

文章编号:1673-9469(2025)06-0021-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.003

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

丁瑶¹,田砾^{1*},刘孝华²,陈强³,刘洋¹,王鹏刚¹

(1. 青岛理工大学土木工程学院,山东青岛266033;2. 青岛市西海岸新区住房与城乡建设局,山东青岛266400;
3. 青岛市政空间开发集团有限责任公司,山东青岛266100)

摘要:为研究氯离子环境下混凝土裂缝的自愈合行为及其对氯离子传输的抑制作用,模拟了混凝土裂缝动态自愈合过程,分析了不同裂缝宽度和不同浓度氯化钠溶液下混凝土的自愈合效果及其对氯离子传输的抑制机制,探讨了裂缝宽度和氯化钠溶液浓度对裂缝愈合率的影响规律。研究结果显示,宽度为50、150、250 μm 的初始裂缝在水中愈合60 d后的愈合率分别为62.1%、24.4%、15.1%,裂缝的愈合率随裂缝宽度的增大而减小。水对裂缝愈合的促进作用有限,在水中仅能有效地愈合尺寸较小的裂缝,裂缝的宽度一般在50 μm 以内。500、1 000、2 000 mol/m^3 3种氯离子浓度对不同宽度裂缝自愈合的促进程度不同,当氯离子浓度较低且裂缝尺寸较小时,氯离子对裂缝自愈合有更好的促进作用。在400 mol/m^3 氯化钠溶液中愈合12 h后,250 μm 宽的初始裂缝完全愈合,裂缝周边5 mm处的氯离子平均浓度下降2.6~5.0 mol/m^3 。

关键词:裂缝混凝土;自愈合;氯离子;裂缝愈合率

中图分类号:TU528

文献标识码:A

The Self-healing Behavior of Concrete Cracks Under Chloride Ion Environment and Its Impact on the Inhibitory Effect of Chloride Ion Transport

DING Yao¹, TIAN Li^{1*}, LIU Xiaohua², CHEN Qiang³, LIU Yang¹, WANG Penggang¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;

2. Housing and Urban-Rural Development Bureau, Qingdao West Coast New Area, Qingdao, Shandong

266400, China; 3. Qingdao Municipal Construction Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: In order to study the self-healing behavior of concrete cracks in a chloride environment and its inhibitory effect on chloride ion transport, the dynamic self-healing process of concrete cracks was simulated. The self-healing behavior of concrete under different crack widths and various sodium chloride solutions was analyzed, as well as the inhibitory effect of crack self-healing on chloride ion transport in concrete. The relationship between crack width and sodium chloride solution concentration on crack healing rate was established. The results show that the healing rates of initial cracks with widths of 50, 150, and 250 μm after 60 days in water were 62.1%, 24.4%, and 15.1%, respectively, with the healing rate decreasing as crack width increased. The promoting effect of water on crack healing was limited, as it only effectively healed smaller cracks, generally with widths within 50 μm . The promotion of self-healing for cracks of different widths varied under chloride concentrations of 500, 1 000, and 2 000 mol/m^3 . When the chloride concentration was relatively low and the crack size was small, chloride ions exhibited a better promotion effect on crack self-healing. After healing for 12 hours in a

收稿日期:2024-03-25

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR202103020358)

第一作者:丁瑶(1999—),男,安徽马鞍山人,硕士研究生,从事混凝土耐久性方面的研究。

*通信作者:田砾(1972—),女,山东青岛人,博士,教授,从事混凝土耐久性方面的研究。

400 mol/m³ sodium chloride solution, the initial cracks with a width of 250 μm were completely healed, and the average chloride ion concentration at 5 mm around the cracks decreased by 2.6~5.0 mol/m³.

