

非饱和砂浆氯离子传输与 pH 分布相关性研究

杨 林¹, 张云升², Carmen Andrade³, 张春晓^{4,✉}

1 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001

2 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050

3 International Center for Numerical Methods in Engineering, CIMNE, Spain

4 中国人民解放军军事科学院国防工程研究院工程防护研究所, 洛阳 471023

研究了非饱和砂浆在氯盐溶液中持续浸泡、干湿循环作用下的氯离子传输和 pH 分布, 并考虑了碳化作用对氯离子传输的影响, 重点分析了氯离子传输与 pH 分布的相关性。研究表明: 干燥砂浆在 NaCl 溶液中持续浸泡不同时间后, 氯离子浓度分布与 pH 分布没有表现出明显的相关性; 然而, 在干湿循环作用下, 非饱和砂浆的氯离子传输与 pH 分布密切相关, 砂浆近表层氯离子浓度的减小与 pH 下降具有一致性; 非饱和预碳化砂浆经干湿循环之后的氯离子浓度分布与 pH 分布具有相同的特征, 均呈“S”型, 碳化作用使砂浆的 pH 分布发生改变, 进而影响了氯离子传输行为。

关键词 非饱和混凝土 氯离子 碳化 耐久性

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A

Study on the Correlation Between Chloride Ion Transportation and pH Distribution in Unsaturated Mortar

YANG Lin¹, ZHANG Yunsheng², ANDRADE Carmen³, ZHANG Chunxiao^{4,✉}

1 School of Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

2 School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

3 International Center for Numerical Methods in Engineering, CIMNE, Spain

4 Institute of Engineering Protection, Institute of Defense Engineering, Academy of Military Science of PLA, Luoyang 471023, China

Chloride ion transportation and pH distribution of unsaturated mortar suffered from continuous immersion in chloride solution and drying-wetting cycles were investigated, and the influence of carbonation on chloride transportation was considered. What's more, the correlation between chloride transportation and pH distribution was analyzed systematically. The results show that the chloride transportation and pH distribution do not show a direct correlation when the dried mortars were suffered from continuous immersing in NaCl solution for different time. However, under the drying-wetting cycles, the chloride transportation of unsaturated mortar is closely related to pH distribution. The decrease of chloride content near the surface of mortar is consistent with the decrease of pH. For the unsaturated pre-carbonated mortar suffered from drying-wetting cycles, the chloride content distribution and pH distribution show the same characteristics, similar to “S” shape. The carbonation of unsaturated mortar changes the pH distribution and further affects the behavior of chloride transportation.

Key words unsaturated concrete, chloride ion, carbonation, durability

0 引言

在造成混凝土结构破坏的众多原因中, 钢筋锈蚀被列为第一大因素, 而氯离子侵蚀是导致钢筋锈蚀的主要原因^[1]。同时, 从海洋工程中可以发现, 混凝土结构最先发生腐蚀破坏的区域往往是潮差区、浪溅区、干湿交界处, 而且破坏程度最为严重, 主要原因是这些区域的混凝土通常处于非饱和状态。氯离子的传输除了浓度梯度的扩散外, 还有毛细管作用力下的对流效应, 加速了氯离子的迁移^[1-3]。因此, 科研人员对混凝土中氯离子传输行为的研究由饱和状态转向非饱和状态。

基于海洋环境下混凝土结构服役的环境特点, 主要采用干湿循环的方式对非饱和混凝土氯离子传输行为进行模拟研究。Fraj 等^[4]研究了干湿循环作用下混凝土相对湿度对氯离子传输的影响, 发现当混凝土的相对湿度从 90% 降低到 50% 时, 氯离子表观扩散系数会提高 2~9 倍。Hong 等^[5]重点研究了干湿循环次数对氯离子渗透深度的影响, 认为氯离子的渗透深度与干湿循环次数的平方根呈线性增长关系。

