

文章编号:1673-9469(2026)04-0030-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.04.004

自密实碱激发混凝土抗氯离子侵蚀性能研究

胡东康^{1,2}, 胡楠^{1,2}, 贲树俊^{1,2}, 蒋建华^{3*}, 夏睿琪³

(1. 南通电力设计院有限公司, 江苏 南通 226000; 2. 国网江苏省电力有限公司南通供电分公司, 江苏 南通 226000; 3. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 为探究自密实混凝土的绿色低碳化方案, 采用干湿循环加速试验法, 开展了自密实碱激发混凝土与自密实水泥混凝土的抗氯离子侵蚀性能对比研究, 对混凝土的游离氯离子含量、氯离子总含量、氯离子结合能力以及表观氯离子扩散系数等指标进行分析。结果表明, 当氯离子侵蚀龄期与深度一定时, 自密实水泥混凝土的游离氯离子和总氯离子含量最大, 自密实碱激发混凝土次之, 2% 纳米 SiO₂ 改性自密实碱激发混凝土最小; 与自密实水泥混凝土相比, 自密实碱激发混凝土的氯离子结合能力提高了 29.90%, 表观氯离子扩散系数更低, 抗氯离子侵蚀能力更强; 掺入纳米 SiO₂ 虽降低了自密实碱激发混凝土结合氯离子的能力, 但同时也降低了表观氯离子扩散系数。

关键词: 自密实混凝土; 碱激发; 纳米 SiO₂; 氯离子侵蚀; 干湿循环

中图分类号: TU503

文献标识码: A

Research on the Resistance of Self-compacting Alkali-Activated Concrete to Chloride Ion Erosion

HU Dongkang^{1,2}, HU Nan^{1,2}, BEN Shujun^{1,2}, JIANG Jianhua^{3*}, XIA Ruiqi³

(1. Nantong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226000, China;

2. State Grid Jiangsu Nantong Electric Power Co., Ltd., Nantong, Jiangsu 226000, China;

3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: To explore a green and low-carbon scheme for self-compacting concrete, a comparative study on the chloride ion erosion resistance of self-compacting alkali-activated concrete and self-compacting cement concrete was conducted using the dry-wet cycle accelerated test method. The free chloride ion content, total chloride ion content, chloride ion binding capacity, and apparent chloride diffusion coefficient of concrete were analyzed. The results indicate that when the chloride ion erosion duration and depth are constant, the free chloride ion and total chloride ion contents are the highest in self-compacting cement concrete, followed by self-compacting alkali-activated concrete, and the lowest in self-compacting alkali-activated concrete modified with 2% nano-SiO₂. The chloride ion binding capacity of self-compacting alkali-activated concrete is 29.90% higher than that of self-compacting cement concrete, and its apparent chloride diffusion coefficient is lower, demonstrating superior resistance to chloride ion erosion. Although the incorporation of nano-SiO₂ reduces the chloride ion binding capacity of self-compacting alkali-activated concrete, it also contributes to a decrease in the apparent chloride diffusion coefficient.

Key words: self-compacting concrete; alkali-activated; nano-SiO₂; chloride ion erosion; dry-wet cycle

收稿日期:2025-02-18 修回日期:2025-04-09

基金项目:国网江苏省电力有限公司省管产业科技项目(JC2024119);国家自然科学基金资助项目(51408192)

第一作者:胡东康(1992—),男,江苏沭阳人,硕士,工程师,主要从事混凝土结构耐久性、早龄期裂缝控制方面的研究。

*通信作者:蒋建华(1982—),男,重庆忠县人,博士,副教授,主要从事混凝土结构耐久性研究。

自密实混凝土拌合物流动性好,所用粗骨料粒径通常较小,且无需人工振捣,靠自重便能填充模板,常被应用于水下桥墩、地下隧道工程及配筋较密部位^[1]。为确保新拌自密实混凝土同时具备较好的流动性和黏聚力,凝胶材料的用量往往较大,经济成本较高^[2]。在“双碳”背景下,推动传统建筑行业逐渐向绿色可持续发展方向转型升级成为趋势,而传统水泥生产过程中碳排放量极高,会带来严重的环境问题,与“双碳”目标冲突。因此,研究自密实混凝土的低碳化对扩大其工程应用和实现可持续发展具有重要意义。

