

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221012001

钢筋再生混凝土电化学除氯效果研究*

陈峰, 屈锋, 王功勋, 程火焰, 黄志, 金浩

(湖南科技大学土木工程学院, 湖南湘潭 411201)

摘要:为探究遭受氯盐侵蚀钢筋再生混凝土耐久性修复路径,通过内掺氯盐方式模拟再生混凝土遭受氯盐侵蚀,开展再生混凝土电化学除氯试验,研究再生骨料特征和通电参数对电化学除氯效率的影响。研究表明,采用5~25 mm再生粗骨料粒径范围的钢筋再生混凝土电化学除氯效率是5~30 mm粒径范围钢筋再生混凝土的1.36倍;随再生粗骨料取代率增加,电化学除氯效率增大,取代率达50%时,钢筋再生混凝土除氯效率较普通混凝土提高约26%;随通电电流密度增大,再生混凝土除氯效率增大,相较1 A/m²,电流密度3 A/m²时的电化学除氯效率是其1.45倍,电流密度从1 A/m²增大到2 A/m²,再生混凝土除氯效率增幅比普通混凝土更明显;随除氯时间延长,再生混凝土除氯效率明显增大,相对普通混凝土,再生混凝土前期除氯效率占比更大,7 d除氯效率是28 d的51%;基于电化学除氯效率开展影响因素敏感性分析,结果表明,再生骨料取代率的影响大于再生骨料粒径,但电化学除氯时间影响最为明显。

关键词:钢筋再生混凝土;骨料粒径;再生骨料取代率;电化学除氯;电流密度

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)04-0952-08

Study on the Effect of Electrochemical Chloride Extraction Effect in Recycled Reinforced Concrete

CHEN Feng, QU Feng, WANG Gongxun, CHENG Huoyan, HUANG Zhi, JIN Hao
(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To explore the durability repair pathways of recycled reinforced concrete affected by chloride salt-induced corrosion, an electrochemical chloride extraction (ECE) experiment was carried out. Chloride salts were internally added to simulate the corrosion process, and the effect of recycled aggregate characteristics and electrical parameters on ECE efficiency were studied. The results showed that the ECE efficiency of recycled reinforced concrete with recycled coarse aggregate sizes of 5 to 25 mm was 1.36 times higher than that of the concrete with aggregate sizes of 5~30 mm. An increased replacement rate of recycled coarse aggregate resulted in improved ECE efficiency. At a 50% replacement rate, the ECE efficiency was about 26% higher than that of ordinary concrete. As current density increased during electrification, the ECE efficiency also improved. The ECE efficiency at a current density of 3 A/m² was 1.45 times higher than that at 1 A/m². When the current density increased from

* 收稿日期:2022-10-12;修回日期:2023-01-09

基金项目:国家自然科学基金(51678234,51808213)、湖南省教育厅科研项目(18C0324,19A164,20B214)、湖南省自然科学基金(2019JJ50185)资助

作者简介:陈峰(1999—),男,硕士研究生。主要从事混凝土结构耐久性研究。E-mail:2012040006@qq.com

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

1 A/m² to 2 A/m², the improvement in ECE efficiency was more pronounced for recycled concrete than for ordinary concrete. Extending ECE duration significantly enhanced its efficiency, with recycled concrete showing a substantially higher chloride removal rate in the early stages compared to ordinary concrete. The chloride extraction efficiency within the first 7 days was 51% of that achieved in 28 days. Sensitivity analysis of the factors affecting ECE efficiency showed that the recycled aggregate replacement rate had a greater impact than aggregate particle size. However, ECE duration had the most significant impact.

