

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240208001

# 电化学除氯后碳化再生混凝土钢筋锈蚀状态评价\*

何昱皞, 屈 锋, 石卫华, 王功勋, 黄 博, 侯海龙

(湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 再生混凝土结构是实现绿色低碳建设工程的应用方向之一,但在实际环境条件下碳化和氯盐共同侵蚀可能是影响结构耐久性的重要因素。通过测试锈蚀电位和电阻率,研究电化学除氯前后掺合料、骨料、碳化时间、电化学参数对碳化再生混凝土(carbonized recycled aggregate concrete, CRAC)钢筋锈蚀状态的影响规律,建立电阻率模型,对氯盐侵蚀环境下CRAC电化学修复后钢筋锈蚀状态进行定量评价。结果表明:对比普通混凝土(NAC),电化学除氯后CRAC总体上呈现锈蚀风险更低的趋势。电化学除氯后,粉煤灰掺量10%时CRAC钢筋锈蚀状态最好;再生粗骨料品质和取代率的提升能改善钢筋的锈蚀状态,取代率100%时锈蚀电位比天然混凝土高85%;碳化时间延长、除氯时间增加、电流密度增大均能增强CRAC钢筋的抗锈蚀能力,锈蚀风险均低于10%。根据试验测得的电阻率,考虑再生粗骨料取代率、电化学参数等因素,建立CRAC电化学修复后的电阻率模型,模型值与试验值误差为-8.73%~5.35%,为电化学除氯后CRAC的钢筋锈蚀状态预测评价提供了理论依据。

**关键词:** 再生混凝土; 碳化; 氯盐侵蚀; 锈蚀状态; 电化学除氯

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0620-10

## Evaluation of Corrosion Status of Steel Bars in Carbonated Recycled Aggregate Concrete after Electrochemical Chloride Extraction

HE Yuhao, QU Feng, SHI Weihua, WANG Gongxun, HUANG Bo, HOU Hailong  
(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Recycled aggregate concrete (RAC) structures are one of the approaches to achieving green and low-carbon construction. The combined erosion of carbonation and chloride salts under actual environmental conditions is an important factor that may affect structural durability. This study investigated the influence of admixture, aggregate, carbonation time, and electrochemical parameters on the corrosion status of steel bars in carbonized recycled aggregate concrete (CRAC) before and after electrochemical chloride extraction, by testing corrosion potential and resistivity. A resistivity model was established to quantitatively evaluate the corrosion status of CRAC steel bars after electrochemical repair under chloride salt erosion. The results indicated that compared with normal aggregate concrete (NAC), CRAC after electrochemical chloride extraction generally exhibited a lower corrosion risk. After electrochemical chloride extraction, the corrosion status of CRAC steel bars was optimal when

\* 收稿日期:2024-02-08;修回日期:2024-03-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51678234)、湖南省教育厅科研项目(18C0324;19A164;22B0473)资助

作者简介:何昱皞(2001—),男,硕士研究生。主要从事混凝土结构耐久性及高性能混凝土研究。

E-mail: 1569143303@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及高性能混凝土研究。E-mail:qfkd1015@126.com

10% fly ash was added. Improving the quality and substitution rate of recycled coarse aggregates enhanced the corrosion resistance of steel bars. When the substitution rate reached 100%, the corrosion potential was 85% more positive than that of natural concrete. Prolonging carbonation time, increasing dechlorination time, and raising current density all enhanced the corrosion resistance of CRAC steel bars, with corrosion risk remaining below 10%. Based on the experimentally measured resistivity and considering factors such as the replacement rate of recycled coarse aggregates and electrochemical parameters, a resistivity model of CRAC after electrochemical repair was established. The error between the model values and experimental values ranged from -8.73% to 5.35%. The model provides a theoretical basis for predicting and evaluating the corrosion status of steel bars in CRAC after electrochemical chloride extraction.

**Keywords:** recycled aggregate concrete; carbonation; chloride erosion; corrosion status; electrochemical chloride extraction

## 0 引言

为解决混凝土生产导致天然砂石资源短缺和生态环境破坏的问题,可将建筑垃圾处理制成再生骨料<sup>[1]</sup>,以代替天然骨料。钢筋锈蚀是影响混凝土结构耐久性的重要因素,实际应用中,碳化和氯离子是造成混凝土内钢筋锈蚀的主要原因<sup>[2-3]</sup>。氯离子与CO<sub>2</sub>渗透至再生混凝土内部,氯离子与混凝土中水化铝酸钙等水化产物反应,生成氯铝酸钙、钙矾石和弗雷德尔盐等产物而体积膨胀,并与碳化耦合作用降低混凝土内部碱性,最终破坏钢筋钝化膜,形成微电池造成锈蚀<sup>[4]</sup>。

与普通混凝土相比,再生混凝土存在密度低、吸水率高和孔隙率大等问题,更容易受到自由态氯离子侵蚀<sup>[5]</sup>。通过测试钢筋锈蚀电位和电阻率,能在无损的前提下检测混凝土结构钢筋锈蚀状态<sup>[6]</sup>。钢筋锈蚀状态与离子扩散速度有关<sup>[7]</sup>。潘艺倩等<sup>[8]</sup>发现,氯离子在再生混凝土界面过渡区处的传输速率远远快于普通混凝土;混凝土碳化后,CaCO<sub>3</sub>会填充内部空隙,但也会分解Friedel盐并释放结合氯离子,对氯离子渗透性产生不同程度的影响<sup>[9]</sup>。钢筋锈蚀状态还受更多因素影响,如矿物掺合料,张琨等<sup>[10]</sup>研究发现硅灰、粉煤灰和矿渣的掺入都会使混凝土试件中的氯离子迁移和分布发生变化。研究与实践发现,电化学除氯技术通过混凝土浸泡电解液外接电流产生的电化学反应去除内部氯离子,能有效地提高混凝土耐久性、使钢筋恢复钝化、降低钢筋锈蚀风险<sup>[11-13]</sup>。但其除氯效果与混凝土内氯离子渗透系数有关<sup>[14]</sup>,可能受再生骨料品质<sup>[15]</sup>、电化

