

文章编号:1007-9629(2026)03-0293-08

氯离子与硫酸根离子在水泥浆体中的耦合扩散

汪伟^{1,2,*}, 范志宏^{1,2}, 杨海成^{1,2}, 唐博文^{1,2}

(1. 中交四航工程研究院有限公司 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510230;

2. 中交四航工程研究院有限公司 中交集团建筑材料重点实验室, 广东 广州 510230)

摘要:研究了不同复合盐环境下 Cl^- 与 SO_4^{2-} 在水泥浆体中的耦合扩散。结果表明:对于普通硅酸盐水泥浆体,复合氯盐溶液中的 SO_4^{2-} 早期会抑制 Cl^- 扩散,后期则转为促进作用;与复合氯盐溶液相比,亚硫酸盐溶液中 SO_4^{2-} 对 Cl^- 扩散的抑制作用更强,但该抑制作用随浸泡时间延长而减弱;普通硅酸盐水泥浆体对 Cl^- 的吸附能力较弱,在 SO_4^{2-} 作用下释放的自由 Cl^- 更易向浆体内部扩散,对 Cl^- 总扩散进程影响显著;矿渣-水泥浆体在单氯盐、复合氯盐及亚硫酸盐溶液中的 180 d 自由 Cl^- 扩散系数分别为 0.96×10^{-12} 、 0.81×10^{-12} 、 $0.77 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;矿渣-水泥浆体对 Cl^- 的吸附能力较强, SO_4^{2-} 作用下表层浆体释放的自由 Cl^- 易被内部浆体的水化产物重新吸附,对总体扩散进程影响较小。

关键词:复合盐环境;氯离子;硫酸根离子;扩散;吸附能力

中图分类号:TU528.33

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2026.03.002

Coupled Diffusion of Chloride and Sulfate Ions in Cement Pastes

WANG Wei^{1,2,*}, FAN Zhihong^{1,2}, YANG Haicheng^{1,2}, TANG Bowen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Harbor & Marine Structure Durability Technology of Transport Industry, CCCC Fourth Harbor

Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China; 2. Key Laboratory of Construction Material, CCCC

Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: The coupled diffusion of Cl^- and SO_4^{2-} in cement pastes under different composite salt environments was investigated. The results show that for ordinary Portland cement pastes, SO_4^{2-} in composite chloride solution inhibits Cl^- diffusion in the early stage but turns to promote it in the later stage. Compared to composite chloride solution, SO_4^{2-} in sulfite solution exerts a stronger inhibitory effect on Cl^- diffusion, yet this inhibition weakens with time extension. The adsorption capacity of ordinary Portland cement pastes for Cl^- is weak, and the free Cl^- released under SO_4^{2-} attack diffuse is more readily into the interior of the pastes, leading to significant influence on the overall Cl^- diffusion process. For slag-cement, the 180 d free Cl^- diffusion coefficients in single chloride, composite chloride and sulfite solutions are 0.96×10^{-12} , 0.81×10^{-12} and $0.77 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, respectively. Slag-cement pastes have strong adsorption capacity for Cl^- . Free Cl^- released from the superficial pastes is readily re-adsorbed by the hydration products of the inner pastes, resulting in a comparatively minor impact on the overall diffusion process.

Key words: composite salt environment; chloride ion; sulfate ion; diffusion; adsorption capacity

钢筋混凝土基础设施在海洋、盐湖、盐渍土等环境中服役时,腐蚀破坏风险较高。环境中的 Cl^- 与 SO_4^{2-} 是导致混凝土结构耐久性劣化的主要原因^[1-3],且两种离子在混凝土内部的扩散存在强耦合作

用^[4-7]。现有研究表明, SO_4^{2-} 对 Cl^- 在混凝土中扩散的作用包括抑制^[8-10]、促进^[11-12]及先抑制后促进^[13-14]。海水中 Cl^- 与 SO_4^{2-} 的浓度相对稳定,但不同地区盐湖、盐渍土环境中的两种离子浓度存在显著的地域

收稿日期:2025-05-13; 修订日期:2025-06-23

基金项目:中交集团应用基础研发项目(2024-ZJKJ-PTJS06)

第一作者(通讯作者):汪伟(1996—),男,安徽六安人,中交四航工程研究院有限公司工程师,硕士。E-mail:ww191203@126.com

差异。根据 GB/T 50942—2014《盐渍土地区建筑技术规范》,基于盐渍土中 Cl^- 浓度 C_1 与 SO_4^{2-} 浓度 C_2 的比值,将盐渍土分为氯盐($C_1/2C_2 > 2.0$)、亚氯盐($1.0 < C_1/2C_2 \leq 2.0$)、亚硫酸盐($0.3 < C_1/2C_2 \leq 1.0$)和硫酸盐($C_1/2C_2 \leq 0.3$)等。不同盐环境对混凝土结构耐久性的劣化作用存在显著差异,但相关规律尚未明确。

鉴于矿渣在抗氯盐侵蚀混凝土中的广泛应用,本文设计了一系列不同 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度的侵蚀溶液,同时开展普通硅酸盐水泥浆体、矿渣-水泥浆体浸泡侵蚀试验。达到设计浸泡时间后,进行 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量分布以及水化产物分析测试,旨在阐明不同复合盐环境下 Cl^- 、 SO_4^{2-} 在水泥浆体中的耦合扩散,为不同典型氯-硫服役环境下混凝土结构耐久性设计提供理论依据。