Keywords: recycled reinforced concrete; aggregate particle size; replacement rate of recycled aggregate; electrochemical chloride extraction; current density

0 引言

随城镇化进行,我国每年产生建筑垃圾数量快速上升,据统计,2020年产生建筑垃圾30亿吨^[1]。利用建筑垃圾破碎产生的再生骨料,部分或全部替代天然骨料制成的再生混凝土,既能满足力学性能和耐久性要求^[2-3],也能缓解天然骨料紧缺的局面^[4]。

目前再生混凝土应用范围越来越广泛,在盐渍地区钢筋混凝土往往会遭受氯盐侵蚀,再生混凝土因为含有较高孔隙率和微裂缝,故更容易遭受氯盐侵蚀^[5],这也限制了它的推广应用。再生混凝土孔隙率较高,主要是破碎得到的骨料表面附着一层旧砂浆,使其界面过渡区含量要多于普通混凝土,而界面过渡区孔隙率较高,因此再生混凝土的孔隙率也会高于普通混凝土^[6],通常再生骨料的取代率越高混凝土孔隙率也越高^[7-8]。电化学除氯技术能将遭受侵蚀钢筋混凝土中氯离子排出,恢复钢筋钝化状态。它被作为一种有效提高混凝土耐久性的手段应用在了实际工程中^[9],现有研究发现^[10-12]在钢筋混凝土中,随除氯时间增加和除氯电流密度增大,除氯效率会增加。钢筋混凝土自身的性质也会影响除氯效率,骨料粒径越大,氯离子传输的阻碍越大,氯离子扩散系数越小^[13]。混凝土孔隙率越大,氯离子扩散系数越大^[14]。就钢筋再生混凝土结构而言,在受氯盐侵蚀环境中,亟需解决再生骨料掺入的影响与混凝土结构耐久性提升所带来的问题。

目前对再生混凝土进行电化学除氯的研究还比较少,本文通过模拟再生混凝土遭受氯盐侵蚀,开展钢筋再生混凝土的电化学除氯试验,研究再生骨料的粒径和取代率以及电化学除氯的电流密度

和除氯时间对除氯效果的影响机理,为再生混凝土结构耐久性提升及耐久性评价提供理论基础。

1 原材料与试验方案

1.1 水泥

本实验采用湘乡棋梓桥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23.5、54.1 MPa,其化学组成见表1。

表1 水泥化学成分组成

Table 1 Cement chemical composition

								单位: %
CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	SO ₃	Ignition loss rate
60.12	5.61	2.67	3.55	0.17	0.52	21.26	2.55	3.65

1.2 骨料

试验中细骨料使用湘江河沙,天然粗骨料使用碎石。再生粗骨料是通过废弃混凝土破碎、筛分后得到,依据《混凝土用再生粗骨料》^[15],本试验使用的再生粗骨料为II类骨料。表2为集料相关物理指标。

表2 骨料物理指标

Table 2 Physical indicators of aggregates

骨料种类	粒径/mm	表观密度/(kg·m ⁻³)	细度模数	压碎值/%	堆积密度/(kg·m ⁻³)	吸水率/%
细骨料	<5	2 581	2.70	—	1 640	1.02
粗骨料	5~20	2 608	—	9.20	1 550	0.93
再生粗骨料	5~20	2 560	—	17.50	1 458	4.20
	5~25	2 565	—	16.60	1 402	4.00
	5~30	2 572	—	15.10	1 376	3.80

1.3 试件设计

钢筋混凝土配合比见表3,向每个试件中掺入占胶凝材料质量3%的NaCl,模拟试件遭受氯盐侵蚀。按照不同的再生骨料粒径和不同的再生骨料取代率分批进行浇筑,并在试件中部埋入一根长350 mm、直径16 mm的HRB400螺纹钢钢筋,24 h后脱模,试件标准养护28 d后进行后续试验,钢筋混凝土试件尺寸如图1所示。

表3 试件配合比

Table 3 Mix proportions for specimens

单位:kg/m ³					
再生骨料取代率/%	水泥	水	细骨料	普通粗骨料	再生粗骨料
0	410	172	578	1 292	0
20	410	172	578	1 034	258
30	410	172	578	904	388
40	410	172	578	776	516
50	410	172	578	646	646

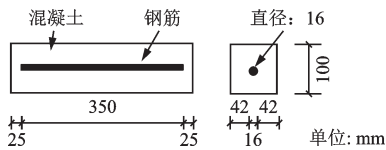


图1 试件示意

Fig.1 Schematic diagram of specimen

试验分组见表4,采用普通混凝土试件PC作为对照组进行电化学除氯效率对比。以再生粗骨料粒径、再生粗骨料取代率为骨料特征参数探讨其对钢筋再生混凝土电化学除氯效果的影响,试验分组为RAC1、RAC2和RAC3。以电流密度和除氯时间为电化学参数考察其对钢筋再生混凝土电化学除氯效果影响规律,试验分组为RAC4、RAC5和RAC6。RAC1-20与RAC5-28是同一个试件。