学参数、碳化程度和掺合料<sup>[16-18]</sup>等多种因素影响。

目前,关于钢筋锈蚀状态的单因素影响研究较多,但针对碳化和氯离子共同侵蚀的钢筋锈蚀状态研究尚需进一步探究。本文通过快速碳化试验和电化学除氯试验,研究掺合料、再生粗骨料、碳化时间、电化学参数对碳化再生混凝土钢筋锈蚀状态的影响规律,对比其与普通混凝土的差异,建立碳化再生混凝土电化学修复后的电阻率评价模型,为碳化再生混凝土耐久性和修复评价研究提供理论参考。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

采用P.O42.5普通硅酸盐水泥,水泥技术指标见表1;粉煤灰密度为2.55 g/cm<sup>3</sup>,堆积密度1.12 g/cm<sup>3</sup>,细度16%;细集料取自湘江,细度模数2.7;天然粗骨料(NA)为湘乡碎石,再生粗骨料是实验室废弃混凝土进行破碎、筛分制得,粗骨料物理指标见表2,其中再生粗骨料依据《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177-2010)标准<sup>[19]</sup>,RA1、RA2和RA3分别满足再生粗骨料I类、II类和III类。电化学除氯试件采用钢筋为湘潭钢铁集团有限公司生产的直径为16 mm的HRB400螺纹钢;混凝土NaCl采用纯度大于96%的工业盐;饱和Ca(OH)<sub>2</sub>电解质溶液采用CaO分析纯配制;试验用水为自来水,相较于天然粗骨料,再生粗骨料吸水率较高,所以加入附加水用于控制混凝土水灰比<sup>[20]</sup>。

表1 水泥技术指标

Table 1 Technical specifications of cement

标准稠度用水量/%	细度(45 μm方孔筛余量)/%	初凝时间/min	终凝时间/min	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
				3 d	28 d	3 d	28 d
27.1	6.0	120	200	4.1	6.3	23.5	54.1

表2 粗骨料物理指标

Table 2 Physical properties of coarse aggregate

项目	天然粗骨料(NA)	再生粗骨料					
		I类(RA1)		II类(RA2)		III类(RA3)	
		标准	实测	标准	实测	标准	实测
粒径/mm	5~20	—	5~20	—	5~20	—	5~20
吸水率/%	0.72	<3.0	1.48	<5.0	3.93	<8.0	5.74
压碎指标/%	9.0	<12	10.7	<20	17.2	<30	22.5
表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 650	>2 450	2 590	>2 350	2 398	>2 250	2 361
空隙率/%	40	<47	43.2	<50	45.7	<53	49.2
粘附砂浆含量/%	—	—	19.6	—	33.4	—	44.8

## 1.2 配合比设计

为模拟实际工况开展电化学除氯试验,研究矿物掺合料、再生粗骨料取代率、再生粗骨料品质和电

化学参数对碳化再生混凝土经电化学除氯后钢筋锈蚀状态的影响,掺入3%胶凝材料质量的工业盐引入氯离子,模拟混凝土结构使用中受氯盐侵蚀状态,试验设计13种配合比及所对应的抗压强度见表3。

表3 混凝土配合比及抗压强度

Table 3 Concrete mix ratio and compressive strength

编号	材料/(kg·m <sup>-3</sup> )								抗压强度/MPa
	水泥	细骨料	天然粗骨料	再生粗骨料	粉煤灰	水	附加水	NaCl	
NAC0	394	578	1 292	0	0	171	0.0	11.82	43.2
RAC1	394	578	969	323	0	171	6.1	11.82	39.2
RAC2	394	578	646	646	0	171	12.1	11.82	33.8
RAC3	394	578	323	969	0	171	18.2	11.82	31.4
RAC4	394	578	0	1 292	0	171	24.3	11.82	29.1
RAC5	394	578	969	323	0	171	12.7	11.82	32.9
RAC6	394	578	969	323	0	171	18.5	11.82	30.5
NAC1	355	578	1 292	0	39	171	0.0	11.82	38.1
NAC2	315	578	1 292	0	79	171	0.0	11.82	41.3
NAC3	276	578	1 292	0	118	171	0.0	11.82	40.0
RAC11	355	578	969	323	39	171	6.1	11.82	38.6
RAC12	315	578	969	323	79	171	6.1	11.82	36.6
RAC13	276	578	969	323	118	171	6.1	11.82	33.9

## 1.3 试件制作

电化学除氯试验采用(100×100×400) mm棱柱体试块,在轴心位置埋入长350 mm、直径16 mm的螺纹钢筋,混凝土抗压强度试验采用100 mm立方体试块。

## 1.4 试验方法

### 1.4.1 快速碳化试验

碳化试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法》(GB/T 50082-2009)<sup>[21]</sup>,使用碳化箱对再生混凝土进行碳化试验,由于混凝土碳化14 d

后碳化深度和界面过渡区宽度变化速率均减小,对微观结构改变作用减弱<sup>[17]</sup>,NAC0和RAC1组试件分别经7、14、和28 d碳化试验,其他试件经14 d碳化试验。达到碳化时间将各试件取出,沿碳化面中线劈开,喷洒浓度为1%的酒精酚酞溶液测试其碳化深度。

#### 1.4.2 钢筋锈蚀状态试验

依据《公路桥梁承载力检测评定规程》(JTGT J21-2011)<sup>[22]</sup>采用半电池电位法和四电极阻抗测试法测试钢筋锈蚀状态。使用钢筋锈蚀仪和混凝土电阻率测定仪,对每个试件在除氯前后测试锈蚀电位和电阻率,并对测试结果进行评定。四电极阻抗测试法中,对所测试件设置四个电极,外侧两个电极充当电流极,内侧的两个电极充当电压极。

