

氯盐干湿循环下再生 ECC 力学与抗氯离子侵蚀性能研究

王福豪, 杨令强, 朱崇绩*

(济南大学 土木建筑学院, 济南 250024)

摘要:通过氯盐干湿循环试验模拟混凝土受氯盐侵蚀的实际环境,对侵蚀后再生细骨料高延性水泥基复合材料(RECC)力学性能及抗氯离子侵蚀性能进行研究。试验结果表明:氯盐干湿循环会导致 RECC 力学性能略有下降,但仍保持高延性特性;其中,RECC25 与 RECC0 力学性能相近,RECC50、RECC100 力学性能受侵蚀后仍处于较高水平。再生骨料取代率较低时对氯离子扩散的影响较小;然而在较高循环次数下,高取代率 RECC 的氯离子扩散率减缓速度相对较低。XRD 分析显示,随着循环的进行,RECC 中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 逐渐消耗,并伴随 CaCO_3 和弗里德尔盐(Friedel's salt, Fs)的生成。

关键词:高延性水泥基复合材料;再生细骨料;氯盐干湿循环;力学性能;氯离子侵蚀

中图分类号:TU528.58 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2026)02-0026-10

DOI:10.3969/j.issn.1673-4602.2026.02.004

Study on the mechanical properties and chloride ion erosion resistance of recycled ECC under chloride salt dry-wet cycles

WANG Fuhao, YANG Lingqiang, ZHU Chongji*

(School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250024, China)

Abstract: The chloride salt dry-wet cycle (CDWC) test was conducted to simulate the actual environmental conditions of concrete subjected to chloride-induced corrosion, aiming to evaluate the mechanical properties and chloride ion erosion resistance of recycled fine aggregate engineered cementitious composites (RECC) after erosion. The experimental results indicate that chloride salt dry-wet cycles lead to a slight decline in the mechanical properties of RECC while maintaining its high ductility. Among the samples, RECC25 exhibits mechanical properties similar to RECC0, whereas RECC50 and RECC100 maintain relatively high levels of mechanical performance after erosion. The low replacement rate of recycled aggregate has a minimal impact on chloride ion diffusion. However, at higher cycle counts, the rate of reduction in chloride ion diffusivity is relatively slower for RECC with higher replacement rates. XRD analysis reveals that as the cycles progress, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in RECC is gradually consumed, accompanied by the formation of CaCO_3 and Friedel's salt (Fs).

Key words: engineered cementitious composites; recycled fine aggregate; chloride salt dry-wet

收稿日期:2024-10-07

基金项目:国家自然科学基金(52372026);山东省住房和城乡建设科技计划(2024KYKF-LSDT084)

作者简介:王福豪(2000—),男,山东菏泽人。硕士,研究方向为高性能混凝土。E-mail:wangfuhao2000@qq.com。

*通信作者:朱崇绩(1980—),男,山东济南人。博士,讲师,主要从事高性能混凝土、建筑结构防灾减灾和装配式建筑等方面的研究。E-mail:cea_zhucj@ujn.edu.cn。

cycle(CDWC); mechanical properties; chloride ion erosion

氯离子在钢筋混凝土中的扩散对结构耐久性至关重要^[1],尤其在海洋环境或使用除冰盐时,氯离子渗透混凝土,导致钢筋锈蚀,严重损害其耐久性^[2]。在氯离子侵蚀试验中,相比直接浸泡,氯盐干湿循环(Chloride Salt Dry-Wet Cycle, CDWC)更能真实模拟实际服役环境中的情况^[3]。在干湿循环条件下,混凝土表面的氯离子会随着时间的推移逐渐积累,这表现为氯离子质量分数(C_s)的变化^[4]。用 Fick 第二定律模拟氯离子扩散传输的解析解可得氯离子扩散系数(D_{app}),实践表明, D_{app} 随着时间的推移逐渐变小^[5]。 C_s 与 D_{app} 的时间依赖性一定程度上可表征混凝土结构的使用寿命^[6]。

高延性水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)是一种具有优异延展性和多裂纹特性的纤维增强材料^[7]。ECC 在承载后裂缝宽度小,能有效限制侵蚀性离子的渗透,进而提高耐腐蚀性能^[8]。目前 ECC 已广泛应用于高耐久性要求的混凝土结构中,尽管长时间处于氯盐环境下其力学性能有所下降,但高延展性和多裂纹特性依然保持^[9]。有研究指出, ECC 的耐用性很大程度上取决于纤维类型,其中聚乙烯醇纤维(Polyvinyl Alcohol Fiber, PVA Fiber)增强的 ECC 表现最佳^[10-11]。

建筑垃圾作为再生骨料添加到混凝土中,有助于缓解资源短缺和环境污染问题^[12]。研究表明,混凝土中再生细骨料(Recycled Fine Aggregate, RFA)取代率达 40%,力学性能仍然良好^[13]。然而,有研究发现 D_{app} 与 RFA 取代率正相关^[14],原因在于其更复杂的孔隙结构与界面过渡区特性。因此,研究氯盐侵蚀对再生细骨料高延性水泥基复合材料(再生 ECC, 简称 RECC)微观结构和力学性能的影响至关重要^[15-16]。

本文旨在研究 CDWC 对不同 RFA 取代率的 RECC 力学性能及抗氯离子性能的影响。通过评估 RECC 的抗压、抗折、抗拉性能变化,分析其在 CDWC 条件下的劣化程度。此外,测量氯离子侵蚀深度和水溶性氯离子质量分数,探讨 C_s 和 D_{app} 的时间依赖性,以评估 RECC 的耐氯离子侵蚀能力。同时,利用 X 射线衍射(X-ray Diffraction, XRD)技术标定 RECC 中的晶相物质并分析其变化,探讨氯离子侵蚀的作用机理。