1 试验

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥(OPC),矿渣为 S95 矿渣,其化学组成(质量分数,文中涉及的含量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比)见表 1。拌和水符合 JGJ 63—2006《混凝土用拌合水》的要求。

1.2 试验设计

为模拟单氯盐(I)、复合氯盐(II)、亚硫酸盐(III)和硫酸盐(IV)服役环境,设计了 4 种 Cl^- 与 SO_4^{2-} 浓度的侵蚀溶液,其配合比见表 2。表中单氯盐(I)和复合氯盐(II)环境均属于氯盐环境,复合氯盐环境中存在一定含量的硫酸盐,但质量浓度低于亚硫酸盐(III)环境。普通硅酸盐水泥浆体(PC)的胶材为普通硅酸盐水泥;矿渣-水泥浆体(PG)的胶材组成为 60% 矿渣和 40% 普通硅酸盐水泥;浆体水胶比均为 0.5。成型尺寸为 100 mm 的立方体试件,标准养护 56 d 后,使用环氧树脂对试件的 5 个侧面进行涂

覆,留 1 个侧面进行侵蚀,达指定浸泡时间后进行测试。

1.3 测试方法

采用磨削机对试件侵蚀面进行逐层磨粉,以 2 mm 为间距分层磨削,磨削深度为 20 mm。将收集到的粉末置于真空干燥箱中 60 °C 烘干 2 h,随后称取 2.0~2.5 g 不同磨削深度的粉末,分别溶于稀 HNO_3 溶液/去离子水中,振荡 1 h 后静置 24 h。过滤提取滤液,采用自动电位滴定仪进行测试,酸溶(总)/水溶(自由) Cl^- 含量 $w(\text{Cl}^-)$ 为:

$$w(\text{Cl}^-) = \frac{M(\text{Cl}^-)C_1V}{m} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $M(\text{Cl}^-)$ 为氯离子的摩尔质量,取 35.5 g/mol; C_1 为滴定 Cl^- 浓度, mol/L; m 为粉末样品的质量, g; V 为 HNO_3 溶液/去离子水体积, L。

采用 BaSO_4 重量法^[15] 进行 SO_4^{2-} 含量测试。该方法测得的是外部硫酸盐侵入量与原材料本身含硫组分的总 SO_3 含量,通过减去原材料中的硫含量(10~20 mm 深度的 SO_3 含量平均值)可计算外部侵入的 SO_4^{2-} 含量 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 。称取约 0.5 g 粉末置于 200 mL 烧杯中,加入 40 mL 去离子水搅拌分散,再加入 10 mL 盐酸,加热并保持微沸 5~10 min;过滤,洗涤 10~12 次,收集全部滤液及洗液;加水稀释至约 250 mL,煮沸,缓慢加入 10 mL BaCl_2 溶液,静置 12~24 h,过滤、洗涤至检验无 Cl^- 。将沉淀与滤纸转移至坩埚中进行灰化,灰化完全后于 800~950 °C 高温下灼烧至质量恒定。 $w(\text{SO}_4^{2-})$ 计算式为:

$$w(\text{SO}_4^{2-}) = \frac{(m_1 - m_2) \times 0.343}{m_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中: m_1 为灼烧后沉淀的质量, g; m_2 为空白样品灼烧后沉淀的质量, g; m_3 为初始样品质量, g。

将试件浸泡至指定时间后,取表层水泥浆体粉

表 1 普通硅酸盐水泥和矿渣的化学组成

Table 1 Chemical compositions (by mass) of OPC and slag

Material	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	MgO	SO_3	IL	Other
OPC	21.51	58.05	7.37	4.16	0.51	1.76	2.85	1.92	1.87
Slag	35.92	37.10	12.53	0.33	0.48	11.20	1.14	0.08	1.22

Unit: %

表 2 侵蚀溶液的配合比

Table 2 Mix proportions of erosion solutions

Environment	$C_1/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$C_2/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NaCl})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Na}_2\text{SO}_4)/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
I	0.6	0	35	0
II	0.6	0.1	35	14
III	0.6	0.4	35	57
IV	0	0.4	0	57

末(2~4 mm)进行物相测试,采用X射线衍射仪(XRD),Cu靶(40 kV,40 mA),扫描范围为5°~90°,扫描速率2(°)/min。

2 结果与分析

2.1 不同环境对Cl⁻扩散的影响

利用Fick第二定律对Cl⁻扩散系数D与表面Cl⁻含量w_s进行拟合计算^[16-17]:

$$w(\text{Cl}^-) = w_0 + (w_s - w_0) \left[1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (3)$$

式中:x为侵蚀深度,mm;w₀为浆体初始Cl⁻含量,%;t为侵蚀时间,s。考虑到浆体表层非均匀性,拟合从x=4 mm处进行。

2.1.1 单氯盐环境

单氯盐环境下水泥浆体中Cl⁻含量分布见图1(图中R²为拟合相关系数)。由图1可见:矿渣-水泥浆体的总/自由Cl⁻扩散系数均明显小于普通硅酸盐水泥浆体;当浸泡时间为60、180 d时,普通硅酸盐水泥浆体中自由Cl⁻扩散深度分别超过了14、20 mm,而矿渣-水泥