#### 1.4.3 电化学除氯试验

各组试件经设计龄期快速碳化试验后,采用自制除氯装置对其进行除氯试验。试验中混凝土中的钢筋作为阴极,混凝土表面的不锈钢网作为阳极,并将混凝土试件表面浸泡在Ca(OH)<sub>2</sub>电解液中,与外界直流电源相连,如图1所示。大量试验表明,混凝土随着电化学除氯时间增加除氯效果变好,28 d时除氯效果较好,且时间继续延长效果提升并不明显<sup>[11-12]</sup>,所以其中经碳化14 d的NAC0、RAC1组试件分别除氯试验7、14和28 d,其他组试件经28 d除氯试验。RAC1组经碳化14 d除氯28 d的编号为RAC1-14-28。

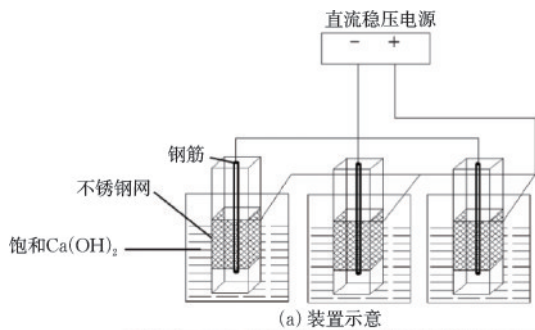


图1 电化学除氯装置

Fig.1 Electrochemical chloride extraction unit

## 2 再生混凝土钢筋锈蚀状态分析

### 2.1 碳化时间的影响

图2为测得不同碳化时间下NAC和RAC组在电化学除氯前后钢筋的锈蚀指标。由图2(a)和(b)可知,除氯后NAC和RAC组锈蚀电位均随碳化时间的延长而增大,碳化28 d时锈蚀电位增长90.6%,电阻率随碳化时间的延长而减小,碳化再生混凝土各组与碳化普通混凝土各组相比锈蚀电位更高,电阻率略低。

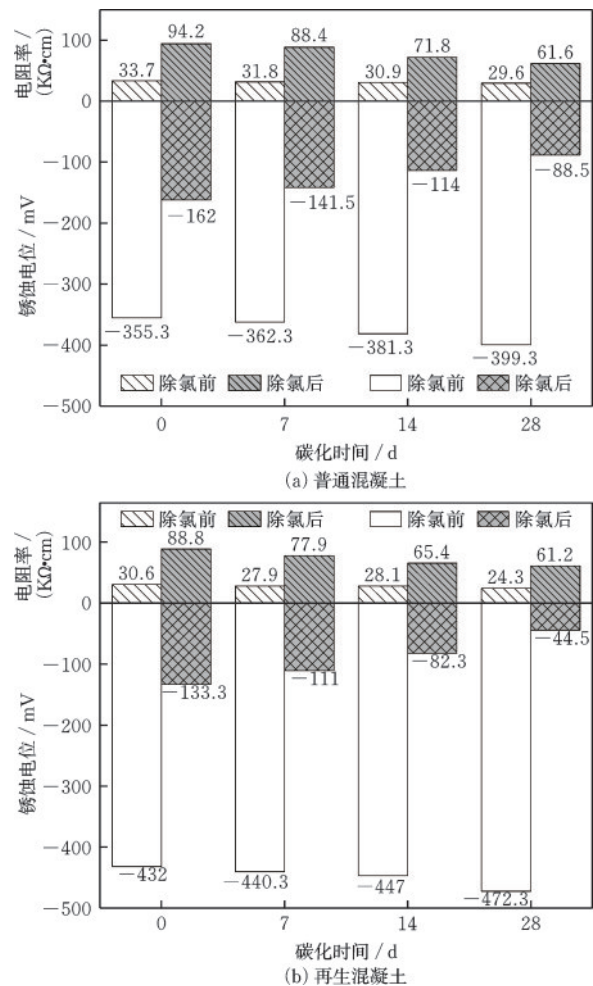


图2 不同碳化时间钢筋锈蚀指标

Fig.2 Corrosion indicators of steel bars with different carbonation time

受碳化时间延长的影响,CO<sub>2</sub>渗透混凝土程度越深,产生的CaCO<sub>3</sub>膨胀以及C-S-H凝胶和板状Ca(OH)<sub>2</sub>消失,使混凝土内部出现孔隙连通现象或微裂纹的可能性增大<sup>[9]</sup>,在电化学除氯作用下,自由氯离子向外渗透增多,使钢筋恢复钝化,锈蚀电位

增大。另外,再生骨料相比天然骨料存在更多微裂纹,提高了碳化再生混凝土的孔隙率<sup>[17]</sup>,使电阻率小于普通混凝土。

### 2.2 粉煤灰掺合料的影响

图3为测得不同粉煤灰掺量下NAC和RAC组在电化学除氯前后钢筋的锈蚀指标。由图3(a)和(b)可知,除氯后,混凝土锈蚀电位增大,碳化普通混凝土除氯后相比除氯前锈蚀电位增量为70.1%、43.8%、29.0%、60.0%,碳化再生混凝土增量分别为81.6%、91.3%、69.7%、78.1%,随着粉煤灰掺量的增加,出现先劣化再优化的现象,在10%掺量时碳化再生混凝土的修复效果最好。一方面,C-S-H凝胶能结合混凝土内部的自由氯离子,随着混凝土骨料中粉煤灰掺量的增加,粉煤灰与Ca(OH)<sub>2</sub>反应生成的C-S-H凝胶增加,结合自由氯离子的能力增强,钢筋锈蚀风险减小,锈蚀电位增大;另一方面粉

