文章编号:1673-9469(2023)04-0025-07 DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.04.004

海洋大气区蒸养矿粉混凝土内部离子传输与反应

董升圆[1],王秀林[2],周建国[3],隋晓萌[4],李 涛[2],田 砾[1*]

(1.青岛理工大学 土木工程学院,山东 青岛 266033;2.济南通达公路工程有限公司,山东 济南 250200;
3.山东路桥青岛分公司,山东 青岛 266033;4.中建筑港集团有限公司,山东 青岛 266011)

摘要:处于滨海大气区的钢筋混凝土结构容易受到氯离子、硫酸根离子等有害离子的侵害,导致结构服役寿命缩短。通过低场核磁等试验研究了蒸养、标养混凝土的孔径分布,揭示了氯离子、硫酸根离子对蒸养混凝土的侵蚀演变规律。结果表明,相比于标养混凝土,蒸养混凝土的无害孔含量降低,有害孔和多害孔含量增大,导致具有更高水化程度蒸养混凝土的抗压强度低于标养混凝土抗压强度。掺入一定量的矿粉可以显著提高蒸养混凝土抗氯离子侵蚀能力,氯离子结合能力越大,氯离子扩散系数越小,表层氯离子浓度越低。当矿粉掺量为25%时,蒸养混凝土的氯离子扩散系数较低,说明矿粉的二次水化作用优化孔径效果达到最佳;随着矿粉掺量的增加硫酸根离子反应系数逐渐降低,当矿粉掺量为50%时,由于混凝土中的钙相物质含量最低,导致硫酸根离子的反应系数最小。

关键词:大气区;蒸养混凝土;孔结构;氯离子传输;硫酸根离子侵蚀

中图分类号:TU528.4 **文献标识码**:A

Internal Ion Transport and Reaction of Steam-cured Slag Concrete in Marine Atmosphere Zone

DONG Shengyuan[1], WANG Xiulin[2], ZHOU Jianguo[3], SUI Xiaomeng[4], LI Tao[2], TIAN Li[1*]

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;
2. Jinan Tongda Highway Engineering Co., Ltd., Jinan, Shandong 250200, China;
3. Shandong Road and Bridge Group Co. Ltd., Qingdao, Shandong 266033, China;
4. China Construction Port Group Ltd., Qingdao, Shandong 266011, China)

Abstract: Reinforced concrete structures located in coastal atmospheric areas are susceptible to harmful ions such as chloride ions and sulfate ions, resulting in a shortened service life of the structure. The pore size distribution of steam-cured and standard-cured concrete was studied through low-field nuclear magnetic resonance experiments, revealing the corrosion evolution law of chloride ions and sulfate ions on steam-cured concrete. The results indicate that compared to standard cured concrete, the harmless pore content of steam-cured concrete decreases, while the harmful and multi-harmful pore content increases, resulting in a higher degree of hydration. The compressive strength of steam-cured concrete is lower than that of standard-cured concrete. Adding a certain amount of mineral powder can significantly improve the resistance of steam-cured concrete to chloride ion corrosion. The greater the chloride ion binding ability, the smaller the chloride ion diffusion coefficient, and the lower the surface chloride ion concentration. When the content of mineral powder is 25%, the chloride ion diffusion coefficient of steam-cured concrete is low, indicating that the optimal pore size effect of the secondary hydration of mineral powder is achieved; As the amount of mineral powder increases, the reaction coefficient of sulfate ions gradually decreases. When the amount of mineral powder is 50%, the reaction coefficient of

收稿日期:2023-04-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278263)

作者简介:董升圆(1999-),男,河南信阳人,硕士研究生,主要从事机制砂混凝土性能方面的研究。

*通讯作者:田砾(1972-),女,山东青岛人,博士,教授,主要从事混凝土结构防护与修复方面的研究。

sulfate ions is the lowest due to the lowest content of calcium phase substances in concrete.

