

文章编号:1673-9469(2025)01-0026-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.01.004

干燥条件下老化混凝土内部含湿量演变规律研究

蒋建华,师效哲,吴琦,卢宸宸,周家冰

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210024)

摘要: 为研究既有结构表层混凝土老化对混凝土内外湿度响应的影响,以海洋大气环境为背景,开展了碳化、氯盐侵蚀以及两者共同作用后混凝土的快速失水和反向湿度响应试验研究。试验结果表明,混凝土失水速率峰值随着碳化龄期和氯盐掺量增加均呈现先减小后增大的趋势,其中碳化14 d和氯盐掺量为1.5%时,混凝土失水速率峰值最小。碳化和氯盐侵蚀共同作用后混凝土失水速率低于两者单独作用后的混凝土失水速率。混凝土反向湿度响应随着碳化龄期和氯盐掺量增加均呈现先减缓后加快的趋势。碳化与氯盐侵蚀共同作用后混凝土反向湿度响应较两者单独作用后有所减缓。

关键词: 混凝土;碳化;氯盐侵蚀;反向湿度响应;演变规律

中图分类号: TU528

文献标识码: A

Research on the Evolution Law of Internal Moisture Content of Aging Concrete Under Dry Conditions

JIANG Jianhua, SHI Xiaozhe, WU Qi, LU Chenchen, ZHOU Jiabing

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

Abstract: To investigate the effect of aging of surface concrete on the internal and external humidity response of existing structures, experiments were conducted on carbonation, chloride salt erosion, and the rapid dehydration and reverse humidity response of concrete after their combined action in the marine atmospheric environment. The experimental results show that the peak water loss rate of concrete decreases first and then increases with the increase of carbonation age and chloride salt content. Among them, the peak water loss rate of concrete is the smallest when the carbonation age is 14 days and the chloride salt content is 1.5%. The water loss rate of concrete after the combined action of carbonation and chloride erosion is lower than that after the separate action of the two. The reverse humidity response of concrete shows a trend of first slowing down and then accelerating with the increase of carbonation age and chloride content. After the combined action of carbonation and chloride erosion, the reverse humidity response of concrete is slowed down compared to when they act alone.

Key words: concrete; carbonization; chloride erosion; reverse humidity response; evolution laws

近年来,随着建筑物的数量剧增和我国“碳达峰”“碳中和”战略的持续推进,混凝土结构耐久性显得极为重要^[1]。而混凝土结构的耐久性劣化过程又与其内部含湿状态密切相关^[2]。所以,研究复杂环境下混凝土内部含湿状态的演变对于混凝土结构耐久性寿命预测具有重要意义。

当混凝土存在内外湿度梯度时,其内部湿度

状态将会发生改变。目前常用“相对湿度”来表征外界环境湿度和混凝土内部微环境湿度状态^[3]。混凝土内部湿度响应速率与距离暴露面的远近有关,且响应存在滞后效应^[4]。Liu等^[5]研究了在不同温度、不同深度条件下对不同再生骨料取代率的混凝土内部湿度的影响规律和影响机理,并建立了再生混凝土内部相对湿度理论计算模型。蒋

收稿日期:2023-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408192);河海大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B200202232)

第一作者:蒋建华(1982—),男,重庆人,博士,副教授,研究方向:混凝土结构耐久性。

建华等^[6-8]研究了人工环境下混凝土相对湿度响应规律,发现压应力降低了混凝土中的相对湿度响应速率,而拉应力则与之相反;并发现水灰比越大,相对湿度响应越快。实际环境下混凝土还可能遭受碳化、氯盐侵蚀等老化问题,这与混凝土内部相对湿度密切相关^[9]。氯盐侵蚀后混凝土内有絮状物产生,这会破坏混凝土内初始结构,产生新裂缝^[10]。Da 等^[11]发现在氯盐侵蚀过程中,流体溶解并在孔隙中发生渗透流动,对混凝土骨架产生渗透压力和化学腐蚀,两种效应共同作用造成了内部孔隙结构的变异。碳化则会细化混凝土孔隙结构,提高混凝土密实度,减小其吸水率,降低渗透性,但会使得混凝土内临界孔径和最可几孔径增大,提高水泥浆体之间的孔隙连通性^[12-14]。

