

文章编号:1672-3961(2024)01-0123-08 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2022.249

碳化-冻融作用对风积沙混凝土氯离子传输的影响

董伟^{1,2},周梦虎^{1*},王雪松¹,薛刚¹,王栋¹

(1.内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古包头014010;2.内蒙古自治区建筑结构防灾减灾工程技术研究中心,内蒙古包头014010)

摘要:为研究碳化-冻融循环作用对风积沙混凝土氯离子传输的影响,进行全风积沙混凝土经历碳化(0、14、28 d)后的冻融循环(50、100、150、200次)试验研究,根据碳化时间分为C0组、C1组、C2组。通过化学滴定法检测不同深度处混凝土中的氯离子质量分数,进而分析氯离子质量分数、分布、氯离子扩散系数以及碳化深度与时间依赖性的关系,并通过扫描电镜观察混凝土内部结构。结果表明:碳化生成的碳化产物使混凝土更加密实,能够有效抵抗氯离子的侵蚀,且碳化时间越长,抵抗氯离子侵蚀效果越明显;冻融循环增大混凝土裂缝的产生,为氯离子向内部传输提供通道;随着冻融循环次数增多,氯离子侵蚀也越严重,当冻融循环100次时,C0组氯离子侵入深度为30 mm,冻融循环150次时,所有混凝土氯离子侵入深度为30 mm;200次冻融循环条件下,C1组时间依赖性系数较C0组增加42.22%,C2组较C0组增加57.78%,较C1组增加10.94%。风积沙混凝土内部氯离子质量分数随冻融循环次数增加逐步增加,随碳化深度的增加逐步降低。

关键词:风积沙混凝土;碳化-冻融循环;自由氯离子;氯离子扩散系数;时间依赖性系数

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A

引用格式:董伟,周梦虎,王雪松,等.碳化-冻融作用对风积沙混凝土氯离子传输的影响[J].山东大学学报(工学版),2024,54(1):123-130.

DONG Wei, ZHOU Menghu, WANG Xuesong, et al. Effect of carbonation freeze-thaw on chloride ion transport in aeolian sand concrete [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(1):123-130.

Effect of carbonation freeze-thaw on chloride ion transport in aeolian sand concrete

DONG Wei^{1,2}, ZHOU Menghu^{1*}, WANG Xuesong¹, XUE Gang¹, WANG Dong¹

(1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Autonomous Region Engineering Technology Research Center of Building Structure disaster prevention and Reduction, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to study the effect of carbonation freeze-thaw cycle on chloride ion transmission of aeolian sand concrete, the experimental study of freeze-thaw cycle (50, 100, 150, 200) of all aeolian sand concrete after carbonation (0, 14, 28 d) was carried out. The chloride ion in concrete at different depths was detected by chemical titration, and then the relationship between chloride ion content, distribution, chloride ion diffusion coefficient, carbonation depth and time dependence was analyzed. The internal structure of concrete was observed by scanning electron microscope. The results showed that the carbonation products produced by carbonation made the concrete more dense and could effectively resist the corrosion of chloride ions, and the longer the carbonation time was, the more obvious the effect of resisting the corrosion of chloride ions was. The freeze-thaw cycle increased the generation of concrete cracks and provided a channel for the internal transmission of chloride ions; With the increase of the number of freeze-thaw cycles, the chloride ion erosion was also more serious. When the freeze-thaw cycle was 100 times, C0 group was invaded by chloride ion at chloride ion invasion depth 30 mm, and when the freeze-thaw cycle was 150 times, chloride ion invasion depth 30 mm of all concrete was eroded by chloride ions. Under the condition of 200 freeze-thaw cycles, the time-dependent coefficient of group C1 in-

收稿日期:2022-07-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52268044);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2021LHMS05019);内蒙古科技大学建筑科学研究所开放基金资助项目(JYSJJ-2021Q01)

第一作者简介:董伟(1987—),男,内蒙古包头人,副教授,博士,主要研究方向为绿色建筑材料。E-mail:dw617@126.com

*通信作者简介:周梦虎(1998—),男,河南新乡人,硕士研究生,主要研究方向为风积沙混凝土。E-mail:784910006@qq.com

creased by 42.22% compared with group C0, group C2 increased by 57.78% compared with group C0, and increased by 10.94% compared with group C1. The mass fraction of chloride ions in aeolian sand concrete increased with the increase of freeze-thaw cycles and decreased with the increase of carbonation depth.