1.4 试验方法

1.4.1 电化学除氯试验

养护到龄期的试件取出,按照如图2所示试验装置进行电化学除氯试验,使用导线将外接电源与混凝土试件内部钢筋和外部钢丝网连接。钢筋连接电源负极,钢丝网连接电源正极,试件浸泡在饱和Ca(OH)₂溶液中。通电电流采用1、2、3 A/m²;通电时间采用7、14、28 d。

表4 试验分组

Table 4 Experimental groups

组号	粗骨料粒径/mm	再生粗骨料取代率/%	电流密度/(A·m ⁻²)	除氯时间/d
PC-0				0
PC-7	5~20	0	2	7
PC-14				14
PC-28				28
RAC1-20				5~20
RAC2-20	5~25	20	2	28
RAC3-20	5~30			
RAC1-30		30		
RAC1-40	5~20	40	2	28
RAC1-50		50		
RAC4-28			1	
RAC5-28	5~20	20	2	28
RAC6-28			3	
RAC5-0				0
RAC5-7	5~20	20	2	7
RAC5-14				14

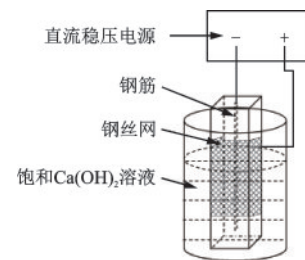


图2 电化学除氯装置示意

Fig.2 Schematic diagram of electrochemical chloride extraction device

1.4.2 残余氯离子含量试验

在各钢筋再生混凝土电化学除氯试验结束后,以表面范围0~5 mm为第一层,沿深度向内每隔10 mm依次钻粉取样,直至钢筋附近,共取5个样本。之后,依据《混凝土中氯离子含量检测技术规范》^[16],采用水溶性氯离子测定法进行试验,获得每层再生混凝土样品内的残余自由氯离子含量,以空白组钢筋再生混凝土试件的氯离子含量为初始氯离子含量进行比较,获得各层钢筋再生混凝土电化学除氯效率。为评估每个试件的除氯效果,对试件各层的电化学除氯效率取平均值,得到单个试件的平均除氯效率。

2 再生混凝土电化学除氯效果分析

2.1 再生粗骨料粒径的影响

图3为不同再生粗骨料粒径范围的钢筋再生混凝土除氯效率,本组试件的再生粗骨料取代率为20%,在通电电流 2 A/m^2 下电化学除氯28 d。经检测,该批试件内部初始氯离子含量为0.133%(占胶凝材料质量分数)。

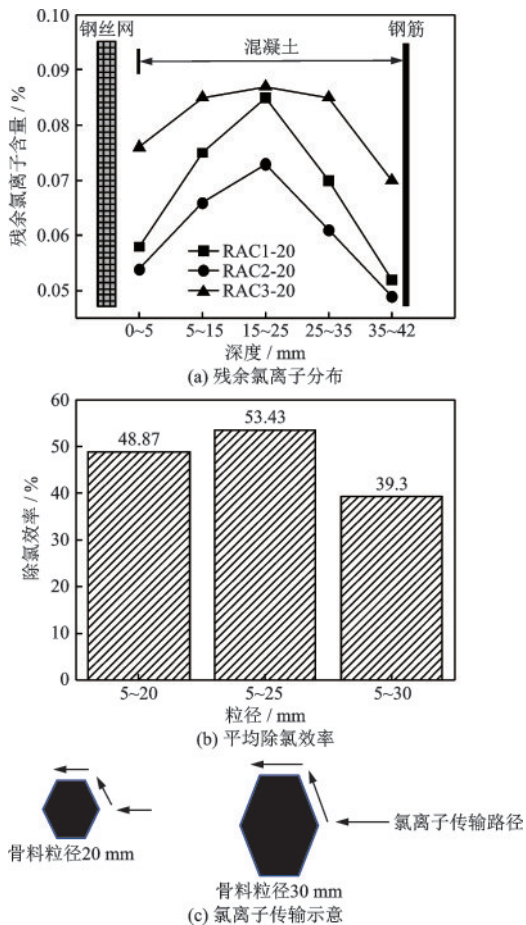


图3 再生粗骨料粒径对除氯效率的影响

Fig.3 Effect of recycled aggregate particle sizes on chloride extraction efficiency