Xu 等^[6]利用试验和数值模拟的方法研究了干湿循环制度对氯离子传输的影响, 发现氯离子的最大传输深度与混凝土扩散系数及干湿循环制度密切相关, 而与表面氯离子浓度几乎无关。Chang 等^[7]基于孔结构研究了干湿循环作用下浆体对流区氯离子浓度峰的迁移, 结果表明, 浆体总孔隙率越高, 氯离子峰值浓度越大, 且临界孔径增大, 氯离子浓度峰出现的位置越深。曹卫群^[8]对干湿交替下混凝土中氯离子的传输机理进行了研究, 并建立了氯离子扩散-对流传输模型。此外, 在干湿循环过程中, 混凝土不可避免地会发生碳化、离子溶出等劣化现象, 造成砂浆近表层 pH 下降, 进而影响氯离子传输行为。目前已开展了大量有关混凝土碳化对氯离子传输影响的研究, 但结论并不一致。一种观点认为, 碳化使混凝土孔隙率降低以及孔径重新分布, 阻碍了氯离子传输; 另一观点认为, 碳化使混凝土中的结合氯离子释放, 增加了孔溶液中的自由氯离子浓度, 加速了氯离子传输^[9]。然而, 碳化仅仅是造成混凝土 pH 下降的一个因素, 只分析碳化作用对氯离子传输的影响是片面的。因此, 开展氯离子传输与 pH 分布的相关性研究具有更大的理论意义和应用价值。

基金项目: 国家自然科学基金(51808508; 52078468)

This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51808508, 52078468).

✉ cxz_007@163.com

18064

DOI: 10.11896/cldb.20070324

本工作研究了非饱和砂浆在氯盐溶液中持续浸泡、干湿循环作用下饱和度变化、氯离子传输和 pH 分布,重点分析了氯离子传输与 pH 分布的相关性,以期为混凝土结构的耐久性设计、寿命预测等提供理论依据。

1 实验

1.1 原材料与试样制备

采用 P·I 52.5 硅酸盐水泥和标准砂,水泥的化学成分如表 1 所示。按 $m(\text{水泥}):m(\text{砂})=1:3$ 、 $W/C=0.5$ 制备标准砂浆,成型直径 100 mm、高 200 mm 的圆柱形试件,标准养护 24 h 后脱模,然后放入水中继续养护 28 d。

表 1 水泥的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition (mass fraction, %) of cement								
CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Others
64.36	0.62	19.87	3.75	4.05	3.43	0.65	0.65	2.62

试样制备分为三部分:

(1) 将养护完毕的试件沿高度方向切割成厚度为 20 mm 的片状试样,在电热鼓风干燥箱中于 105 °C 干燥至恒重,然后将砂浆试样的侧面和一个端面用环氧树脂进行密封,将另一端面暴露于 NaCl 溶液中,此部分研究干燥砂浆的氯离子传输。

(2) 将养护完毕的试件按纵向高度平均切为两段,并进行真空饱水,然后将饱和的砂浆试样在干燥箱中于 50 °C 干燥不同时间以达到预设初始饱和度($\theta_i=0.6、0.8、1.0$)。饱和度的计算方法如下:

$$\theta = \frac{m_x - m_0}{m_s - m_0} \quad (1)$$

式中: θ 是试样的饱和度; m_x 是 $\theta=x$ 时试样的质量, m_0 是绝干试样的质量(在 105 °C 干燥至恒重); m_s 是饱和试样的质量。

当试样冷却至室温后,将试样的侧面和成型面用环氧树脂进行密封,而切割面暴露于 NaCl 溶液中。待环氧树脂固化后,将试样用塑料膜进行包裹,并置于室内 20 d 以上,使试样内部水分分布均匀,得到不同初始饱和度的砂浆试样。

(3) 选取处理完毕后饱和度分别为 0.6、0.8 的砂浆试样,放置于碳化箱中碳化 30 d,碳化条件为:CO₂ 浓度 3%、温度 20 °C,制得预碳化砂浆试样。

1.2 试验方法

1.2.1 氯离子传输试验

(1) 持续浸泡:将干燥砂浆浸泡于质量分数为 3% 的 NaCl 溶液中,砂浆未密封端面直接与盐溶液接触,氯离子向上传输,液面高于试样底面 3~5 mm,如图 1 所示,连续浸泡至 60 d。

(2) 干湿循环:将不同饱和度的砂浆试样和预碳化试样在氯盐溶液中进行干湿循环试验,干 4 d+湿 3 d 为一个循环。干燥在 50 °C 的电热鼓风干燥箱中进行;润湿是将未密封的试样端面浸泡于质量分数为 3% 的 NaCl 溶液中,如图 1 所示。