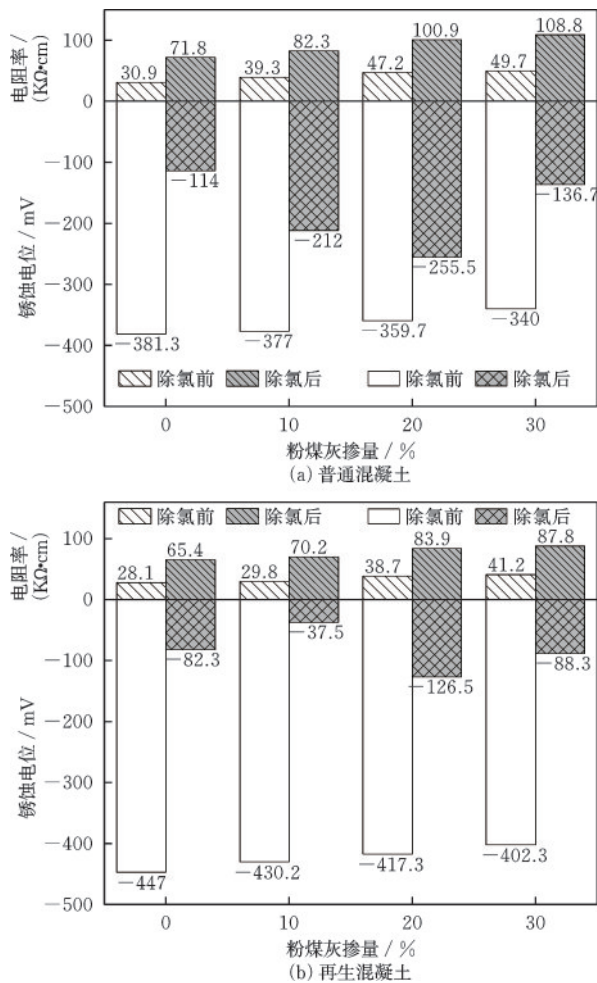


图3 不同粉煤灰掺量混凝土钢筋锈蚀指标  
Fig.3 Corrosion indicators of steel bars with different fly ash dosages

煤灰的掺入能改善混凝土内部结构,增大电阻率,降低除氯效率,导致锈蚀电位增值减少<sup>[18]</sup>。随着粉煤灰掺量的增加两种因素所占的主导作用随之变化,导致出现该现象。

由图3(a)和(b)还可知,随着粉煤灰掺量的增加,混凝土电阻率值在除氯前都后有所提升,但都位于20~199 kΩ·cm之间,锈蚀风险降低不明显。电阻率的增大是因为混凝土中粉煤灰的掺入,自身和其二次水化产生的C-S-H等凝胶物质填充了内部的孔隙<sup>[10]</sup>,使混凝土孔隙率减小,密实度增加,电阻率随之增大。

### 2.3 再生粗骨料取代率的影响

图4为测得不同再生粗骨料取代率下RAC组在电化学除氯前后钢筋的锈蚀指标。由图4(a)可知,随着再生粗骨料取代率增大,碳化再生混凝土在除氯前锈蚀电位略减,除氯后锈蚀电位逐渐增

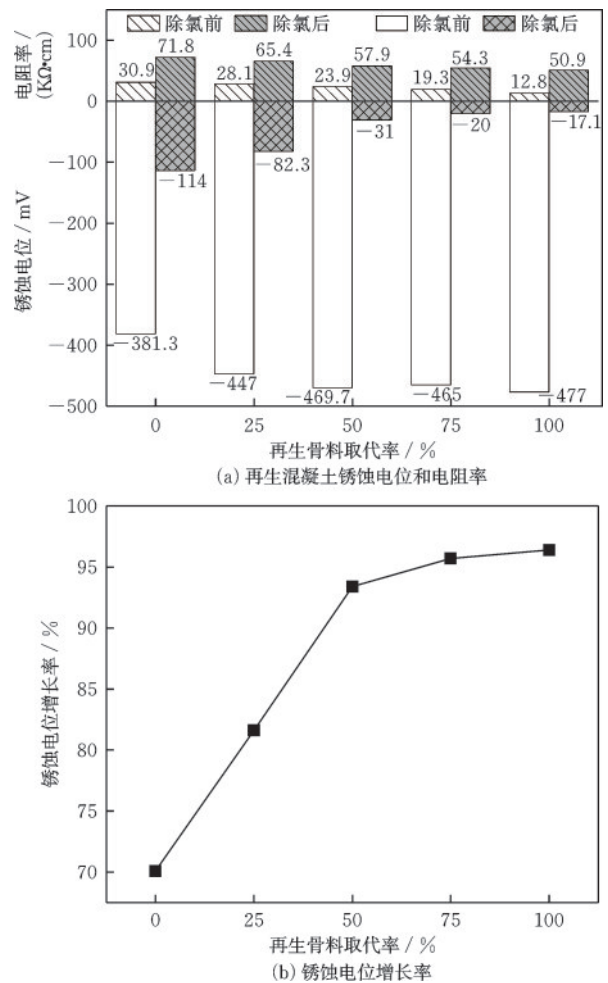


图4 不同再生粗骨料取代率钢筋锈蚀指标  
Fig.4 Corrosion indicators of steel bars with different recycled coarse aggregate replacement rates

大, 锈蚀风险降至 10% 以下。由图 4(b) 可知, 随着再生粗骨料取代率增大, 碳化再生混凝土除氯后锈蚀电位增幅减小, 由 11.5% 下降至 0.7%, 取代率 100% 时锈蚀电位比天然混凝土高 85%, 再生混凝土电阻率随再生粗骨料取代率的增加略微减小。