碱激发胶凝材料是将难以直接水化的天然矿物或工业废料与特定的碱性溶液混合得到的^[3]。该材料作为一种新型绿色建筑材料,已被证实可大幅提高工业固体废料的利用率,比传统水泥更低碳环保,符合可持续发展理念^[4-6]。碱激发胶凝材料具有水化热低、抗腐蚀性强、抗冻性强、耐高温等优点^[7]。碱激发混凝土根据胶凝体系不同可分为碱激发矿渣混凝土、碱激发粉煤灰/矿渣混凝土。碱激发矿渣混凝土快硬早强效果显著,其力学性能优于普通混凝土;在碱激发矿渣体系中掺入粉煤灰虽会小幅降低早期强度,但可有效改善碱激发混凝土的干燥收缩性能和体积稳定性^[8]。部分学者^[9-10]将活性高且微集料填充作用强的纳米 SiO₂ 掺入混凝土体系开展研究,为碱激发混凝土的性能优化提供了新的思路。

海工混凝土结构长期受氯盐侵蚀,其钢筋锈蚀加速,使用寿命普遍低于陆上结构^[11]。现有研究多聚焦于自密实水泥混凝土(Self-Compacting Concrete, SCC)的抗氯离子侵蚀性能^[12-13],而对自密实碱激发混凝土(Self-Compacting Alkali-Activated Concrete, SCAAC)的氯离子渗透行为缺乏系统性研究。基于以上背景,本文采用干湿循环法对 SCC、SCAAC 及纳米 SiO₂ 改性自密实碱激发混凝土(Self-Compacting Alkali-Activated Concrete with Nano-SiO₂, SCAAC-NS)开展加速氯盐侵蚀试验,通过对比分析氯离子结合能力与扩散特性,揭示碱

激发胶凝材料及纳米 SiO₂ 对自密实混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响规律及机理,以期自密实混凝土的低碳化及其在氯盐侵蚀环境下的工程应用提供理论依据和技术支持。

1 试验概况

1.1 原材料

本试验胶凝材料选用海螺牌 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥、I 级 C 类粉煤灰和 S105 级粒化高炉矿渣粉;细骨料为河砂(中砂);粗骨料为粒径 5~20 mm 的碎石;氢氧化钠(NaOH)为片状固体,20℃以下的溶解度为 109.0 g;水玻璃模数为 2.31,其中 Na₂O、SiO₂ 含量分别为 13% 和 29%;纳米 SiO₂ 平均粒径为 20 nm,纯度为 99.9%;试验用水为普通自来水;外加剂为 CQJ-JSS 型醚类聚羧酸粉体高效减水剂。

1.2 试件设计及制备

本试验设计 3 种不同混凝土工况,各配合比见表 1。各工况混凝土水胶比为 0.45,胶砂比为 0.63,减水剂的掺量为胶凝材料总用量的 0.15%。在 SCAAC 工况中,粉煤灰与矿渣粉用量比例为 1:3。在 SCAAC-NS 工况中,纳米 SiO₂ 等质量取代 2% 的粉煤灰和矿渣粉。每种工况制备 15 个边长为 100 mm 的立方体试件,对应 5 个氯盐侵蚀龄期(15、30、45、60、75 d),每个侵蚀龄期设置 3 个平行试件,共制备 45 个试件。

试件制备前预先配制碱激发溶液及减水剂溶液,本试验选用 NaOH-水玻璃混合溶液作为碱激发剂,其中,水玻璃与 NaOH 的质量比为 0.81,NaOH 溶液浓度为 2.5 mol/L,碱激发溶液模数为 1.38。混凝土拌合时,先将骨料倒入搅拌机搅拌 3 min,再将胶凝材料倒入搅拌机搅拌 3 min,最后在 1 min 内依次缓慢倒入准备好的碱激发溶液和减水剂溶液(SCC 工况只需倒入减水剂溶液),搅拌 5 min 后得到充分混合的拌合物。将拌合物分 2 层装入内尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的

表 1 自密实混凝土配合比

Tab. 1 Mixture proportions of self-compacting concrete

工况	胶凝材料/(kg·m ⁻³)				骨料/(kg·m ⁻³)		氢氧化钠/ (kg·m ⁻³)	水玻璃/ (kg·m ⁻³)	额外用水量/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ (kg·m ⁻³)
	水泥	粉煤灰	矿渣粉	纳米 SiO ₂	砂	石				
SCC	526.0	0.0	0.0	0.0	840	775	0.0	0.0	236.7	0.8
SCAAC	0.0	131.5	394.5	0.0	840	775	14.3	127.8	162.6	0.8
SCAAC-NS	0.0	128.9	386.6	10.5	840	775	14.3	127.8	162.6	0.8

三联塑料模具中并抹平,之后放入温度为 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不低于95%的标准养护室。试件硬化48 h后对其进行脱模处理,脱模后继续放入养护室养护28 d。制备成型的混凝土试件如图1所示。