1.2.2 氯离子含量测定

达到预设氯盐溶液侵蚀时间后取出试样,由表及里逐层磨粉,每层的厚度为 1 mm。将收集到的粉末在电热鼓风干燥

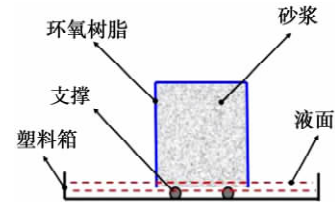


图 1 砂浆试样浸泡于 NaCl 溶液

Fig.1 Mortar exposed to NaCl solution

箱中于 105 °C 干燥 24 h 以上,冷却至室温后,用 0.15 mm 方孔筛筛除大颗粒后采用沉淀-电位滴定法测定总(酸溶)氯离子含量^[1]。

1.2.3 pH 测定

称取 1 g 粉末样品放置于量筒中,加入 10 mL 蒸馏水并迅速摇动使其溶解,放置 30 s 后采用 pH 计(STAR A215, Thermo Scientific)测定上清液的 pH 值。为了防止碳化,整个测试过程需在 2 min 内完成。

2 结果与分析

2.1 干燥砂浆持续浸泡下氯离子传输与 pH 分布

图 2 为干燥砂浆在 NaCl 溶液中持续浸泡的饱和度变化。可见,随着浸泡时间的延长,砂浆内部的饱和度逐渐增大,尤其是在浸泡开始的几小时内,砂浆内部的饱和度迅速增大,此阶段砂浆的水分传输主要在毛细孔内进行,其驱动力为毛细管作用力^[10-11]。持续浸泡至 24 h,砂浆内部的饱和度达到 0.926,吸水过程由快速阶段过渡到稳定阶段。浸泡至 7 d 时,砂浆内部的饱和度达到 0.969,此时砂浆的水分传输主要发生在凝胶孔内,以水分扩散为主^[11]。当持续浸泡至 30 d、60 d 时,砂浆内部的饱和度分别为 0.986、0.99,砂浆吸水已极为困难,接近理论饱和状态。另一方面,水分进入砂浆内部会造成未水化水泥颗粒的进一步水化,新生成的水化产物填充孔隙,使砂浆的微结构更加密实,从而降低了水分的传输速率,但该影响极为有限。

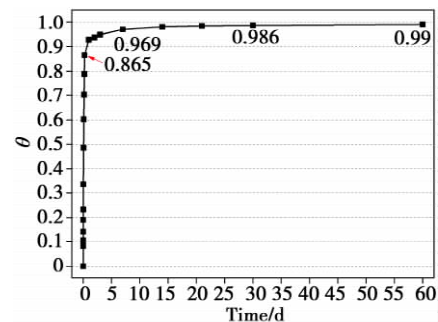


图 2 干燥砂浆在 NaCl 溶液中浸泡的饱和度变化

Fig.2 Saturation degree evolution for the dried mortar exposed to NaCl solution

图 3 为干燥砂浆在 NaCl 溶液中持续浸泡不同时间后的氯离子浓度分布与 pH 分布。为了避免偶然因素对试验结果的影响,将试样近表面 1 mm 的试验结果去除。如图 3a 所示,当干燥砂浆在 NaCl 溶液中浸泡 6 h 时,砂浆的氯离子浓度分布由表及里并没有表现出明显的浓度梯度;当浸泡至 7 d 时,砂浆近表层的氯离子浓度显著增大,而深度大于 7 mm 的

氯离子浓度与浸泡 6 h 时一致; 当浸泡时间由 7 d 延长到 30 d 时, 砂浆不同深度的氯离子浓度均大幅增加; 而浸泡时间由 30 d 延长至 60 d 时, 砂浆近表面的氯离子浓度几乎无变化, 而深度大于 7 mm 的氯离子浓度有所增加。以上干燥砂浆的氯离子传输特点与规律受控于不同阶段的氯离子传输机制。当干燥砂浆浸泡于 NaCl 溶液中, 氯离子向砂浆内部的传输包括两个过程: 一是因毛细管作用力的存在而产生的对流效应, 即氯离子随孔隙水运动而发生迁移; 二是因浓度梯度造成的扩散^[2,12-13]。如图 2 所示, 干燥砂浆在 NaCl 溶液中浸泡初期, 水分传输以毛细吸水为主, 氯离子传输则是以对流效应为主, 传输速率快; 此后, 砂浆逐渐趋于饱和, 氯离子的传输以扩散为主, 传输速率变慢。