除氯前, 随着再生粗骨料取代率的提高, 再生混凝土中孔隙率增大, 氯离子更易渗透进入混凝土内部, 导致钢筋发生锈蚀<sup>[8]</sup>, 并降低锈蚀电位。而除氯后, 再生粗骨料的高孔隙率会提供更多的氯离子传输通道, 取代率的增大提供了更多的离子传输通道, 取代率越高, 钢筋钝化速度越快<sup>[13]</sup>, 钢筋锈蚀电位越高。电阻率降低, 是因为再生粗骨料表面有大量黏附砂浆, 界面过渡区和孔隙率大, 密度比天然骨料低<sup>[23]</sup>。

### 2.4 再生粗骨料品质的影响

图 5 为测得不同再生粗骨料品质下 RAC 组在除氯作用前后钢筋的锈蚀指标, 图中横坐标 0-4 分别对应 NA 和 RA1-3。图 6 为再生混凝土界面微观示意图。由图 5 可知, 随着再生粗骨料品质的降低, 粘附砂浆含量增多, 其锈蚀电位与电阻率变化规律与不同再生粗骨料取代率影响相似, 锈蚀电位逐渐增大, 由 -82.3 mV 增长至 -27 mV, 电阻率降低。

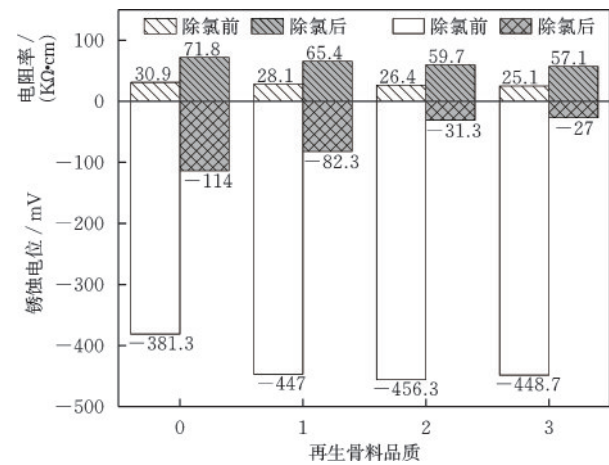


图 5 不同再生粗骨料品质钢筋锈蚀指标

Fig.5 Corrosion indicators of steel bars with recycled coarse aggregates of different quality

如图 6 所示, 再生粗骨料存在多重界面过渡区。粗骨料的品质降低, 骨料表面黏附的旧砂浆增多、内部裂缝增多, 使混凝土内部界面过渡区的接触面和孔隙率增大, 提供更多离子传输通道<sup>[23-24]</sup>, 一定程度上提高了电化学除氯效率, 钢筋恢复钝化效果更好, 增大了锈蚀电位。

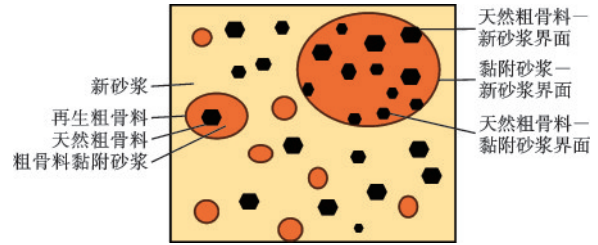


图 6 再生混凝土界面微观示意

Fig.6 Schematic diagram of the recycled aggregate concrete interface at the microscale

### 2.5 除氯时间的影响

图 7 为测得不同除氯时间下 NAC 和 RAC 组在除氯作用前后钢筋的锈蚀指标。由图 7(a) 和 (b) 可知, NAC 组和 RAC 组随着电化学除氯时间的增加, 除氯后的锈蚀电位增加幅度较大, 电阻率略增。除氯前, 碳化再生混凝土锈蚀电位均低于碳化普通混凝土, 但电化学除氯后, 碳化再生混凝土锈蚀电

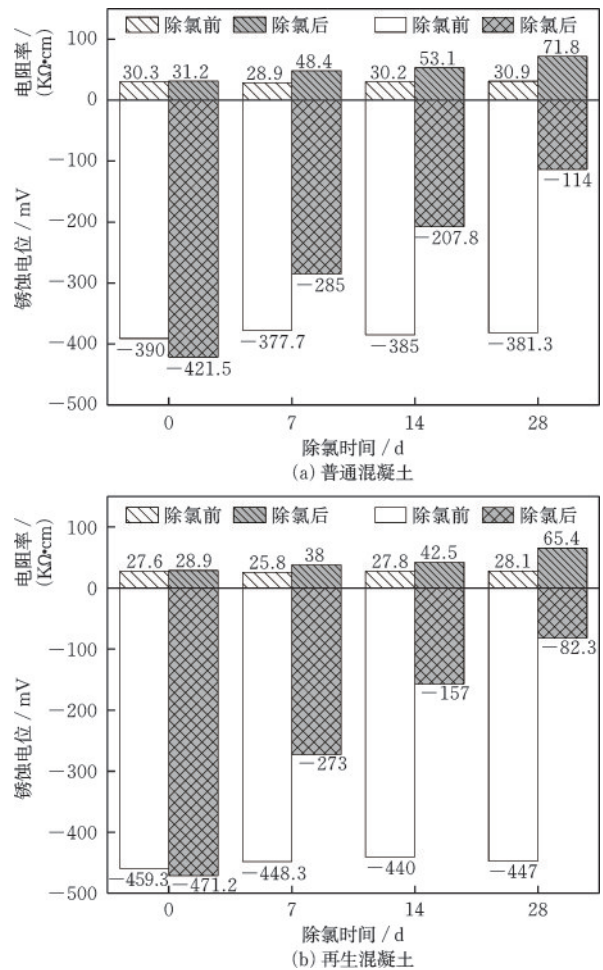


图 7 不同除氯时间钢筋锈蚀指标

Fig.7 Corrosion indicators of steel bars with different dechlorination time

位要高于碳化普通混凝土。除氯时间达到 14 d 时, NAC 组锈蚀电位略低于  $-200$  mV, 锈蚀风险接近 10%, 而 RAC 组锈蚀风险已低于 10%。除氯时间达到 28 d, 两组混凝土锈蚀电位仍有较大程度的增加。电阻率随着除氯时间的增加而增加, 但均处于 20~199  $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$  区间。

