

文章编号:1673-9469(2026)04-0056-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.04.007

海洋环境下粉煤灰蒸养混凝土抗离子侵蚀研究

凌梓峻¹,隋晓萌²,傅宁³,王鹏刚^{1*},潘崇根⁴,刘新科⁵

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中建筑港集团有限公司, 山东 青岛 266011;
3. 宁波蛟川构件有限公司, 浙江 宁波 315207; 4. 浙大宁波理工学院 土木建筑工程学院, 浙江 宁波 315100;
5. 宁波市轨道交通集团有限公司建设分公司, 浙江 宁波 315101)

摘要: 为探究不同粉煤灰掺量与养护制度对混凝土宏观力学性能、抗离子侵蚀及微观孔隙结构的影响规律,揭示粉煤灰掺量、养护制度与混凝土宏观性能及抗离子侵蚀能力的内在关联,通过力学性能、电位滴定和孔结构测试,系统研究了不同粉煤灰掺量和养护制度下混凝土宏观、微观性能。结果表明,混凝土抗压强度随粉煤灰掺量的增加而降低;相同粉煤灰掺量下,蒸汽养护(蒸养)混凝土1 d抗压强度比标准养护(标养)混凝土提高了36.2%。随着粉煤灰掺量的增加,蒸养混凝土氯离子结合能力逐渐提升,硫酸根离子反应系数略有降低,当粉煤灰掺量为45%时,蒸养混凝土宏观、微观性能最佳。蒸养试件的孔径峰值高于标养试件,蒸养导致试件过渡孔和毛细孔占总空隙率的比例升高、凝胶孔的占比降低。

关键词: 海洋大气区;粉煤灰;蒸养混凝土;离子传输;孔结构

中图分类号: TU528.41

文献标识码: A

Research on Ion Erosion Resistance of Steam-Cured Fly Ash Concrete Under Marine Environment

LING Zijun¹, SUI Xiaomeng², FU Ning³, WANG Penggang^{1*}, PAN Chonggen⁴, LIU Xinke⁵

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;
2. China Construction Port Group Ltd., Qingdao, Shandong 266011, China; 3. Ningbo Jiaochuan Component Co.,
Ningbo, Zhejiang 315207, China; 4. School of Civil Engineering and Architecture, NingboTech University, Ningbo,
Zhejiang 315100, China; 5. Construction Branch of Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315101, China)

Abstract: The influence laws of different fly ash dosage and curing regimes on the macroscopic mechanical properties, ion erosion resistance and microscopic pore structure of concrete are explored. The internal correlations among fly ash dosage, steam curing regime, macro-microscopic properties and ion erosion resistance of concrete are revealed. Through mechanical property tests, potentiometric titration and pore structure tests, the macroscopic and microscopic properties of concrete with different fly ash dosages and curing regimes are systematically investigated. The results show that the compressive strength of concrete decreases with the increase of fly ash dosage. At the same fly ash dosage, the 1 day compressive strength of steam-cured concrete is 36.2% higher than that of standard-cured concrete. With the increase of fly ash dosage, the chloride ion binding capacity of steam-cured concrete is gradually enhanced and the sulfate ion reaction coefficient decreases slightly. When the fly ash dosage reaches 45%, the steam-cured concrete exhibits the optimal macroscopic and microscopic properties. The pore size peak of steam-cured specimens is higher than that of standard-cured specimens and the steam curing increases the proportion of transition pores and capillary pores in the total porosity, while reducing the proportion of gel pores.

收稿日期:2025-03-27 修回日期:2025-05-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB3711400)

第一作者:凌梓峻(1999—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事混凝土结构耐久性方面的研究。

*通信作者:王鹏刚(1982—),男,山东青岛人,博士,教授,主要从事混凝土结构耐久性方面的研究。

Key words: marine atmospheric zone; fly ash; steam cured concrete; ion transport; pore structure

随着海洋强国与“一带一路”战略的持续推进,滨海基础设施建设规模不断扩大,预制混凝土构件被广泛应用于滨海建设。蒸汽养护(蒸养)作为常用的预制构件养护方法,可加快混凝土早期强度发展,从而提高构件生产效率。然而,蒸养混凝土在海洋环境中的耐久性不足^[1],其高孔隙率使混凝土更易受到氯离子(Cl^-)和硫酸根离子(SO_4^{2-})侵蚀,导致钢筋锈蚀和结构劣化,进而影响构件的长期服役性能^[2-3]。研究发现,掺加矿物掺合料(如粉煤灰、矿渣等)可显著提升混凝土的耐久性能^[4-6],是提高海洋环境下混凝土抗离子侵蚀性能的重要手段。

为推动绿色可持续发展、实现“双碳”目标,建筑行业用粉煤灰、矿渣等工业固废取代部分水泥已成为发展趋势。基于碳足迹控制需求^[7],以粉煤灰替代部分水泥,可减少水泥用量、降低碳排放。另外,掺加粉煤灰能够改善混凝土宏观、微观性能^[8-9]。国内外学者研究表明^[10-13],粉煤灰作为一种矿物掺合料,因其火山灰活性及微集料填充效应受到广泛关注。粉煤灰中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 等组分可与水泥水化产物发生二次水化反应,生成更多水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,从而优化混凝土微观孔结构,提高其致密性,并有效阻碍 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的迁移,进而显著提升混凝土耐久性能。

目前,关于蒸养混凝土复掺粉煤灰的研究较少,且针对实际海洋环境下蒸养混凝土与标准养护(标养)混凝土在力学性能、离子传输及孔结构方面的比较研究尚不充分,实际服役时蒸养混凝土