图 3b 所示为干燥砂浆在 NaCl 溶液中浸泡不同时间后的 pH 变化。随着浸泡时间的延长, 砂浆的 pH 整体上呈现降低的趋势, 尤其是浸泡时间从 6 h 延长至 30 d, 砂浆的 pH 下降较为明显; 而当浸泡时间从 30 d 延长至 60 d, 砂浆近表面的 pH 有较为明显的下降, 但在深度大于 7 mm 后 pH 下降并不显著。同时, 从砂浆的 pH 分布可以看出, 砂浆表层的 pH 远小于内部的 pH, 且浸泡时间越长, 砂浆更深处的 pH 逐渐降低, 造成这一现象的主要原因是砂浆表面的碳化和浸泡过程中 OH⁻ 的溶出^[7,14-15]。由图 3 可以看出, 干燥砂浆在 NaCl 溶液中持续浸泡不同时间后的氯离子浓度分布与 pH 分布没有表现出直接的相关性。

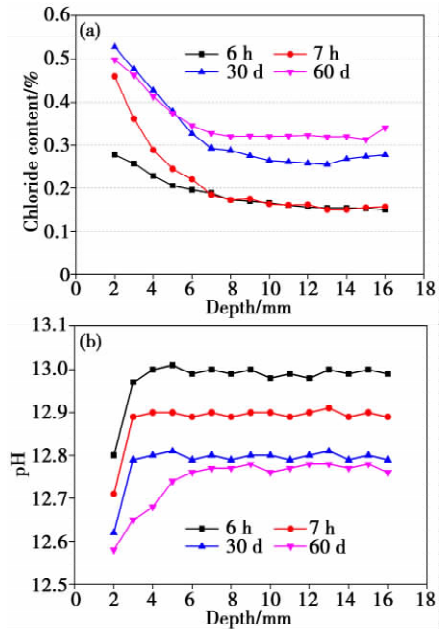


图 3 干燥砂浆在 NaCl 溶液中浸泡不同时间后的 (a) 氯离子浓度分布与 (b) pH 分布

Fig.3 (a) Chloride content and (b) pH distribution of the dried mortar exposed to NaCl solution for different time

2.2 非饱和砂浆干湿循环作用下氯离子传输与 pH 分布

图 4 所示为 $\theta_i = 0.6, 0.8, 1.0$ 的砂浆经过 4 次、8 次、12 次

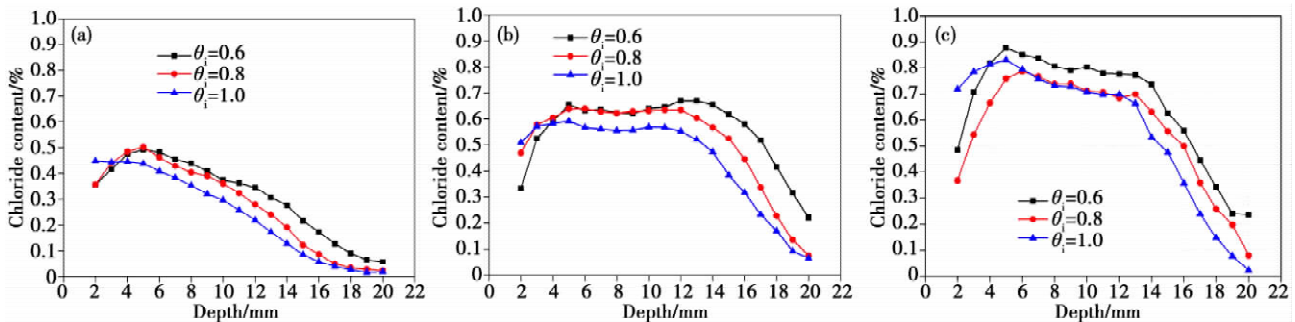


图 4 干湿循环作用下砂浆的氯离子浓度分布: (a) 4 次循环; (b) 8 次循环; (c) 12 次循环

Fig.4 Chloride content distribution of mortar suffered from the cycles of drying-wetting: (a) 4 cycles; (b) 8 cycles; (c) 12 cycles