图3(a)为不同粒径范围下,试件内部沿混凝土表面到钢筋附近的残余氯离子含量分布。由图可知,经过电化学除氯后,残余氯离子含量在试件内总体上呈凸型分布,钢筋附近自由氯离子大幅降低,以本试验试件为基准,凸点基本在15~25 mm,氯离子含量的峰值出现在中间区域。电化学除氯过程中,因为氯离子在电场力的作用下向外迁出,距离电极较近的区域,氯离子受到较大的牵引力,

中间层氯离子受到的牵引力较小^[17],氯离子排出速率较低,并且从钢筋附近排出的氯离子在经过此区域时,部分会在此滞留,两种因素的共同作用下中间区域的氯离子含量超出两端,且混凝土表层范围氯离子在渗透作用下也会进入外面的溶液,故沿深度范围变化,氯离子含量呈现凸型分布,这也与普通混凝土电化学除氯的规律相同^[18]。

由图3(a)中各试件曲线的凸起程度可知,RAC-3试件的曲线更平缓,RAC-1的曲线凸起更明显。对于不同粒径范围的残余氯离子含量分布,15~25 mm区域残余氯离子含量要高于两边,主要是钢筋附近氯离子的迁入和混凝土表层氯离子的迁出,而粗骨料粒径越大导致氯离子传输路径延长,阻碍了氯离子的传输^[13],其原理如图3(c)所示。故粒径范围大的试件,氯离子从钢筋附近移动到中部和从混凝土表层迁移到溶液的数量减少,则15~25 mm深度的残余氯离子含量与两边的差值降低。所以粒径范围较大的RAC-3试件氯离子含量分布的曲线更平缓,而粒径范围较小的RAC-1更凸。

由图3(b)可知,5~25 mm粒径的平均除氯效率最高,其平均除氯效率是5~30 mm粒径的1.36倍。一方面粗骨料粒径增大,使氯离子传输路径延长,阻碍了氯离子的传输,氯离子扩散系数会变小^[13]。另一方面,由表2可知,随着粒径增大,再生骨料吸水率降低,因此同样设计水灰比下,粒径大的再生混凝土实际水灰比更大,故孔隙率增大除氯效率增加。在这两方面因素综合影响下,除氯效率随再生骨料粒径范围的增大呈现中间高两端低的趋势。

2.2 再生粗骨料取代率的影响

图4为不同再生粗骨料取代率下钢筋再生混凝土除氯效率,试件的再生粗骨料粒径范围是5~20 mm,在通电电流 2 A/m^2 下电化学除氯28 d。该批试件内部初始氯离子含量为0.133%。

不同取代率下再生混凝土内部残余氯离子含量分布如图4(a)所示,图中残余氯离子含量分布呈中间高两边低的分布。由15~25 mm深度处残余氯离子可知,随着再生骨料取代率的增加,残余氯离子含量下降幅度总体上是增大的。这是因为15~25 mm深度的残余氯离子含量是由初始的氯离子含量减去除氯时该处去除的氯离子含量,再加上除氯过程中钢筋附近氯离子向外迁移时滞留在该

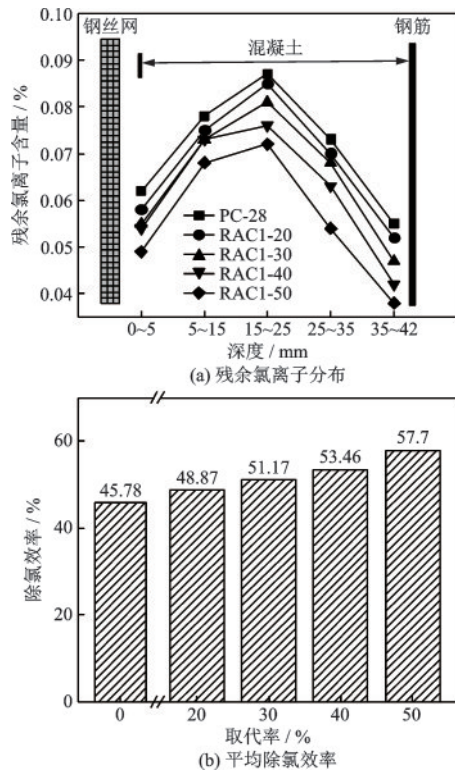


图4 再生骨料取代率对除氯效率的影响

Fig.4 Effects of recycled aggregate replacement rate on chloride extraction efficiency