Key words: atmosphere zone; steam cured concrete; pore structure; chloride penetration; sulfate attack

混凝土制品具有生产周期短、质量易于控制、施工效率高等优点,在城市建设、地铁工程、铁路交通、电力输送以及工业与民用建筑等领域得到广泛的应用,特别是近几年来在“新型建筑工业化”“新型城镇化”等战略的推动下,混凝土制品成为混凝土行业的重要发展趋势[1]。目前,混凝土制品普遍采用蒸养或蒸压等湿热养护方式加速制品的早期强度发展,但蒸汽或者蒸压养护会导致混凝土内部孔隙分布更加粗大,水化产物的排列更加松散[2],为氯离子、硫酸根离子等侵入混凝土制品提供便利通道,耐久性差[3-4]。来自海洋的离子经常被海风输送到大气区的建/构筑物表面,由于重力沉降作用,这些离子会沉积在不饱和混凝土的表层。当氯离子渗透到混凝土中并积聚在混凝土内部钢筋附近时,会导致钝化膜破坏,引发混凝土内部的钢筋锈蚀,甚至导致混凝土开裂和剥落[5-6]。硫酸根离子会与胶凝材料发生化学反应生成 AFt、石膏等低溶解度、膨胀性产物,引起混凝土开裂。目前,国内外学者在标准养护混凝土离子传输方面开展了系统的研究[7],但是蒸养混凝土内部离子传输与反应方面的研究不多,导致很难准确地预测海洋大气区的混凝土制品服役寿命。针对上述问题,通过海洋大气区暴露试验,研究了不同矿粉掺量蒸养混凝土的氯离子传输与结合,硫酸根离子的传输与反应规律,为海洋大气区装配式结构耐久性评估和寿命预测提供理论依据。

1 试验方案

1.1 试件制备与养护

试验采用 P·II 52.5 硅酸盐水泥,S95 级矿粉,I 级粉煤灰,其化学组成见表 1。细骨料为细度模数为 2.6 的河砂,粗骨料为粒径 5~20 mm 的玄武岩石子,物理指标见表 2,级配如图 1 所示。拌和水为自来水,减水剂选用的是聚羧酸高效减水剂,减水率为 28%。

表 1 水泥、矿粉化学组成

Tab. 1 Chemical composition of cement and slag

成分	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	TiO_2	Na_2O	K_2O
水泥	21.48	5.47	2.71	62.87	2.73	2.11	0.33	0.19	0.75
矿粉	29.90	15.40	0.43	41.60	7.83	2.20	0.81	0.56	0.46

表 2 粗骨料物理指标

Tab. 2 Physical indicators of coarse aggregates

压碎值/%	表观密度/($m^3 \cdot kg^{-1}$)	松散堆积密度/($m^3 \cdot kg^{-1}$)	紧密堆积密度/($m^3 \cdot kg^{-1}$)
11.8	2 703	1 487	1 583

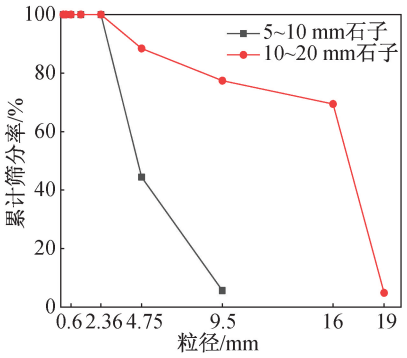


图 1 粗骨料级配曲线

Fig. 1 Coarse aggregate grading curve

试验所采用的净浆水胶比为 0.32,净浆配合比和混凝土配合比如表 3 和表 4 所示。此外还设置了 BC100,BS25 的标准养护对照组。

表 3 净浆配合比

Tab. 3 Mix proportion of paste

编号	胶凝材料组成
C100	100%水泥
S15	85%水泥+15%矿粉
S25	75%水泥+25%矿粉
S50	50%水泥+50%矿粉

表 4 混凝土配合比

Tab. 4 Mix proportion of concrete

编号	水泥/($kg \cdot m^{-3}$)	矿粉/($kg \cdot m^{-3}$)	砂/($kg \cdot m^{-3}$)	石子/($kg \cdot m^{-3}$)	水/($kg \cdot m^{-3}$)	减水剂/%
C100	460	0	780	1 021	145	1.1
S15	391	69	780	1 021	145	1.1
S25	345	115	780	1 021	145	1.1
S50	230	230	780	1 021	145	1.1

净浆试件的尺寸为 40 mm×40 mm×40 mm,混凝土试件尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm。新拌净浆和混凝土试件装入模具后,放入蒸汽养护箱进行养护,养护制度如图 2 所示。蒸汽养护后,将试件移至标准混凝土养护室($T=(20\pm2)$℃,RH≥95%)养护至 28 d。