干湿循环之后的氯离子浓度分布。如图 4a 所示, 经过 4 次干湿循环之后, $\theta_i = 0.6, 0.8$ 的砂浆氯离子浓度分布并不是由外向内逐渐降低, 氯离子浓度最大值 (C_{max}) 出现在距表面 5 mm 处 (即 $D = 5$ mm, 下同); 对于 $\theta_i = 1.0$ 的砂浆, $D \leq 5$ mm 的氯离子浓度变化不大, 而当 $D > 5$ mm 时, 氯离子浓度逐渐降低。如图 4b 所示, 经过 8 次干湿循环之后, 砂浆的氯离子浓度显著增加, 且不同初始饱和度的砂浆近表面氯离子浓度均明显下降。氯离子浓度分布特征可划分三个阶段: (1) $D \leq 5$ mm, 随着深度增加, 氯离子浓度增加; (2) $5 \text{ mm} < D \leq 12$ mm, 氯离子浓度达到最大值, 且在一定的范围内波动, C_{max} 向内延伸至 $D = 12$ mm; (3) $D > 12$ mm, 随着深度增加, 氯离子浓度逐渐降低。如图 4c 所示, 经过 12 次干湿循环之后, 砂浆的氯离子浓度继续增加, 但氯离子浓度分布特征发生了变化: $5 \text{ mm} < D \leq 13$ mm, 随着深度增加, 氯离子浓度出现小幅度下降; $D > 13$ mm, 氯离子浓度迅速下降。另外, 由图 4 还可以看出, 在氯离子浓度下降阶段, 砂浆的初始饱和度越小, 相同位置处

的氯离子浓度越大。当砂浆处于非饱和状态时, 氯离子的传输是由扩散与对流共同作用, 且对流效应占主导地位; 砂浆内部饱和度越小, 毛细管作用力越大, 对流效应越强, 氯离子传输越快^[16-17]。

图 5 所示为 $\theta_i = 0.6, 0.8, 1.0$ 的砂浆在 3% NaCl 溶液中经过 4 次、8 次、12 次干湿循环后的 pH 分布。从图 5 可以看出, 砂浆近表面的 pH 明显低于内部, 且由内向外呈下降趋势; 同时, 随着干湿循环次数的增加, 砂浆的 pH 整体呈下降趋势, 且不受砂浆初始饱和度的影响。综合图 4、图 5 可以发现, 砂浆近表面氯离子浓度的减小与 pH 下降具有一致性。在干湿循环过程中, 水泥浆体析出 OH⁻, 使孔溶液失去电荷平衡, 降低了对氯离子的吸附能力, 使近表面的氯离子向外逆向迁移^[15,18]。随着深度的增加, 砂浆的 pH 趋于稳定, 当深度超过 C_{max} 位置后, 氯离子浓度随着深度的增加而减小。

为了进一步分析离子平衡对砂浆 pH 的影响, 将不同初始饱和度的砂浆以蒸馏水为介质按相同的制度进行 12 次干

湿循环,然后分层磨粉、测定 pH,并与以 3% NaCl 溶液为介质进行 12 次干湿循环测得的 pH 进行对比,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,当以 NaCl 溶液为介质时,砂浆近表层 2~3 mm 处的 pH 大于以蒸馏水为介质的 pH,而 4~13 mm 深

度处的 pH 小于后者;当 $D > 14$ mm 时,二者无明显差异。以上结果表明,当以 NaCl 溶液为介质进行干湿循环时,氯离子的进入使砂浆孔溶液失去电荷平衡,而孔溶液为了维持电荷平衡,在浓度梯度的作用下,迫使 OH^- 由内向外迁移,加速了