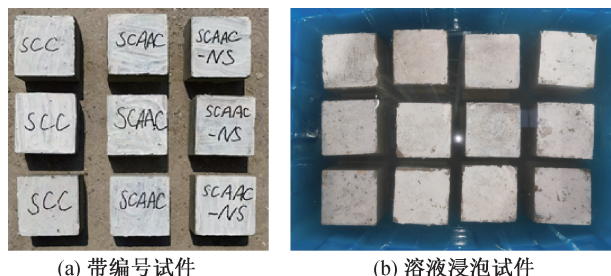


图1 立方体自密实混凝土试件

Fig. 1 Cubic self-compacting concrete specimens

1.3 试验方法

为加速氯盐对各工况混凝土的侵蚀,试验采用“四湿一干”的干湿循环制度。在侵蚀试验前,先将养护完成的试件放入 60°C 的烘箱中烘干24 h,自然冷却至室温后,选取一个较平整面为侵蚀面,其余面均涂刷环氧树脂胶密封。

将试件放入质量分数为3.5%的氯化钠溶液中浸泡4 d,之后擦干表面并置于 60°C 的烘箱中烘干1 d,待其自然冷却至室温即为一次循环。本试验设定侵蚀龄期为干湿循环15、30、45、60和75 d,每15 d更换一次溶液,以确保较好的氯盐侵蚀效果。定期检查以确保溶液始终高出试件上表面20~30 mm。

到达设定侵蚀龄期后,每个工况各取3个烘干试件,先将试件沿侵蚀面的垂直方向劈开,用手持式冲击钻沿氯离子侵蚀方向以6 mm的层厚为间隔分层取样,取样点为每层的中心位置,依次对应距离试件侵蚀表面深度为3、9、15和21 mm的

4个测试层,每层钻取约30 g粉末样品,以备氯离子含量测试,样品采集过程如图2所示。图2(a)中①—④分别代表第1—4层钻孔点,相同序号代表同层多点钻孔,且各层钻孔点互相错开。样品采集完成后,按照《水运工程混凝土试验检测技术规范》(JTS/T 236—2019)^[14]测定混凝土的游离氯离子含量和氯离子总含量。

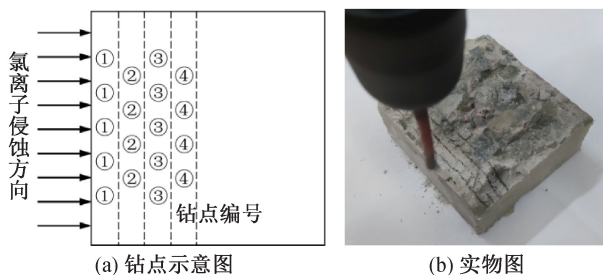


图2 混凝土粉末样品采集过程

Fig. 2 Collection process of concrete powder samples

2 试验结果与分析

2.1 游离氯离子含量

不同氯盐侵蚀龄期下,3种混凝土游离氯离子含量 w_f 随深度的变化情况如图3所示。混凝土内部 w_f 均与深度呈负相关,与氯盐侵蚀龄期呈正相关,且较浅处 w_f 增长量大于较深处。以SCAAC为例,随着氯盐侵蚀龄期由15 d增加至75 d,SCAAC内部3.0 mm深度处的 w_f 增长量为0.078%,而9.0、15.0、21.0 mm深度处的 w_f 增长量分别为0.062%、0.044%和0.022%。分析其原因,试验采用的自密实混凝土水胶比相对较高,无振捣浇筑时表层水分蒸发和空气迁移导致缺陷更显著,加上干湿循环的毛细吸附作用,使表层游离氯离子富集程度高于内部。

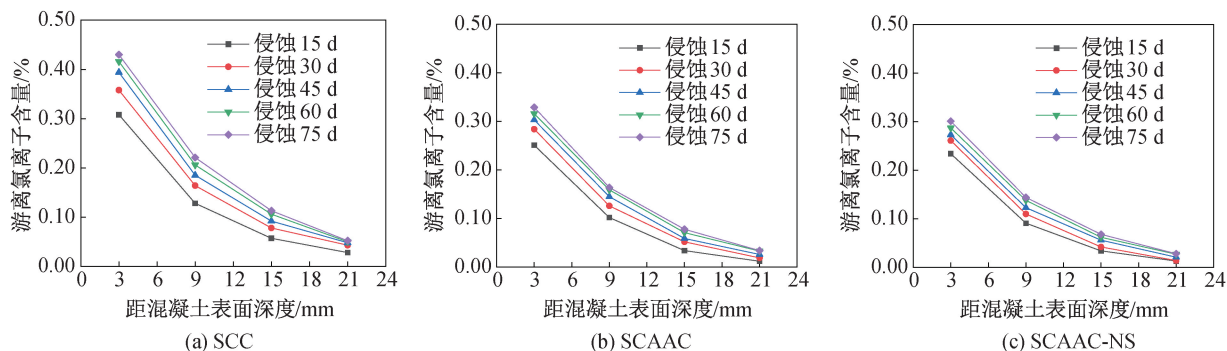


图3 自密实混凝土游离氯离子含量随深度的变化

Fig. 3 Variation of free chloride ion content in self-compacting concrete with depth