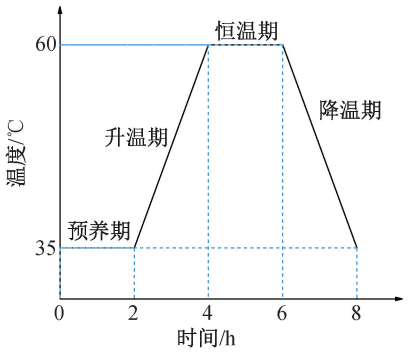


图 2 净浆和混凝土试件蒸养制度

Fig. 2 Steam curing system of paste and concrete specimens

1.2 实海暴露试验

将养护至 28 d 的混凝土试件四个面用环氧树脂密封,留两个相对面作为侵蚀面,试件放置在青岛小麦岛海洋暴露站的大气区,定期取样,并测试样品中的氯离子和硫酸根离子的含量。青岛小麦岛海洋暴露站位于青岛小麦岛,海水流速为 0.05 m/s,年平均气温 14.5 ℃,年相对湿度为 69.86%,大气区海盐粒子沉降量为 15.97 mg/d。

1.3 试验方法

1.3.1 孔结构测试

净浆试件养护至 28 d 后,采用中国纽迈分析仪器股份有限公司生产的 PQ001 型核磁共振分析仪进行低场核磁试验(LF-NMR),仪器磁场频率为 18 MHz,强度为 0.42 T,温度保持为(32±0.02)℃。试验前,将样品敲碎,取 1~2 cm 的碎片放入到真空饱水仪中进行饱水,饱水结束后将样品放置在直径 25 mm、长度 200 mm 的圆柱形玻璃管中。最后采用 LF-NMR 光谱仪中的 Carr-Purcell-Meiom-Gill(CPMG)序列获得样品的横向弛豫时间 T2 信号。孔径通过公式(1)计算。

$$d = 4\rho_2 T_2 \tag{1}$$

式中,ρ_2—表面松弛率,取 12 nm/ms;T_2—弛豫时间,ms。

1.3.2 氯离子含量测试

首先用混凝土粉末打磨机将从大气区取回的混凝土试块分层磨粉,然后采用电位滴定法测试粉末中的氯离子浓度。根据《混凝土中氯离子含量检测技术规程》(JGJ/T 322—2013)[8] 中所给公式计算氯离子的含量,测试过程如图 3 所示。其中,水溶性氯离子的浓度计算公式如式(2)所示:

$$C_f = \frac{C_{AgNO_3} \times (V_{11} - V_{12}) \times 0.035\,45}{G \times \frac{1}{2}} \times 100\% \tag{2}$$

式中,C_f—混凝土中水溶性氯离子含量,%;C_{AgNO_3}—$AgNO_3$ 标准溶液浓度,mol/L;G—粉末质量,g;V_{11}—25 mL 滤液达到滴定终点 $AgNO_3$ 消耗的体积,mL;V_{12}—空白试验达到滴定终点 $AgNO_3$ 消耗的体积,mL。

酸溶性氯离子的浓度计算公式如式(3)所示:

$$C_t = \frac{C_{AgNO_3} \times (V_{21} - V_{22}) \times 0.035\,45}{G \times \frac{1}{2}} \times 100\% \tag{3}$$

式中,C_t—混凝土中酸溶性氯离子含量,%;C_{AgNO_3}—$AgNO_3$ 标准溶液浓度,mol/L;G—粉末质量,g;V_{21}—25 mL 滤液达到滴定终点 $AgNO_3$ 消耗的体积,mL;V_{22}—空白试验达到滴定终点 $AgNO_3$ 消耗的体积,mL。