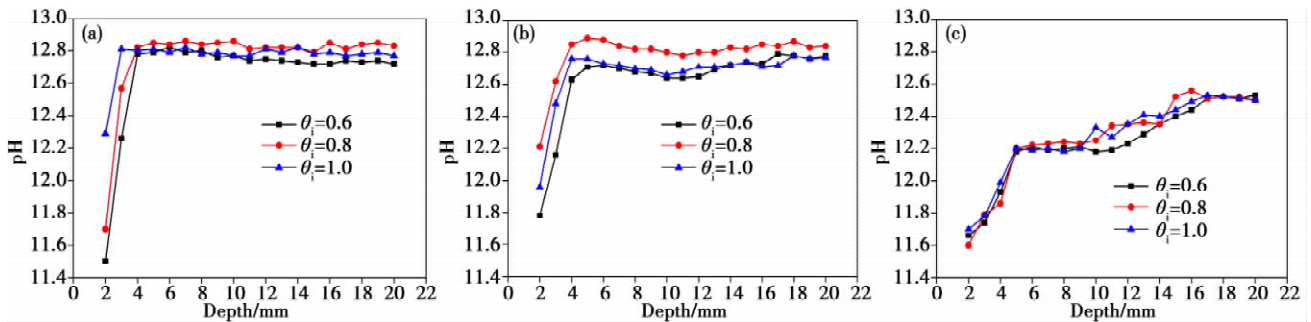


图 5 干湿循环作用下砂浆的 pH 分布: (a) 4 次循环; (b) 8 次循环; (c) 12 次循环

Fig.5 pH distribution of mortar suffered from the cycles of drying-wetting: (a) 4 cycles; (b) 8 cycles; (c) 12 cycles

砂浆对流区 OH^- 的析出,造成 pH 显著下降^[19-20]。

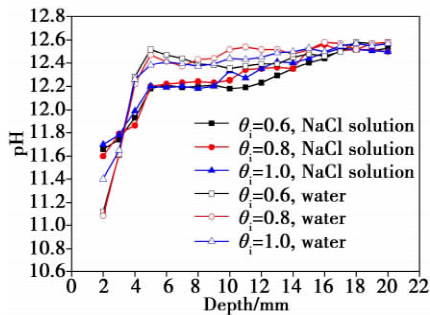


图 6 砂浆在 3% NaCl 溶液和水中经过 12 次干湿循环后的 pH 对比

Fig.6 Comparison of pH for mortars suffered from 12 cycles of drying-wetting exposing to 3% NaCl solution and water

2.3 碳化砂浆干湿循环作用下氯离子传输与 pH 分布

图 7 所示为预碳化砂浆经过 8 次干湿循环之后的氯离子浓度分布与 pH 分布。在砂浆的近表层,随着深度增加,砂浆的氯离子浓度逐渐下降,且 $\theta_i = 0.6, 0.8$ 的预碳化砂浆氯离子浓度分别在 $D = 9$ mm、7 mm 深度位置达到最小值;而后,随着深度增加,氯离子浓度再次增大,均在 $D = 14$ mm 处达到峰值,继而随着深度增加而下降。非饱和预碳化砂浆的 pH 分布与氯离子浓度分布具有相同的特征,均表现为“S”型,可分为碳化区、碳化过渡区和未碳化区。因碳化作用,砂浆近表层的 pH 下降至 10.5 左右;随着深度的增加,砂浆 pH 逐渐增大,由碳化区向未碳化区过渡;当 $D > 14$ mm,砂浆 pH 趋于稳定,进入未碳化区。由图 7 可以看出,预碳化砂浆经过干湿循环后的氯离子浓度分布与 pH 分布具有直接相关性。砂浆近表层因碳化作用使浆体失去了对氯离子的结合能力,造成氯离子浓度下降^[14,18,21]。在砂浆碳化过渡区,随着深度的增加,氯离子浓度增大与 pH 增大具有一致性。在砂浆未碳化区,随着深度的增加,pH 趋于稳定,而氯离子在浓度梯度的作用下向内传输。

通过与图 4 对比可以发现,非饱和预碳化砂浆在氯盐溶液中经过相同次数的干湿循环后,虽然氯离子峰值浓度出现的位置与未碳化砂浆接近,但整体的氯离子浓度分布与后者有显著区别。对于未做碳化处理的砂浆,其碳化仅发生在近表面 4 mm 处,而经过预碳化处理后,砂浆的碳化深度达到了

14 mm,碳化区砂浆的氯离子浓度远小于同等深度的未碳化砂浆。碳化作用改变了砂浆的 pH 分布,进而影响了氯离子传输行为,该结果有力地证明了非饱和砂浆氯离子传输与 pH 分布具有直接的相关性。

