

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210121001

冻融循环作用后钢筋混凝土电化学除氯效果研究^{*}

屈 锋, 侯海龙, 胡 松, 石卫华, 程火焰, 王功勋, 金 浩

(湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭, 411201)

摘要: 为探究盐冻环境钢筋混凝土结构经电化学除氯后的残余氯离子分布规律, 本文设计快速冻融试验, 对冻融循环作用后的钢筋混凝土开展电化学除氯试验, 研究冻融循环次数、除氯时间和粉煤灰掺量等因素对钢筋混凝土电化学除氯效果的影响。研究表明, 粉煤灰混凝土电化学除氯效率受冻融循环作用影响和粉煤灰二次水化的共同影响, 冻融循环作用引起的混凝土性能劣化导致电化学除氯后混凝土内残余氯离子呈凸型分布, 集聚在距混凝土表面15~25 mm范围, 钢筋附近残余氯离子含量最低。结果表明, 冻融循环作用会引起混凝土电化学平均除氯效率上升, 相较于未冻融试件, 冻融循环作用100次的试件上升约12.5%; 随电化学除氯时间增加, 平均除氯效率会增大, 混凝土内残余氯离子含量下降和外迁总量正相关; 随粉煤灰掺量增加, 混凝土电化学除氯效率增大, 掺10%、20%、30%的粉煤灰混凝土, 其28 d平均除氯效率分别达到51.2%、54.5%、59.9%。

关键词: 钢筋混凝土; 冻融循环; 粉煤灰; 电化学除氯; 耐久性

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0347-07

Study on Electrochemical Chloride Extraction effect of Reinforced Concrete after Freeze-thaw Cycle

QU Feng, HOU Hailong, HU Song, SHI Weihua, CHENG Huoyan, WANG Gongxun, JIN Hao
(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to explore the distribution of residual chloride ions in reinforced concrete structures after electrochemical chlorine removal in the salt-frozen environment, a rapid freeze-thaw test was designed and electrochemical chloride extraction tests of reinforced concrete after freeze-thaw cycles were carried out. The influence of freeze-thaw cycles, chlorination time and fly ash content on the electrochemical chloride extraction of the reinforced concrete was studied. Studies showed that the electrochemical chloride extraction efficiency of fly ash concrete can be affected by the combined impact of the freeze-thaw action and secondary hydration of fly ash. The deterioration of concrete performance caused by freeze-thaw cycle can lead to the convex distribution of residual chloride ions in concrete after electrochemical chloride extraction. After electrochemical chlorine removal, the residual chloride ions in concrete present a convex distribution trend and gathered in the depth of 15-25 mm from the concrete surface. And the content of residual chloride ions near the reinforcement bar is the lowest.

^{*} 收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(51678234)、湖南省教育厅科研项目(18C0324; 19A164)、湖南科技大学自然科学基金(E54009)资助

作者简介: 屈锋(1979—)男, 讲师, 博士。主要从事混凝土结构耐久性及高性能混凝土研究。E-mail: qfkd1015@126.com

The results show that the freeze-thaw action leads to the increase of average dechlorination efficiency of concrete. Compared with the specimens without freeze-thaw attacking, the average dechlorination efficiency of concrete after 100 freeze-thaw cycles increases by about 12.5%. With the electrochemical chlorine removal time increasing, the average chlorine removal efficiency increases, and the decrease of residual chlorine ions content in concrete is positively correlated with the total amount of external migration. With the fly ash content increasing, the dechlorination efficiency of concrete increases. The 28-day average dechlorination efficiency with fly ash content of 10%, 20% and 30% can reach 51.2%, 54.5% and 59.9%, respectively.

Keywords: reinforced concrete; freeze-thaw cycle; fly ash; electrochemical chloride extraction; durability

引言

氯离子侵蚀是造成钢筋锈蚀的主要原因之一,由氯离子引起的钢筋锈蚀会大幅度降低钢筋混凝土结构的耐久性和使用寿命。北方沿海地区许多码头进行的耐久性调查结果表明,大部分工程都过早地出现因氯盐侵蚀所造成的钢筋锈蚀及混凝土开裂,且部分受到冻害^[1-2]。

