不同形态氯离子分布的影响,对混凝土内自由和结合氯离子含量进行测试。自由氯离子和结合氯离子的含量依据《混凝土中氯离子含量检测技术规程》(JGJ/T 322—2013)分别采用水溶法和酸溶法进行测试。电化学除氯效率的计算如式(1)所示。

$$E = \left[\frac{C_i - C_0}{C_0} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: E 为电化学除氯效率; C_i 为电化学除氯后的氯离子浓度; C_0 为初始氯离子浓度。

2.3 混凝土强度测试

由于混凝土内部配置有钢筋笼,切割后无法直接进行抗压强度试验,采用混凝土强度回弹测试评价混凝土抗压强度变化。电化学除氯结束进行标准养护至28 d后,采用HT225T型数显回弹仪对混

凝土进行回弹强度测试。每个切割后的试件截面共测试 8 个数据点,回弹仪向下垂直于待测表面,按照先内层、后外层的顺序进行测试,测点布置如图 4 所示。

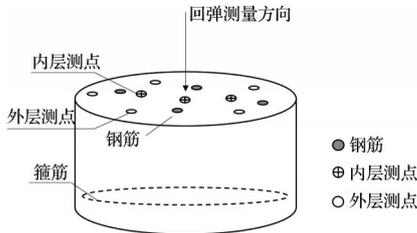


图 4 回弹测点布置图

Fig. 4 Layout diagram of rebound measuring point

3 结果与分析

3.1 除氯效率

为比较不同养护期下不同通电时长的电化除氯效果,计算得到除氯效率,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,相同通电时长下养护期 3、5 d 的除氯效率远大于 7 d,其原因是混凝土养护 7 d 时,水化完成约 80% 的标准强度使得电阻增大^[18],导致

自由氯离子排出效果没有 3、5 d 明显。在不同保护层深度上,靠近钢筋处的除氯效率最高,且向外呈减小趋势,主要原因是电场力在阴极钢筋处最高,此处氯离子受到的排斥驱动力最大。

由图 5 可知,养护期 3 d 通电 40、80、120 min 的除氯效率分别为 52.02%、60.05% 和 71.32%;养护期 5 d 通电 40、80、120 min 的除氯效率分别为 44.87%、52.11% 和 63.06%;养护期 7 d 通电 40、80、120 min 的除氯效率分别为 21.92%、31.14% 和 49.21%;电化学的除氯效率随着通电时长增大而逐渐提高。将试验结果与相关文献中除氯效率和通电时长的关系进行对比,如图 6 所示。

由图 6 可知,在相同除氯效率下,强电场作用可以大幅缩短通电时长,其中养护期 3、5 d 分别通电 40、80 min 时即可达到文献中 50% 的除氯效率,通电时长约为传统电化学方法的 1/300。