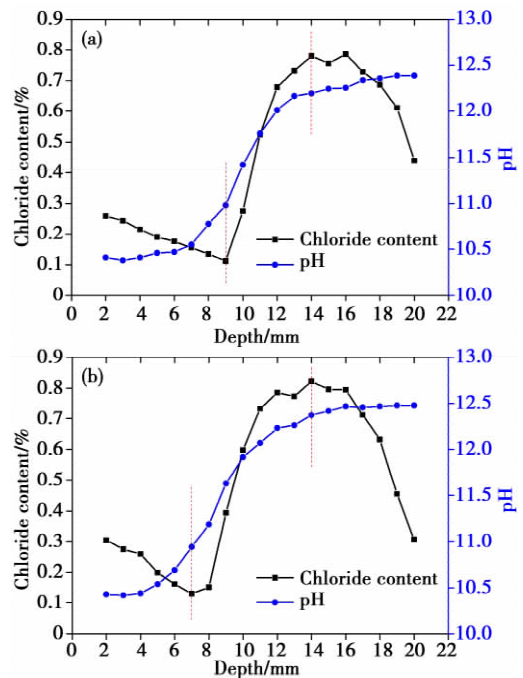


图 7 碳化砂浆经过 8 次干湿循环后的氯离子浓度分布与 pH 分布: (a) $\theta_i = 0.6$; (b) $\theta_i = 0.8$

Fig.7 Chloride content and pH distribution for carbonated mortar suffered from 8 cycles of drying-wetting: (a) $\theta_i = 0.6$; (b) $\theta_i = 0.8$

3 结论

(1) 干燥砂浆在 NaCl 溶液中持续浸泡不同时间后的氯离子浓度分布与 pH 分布没有表现出明显的相关性。

(2) 在干湿循环作用下,非饱和砂浆的氯离子传输与 pH 分布密切相关,砂浆近表层氯离子浓度的减小与 pH 下降具有一致性;砂浆孔溶液的电荷平衡直接影响 pH 分布,进而影响氯离子传输。

(3) 非饱和预碳化砂浆经过干湿循环后的氯离子浓度分

布与 pH 分布直接相关,均表现为“S”型;碳化作用使砂浆的 pH 分布发生改变,从而极大地影响了氯离子传输和浓度分布。

(4) 非饱和混凝土的 pH 变化是影响氯离子传输的关键因素,在进行混凝土结构寿命预测和耐久性设计时不容忽视。

参考文献

- 1 Yang L. Investigation of moisture and chloride ion transport in unsaturated concrete. Ph. D. Thesis, Southeast University, China, 2017 (in Chinese).
杨林. 非饱和混凝土水分与氯离子传输行为研究. 博士学位论文, 东南大学, 2017.
- 2 Pan Z C, Chen A R. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(3), 314 (in Chinese).
潘子超, 陈艾荣. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(3), 314.
- 3 Erik P N, Mette R G. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33, 133.
- 4 Fraj A B, Bonnet S, Khelidj A. *Construction and Building Materials*, 2012, 35, 761.
- 5 Hong K, Hooton R D. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29, 1379.
- 6 Xu G, Li Y, Su Y, et al. *Structural Concrete*, 2015, 16(2), 289.
- 7 Chang H L, Mu S, Xie D, et al. *Construction and Building Materials*, 2017, 131, 16.
- 8 Cao W Q. Chloride transport and cover protection of concrete under drying-wetting cycles. Ph. D. Thesis, Xi'an University of Architecture & Technology, China, 2013 (in Chinese).
曹卫群. 干湿交替环境下混凝土的氯离子侵蚀与耐久性防护. 博士学位论文, 西安建筑科技大学, 2013.

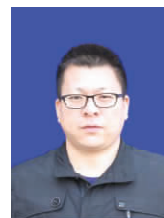


Lin Yang received his doctor degree in 2017 from Southeast University. He works in the School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, as an associate professor. His research area is the durability of cement-based materials.