处的氯离子含量。随着取代率的增大,混凝土孔隙率增加,氯离子向外迁移的路径增加,导致15~25 mm处除氯除去氯离子含量增加,而钢筋附近氯离子向外迁移过程中在该处滞留的氯离子含量都减少,因此该处残余氯离子含量下降幅度增大。在15~25 mm深度处当取代率从40%增加到50%时,该处的残余氯离子含量下降的幅度减小,可能是因为孔隙率增大到一定程度,残余氯离子含量减少,氯离子向外迁移速度也会减缓。

总体上,试件内部残余氯离子含量随取代率增加而下降,但在5~15 mm深度处,再生骨料取代率为30%和40%的残余氯离子含量相同,原因可能是混凝土内再生骨料的分布具有随机性,若两个再生骨料相邻,则通过旧砂浆-新砂浆-旧砂浆连接,使该处砂浆的界面过渡区含量较高,故孔隙率也高,在除氯后残余氯离子含量会较低。而相邻两个普通骨料之间只有新砂浆,因此除氯后该处的残余氯离子含量较高。故钢筋再生混凝土局部的残余氯离子含量变化规律可能会不同。

由图4(b)不同取代率下再生混凝土平均除氯效率可知,再生骨料取代率越高,除氯效率越高。20%、30%、40%和50%取代率钢筋再生混凝土的

电化学除氯效率为普通混凝土的1.07、1.12、1.17和1.26倍。再生骨料取代率越高,混凝土中附着的旧砂浆含量越高,孔隙率增加,则除氯过程中氯离子可以通过更多的路径从混凝土迁出,使除氯效率增加。

2.3 电流密度的影响

不同通电电流密度下钢筋再生混凝土除氯效率如图5所示,本组试件的再生骨料粒径范围和取代率分别为5~20 mm和20%,进行28 d电化学除氯。该批试件内部初始氯离子含量为0.133%。

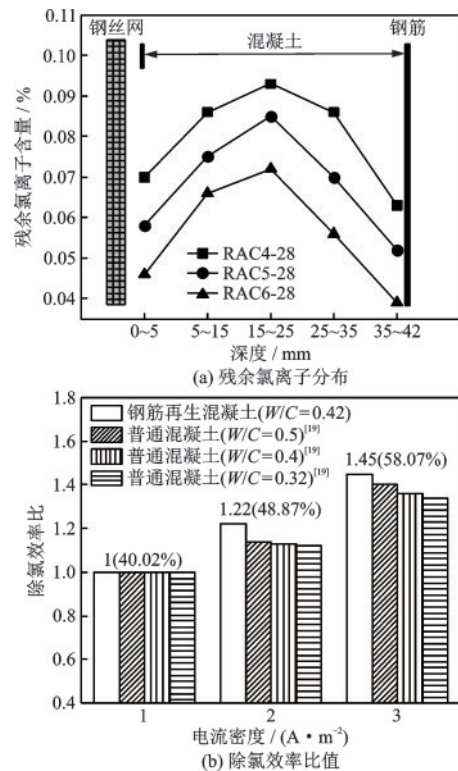


图5 电流密度对除氯效率的影响

Fig.5 Effects of current density on chloride extraction efficiency

图5(a)为不同电流密度下再生混凝土内部残余氯离子含量的分布。可知混凝土表层和钢筋附近残余氯离子含量要低于15~25 mm深度处。

图5(b)为以再生混凝土和普通混凝土^[19]通电电流密度为1 A/m²时的除氯效率为基准,在不同电流密度下各个水灰比组的除氯效率比值。随着电流密度增大,再生混凝土和普通混凝土^[19]除氯效率都增加,再生混凝土3 A/m²电流密度的除氯效率为58.07%,是1 A/m²的1.45倍,2 A/m²电流密度的除氯效率为48.87%,是1 A/m²的1.22倍。随着电流