3.2 混凝土内氯离子分布特征

3.2.1 自由氯离子

将不同养护期下不同通电时长的自由氯离子分布特征绘制于图 7。

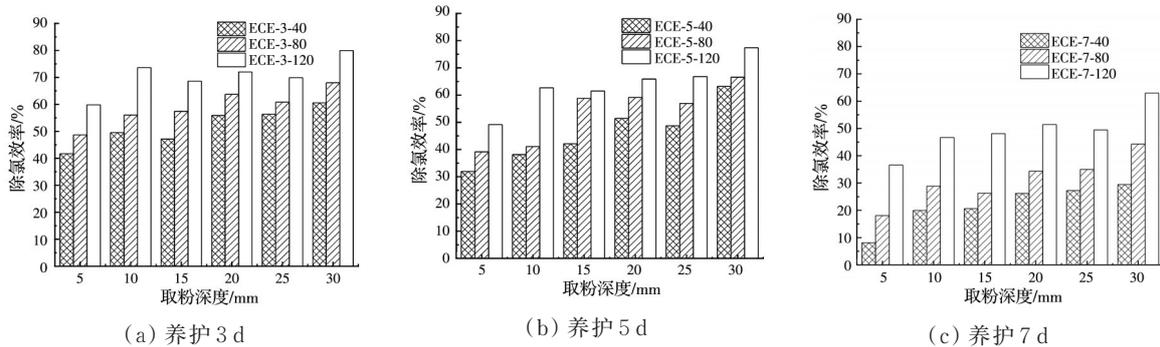


图 5 氯离子除氯效率

Fig. 5 Chlorine ion dechlorination efficiency

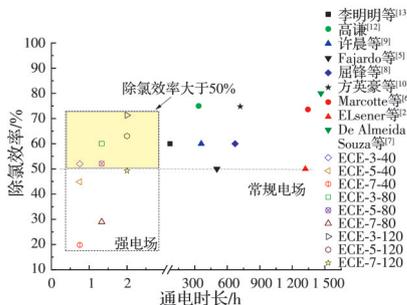


图 6 除氯效率对比图

Fig. 6 Comparative diagram of chlorine removal efficiency

由图 7 可知,自由氯离子分布总体呈现非均匀下降特征,越靠近钢筋处残余氯离子浓度越低。混凝土内自由氯离子含量随着养护时间的减少而降低;在相同养护期时间,氯离子含量随着通电时间

的增加呈减小趋势。在传统的常规电流密度电化除氯试验中,受限於电场强度大小,会存在沿电极两侧向中间位置的电势减弱效应,在除氯后自由氯离子有较为明显的中间位置堆积现象^[22]。试验在强电场作用下,降低了保护层中间位置的氯离子浓度,使保护层各位置的自由氯离子含量较为均衡地下降。

3.2.2 结合氯离子

将不同养护期下不同通电时长的结合氯离子分布特征绘制于图 8。

由图 8 可知,相比自由氯离子分布特征,结合氯离子在保护层中间出现明显的堆积现象。依据电化除氯的电势分布情况^[22],阴极钢筋处和阳极钛板处的电场较大,结合氯离子会在强电场作用下发