1 试验

1.1 试件材料及制备

水泥使用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥(Ordinary Portland Cement, OPC)。I 级粉煤灰(Fly Ash, FA)为矿物添加剂,含水质量分数 0.5%,细度 43 μm ,密度 2.4 g/cm^3 。天然细骨料(Natural Fine Aggregate, NFA)为 80~120 目标标准砂,再生细骨料由废弃混凝土破碎、研磨并筛分,调整颗粒级配与标准砂一致。纤维采用高模量 PVA 纤维(表 1),掺量为 RECC 总体积的 2%。减水剂为多元羧酸高效粉体减水剂(High-Range Water Reducer, HRWR),其氯离子含量可忽略不计。部分材料成分见表 2, RECC 的配合比见表 3,其中试件后标号为 RFA 取代率。

表 1 PVA 纤维的性能指标

长度/mm	直径/ μm	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
12	20	2.9	120	2.42	0.97

表 2 原材料化学成分

材料	SO_3	SiO_2	Al_2O_3	MgO	CaO	Fe_2O_3	烧失量
OPC	3.52	22.35	7.52	2.19	55.32	4.23	3.28
FA	0.54	56.12	24.57	1.29	4.12	3.74	2.37
NFA	0.05	96.00	1.80	0.10	0.50	0.5	1.05
RFA	1.33	50.25	11.88	2.13	27.91	2.09	4.14

表3 材料组成及配合比

试件	OPC	FA	NFA	RFA	水	HRWR	纤维
RECC0	936.7	401.4	801.0	0	335.1	4.2	19.0
RECC25	936.7	401.4	600.8	200.2	335.1	4.2	19.0
RECC50	936.7	401.4	400.5	400.5	335.1	4.2	19.0
RECC100	936.7	401.4	0	801.0	335.1	4.2	19.0

将水泥、粉煤灰和细骨料混合,使用行星式砂浆搅拌机干拌 2 min。然后加入水和减水剂的混合溶液搅拌 5 min。之后分批加入分散的 PVA 纤维,继续搅拌 5 min 以上以避免纤维结团。搅拌完成后,将混合物浇筑入模具中,表面找平后覆盖塑料薄膜。静置 24 h 后试件拆模,在 20 °C、湿度 95% 以上的混凝土标准养护室中养护 28 d。

1.2 试验方法

立方体试件 105 °C 烘干至恒重 m_s 。将试件浸入水中一定时间后擦去浮水,测定质量 m_{xh} 。混凝土吸水率 $W_{xh} = (m_{xh} - m_s) / m_s \times 100\%$ 。其中,0.5 和 168 h 测试早期和极限吸水率^[17],3 h 对应《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[18]中吸水率。

各试件在质量分数 10% 的 NaCl 溶液中浸泡 36 h,之后放入 80 °C 的烘箱中干燥 12 h 为一次 CDWC 循环。本次试验每 5 次循环处理结束后对试件进行后续检测,共 20 次循环。试件因 CDWC 产生对应的质量变化,以试件在烘箱干燥后的质量作为测量节点,记录其质量为 m_{cq} ,其中 q 为循环次数。质量变化率 $\Delta m = (m_{cq} - m_{c0}) / m_{c0} \times 100\%$ 。

CDWC 处理结束后对试件进行力学性能测试,各试件加载方式采用位移控制加载,加载速度为 0.5 mm/min。抗压强度试件规格为边长 100 mm 的立方体;抗弯强度进行三点压弯试验测定。直接拉伸试验采用狗骨型试件,具体尺寸如图 1(a)所示。试验过程中利用狗骨中间段两侧所夹夹具固定引伸计,以采集加载时测试区对应位移,试验装置见图 1(b)。

对 CDWC 处理后的立方体试件进行劈裂,清理断裂面并喷涂 0.1 mol/L $AgNO_3$ 溶液使其呈现变色边界。用游标卡尺测量氯离子侵蚀深度。试件每隔 3 mm 进行取样,破碎研磨后通过 0.63 mm 方孔筛筛分。筛分后样品 105 °C 干燥 2 h 后使用蒸馏水进行水萃。依照《水运工程混凝土试验检测技术规范》(JTS/T 236—2019)^[19]中测试方法对水萃后溶液测试水溶性氯离子浓度。收集水萃取前后的粉末样品,使用 Rigaku SmartLab 9KW X 射线衍射仪对样品在 5~70° 范围内进行 XRD 测试,以分析样品的化学成分变化。

收集水萃取前后的粉末样品,使用 Rigaku SmartLab 9KW X 射线衍射仪对样品在 5~70° 范围内进行 XRD 测试,以分析样品的化学成分变化。

2 试验结果及分析

2.1 试件吸水率及质量变化率

图 2 展示了不同 RFA 取代率下 RECC 的吸水率变化。其中,RECC25 和 RECC50 的极限吸水率分别比 RECC0 高出 9.88% 和 8.43%,远低于 RECC100 对应的 33.4%。这表明,在低 RFA 取代率下,RFA 对 RECC 的极限吸水性能影响较小。随着 RFA 取代率的增加,RECC 的吸水率总体呈上升趋势,吸水性能反映了混凝土内部孔隙体积及连通性,同时表征了混凝土的渗透性。结果显示,低掺入量的 RFA 对渗

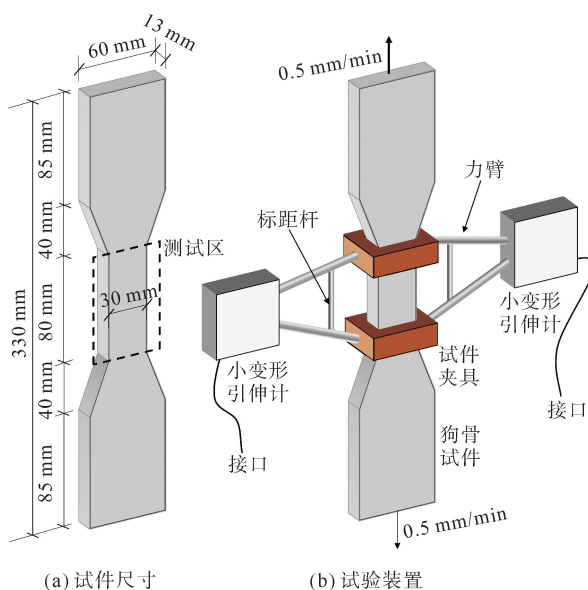


图1 狗骨试件示意

透性的影响不大。

图 3 显示了经过 CDWC 处理后 RECC 的质量变化。不同 RFA 取代率下,RECC 的质量变化趋势基本一致。CDWC 增强了混凝土的氯离子扩散能力,导致内部孔隙水趋于饱和。随着循环次数增加,质量变化逐渐减缓。RFA 取代率增加时,质量变化呈上升趋势,RFA 中的残余水化产物增加了 RECC 的孔隙体积,较高的孔隙率在润湿过程中促进了溶液的渗透,同时在干燥过程中为氯盐晶体积累提供了更多空间,这两者均对质量变化产生影响。