3种混凝土内部各深度处 w_f 的增长量均随氯盐侵蚀龄期的增加而减小。以 SCAAC 内部 3.0 mm 深度处为例,随着氯盐侵蚀龄期由 15 d 增加至 30 d, w_f 的增长量为 0.033%; 侵蚀龄期由 30 d 至 45 d、45 d 至 60 d、60 d 至 75 d, w_f 的增长量分别为 0.019%、0.013% 和 0.013%。分析原因如下:氯盐侵蚀过程中,混凝土中的胶凝材料仍持续而缓慢地发生水化,其基体中的孔隙通道渐渐被水化产物填充^[15];试件烘干后,侵蚀溶液中的氯离子浓度比试件孔隙溶液低,孔隙通道中甚至出现氯化钠析晶^[16],当试件再次浸入溶液时,浓度差的存在使部分游离氯离子从试件内部向外部环境溶液中迁移。

对比 3 种混凝土发现,各侵蚀龄期下 SCAAC 内部不同深度处的 w_f 均低于 SCC。以氯盐侵蚀 15 d 为例,试件内部 3.0、21.0 mm 深度处,SCAAC 的 w_f 分别为 0.251%、0.012%,为 SCC 相同深度处 w_f 的 81.49%、42.86%。这是因为 SCAAC 的基体结构比 SCC 更致密,侵蚀溶液更难向其内部渗透。

研究发现,各侵蚀龄期下 SCAAC-NS 内部不同深度处的 w_f 均低于 SCAAC。以氯盐侵蚀 75 d 为例,SCAAC 内部 3.0、9.0、15.0、21.0 mm 深度处的 w_f 分别为 0.329%、0.164%、0.078% 和 0.034%,而 SCAAC-NS 内部对应深度处的 w_f 分别为 0.301%、0.144%、0.068% 和 0.028%。这主要是因为纳米 SiO_2 与碱激发溶液发生反应生成的硅酸盐凝胶,填充在砂、石、胶凝材料及其水化产物等组分间的空隙中,降低了 SCAAC-NS 的孔隙率,进而抑制侵蚀溶液向内部渗透。

2.2 氯离子总含量

3 种混凝土在不同氯盐侵蚀龄期下氯离子总含量 w_t 随深度的变化情况如图 4 所示。与游离氯

离子含量 w_f 的变化趋势一致, w_t 与距混凝土表面的深度呈负相关,与氯盐侵蚀龄期呈正相关,且较浅处 w_t 增长量大于较深处。以 SCAAC 为例,随着氯盐侵蚀龄期由 15 d 增加至 75 d, SCAAC 内部 3.0 mm 深度处的 w_t 增长量为 0.12%, 9.0、15.0 和 21.0 mm 深度处的 w_t 增长量分别为 0.10%、0.07% 和 0.03%, 为 3.0 mm 深度处 w_t 增长量的 83.33%、58.33% 和 25.00%。此外,3 种混凝土内部各深度处 w_t 的增长量均随氯盐侵蚀龄期的增加而减小。以 SCAAC 内部 3.0 mm 深度处为例,氯盐侵蚀龄期由 15 d 增至 30 d 时, w_t 的增长量为 0.05%, 侵蚀龄期由 30 d 至 45 d、45 d 至 60 d、60 d 至 75 d, w_t 的增长量分别为 0.03%、0.02% 和 0.02%。

各侵蚀龄期下 SCAAC 内部各深度处的 w_t 均低于 SCC。以氯盐侵蚀 15 d 为例, SCAAC 内部 3.0、9.0、15.0 和 21.0 mm 深度处的 w_t 为 0.38%、0.15%、0.05% 和 0.02%, 分别为 SCC 相同深度处 w_t 的 88.37%、83.33%、62.50% 和 50.00%。研究发现,内掺 2% 纳米 SiO_2 后各侵蚀龄期下 SCAAC-NS 内部不同深度处的 w_t 均有所降低。以氯盐侵蚀 75 d 为例, SCAAC 内部 3.0、9.0、15.0 和 21.0 mm 深度处的 w_t 分别为 0.50%、0.25%、0.12% 和 0.05%, 而 SCAAC-NS 相应深度处的 w_t 分别为 0.44%、0.21%、0.10% 和 0.04%。