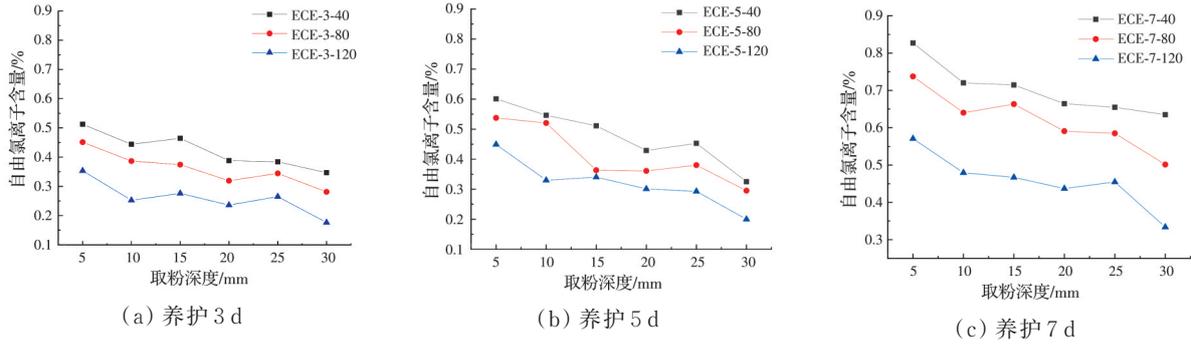


图 7 自由氯离子分布图

Fig. 7 Distribution of free chloride ion

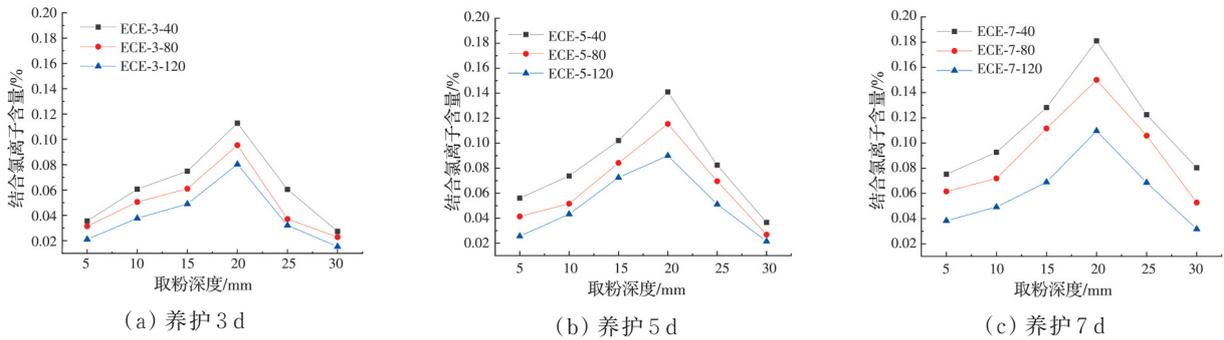


图 8 结合氯离子分布图

Fig. 8 Distribution of binding chloride ion

生分解^[23]。根据电化学除氯过程中的离子迁移特征以及Friedel盐生成机理,强电场作用下钢筋附近的OH⁻和Cl⁻外迁并与电解液中向内迁移的Ca²⁺积聚,造成Ca(OH)₂晶体生成、沉积并堵塞毛细管壁^[20],减缓了氯离子在保护层中间区域向外迁移的速率,提高与C₃S和C₂S等凝胶体的吸附效率并提高结合氯离子生成概率,导致了结合氯离子在保护层中间的堆积现象。

由图8可知,不同养护期时间介入强电场电化

学除氯后结合氯离子含量较初始值均有所下降,养

护期时间相同时,不同保护层深度的结合氯离子含量随着通电时间延长逐渐降低。这主要是因为结合氯离子受外电场、混凝土碱性升高等影响而发生失稳,氯离子在强电场作用下分子运动加速,使物理吸附解除;同时,Friedel盐的稳定存在对氯离子浓度具有依赖性,随着通电时间增加,混凝土碱度增大,结合氯离子失稳释放^[24]。

3.3 混凝土回弹强度

电化除氯后进行28 d标准养护后的回弹强度测试值如图9所示。

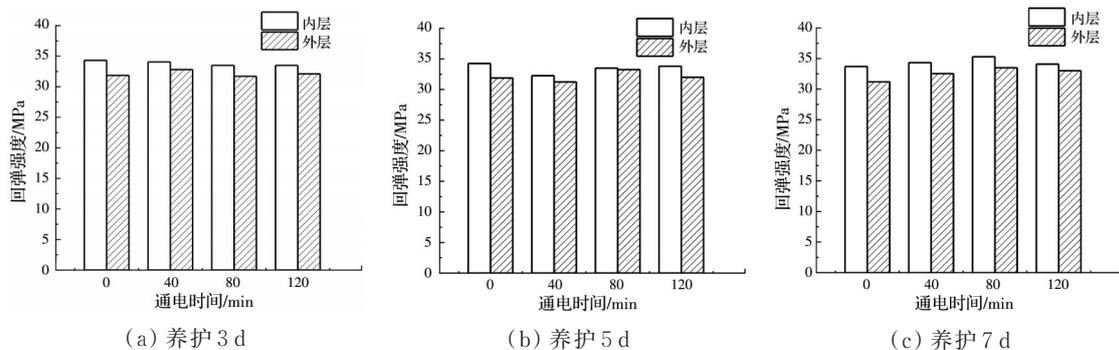


图 9 回弹强度测试值

Fig. 9 Rebound strength test value

由于内层混凝土未受到电场力作用,属于正常水化状况,因此,将不同通电时长保护层回弹强度

值与内层进行对比。由图9可知,未通电情况下,养护28 d后的内层混凝土回弹强度值约为34.1 MPa,

外层强度值约为31.6 MPa。可以发现,不同养护期下不同通电时长的保护层回弹强度值与未通电位置混凝土差别不大。这是因为在养护期7 d前混凝土内部处于快速水化反应阶段,混凝土内 C_3S 水化生成大量水化硅酸钙(C-S-H凝胶)和氢氧化钙^[18]。因此,早龄期强电场电化学除氯过程对标准养护后混凝土保护层强度影响较小。