目前,关于混凝土内外湿度响应的研究主要集中于考虑混凝土组成、荷载应力以及环境条件的影响等方面,忽略了实际环境下混凝土面临的老化作用的影响。本文在海洋大气环境条件下,考虑混凝土遭受碳化与氯盐侵蚀,重点研究老化混凝土在干燥(快速失水、反向湿度响应)条件下内部含湿状态的变化规律和机理。研究工作可以为海洋大气环境下混凝土结构耐久性定量化研究和使用寿命预测方法的建立奠定基础。

1 试验方案

1.1 原材料

水泥采用 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥,水泥化学组成见表 1。细骨料为普通河砂,细度模数为 2.75,含水率为 2%,含泥量为 1%;粗骨料为碎石,粒径范围为 5~20 mm。外加剂为液态聚羧酸高效减水剂。试验用水为普通自来水。

表 1 水泥的主要化学组成

Tab.1 Main chemical components of cement			
成分	含量	成分	含量
SiO ₂	21.35%	MgO	3.08%
Al ₂ O ₃	4.67%	SO ₃	2.25%
Fe ₂ O ₃	3.31%	K ₂ O	0.54%
TiO ₂	0.28%	Na ₂ O	0.21%
CaO	62.60%	LOI	1.71

1.2 试件设计与制作

1.2.1 失水试验试件

试验选用边长为 100 mm 的立方体试块,并采用内掺氯盐和加速碳化的方法模拟老化混凝土。试验设计三组试验工况,分别为水灰比为 0.40 条件下,不同碳化时间的试验工况;水灰比分别为 0.33、0.40 和 0.45 条件下,不同氯盐含量的试验工况;以及水灰比为 0.40 条件下,不同碳化时间与不同氯盐含量共同作用的试验工况。具体的混凝土配合比如表 2 所示。所有试块均采用立方体塑料模具制作,共计 25 种试验工况,每种工况制作 3 个试块。混凝土浇筑 24 h 后拆模,然后将试块置于温度为(20±2)℃的水中养护 28 d。

表 2 混凝土配合比

Tab.2 Mixture proportion of concrete					
水灰比	水/ (kg · m ⁻³)	砂/ (kg · m ⁻³)	天然骨料/ (kg · m ⁻³)	水泥/ (kg · m ⁻³)	减水剂/ (kg · m ⁻³)
0.33	171	636	1 131	512	3.1
0.40	180	655	1 165	450	1.8
0.45	200	666	1 140	444	0.0

1.2.2 湿度响应试验试件

湿度响应试验采用带有预留孔的边长为 100 mm 的立方体试块,试件设计及具体尺寸如图 1 所示。混凝土配合比同表 2。试件制作时,利用 PVC 管制备预留孔道,便于后期试验中埋设湿度传感器。混凝土内部相对湿度的测量位置距离试

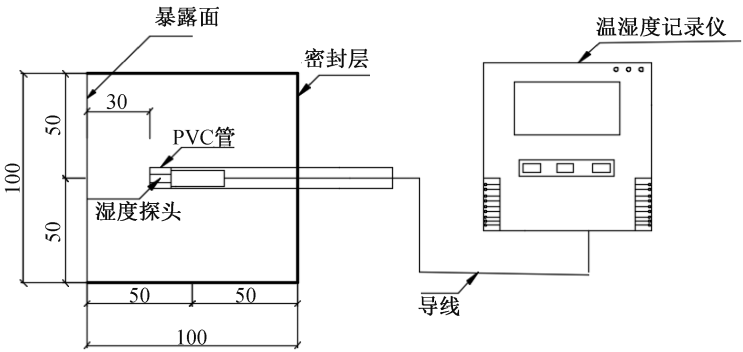


图 1 湿度响应试验试件设计及尺寸(单位:mm)

Fig.1 Design and dimensions of specimen for humidity response (unit:mm)