Keywords: aeolian sand concrete; carbonation freeze-thaw cycle; free chloride; chloride diffusion coefficient; time dependent coefficient

0 引言

我国西北地区有富集的沙漠资源,若能因地制宜合理开发并有效利用风积沙,将其运用在实际工程中,一方面能缓解河砂资源的匮乏,另一方面能够遏制沙漠化进程^[1]。风积沙较强的吸水性能改善混凝土界面过度区性能,且风积沙中活性成分发生火山灰反应,产生的水化硅酸钙胶凝体能够填充混凝土内部孔隙,增强混凝土密实性,进而改善混凝土工作性能^[2]。随着我国经济发展,大量临海、盐湖以及除冰盐环境下的基础设施建成,这些环境下的混凝土长期受到碳化和冻融的共同作用并伴随着氯离子的侵蚀^[3],因此研究碳化-冻融作用下风积沙混凝土中氯离子传输机理尤为重要。

为了明确混凝土中氯离子的传输机理,许多学者对其开展了全面的研究:文献[4-5]研究了碳化和冻融的耦合作用对混凝土氯离子侵蚀的影响,研究表明碳化作用会破坏混凝土原有过滤机制,促进Friedel盐分解,冻融循环增大混凝土孔隙率,为氯离子侵蚀提供有利条件,两者共同作用下氯离子侵蚀较单独作用更为严重;文献[6-7]研究了冻融循环与氯盐侵蚀对混凝土耐久性的影响,研究表明冻融循环严重缩短了混凝土的使用寿命,且冻融损伤越大,氯离子扩散深度越深。冻融循环过程中,温度下降使混凝土内部产生冻胀应力,促进混凝土中微裂缝发展并生成新的微裂缝,当混凝土孔隙中的冰融化时微裂缝有所闭合,随着正负温度的交替作用,混凝土内部裂缝逐渐增多、扩大,使混凝土内部渗透通道增多,促进了氯离子的扩散^[8-12]。碳化作用对氯离子的扩散有正负效应,一方面碳化养护在混凝土表面生成碳酸盐,增大混凝土密实性,降低了混凝土渗透性、吸水性,增强了混凝土抵抗氯离子的渗透能力;另一方面碳化作用能释放混凝土中的结合氯离子,造成混凝土局部氯离子浓度升高,增强氯离子扩散能力,因此碳化对氯离子扩散的影响需要综合考虑^[13-15]。文献[16-19]研究了碳化作用对氯离子侵蚀的影响,碳化会使混凝土临界孔径、最可几孔径以及孔隙的连通性增大,从而增大

氯离子扩散系数,随碳化时间增加,氯离子在混凝土中的含量也随之增加。文献[20-21]研究了不同碳化龄期下混凝土中氯离子的扩散性能,研究表明,碳化作用会使混凝土的扩散系数降低,完全碳化混凝土的氯离子扩散系数约为未碳化的0.43倍。文献[22-24]通过模拟和试验系统研究了氯离子在混凝土中的扩散规律。

综上所述,目前研究大多围绕冻融循环或碳化单一因素作用对混凝土中氯离子扩散的影响,碳化和冻融循环共同作用对氯离子传输机理的文献研究甚少。基于此,本研究开展了风积沙混凝土在碳化0、14、28 d,冻融循环50、100、150、200次后氯离子的传输试验研究,为风积沙混凝土中氯离子传输机理的研究及工程应用提供参考。

1 试验

1.1 原材料

水泥为P·O42.5普通硅酸盐水泥。粉煤灰为I级粉煤灰;细骨料是库布齐沙漠腹地风积沙(100%取代河砂),粒径为0.075~0.215 mm;粗骨料为碎石,粒径5~25 mm连续级配;水为自来水;外加剂为复合高效减水引气剂。

1.2 配合比

为了探讨复杂环境下风积沙混凝土的耐久性,研究100%掺量风积沙混凝土在不同环境下耐久性的劣化机制,试验采用一种配合比。配合比设计参考《普通混凝土配合比设计规范》(JGJ 55—2011)^[25],水泥每立方米用量320 kg,粉煤灰35 kg,石子1 130 kg,坍落度 ≥ 150 mm,外加剂为胶凝材料质量的2%,质量水胶比55%,风积沙质量分数为39%。

1.3 试验方法

将C0、C1、C2组(C0、C1、C2组分别为碳化0、14、28 d的试件)的混凝土通过《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082—2009)中酚酞法测定碳化深度^[26],其中C0组碳化深度2.8 mm, C1组碳化深度6.7 mm, C2组碳化深度17.8 mm。

冻融循环试验抗冻性能试验采用快冻法,试件

中心温度不高于 7 ℃,不低于-18 ℃,分别将 D1、D2、D3、D4 组(D1、D2、D3、D4 组分别为冻融循环 50、100、150、200 次的试件)试件进行氯离子质量分数测试。

氯离子浓度检测试验选取相对较为经济准确的水溶、酸溶萃取法进行滴定测量。试验前分别在冻融循环 50、100、150、200 次时对试块进行分层取粉,参照《水运工程混凝土试验检测技术规范》(JTS/T236—2019)^[27],用化学滴定法测量混凝土粉末中自由氯离子质量分数并记录相关数据。