电化学除氯为通过外加电场除去混凝土内氯离子,而使钢筋恢复钝化的有效方法。目前对电化学除氯效率影响研究,主要集中在对电极材料种类、电化学参数以及不同类型混凝土等因素^[3-6],较少考虑混凝土所处恶劣环境(如冻融环境)对电化学除氯效果的影响。已有研究表明,冻融作用改变了混凝土孔隙结构,使混凝土内部微裂缝扩张,抗渗性降低^[7-9],导致各种盐溶液能加速进入混凝土内,加剧混凝土结构损伤。孙文博等^[10]研究发现经电化学除氯后,混凝土表面结构致密,但钢筋附近区域的孔隙率增多、孔径增大,内部结构变得疏松。Hu等^[11]对掺量分别为10%、20%、30%的粉煤灰混凝土进行了电化学除氯效率影响研究,表明掺入粉煤灰可提高除氯效率,达12%~153.1%,额外提取的氯离子是由于结合氯化物的溶解。

本文以工程结构所处服役环境为背景,以快速冻融循环试验为基础,通过对不同掺量粉煤灰混凝土进行电化学除氯试验,研究不同冻融循环次数、不同除氯时间和不同粉煤灰掺量对电化学除氯效果的影响,为准确评价电化学除氯钢筋混凝土耐久性提供参考。

1 试验

1.1 试验材料和配合比

本试验采用湘潭恒宇牌P.O42.5水泥,其细度(45 μm方孔筛余量)为6.2%,3 d和28 d的抗压强度分别为24.5、49.6 MPa;采用候钢一级粉煤灰,密度2.63 g/cm³,含水量0.5%,细度9.6%,需水量比为93%;细集料采用湘潭市湘江河沙,细度模数为2.7;粗骨料采用湘潭湘江碎石,压碎值8.1%,粒径5~20 mm;钢筋采用湖南湘钢有限公司生产的HRB400螺纹钢;NaCl采用纯度大于96%的工业盐;饱和Ca(OH)₂电解质溶液采用分析纯CaO配制。

试验共设计4组混凝土,强度设计等级为C40,水胶比为0.49,其中未掺外加剂及掺和料的为NFAC组,掺10%、20%、30%粉煤灰混凝土分别为FAC-1、FAC-2、FAC-3组,FAC-1-50-28表示掺10%粉煤灰、经50次冻融循环数、电化学除氯28 d的混凝土组。每组试件制作时掺入胶凝材料总量3%的工业盐以引入Cl⁻,混凝土配合比及28 d立方体抗压强度见表1。

表1 混凝土配合比
Table 1 Concrete mix ratio

编号	材料用量/(kg·m ⁻³)						<i>f_c</i> /MPa
	水泥	细骨料	粗骨料	粉煤灰	水	NaCl	
NFAC	357	642	1 246	0	175	11	48.0
FAC-1	321	642	1 246	36	175	11	46.3
FAC-2	285	642	1 246	72	175	11	45.5
FAC-3	249	642	1 246	108	175	11	44.2

1.2 试验方法

混凝土抗压强度试验采用(100×100×100) mm立方体试块,电化学除氯试验采用(100×100×400) mm棱柱体试件,构件中埋入一根直径16 mm、长350 mm的螺纹钢筋,如图1所示。

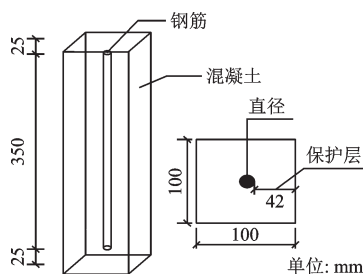


图1 试件示意

Fig.1 Schematic diagram of specimen

冻融循环试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[12]采用“快冻法”,将试件分别经0、25、50、75、100次冻融循环,共5组。每组试件经冻融循环作用后,采用如图2所示自制除氯装置进行除氯试验,将混凝土试件外包裹的不锈钢网作为装置的阳极,钢筋作为阴极,电解质用饱和Ca(OH)₂溶液,通过导线连接至直流电源,形成闭合回路,电流密度设定在2 A/m²^[13]。