2.3 氯离子结合能力

当各工况混凝土的氯离子总含量相同时,混凝土氯离子结合能力越强,其含有的游离氯离子越少,越适用于海工结构。本试验根据测得的游离氯离子含量 w_f 和氯离子总含量 w_t , 计算得到了不同氯盐侵蚀龄期下混凝土内部各深度处的结合氯离子含量 w_b , 见图 5。由图 5 可见,3 种混凝土

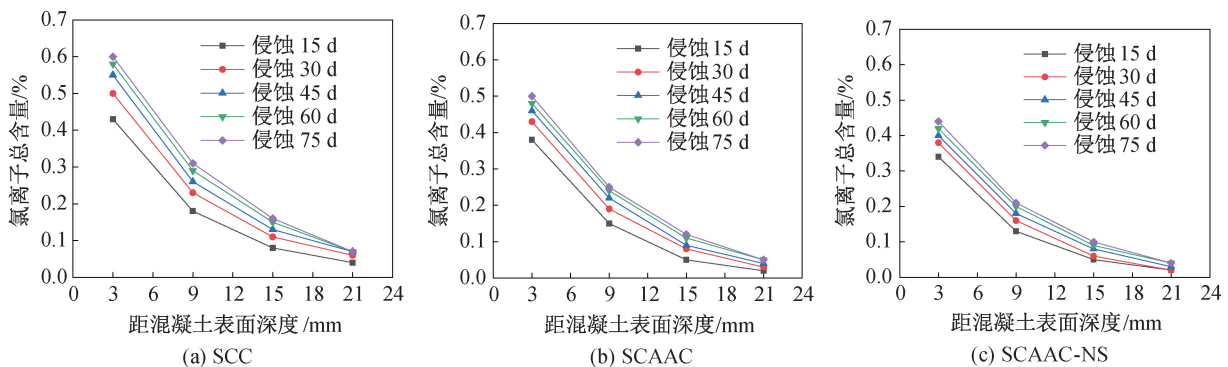


图4 自密实混凝土氯离子总含量随深度的变化

Fig. 4 Variation of total chloride ion content in self-compacting concrete with depth

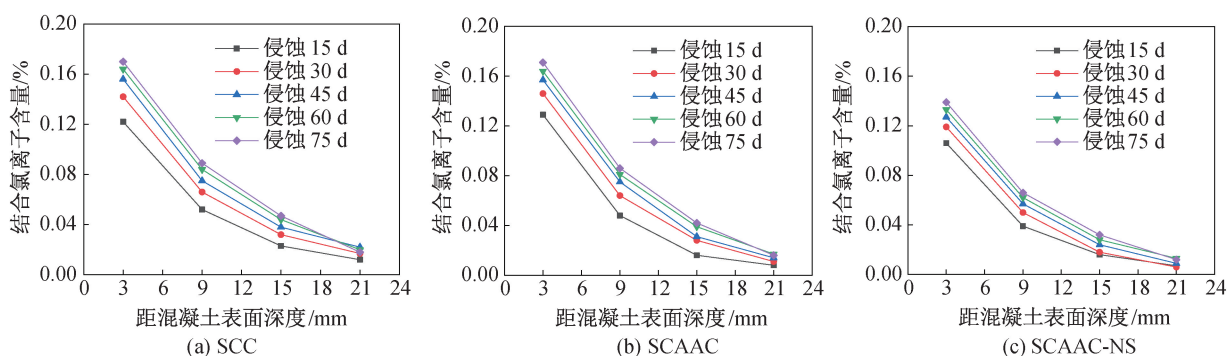


图5 自密实混凝土结合氯离子含量随深度的变化

Fig. 5 Variation of bound chloride ion content in self-compacting concrete with depth

内部 w_b 均与距混凝土表面的深度呈负相关,与氯盐侵蚀龄期呈正相关。

为进一步明确混凝土的氯离子结合能力,本文分析了3种混凝土内部结合氯离子含量 w_b 随游离氯离子含量 w_f 的变化趋势,如图6所示。混凝土内部的 w_b 与 w_f 线性相关,且随着 w_f 的增加, w_b 呈上升趋势。此外,SCAAC 的 w_b - w_f 曲线斜率最大,SCAAC-NS 次之,SCC 最小。本文选用线性模型模拟3种自密实混凝土的 w_b - w_f 关系曲线,见式(1)。