2 试验结果分析

2.1 碳化作用对自由氯离子质量分数的影响

图 1 为不同碳化时间下风积沙混凝土自由氯离子质量分数的变化情况。由图 1 可知,C0、C1、C2 组在经历相同冻融循环次数后,自由氯离子质量分数随深度增加而减少,且混凝土表层自由氯离子质量分数下降速度更快,混凝土内部氯离子的变化速度变缓。冻融 200 次时,C0 组氯离子侵入深度为 5~10 mm 处自由氯离子质量分数下降 0.14%,氯离子侵入深度为 25~30 mm 处下降 0.05%;C1 组氯离

子侵入深度为 5~10 mm 处下降 0.13%, $H = 25 \sim 30$ mm 处下降 0.06%;C2 组氯离子侵入深度为 5~10 mm 处下降 0.10%,氯离子侵入深度为 25~30 mm 处自由氯离子质量分数下降 0.04%。在整个冻融循环期间,混凝土表层自由氯离子质量分数的变化大于混凝土内部,因此,冻融循环对混凝土表层自由氯离子的影响更大。

由图 1 可知:冻融循环 50 次时,C0 组混凝土表面(氯离子侵入深度为 5 mm 处)自由氯离子质量分数为 0.3%,比 C1 组高 0.06%,比 C2 组高 0.1%;冻融循环 200 次时,C0 组混凝土表面自由氯离子质量分数为 0.62%,比 C1 组高 0.08%,比 C2 组高 0.15%。碳化过程产生的 CaCO_3 能够填充孔隙,降低孔隙率,提升混凝土密实度,使进入混凝土的溶液减少,降低冻融过程应力的产生。碳化作用减少了氯离子的运输通道,且碳化处理后混凝土在冻融循环各个时期自由氯离子质量分数低于未碳化处理的混凝土,碳化深度越深自由氯离子质量分数越低。在混凝土表层,随着碳化深度增加,自由氯离子质量分数逐渐减少,未碳化混凝土自由氯离子质量分数最大,碳化能有效阻碍氯离子在冻融循环过程中的侵入。

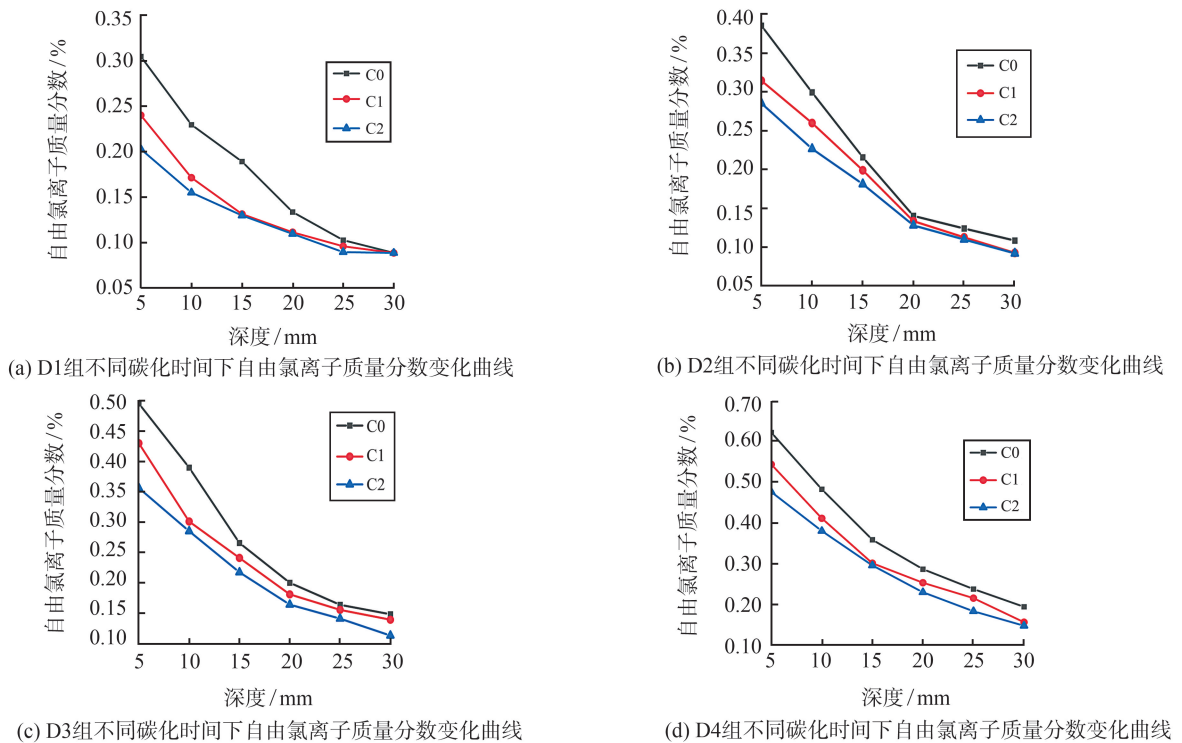


图 1 不同碳化时间下自由氯离子质量分数变化曲线

Fig.1 Variation curve of free chloride ion content in aeolian sand concrete under different carbonation time