杨林, 2017 年获得东南大学博士学位。目前在郑州大学水利科学与工程学院工作, 副教授, 主要从事水泥基材料耐久性研究。

- 9 Chang H. Chloride condensation and its mechanism in surface layer of cementitious-based materials under cyclic wetting-drying condition. Ph. D. Thesis, Southeast University, China, 2018 (in Chinese).
常洪雷. 干湿交替下水泥基材料表层氯离子富集现象及形成机制研究. 博士学位论文, 东南大学, 2018.
- 10 Martys N S, Ferraris C F. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(5), 747.
- 11 Neithalath N. *ACI Material Journal*, 2006, 103(3), 209.
- 12 Nielsen E P, Geiker M R. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33, 133.
- 13 Ababneh A, Benboudjema F, Xi Y. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(2), 183.
- 14 Chang H, Mu S, Feng P. *Cement & Concrete Research*, 2018, 103, 95.
- 15 Chang H. *Cement & Concrete Composites*, 2017, 84, 1.
- 16 Castro J, Bentz D, Weiss J. *Cement & Concrete Composites*, 2011, 33, 805.
- 17 Zhutovsky S, Hooton R D. *Construction and Building Materials*, 2019, 215, 918.
- 18 Wang X G, Shi C J, He F Q, et al. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(2), 187 (in Chinese).
王小刚, 史才军, 何富强, 等. *硅酸盐学报*, 2013, 41(2), 187.
- 19 Nguyen P T, Amiri O. *Construction and Building Materials*, 2014, 50, 492.
- 20 Friedmann H, Amiri O, Ait-Mokhtar A. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38, 1394.
- 21 Niu D T, Sun C T. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41(8), 1094 (in Chinese).
牛荻涛, 孙丛涛. *硅酸盐学报*, 2013, 41(8), 1094.

(责任编辑 余波)



Chunxiao Zhang received his Master Degree in Wuhan University of Technology in 2010. He is currently an associate researcher in National Defense Engineering Institute. His research interest is engineering protective materials.

张春晓, 军事科学院国防工程研究院工程防护研究所, 副研究员。2010 年 6 月毕业于武汉理工大学, 获材料学硕士学位。同年加入国防工程研究院工程防护研究所工作至今, 主要从事工程防护材料的技术研发。在国内外重要期刊发表文章 20 余篇, 申报发明专利 10 余项。

(上接第 18063 页)

- 8 Zhou Z, Shen J, Jiao S Y, et al. *Functional Materials*, 2016(47), 12007 (in Chinese).
周智, 申娟, 焦思雨, 等. *功能材料*, 2016(47), 12007.
- 9 Li V C, Maalej M. *Cement and Concrete Composites*, 1996, 18(4), 239.
- 10 Divanadari H, Eskandari-Naddaf H. *Construction and Building Materials*, 2020, 233, 117207.



Shishuai Qiao, graduated from Xi'an University of Architecture and Technology in June 2017, majoring in Materials Science and Engineering. Now he is studying at Xi'an University of Architecture and Technology and is pursuing a master's degree in engineering. He is mainly engaged in the related research of light-transmitting cement-based composites.

乔师帅, 2017 年 6 月毕业于西安建筑科技大学, 材料科学与工程专业。现就读于西安建筑科技大学, 攻读工程硕士学位, 主要从事透光水泥基复合材料的相关研究。



Jian Wei, vice dean of School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, director of the Institute of Nano-materials. Graduated from Northwestern Polytechnical University in 2008 with a doctoral degree. Mainly engaged in research on conductive/thermoelectric cement-based composite materials, lithium battery materials, conductive/nano-fiber and membrane materials, and low-dimen-

- 11 Liu J, Jia Y, Wang J. *Fibers and Polymers*, 2019, 20(9), 1900.
- 12 Lemeshev D O, Makarov N A, Ikonnikov K I. *Glass & Ceramics*, 2012, 69(5-6), 178.
- 13 Henriques T D S, Dal Molin D C, Masero A B. *Construction and Building Materials*, 2018, 161, 305.

(责任编辑 谢欢)

sional nano-materials preparation technology. Published 2 college textbooks for colleges and universities, published more than 50 academic papers, WOS cited more than 540 times, first/corresponding author published 32 papers in internationally renowned journals (including 26 SCI papers, 11 papers in the first district, a single paper, the highest SCI he cited 60 times), applied for and authorized 20 invention patents.

魏剑, 西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 副院长, 纳米材料研究所, 所长。2008 年毕业于西北工业大学材料学院, 博士研究生。主要从事于导电/热水泥基复合材料、锂电池材料、导电/纳米纤维与膜材料、低维纳米材料规模制备技术的研究。出版高等学校规划教材 2 部, 发表学术论文 50 余篇, WOS 他引超过 540 次, 第一/通讯作者在国际著名期刊发表论文 32 篇(其中, SCI 论文 26 篇, 一区论文 11 篇, 单篇最高 SCI 他引 60 次), 申请和授权发明专利 20 项。