Key words: cracked concrete; self-healing; chloride; crack healing rate

混凝土作为人造建筑材料,被广泛地应用于各种建设工程。然而,混凝土开裂是混凝土结构在服役过程中不可避免的问题,若不及时修补裂缝,将影响混凝土结构耐久性能。2022年我国水泥产量 21.18 亿 t,混凝土产量 25.46 亿 m³,大量混凝土结构裂缝的检测、修补工作将产生巨额费用,而且传统的裂缝修补方法难以有效修复混凝土内部的微裂缝和损伤^[1]。自愈合技术在修复混凝土裂缝方面拥有巨大的优势^[2-3]。我国东部沿海和西部盐渍土地环境中含有大量的氯离子,会对混凝土的自愈合性能产生影响。

20 世纪上半叶,混凝土裂缝自愈合现象首次被发现^[4],引起了国内外学者的广泛关注,并开展了大量的研究。Qiu 等^[5]研究发现,经过水流长时间冲刷,混凝土管裂缝的尺寸逐渐变小,水分促进了水泥的二次水化,水化产物填充了裂缝;Faucon 等^[6]将带有裂缝的混凝土试件放置在水中愈合,裂缝尺寸、单位时间的渗水量均随时间推移有所减小,试验结果分析表明愈合产物为 CaCO₃;武少赟^[7]研究了裂缝尺寸、混凝土配合比等参数对裂缝自愈合的影响,结果表明,在海水环境中,裂缝宽度由 50 μm 增大到 150 μm 时,裂缝愈合率逐渐降低,且裂缝愈合率随矿渣掺量增加而提高,随硅灰掺量增加而降低。另外,很多学者对氯离子和混凝土自愈合性能之间的关系展开了研究。Peng 等^[8]利用数值模型研究了裂缝自愈合对混凝土内氯离子传输的影响,结果表明,裂缝愈合会降低混凝土内氯离子的浓度,对纵向氯离子浓度影响更为明显;Darquennes 等^[9]研究了自愈合对高炉矿渣胶凝材料抗氯离子侵蚀的影响,结果表明,材料愈合有效抑制了氯离子的渗透,且抑制效果随愈合时间和高炉矿渣的增加而增大。部分学者认为氯离子是一把“双刃剑”,当氯离子含量较低时,可促使未水化的水泥颗粒进一步水化,实现裂缝自愈合,从而提高混凝土的整体强度;而当其含量过高时,则会引起钢筋锈蚀,导致混凝土开裂。刘素瑞等^[10]研究表明,氯化钠溶液可促进裂缝中生成 C-S-H 凝胶、钙矾石、Friedel 盐等水化产物,水化产物通过填充和胶结作用,使裂缝逐渐愈合。叶东忠^[11]发现掺入适量的氯化钠溶液可以提高粉煤灰水泥的水化程度和抗压强度。

目前,混凝土自愈合性能的研究仍处于理论研究和实验室阶段,氯离子环境下的混凝土自愈合性能研究相对较少,氯离子对混凝土自愈合程度、速度以及自愈合对氯离子在混凝土中的传输影响是有待解决的问题。基于上述问题,本文研究了裂缝自愈合对混凝土中氯离子传输的影响,定量分析了不同裂缝宽度和不同浓度氯化钠溶液作用下混凝土的自愈合规律。研究结果可为氯离子环境下混凝土裂缝自愈合定量计算提供理论依据。

1 研究方法

1.1 混凝土自愈合机理

混凝土愈合能力主要来自两方面^[12-14]:一是未水化的水泥颗粒二次水化,生成 C-S-H 凝胶等水化产物,水化产物吸附在裂缝表面并发生溶胀作用,从而减小裂缝宽度,达到愈合的效果;二是碳化作用生成的 CaCO₃ 在裂缝表面沉淀,进而减小裂缝宽度,混凝土自愈合机理见图 1。

1.2 二次水化愈合理论模型

1.2.1 水分传输过程

当水分进入到裂缝,继而渗入到混凝土基体时,就会与未水化的水泥颗粒发生反应,诱导二次水化的发生,所以愈合过程中必然涉及水分的传输。一般来说,混凝土的孔隙并未完全饱和,在沿海和海洋工程中存在大量的水分,水分通过裂缝渗透到混凝土内部。根据质量守恒定律,裂缝减少的水量应等于混凝土中增加的水量。Huang 等^[15]建立了二次水化过程中的水分传输模型,如式(1)所示。混凝土中的水量变化见式(2),裂缝中的水量计算见式(3)。

$$\Delta V_{\text{con}} = -\Delta V_{\text{cra}} \quad (1)$$

$$\Delta V_{\text{con}} = \Delta S \cdot \phi \cdot V \quad (2)$$

$$V_{\text{cra}}(t) = V_{\text{cra},0} - \Delta S(t) \cdot \phi \cdot V \quad (3)$$