浆体中自由Cl⁻扩散深度分别小于8、12 mm。

2.1.2 复合氯盐环境

复合氯盐环境下水泥浆体中Cl⁻含量分布见图2。结合图1和图2可见,矿渣-水泥浆体的抗氯盐侵蚀能力优于普通硅酸盐水泥浆体,较低浓度的SO₄²⁻对Cl⁻在两种水泥浆体中扩散的影响不同:(1)对于普通硅酸盐水泥浆体,60 d时SO₄²⁻抑制了Cl⁻向普通硅酸盐水泥浆体内部的扩散,单氯盐、复合氯盐环境下自由Cl⁻扩散系数分别为7.56×10⁻¹²、5.59×10⁻¹² m²/s。但在180 d时,单氯盐、复合氯盐环境下自由Cl⁻扩散系数分别为5.50×10⁻¹²、7.02×10⁻¹² m²/s,SO₄²⁻促进了Cl⁻扩散。(2)对于矿渣-水泥浆体,SO₄²⁻对Cl⁻扩散的影响较弱,单氯盐、复合氯盐环境下180 d自由Cl⁻扩散系数分别为0.96×10⁻¹²、0.81×10⁻¹² m²/s。

2.1.3 亚硫酸盐环境

亚硫酸盐环境下水泥浆体中Cl⁻含量分布见图3。结合图1~3可见:与复合氯盐环境相比,亚硫酸盐环境下溶液中的SO₄²⁻浓度更高,较高浓度的SO₄²⁻对普通硅酸盐水泥浆体中早期Cl⁻的扩散抑制作用更

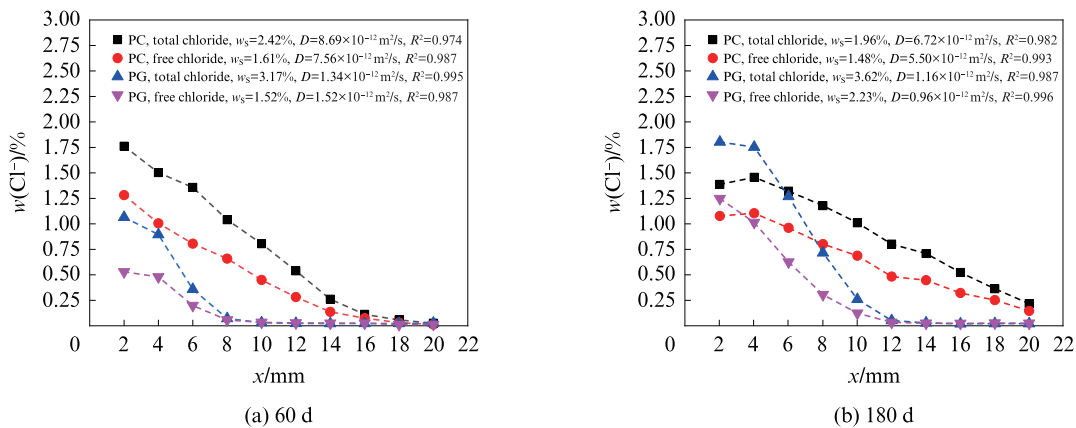


图1 单氯盐环境下水泥浆体中Cl⁻含量分布

Fig. 1 Distribution of w(Cl⁻) in cement pastes under single chloride environment

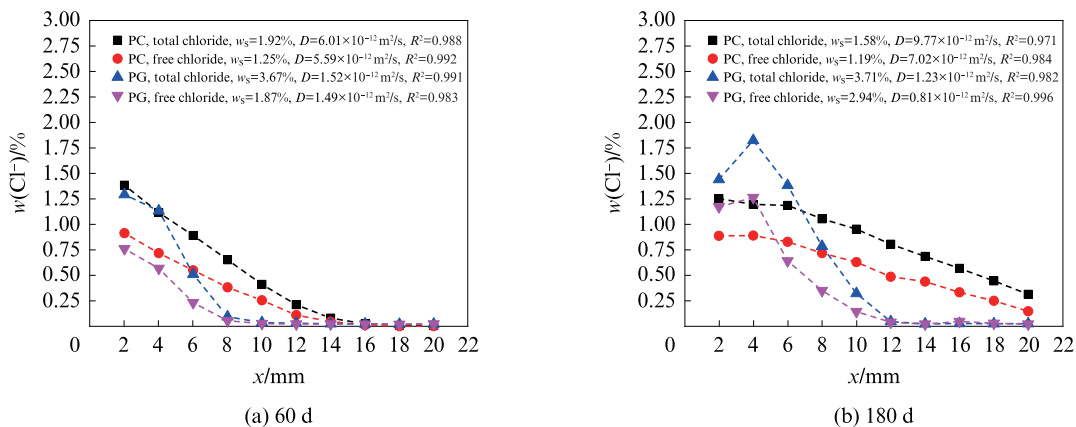


图2 复合氯盐环境下水泥浆体中Cl⁻含量分布

Fig. 2 Distribution of w(Cl⁻) in cement pastes under composite chloride environment

明显,60 d时其自由 Cl^- 扩散系数为 $2.73 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$,180 d自由 Cl^- 扩散系数进一步减小至 $2.27 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;亚硫酸环境的长期作用对矿渣-水泥浆体中 Cl^- 扩

散的影响弱于其对普通硅酸盐水泥浆体的影响,单氯盐、亚硫酸盐环境下180 d矿渣-水泥浆体的自由 Cl^- 扩散系数分别为 0.96×10^{-12} 、 $0.77 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