件表面 30 mm。将一根直径与 PVC 管内径相同的尼龙棒插入 PVC 管中,且端部与 PVC 管端部齐平;将 PVC 管固定至距离模具底部 30 mm 处,浇筑混凝土。混凝土浇筑 24 h 后拆模,此时试件中的 PVC 管与尼龙棒不拔出,然后将试件置于温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的水中养护 28 d。

1.3 试验方法

1.3.1 碳化及氯盐侵蚀试验

为了模拟实际工程中混凝土的老化,本试验通过内掺不同含量氯化钠(氯化钠占胶凝材料质量百分数为 0%、1.5%、3.0%、4.5%)的方式来模拟混凝土已遭受不同程度的氯盐侵蚀;而混凝土的碳化则通过快速碳化试验来模拟。快速碳化试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)进行,碳化箱内环境条件为温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度 $(70 \pm 5)\%$, CO_2 浓度 $(20 \pm 3)\%$ 。碳化龄期设置为 7、14 和 28 d。

1.3.2 快速失水试验

为了模拟一维失水过程,试件除了一个暴露面以外,其余所有面均采用锡纸密封。将试件浸泡于水箱中,7 d 后将试件从水箱中取出,并用干毛巾拭去表面多余水分,称取其质量并记为混凝土试件饱和状态下的初始质量 M_0 (kg)。然后,将饱水混凝土试件置于干燥箱中进行快速失水试验,干燥温度为 60°C 。早期每隔 1 h 称量一次试件的质量,记为 M_t (kg),共记录 7 次;然后每隔 24 h 称取一次试件的质量,共记录 7 次。最后计算失水速率 $V_L = (M_0 - M_t) / (A_t) \times 100\%$ 。其中, t 为失水时间, h; A 为混凝土干燥面面积, m^2 。

1.3.3 反向湿度响应试验

混凝土内部相对湿度高于外界环境湿度时,混凝土处于干燥状态,将这一过程定义为“反向湿度响应”。试验时,混凝土内部初始相对湿度控制在 $(90 \pm 3)\%$,恒温恒湿箱内的相对湿度设置为 60%,温度为 40°C 。为了模拟一维湿度响应过程,试件除了一个暴露面以外,其余所有面均采用锡纸密封。试验过程中利用记录仪自动采集混凝土内部湿度的相对湿度值,采集间隔时间设定为 24 h,试验持续时间为 30 d。

2 失水试验结果与分析

2.1 碳化对混凝土失水速率的影响

干燥条件下,水灰比为 0.40 的不同碳化龄期

的混凝土失水速率的变化如图 2 所示。不同工况下混凝土失水速率随时间的变化趋势基本相同,混凝土的失水过程大致可以分为三个阶段^[15]:第一阶段为升温干燥阶段,此过程混凝土失水速率随着时间增大而增大;第二阶段为干燥过渡阶段,内部水分的传输速率减缓,混凝土的失水速率逐渐下降;第三阶段为基本干燥阶段,此时混凝土失水速率变化极小,可认为混凝土已经完全干燥。失水速率随失水试验时间的推进先增大后减小,试验进行 4 h 时混凝土失水速率最大。混凝土失水速率随着碳化龄期增加呈现先减小后增大的趋势,碳化 7、14 和 28 d 混凝土的失水速率峰值相比于未碳化混凝土分别降低了 12.31%、24.62% 和 20.00%,碳化 14 d 混凝土的失水速率最低。原因在于混凝土碳化过程中, CO_2 与混凝土中的氢氧化钙等碱性物质发生反应生成碳酸钙,使得混凝土内部结构更密实,但长时间碳化会引起混凝土内部收缩变形,产生微裂缝,一定程度上加快了水分的传输^[16]。