式中: ΔV_{con} 为混凝土中的水量变化, m³; ΔV_{cra} 为裂缝中的水量变化, m³; V_{cra} 为裂缝中的水量, m³; t 为时间, s; $V_{\text{cra},0}$ 为裂缝中的初始水量, m³; ΔS 为饱和度的变化; ϕ 为孔隙率, %; V 为混凝土的体积, m³。

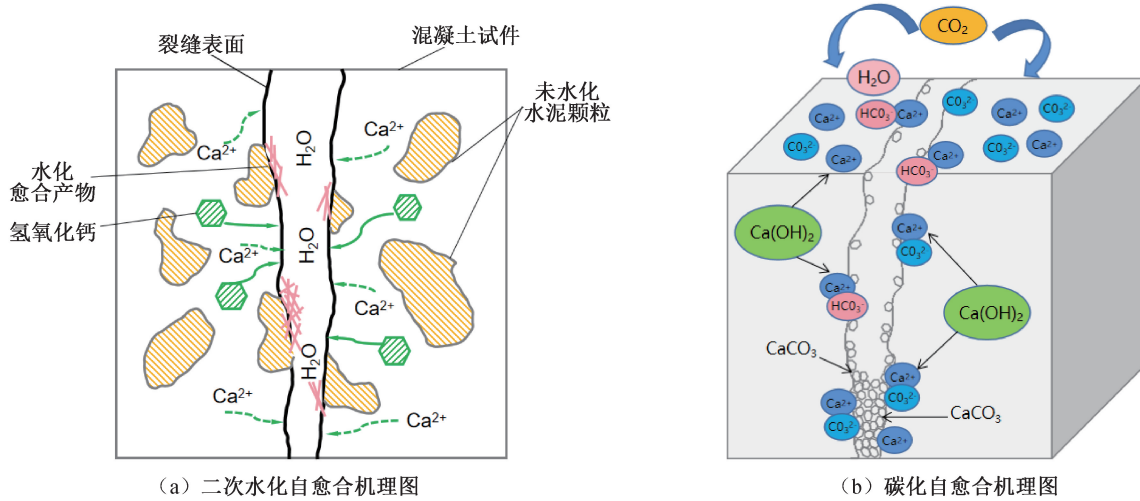


图 1 混凝土自愈合机理图

Fig. 1 Diagram of the self-healing mechanism of concrete

混凝土饱和度的变化根据达西定律计算^[16], 见式(4)。根据式(4)一式(6)可计算混凝土裂缝中水量时空分布。

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \nabla[(k_1 + k_v) \frac{\partial p}{\partial t} \nabla s] \quad (4)$$

$$k_1 = \frac{\rho \phi^2}{50B^2 \mu} [1 - \ln(\frac{e}{1-s}) \cdot (1-s)]^2 \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{2BC\gamma \cos \alpha}{(1-s) \ln^2(1-s)} \quad (6)$$

式中: k_1 为不饱和渗透率; k_v 为孔隙中的蒸汽扩散系数; $\frac{\partial p}{\partial t}$ 表示水压力随时间的变化; ∇s 表示时间矢量; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; B 为雷利-里兹孔径分布常数, 表示对数尺度上孔径分布的峰值, $1/\text{m}$; μ 为理想条件下的水粘滞度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; s 为饱和度; e 为自然常数; C 为模型中流体-介质耦合的经验系数, 本文取 1; γ 为水的表面张力, N/m ; α 为水与固体的接触角, ($^\circ$)。