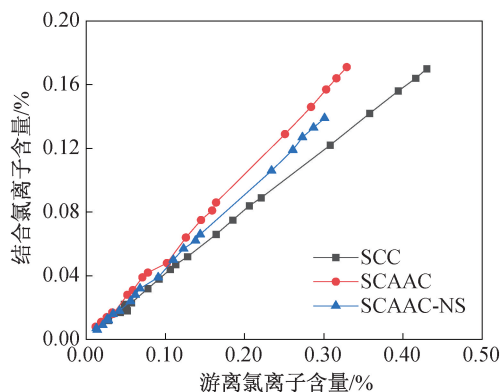


图6 自密实混凝土结合氯离子含量随游离氯离子含量的变化

Fig. 6 Variation of bound chloride ion content in self-compacting concrete with free chloride ion content

$$w_b = \alpha_{cl} w_f \quad (1)$$

式中: α_{cl} 为胶凝材料影响系数。

根据式(1)分别对 SCC、SCAAC 和 SCAAC-NS 的 w_b - w_f 曲线进行拟合,得到其 α_{cl} 值分别为 0.398、0.517 和 0.459,相关指数均为 0.999。 α_{cl} 实际上反映了混凝土结合氯离子的能力^[15],本试验 SCAAC 的氯离子结合能力比 SCC 提高了 29.90%,这主要归功于 SCAAC 中丰富的铝相及其特殊的基体结构^[11]。SCAAC-NS 的氯离子结合能

力比 SCAAC 降低了 11.22%,这是因为将纳米 SiO_2 内掺添加到 SCAAC 中,实际上减少了胶凝材料的用量,进而减少了能够结合氯离子的水化产物生成量。

2.4 表观氯离子扩散系数

干湿循环条件下混凝土中氯离子传输机制主要涉及毛细管吸附和扩散过程。考虑到本试验氯盐侵蚀以混凝土内部的氯离子扩散过程为主,同时为简化计算,本研究近似采用 Fick 第二扩散定律的解析解回归计算各氯盐侵蚀龄期下混凝土的表观氯离子扩散系数^[16-17],见式(2)。

$$w_f = w_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{d_{cl}}{2\sqrt{D_{a,t} t_{cl}}} \times 24 \times 60 \times 60 \right) \right] \quad (2)$$

式中: w_s 为混凝土表面氯离子含量,%; $D_{a,t}$ 为混凝土的表观氯离子扩散系数, mm^2/s ; d_{cl} 为距混凝土表面的深度, mm ; t_{cl} 为氯盐侵蚀龄期, d ; $\operatorname{erf}()$ 为误差函数。

不同侵蚀龄期下 SCC、SCAAC 和 SCAAC-NS 试件的表观氯离子扩散系数计算结果如图7所示。由图7可知,随着氯盐侵蚀龄期的增加,3种混凝土的 $D_{a,t}$ 均有所降低,且下降速率均先快后慢。以 SCAAC 为例,当氯盐侵蚀 15 d 至 30 d 时, $D_{a,t}$ 降低了 $5.0995 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$,而侵蚀 30 d 至 45 d、45 d 至 60 d、60 d 至 75 d 时, $D_{a,t}$ 分别降低了 1.8809×10^{-6} 、 0.9350×10^{-6} 和 $0.6900 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$,分别为侵蚀 15 d 至 30 d 时 $D_{a,t}$ 下降值的 36.88%、18.34% 和 13.53%。这主要是因为自密实混凝土试件中的胶凝材料持续水化,且试件烘干后孔隙溶液中氯离子浓度较高,阻碍了氯离子侵蚀进程^[15,17]。

混凝土表观氯离子扩散系数与氯盐侵蚀龄期的关系可用式(3)的模型描述^[16]。

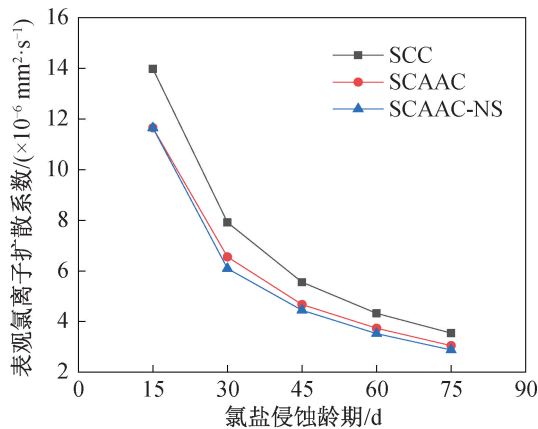


图7 自密实混凝土表观氯离子扩散系数随侵蚀龄期的变化

Fig. 7 Variation of apparent chloride diffusion coefficient of self-compacting concrete with erosion duration

$$\frac{D_{a,t}}{D_{a,0}} = \left(\frac{t_{cl,0}}{t_{cl}} \right)^\gamma \quad (3)$$