2.2 冻融循环次数对自由氯离子质量分数的影响

图 2 是风积沙混凝土不同冻融循环次数下自由氯离子质量分数的变化。由图 2 可知:随着冻

融循环次数增加,混凝土内自由氯离子质量分数逐步增加;冻融循环前期,自由氯离子质量分数增加速度更快,冻融循环 0~50 次时,C0 组混凝土表

面自由氯离子质量分数增加 0.3%, C1 组表面自由氯离子质量分数增加 0.24%, C2 组表面自由氯离子质量分数增加 0.2%; 冻融循环 150~200 次时, C0 组混凝土表面自由氯离子质量分数增加 0.12%, C1 组表面自由氯离子质量分数增加

0.11%, C2 组表面自由氯离子质量分数增加 0.12%。对比 C0、C1、C2 三组混凝土在冻融前期和冻融后期的自由氯离子增量可以发现: 碳化能有效抵抗氯离子的侵蚀, 但在冻融循环后期, 碳化作用的优化效果明显减弱。

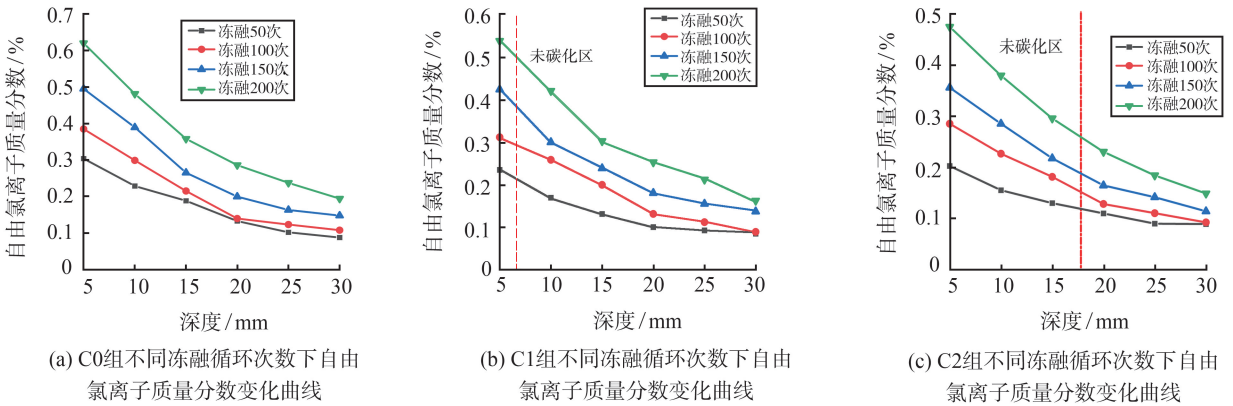


图2 不同冻融循环次数下自由氯离子变化曲线

Fig.2 Variation curve of free chloride ion in aeolian sand concrete under different freeze-thaw cycles

混凝土在冻融循环过程中侵入混凝土内部的溶液不断结冰、融化, 溶液结冰体积膨胀产生膨胀应力, 对孔隙产生压应力, 破坏混凝土内部孔隙, 形成裂缝, 增加了氯离子的运输通道, 使自由氯离子质量分数在冻融循环前期增速加快。随着冻融循环不断进行, 氯离子在混凝土表层形成大量盐结晶, 阻碍氯离子的运输, 自由氯离子的增量在冻融循环后期放缓。碳化作用减少了冻融循环过程中冻胀力的产生, 在冻融循环前期阻碍了氯离子的侵蚀; 冻融循环后期未碳化混凝土的孔隙被盐结晶填充, 达到了同样效果。冻融循环后期, 碳化混凝土和未碳化混凝土自由氯离子增速相同。

随着侵蚀深度增加, 自由氯离子质量分数增幅逐渐减小。冻融循环前期, 距离混凝土表层 30 mm 处的自由氯离子质量分数基本不变。由图 2(b)(c) 可知, C1、C2 组在冻融循环 50 次和 100 次后氯离子侵入深度为 25 mm 处和氯离子侵入深度为 30 mm 处自由氯离子质量分数相等, C0 冻融循环 150 次与冻融循环 100 次相比, C0 组氯离子侵入深度为 30 mm 处自由氯离子质量分数上升了 0.05%, C1 组氯离子侵入深度为 30 mm 处自由氯离子质量分数上升了 0.05%, C2 组氯离子侵入深度为 30 mm 处自由氯离子质量分数上升了 0.02%。结合图 2(a) 在冻融 50 次时三组混凝土氯离子侵入深度为 30 mm 处自由氯离子质量分数相同, 说明在冻融循环 50 次时混凝土内部 30 mm 处并未受到氯离子侵蚀, 混凝土内部的自由氯离子质量分数主要是混凝土

材料所带入。冻融循环 100 次时, C0 组氯离子侵入深度为 30 mm 处被氯离子侵入, C1、C2 组氯离子侵入深度为 30 mm 未被氯离子侵入, 冻融循环 150 次时所有混凝土氯离子侵入深度为 30 mm 处均被氯离子侵蚀。