密度的升高,电场作用力增强,氯离子迁移加快,故再生混凝土和普通混凝土的除氯效率增加。

对比普通混凝土可知:(1)随着水灰比的增加,普通混凝土除氯效率增加。这是因为随着水灰比的增大,普通混凝土的孔隙率增加,故除氯效率也增大;(2)电流密度从 1 A/m^2 增大到 2 A/m^2 ,再生混凝土的除氯效率比值均大于普通混凝土^[19],这说明随着电流密度的增加,再生混凝土的除氯效率增幅大于普通混凝土。再生混凝土的水灰比小于普通混凝土0.5的水灰比,但除氯效率增幅大于普通混凝土,这可能是由于再生混凝土孔隙率更高,电流密度增加时,再生混凝土能比普通混凝土排出更多的氯离子,除氯效率增幅也更明显。从图5还可以看出,电流密度从 1 A/m^2 增大到 3 A/m^2 ,再生混凝土相对于普通混凝土的除氯效率增幅没有从 1 A/m^2 增大到 2 A/m^2 的增幅大。

2.4 除氯时间的影响

图6为不同电化学除氯时间下钢筋混凝土除氯效率,本组试件的再生骨料粒径范围和取代率分别为 $5\sim 20\text{ mm}$ 和 20% ,通电电流密度为 2 A/m^2 。该批试件内部初始氯离子含量为 0.133% 。

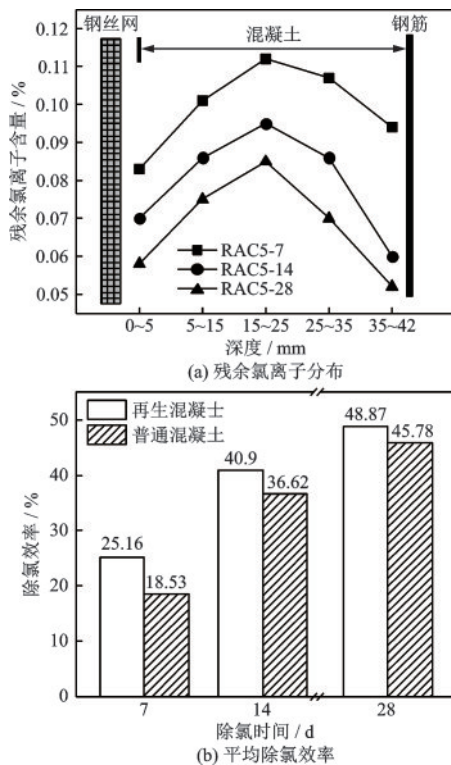


图6 除氯时间对除氯效率的影响

Fig.6 Effects of chloride extraction duration on chloride extraction efficiency

图6(a)为不同除氯时间下再生混凝土各深度范围残余氯离子含量分布,如图所示中间区域的残余氯离子含量要高于两边,且除氯时间从7 d增加到14 d,残余氯离子含量下降的幅度大于从14 d增加到28 d的幅度。钢筋附近残余氯离子含量因电化学除氯的进行持续降低,向外迁移的氯离子减少,故钢筋附近残余氯离子含量下降的幅度减小。其他深度范围的残余氯离子含量下降趋势也如此,但钢筋附近的趋势更明显,这是因为,钢筋附近氯离子受到的电场力更大,迁出的氯离子更多,且钢筋附近的氯离子在向外迁移的过程中滞留了部分氯离子在其他区域,减缓了其他区域残余氯离子含量下降的速度。

不同除氯时间下的普通混凝土和再生混凝土平均除氯效率如图6(b)所示。由图可知随着除氯时间越长,钢筋再生混凝土除氯效率增加,但增加幅度减小,这是因为随着除氯时间的增加,残余氯离子含量持续降低,故除氯效率增加。而残余氯离子含量降低,除氯过程中排出的氯离子减少,单位时间内的除氯效率会降低^[11],导致除氯时间延长除氯效率增幅降低。