式中: $D_{a,0}$ 为氯盐侵蚀龄期 $t_{cl,0}$ 时混凝土中氯离子的表观扩散系数, mm^2/s ; $t_{cl,0}$ 为人为设定的基准氯盐侵蚀龄期, d; γ 为时变模型的经验系数。

本文设定氯盐侵蚀 15 d 为基准氯盐侵蚀龄期, 根据式 (3) 分别对 SCC、SCAAC 和 SCAAC-NS 进行拟合, 其 $D_{a,t}$ 时变模型见式 (4) (5) (6), 相关指数分别为 0.999 7、0.999 9 和 0.998 7, 均接近 1, 表明式 (3) 既适用于拟合自密实水泥混凝土, 也适用于自密实碱激发混凝土。

$$D_{a,t} = 13.9829 \times 10^{-6} \times \left(\frac{15}{t_{cl}} \right)^{0.841} \quad (4)$$

$$D_{a,t} = 11.6549 \times 10^{-6} \times \left(\frac{15}{t_{cl}} \right)^{0.829} \quad (5)$$

$$D_{a,t} = 11.6519 \times 10^{-6} \times \left(\frac{15}{t_{cl}} \right)^{0.883} \quad (6)$$

由图 7 可见, 各氯盐侵蚀龄期下自密实碱激发混凝土 (SCAAC、SCAAC-NS) 的 $D_{a,t}$ 均比自密实水泥混凝土 (SCC) 的 $D_{a,t}$ 低。以氯盐侵蚀 75 d 为例, SCAAC、SCAAC-NS 的 $D_{a,t}$ 分别为 SCC 的 86.04% 和 81.24%。这是因为自密实碱激发混凝土的基体结构比自密实水泥混凝土更致密, 抵抗氯盐侵蚀的能力更强。同时, 在自密实碱激发混凝土中内掺 2% 纳米 SiO_2 后, 各氯盐侵蚀龄期下的 $D_{a,t}$ 均有所下降。当氯盐侵蚀 75 d 时, SCAAC-NS 的 $D_{a,t}$ 比 SCAAC 降低了 5.58%, 这是因为掺入适量的纳米 SiO_2 能够增强自密实碱激发混凝土的密实程度 (图 8), 从而抑制侵蚀溶液向内部渗透。

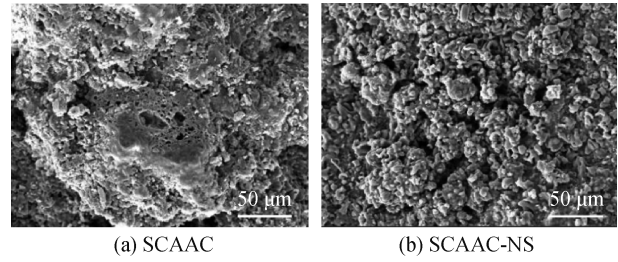


图8 自密实碱激发混凝土 SEM 图像

Fig. 8 SEM images of self-compacting alkali-activated concrete

3 结论

1) 氯盐侵蚀龄期与深度一定时, 自密实水泥混凝土 (SCC) 的游离氯离子含量最大, 自密实碱激发混凝土 (SCAAC) 次之, 2% 纳米 SiO_2 改性自密实碱激发混凝土 (SCAAC-NS) 最小。混凝土内部氯离子总含量的变化规律与游离氯离子含量完全一致。

2) 自密实混凝土结合氯离子的含量均与游离氯离子含量呈线性正相关。SCAAC 的氯离子结合能力比 SCC 提高了 29.90%, 而 SCAAC-NS 的氯离子结合能力相比 SCAAC 降低了 11.22%。

3) 自密实混凝土的表观氯离子扩散系数与氯盐侵蚀龄期呈负相关。SCAAC 的表观氯离子扩散系数低于 SCC, 掺入 2% 纳米 SiO_2 有助于进一步降低混凝土的表观氯离子扩散系数。

参考文献:

- [1] Hussien R M, Abd el-Hafez L M, Mohamed R A S, et al. Influence of nano waste materials on the mechanical properties, microstructure, and corrosion resistance of self-compacted concrete [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00859.
- [2] Shen Weiguo, Zhang Zheng, Li Jiangwei, et al. Experimental investigation on the high-volume fly ash ecological self-compacting concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 60: 105163.
- [3] Souayfan F, Rozière E, Paris M, et al. ^{29}Si and ^{27}Al MAS NMR spectroscopic studies of activated metakaolin-slag mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2022, 322: 126415.
- [4] Sun Xiaogang, Zhao Yingliang, Qiu Jingping, et al. Review: alkali-activated blast furnace slag for eco-friendly binders [J]. Journal of Materials Science, 2022, 57 (3): 1599-1622.
- [5] 王洪全, 范宏, 牛宝乐, 等. 不同材料对碱激发混凝土抗碳化性能影响研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学)

- 学版),2024,41(3):32-38+48.
- Wang Hongquan,Fan Hong,Niu Baole,et al. Study on the effect of different materials on the anti-carbonation properties of alkali-activated concrete[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition),2024,41(3):32-38+48.
- [6] 任宏伟,邓铤,丛耀宏,等. 铜尾矿地聚物混凝土研究及发展[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2025,47(3):10-21.
- Ren Hongwei,Deng Xin,Cong Yaohong,et al. Research and development of copper tailings geopolymer concrete [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition),2025,47(3):10-21.
- [7] 刘振涛,李秋义,魏红俊,等. 碱激发绿色建筑材料研究及应用[J]. 混凝土,2022(4):163-166.
- Liu Zhentao,Li Qiuyi,Wei Hongjun,et al. Research and application of alkali-activated green building materials [J]. Concrete,2022(4):163-166.
- [8] 王鑫焱,刘程,李秋义,等. 碱激发干硬性混凝土的制备及性能研究[J]. 混凝土,2024(8):184-187+192.
- Wang Xinyan,Liu Cheng,Li Qiuyi,et al. Preparation and performance study of alkali-activated dry hard concrete [J]. Concrete,2024(8):184-187+192.
- [9] 云振军,姚占全,何梁,等. 纳米 SiO_2 粉煤灰混凝土抗压强度影响及灰熵分析[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(5):467-474.
- Yun Zhenjun,Yao Zhanquan,He Liang,et al. Influence of nano- SiO_2 fly ash on compressive strength of concrete and grey entropy analysis[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2022,40(5):467-474.
- [10] 蒋建华,卢宸宸,师效哲,等. 纳米 SiO_2 改性粉煤灰混凝土力学性能及吸水特性研究[J]. 建筑科学与工程学报,2024,41(3):10-17.
- Jiang Jianhua,Lu Chenchen,Shi Xiaozhe,et al. Study on mechanical properties and water absorption characteristics of fly ash concrete modified by nano- SiO_2 [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2024,41(3):10-17.
- [11] 刘玉美,杨浪,饶峰,等. 氯离子对海工混凝土钢筋腐蚀的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2023,42(9):3059-3074.
- Liu Yumei,Yang Lang,Rao Feng,et al. Research progress of chloride ions on corrosion of marine concrete reinforcement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2023,42(9):3059-3074.
- [12] Jain S,Pradhan B. Fresh, mechanical, and corrosion performance of self-compacting concrete in the presence of chloride ions[J]. Construction and Building Materials,2020,247:118517.
- [13] 付颖,王婷,周凯,等. 自密实混凝土的非稳态氯离子渗透特性研究[J]. 混凝土,2024(12):70-73+79.
- Fu Ying,Wang Ting,Zhou Kai,et al. Research on non-steady-state chloride ion permeability characteristics of self-compacting concrete [J]. Concrete,2024(12):70-73+79.
- [14] 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 specification for concrete testing of port and waterway engineering[S].
- [15] 解国梁,申向东,姜伟,等. 干湿循环作用下氯离子在聚丙烯纤维混凝土中传输性能研究[J]. 硅酸盐通报,2021,40(6):2019-2025.
- Xie Guoliang,Shen Xiangdong,Jiang Wei,et al. Chloride ion transport in polypropylene fiber concrete under dry-wet cycle[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2021,40(6):2019-2025.
- [16] 钱金权,钱晓倩,张聪燕. 时间与拉应力耦合作用对混凝土中氯离子扩散影响[J]. 混凝土,2022(4):28-32.
- Qian Jinquan,Qian Xiaoqian,Zhang Congyan. Influence of coupled effects of time and tensile stress on chloride diffusion in concrete[J]. Concrete,2022(4):28-32.
- [17] 董伟,王栋,刘鑫,等. 干湿循环作用下风积沙混凝土中氯离子扩散研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(5):904-911.
- Dong Wei,Wang Dong,Liu Xin,et al. Chloride ion transport in aeolian sand concrete under dry-wet cycles [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2022,38(5):904-911.

(责任编辑 张爱丽)