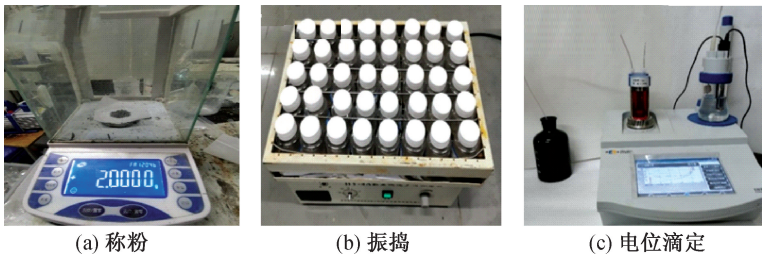
氯离子结合能力(R)计算公式如式(4)所示:

$$R = \frac{C_b}{C_f} = \frac{C_t - C_f}{C_f} \tag{4}$$

式中,C_b—距离混凝土表面 X 深度处的结合氯离子浓度 mol/L;C_f—X 深度处的自由氯离子浓度 mol/L;C_t—X 深度处的总的氯离子浓度 mol/L。

1.3.3 硫酸根离子含量测试

采用 $BaSO_4$ 比浊法测试混凝土粉末中的硫酸根离子含量[9]。所采用的试验仪器为紫外分光光



(a) 称粉　(b) 振捣　(c) 电位滴定

图 3 混凝土粉末中氯离子含量的测定

Fig. 3 Determination of chloride content in concrete powder

度计。试验过程中以聚乙烯醇溶液为稳定剂,使分散体系生成的 $BaSO_4$ 沉淀能够均匀悬浮于其中,并有效降低 $BaSO_4$ 颗粒与溶液间的表面自由能,提高 Ba^{2+} 和 SO_4^{2-} 的反应速度;加入 HCl 溶液消除体系中 CO_3^{2-}、SO_3^{2-} 等外界离子的影响。水溶与酸溶的解释与氯离子测试相同,测试之前,需要用 Na_2SO_4 标准溶液进行标定,根据测得的吸光光度值(Abs)和 Na_2SO_4 标准溶液中的硫酸根离子浓度,得到水溶与酸溶的标定曲线,测试过程如图 4 所示。混凝土中硫酸根离子含量的计算公式如式(5)所示:

$$P = \frac{f_{(A)}}{1000 \times G \times \dfrac{V_5}{V_4}} \times 100\% \qquad (5)$$

式中,P—2 g 粉末中硫酸根离子的含量,%;G—混凝土粉末试样重量,g;V_4—溶解试样的用水量,mL;V_5—测定所需滤液量,mL;$f_{(A)}$—测定得到滤液中硫酸根离子质量,mg。

(a) 振荡 (b) 分光光度计测度

图 4 混凝土粉末中硫酸根离子含量的测定

Fig. 4 Determination of sulfate content in concrete powder

2 结果分析与讨论

2.1 蒸养矿粉混凝土强度演变

蒸养矿粉混凝土抗压强度如图 5 所示。可以看出,蒸汽养护显著提高了混凝土的早期强度。8 h 蒸汽养护结束后立刻对比 S25 和 BS25 试件的抗压强度,发现 S25 比 BS25 提高了 60.32%。然而,当矿粉掺量过大时,会明显影响混凝土的后期强度。这是因为大掺量的矿粉导致水泥含量不足,严重影响水化反应速率。随着矿粉掺量的增加,蒸养混凝土 8 h 和 28 d 的抗压强度与未掺加辅助胶凝材料的试件相比均呈下降的趋势。很明显,蒸汽养护可以提高混凝土的初期抗压强度,尤其在养护龄期为 1 d 时的效果最为显著。养护 28 d 龄期时,S25 抗压强度比 BS25 降低 0.59%。这是因为 BS25 试件的孔结构更加密实,但水化程度较低,但 S25 试件正好相反,两者相互平衡导致强度相差不大。可见,在矿粉掺量不超过 25%时,对后期抗压强度的影响甚微,研究结果与文献[10]一致。