锈蚀电位增大是因为随着电化学除氯时间的延长, 混凝土内部残留的氯离子持续向外扩散, 进一步降低钢筋附近碱度<sup>[14]</sup>。电阻率增大反映出混凝土结构内部孔隙率随着除氯时间的延长逐渐增大<sup>[25]</sup>, 因为  $\text{Ca}^{+}$  等聚集在混凝土中外层, 析出的  $\text{CaCO}_3$  等晶体填充混凝土孔隙。此外, 随着除氯时间延长, 混凝土中可能有未水化的水泥继续发生水化反应, 产生水化产物增加混凝土的密实性<sup>[13]</sup>。

### 2.6 电流密度的影响

图 8 为测得不同电流密度下 NAC 和 RAC 组在除氯作用前后钢筋的锈蚀指标。由图 8 可知, 电化学除氯处理时, 普通混凝土和再生混凝土随着电流密度的增大, 锈蚀电位以及电阻率均逐渐增大, 锈蚀电位在  $-200$  mV 以上, 锈蚀风险低于 10%。

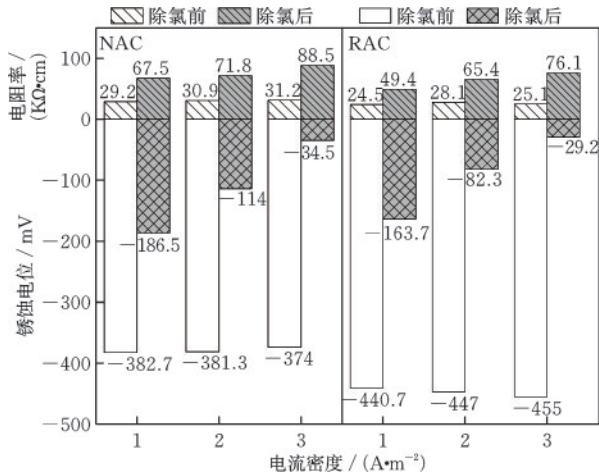


图 8 不同电流密度下钢筋的锈蚀指标

Fig.8 Corrosion indicators of steel bars with different current densities

氯离子可以在电场的驱动力下通过孔隙转移到混凝土外部, 随着电流密度的增加, 对氯离子驱动力增强, 除氯效率变高, 使钢筋钝化效果更好更迅速<sup>[16]</sup>, 锈蚀电位增大, 锈蚀风险更低。电流密度的增大加快了混凝土内部离子传输速度, 生成更多难溶的  $\text{CaCO}_3$  等产物<sup>[13]</sup>, 所以电流密度越大混凝土电阻率增加越大。

## 3 碳化再生混凝土电阻率敏感性分析

通过单因素敏感性分析法<sup>[26]</sup>, 电阻率  $F$  可以作为不同影响因素  $X_n$  的函数, 即

$$F = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

式中,  $X_1$  为再生粗骨料品质;  $X_2$  为再生粗骨料取代率;  $X_3$  为粉煤灰掺量;  $X_4$  为电流密度;  $X_5$  为除氯时间。

单因素敏感性分析通过比较各因素和电阻率的相对变化率来进行衡量, 即第  $n$  个影响因素的敏感度  $E_n$  为

$$E_n = \left| \frac{\Delta P_n}{P_n} \right| / \left| \frac{\Delta X_n}{X_n} \right| \quad (2)$$

式中,  $\left| \frac{\Delta X_n}{X_n} \right|$  为影响因素的相对变化率;  $\left| \frac{\Delta P_n}{P_n} \right|$  为总除氯效率的相对变化率。

敏感性分析计算结果见表 6。可知: 再生粗骨料品质和再生粗骨料取代率的敏感性最大, 电化学参数中除氯时间敏感性更大, 这三个因素对除氯后再生混凝土电阻率的影响最大。

表 6 敏感性分析计算结果

Table 6 Sensitivity analysis calculation results

影响因素	编号	$\bar{E}_i / \%$
粉煤灰掺合料	RAC1(0%)	0.136
	RAC11(10%)	
	RAC12(20%)	
	RAC13(30%)	
再生粗骨料品质	RAC1(I)	0.305
	RAC5(II)	
	RAC6(III)	
再生粗骨料取代率	RAC1(25%)	0.236
	RAC2(50%)	
	RAC3(75%)	
	RAC4(100%)	
电流密度	RAC1(1A/m <sup>2</sup> )	0.249
	RAC1(2A/m <sup>2</sup> )	
	RAC1(3A/m <sup>2</sup> )	
除氯时间	RAC1(ECE7)	0.260
	RAC1(ECE14)	
	RAC1(ECE28)	

## 4 碳化再生混凝土电阻率预测模型

以再生粗骨料品质、粉煤灰掺量、碳化深度、电化学除氯时间和电流密度作为影响系数, 以再生粗

骨料取代率作为基础变量,经碳化14 d和除氯28 d的RAC1组为基准组,参考文献[25]中的珊瑚骨料混凝土电阻率计算公式。碳化再生混凝土除氯后的电阻率采用相同形式的计算公式,见式(3)。对碳化和氯离子耦合侵蚀情况下,碳化再生混凝土电化学除氯后钢筋锈蚀状态进行定量评价。

$$\rho_v = k_n [B_1(x_m)^3 + B_2(x_m)^2 + B_3(x_m) + B_0] \quad (3)$$

$$k_n = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 \quad (4)$$

式中, $\rho_v$ 是碳化再生混凝土的电阻率( $k\Omega \cdot cm$ ); $k_n$ 是各影响因素对碳化再生混凝土电阻率的影响系数; $x_m$ 是再生粗骨料取代率; $k_1 \sim k_5$ 分别是再生粗骨料品质、粉煤灰掺量、碳化深度、电化学除氯时间和电流密度对碳化再生混凝土电阻率的影响系数; $B_0 \sim B_3$ 是待定常数。