1.2.2 固体沉淀过程

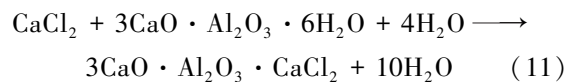
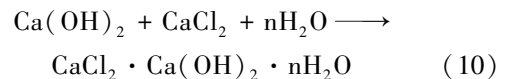
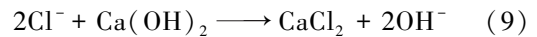
根据热力学原理^[17-18], 水泥水化作用是一个复杂的过程, 至少涉及两种固相(未水化水泥相和水化产物相)和一种液相。未水化水泥相的溶解存在溶解速率 R_d , 水化产物相的沉淀存在沉淀速率 R_p 。水化是发生在界面上的反应, 因此水化速率还与固相、液相的接触面积有关。在材料各向同性的情况下, t 时刻的溶解或者沉淀速率见式(7), 在水化过程中, 溶解界面速率和沉淀界面速率是不同的, 但考虑到溶解时固体表面积的减少以及沉淀时固体表面积的增加, 在大部分时间内溶解速率约等于沉淀速率, 见式(8)。

$$R(t) = r_{if}(\Delta G(t), c, \dots)S(t) \quad (7)$$

$$R_d \approx R_p \quad (8)$$

式中: $R(t)$ 为 t 时刻的溶解或沉淀速率, mol/s ; r_{if} 为溶解或沉淀的界面速率, $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $\Delta G(t)$ 为 t 时刻吉布斯自由能, 其值越大, 溶解速率和沉淀速率越大, J/mol ; c 为任意离子的浓度, mol/m^3 ; $S(t)$ 为 t 时刻溶解或沉淀生成的表面积, m^2 。

生成不溶性 Friedel 盐的具体反应如下:



Friedel 盐的生成过程伴随着 OH^- 的释放, 这些 OH^- 不仅保证了混凝土内部碱性环境的连续性, 而且对水泥水化起到促进作用。其机理是在 OH^- 的作用下, 水泥及其掺合料的硅氧四面体组成的玻璃体网络解聚、瓦解, 使 $\text{Ca}-\text{O}$ 键、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 键、 $\text{Si}-\text{O}-\text{Al}$ 键等断裂, 产生大量的 $(\text{SiO}_4)^{4-}$ 、 $(\text{AlO}_4)^{4-}$ 和 Ca^{2+} 等, 从而激发未水化水泥颗粒二次水化, 产生更多的水化愈合产物, 填充混凝土裂缝, 达到减小裂缝宽度、提高混凝土密实度的效果^[19-20]。

1.3 碳化愈合理论模型

基于碳化反应和水泥水化反应过程, 根据混凝土中 CO_2 气相、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 液相和固相物质的质量守恒, 建立碳化模型^[21], 见式(12)一式(14)。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\text{CO}_2} \frac{\partial D_{\text{CO}_2}(x,t)}{\partial x} \right) = c_{\text{CO}_2}(x,t) \cdot [k_{\text{CH}} \cdot c_{\text{CH}}(x,t) + 3k_{\text{CSH}} \cdot c_{\text{CSH}}(x,t)] \quad (12)$$

$$\frac{\partial c_{\text{CH}}(x,t)}{\partial x} = -k_{\text{CH}} \cdot c_{\text{CH}}(x,t) \cdot c_{\text{CO}_2}(x,t) \quad (13)$$

$$\frac{\partial c_{\text{CSH}}(x,t)}{\partial x} = -k_{\text{CSH}} \cdot c_{\text{CSH}}(x,t) \cdot c_{\text{CO}_2}(x,t) \quad (14)$$

式中: x 为混凝土内某点到外表面的距离, m ; $D_{\text{CO}_2}(x,t)$ 为 CO_2 扩散系数; $c_{\text{CO}_2}(x,t)$ 、 $c_{\text{CH}}(x,t)$ 、 $c_{\text{CSH}}(x,t)$ 分别为 CO_2 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的浓度, mol/m^3 ; k_{CH} 、 k_{CSH} 分别为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 参与碳化反应的速率系数, $\text{m}^3/(\text{mol} \cdot \text{s})$ 。