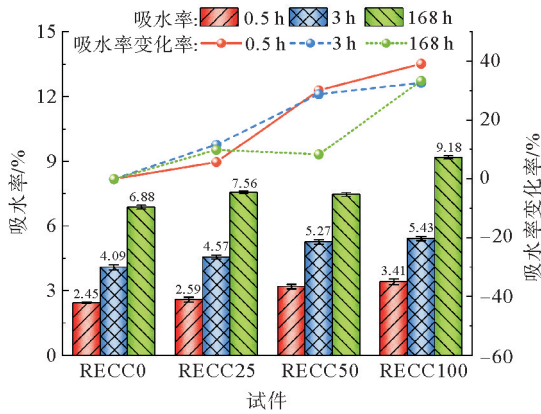


图 2 各 RFA 取代率试件吸水率及变化率

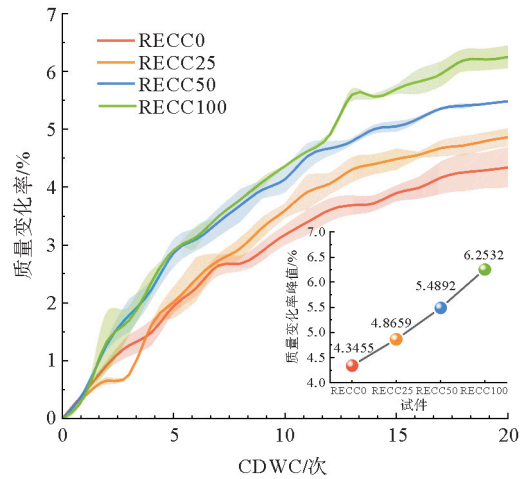
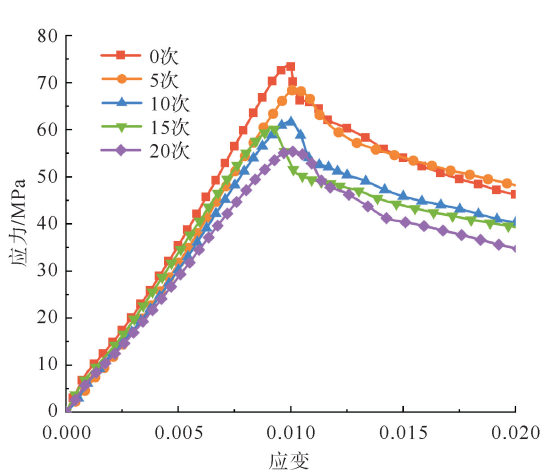


图 3 CDWC 质量变化率

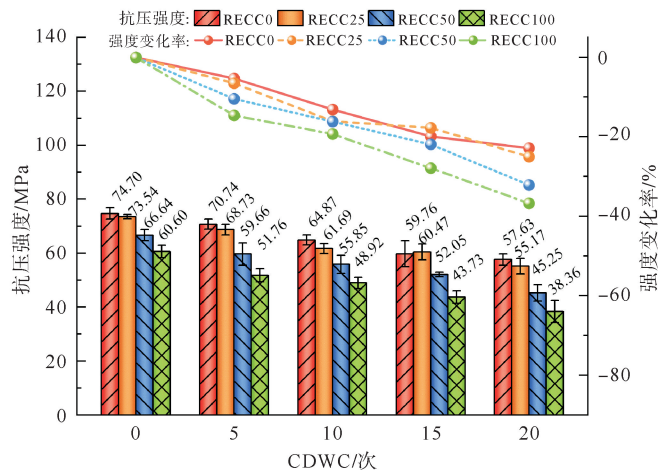
2.2 力学性能

2.2.1 抗压性能

在 CDWC 处理后,各 RFA 取代率下 RECC 的抗压应力-应变曲线表现出一致性。以 RECC25 在 CDWC 下的应力-应变曲线为例(图 4(a)),在应力达到 70%峰值强度时,上升段开始偏离线性行为,随着压应力的增加,试件的弹性模量有所下降。承载力峰值后,曲线呈现双线性形态,拐点大致位于 RECC 承载极限峰值的 85%~90%处。



(a) RECC25 应力-应变曲线



(b) RECC 抗压强度及变化率

图 4 RECC 抗压性能

如图 4(a)所示,在 CDWC 处理后,各 RFA 取代率下的 RECC 试件峰值强度对应应变保持在 0.9%~1.1%之间,延性段的承载能力下降速率相似,表明 CDWC 对 RECC 的变形能力影响较小。如图 4(b)所

示,随着 CDWC 次数的增加,不同 RFA 取代率的 RECC 抗压强度逐渐下降。RECC0 和 RECC25 在 CDWC 过程中的强度下降速率基本一致;在 CDWC 初期,RECC50 的强度损失与 RECC0 和 RECC25 相近,但在后期速度加快。CDWC 过程中,RECC 在干燥及吸水时内部产生变形,反复的干湿循环导致 RECC 内部微裂缝的产生与扩展,进而影响其强度。因其较高的吸水率及循环过程中较高的质量变化,高 RFA 添加率的 RECC 上述作用更显著。

2.2.2 弯曲性能

经过 CDWC 不同次数处理后,各 RFA 取代率的 RECC 试件初裂强度和位移保持稳定(7 MPa, 0.8 mm)。初裂后,荷载增加时,纤维的拉结作用增强了承载力,曲线趋势和波动性一致,表明纤维与基体间连接受到的影响较小。承载力峰值后试件表现出负弯曲刚度,承载力逐渐下降(图 5)。