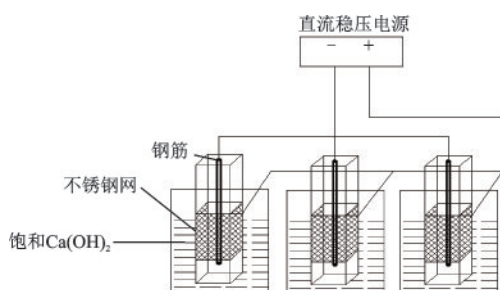


图2 电化学除氯装置

Fig.2 Electrochemical chloride extraction device

电化学除氯后,将混凝土试件表面清洗干净,静置待干后,沿试件表面向内部钢筋方向钻取粉末,以表面向内5 mm为第1个样本,依次间隔10 mm取粉,直至到达钢筋附近,每1个钻取粉末样本重约20 g,钻取完毕后将样品研磨、过筛、烘干后按照《混凝土中氯离子含量检测技术规程》^[14]规范方法,采用水溶性氯离子含量测定方法测试氯离子含量。除氯效率 P 计算如式(1)所示:

$$P = \left(1 - \frac{\text{残余氯离子含量}}{\text{初始氯离子含量}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与分析

2.1 不同冻融循环次数对电化学除氯效果的影响

图3为不同冻融循环作用后,各深度范围混凝土内电化学除氯后的残余氯离子分布。由图3可知,各深度范围内残余氯离子含量随冻融循环次数增加而降低。经28 d除氯,残余自由氯离子从混凝土表面至钢筋表面呈先增后减的趋势,在钢筋表面残余氯离子含量最低,氯离子迁移量最大。

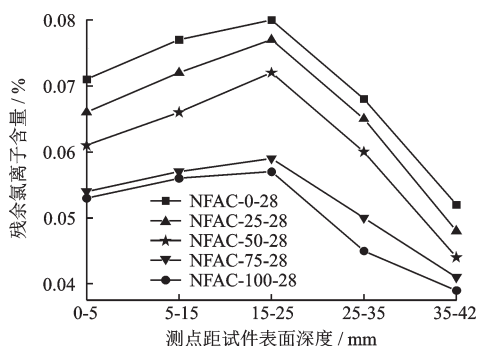


图3 不同冻融循环次数各深度范围残余氯离子分布

Fig.3 Residual chloride ion distribution at different depths after different freeze-thaw cycles

表2为不同混凝土各深度范围内的除氯效率及平均除氯效率。由表2可知,经0、25、50、75、100次冻融循环作用后,混凝土各深度范围内随冻融次数增加除氯效率呈增加趋势,平均除氯效率分别达到55.6%、58.2%、61.4%、66.7%、68.1%。经100次冻融循环作用的试件,对比未经冻融循环作用试件,其平均除氯效率增大了12.5%。由此可知,随冻融损伤程度不断加剧,混凝土电化学除氯效率存在上升趋势。这是因为:一方面,随着混凝土冻融损伤持续加剧,其内部会生成大量细小裂缝以及孔洞,导致混凝土内部结构疏松,而这些细小的裂缝和孔洞为氯离子运输提供通道,增加了自由氯离子的排出量;另外,开展冻融循环试验混凝土试件在冻融试验开始前,需要在水中浸泡4 d,由于混凝土内外氯离子存在浓度差,导致部分自由氯离子排出,各试件在未除氯时初始自由氯离子含量就可能有所减少,故各组试件除氯效率相对于NFAC-0-28组试件有所提高。

表2 不同冻融循环次数各深度范围内的除氯效率

Table 2 Dechlorination efficiency at different depths after different freeze-thaw cycles

试件编号	除氯效率	测点距试件表面深度 /mm					平均除氯效率 /%
		0~5	5~15	15~25	25~35	35~42	
NFAC-0-0	初始氯离子含量	0.153	0.157	0.159	0.157	0.159	—
NFAC-0-28	除氯效率 /%	53.59	50.96	49.69	56.69	67.30	55.6
NFAC-25-28	除氯效率 /%	56.86	54.14	51.57	58.60	69.81	58.2
NFAC-50-28	除氯效率 /%	60.13	58.00	54.72	61.78	72.32	61.4
NFAC-75-28	除氯效率 /%	64.71	63.69	62.89	68.15	74.21	66.7
NFAC-100-28	除氯效率 /%	64.7	60.5	64.15	71.34	75.47	68.1

2.2 除氯时间对电化学除氯效果的影响

图4为经不同除氯时间各层深度范围内残余氯离子含量。由图4可知,各组试件经冻融循环75次,再分别开展7、14、28 d电化学除氯后,其残余自由氯离子含量随除氯时间延长而呈降低趋势。距试件表面深度0~15 mm处,残余氯离子含量呈增加趋势,大多数残余氯离子聚集于15~25 mm范围内,在25 mm到钢筋表面时,残余氯离子含量呈减少趋势,钢筋表面达到最低。