的耐久性和寿命难以准确预测。基于上述问题,本文系统研究了粉煤灰掺量和养护制度对暴露于海洋大气环境下混凝土抗离子侵蚀性能的影响。通过分析混凝土的孔结构和 Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量,揭示了粉煤灰掺量与养护制度对混凝土离子传输规律及微观特性的作用机制,为海工蒸养混凝土配合比优化提供理论依据与技术参考。

1 试验方案

1.1 试件制备与养护

本试验使用的胶凝材料为 P·II 52.5 硅铝酸盐水泥和 I 级低钙粉煤灰,其化学组成见表 1。细集料为细度模数 2.60 的河砂,粗集料为粒径 5~20 mm 的玄武岩石,水为实验室自来水,减水剂为聚羧酸型减水剂,减水效率 28%。

本试验设计 5 组混凝土配合比,见表 2。BF25 为试验对照试件,粉煤灰掺量为 25%,C100、F15、F25 和 F45 粉煤灰掺量分别为 0%、15%、25% 和 45%。每组配合比制备 39 个尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的试件,其中 27 个用于不同龄期的混凝土强度测试,12 个用于海洋环境下暴露试验。

为对比分析不同养护制度下试件的孔结构,本研究仅使用水泥、粉煤灰制备 BF25 和 F25 的净浆试件各 3 个,尺寸均为 40 mm×40 mm×40 mm。

将 BF25 净浆试件和混凝土试件放入标养室养护至 28 d,F25 净浆试件和 C100、F15、F25、F45 混凝土试件蒸养后,再移至标养室养护至 28 d。蒸养总时长为 8 h,预热、加热、恒温与降温阶段的

表 1 胶凝材料的化学组成

Tab.1 Chemical composition of cementitious materials									
材料	$\text{SiO}_2/\%$	$\text{TiO}_2/\%$	$\text{Na}_2\text{O}/\%$	$\text{K}_2\text{O}/\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\%$	$\text{CaO}/\%$	$\text{MgO}/\%$	$\text{SO}_3/\%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3/\%$
水泥	21.48	0.33	0.19	0.75	5.47	62.87	2.73	2.11	2.71
粉煤灰	46.60	1.50	0.17	0.51	36.20	6.16	0.34	0.22	6.60

表 2 混凝土配合比

Tab.2 Mixture proportion of regime						
编号	水泥/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	粉煤灰/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	砂/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	石子/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	水/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	减水剂/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
C100	460	0	780	1 021	145	5.06
F15	391	69	780	1 021	145	5.06
F25	345	115	780	1 021	145	5.06
BF25	345	115	780	1 021	145	5.06
F45	276	184	780	1 021	145	5.06

时长均为 2 h。加热阶段的升温速率和降温阶段的降温速率均为 12.5 °C/h, 蒸养结束时温度为 35 °C, 蒸养制度见图 1。

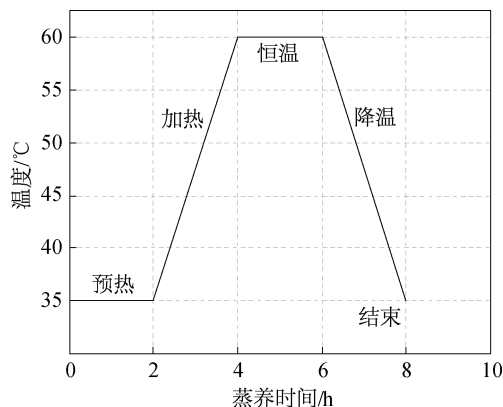


图 1 蒸养制度

Fig. 1 Steam curing regime

1.2 实海暴露试验

为了研究不同粉煤灰掺量的蒸养混凝土在海洋大气环境中的耐久性能, 本研究选取养护完成的混凝土试件开展实海暴露试验。试验前, 采用环氧树脂密封试件的 4 个侧面, 仅保留 2 个相对面作为侵蚀暴露面(暴露面不为浇筑面)。实海暴露场所为青岛小麦岛海洋暴露站, 其附近海域海水中的化学物质组成见表 3, 实海暴露试验见图 2。试件在暴露站大气区的暴露时间为 3 个月和 6 个月, 当混凝土试件达到暴露龄期后, 测试混凝土试件内部的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量。

表 3 海水化学物质组成

Tab. 3 Chemical composition of seawater

成分	质量浓度/(mg · L ⁻¹)	成分	质量浓度/(mg · L ⁻¹)
NO_3^-	12.76	NH_4^+	<0.04
HCO_3^-	161.29	Ca^{2+}	407.83
SO_4^{2-}	2 176.12	Mg^{2+}	1 177.38
Cl^-	17 533.33		

1.3 试验方法

1.3.1 氯离子含量测试

根据《混凝土中氯离子含量检测技术规程》(JGJ/T 322—2013)^[14], 将达到暴露龄期的混凝土试件按 1 mm 间隔分层打磨, 打磨后的粉末过 0.63 mm 标准筛, 即制得待测粉末。试样制备流程见图 3, 具体操作步骤见文献[10]。

自由氯离子含量、总氯离子含量和氯离子结合能力计算见式(1)(2)(3)。

$$w_f = \frac{c_{\text{AgNO}_3} \times V_1 \times 0.03545}{m \times V_2/V_3} \times 100\% \quad (1)$$

$$w_t = \frac{c_{\text{AgNO}_3} \times V_4 \times 0.03545}{m \times V_5/V_6} \times 100\% \quad (2)$$

$$R = \frac{w_b}{w_f} = \frac{w_t - w_f}{w_f} \quad (3)$$

式中: w_f 为自由氯离子含量, %; w_t 为总氯离子含量, %; w_b 为结合氯离子含量, %; R 为氯离子结合能力; c_{AgNO_3} 为 AgNO_3 溶液浓度, mol/L; m 为待测粉末质量, g; V_1 为浸泡粉末中自由氯离子使用