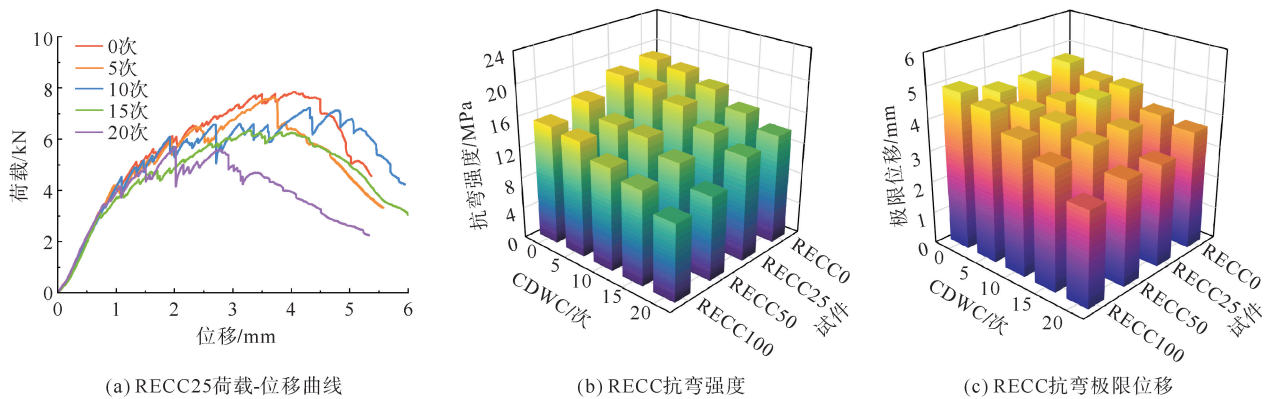


图 5 RECC 抗弯性能

图 5(b)(c)显示,不同 RFA 取代率下的 RECC 抗弯强度和极限位移在 CDWC 处理后的劣化趋势相似,强度和位移的劣化速率保持稳定。不同 CDWC 循环次数下,RECC0 与 RECC25 的抗弯强度相近,说明低 RFA 取代率对抗弯强度影响有限。同时,各侵蚀阶段下,不同 RFA 取代率的极限位移无显著差异,表明再生骨料对纤维与水泥基体的黏结作用影响不大。

2.2.3 直接拉伸性能

RECC 的直接拉伸应力-应变曲线及裂缝开展变化如图 6、7 所示。初裂后,试件表面出现细小平行裂缝,曲线波动上升代表明显的应变硬化。随着新裂缝的产生,未经 CDWC 处理的 RECC 应变硬化过程的波动性大,表现为在应力下降上比经过 CDWC 处理的更明显。

图 8 展示了对抗拉性能的参数评估,面积大小反映 RECC 的相对综合性能,其中强度(应变)比为极限强度(应变)值与初裂强度(应变)值之比。RECC0、RECC25、RECC50 在 5 次 CDWC 后强度呈现先升后降的趋势,主要原因如下:①饱和和水环境促进水泥基体水化,增强了纤维与基体的结合;②CDWC 引发试件的累计侵蚀破坏。两者耦合导致强度变化。经过 CDWC 处理后,RECC 的强度比约为 2.0,应变比保持在 50 以上,表明其仍具备良好的应变硬化性能和高延性特性。