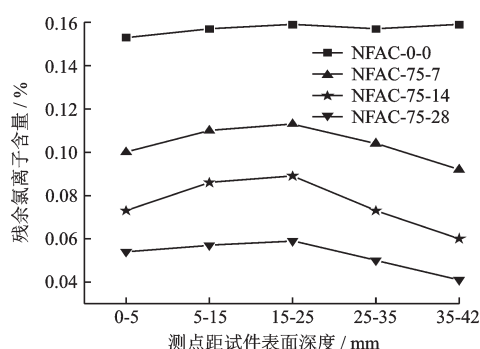


图4 经不同除氯时间各层深度范围内残余氯离子含量

Fig.4 The residual chloride ion content at different depths after different chlorination extraction time

张文文等^[15]研究表明在电化学除氯过程中,氯离子的迁出速率与电场强度正相关。由此可知,在

除氯过程中外加电源提供了混凝土内部离子一个电场环境,而离子本身带有电荷,因此就会受电场环境影响而移动。但中间区域相对于靠近电极附近的离子受排斥力与吸引力作用较小,以及钢筋附近区域的氯离子不断向中间区域迁移排出,所以各试件经冻融循环作用后,残余自由氯离子大多数集聚于15~25 mm范围内,两端残余氯离子含量较少。在电化学除氯作用下各层范围内残余自由氯离子基本呈现凸型分布,这与既有研究结果^[16-17]一致。

由表3可知,随除氯时间增加,电化学除氯效率增加,除氯28 d不同深度范围的平均除氯效率为66.7%,是除氯时间为7、14 d平均除氯效率的1.97倍、1.30倍。但单位天数除氯量有所降低,其中经过7 d除氯时间的试件,其单位天数平均除氯效率为4.84%,而经过14 d、28 d的试件仅为3.68%、2.38%。

分析其原因,在于电化学除氯造成了离子迁移,阴极产生的氢气使混凝土内部结构疏松,产生的OH⁻则会与K⁺、Na⁺结合,分解水化产物C-S-H凝胶,同样会造成混凝土内部结构疏松,使得除氯效率增加。但因试件内部氯离子含量恒定,除氯初期混凝土内部氯离子含量较高,除氯效率提升较快,但随电化学除氯时间延长,氯离子总的含量就会减少,除氯效率就处于减少趋势。

表3 不同除氯时间各深度范围内的除氯效率

Table 3 Dechlorination efficiency at different depths with different chlorination extraction time

试件编号	除氯效率	测点距试件表面深度 /mm					平均除氯效率 /%
		0~5	5~15	15~25	25~35	35~42	
NFAC-0-0	初始氯离子含量	0.153	0.157	0.159	0.157	0.159	—
NFAC-75-7	除氯效率 /%	34.64	29.94	28.93	33.76	42.14	33.9
NFAC-75-14	除氯效率 /%	52.29	45.22	44.02	53.50	62.26	51.5
NFAC-75-28	除氯效率 /%	64.71	63.69	62.89	68.15	74.21	66.7

结合未经冻融循环作用的钢筋混凝土结构电化学除氯效率研究成果^[18],如表4所示,其中7 d平均除氯效率仅为13.0%,14 d和28 d分别为40.3%、60.1%。对比发现,经冻融循环75次后,除

氯7 d的平均效率比未冻融试件增加约2倍。这在于电化学除氯和冻融循环两者共同作用造成混凝土内外部微裂缝连通,经除氯7 d,其除氯效率大幅增加。

表4 未冻融试件不同除氯时间各深度范围内的除氯效率^[18]

除氯时间 /d	除氯效率	测点距试件表面深度 /mm					平均除氯效率 /%
		0~5	5~15	15~25	25~35	35~42	
7	除氯效率 /%	26.7	12.4	3.8	7.2	14.9	13.0
14	除氯效率 /%	38.0	43.5	39.0	32.3	48.4	40.3
28	除氯效率 /%	43.6	47.4	56.8	66.0	86.8	60.1