综上, 随冻融循环次数增多, 混凝土中氯离子质量分数增高, 且随深度增加, 自由氯离子质量分数增加幅度明显降低。

综合图 2, 在碳化和冻融循环双重作用下风积沙混凝土中氯离子传输能力随碳化时间增加而减弱, 随冻融循环次数增加而提高。

2.3 微观结构

图 3 为根据核磁共振试验数据绘制的 C0、C1、C2 组风积沙混凝土孔径分布图。由图 3 可知, 随着碳化作用进行, 试件中无害孔占比不断提高, 少害孔、多害孔、有害孔占比相对减小; 随着冻融循环次数的增加, 试件中无害孔逐渐转化为其他三种孔结构。

碳化区氯离子主要由碳化作用释放的结合氯离子和溶液中向混凝土内传输来的氯离子两部分组成, 碳化作用产生的 CaCO_3 填充了混凝土内部孔隙, 阻碍了氯离子扩散, 且碳化作用降低了混凝土对氯离子的结合能力, 释放了部分结合氯离子, 碳化区结合氯离子含量减少, 未碳化区氯离子主要依靠氯离子扩散作用进入混凝土内部, 因此碳化作用对混凝土抗氯离子侵蚀有明显的优化效果, 碳化前后氯离子传输示意图如图 4 所示。

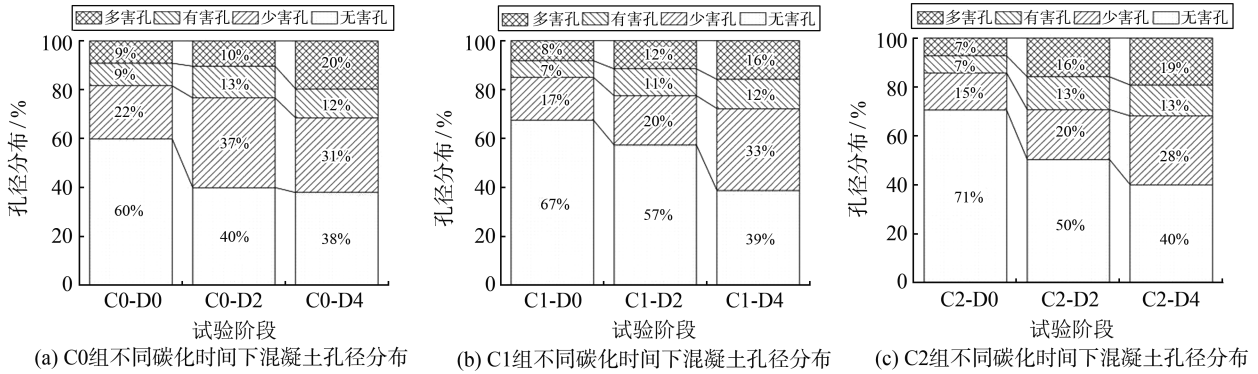


图 3 不同碳化时间下风积沙混凝土孔径分布图
Fig.3 Pore size distribution of aeolian sand concrete under different carbonization time

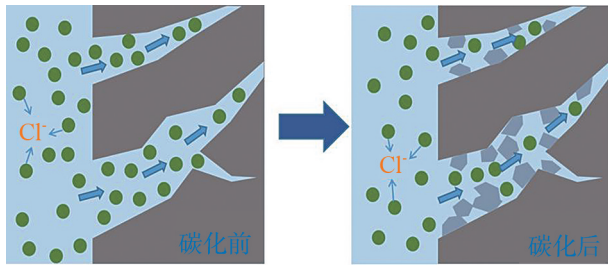


图 4 碳化前后氯离子传输示意图
Fig.4 Schematic diagram of chloride ion transmission to concrete before and after carbonation

对冻融循环 200 次的 C0 与 C2 组混凝土进行扫描电镜试验,扫描式电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM) 照片见图 5。由图 5 可见,相比于未经碳化的混凝土,经过碳化作用后混凝土内孔洞周围附着大量 CaCO_3 晶体与盐结晶, CaCO_3 与盐结晶的产生填充了混凝土孔隙,增加了密实度,阻碍了氯离子传输。冻融循环产生的冻胀应力使混凝土内部产生裂缝,为氯离子向内部传输提供通道,造成混凝土内部孔隙中出现较多盐结晶。