图 2 大气区实海暴露试验

Fig. 2 Atmospheric zone exposure test

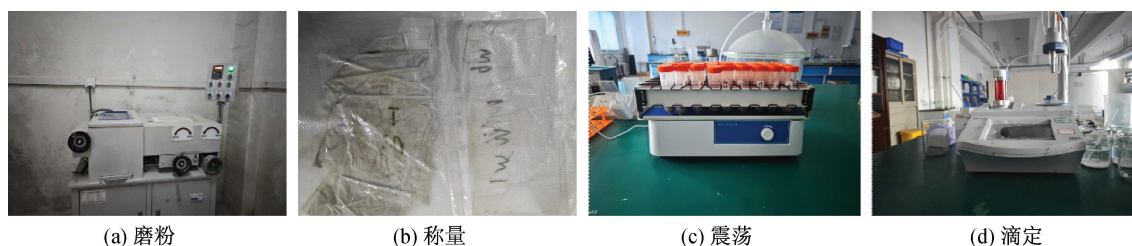


图 3 试样制备流程

Fig. 3 Sample preparation process

的去离子水量, mL; V_2 为滴定自由氯离子使用的浸泡粉末滤液量, mL; V_3 为每次滴定自由氯离子使用 AgNO_3 量, mL; V_4 为浸泡粉末中总氯离子使用的硝酸量, mL; V_5 为滴定总氯离子使用的浸泡粉末滤液量, mL; V_6 为每次滴定总氯离子使用 AgNO_3 量, mL。

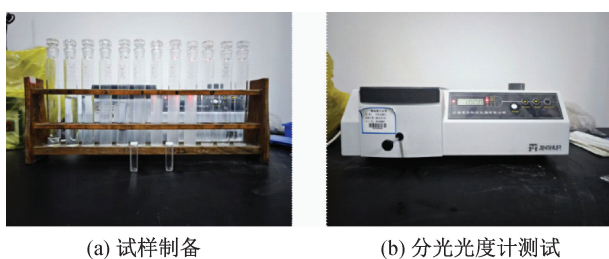
1.3.2 硫酸根离子含量测试

试验采用紫外分光光度计对实海暴露的混凝土试件水溶性与酸溶性 SO_4^{2-} 进行测试, 量化试件内部硫酸盐物理结晶和化学侵蚀情况, 测试过程如图4所示。研磨与制样过程与氯离子含量测定相同。采用 Na_2SO_4 标准溶液进行酸溶性 SO_4^{2-} 标定, 将标准溶液中 SO_4^{2-} 质量与酸溶性试验获得的吸光度值进行拟合, 得到酸溶性拟合公式, 见式(4)。混凝土内 SO_4^{2-} 含量计算见式(5)^[10]。

$$m_s = 0.43133 - 0.76411A + 7.27975A^2 \quad (4)$$

$$w_s = \frac{m_s}{1000 \times m \times V_8 / V_7} \times 100\% \quad (5)$$

式中: m_s 为 50 mL 酸溶液中 SO_4^{2-} 质量, mg; A 为吸光度值; w_s 为待测粉末中 SO_4^{2-} 的含量, %; V_7 为浸泡粉末中 SO_4^{2-} 使用的硝酸量, mL; V_8 为取用浸泡粉末中的硝酸量, mL。



(a) 试样制备

(b) 分光光度计测试

图4 分光光度计测定

Fig. 4 Spectrophotometric measurement

1.3.3 孔结构测试

试验采用低场核磁共振分析仪测定养护 28 d 净浆试件的孔隙率。测试前, 将养护完成的净浆试件制备成宽度、厚度均为 1~2 cm 的试样。将待测样放入真空加压保水设备进行保水处理, 保水 48 h 后将试件放入低场核磁测试皿中进行测试。孔径 d 的计算见式(6)^[10]。

$$d = 4\rho T \quad (6)$$

式中: ρ 为表面松弛度, 取值为 12, nm/ms^[15]; T 为孔隙水的弛豫时间, ms。

2 结果分析与讨论

2.1 蒸养粉煤灰混凝土抗压强度演变

图5为不同粉煤灰掺量下混凝土试件抗压强度。相较于标养混凝土试件 BF25, F25 试件蒸养结束时的抗压强度提高了 43.3%, 标养室内养护 1 d 时提高了 36.2%。养护至 28 d 时, F15、F25、BF25 和 F45 抗压强度分别为 59.6、58.3、62.9、45.1 MPa, BF25 抗压强度较 F25 提高 7.89%, 较 F15 提高 1.36%。

随着养护时间的增加, 标养试件与蒸养试件的抗压强度差值逐渐减小, 并最终超过蒸养试件。蒸养可提升粉煤灰混凝土试件的早期强度, 但会降低后期强度。对比 5 组试件发现, 在蒸养环境下, 试件抗压强度随粉煤灰掺量的增加而下降。这是因为高温促使水泥快速水化, 在短时间内形成大量水化产物, 但 C—S—H 凝胶快速硬化, 导致水泥内部水化不充分; 同时蒸养使粉煤灰被固化结构包裹, 后期火山灰反应受限^[5]。掺入粉煤灰会降低混凝土的抗压强度, 且掺量越多下降越明显。这是因为粉煤灰替代水泥削弱了早期水化胶凝速率, 且火山灰反应滞后, 蒸养条件下粉煤灰的活性受抑^[5]。