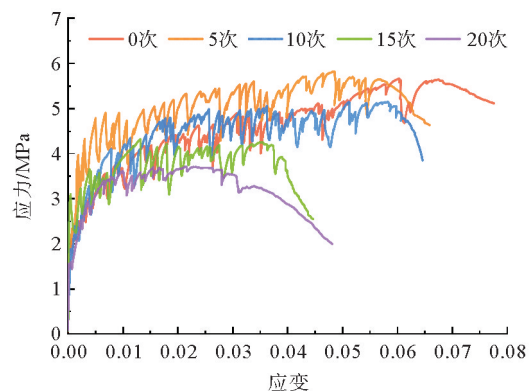


图 6 RECC25 狗骨抗拉应力-应变曲线

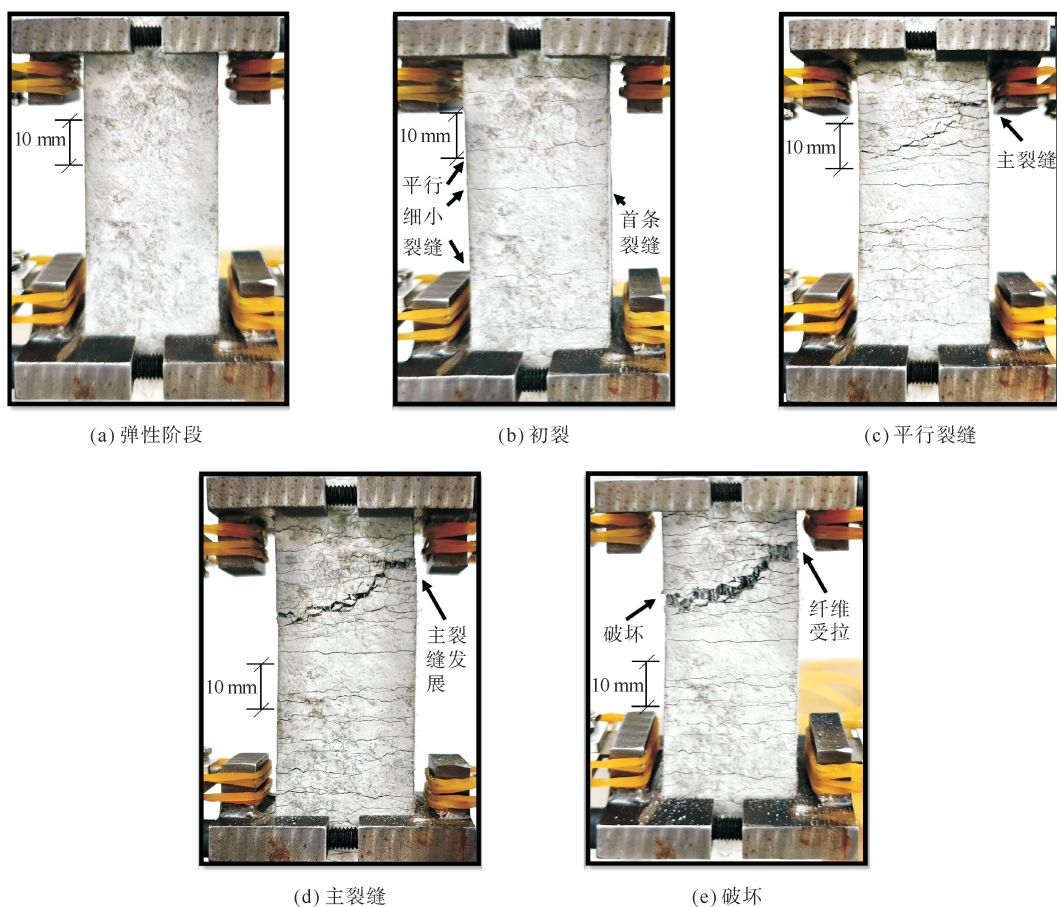


图 7 RECC 直接拉伸裂缝开展形态

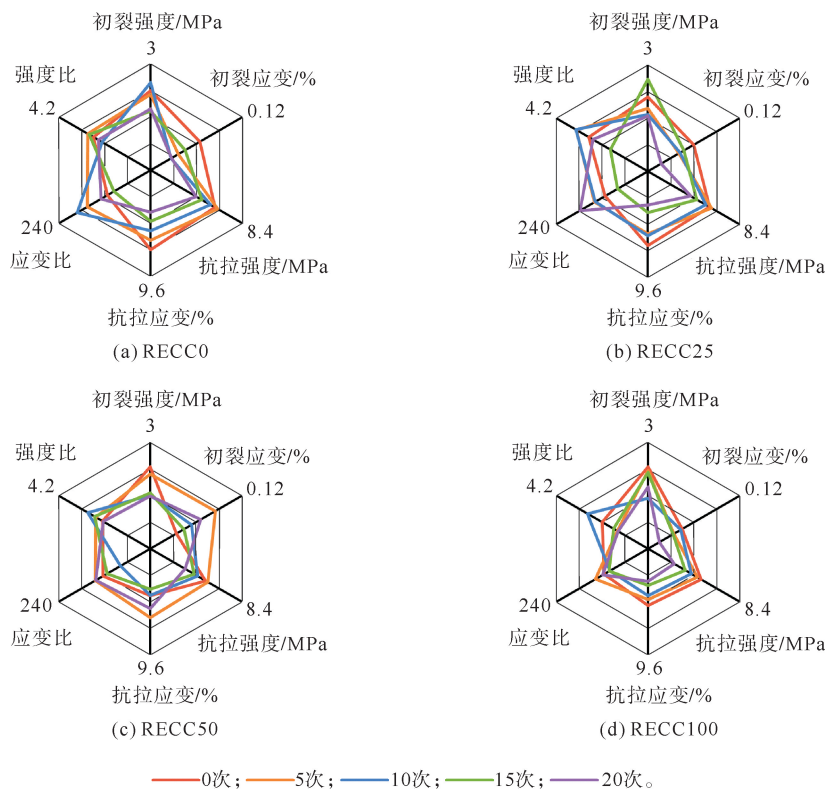


图 8 直接抗拉性能参数六维评估

2.3 氯离子侵蚀深度

混凝土试块的复杂内部结构导致氯盐侵蚀边界显著波动。因此,每组试块随机抽取 30 个测点进行统计分析。图 9 中结果显示,每组数据近似正态分布,箱体分布均匀且异常值较少,统计结果可信。随着 CDWC 次数增加,各 RFA 取代率试件的侵蚀深度表现出更高的离散性。各组试件的平均侵蚀深度随 CDWC 次数增加而上升。在比较 CDWC 5~20 次的深度增长率时,RECC25 的增长率(131%)略低于 RECC0(138%)和 RECC50(139%),表明在内部环境稳定时,低 RFA 取代率的 RECC 抗侵蚀性能与未掺 RFA 的 ECC 相当。