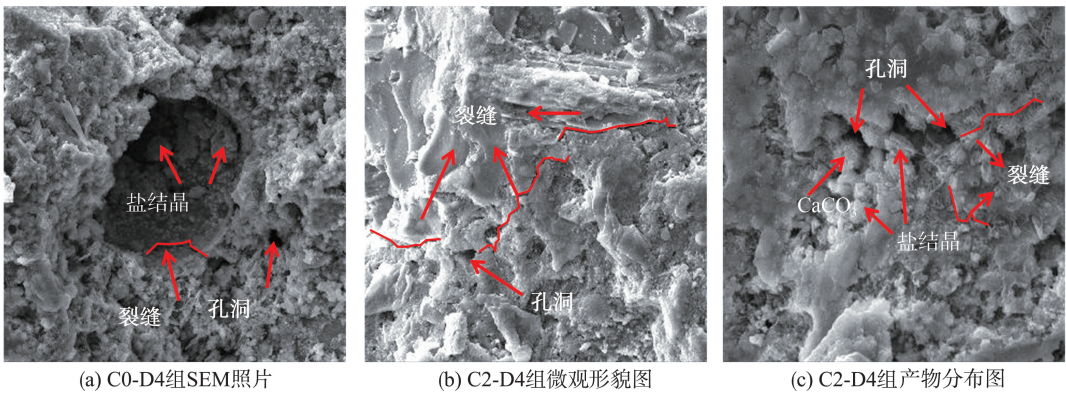


图 5 碳化-冻融循环作用下混凝土内部扫描式电子显微镜照片
Fig.5 Scanning electron microscope photos of concrete interior under carbonation freeze-thaw cycle

2.4 氯离子扩散系数

氯离子扩散系数作为评价混凝土抗氯离子侵蚀扩散性能的重要指标,采用 Fick 第二扩散定律来描述氯离子在混凝土中的传输行为:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

根据边界条件 $C(x=0,t>0) = C_s, C(x>0,t=0) = C_0$ 可得

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s - C_0) \left(1 - Z \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right), \quad (2)$$

式中: $C_{x,t}$ 为混凝土在暴露 t 时距离表面 x 处的自由氯离子质量分数; C_s 为混凝土表面的自由氯离子质量分数; C_0 为混凝土初始自由氯离子质量分数; D

为混凝土自由氯离子扩散系数; x 为氯离子质量分数测试点距离混凝土表面长度; t 为冻融循环的次数, Z 为误差函数,

$$Z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du. \quad (3)$$

依据式(3)对冻融循环作用下不同碳化时间的风积沙混凝土自由氯离子进行拟合,为了便于进行分析,将拟合计算并绘制成柱状图,如图 6 所示。从图 6 中可以看出,随着冻融循环进行,各组混凝土氯离子扩散系数均随冻融循环次数增加而降低并趋于稳定,碳化作用降低了冻融循环过程中氯离子扩散系数,碳化时间越长,氯离子扩散系数越低;冻融循环 50 次, C2 组氯离子扩散系数相对 C0 组降低

38.97%, C1组相对C0组降低13.52%, 冻融循环100次, C2组相对C0组降低48.01%, C1组相对C0组降低15.4%; 冻融循环150次, C2组相对C0组降低29.38%, C1组相对C0组降低13.65%; 冻融循环200次, C2组相对C0组降低33.84%, C1组相对C0组降低31.72%。

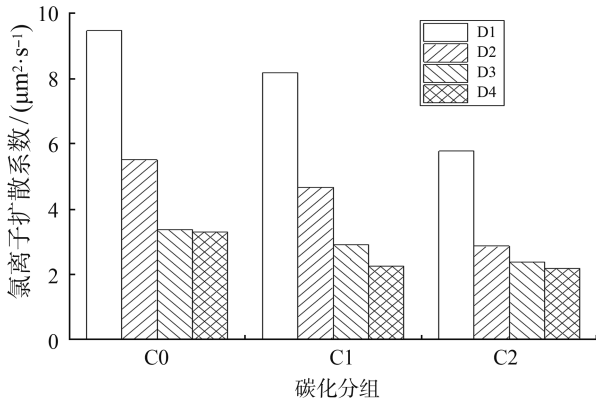


图6 氯离子扩散系数柱状图

Fig.6 Histogram of chloride diffusion coefficient in aeolian sand concrete under different freeze-thaw cycles

冻融循环前期, 氯离子侵蚀使混凝土内部出现大量盐溶液, 析出多余的盐类晶体并且储存在混凝土孔隙之中, 堵塞孔洞及氯离子传输通道, 使氯离子扩散系数不断下降。冻融循环中后期, 冻融损伤使得混凝土裂缝不断发展, 氯离子扩散系数下降速度变缓。碳化作用同样提升了混凝土在冻融循环过程中的抗氯离子侵蚀能力, 所以C2组氯离子扩散系数低于C1组低于C0组。

2.5 氯离子扩散系数的时间依赖性与碳化深度的关系

氯离子扩散系数随冻融循环次数变化而变化, Thomas等^[28]通过试验研究得到氯离子扩散系数与时间的指数函数关系, 并广泛应用于混凝土中氯离子的传输研究中。氯离子扩散系数的时间依赖性关系可表示为

$$D_t = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m, \quad (4)$$

式中, t_0 为参考暴露时间, D_0 为时间 t_0 时氯离子扩散系数, D_t 为时间 t 时氯离子扩散系数, m 为时间依赖性常数, 表示氯离子扩散系数的衰减速率。在利用式(4)计算时, 通常取 $t_0 = 28$ d时氯离子扩散系数 D_{28} 作为扩散系数的参考值。将各组氯离子扩散系数与冻融循环次数代入公式4进行回归分析, 得到各组混凝土氯离子扩散系数的时间依赖性系数见表1, 其中 m_1 为C0组时间依赖性系数, m_2 为C1组时间依赖性系数, m_3 为C2组时间依赖性系