2.3 不同粉煤灰掺量对电化学除氯效果的影响

图5为不同粉煤灰掺量各深度范围残余氯离子分布。由图5可知,未掺粉煤灰组残余氯离子含量均小于掺粉煤灰组,而在掺粉煤灰组中,粉煤灰掺量越大其残余氯离子含量越少。

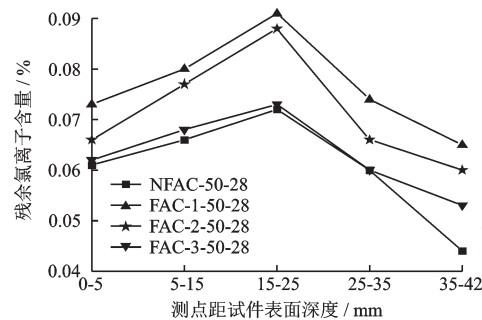


图5 不同粉煤灰掺量各深度范围残余氯离子分布
Fig.5 Residual chloride ion distribution at different depths for different fly ash contents

从表5可知,各深度范围内未掺粉煤灰混凝土除氯效率值及平均除氯效率值均大于掺粉煤灰混凝土,但在掺粉煤灰混凝土中,粉煤灰掺量越大平均除氯效率有增加趋势,其中钢筋表面区域的除氯

效率最高。

粉煤灰掺入能结合更多自由氯离子,当自由氯离子降至钢筋锈蚀临界值以下时,就起到了降低钢筋锈蚀发生的作用^[19]。氯离子以自由氯离子和结合氯离子形式分布于混凝土内,而除氯过程中排出的氯离子多为自由氯离子。研究表明^[20-21],结合氯离子主要分两大类,一类是通过物理吸附于水泥水化产物(主要是C-S-H)上,另一类是通过氯离子与AFm(单硫型水化硫铝酸钙)发生反应生成含氯AFm化合物,弗里德尔盐(Friedel’s salt)就是其化合物中的一种。

粉煤灰中含有的氧化铝可结合氯离子生成更多的弗里德尔盐,而活性物质可与水化产物氢氧化钙进行二次水化生成C-S-H凝胶提高氯离子的吸附率,所以随粉煤灰掺量增加,其结合氯离子能力不断增强,结合态氯离子含量增加使未掺粉煤灰组的初始自由氯离子大于掺粉煤灰组,从而其除氯效率大于掺粉煤灰组。但由于在电化学除氯过程中,试件浸泡在饱和Ca(OH)₂溶液中,电解质阴极端会产生大量OH⁻离子并向阳极端迁移,提高了混凝土内部碱度,而碱度的提高会抑制弗里德尔盐的形成^[21],减少了结合氯离子的产生,除此之外,随着粉

表5 不同粉煤灰掺量各深度范围内的除氯效率

试件编号	除氯效率	测点距试件表面深度 /mm					平均除氯效率 /%
		0~5	5~15	15~25	25~35	35~42	
NFAC-0-0	初始氯离子含量	0.153	0.157	0.159	0.157	0.159	—
NFAC-50-28	除氯效率 /%	60.13	58.00	54.72	61.78	72.32	61.4
FAC-1-50-28	除氯效率 /%	52.29	49.04	42.77	52.87	59.12	51.2
FAC-2-50-28	除氯效率 /%	56.86	50.96	44.65	57.96	62.26	54.5
FAC-3-50-28	除氯效率 /%	59.48	56.69	54.09	62.42	66.67	59.9

煤灰掺量的增加,混凝土抗冻性能退化^[22],冻融损伤加剧造成混凝土内部裂缝扩展,加速了自由氯离子的排出,从而出现各层深度范围除氯效率及平均除氯效率FAC-3>FAC-2>FAC-1。

3 结 论

设计钢筋混凝土冻融循环作用后电化学除氯试验,开展不同冻融循环次数、不同除氯时间和不同粉煤灰掺量对电化学除氯效果的影响研究,结论如下:

(1) 除氯后混凝土内的残余氯离子呈凸型分布,聚集在距混凝土表面15~25 mm深的范围内,钢筋表面附近残余氯离子含量最低。

(2) 钢筋混凝土经冻融循环后,随着冻融次数的增加,其平均除氯效率有所增加。

(3) 在一定的冻融循环作用下,粉煤灰混凝土随着电化学除氯时间的增加,平均除氯效率会增大,除氯28 d的平均除氯效率是除氯7 d的1.97倍。

(4) 粉煤灰的掺入降低了电化学除氯效率,但随着粉煤灰掺量的增大,各深度范围残余自由氯离子含量减小,除氯效率有所增加。

参考文献:

[1] Song Y P, Song L Y, Zhao G F. Factors affecting corrosion and approaches for improving durability of ocean reinforced concrete structures [J]. Ocean Engineering, 2004, 31(5-6): 789-799.