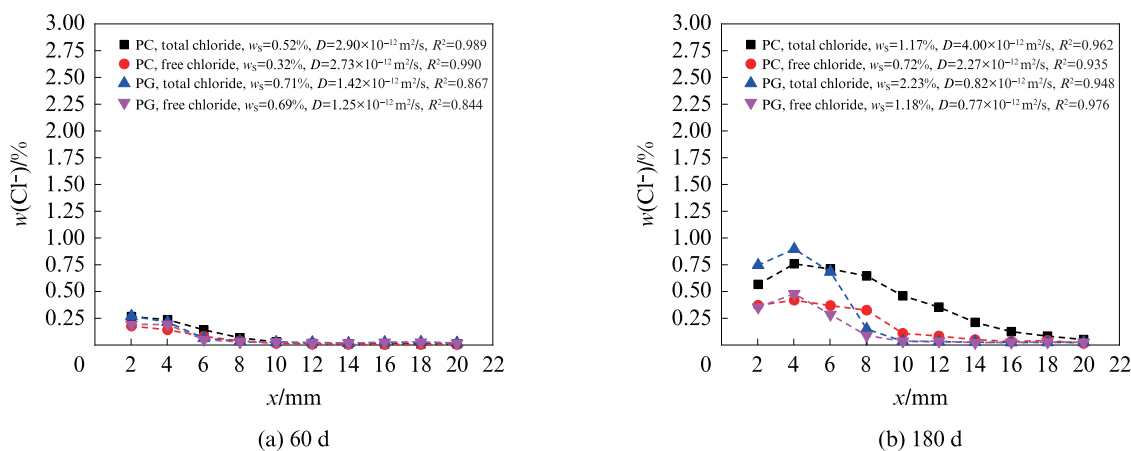


图3 亚硫酸盐环境下水泥浆体中 Cl^- 含量分布

Fig. 3 Distribution of $w(\text{Cl}^-)$ in cement pastes under sulfite environment

2.2 SO_4^{2-} 含量分布

水泥浆体中外部侵入 SO_4^{2-} 含量分布见图4。由图4可见: SO_4^{2-} 在浆体中的扩散深度远低于 Cl^- ,180 d时 SO_4^{2-} 扩散深度均小于6 mm;亚硫酸盐环境下浆体中外部侵入 SO_4^{2-} 含量明显低于硫酸盐环境下,即 Cl^- 可以抑制 SO_4^{2-} 扩散,这与现有的研究结论一致^[18]。 SO_4^{2-} 和 Cl^- 均可与水化产物反应, Cl^- 与单硫型水化硫铝酸钙(AFm)反应生成的Friedel盐会细化浆体孔隙,进而抑制 SO_4^{2-} 的扩散^[19-20]。此外,钙矾石(AFt)在氯盐溶液中有较高的溶解度^[21], Cl^- 可减少膨胀性水化产物对浆体微结构的损伤,从而抑制因微结构损伤引发的离子扩散加速。

2.3 水化产物

不同环境下水泥浆体水化产物的XRD图谱见图5。由图5可见:(1)与普通硅酸盐水泥浆体相比,

矿渣中铝相含量较高(见表1),水化过程中可形成更多的AFm,AFm能吸附孔溶液中的Friedel盐^[22]。(2)当浸泡60、180 d时,在单氯盐、复合氯盐及亚硫酸盐环境下,矿渣-水泥浆体中Friedel盐的衍射峰强度均高于普通硅酸盐水泥浆体,这表明在单氯盐和氯-硫复合环境下,矿渣-水泥浆体对 Cl^- 的吸附能力均优于普通硅酸盐水泥浆体。(3)60 d时不同浸蚀环境下,普通硅酸盐水泥浆体、矿渣-水泥浆体中AFt含量均处于较低水平;当浸泡时间延长至180 d时,AFt含量明显增大,且复合氯盐、亚硫酸盐环境下浆体的AFt含量均高于单氯盐环境,表明浆体中的Friedel盐会在 SO_4^{2-} 作用下转化为AFt^[23-24]。

2.4 Cl^- 吸附特性

采用Freundlich、Langmuir吸附曲线拟合水泥浆体的 Cl^- 吸附特性^[25],其表达式为:

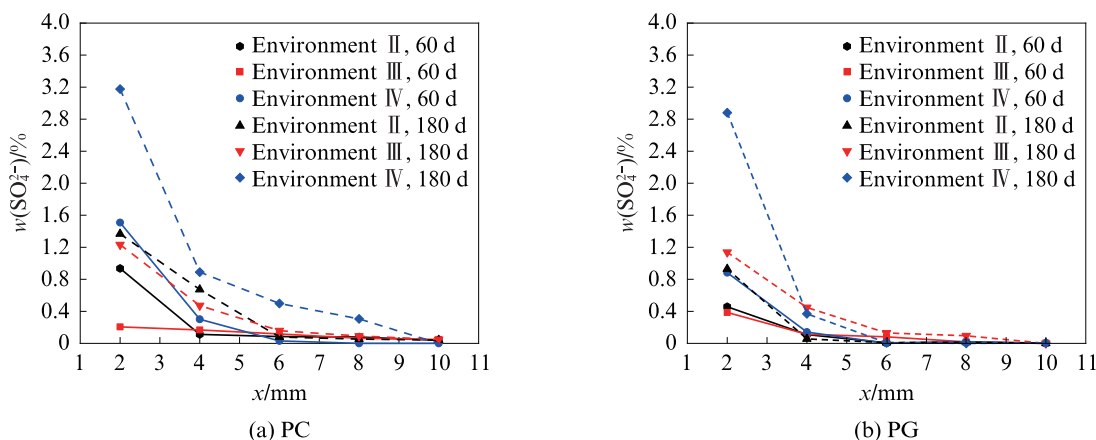


图4 水泥浆体中外部侵入 SO_4^{2-} 含量分布

Fig. 4 Distribution of $w(\text{SO}_4^{2-})$ in cement pastes

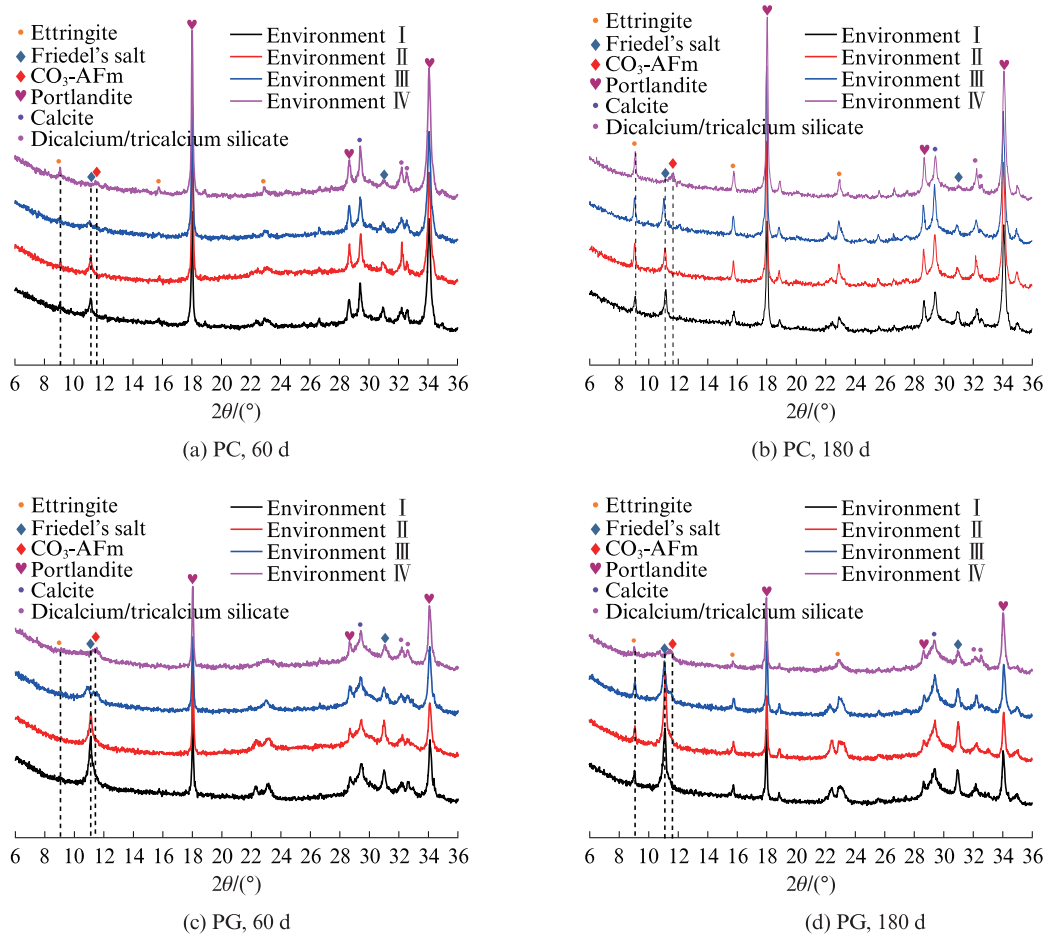


图5 不同环境下水泥浆体的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of cement pastes under different environments

$$w_b = \alpha w_f^\beta \quad (4)$$

$$w_b = \frac{aw_f}{1 + bw_f} \quad (5)$$

式中： α 、 β 均为Freundlich吸附曲线拟合的无量纲参数； a 、 b 均为Langmuir吸附曲线拟合的无量纲参数； w_b 为浆体中结合 Cl^- 含量，近似计算为酸溶（总） Cl^- 含量 w_t 与水溶（自由） Cl^- 含量 w_f 的差值^[26-28]。

不同环境下 Cl^- 的Freundlich和Langmuir吸附曲线见图6，其拟合参数见表3。结合图6和表3可见：矿渣-水泥浆体的Freundlich吸附曲线拟合参数 α 、 β 值均高于普通硅酸盐水泥浆体，表明其对 Cl^- 的吸附能力更强，这与前文结论一致； SO_4^{2-} 改变了浆体 Cl^- 的吸附特性，在亚硫酸盐溶液中 SO_4^{2-} 的作用下，普通硅酸盐水泥浆体Freundlich和Langmuir吸附曲线拟合相关系数 R^2 分别由60 d时的0.970、0.982降至180 d时的0.571、0.668；矿渣-水泥浆体对 Cl^- 的吸附特性受复合氯盐溶液中 SO_4^{2-} 影响更为显著，在该溶液中浸泡180 d时，Freundlich和Langmuir吸附曲线的拟合相关系数 R^2 分别减小为0.627、0.728。

2.5 相对 Cl^- 扩散系数及表面 Cl^- 含量

为进一步明确 SO_4^{2-} 对 Cl^- 在水泥浆体中扩散行为的影响，以单氯盐环境为参照基准，计算复合盐环境下浆体相对自由 Cl^- 扩散系数 R_D 、相对表面自由 Cl^- 含量 R_C 和相对 Cl^- 积分含量 R_T 。其中， Cl^- 积分含量用于表征 Cl^- 扩散总量，为自由 Cl^- 分布曲线的积分面积。