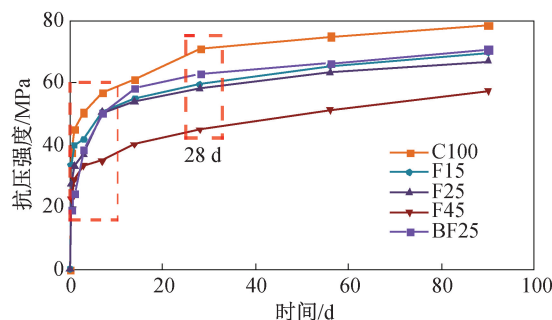


图5 不同粉煤灰掺量下混凝土试样的抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of concrete samples under different fly ash contents

2.2 蒸养粉煤灰混凝土氯离子传输与结合

图6、图7为不同混凝土试件的氯离子含量分布情况。在不同的暴露龄期下, 掺入粉煤灰的蒸养混凝土试件中自由氯离子、总氯离子含量均小于未掺加粉煤灰的试件(C100)。这是由于未掺粉煤灰试件内 Ca^{2+} 含量较高, 主要以 C—S—H 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 形式存在, 氯离子可与 C—S—H、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应生成 Friedel 盐, 且粉煤灰替代水泥削弱了早期水化胶凝速率。对比发现, 当粉煤灰掺量为 45% 时, 可最大程度降低蒸养混凝土内氯离子含量。

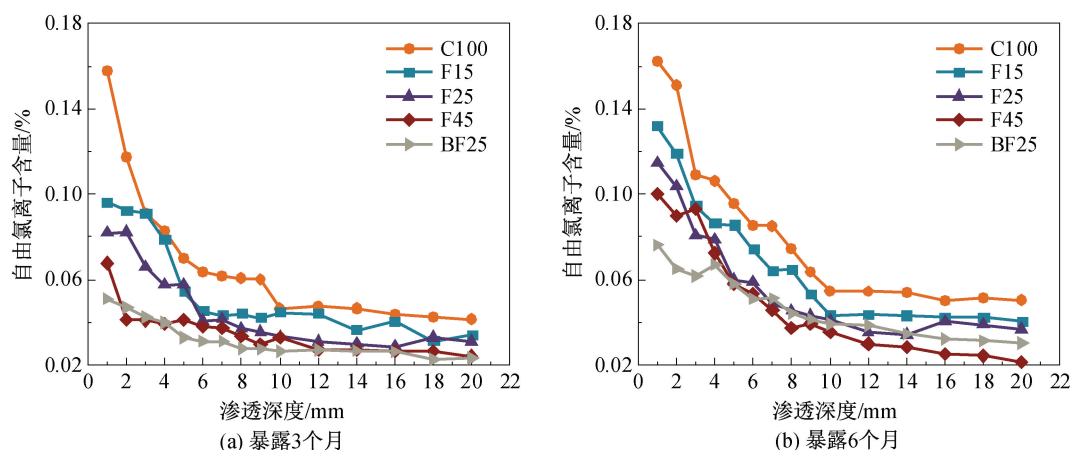


图6 不同养护制度下粉煤灰掺量对混凝土内部自由氯离子的影响

Fig. 6 Effect of fly ash dosage on free chloride ions in concrete under different curing regimes

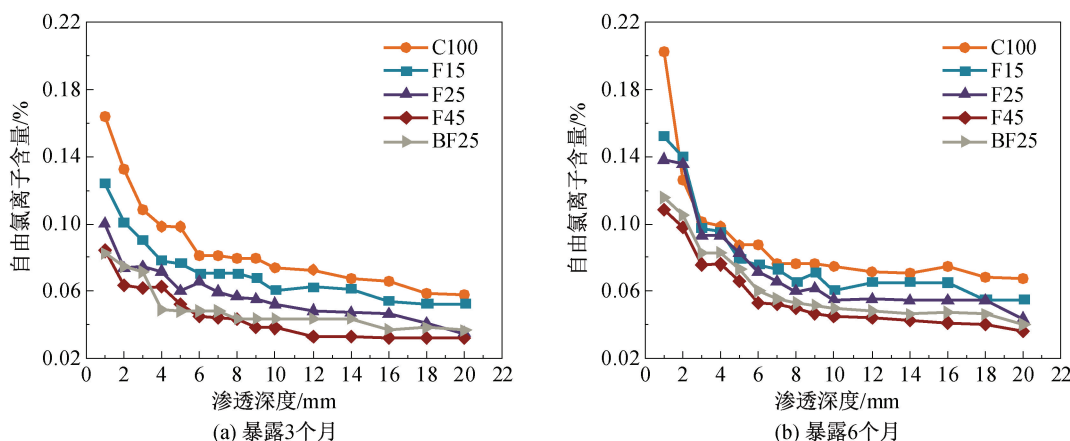


图7 不同养护制度下粉煤灰掺量对混凝土内部总氯离子的影响

Fig. 7 Effect of fly ash dosage on total chloride ions in concrete under different curing regimes

该结果说明粉煤灰替代部分水泥降低了混凝土内部水化速率,氯离子多以自由态附着于混凝土内,化学结合的氯离子含量减少,海水中氯离子向混凝土内部传输放缓;另外,粉煤灰的微集料填充效应降低了有害孔数量,使蒸养混凝土更密实^[8]。随着粉煤灰的掺入,蒸养混凝土表现出良好的抗氯离子侵蚀性能^[16-17]。蒸养 25% 掺量混凝土 (F25) 自由氯离子和总氯离子含量高于标养 25% 掺量的标养混凝土 (BF25)。这是由于蒸养加速了水泥颗粒水化, C—S—H 内部水化不充分, 造成蒸养混凝土内孔隙粗大, 在相同掺量下蒸养混凝土的孔结构更有利于有害离子传输渗透。