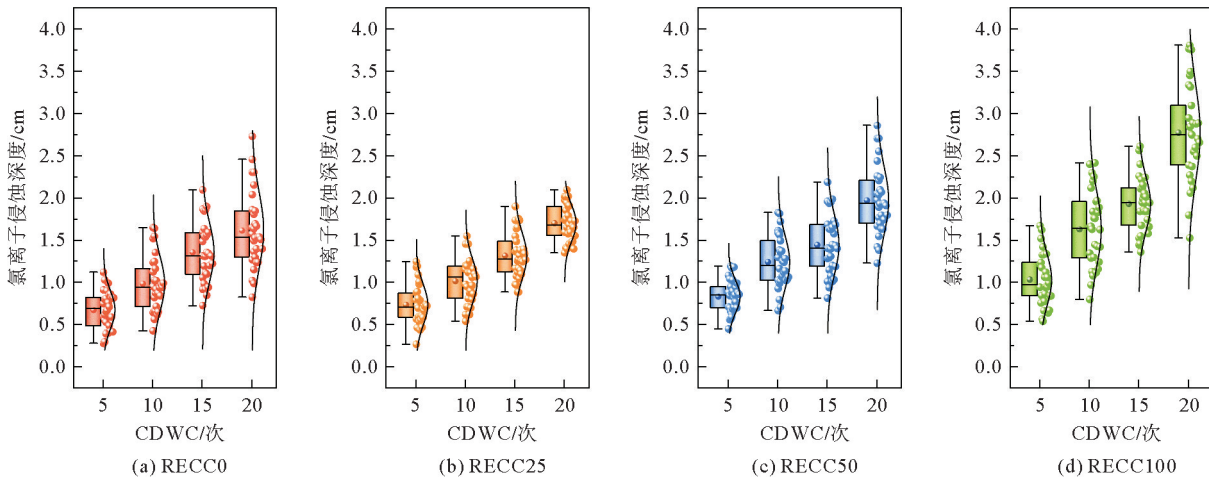


图 9 氯离子侵蚀深度变化

2.4 氯离子含量测定及扩散系数分析

在氯离子质量分数测定时,测取同批次未经 CDWC 循环 RECC 中氯离子质量分数,求取其与试验值之间差值为侵蚀后游离态氯离子质量分数,以消除 ECC 中基础值差异。图 10 为不同 CDWC 次数下,各 RFA 取代率的 RECC 氯离子质量分数(C_s)在深度方向的分布。在 CDWC 过程中,相同深度处的 C_s 随着 CDWC 次数的增加逐渐增加。氯离子因干燥时孔隙中溶液的对流迁移而向外扩散,表面水分蒸发导致氯离子浓度升高,形成浓度梯度,促进氯离子向内部扩散。这一过程使 C_s 的峰值(C_{smax})位于试件内部。不同 RFA 取代率和不同 CDWC 次数下, C_{smax} 所在位置 Δx 保持稳定,表明 Δx 对 RFA 含量和 CDWC 周期不敏感。

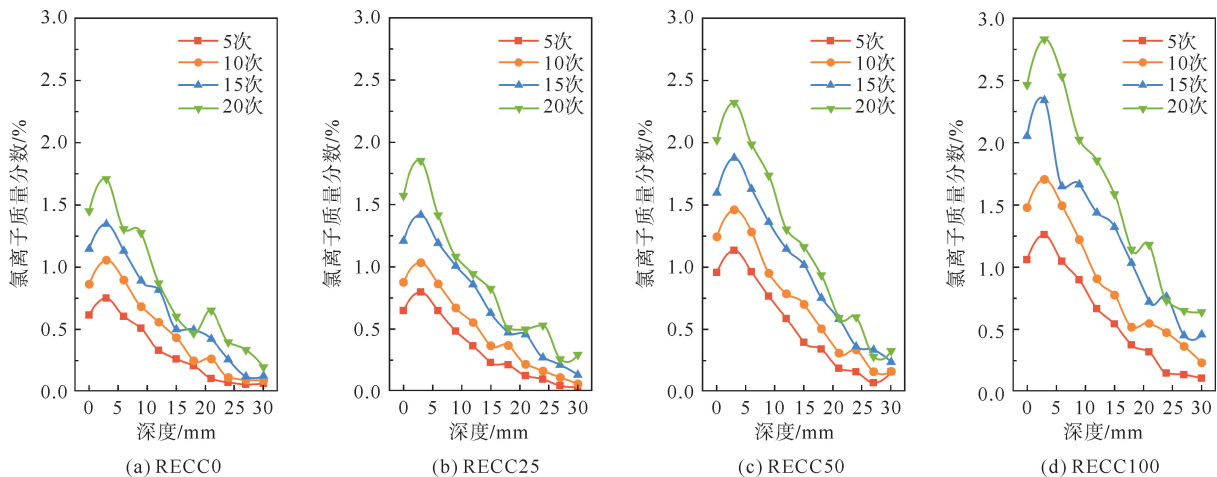


图 10 氯离子质量分数分布

为了定量分析 CDWC 和 RFA 取代水平对 C_{smax} 的影响,采用时间依赖型氯离子浓度计算模型对 RECC 在不同 CDWC 过程中的 C_{smax} 进行数据拟合,结果如图 11(a)所示,其中, k 为年龄因子。结果显示,RECC25 和 RECC0 的年龄因子在 CDWC 次数增加时保持稳定,而 RECC50 和 RECC100 的年龄因子则有所提升。这表明,在低 RFA 取代率的 RECC 中,RFA 对内部氯离子融合的促进作用较小。

对各侵蚀深度的 C_s 进行回归分析得到了对应的 D_{app} (图 11(b))。RECC0 与 RECC25 在各 CDWC 阶段的 D_{app} 相近,表明 RECC25 的氯离子扩散性能与未掺 RFA 的 ECC 相当。随着时间推移 RECC 的 D_{app} 持续下降。 D_{app} 的时间依赖性如图 11(b)所示,通过数据拟合得到可表征氯离子扩散率的 m 值。结果显示,随着 RFA 含量增加 m 值持续降低,表明 RFA 可以减缓氯离子扩散率下降。