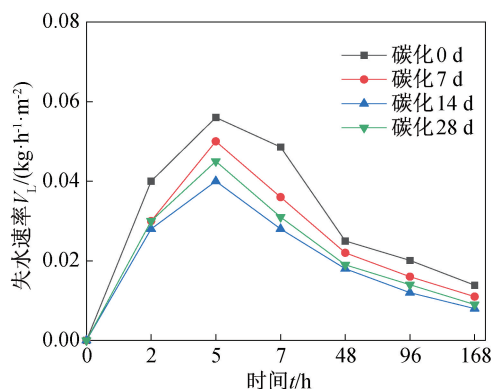


图 2 碳化混凝土的失水速率时变曲线

Fig. 2 Time-varying curves of water loss rate of concrete after carbonization

2.2 氯盐侵蚀对混凝土失水速率的影响

干燥条件下,不同水灰比和氯盐含量混凝土失水速率的变化如图 3 所示。混凝土失水速率仍然是在 4 h 时达到峰值,且水灰比越大,混凝土失水速率越快。水灰比为 0.45 和 0.40 的混凝土失水速率峰值分别为水灰比为 0.33 混凝土的 1.66 倍和 1.26 倍。与未掺氯盐混凝土相比,当水灰比为 0.33、0.40、0.45 时,氯盐掺量为 1.5% 的混凝土失水速率峰值分别降低了 25.00%、17.74%、33.77%;氯盐掺量为 3.0% 的混凝土失水速率峰值分别增加了 4.17%、4.84%、3.90%;氯盐掺量为 4.5% 的混凝土失水速率峰值分别增加了 19.79%、

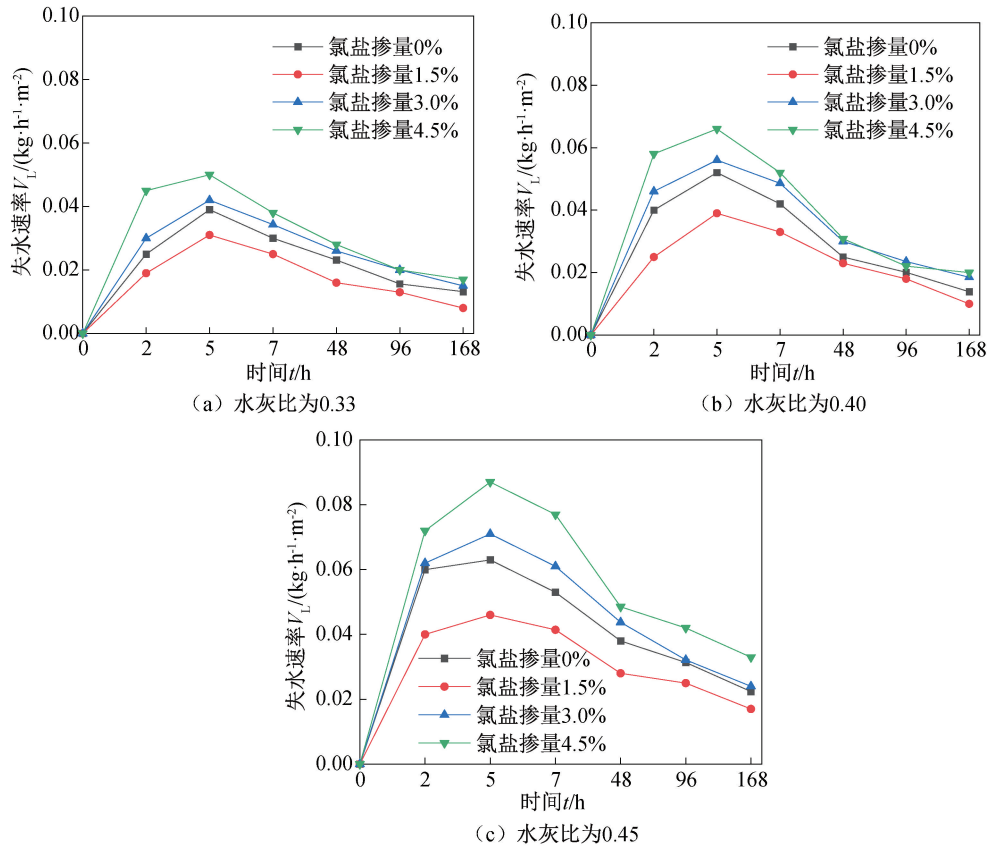


图3 不同氯盐掺量混凝土失水速率时变曲线

Fig. 3 Time-varying curves of water loss rate of concrete with different chloride contents