将氯离子扩散区不同深度处的自由氯离子含量代入式(7), 计算得到表层氯离子浓度与有效氯离子扩散系数 D 。

$$c(x, t) = c_0 + (c_s - c_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (7)$$

式中: $c(x, t)$ 为 t 龄期 x 位置氯离子浓度, mol/L;

c_0 为腐蚀前混凝土内氯离子浓度, mol/L; x 为距离表面的深度, mm; $\operatorname{erf}()$ 为高斯误差函数。

由图 8 可知, 蒸养时增加粉煤灰掺量可降低表面氯离子浓度。相同粉煤灰掺量下, 标养试件表面氯离子浓度低于蒸养试件, 氯离子扩散系数变化趋势与表面氯离子浓度一致。具体而言, 在大气区暴露 6 个月的 F45 氯离子扩散系数仅为 C100 的一半, F45 氯离子扩散系数比 F25 低 14.1%, 表明掺入粉煤灰提升了蒸养混凝土的抗氯离子侵蚀性能。这是因为粉煤灰的活性低于水泥, 取代部分水泥后整体活性降低, 粉煤灰的微集料填充效应提高了混凝土的抗氯离子传输性能^[11]。

由图 9 可知, 试件氯离子结合能力随暴露时间的增加呈下降趋势。究其原因, 随着暴露时间的增加, 粉煤灰蒸养混凝土试件内 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 逐渐被消耗, 削弱了混凝土化学结合氯离子能力, 且 SO_4^{2-} 的化学结合能力高于 Cl^- ^[18-22], SO_4^{2-} 会与 Friedel 盐

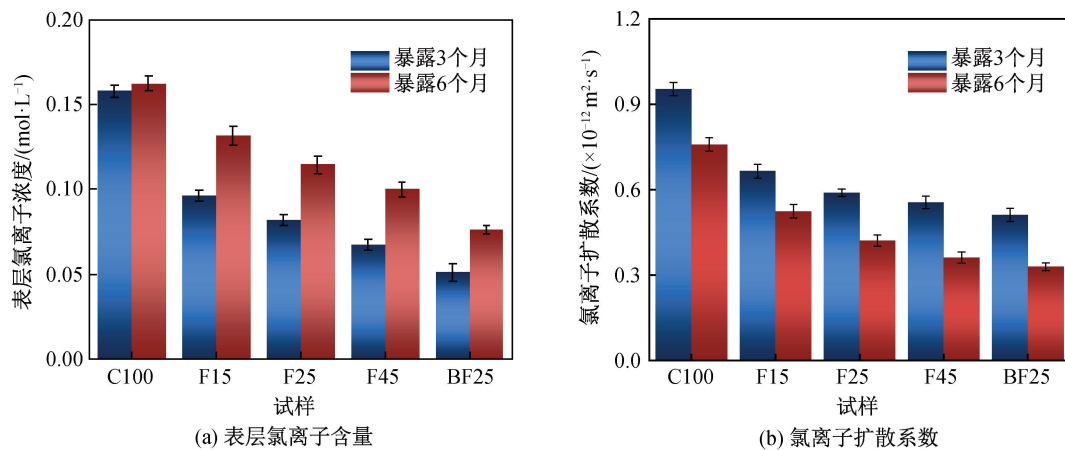


图8 不同养护制度下粉煤灰掺量对混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响

Fig. 8 Effect of fly ash dosage on chloride ion erosion resistance of concrete under different curing regimes

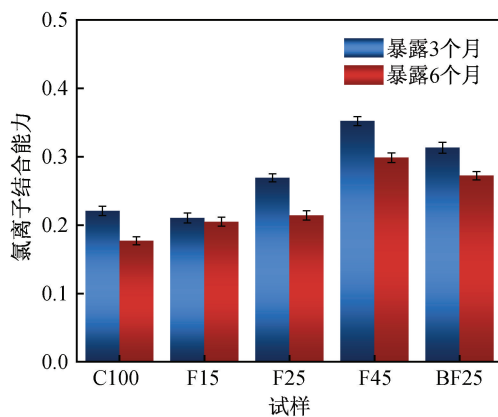
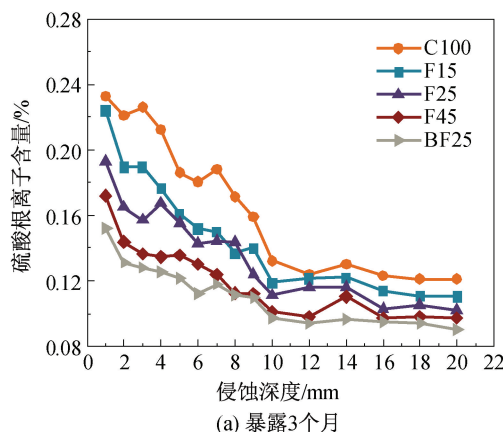


图9 粉煤灰掺量对混凝土氯离子结合能力的影响

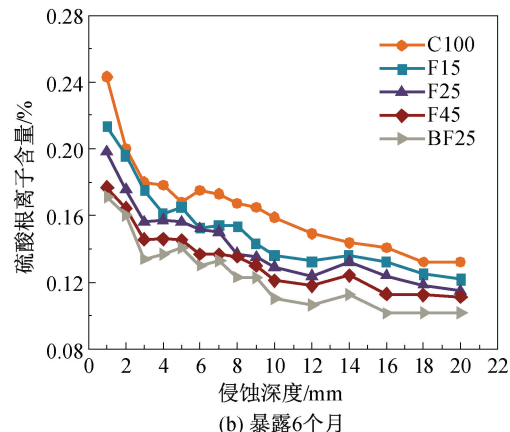
Fig. 9 Effect of fly ash dosage on chloride ion binding capacity of concrete under different curing regimes