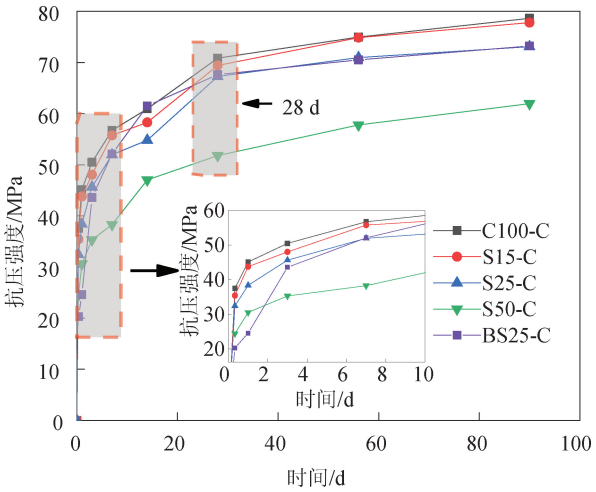


图 5 蒸养矿粉混凝土抗压强度

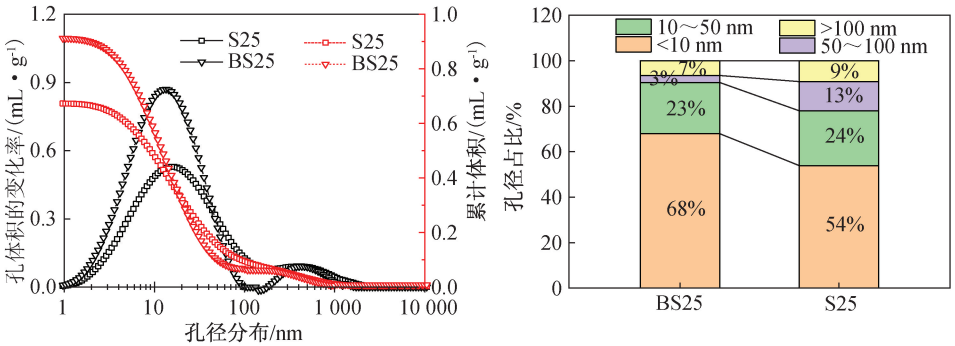
Fig. 5 Compressive strength of steam-cured slag concrete

2.2 蒸养水泥净浆孔结构分析

掺加矿粉试件 28 d 龄期时的孔径分布和孔结构含量如图 6 所示。可以看出,养护 28 d 后,蒸养混凝土的最可几孔径含量低于标养试件,但最可几孔径值大于标养混凝土。两种试件的主峰宽度相差不大,主峰分布范围主要在 1~100 nm,与标养混凝土相比,蒸养混凝土的小孔(<100 nm)含量低。根据文献[11]可以将孔结构划分为:凝胶孔(<10 nm)、小毛细孔(10~50 nm)、大毛细孔(50~100 nm)以及大孔(>100 nm)。可以发现,掺加矿粉的混凝土试件在标准养护下的凝胶孔含量要高于蒸汽养护,孔含量基本相同,有害孔和多害孔的含量要低于蒸汽养护。随着水化反应的继续进行,混凝土中的孔隙空间被不断填充,孔径减小[12]。蒸汽养护试件的水化程度比标准养护高,因此蒸汽养护试件的孔径应该减小。但是在此文中出现相反的现象,这是因为混凝土的孔径除了与水化程度有关外,还与混凝土的水灰比,养护制度等密切相关[13]。由此可知,蒸汽养护使试件的有害孔和大孔含量增加,粗化了水泥基材料的孔隙结构,影响混凝土结构的强度和耐久性。

2.3 蒸养混凝土氯离子传输与结合

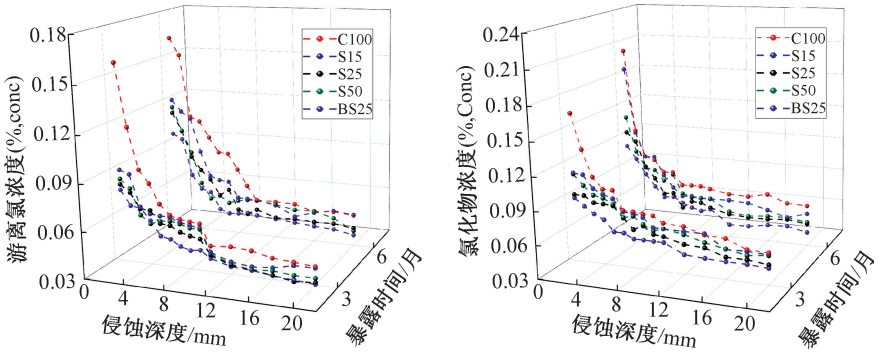
图 7 为不同矿粉掺量和侵蚀龄期下混凝土内部氯离子浓度分布。可以看出,随着侵蚀龄期的增加,蒸养混凝土中氯离子含量有所增加。掺加矿粉的蒸养混凝土中自由、总氯离子浓度均小于