数。由表1可知, C1-D4组较C0-D4组增加42.22%, C2-D4组较C0-D4组增加57.78%, 较C1-D4组增加10.94%。随着碳化深度的增加, 混凝土的时间依赖性系数随之增加, 且时间依赖性系数 m 同碳化深度 x 呈线性关系, 可见碳化作用能够提高混凝土的抗氯离子侵蚀能力, 减弱冻融循环对混凝土的破坏。

表1 不同碳化深度混凝土时间依赖性系数 m 值
Table 1 Time dependent coefficient of aeolian sand concrete with different carbonation depth

冻融循环次数	m_1	m_2	m_3	拟合方程	相关系数
50	-0.29	0.03	0.40	$M_1 = -0.318 + 0.025x$	0.98
100	0.29	0.43	0.77	$M_2 = 0.257 + 0.017x$	0.95
150	0.52	0.60	0.72	$M_3 = 0.513 + 0.007x$	0.99
200	0.45	0.64	0.71	$M_4 = 0.470 + 0.009x$	0.93

3 结语

(1) 风积沙混凝土内部氯离子质量分数随冻融循环次数增加逐步增加, 随碳化深度的增加逐步降低。C0在冻融循环50次后氯离子侵入深度 H 为30 mm, C1、C2组在冻融循环100次后氯离子侵蚀深度 H 为30 mm, 碳化作用能提升混凝土盐冻过程中氯离子传输。

(2) 碳化作用产生的 CaCO_3 晶体填充了混凝土内部孔隙, 使混凝土密实度增加, 随碳化深度增加, 氯离子扩散系数降低, 且碳化作用的优化效果伴随整个冻融循环过程。

(3) 风积沙混凝土氯离子扩散时间依赖性系数与碳化深度呈线性关系, 碳化深度越深风积沙混凝土时间依赖性系数越大, C1-D4组较C0-D4组增加42.22%, C2-D4组较C0-D4组增加57.78%, 较C1-D4组增加10.94%, 时间依赖性系数越大, 混凝土氯离子扩散速率衰减越明显, 抗氯离子侵蚀能力越强。

参考文献:

- [1] 王尧鸿, 楚奇, 韩青. 库布齐风积沙对各分级河砂的填充效应[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 191-198.
WANG Yaohong, CHU Qi, HAN Qing. Filling effect of Kubuqi aeolian sand on different classifications of river sand[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1): 191-198.
- [2] 刘超, 林鑫, 朱超, 等. 风积沙应用于混凝土的研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(4): 695-705.
LIU Chao, LIN Xin, ZHU Chao, et al. Research progress