中的 Cl^- 发生置换反应,进一步降低了试件的氯离子结合能力。试件氯离子结合能力随粉煤灰掺量的增加而提高,F45 试件氯离子结合能力为 0.352 1,相较于 F25 试件提高了 39.2%。

蒸养 25% 粉煤灰掺量试件 (F25) 的氯离子结



(a) 暴露3个月



(b) 暴露6个月

图10 粉煤灰掺量对混凝土内部酸溶性 SO_4^{2-} 含量的影响

Fig. 10 Effect of fly ash dosage on acid-soluble sulfate ions in concrete under different curing regimes

合能力低于标养试件 BF25,原因是蒸养加速了水泥早期水化,但部分水泥未能完全水化,未反应的铝相物质被包裹在 C—S—H 凝胶层内,无法与 Cl^- 反应,在很大程度上抑制了水泥后期的水化反应进程,导致氯离子结合能力下降。

2.3 蒸养粉煤灰混凝土硫酸根离子传输与结合

图 10 为不同粉煤灰掺量下混凝土试件中 SO_4^{2-} 含量随侵蚀深度变化情况。实海暴露 3 个月和 6 个月后,各试件 SO_4^{2-} 含量分别在侵蚀深度 14、16 mm 后趋于稳定, SO_4^{2-} 含量随粉煤灰掺量增加呈降低趋势。根据 SO_4^{2-} 反应系数变化(图 11)可知,随着粉煤灰掺量的增加, SO_4^{2-} 反应系数有所降低。F45 试件的 SO_4^{2-} 反应系数最低,C100 试件最高,表明 F45 试件抗硫酸盐侵蚀能力最强,C100 试件最弱。这是因为纯水泥体系中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量较高, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C—S—H 等水化产物加速了 SO_4^{2-} 的化学结合^[23-25]。BF25 试件的 SO_4^{2-} 反应系数低于 F25 试件,这是因为蒸养加速了水泥颗粒的水化,

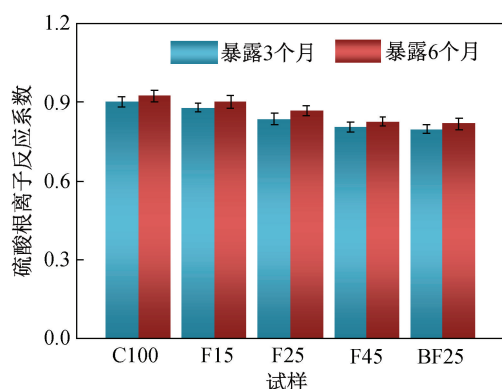


图 11 不同养护制度下粉煤灰掺量对混凝土硫酸根反应系数的影响

Fig. 11 Effect of fly ash dosage on sulfate ion reaction coefficient of concrete under different curing regimes

造成蒸养混凝土内孔隙粗大,在相同掺量下蒸养混凝土的孔结构更有利于有害离子传输渗透。对比发现,试件暴露 3 个月与 6 个月的 SO_4^{2-} 反应系数变化不大。这主要由于 SO_4^{2-} 传输较慢,与混凝土水化产物的化学反应存在滞后效应。

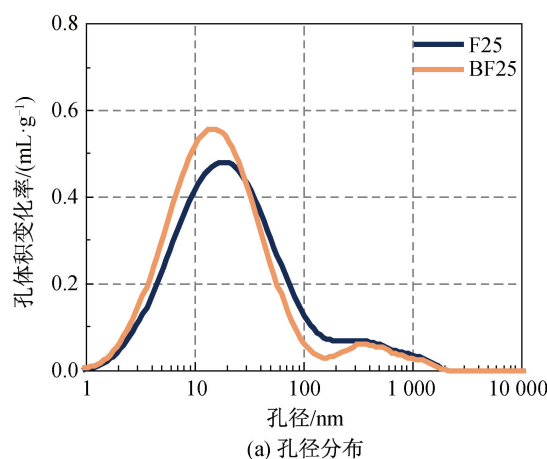
2.4 孔结构分析结果

混凝土孔径可分为 4 类^[23-25]:凝胶孔(<20 nm)、过渡孔(20~50 nm)、毛细孔(>50~200 nm)和大孔(>200 nm)。图 12 为净浆试件养护后的孔径分布和孔结构占比情况。由图 12(a)可知,蒸养净浆试件孔径峰值高于标养净浆试件,表明蒸养导致试件孔隙率升高、结构劣化。图 12(b)显示,蒸养试件的过渡孔占比较高。这是因为蒸养的高温、高湿环境加速了水泥水化,使早期 C—S—H 凝胶结构相对粗糙、孔隙疏松。此外, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 快速析出促进了大孔的形成,使大孔占比增加。水化产物非均匀分布可能导致微结构不致密,最终大孔、毛细孔和过渡孔的比例上升。