(a) 孔径分布　　(b) 孔径占比

图 6　28 d 龄期时蒸汽养护与标准养护矿粉混凝土孔结构分布

Fig. 6　Pore size distribution of stream-cured and standard-cured slag concrete at 28 days



(a) 自由氯离子　　(b) 总氯离子

图 7　蒸汽养护与标准养护矿粉混凝土内部氯离子浓度分布曲线

Fig. 7　Internal chloride ion concentration distribution curve of stream-cured and standard-cured slag concrete

未掺加矿粉的混凝土(C100 试件)。这是因为矿粉本身具有较高含量的活性 Al_2O_3 和 SiO_2,可以与水泥水化产物氢氧化钙发生二次水化反应生成 C-S-H 凝胶等物质,从而细化了蒸养混凝土中的孔隙结构,提高了蒸养混凝土的密实度,使矿粉颗粒与浆体的界面变得更加牢固。同时 C-S-H 凝胶对氯离子具有吸附作用,由于矿粉的比表面积较小,所以物理吸附氯离子能力相对较低,较高的 Al_2O_3 含量可以提高化学结合氯离子能力。因此,掺入一定量的矿粉可以显著提高蒸养混凝土的抗氯离子侵蚀能力,减小了蒸养混凝土内部氯离子含量[14]。并且 BS25 试件氯离子浓度要小于 S25 试件,这主要因为蒸汽养护会造成混凝土有害孔和多害孔的数量增多,粗化了蒸养混凝土的孔隙结构,为氯离子的侵入提供了便利的通道。

将氯离子扩散区不同深度处的自由氯离子浓度代入式(6)中,计算得到表观氯离子扩散系数(D)与表层氯离子浓度(C_s)。图 8 和图 9 分别为大气区暴露 3、6 个月矿粉混凝土的 D 与 C_s 分布图。可以看出,随着侵蚀龄期的增加,蒸养混凝土表观氯离子扩散系数减小。这主要是因为随着蒸

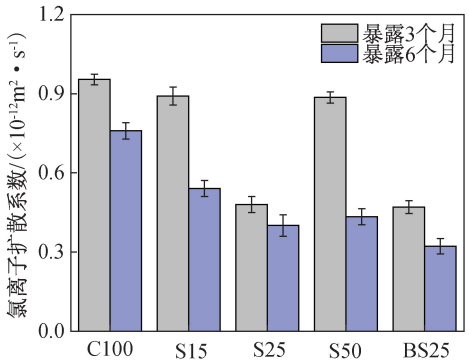


图 8　蒸汽养护与标准养护矿粉混凝土有效氯离子扩散系数

Fig. 8　Effective chloride ion diffusion coefficient of stream-cured and standard-cured slag concrete

养混凝土水化反应的不断进行,蒸养混凝土的孔结构会得到一定程度的改善,从而使氯离子的扩散系数逐渐减小。无论侵蚀龄期为 3 个月、还是 6 个月,随着矿粉掺量的增加,D 和 C_s 均呈现先减小后增加的趋势。当矿粉掺量为 25%时 C_s 和 D 最小。说明当矿粉掺量为 25%时,矿粉的二次水化作用优化混凝土孔径效果达到最佳,能够最大程度地与氢氧化钙发生二次水化反应,生成水化铝酸钙和 C-S-H 填充蒸养混凝土中的孔隙结

构,导致氯离子的传输更困难,使得掺入矿粉的蒸养混凝土的氯离子扩散系数逐渐降低。当实海暴露6个月时,S25试件的D只达到C100试件的一半。

$$C_{x,t}=C_0+(C_s-C_0)\left[1-\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)\right] \quad (6)$$

式中,$C_{x,t}$—t时刻x深度处的氯离子浓度,mol/L;C_0—初始浓度,mol/L;C_s—表面浓度,mol/L;D—氯离子扩散系数,mm^2/s;x—距离表面的深度,mm;t—混凝土试件受氯离子侵蚀的时间,s;$\mathrm{erf}(z)$—误差函数。