4 结论

对早龄期混凝土结构进行强电场作用下的电化学除氯试验,对内部氯离子的含量变化及其分布特征进行测试,并对处理后养护28 d试件进行回弹强度测试,得到如下结论:

1)强电场作用下,随着养护期时间缩短,电化学除氯效率提高,自由氯离子和结合氯离子均大幅降低。养护期3、5 d分别通电40、80 min可以达到相关文献相同除氯效率。

2)强电场作用下,不同养护期时间的自由氯离子未出现明显的保护层中间堆积现象,结合氯离子中该现象仍然存在。不同养护期时间电化学除氯并标准养护28 d后的混凝土保护层回弹强度值基本未出现降低。

3)对传统电化学除氯参数开展了系统性的研究,其中包括钢筋氢脆、黏结-滑移及构件力学性能等,提出的强电场电化学除氯尚处于探索阶段,可进一步开展系统研究,以掌握其负面影响和控制方法。

参考文献

- [1] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2014.
JIN W L, ZHAO Y X. Durability of concrete structures [M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [2] KARTHICK S P, MADHAVAMAYANDI A, MURALIDHARAN S, et al. Electrochemical process to improve the durability of concrete structures [J]. Journal of Building Engineering, 2016, 7: 273-280.
- [3] 雷智昊, 屈锋, 孙浩然, 等. 钢筋混凝土结构电化学除氯研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(9): 2834-2840.
LEI Z H, QU F, SUN H R, et al. Research on electrochemical chloride extraction of reinforced concrete structures [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(9): 2834-2840. (in Chinese)
- [4] 宋鑫. 混凝土结构建造期的氯离子电迁移控制方法及其效果试验[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
SONG X. Experimental study on the electromigration of chloride during the construction of concrete structure [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese)
- [5] FAJARDO G, ESCADEILLAS G, ARLIGUIE G. Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel-reinforced concrete specimens contaminated by "artificial" sea-water [J]. Corrosion Science, 2006, 48 (1): 110-125.
- [6] MARCOTTE T D, HANSSON C M, HOPE B B. The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar. Part I: Electrochemical measurements [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(10): 1555-1560.
- [7] 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.
- [8] 屈锋, 孙浩然, 雷智昊, 等. 不同因素下钢筋混凝土电化学除氯效率研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2019, 31 (5): 515-520.
QU F, SUN H R, LEI Z H, et al. Effect of several processing factors on electrochemical dechlorination efficiency of reinforced concrete [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019, 31(5): 515-520. (in Chinese)
- [9] 许晨, 金伟良, 章思颖. 氯盐侵蚀混凝土结构延寿技术初探 II: 混凝土中6种胺类有机物电迁移与阻锈性能[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 761-767.
XU C, JIN W L, ZHANG S Y. Preliminary study on service life extension of concrete structures under chloride environment-electromigration and corrosion inhibition performance of six amine-based inhibitors in concrete [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 761-767. (in Chinese)
- [10] 方英豪, 李森林, 范卫国, 等. 电化学脱盐防腐蚀保护技术现场应用[J]. 水运工程, 2009(4): 56-59.
FANG Y H, LI S L, FAN W G, et al. Site application of electrochemical desalination anticorrosion technique [J]. Port & Waterway Engineering, 2009(4): 56-59. (in Chinese)
- [11] 毛江鸿, 金伟良, 李志远, 等. 氯盐侵蚀钢筋混凝土桥梁耐久性提升及寿命预测[J]. 中国公路学报, 2016, 29 (1): 61-66.
MAO J H, JIN W L, LI Z Y, et al. Durability improvement and service life prediction of reinforced concrete bridge under chloride attack [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(1): 61-66. (in Chinese)
- [12] 高谦. 电化学修复后混凝土氯离子扩散试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
GAO Q. Experimental study on chloride diffusion of concrete after electrochemical repair [D]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

- Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [13] 李明明, 陈春雷, 毛江鸿, 等. 养护期电化学除氯提高含氯盐混凝土耐久性的探索与试验[J]. 混凝土, 2018(1): 12-14.
LI M M, CHEN C L, MAO J H, et al. Experimental research on the improvement effect of ECE treatment on durability of early concrete with chloride [J]. Concrete, 2018(1): 12-14. (in Chinese)
- [14] SONG Q L, YU R, SHUI Z H, et al. Macro/micro characteristics variation of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) subjected to critical marine environments [J]. Construction and Building Materials, 2020, 256: 119458.
- [15] 王玲, 郭小华, 惠云玲, 等. 氯盐侵蚀下锈损钢筋混凝土试件阻锈修复效果试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(11): 35-39.
WANG L, GUO X H, HUI Y L, et al. Experimental research on repair effect of corrosion resistance of corroded reinforced concrete specimens under chloride erosion [J]. Industrial Construction, 2018, 48(11): 35-39. (in Chinese)
- [16] 卢予奇, 赵羽习. 海砂颗粒形态评价与海拌混凝土性能研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(6): 124-130.
LU Y Q, ZHAO Y X. Morphological evaluation of sea sand particles and basic properties of marine-mixed concrete [J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(6): 124-130. (in Chinese)
- [17] 郑靓, 韦江雄, 余其俊, 等. 电化学除盐中混凝土内氯离子的迁移特征研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(2): 42-45.
ZHENG L, WEI J X, YU Q J, et al. Research of the chloride ion migration in concrete during electrochemical chloride extraction [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(2): 42-45. (in Chinese)
- [18] 刘鹏, 余志武, 陈令坤. 养护龄期对水泥混凝土性能和微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(5): 717-723.
LIU P, YU Z W, CHEN L K. Influence of curing age on properties and micro structure of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(5): 717-723. (in Chinese)
- [19] LIN H, LI Y, LI Y Q. A study on the deterioration of interfacial bonding properties of chloride-contaminated reinforced concrete after electrochemical chloride extraction treatment [J]. Construction and Building Materials, 2019, 197: 228-240.
- [20] 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, 63.
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, 63. (in Chinese)
- [21] ELSENER B, MOLINA M, BÖHNI H. The electrochemical removal of chlorides from reinforced concrete [J]. Corrosion Science, 1993, 35(5-8): 1563-1570.
- [22] 杨超, 毛江鸿, 孙洋, 等. 电化学除氯过程钢筋网周围电场与氯离子分布特征试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(3): 81-85.
YANG C, MAO J H, SUN Y, et al. Experimental analysis on distribution characteristics of chloride and electric field around reinforcement nets during electrochemical chloride extraction [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(3): 81-85. (in Chinese)
- [23] 张邦庆, 储洪强, 蒋林华, 等. 电化学脱盐对结合氯离子稳定性的若干影响因素研究[J]. 材料导报, 2015, 29(20): 70-75.
ZHANG B Q, CHU H Q, JIANG L H, et al. Effects of several factors on stability of bound chloride in progress of electrochemical chloride removal [J]. Materials Review, 2015, 29(20): 70-75. (in Chinese)
- [24] YU H Y, SHI S J, XU R, et al. Study on the removal mechanism of chemically bonded chloride ions in concrete under electric field [J]. Ferroelectrics, 2019, 549(1): 126-136.

(编辑 王秀玲)