17.74%、24.68%。混凝土失水速率随着氯盐掺量的增加呈现先减小后增大的趋势,氯盐掺量为1.5%时最小。原因在于混凝土掺入一定量的氯盐后,氯盐与水化铝酸钙等发生反应生成新产物Friedel盐,改善了混凝土的初始孔隙结构,抑制水分传输;但随着氯盐掺量增大,过多的新产物使得混凝土内部产生新的孔隙和裂缝,反而加快了水分传输^[17]。总体而言,水灰比越大,氯盐掺量对混凝土失水速率的影响越显著。

2.3 碳化和氯盐侵蚀共同作用对混凝土失水速率的影响

干燥条件下,碳化与氯盐侵蚀共同作用后的混凝土(水灰比为0.40)失水速率的变化如图4所示。碳化和氯盐侵蚀共同作用时,混凝土失水速率峰值随着氯盐掺量和碳化龄期的增加均呈现为先减小后增大趋势,与两者单独作用后的变化趋势相似。以碳化龄期14 d为例,氯盐掺量为1.5%、3.0%的混凝土失水速率峰值相比于未掺氯盐混凝土的分别降低了28.57%、8.16%;氯盐掺量为4.5%的混凝土失水速率峰值相比于未掺氯盐混凝土的增加了8.16%。以氯盐掺量为3.0%为

例,碳化7、14、28 d混凝土失水速率峰值相比于未碳化混凝土分别降低了14.06%、29.69%和25.00%。总体而言,除了氯盐掺量为4.5%时,混凝土失水速率峰值较单独碳化后有所加快以外,碳化和氯盐侵蚀共同作用后混凝土失水速率低于两者单独作用后的混凝土失水速率。原因在于,适量的氯盐可以细化水泥浆体结构,增强其密实度^[18]。在氯盐与碳化的双重作用下,混凝土孔隙结构更加密实,失水速率减小。此外,碳化作用会降低混凝土内部的pH值,使得结合氯离子转化为自由氯离子^[19],当氯盐掺量过大时(本文氯盐掺量为4.5%),导致氯盐侵蚀反应加剧,生成过量的Friedel盐破坏混凝土内部结构,从而造成失水速率加快。

3 反向湿度响应试验结果与分析

3.1 碳化对混凝土反向湿度响应的影响

干燥条件下,水灰比为0.40的不同碳化龄期的混凝土内部相对湿度的变化如图5所示。由于混凝土内外存在较大的初始湿度差,混凝土内部相对湿度出现显著下降。湿度响应进行至30 d时,碳化龄期为0、7、14、28 d的混凝土内部相对