[2] 孙成, 李洪锡, 张淑泉, 等. 钢筋混凝土腐蚀研究综述 [J]. 材料导报, 2000, 14(5): 27-28.

Sun C, Li H X, Zhang S Q, et al. Review of research on corrosion of reinforced concrete [J]. Materials Review, 2000, 14(5): 27-28. (in Chinese).

[3] Nguyen H Y T, Pansu K W, Sanchaon P. The effects of electro-chemical chloride extraction on the migration of ions and the corrosion state of embedded steel in reinforced concrete [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(8): 2942-2950.

[4] Shan H Y, Wang Z Y, Xu J X, et al. Influences of fly ash, slag and silica fume on electrochemical chloride removal treatment with simultaneous migration of silicate ion [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2018, 13(6): 1120-1130.

[5] Chang C C, Yeih W, Chang J J, et al. Effects of stirrups on electrochemical chloride removal efficiency [J]. Construction and Building Materials, 2014, 68(10): 692-700.

[6] 李森林, 范卫国, 蔡伟成, 等. 电化学脱盐防腐技术的室内试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2001(3): 35-40.

Li S L, Fan W G, Cai W C, et al. Laboratory tests of electrochemical removal of chloride for anti-corrosion [J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(3): 35-40. (in Chinese)

[7] 姜文镗, 刘清风. 冻融循环下混凝土中氯离子传输研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(2): 258-272.

Jiang W Q, Liu Q F. Chloride transport in concrete subjected to freeze-thaw cycles—A short review [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(2): 258-272. (in Chinese)

[8] 邱继生, 邢敏, 杨占鲁, 等. 冻融作用下聚丙烯纤维煤矸石混凝土孔结构研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2020, (6): 41-44, 48.

Qiu J S, Xing M, Yang Z L, et al. Pore structure characteristics of polypropylene fiber coal Gangue concrete under freeze-thaw [J]. China Concrete and Cement Products, 2020, (6): 41-44, 48. (in Chinese)

[9] 姜磊, 牛荻涛. 硫酸盐与冻融环境下混凝土损伤破坏准则研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 148-153.

Jiang L, Niu D T. Study on damage failure criterion of concrete under sulfate attack and freeze-thaw environment [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(1): 148-153. (in Chinese)

[10] 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): 1108-1112.

Sun W B, Gao X J, Yang Y Z, et al. Microstructure of concrete after electrochemical chloride extraction treatment [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(10): 1108-1112. (in Chinese)

[11] Hu J Y, Li S, Lu Y 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(7): 1-10.

[12] 普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[13] 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. (in Chinese)
- [14] 混凝土中氯离子含量检测技术规程 JGJ/T 322—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [15] 张文文, 毛江鸿, 孙洋, 等. 不同电场方向下电化学除氯过程氯离子迁移特征试验研究 [J]. 建筑科学, 2018, 34(1): 38-43.
- Zhang W W, Mao J H, Sun Y, et al. Experimental research on chloride migration featureduring electrochemical chloride extraction under different electric field direction [J]. Building Science, 2018, 34 (1): 38-43. (in Chinese)
- [16] 祝频, 王新祥, 韦江雄, 等. 电化学除盐模型及离子迁移过程的数值分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33 (5): 41-47.
- Zhu P, Wang X X, Wei J X, et al. Model and numerical analysis of ions migration in concrete during the process of electrochemical chloride extraction [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(5): 41-47. (in Chinese)
- [17] 郑靛, 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] 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)
- [19] Liu J, Liu J Y, Huang Z Y, et al. Effect of fly ash as cement replacement on chloride diffusion, chloride binding capacity, and micro-properties of concrete in a water soaking environment [J]. Applied Sciences, 2020, 10 (18): 1-16.
- [20] Geng Jian, DaveEasterbrook, Li L Y, et al. The stability of bound chlorides in cement paste with sulfate attack [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 68 (2): 211-222.
- [21] Ipavec A, Tomaž V U K, Gabrovšek, et al. Chloride binding into hydrated blended cements: The influence of limestone and alkalinity [J]. Cement and Concrete Research. 2013, 48(6): 74-85.
- [22] 雷智昊. 钢筋混凝土构件电化学除氯效果及除氯后抗冻性能研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2018.
- Lei Z H. Study on effect of electrochemical chloride extraction and frost resistance after extraction of reinforced concrete components [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)