不同环境下水泥浆体的相对自由 Cl^- 扩散系数、相对表面 Cl^- 含量和相对 Cl^- 积分含量见图7。由图7可见：普通硅酸盐水泥浆体在复合氯盐、亚硫酸盐环境下的相对自由 Cl^- 扩散系数60 d时分别为73.9%、36.1%，180 d时分别为127.6%和41.3%；矿渣-水泥浆体在复合氯盐、亚硫酸盐环境下相对自由 Cl^- 扩散系数60 d时分别为98.0%、86.2%，180 d时分别为84.4%和80.2%。当溶液中存在 SO_4^{2-} 时， SO_4^{2-} 会通过孔隙向浆体内部扩散，先与 $Ca(OH)_2$ 反应生成 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ，进而与铝酸盐反应形成AFt。 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 和AFt密实了浆体的孔隙，因此，在60 d时，浆体的相对自由 Cl^- 扩散系数均减小， SO_4^{2-} 抑制了 Cl^- 扩散。但随着溶液中 SO_4^{2-} 浓度的增大， $Ca(OH)_2$ 持

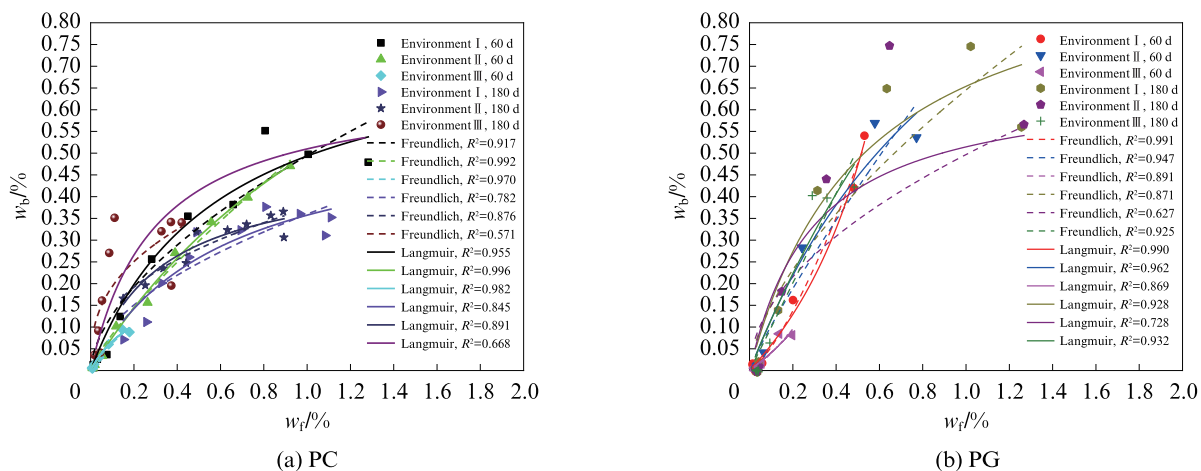


图6 不同环境下Cl⁻的Freundlich与Langmuir吸附曲线
Fig. 6 Freundlich and Langmuir adsorption curves of Cl⁻ under different environments

表3 吸附曲线的拟合参数

Table 3 Fitting parameters of Freundlich and Langmuir adsorption curves

Environment	Time/d	Freundlich				Langmuir			
		PC		PG		PC		PG	
		α	β	α	β	a	b	a	b
I	60	0.494	0.587	1.216	1.360	1.322	1.679	0.528	-0.876
II	60	0.516	0.791	0.766	0.875	0.809	0.629	1.277	0.877
III	60	0.381	0.780	0.751	1.287	0.9867	4.640	0.354	-1.125
I	180	0.360	0.541	0.640	0.636	0.944	1.641	1.874	1.890
II	180	0.373	0.413	0.493	0.520	1.487	3.138	2.216	3.347
III	180	0.457	0.374	1.030	1.018	5.216	13.837	1.230	0.545

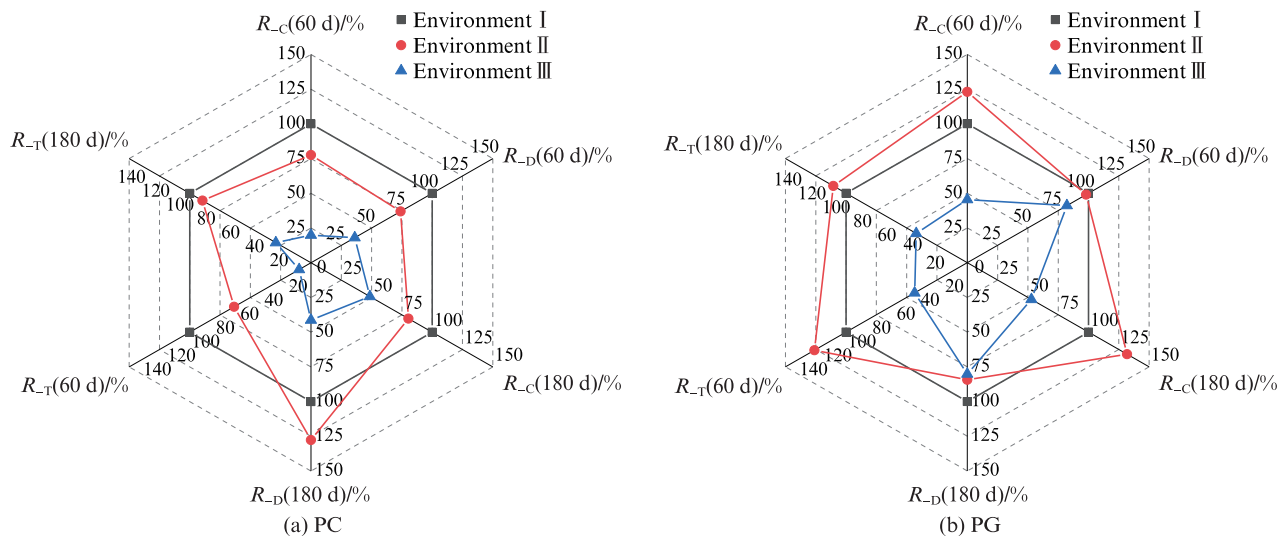


图7 不同环境下水泥浆体的相对自由Cl⁻扩散系数、相对表面Cl⁻含量和相对Cl⁻积分含量
Fig. 7 R_D , R_C and R_T of cement pastes under different environments