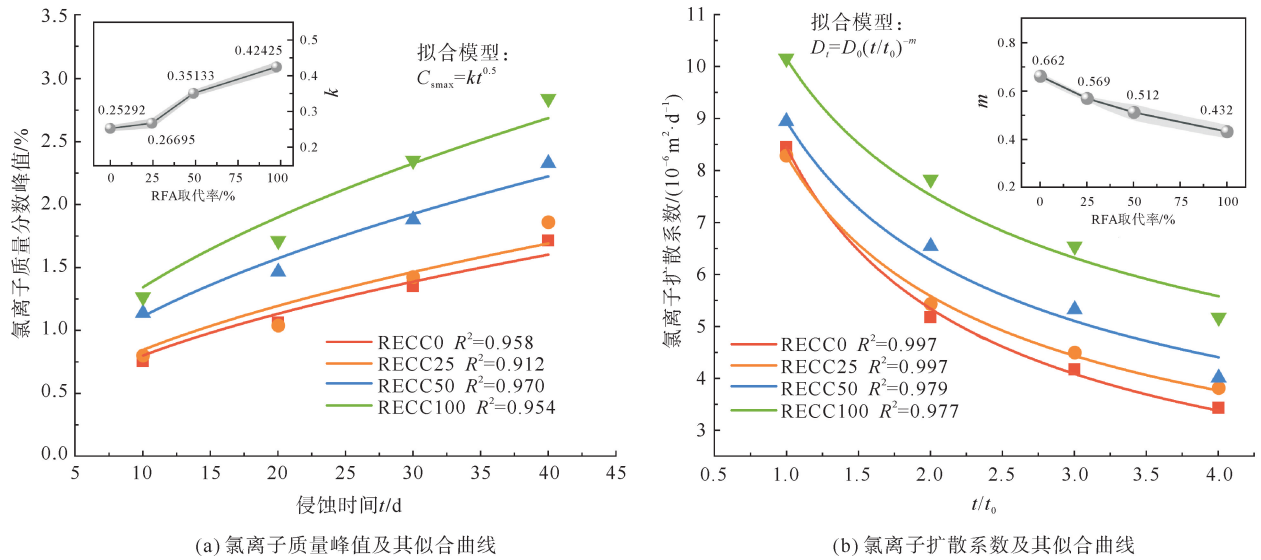


图 11 抗氯离子侵蚀性能相关系数拟合

2.5 XRD 分析

图 12 展示了 RECC 的 XRD 衍射图谱及其物相组成。经过 CDWC 处理后,图谱中出现了弗里德尔盐(Fs)的衍射峰,主要是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 缺乏导致,钙矾石和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰几乎消失,表明水化产物与氯离子发生了化学结合。图 13(a)(b)显示在相同 CDWC 条件下,氯离子浓度较高时 Fs 显著生成(RECC25- x - y ,其中, x 为循环次数,次; y 为深度,mm)。图 13(c)则比较了水萃前后 RECC 样品的 XRD 图谱,Fs 的衍射峰强度下降,表明高浓度氯离子是 Fs 形成和稳定的关键因素。

图 13 显示,在高氯离子浓度环境中,波特兰石的衍射峰强度明显下降。这主要是因为,在干湿循环条件下, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为 Fs 的主要反应成分被消耗,且 RECC 表层的碳化也消耗了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,同时生成 CaCO_3 ,衍射图谱中表现为方解石的衍射峰强度略有提升。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰强度在水萃后显著减弱,表明在 CDWC 过程中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 部分溶解。在 CDWC 条件下,Fs 的水合膨胀、水化产物结合水变化及可溶性基体材料的溶解促使微裂缝扩展,进而产生性能劣化。

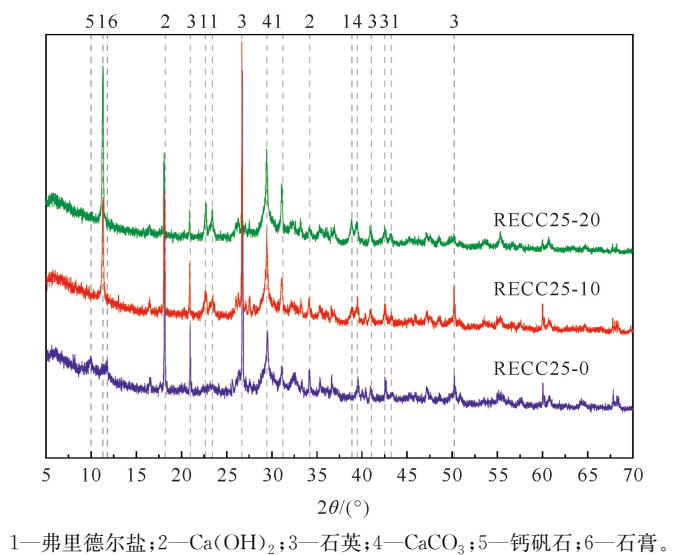


图 12 RECC 衍射图谱及物相组成

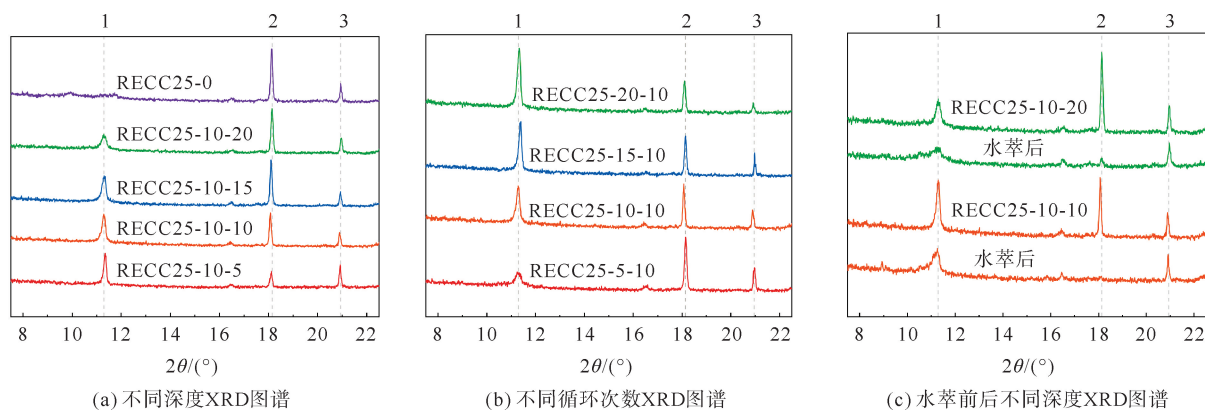


图 13 RECC 各条件 XRD 图谱

3 结论

本文研究了在 CDWC 条件下,不同 RFA 取代率和 CDWC 次数对 RECC 的抗压、抗弯、抗拉性能及氯离子扩散和腐蚀的影响,结果总结如下:

1) 由于干湿循环引发微裂缝,RECC 的强度和应变在不同 CDWC 次数下均有所劣化,高循环次数下 RECC 仍保持高延性。低 RFA 取代率时,RFA 对孔隙结构的影响不显著,孔隙率和质量变化与 RECC0 相近,与力学性能变化有所对应。

2) 在 CDWC 过程中,RECC25 的氯离子侵蚀深度增长率及氯离子浓度峰值对应的参数表明低 RFA 取代率的 RECC 对氯离子的融合较轻。氯离子扩散系数结果显示,RECC25 与 RECC0 相近,且低于其余两项。随着 RECC 中 RFA 取代率升高,氯离子扩散系数的下降幅度减小且拟合模型中的 m 值降低,表明再生骨料可减缓氯离子扩散系数的衰减速度。

3) RECC 中再生骨料与水化产物结合不够紧密,导致孔隙体积增加。高 RFA 取代率的 RECC 表现出明显的耦合效应:高孔隙率加剧 CDWC 的影响,而 CDWC 又进一步恶化孔隙结构,最终导致强度下降与劣化加速。

参考文献 (References):