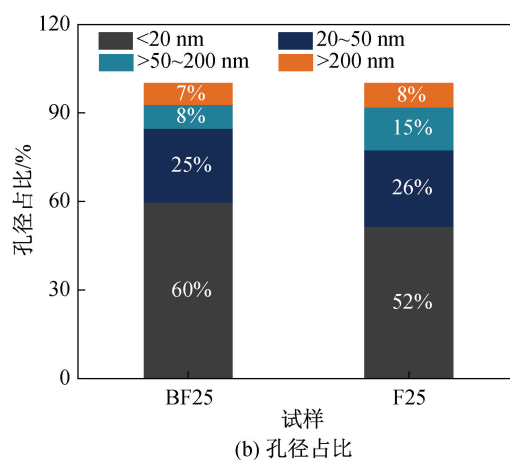
3 结论

1) 蒸养下混凝土试件生成更多的 C—S—H 凝胶,提高了试件早期宏观力学性能,蒸养混凝土试件 1 d 的抗压强度较标养试件提高了 36.2%。高温环境导致蒸养混凝土抗压强度增长缓慢,蒸养混凝土试件 28 d 抗压强度较标养试件降低了 7.89%。

2) 随着粉煤灰掺量的增加,蒸养混凝土的抗氯离子侵蚀性能逐渐增强,具体来说,45% 粉煤灰掺量比 25% 掺量下蒸养混凝土抗氯离子侵蚀性能提升了 14.1%,氯离子结合能力提升了 39.2%。



(a) 孔径分布



(b) 孔径占比

图 12 不同养护制度下 25% 粉煤灰掺量的孔结构分布

Fig. 12 Pore structure distribution of 25% fly ash dosage under different curing regimes

3) 与抗氯离子侵蚀相比,掺加粉煤灰的蒸养混凝土试件抗硫酸根离子侵蚀能力提升不显著,与其他掺量相比,粉煤灰掺量为 45% 时硫酸根反应系数最低。因此从抗离子侵蚀和矿物掺合料掺量角度分析,F45 是最优配合比试件。

4) 孔结构研究表明,与标养混凝土相比,蒸养导致水泥基材料浆体中有害孔和多害孔含量增大,凝胶孔含量减少,为有害离子侵蚀提供了大量迁移通道,降低了蒸养混凝土抗侵蚀性能。

参考文献:

- [1] Han Xiaofeng, Wang Penggang, Ling Zijun, et al. Optimization and performance regulation of pipe piles based on nano-calcium silicate hydrated (n-C—S—H) [J]. Cement and Concrete Composites, 2025, 158: 105977.
- [2] 刘镇. 海洋环境下混凝土氯离子渗透性评价[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(11): 2846-2856.

Liu Zhen. Chloride permeability evaluation of concretes in marine environment [J]. Journal of the Chinese Ceramic

- Society, 2023, 51(11): 2846-2856.
- [3] Xiao Junyi, Peng Jianxin, Yang Yiming, et al. Comprehensive assessment of prestress loss in post-tensioned prestressed concrete structures exposed to wet-dry cycles in chloride environments [J]. Engineering Structures, 2025, 328: 119691.
- [4] 修建得, 金祖权, 李宁, 等. 海洋盐雾环境下混凝土中氯离子传输研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(3): 771-785.
- Xiu Jiande, Jin Zuquan, Li Ning, et al. Research progress of chloride ion transport in concrete under marine salt spray environment [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(3): 771-785.
- [5] 杨维双, 宋特, 刘春阳, 等. 蒸养前后 C50 高性能混凝土性能对比研究[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(7): 41-45.
- Yang Weishuang, Song Te, Liu Chunyang, et al. Comparative study on properties of C50 high performance concrete before and after steam curing [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(7): 41-45.
- [6] 徐燕行, 乔宏霞, 曹锋. 不同掺合料对 MOCM 受侵蚀后界面粘结性能的影响[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2026, 44(4): 109-112.
- Xu Yanxing, Qiao Hongxia, Cao Feng. Effect of different admixtures on interfacial bonding properties of corroded MOCM [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2026, 44(4): 109-112.
- [7] Yoosuk P, Suksiripattanon C, Hiroki G, et al. Performance of polypropylene fiber-reinforced cellular lightweight fly ash geopolymer mortar under wet and dry cycles[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e03233.
- [8] 徐俊鹏, 赵天奇, 赵睿, 等. 蒸养条件下超掺粉煤灰混凝土强度与机理研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39(1): 49-54.
- Xu Junpeng, Zhao Tianqi, Zhao Rui, et al. Study on strength and mechanism of super blended fly ash concrete under steam curing conditions[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2025, 39(1): 49-54.
- [9] 封孝信, 刘刚. 泥土对混凝土性能的影响综述[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 46-65.
- Feng Xiaoxin, Liu Gang. A review of effect of clay on performance of concrete [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 39(2): 46-65.
- [10] 董升圆, 王秀林, 周建国, 等. 海洋大气区蒸养矿粉混凝土内部离子传输与反应[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 25-31.
- Dong Shengyuan, Wang Xiulin, Zhou Jianguo, et al. Internal ion transport and reaction of steam-cured slag concrete in marine atmosphere zone[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 40(4): 25-31.
- [11] 杨建波, 黄安, 王怀才, 等. 矿物掺合料对桥面板蒸养混凝土强度和抗渗性的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35(4): 104-110.
- Yang Jianbo, Huang An, Wang Huacai, et al. Effect of mineral admixture on strength and permeability resistance of steam-cured concrete for bridge deck[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2021, 35(4): 104-110.
- [12] 王玲, 户元辰, 付素娟. 蒸养复掺矿物混凝土抗碳化和抗氯离子性能研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(7): 73-78.
- Wang Ling, Hu Yuanchen, Fu Sujuan. Study on chloride resistance and carbonation resistance of steam curing concrete added with mineral admixture [J]. Building Science, 2020, 36(7): 73-78.
- [13] 李广, 李北星, 黄安, 等. 养护温度和矿物掺合料对蒸养混凝土脆性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 487-495.
- Li Guang, Li Beixing, Huang An, et al. Effects of curing temperature and mineral admixtures on brittleness of steam cured concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(2): 487-495.
- [14] JGJ/T 322—2013 混凝土中氯离子含量检测技术规程[S].
- JGJ/T 322—2013 Technical specification for test of chloride ion content in concrete[S].
- [15] She Anming, Yao Wu, Yuan Wancheng. Evolution of distribution and content of water in cement paste by low field nuclear magnetic resonance [J]. Journal of Central South University, 2013, 20(4): 1109-1114.
- [16] 延永东, 王鑫, 陆春华, 等. 干湿循环下机制砂粉煤灰混凝土的抗氯离子侵蚀性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 731-737.
- Yan Yongdong, Wang Xin, Lu Chunhua, et al. Resistance of manufactured sand concrete with fly ash to chloride ion attack under dry-wet cycle [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2023, 44(6): 731-737.
- [17] Cao Jian, Zou Ziyi, Zeng Pingheng. Mechanical properties of fly ash concrete after the coupling effects of sustained load and sulphate erosion [J]. Construction and Building Materials, 2025, 460: 139866.