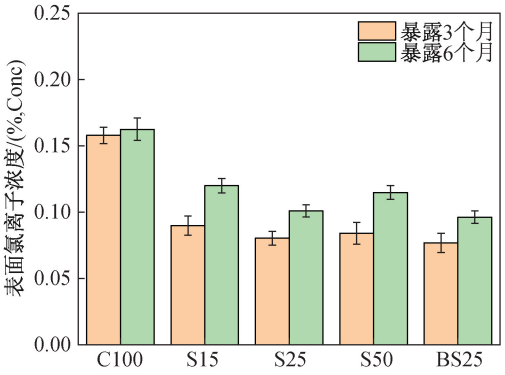


图9 蒸汽养护与标准养护矿粉混凝土表层氯离子浓度图

蒸汽养护与标准养护矿粉混凝土氯离子结合能力如图10所示。可以看出,不同矿粉掺量的混凝土在实海暴露3、6个月时,随着矿粉掺量的增加,氯离子结合能力呈先增大后减小的趋势,当矿粉掺量为25%时,氯离子结合能力最大。同时,矿物掺合料掺量对氯离子结合能力的变化趋势与氯离子扩散系数和表面氯离子浓度的变化趋势相反,氯离子结合能力越大,氯离子扩散系数越小,表层氯离子浓度越低。此外,标准养护混凝土氯离子结合能力均要高于蒸汽养护。这主要是因为在水泥发生水化反应的初期阶段,化学反应占主导地位,蒸汽养护加快水泥的化学反应速率。随着反应的不断进行,水化产物的数量不断增多,附着于水泥颗粒表面的C-S-H凝胶层逐渐增厚。此时需要依靠水分子穿透较厚的C-S-H凝胶层与未反应的水泥颗粒进行水化反应,这个过程将决定着水泥的后期水化反应速率。同时水泥的化学反应速率的加快,造成水化产物的快速富集,不利于水化产物扩散,造成混凝土的孔结构粗化,海水中的SO_4^{2-}更容易侵入到混凝土内部将Friedel盐中的Cl^-置换出来,使结合氯离子重新变为自由氯离子,导致后期氯离子结合能力下降。

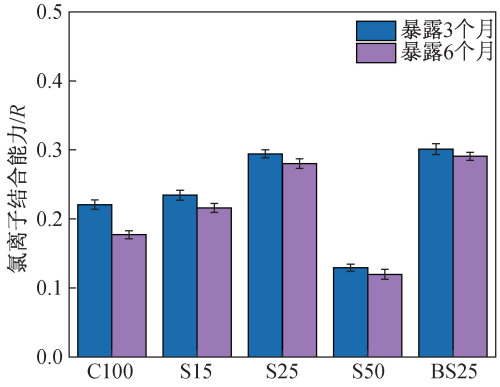


图10 蒸汽养护与标准养护矿粉混凝土氯离子结合能力

Fig. 10 Chloride binding capacity of stream-cured and standard-cured slag concrete

2.4 蒸养混凝土硫酸根离子传输与反应

图11和图12分别为海洋大气区蒸养混凝土中总硫酸根离子浓度随深度变化情况和硫酸根离子反应系数。可以看出,在实海暴露3个月和6个月时,大气区试件中总硫酸根离子浓度由表及里

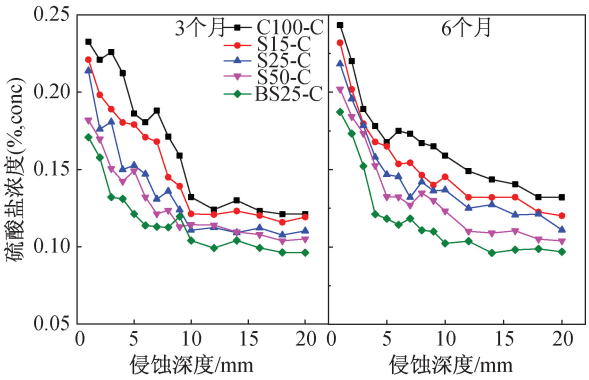


图11 蒸汽养护与标准养护矿粉混凝土内部总硫酸根离子浓度分布

Fig. 11 Internal total sulfate ion concentration distribution of stream-cured and standard-cured slag concrete