通过对不同再生粗骨料取代率的碳化再生混凝土电阻率试验值进行拟合分析,得出再生混凝土的电阻率模型,如式(5)所示。

$$\rho_1 = -39.46667x_m^3 + 90.4x_m^2 - 80.53333x_m + 80.5 \quad (5)$$

式中, $\rho_1$ 是不同再生粗骨料取代率的碳化再生混凝土电阻率。

以再生混凝土碳化深度经验预测模型为基础<sup>[27]</sup>(式(6)),计算不同碳化时间下各组与基准组电阻率的比值,建立拟合曲线,如式(7)所示。

$$x_c = (-0.024f_{cu,k} + 4.78)t^{0.34} \quad (6)$$

$$k_1 = 1.36098 - 0.01314x_c - 0.00203x_c^2 \quad (7)$$

式中, $x_c$ 为再生混凝土碳化深度(mm); $k_1$ 为碳化时间影响系数; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值(MPa); $t$ 为再生混凝土碳化时间(d)。

计算不同除氯时间下各组与基准组电阻率的比值,建立以除氯时间为自变量,电阻率比值为因变量的拟合曲线,如式(8)所示。

$$k_2 = 0.45345 + 0.01198x_1 + 0.000265x_1^2 \quad (8)$$

式中, $k_2$ 为电化学除氯时间影响系数; $x_1$ 为电化学除氯时间(d)。

计算不同再生粗骨料品质各组与基准组电阻率的比值,再生粗骨料品质受黏附砂浆含量的影响<sup>[23]</sup>,建立以再生粗骨料黏附砂浆含量为自变量,电阻率比值为因变量的拟合曲线,如式(9)所示。

$$k_3 = 1.2061 - 1.28585x_2 + 1.19562x_2^2 \quad (9)$$

式中, $k_3$ 为再生粗骨料品质影响系数; $x_2$ 为再生粗骨料黏附砂浆含量(%)。

计算不同粉煤灰掺量下各组与基准组电阻率的比值,建立以粉煤灰掺量为自变量,电阻率比值为因变量的拟合曲线,如式(10)所示。

$$k_4 = 0.9857 + 0.0134x_3 - 0.0000344x_3^2 \quad (10)$$

式中, $k_4$ 为粉煤灰掺量影响系数; $x_3$ 为粉煤灰掺量(%)。

计算不同除氯时间下各组与基准组电阻率的比值,建立以除氯时间为自变量,电阻率比值为因变量的拟合曲线,如式(11)所示。

$$k_5 = 0.43425 + 0.36239x_4 - 0.03976x_4^2 \quad (11)$$

式中, $k_5$ 为电化学除氯时间影响系数; $x_4$ 为电化学除氯电流密度( $A/m^2$ )。

综上所述即可得到除氯后,考虑除氯时间和电流密度、粉煤灰掺量、碳化时间、再生粗骨料取代率和再生粗骨料品质影响的碳化再生混凝土的电阻率预测模型,如式(12):

$$\rho_v = k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 (-39.46667x_m^3 + 90.4x_m^2 - 80.53333x_m + 80.5) \quad (12)$$

对模型值与试验值进行分析,并计算两者之间的误差以及变异系数见表7。其模型值与试验值误差在-8.73~5.35%之间,模型变异系数为3.85%,模型拟合误差小、离散性小,能对碳化再生混凝土经电化学除氯修复后的电阻率进行预测。

表7 模型误差和变异系数

Table 7 Model errors and coefficients of variation

组别	模型值	试验值	误差/%	模拟值和试验值比值R	平均值 $\bar{R}$	变异系数/%
RAC1-14-28	67.9	65.4	-3.70	1.038		
RAC2-14-28	60.1	57.9	-3.70	1.038		
RAC3-14-28	56.4	54.3	-3.70	1.038		
RAC4-14-28	52.9	50.9	-3.70	1.038		
RAC5-14-28	61.8	59.7	-3.40	1.035		
RAC6-14-28	59.1	57.1	-3.36	1.035		
RAC1-14-0	30.9	28.9	-6.47	1.069		
RAC1-14-7	37.5	38.0	1.34	0.987		
RAC1-14-14	45.9	42.5	-7.34	1.079		
RAC1-0-28	87.4	88.8	1.55	0.985	1.030	3.85
RAC1-7-28	73.9	77.9	5.35	0.949		
RAC1-28-28	58.8	61.2	4.00	0.962		
RAC11-14-28	76.9	70.2	-8.73	1.096		
RAC12-14-28	85.4	83.9	-1.79	1.018		
RAC13-14-28	93.5	87.8	-6.08	1.065		
RAC1-14-28 (1A/m <sup>2</sup> )	51.4	49.4	-3.90	1.041		
RAC1-14-28 (3A/m <sup>2</sup> )	79.0	76.1	-3.70	1.038		

## 5 结 论

通过试验探究了碳化再生混凝土电化除氯前后钢筋的锈蚀状态,主要结论如下:

(1) 掺加粉煤灰会影响碳化再生混凝土除氯后的钢筋锈蚀状态,当粉煤灰掺量在10%时,电化除氯的修复效果最好。再生粗骨料取代率的增加和品质增强能提升碳化再生混凝土的电化学修复效果,取代率100%时,修复效果最好,锈蚀电位比普通混凝土高85%。

(2) 碳化时间延长,在除氯前会对再生混凝土的锈蚀电位和电阻率产生不利影响,钢筋锈蚀风险增大,但除氯后混凝土内钢筋锈蚀状态改善显著,能有效提升碳化再生混凝土的耐久性,在碳化28d后进行除氯提升最大,锈蚀电位增长90.6%;电流密度增大和除氯时间延长都能更大程度降低混凝土内部钢筋的锈蚀风险。