- model[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 132-141.
- [20] 陈鹏宇,孔莹,余宏明. 岩石单轴压缩 PFC^{2D} 模型细观参数标定研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(5): 1240-1249.
- Chen Pengyu, Kong Ying, Yu Hongming. Research on the calibration method of microparameters of a uniaxial compression PFC^{2D} model for rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(5): 1240-1249.
- [21] 曹雪山,赖喜阳,额力素,等. PFC2D 中平行粘结参数对直剪强度参数的影响研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019, 36(3): 16-20.
- Cao Xueshan, Lai Xiyang, E Lisu, et al. Study on the influence of parallel bond parameters in PFC2D on the direct shear strength parameters[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 36(3): 16-20.
- [22] 张新松,李长圣,钟军,等. 基于神经网络的土石混合体 CT 图像分割及三维重建[J]. 工程地质学报, 2025, 33(3): 1230-1239.
- Zhang Xinsong, Li Changsheng, Zhong Jun, et al. CT image segmentation and 3D reconstruction of soilrock mixture based on neural network[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(3): 1230-1239.
- [23] 傅华,韩华强,凌华. 堆石料级配缩尺方法对其室内试验结果的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2645-2649.
- Fu Hua, Han Huaqiang, Ling Hua. Effect of grading scale method on results of laboratory tests on rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2645-2649.
- [24] 王有林,赵志祥,许晓霞,等. 西藏某水电站坝前大型冰水堆积体稳定性研究[J]. 西北水电, 2021(6): 38-43.
- Wang Youlin, Zhao Zhixiang, Xu Xiaoxia, et al. Study on the stability of a large outwash deposits in front of a power station dam in Tibet[J]. Northwest Hydropower, 2021(6): 38-43.
- (责任编辑 张爱丽)
-
- (上接第 63 页)
- [18] 丁瑶,田砾,刘孝华,等. 氯离子环境下混凝土裂缝的自愈合行为及对氯离子传输的抑制作用[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2025, 42(6): 21-28.
- Ding Yao, Tian Li, Liu Xiaohua, et al. The self-healing behavior of concrete cracks under chloride ion environment and its impact on the inhibitory effect of chloride ion transport[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2025, 42(6): 21-28.
- [19] 张腾腾,王传林,张宇轩,等. 粉煤灰掺量对海水海砂高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1677-1688.
- Zhang Tengting, Wang Chuanlin, Zhang Yuxuan, et al. Effect of fly ash content on performance of high performance concrete with seawater and sea sand[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(5): 1677-1688.
- [20] 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.
- [21] 郭丽萍,费香鹏,曹园章,等. 氯离子与硫酸根离子在水化硅酸钙表面竞争吸附的分子动力学研究[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 8034-8041.
- Guo Liping, Fei Xiangpeng, Cao Yuanzhang, et al. Molecular kinetics of competitive adsorption of chloride and sulphate ions on C—S—H surface[J]. Materials Reports, 2021, 35(8): 8034-8041.
- [22] Wang Penggang, Mo Rui, Zhou Xiangming, et al. A chemo-thermo-damage-transport model for concrete subjected to combined chloride-sulfate attack considering the effect of calcium leaching[J]. Construction and Building Materials, 2021, 306: 124918.
- [23] 董瑞鑫,申向东,薛慧君,等. 干湿循环与风沙吹蚀作用下风积沙混凝土的抗硫酸盐耐久性[J]. 材料导报, 2020, 34(20): 20053-20060.
- Dong Ruixin, Shen Xiangdong, Xue Huijun, et al. Sulfate durability of aeolian sand concrete under dry-wet cycles and sand blowing[J]. Materials Reports, 2020, 34(20): 20053-20060.
- [24] 余亮,傅平丰,邓威,等. 联合活化多元辅助胶凝材料对蒸养混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(9): 3059-3067.
- She Liang, Fu Pingfeng, Deng Wei, et al. Effect of combined activation multiple supplementary cementitious material on performance of steamed concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(9): 3059-3067.
- [25] 马东,王成生,周建国,等. 粉煤灰掺量对 HDCC 力学及收缩性能的试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 60-66.
- Ma Dong, Wang Chengsheng, Zhou Jianguo, et al. Experimental study on the effect of fly ash content on the mechanical and shrinkage properties of HDCC[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2023, 40(4): 60-66.
- (责任编辑 张爱丽)