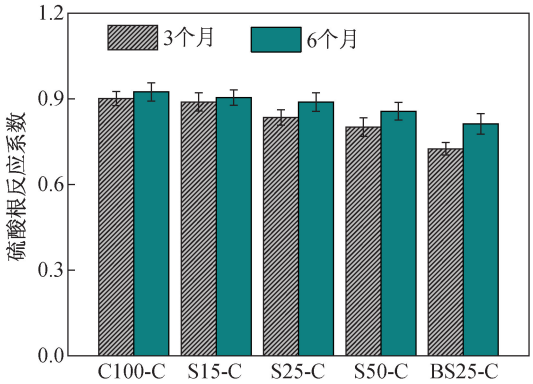


图12 蒸汽养护与标准养护矿粉混凝土硫酸根反应系数

Fig. 12 Sulfate reaction coefficient of stream-cured and standard-cured slag concrete

逐渐降低,并趋于稳定,侵蚀深度分别达到 10 和 12 mm 时,总硫酸根离子浓度基本保持不变。随着矿物掺量的增加,混凝土的硫酸根离子反应系数逐渐降低。S50 试件的硫酸硫酸根离子浓度和反应系数最低,这是因为硫酸根离子的传输较慢,同时矿粉的掺加降低了混凝土试件中钙相物质的含量。

3　结论

1)蒸汽养护混凝土的无害孔含量要低于标准养护混凝土,少害孔含量基本相同,有害孔和多害孔的含量要高于标准养护混凝土,这是水化程度更高的蒸养混凝土抗压强度反而低于标养混凝土的根本原因。

2)掺入一定量的矿粉可以显著提高蒸养混凝土抗氯离子侵蚀能力,减小了蒸养混凝土内部氯离子含量,并且矿粉掺量为 25%时二次水化作用优化混凝土孔径效果达到最佳,能够最大程度地与氢氧化钙发生二次水化反应,填充孔隙结构。

3)物质组成相同的蒸养混凝土试件,氯离子结合能力越大,氯离子扩散系数越小,表层氯离子浓度越低。

4)实海暴露初期,随着矿粉掺量的增加硫酸根离子反应系数逐渐降低,但相差不大,S50 试件的硫酸硫酸根离子浓度和反应系数最低,这是因为此时混凝土试件中钙相物质的含量最低。

参考文献:

[1] 蒋建华,林明益,裘佳琪. 抗裂型外加剂对粉煤灰混凝土抗压强度的影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2020,37(03):40-46.

[2] SHI J, LIU B, ZHOU F, et al. Heat Damage of Concrete Surfaces Under Steam Curing and Improvement Measures [J]. Construction and Building Materials, 2020, 252: 119104.

[3] SHI J, LIU B, ZHOU F, et al. Effect of Steam Curing Regimes on Temperature and Humidity Gradient, Permeability and Microstructure of Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 281: 122562.

[4] SHI J, LIU B, SHEN S, et al. Effect of Curing Regime on Long-term Mechanical Strength and Transport Properties of Steam-cured Concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 255: 119407.

[5] AMER I, KOHAIL M , ELFEKY M S, et al. A Review on Alkali-activated Slag Concrete[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(2): 1475-1499.

[6] DENG G, HE Y, LU L, et al. Pore Structure Evolution and Sulfate Attack of High-volume Slag Blended Mortars Under Standard Curing and Steam Curing[J]. Construction and Building Materials, 2023, 363: 129878.

[7] 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(03):771-785.

[8] 混凝土中氯离子含量检测技术规程:JGJ/T 322—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.

[9] 马志鸣, 赵铁军, 王鹏刚, 等. 海洋浪花飞溅区混凝土硫酸盐侵蚀试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013, (10): 5-8.

[10] 胡益彰. 蒸养条件下大掺量矿物掺合料混凝土的性能研究[D]. 山东: 山东大学, 2016.

[11] ALIGIZAKI K K. Pore Structure of Cement-based Materials: Testing, Interpretation and Requirements [M]. Taylor and Francis: CRC Press, 2005.

[12] DURAMAN S B, RICHARDSON I G. Microstructure & Properties of Steel-reinforced Concrete Incorporating Portland Cement and Ground Granulated Blast Furnace Slag Hydrated at 20 ℃ [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 137: 106193.

[13] ZHANG S, ZHANG M. Hydration of Cement and Pore Structure of Concrete Cured in Tropical Environment [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(10): 1947-1953.

[14] 蒋建华,陈思安,赵克寒,等. 养护方式对再生混凝土抗碳化性能的影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2022,39(04):12-17+25.

(责任编辑　周雪梅)