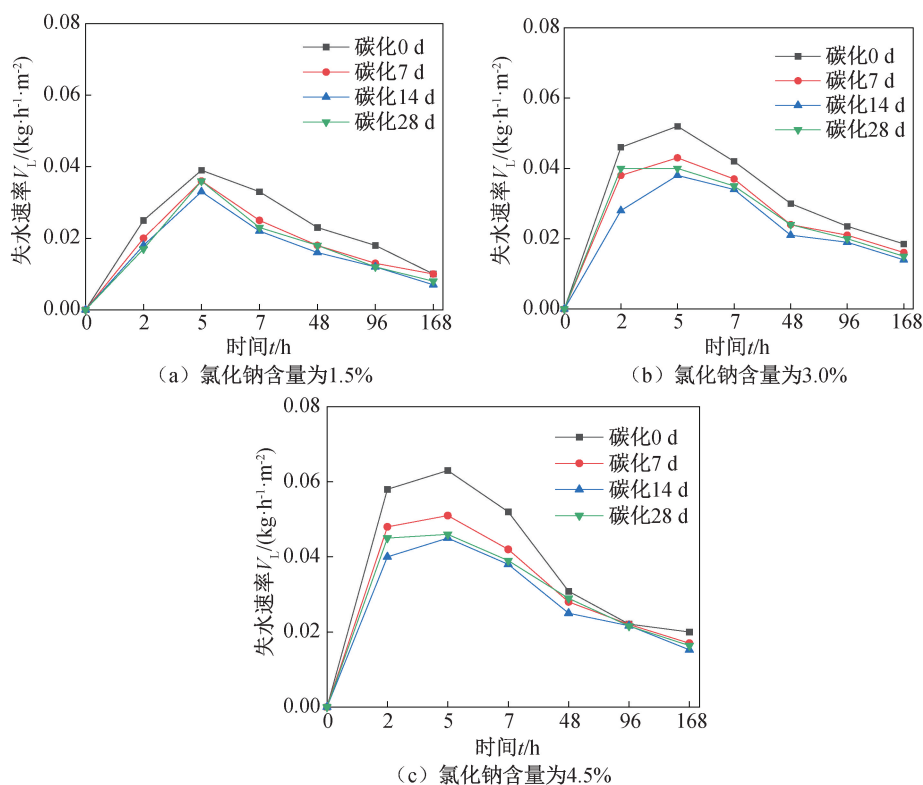


图4 碳化和氯盐侵蚀混凝土的失水速率时变曲线

Fig. 4 Time-varying curves of water loss rate of concrete after carbonization and chloride erosion

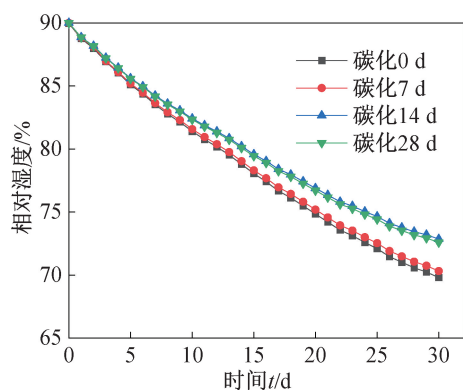


图5 不同碳化龄期混凝土反向湿度响应曲线

Fig. 5 Reverse humidity response curve of concrete with different carbonation ages

湿度下降率分别为 21.06%、17.67%、15.44%、16.28%。混凝土内部湿度下降率随碳化龄期的增大呈先减小后增大趋势,碳化龄期为 14 d 时最小。

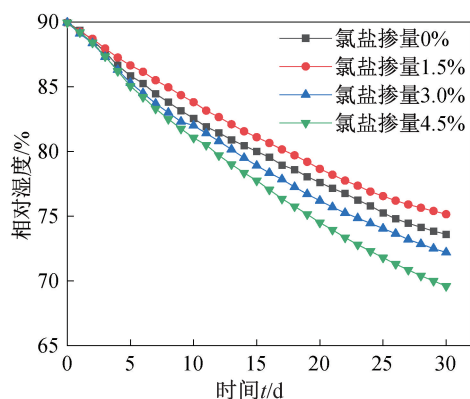
3.2 氯盐侵蚀对混凝土反向湿度响应的影响

干燥条件下,不同水灰比和氯盐含量混凝土内部相对湿度的变化如图 6 所示。反向相对湿度响应进行至 30 d 时,未掺氯盐的水灰比为 0.33、0.40 和 0.45 的混凝土内部相对湿度下降率分别为 18.22%、21.11%、24.17%;氯盐掺量为 1.5% 的三种水灰比的混凝土内部相对湿度下降率分别为

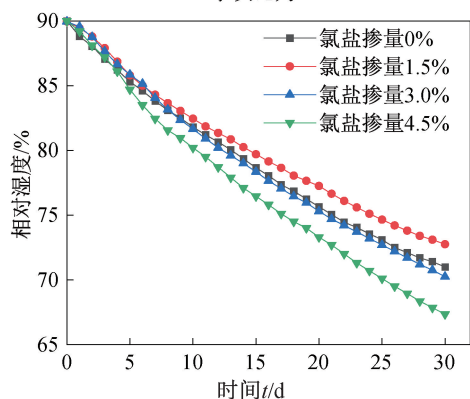
16.50%、19.17%、21.94%;氯盐掺量为 3.0% 的三种水灰比的混凝土内部相对湿度下降率分别为 19.78%、21.94%、24.50%;氯盐掺量为 4.5% 的三种水灰比的混凝土内部相对湿度下降率分别为 22.67%、25.17%、26.61%。由此可以看出,水灰比越大,混凝土内部湿度下降越快。这主要是因为水灰比越大的混凝土孔隙率越大,孔隙连通性越强,湿气传输越快。此外,当水灰比一定时,混凝土内部相对湿度下降率随氯盐掺量增加呈先减小后增大趋势,氯盐掺量为 1.5% 的混凝土内部相对湿度下降率最小。