- on application of aeolian sand in concrete[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2022, 40(4): 695-705.
- [3] 张云清, 余红发, 孙伟, 等. 城市混凝土桥梁盐冻病害调查与研究[J]. *建筑材料学报*, 2012, 15(5): 665-669.
ZHANG Yunqing, YU Hongfa, SUN Wei, et al. Investigation and study of durability of bridge under salt scaling[J]. *Journal of Building Materials*, 2012, 15(5): 665-669.
- [4] 张鹏, 赵铁军, 郭平功, 等. 冻融和碳化作用对混凝土氯离子侵蚀的影响[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2006(增刊2): 238-242.
ZHANG Peng, ZHAO Tiejun, GUO Pinggong, et al. Influence of freeze-thaw cycles and carbonation action on chloride penetration into concrete[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2006(Suppl.2): 238-242.
- [5] KUOSA H, FERREIRA R M, HOLT E, et al. Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 47: 32-40.
- [6] 陈妤, 刘荣桂, 蔡东升, 等. 冻融与氯盐侵蚀作用下预应力结构耐久性试验及数值模拟[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(2): 104-110.
CHEN Yu, LIU Ronggui, CAI Dongsheng, et al. Durability test and numerical analysis of prestressed structures with cyclic freeze-thaw subjoining chloride attack[J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(2): 104-110.
- [7] SUN Lianfang, KAI Nianjiang, XING Jizhu, et al. An alternating experimental study on the combined effect of freeze-thaw and chloride penetration in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 252(20): 119025.
- [8] 李林洁, 刘清风. 冻融循环下混凝土内部结冰及氯离子传输规律的数值研究[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(8): 1-12.
LI Linjie, LIU Qingfeng. Freezing rate and chloride transport in concrete subjected to freeze-thaw cycles: a numerical study[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(8): 1-12.
- [9] 姜文翘, 刘清风. 冻融循环下混凝土中氯离子传输研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(2): 258-272.
JIANG Wenqiang, LIU Qingfeng. Chloride transport in concrete subjected to freeze-thaw cycles: a short review[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(2): 258-272.
- [10] 洪雷, 唐晓东. 冻融循环及龄期对混凝土氯离子渗透性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(2): 254-256.
HONG Lei, TANG Xiaodong. Influence of freezing-thawing cycles and curing age on chloride permeability of concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(2): 254-256.
- [11] 徐港, 卫军. 氯盐种类及冻融对混凝土氯离子迁移的影响[J]. *建筑材料学报*, 2006, 9(6): 729-734.
XU Gang, WEI Jun. Effect of salt types and freeze thaw on chloride diffusion in concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2006, 9(6): 729-734.
- [12] LI Linjie, LIU Qingfeng, TANG Luping, et al. Chloride penetration in freeze-thaw induced cracking concrete: a numerical study[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 302(2): 124291.
- [13] 金南国, 徐亦斌, 付传清, 等. 荷载、碳化和氯盐侵蚀对混凝土劣化的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(10): 1483-1491.
JIN Nanguo, XU Yibin, FU Chuanqing, et al. Influence of carbonation, chloride attack and loading on concrete deterioration[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 43(10): 1483-1491.
- [14] LI Kefei, ZHAO Fuyao, ZHANG Yiming. Influence of carbonation on the chloride ingress into concrete: Theoretical analysis and application to durability design[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123: 105788-105788.
- [15] WANG Y, NANUKUTTAN S, BAI Y. Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 173-183.
- [16] 金祖权, 孙伟, 李秋义. 碳化对混凝土中氯离子扩散的影响[J]. *北京科技大学学报*, 2008, 30(8): 921-925.
JIN Zuquan, SUN Wei, LI Qiuyi. Effect of carbonation on chloride diffusion in concrete[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2008, 30(8): 921-925.
- [17] 元成方, 牛荻陶, 齐广政. 碳化与盐雾共同作用下的混凝土氯离子扩散性能[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(5): 605-609.
YUAN Chengfang, NIU Ditao, QI Guangzheng. Diffusion of chloride ions into concrete under joint action of carbonation and salt spray[J]. *Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)*, 2013, 34(5): 605-609.
- [18] 牛荻陶, 孙丛涛. 混凝土碳化与氯离子侵蚀共同作用研究[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(8): 1094-1099.
NIU Ditao, SUN Congtao. Study on interaction of concrete carbonation and chloride corrosion[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(8): 1094-1099.
- [19] LI Kefei, ZHANG Yiming, WANG Shengnian, et al. Correction to: impact of carbonation on the chloride dif-

- fusivity in concrete: experiment, analysis and application [J]. *Materials and Structures*, 2019, 52(6): 127-127.
- [20] 郑永来, 郑洁琼, 张梅. 碳化程度对混凝土中氯离子扩散系数的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(3): 412-416.
ZHENG Yonglai, ZHENG Jieqiong, ZHANG Mei. Experimental study on effect of concrete carbonization degrees on chloride diffusion coefficient[J]. *Journal of Tongji University (Natural Sciences)*, 2010, 38(3): 412-416.
- [21] 许晨, 王传坤, 金伟良. 混凝土中氯离子侵蚀与碳化的相互影响[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(3): 376-380.
XU Chen, WANG Chuankun, JIN Weiliang. Interaction effect of chloride attack and carbonization in concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(3): 376-380.
- [22] XIAO Jianzhuang, YING Jingwei, SHEN Luming. FEM simulation of chloride diffusion in modeled recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29(4): 12-23.
- [23] YING Jingwei, ZHOU Bin, XIAO Jianzhuang. Pore structure and chloride diffusivity of recycled aggregate concrete with nano-SiO₂ and nano-TiO₂ [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 150:49-55.
- [24] YING Jingwei, HUANG Junzhou, XIAO Jianzhuang. Test and theoretical prediction of chloride ion diffusion in recycled fine aggregate mortar under uniaxial compression [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 321: 126384.
- [25] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土配合比设计规范: JGJ 55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [26] 中国建筑科学研究院. 普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准: GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [27] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程混凝土试验检测技术规范: JTS/T 236—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [28] THOMAS M D A, BAMFORTH P B. Modelling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(4): 487-495.
- (编辑:陈丽萍)
-
- (上接第122页)
- [23] THURSTON Stuart. Thermal stresses in concrete structures[D]. Canterbury:University of Canterbury, 1978.
- [24] 侯东伟, 张君. 早龄期混凝土全变形曲线的试验测量与分析[J]. *建筑材料学报*, 2010(5): 613-619.
HOU Dongwei, ZHANG Jun. Experimental measurement and analysis of full deformation curve of early age concrete [J]. *Journal of Construction Materials*, 2010(5): 613-619.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中华人民共和国国家标准. 大体积混凝土施工标准: JB50496—2018 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [26] ALTOUBAT S A, LANGE D A. Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age[J]. *ACI Materials Journal*, 2001, 98(4): 323-331.
- [27] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [28] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- (编辑:陈丽萍)