相较于普通混凝土,再生混凝土前期的除氯效率占比更大,普通混凝土除氯7 d时除氯效率占28 d的40%,再生混凝土除氯7 d时除氯效率占28 d的51%。这是因为再生混凝土孔隙率比较大^[6],氯离子排出更快。而试件内部的氯离子含量是恒定的,则后期氯离子排出速度降低,故再生混凝土前期的除氯效率占比更高。

2.5 除氯效率敏感性分析

以RAC1-20为基准组,使用单因素敏感性分析方法对再生混凝土除氯效率进行敏感性分析。分析骨料粒径、再生骨料取代率、除氯电流密度和除氯时间等因素在各自的取值范围发生幅度相同的变动时,除氯效率变化的情况,得出敏感性系数。敏感性系数越大则除氯效率对该影响因素越敏感。

$$a_i = \frac{x_i - x_{i0}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式中, a_i 为不确定因素在其相对变化范围内的变化率; x_i 为因素的各级水平; x_{i0} 为因素所设定的基准值; x_{\max} 与 x_{\min} 为因素在其范围内的最大值和最小值。

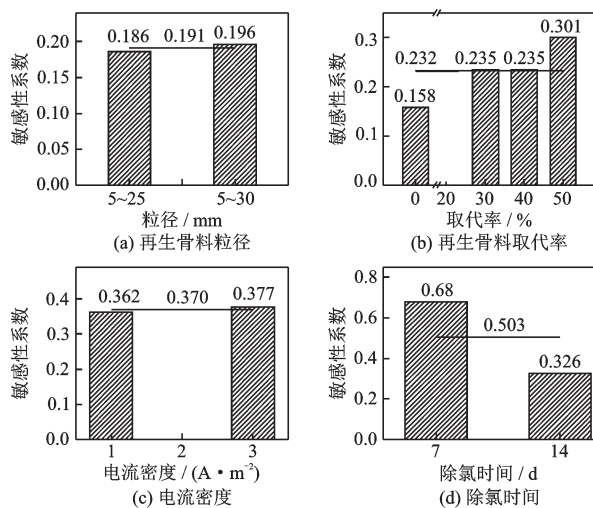
$$b_i = \frac{F(x_i) - F(x_{i0})}{F(x_{i0})} \quad (2)$$

式中, b_i 为不确定因素发生变化时响应值的变化率; $F(x_i)$ 为在第 i 级因素水平时的响应值; $F(x_{i_0})$ 是因素为基准值时的响应值。

敏感性系数 η_i 表示为:

$$\eta_i = \frac{b_i}{a_i} \quad (3)$$

图 7(a)、(c) 敏感系数变化不大, 说明再生骨料粒径和电流密度的变化对除氯效率的影响是线性的。图 7(b) 中敏感性系数增大, 可知随着再生骨料取代率的增加, 对除氯效率的影响也越来越大。从图 7(d) 中敏感性系数减小可知, 除氯时间增加, 其对除氯效率的影响减小。从平均敏感系数可以看出, 在本实验中对除氯效率的影响大小: 除氯时间 > 电流密度 > 再生骨料取代率 > 再生骨料粒径。



注: 阴影柱为敏感性系数; 横线为敏感性系数平均值

图 7 敏感性系数

Fig.7 Sensitivity coefficient

3 结论

(1) 钢筋再生混凝土残余氯离子含量沿混凝土表面到钢筋附近呈凸型分布。钢筋再生混凝土除氯效率受再生骨料粒径的影响, 采用 5~25 mm 再生粗骨料粒径范围的钢筋再生混凝土电化学除氯效率是 5~30 mm 粒径范围钢筋再生混凝土的 1.36 倍。

(2) 随再生粗骨料取代率增加, 电化学除氯效率增大, 取代率达 50% 时, 钢筋再生混凝土除氯效率较普通混凝土提高约 26%。

(3) 随通电电流密度增大, 再生混凝土除氯效率增大, 相较 1 A/m², 电流密度 3 A/m² 时的电化学除氯效率是其 1.45 倍, 电流密度从 1 A/m² 增大到 2 A/m², 再生混凝土除氯效率增幅比普通混凝土更明显。

(4) 随除氯时间延长, 再生混凝土除氯效率明显增大, 但增加幅度减小, 相对普通混凝土, 再生混凝土前期除氯效率占比更高, 7 d 除氯效率是 28 d 的 51%。