3.3 碳化与氯盐侵蚀共同作用对混凝土反向湿度响应的影响

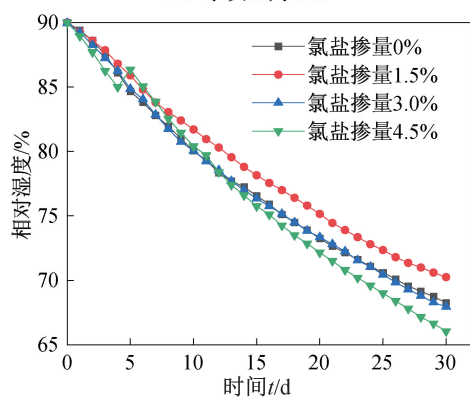
干燥条件下,碳化与氯盐侵蚀共同作用后的混凝土(水灰比为 0.40)内部相对湿度的变化如图 7 所示。反向相对湿度响应试验进行至 30 d 时,以碳化龄期 14 d 为例,氯盐掺量为 0%、1.5%、3.0% 和 4.5% 的混凝土相对湿度下降率分别为 19.04%、16.83%、18.17% 和 19.78%。以氯盐掺量 3.0% 为例,反向相对湿度响应进行至 30 d 时,碳化龄期为 0、7、14 和 28 d 的混凝土内部相对湿度下降率分别为 21.94%、19.89%、18.17% 和 19.22%。



(a) 水灰比为0.33



(b) 水灰比为0.40



(c) 水灰比为0.45

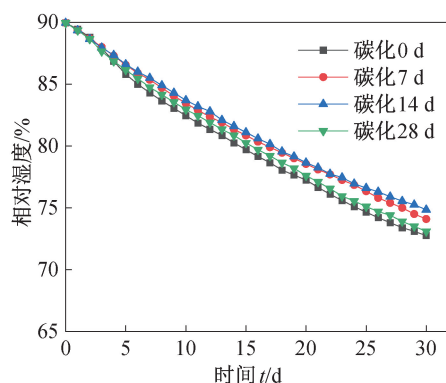
图6 不同氯盐掺量混凝土反向湿度响应曲线

Fig. 6 Reverse humidity response curve of concrete with different chloride contents

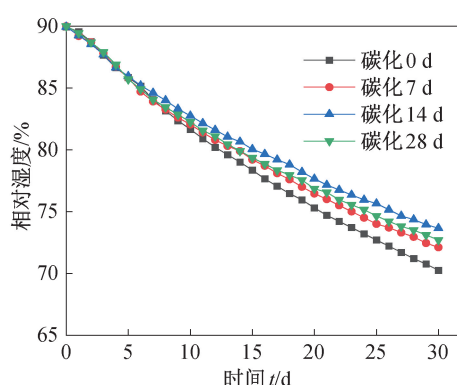
试验结果表明,在碳化龄期0~28 d,氯盐掺量0%~4.5%的范围内,碳化与氯盐侵蚀共同作用后,除了氯盐掺量为4.5%时,混凝土反向湿度响应较单独碳化后有所加快以外,总体而言,与两者单独作用相比,混凝土反向湿度响应进一步减缓,机理解释与2.3节相同。

4 结论

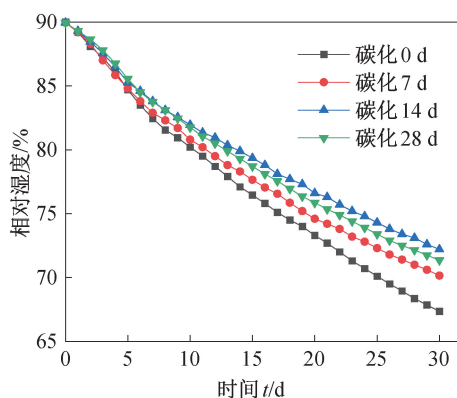
1) 碳化和氯盐侵蚀对混凝土失水速率有显著



(a) 氯化钠含量为1.5%



(b) 氯化钠含量为3.0%



(c) 氯化钠含量为4.5%

图7 碳化与氯盐侵蚀共同作用后混凝土反向湿度响应曲线

Fig. 7 Reverse humidity response curve of concrete after combined actions of carbonization and chloride erosion