- [1] VAN BELLEGHEM B,KESSLER S,VAN DEN HEEDE P,et al. Chloride induced reinforcement corrosion behavior in self-healing concrete with encapsulated polyurethane[J]. Cement and Concrete Research,2018,113:130-139.
- [2] MANGAT P S,OJEDOKUN O O. Free and bound chloride relationships affecting reinforcement cover in alkali activated concrete[J]. Cement and Concrete Composites,2020,112:103692.
- [3] 韩学强,詹树林,徐强,等. 干湿循环作用对混凝土抗氯离子渗透侵蚀性能的影响[J]. 复合材料学报,2020,37(1):198-204.
HAN Xueqiang,ZHAN Shulin,XU Qiang,et al. Effect of dry-wet cycling on resistance of concrete to chloride ion permeation erosion[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2020,37(1):198-204.
- [4] LIAN S,MENG T,ZHAO Y,et al. Experimental and theoretical analyses of chloride transport in recycled concrete subjected to a cyclic drying-wetting environment[J]. Structures,2023,52:1020-1034.
- [5] LIU Q,SUN L,ZHU X,et al. Chloride transport in the reinforced concrete column under the marine environment: Distinguish the atmospheric,tidal-splash and submerged zones[J]. Structures,2022,39:365-377.
- [6] FENAUX M,REYES E,GÁLVEZ J C,et al. Modelling the transport of chloride and other ions in cement-based materials[J]. Cement and Concrete Composites,2019,97:33-42.
- [7] 王义超,侯梦君,余江滔,等. 聚乙烯纤维制备超高延性水泥基复合材料的试验研究[J]. 材料导报,2018,32(20):3535-3540.
WANG Yichao,HOU Mengjun,YU Jiangtao,et al. Experimental study on mechanical properties of ultra-high ductile cementitious composites[J]. Materials Review,2018,32(20):3535-3540.
- [8] SUN R,HU X,LING Y,et al. Chloride diffusion behavior of engineered cementitious composite under dry-wet cycles[J]. Construction and Building Materials,2020,260:119943.

- [9] LIU H,ZHANG Q,LI V,et al. Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment[J]. *Construction and Building Materials*,2017,133:171-181.
- [10] 权港博,王蕾,朱崇绩,等. 再生细骨料制备纤维水泥基复合材料配合比优化及其性能[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*,2024,41(3):227-234.
QUAN Gangbo,WANG Lei,ZHU Chongji,et al. Mix ratio optimization and performance of fiber-reinforced cement-based composites prepared with recycled aggregates[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University(Natural Science)*,2024,41(3):227-234.
- [11] LING Y F,ZHANG P,WANG J,et al. Effect of PVA fiber on mechanical properties of cementitious composite with and without nano-SiO₂[J]. *Construction and Building Materials*,2019,229:117068.
- [12] LU J X,SHEN P L,ZHENG H B,et al. Synergetic recycling of waste glass and recycled aggregates in cement mortars:Physical, durability and microstructure performance[J]. *Cement and Concrete Composites*,2020,113:103632.
- [13] SHARAKY I A,ELAMARY A S,ALHARTHI Y M. Effect of waste basalt fines and recycled concrete components on mechanical, water absorption,and microstructure characteristics of concrete[J]. *Materials*,2022,15(13):4385.
- [14] YING J,HUANG J,XIAO J. Test and theoretical prediction of chloride ion diffusion in recycled fine aggregate mortar under uniaxial compression[J]. *Construction and Building Materials*,2022,321:126384.
- [15] SÁEZ DEL BOSQUE I F,ZHU W,HOWIND T,et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate[J]. *Cement and Concrete Composites*,2017,81:25-34.
- [16] 吴燕开,李文艳,郭肖阳,等. 钢渣粉水泥固化淤泥土氯盐侵蚀下力学性能及机理研究[J]. *青岛理工大学学报*,2023,44(2):23-34.
WU Yankai,LI Wenyan,GUO Xiaoyang,et al. Study on mechanical properties and mechanism of steel slag powder cement solidified silt under chlorine salt erosion[J]. *Journal of Qingdao University of Technology*,2023,44(2):23-34.
- [17] AFROUGHSABET V,OZBAKKALOGLU T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers[J]. *Construction and Building Materials*,2015,94:73-82.
- [18] GB/T 50081—2019,混凝土物理力学性能试验方法标准[S].
GB/T 50081—2019,Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties[S].
- [19] JTS/T 236—2019,水运工程混凝土试验检测技术规范[S].
JTS/T 236—2019,Technical code for testing and inspection of concrete in hydraulic engineering for water transport[S].

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)

(上接第 7 页)

- [17] YOUNIS A,EBEAD U A,SURANENI P,et al. Fresh and hardened properties of seawater-mixed concrete[J]. *Construction and Building Materials*,2018,190:276-286.
- [18] MODUPEOLA,AMUSAN G,FESTUS A O. The effect of seawater on shrinkage properties of concrete[J]. *International Journal of Research in Engineering and Technology*,2014,2(10):1-12.
- [19] YE H,ALEKSANDRA R. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag[J]. *Cement and Concrete Research*,2016,88(10):126-135.
- [20] KONG D L Y ,SANJAYAN J G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste,mortar and concrete[J]. *Cement and Concrete Research*,2010,40(2):334-339.
- [21] ROBERT D C,PAUL G S,ANITA M C,et al. The role of magnesium in concrete deterioration[M]. Ames:Iowa State University,1994.
- [22] WU Z M,KHAYAT K H,SHI C J,et al. Mechanisms underlying the strength enhancement of UHPC modified with nano-SiO₂ and nano-CaCO₃[J]. *Cement and Concrete Composites*,2021,119(5):103992-104006.
- [23] ESSAM A K,DOAA A A,MAHA R M,et al. Effect of calcium chloride on the hydration characteristics of ground clay bricks cement pastes[J]. *Beni Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*,2013,2(1):20-30.
- [24] FERRARIS C F ,WITTMANN F H. Shrinkage mechanisms of hardened cement paste[J]. *Cement and Concrete Research*,1987,17(3):453-464.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)