(3) 根据试验测得再生混凝土的电阻率,考虑再生粗骨料取代率和品质、碳化时间、电化除氯时间等因素,建立了电化除氯后碳化再生混凝土的电阻率预测模型,模型值与试验值的误差在-8.73~5.35%之间。

### 参考文献:

- [1] 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)
- [2] Ming X, Cai Y, Li Z. Atomic scale insight into the mechanisms of chloride induced steel corrosion in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128811.
- [3] Ji Y, Wu M, Ding B, et al. The experimental investigation of width of semi-carbonation zone in carbonated concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 67-75.
- [4] Tian Y, Zhang G, Ye H, et al. Corrosion of steel rebar in concrete induced by chloride ions under natural envi-

ronments [J]. Construction and Building Materials, 2023, 369: 130504.

- [5] 李秋义,王忠星,岳公冰,等.氯盐侵蚀对再生混凝土多重界面显微结构的影响[J].硅酸盐通报,2017,36(1): 27-32.  
Li Q Y, Wang Z X, Yue G B, et al. Effect of chlorine salt erosion on multiple interface microstructure of recycled concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(1): 27-32. (in Chinese)
- [6] Li Z, Jin Z, Wang P, et al. Corrosion mechanism of reinforced bars inside concrete and relevant monitoring or detection apparatus: A review [J]. Construction and Building Materials, 2021, 279: 122432.
- [7] 许骋显,左晓宝,殷光吉.氯盐-硫酸盐环境下钢筋混凝土柱抗震性能退化过程的数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2021, 41(2): 376-384, 402.  
Xu P Y, Zuo X B, Yin G J. Numerical simulation on seismic performance deterioration of reinforced concrete columns subjected to chloride and sulfate attack [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(2): 376-384, 402. (in Chinese)
- [8] 潘艺倩,梁超锋,何智海,等.再生骨料混凝土抗氯离子渗透性能研究进展[J].硅酸盐通报,2018,37(2): 501-507.  
Pan Y Q, Liang C F, He Z H, et al. Research progress on the chloride permeability of recycled aggregate concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(2): 501-507. (in Chinese)
- [9] 元成方,牛荻涛,陈娜,等.碳化对混凝土微观结构的影响[J].硅酸盐通报,2013, 32(4): 687-691, 707.  
Yuan C F, Niu D T, Chen N, et al. Influence of carbonation on the microstructure of concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(4): 687-691, 707. (in Chinese)
- [10] 张琨,单炜,孙文博,等.不同因素对电化除氯处理后混凝土残留氯离子分布的影响[J].自然灾害学报, 2017, 26(3): 106-112.  
Zhang K, Shan W, Sun W B, et al. Impact of different factors on distribution of residual chlorion in concrete after electrochemical chloride extraction treatment [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(3): 106-112. (in Chinese)
- [11] Ann K Y, Kim J, Hwang W. Effect of ECE in removing chlorides at free and bound ones in concrete contaminated with chlorides in cast and with penetrated chlorides [J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134477.
- [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] 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)
- [14] 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)
- [15] 郑建岚, 王晓敏, 张建全. 含氯再生骨料混凝土抗氯离子渗透性能研究 [J]. 材料导报, 2024, 38(18): 114-119.
- Zheng J L, Wang X M, Zhang J Q. Study on the resistance to chloride ion permeability of chlorinated recycled aggregate concrete [J]. Materials Reports, 2024, 38(18): 114-119. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] 牛海成, 范玉辉, 张向冈, 等. 再生混凝土抗碳化性能试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(1): 59-66.
- Niu H C, Fan Y H, Zhang X G, et al. Experiment study on the carbonization resistance of recycled concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(1): 59-66. (in Chinese)
- [18] 孙丛涛, 宋华, 牛荻涛, 等. 粉煤灰混凝土的氯离子结合性能 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 35-39.
- Sun C T, Song H, Niu D T, et al. Chloride binding capacity of fly ash concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 35-39. (in Chinese)
- [19] 混凝土用再生粗骨料: GB/T 25177—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [20] 肖建庄, 陈祥磊, 李标, 等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能的影响 [J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(1): 26-32.
- Xiao J Z, Chen X L, Li B, et al. Effect of mixed Nano-SiO<sub>2</sub> and fly ash on properties of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1): 26-32. (in Chinese)
- [21] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [22] 公路桥梁承载能力检测评定规程: JTGT J21—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [23] Wang B, Yan L B, Fu Q N, et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 171: 105565.
- [24] 郭远新, 李秋义, 岳公冰, 等. 考虑粗骨料品质和取代率的再生混凝土抗压强度计算 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(4): 153-159.
- Guo Y X, Li Q Y, Yue G B, et al. Calculation of compressive strength of recycled concrete based on coarse aggregate quality and replacement rate [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4): 153-159. (in Chinese)
- [25] 张路, 牛荻涛, 文波, 等. 改性珊瑚骨料混凝土的电阻率模型 [J]. 材料导报, 2022, 36(1): 78-83.
- Zhang L, Niu D T, Wen B, et al. Resistivity model of modified coral aggregate concrete [J]. Materials Reports, 2022, 36(1): 78-83. (in Chinese)
- [26] 陈鹏, 徐博侯. 基于因素敏感性的边坡稳定可靠度分析 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(4): 42-48.
- Chen P, Xu B H. Reliability analysis of slope stability based on factors sensitivity [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(4): 42-48. (in Chinese)
- [27] 糜人杰, 潘钢华. 再生混凝土抗碳化性能研究进展 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(3): 473-480.
- Mi R J, Pan G H. Research progress in carbonation resistance of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(3): 473-480. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)