(5) 在本试验中, 由敏感性分析得到对再生混凝土除氯效率的影响大小: 除氯时间 > 电流密度 > 再生骨料取代率 > 再生骨料粒径。

参考文献:

- [1] 姚彤. 建筑垃圾资源化利用规划策略研究—以北京朝阳区为例[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
Yao T. Study on planning strategy of construction waste resource utilization-taking Chaoyang district of Beijing as an example[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021. (in Chinese)
- [2] 曹万林, 肖建庄, 叶涛萍, 等. 钢筋再生混凝土结构研究进展及其工程应用[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 1-16.
Cao W L, Xiao J Z, Ye T P, et al. Research progress and engineering application of reinforced recycled aggregate concrete structure [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12): 1-16. (in Chinese)
- [3] 陈宗平, 周济, 王成, 等. 高温后型钢再生混凝土界面黏结性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(6): 1145-1156.
Chen Z P, Zhou J, Wang C, et al. Experimental research on bond-slip behavior between shape steel and recycled coarse aggregate concrete after elevated high temperatures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1145-1156. (in Chinese)
- [4] Kurad R, Silvestre J D, De Brito J, et al. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166(10): 485-502.
- [5] Otsuki N, Miyazato S I, Yodsudjai W. Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,

- 2003, 15(5): 443-451.
- [6] 陈春红,刘荣桂,朱平华,等.黏附砂浆含量对再生混凝土抗氯离子侵蚀性能影响[J].建筑材料学报,2021,24(6):1216-1223.
Chen C H, Liu R G, Zhu P H, et al. Effect of attached mortar content on chloride ion erosion resistance of recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1216-1223. (in Chinese)
- [7] Gómez-Soberón J. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate-an experimental study [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(8): 1301-1311.
- [8] 张剑波,吴勇生,孙可伟,等.再生骨料混凝土孔隙结构的试验研究[J].硅酸盐通报,2011,30(1):239-244.
Zhang J B, Wu Y S, Sun K W, et al. Experiment and study on pore structure of recycled aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30(1): 239-244. (in Chinese)
- [9] 周建强,毛江鸿,宋鑫,等.某跨海大桥混凝土氯离子超限的诊断与处置[J].桥梁建设,2021,51(1):136-141.
Zhou J Q, Mao J H, Song X, et al. Diagnosis and treatment of excessive chloride ion in concrete of a sea-crossing bridge[J]. Bridge Construction, 2021, 51(1): 136-141. (in Chinese)
- [10] Castellote M, Andrade C, Alonso C. Electrochemical removal of chlorides[J]. Cement & Concrete Research, 2000, 30(4): 615-621.
- [11] Liu Q F, Xia J, Easterbrook D, et al. Three-phase modelling of electrochemical chloride removal from corroded steel-reinforced concrete [J]. Construction & Building Materials, 2014, 70(6): 410-427.
- [12] 屈锋,侯海龙,胡松,等.冻融循环作用后钢筋混凝土电化学除氯效果研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(2):347-353.
Qu F, Hou H L, Hu S, et al. Study on electrochemical chloride extraction effect of reinforced concrete after freeze-thaw cycle [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 347-353. (in Chinese)
- [13] 蔡栋兴,毕文彦,管学茂.粗骨料对混凝土氯离子扩散影响的模拟与试验[J].建筑材料学报,2023,26(4):383-388.
Cai D X, Bi W Y, Guan X M. Simulation and experiments of the effect of coarse aggregates on the diffusion of chloride ions in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(4): 383-388. (in Chinese).
- [14] Cheng X, Xia J, Wang W, et al. Numerical modeling of the effect of concrete porosity evolution on electrochemical chloride removal from concrete structures[J]. Construction and Building Materials, 2021, 267(1): 0-11.
- [15] 混凝土用再生粗骨料:GB/T 25177—2010[S].北京:中国质检出版社,2011.
- [16] 混凝土中氯离子含量检测技术规程:JGJ/T322—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [17] 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 feature during electrochemical chloride extraction under different electric field direction. Building Science, 2018, 34(1): 38-43. (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] 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)

(本文编辑:池营营)