影响。混凝土失水速率随碳化龄期和氯盐掺量的增加均呈现先减小后增大的趋势,其中碳化14 d和氯盐掺量为1.5%时混凝土失水速率峰值最小。总体而言,碳化和氯盐侵蚀共同作用后混凝土失水速率低于两者单独作用后的混凝土失水速率。

2) 碳化和氯盐侵蚀对混凝土反向湿度响应也有显著影响。混凝土反向湿度响应随碳化龄期和氯盐掺量的增加均呈现先减小后增大的趋势。碳化0、7、28、14 d的混凝土反向湿度响应依次减缓;氯盐掺量为4.5%、3.0%、0%和1.5%的混凝土反

向湿度响应依次减缓。总体而言,碳化与氯盐侵蚀共同作用后混凝土反向湿度响应较两者单独作用后有进一步减缓。

参考文献:

- [1] 邓建红, 安冉. 碱激发条件下高掺量粉煤灰混凝土的耐久性试验研究[J]. 河南科学, 2023, 41(6): 875-882.
- [2] 张继超, 王仁义. 湿度对建筑混凝土材料耐久性影响仿真分析[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 336-340.
- [3] ZHAO H, JIANG K, YANG R, et al. Experimental and theoretical analysis on coupled effect of hydration, temperature and humidity in early-age cement-based materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 146: 118784.
- [4] 刘军, 李尚霖, 钟道君, 等. 复杂环境下混凝土结构内湿度微环境的特征及响应规律[J]. 混凝土, 2021(2): 17-19.
- [5] LIU C, LIU H, ZHU C, et al. On the mechanism of internal temperature and humidity response of recycled aggregate concrete based on the recycled aggregate porous interface[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 103: 23-25.
- [6] 蒋建华, 袁迎曙, 王嵩林, 等. 人工气候环境下混凝土内相对湿度响应预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(12): 5091-5099.
- [7] JIANG J H, YUAN Y S. Quantitative models of climate load and its effect in concrete structure[J]. Construction and Building Materials, 2012, 29(2): 102-107.
- [8] JIANG J H, HU F F, FENG X N, et al. Response law and diffusion coefficient of moisture in concrete with load stress[J]. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 2019, 26(2): 135-141.
- [9] CHANG H, MU S, FENG P. Influence of carbonation on "maximum phenomenon" in surface layer of specimens subjected to cyclic drying-wetting condition[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 103: 95-109.
- [10] 杨宁, 白二雷, 许金余, 等. 氯盐对混凝土力学及声学性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(3): 505-508.
- [11] DA B, YU H F, MA H Y, et al. Reinforcement corrosion research based on the linear polarization resistance method for coral aggregate seawater concrete in a marine environment[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2018, 65(5): 458-470.
- [12] 赵冰华, 费正岳, 赵宇, 等. 碳化对混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(6): 1641-1644.
- [13] 郑永来, 郑洁琼, 张梅. 碳化程度对混凝土中氯盐扩散系数的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 412-416.
- [14] 元成方, 牛获涛, 陈娜, 等. 碳化对混凝土微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(4): 687-691+707.
- [15] 黄政宇, 李涛. 超高性能混凝土基体中氯盐结合特性的研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(10): 1912-1918.
- [16] 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.
- [17] KADDAH F, RANAIVOMANANA H, AMIRI O, et al. Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates: Investigation on the microstructure and transport properties at cement paste and mortar scales[J]. Journal of CO₂ Utilization, 2022, 57: 101885.
- [18] 柳俊哲, 袁伟静, 贺智敏, 等. 碳化与氯盐复合作用下水泥浆体的微结构演变[J]. 复合材料学报, 2015, 32(5): 1536-1546.
- [19] 张君博, 肖薇薇, 陈鹏飞, 等. 海洋环境人防工程混凝土结构耐久性试验研究[J]. 混凝土, 2021(11): 58-62.

(责任编辑 王利君)