续反应导致孔溶液 pH 值下降, Friedel 盐稳定性降低, 其 Cl⁻ 被 SO₄²⁻ 置换并重新转化为自由 Cl⁻[24]; 同时, 持续生成的 AFt 可能导致微结构损伤[29]。这两方面因素的共同作用使得 SO₄²⁻ 对普通硅酸盐水泥浆体中 Cl⁻ 扩散的抑制作用随着浸泡时间的延长逐

渐减弱, 甚至转为促进作用。矿渣-水泥浆体水化产物中 AFm 含量更高, 对 Cl⁻ 的吸附能力更强。即便表层浆体部分 Friedel 盐与 SO₄²⁻ 反应释放自由 Cl⁻, 该部分 Cl⁻ 也会被深层浆体的 AFm 吸附, 且 SO₄²⁻ 在矿渣-水泥浆体中的扩散深度较小, 对浆体整体的

Cl⁻吸附能力影响有限,进而对自由Cl⁻总体扩散进程的影响较小。因此,矿渣-水泥浆体在复合氯盐、亚硫酸盐与单氯盐环境下的自由Cl⁻扩散系数相近。

3 结论

(1)复合氯盐溶液中的SO₄²⁻早期抑制普通硅酸盐水泥浆体中Cl⁻扩散,随浸泡时间延长抑制作用转变为促进作用。与复合氯盐溶液相比,亚硫酸盐溶液中SO₄²⁻对该类浆体Cl⁻扩散的抑制作用更强,但该抑制作用随浸泡时间延长减弱。SO₄²⁻对矿渣-水泥浆体中Cl⁻扩散的影响较弱,其在复合氯盐、亚硫酸盐环境下自由Cl⁻扩散系数与单氯盐环境相近。SO₄²⁻在水泥浆体中的扩散深度远低于Cl⁻,且Cl⁻会抑制SO₄²⁻向普通硅酸盐水泥浆体和矿渣-水泥浆体内部扩散。

(2)SO₄²⁻会改变浆体的Cl⁻吸附特性。亚硫酸盐溶液中,SO₄²⁻作用下普通硅酸盐水泥浆体Freundlich与Langmuir吸附曲线的拟合相关系数R²分别由60 d的0.970、0.982减小至180 d的0.571、0.668。在复合氯盐溶液中浸泡180 d后,矿渣-水泥浆体吸附曲线的拟合的相关系数R²分别减小至0.627、0.728。

(3)SO₄²⁻作用下Friedel盐稳定性变差,吸附Cl⁻转变为自由Cl⁻。普通硅酸盐水泥浆体对Cl⁻的吸附能力较弱,自由Cl⁻更易向浆体内部扩散,对Cl⁻整体扩散进程影响显著;矿渣-水泥浆体对Cl⁻的吸附能力较强,表层浆体释放的自由Cl⁻易被内部水化产物重新吸附,对Cl⁻整体的扩散进程影响较小。

参考文献:

- [1] EL-HACHEM R, ROZIÈRE E, GRONDIN F, et al. Multi-criteria analysis of the mechanism of degradation of Portland cement based mortars exposed to external sulphate attack[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(10):1327-1335.
- [2] 蒋金洋, 郑皓睿, 孙国文, 等. 硫酸盐侵蚀混凝土的数值模拟[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(10):1047-1053.
JIANG Jinyang, ZHENG Haorui, SUN Guowen, et al. Numerical simulation of sulfate attack in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10):1047-1053. (in Chinese)
- [3] 曹园章, 郭丽萍, 臧文洁, 等. 氯盐和硫酸盐交互作用下水泥基材料的破坏机理综述[J]. 材料导报, 2018, 32(23):4142-4149.
CAO Yuanzhang, GUO Liping, ZANG Wenjie, et al. Failure mechanism of cement-based materials subjected to the interaction between chloride and sulfate—A review[J]. Material Review, 2018, 32(23):4142-4149. (in Chinese)
- [4] SUN D D, CAO Z J, HUANG C F, et al. Degradation of concrete in marine environment under coupled chloride and sulfate attack: A numerical and experimental study[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17:e01218.
- [5] 张俊喜, 易博, 林德源, 等. 盐渍土环境下钢筋混凝土腐蚀的电化学研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2):390-396, 403.
ZHANG Junxi, YI Bo, LIN Deyuan, et al. Electrochemical study on the corrosion of reinforced concrete under saline soil environment[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2):390-396, 403. (in Chinese)
- [6] YU Y G, GAO W, FENG Y, et al. On the competitive antagonism effect in combined chloride-sulfate attack: A numerical exploration[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 144:106406.
- [7] 张成琳, 刘清风. 钢筋混凝土中氯盐和硫酸盐耦合侵蚀研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(1):69-77.
ZHANG Chenglin, LIU Qinfeng. Coupling erosion of chlorides and sulfates in reinforced concrete: A review [J]. Materials Reports, 2022, 36(1):69-77. (in Chinese)
- [8] WANG X X, LIU J P, JIN Z Q, et al. Real-time strain monitoring of reinforced concrete under the attacks of sulphate and chloride ions based on XCT and DIC methods[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 125:104314.
- [9] 王鹏刚, 莫芮, 隋晓萌, 等. 混凝土中氯盐-硫酸盐耦合侵蚀的化学-损伤-传输模型研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2):512-521.
WANG Penggang, MO Rui, SUI Xiaomeng, et al. Chemo-damage-transport model of combined chloride-sulfate attack in concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2022, 50(2):512-521. (in Chinese)
- [10] CHEN Y J, GAO J M, TANG L P, et al. Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2016, 106:650-658.
- [11] MAES M, DE B N. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 53:59-72.
- [12] ZHANG C L, CHEN W K, MU S, et al. Numerical investigation of external sulfate attack and its effect on chloride binding and diffusion in concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 285:122806.
- [13] 刘荣桂, 李欢, 陈好, 等. 海工混凝土受硫酸盐影响的氯离子扩散规律研究[J]. 混凝土, 2012(2):18-20, 24.
LIU Ronggui, LI Huan, CHEN Yu, et al. Research to the chloride diffusion impact of sulfate of marine concrete [J]. Concrete, 2012(2):18-20, 24. (in Chinese)
- [14] 金祖权, 孙伟, 张云升, 等. 混凝土在硫酸盐、氯盐溶液中的损伤过程[J]. 硅酸盐学报, 2006, 34(5):630-635.
JIN Zuquan, SUN Wei, ZHANG Yunsheng, et al. Damage of concrete in sulfate and chloride solution[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2006, 34(5):630-635. (in Chinese)
- [15] 朱浩宇, 薛鸿杰, 邵姝文, 等. 混凝土内部硫酸根离子检测方法及其扩散理论综述[J]. 混凝土, 2024(1):74-77.
ZHU Haoyu, XUE Hongjie, SHAO Shuwen, et al. Review of sulfate ion test method and diffusion law in concrete[J]. Concrete,

- 2024(1):74-77. (in Chinese)
- [16] LIU P, YU Z W, LU Z H, et al. Predictive convection zone depth of chloride in concrete under chloride environment[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 72:257-267.
- [17] BAO J W, WEI J N, ZHANG P, et al. Experimental and theoretical investigation of chloride ingress into concrete exposed to real marine environment [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 130:104511.
- [18] ZHANG M H, CHEN J K, LÜ Y F, et al. Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate-chloride ions[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 39:26-32.
- [19] SOTIRIADIS K, NIKOLOPOULOU E, TSIVILIS S. Sulfate resistance of limestone cement concrete exposed to combined chloride and sulfate environment at low temperature[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(8):903-910.
- [20] 刘加平, 刘玉静, 石亮, 等. 氯盐-硫酸盐对水泥基材料的复合侵蚀破坏[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(6):993-997.
LIU Jiaping, LIU Yujing, SHI Liang, et al. Combined attack of chloride-sulfate on cement-based materials[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(6):993-997. (in Chinese)
- [21] SHAHEEN F, PRADHAN B. Effect of chloride and conjoint chloride-sulfate ions on corrosion of reinforcing steel in electrolytic concrete powder solution(ECPS)[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101:99-112.
- [22] 汤昊源, 左晓宝, 邹欲晓, 等. 矿物掺合料对硅酸盐水泥净浆氯离子结合能力的影响[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(6):571-578.
TANG Haoyuan, ZUO Xiaobao, ZOU Yuxiao, et al. Influence of mineral admixtures on chloride binding capacity of Portland cement paste[J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(6):571-578. (in Chinese)
- [23] GENG J, EASTERBROOK D, LI L, et al. The stability of bound chlorides in cement paste with sulfate attack[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 68:211-222.
- [24] 耿健, 杨海明, 莫利伟. 硫酸钠溶液腐蚀对固化态氯离子稳定性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(6):919-925.
GENG Jian, YANG Haiming, MO Liwei. Effect of attack of sodium sulfate solution on the stability of bounded chloride ions [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(6):919-925. (in Chinese)
- [25] YUAN Q, SHI C J, DE SCHUTTER G, et al. Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment—A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1):1-13.
- [26] CHANG H L. Chloride binding capacity of pastes influenced by carbonation under three conditions [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 84:1-9.
- [27] 高宇宁, 朱海威, 余红发, 等. 基于南海岛礁暴露试验的混凝土服役寿命[J]. *硅酸盐学报*, 2025, 53(5):1177-1192.
GAO Yuning, ZHU Haiwei, YU Hongfa, et al. Service life of high-performance concretes based on durability exposure test of islands and reefs in the South China Sea[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2025, 53(5):1177-1192. (in Chinese)
- [28] 达波, 余红发, 麻海燕, 等. 南海岛礁普通混凝土结构耐久性的调查研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2016, 37(8):1034-1040.
DA Bo, YU Hongfa, MA Haiyan, et al. Investigation of durability of ordinary concrete structures in the South China Sea [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2016, 37(8):1034-1040. (in Chinese)
- [29] 邹笃建, 覃珊珊, 刘铁军, 等. 多离子溶液浸泡环境下氯离子在砂浆中的扩散性能[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(11):1817-1823.
ZOU Dujian, QIN Shanshan, LIU Tiejun, et al. Chloride ion diffusion in cement mortar in multi-ion solutions with various ions [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(11):1817-1823. (in Chinese)