随着碳化愈合反应的进行,碳化反应生成的 CaCO_3 沉淀物质在混凝土裂缝表面或孔隙内部结晶堆积,进而降低 CO_2 在混凝土中的扩散速率。此外,沿海及海洋工程中环境湿度会很大程度影响 CO_2 在混凝土的扩散行为,导致 CO_2 扩散系数逐渐下降。因此,采用式(15)对 CO_2 在混凝土中的扩散系数进行湿度修正^[22]:

$$D_{e,\text{CO}_2} = 1.64 \times 10^{-6} \times \varepsilon_p^{1.8} \times \left(1 - \frac{R_{\text{RH}}}{100}\right)^{2.5} \quad (15)$$

式中: D_{e,CO_2} 为修正后 CO_2 扩散系数; R_{RH} 为相对湿度,%; ε_p 为混凝土孔隙率,%。

1.4 模型验证

刘素瑞^[23]将预裂缝的混凝土试件浸泡在不同质量分数(0%、2%、4%、6%)的氯化钠溶液中

60 d 进行愈合,研究了自愈前后的裂缝宽度变化。结果表明,在质量分数为 0% 的氯化钠溶液中浸泡 60 d 后,裂缝宽度由初始的 0.16 mm 愈合至 0.14 mm;在 2% 氯化钠溶液中,0.15 mm 宽的初始裂缝愈合至 0.035 mm;在 4% 氯化钠溶液中,0.15 mm 宽的初始裂缝愈合至 0.02 mm;在 6% 氯化钠溶液中,0.16 mm 宽的初始裂缝完全愈合。本文模拟了氯化钠溶液浸泡条件下的混凝土裂缝愈合情况,模型的初始条件、边界条件和控制参数如表 1 所示,裂缝愈合的速率由公式(8)和公式(15)共同控制,模拟结果和文献[23]试验结果对比情况如图 2 所示。由图 2 可以看出,混凝土裂缝在氯化钠溶液中愈合的模拟结果与文献[23]的试验结果相关性较好,本文所用的模型可靠性和计算精度较高,能够真实反映实际情况。

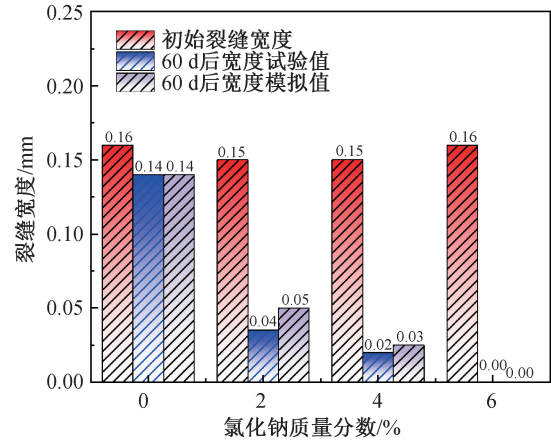


图 2 氯化钠溶液浸泡下混凝土裂缝愈合情况

Fig. 2 Healing situation of concrete cracks after being soaked in sodium chloride solution

表 1 模型模拟的相关参数

Tab. 1 Relevant parameters in the simulation

部分参数		数值
边界条件	边界氯离子浓度 $c_{s,\text{Cl}^-}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	15.300
	初始氯离子浓度 $c_{\text{Cl}^-}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	0.000
初始条件	初始水化硅酸钙 $c_{\text{CSH}}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	4 797.000
	初始氢氧化钙浓度 $c_{\text{CH}}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$	3 420.000
	混凝土孔隙率 $\varepsilon_p/\%$	0.128
	初始氯离子扩散系数 $D_{\text{Cl}^-}^0$	5.500×10^{-12}
其他条件	氢氧化钙反应速率系数 $k_{\text{CH}}/(\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.103
	水化硅酸钙反应速率系数 $k_{\text{CSH}}/(\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	0.720
	温度 T/K	293.000
	相对湿度 $R_{\text{RH}}/\%$	50.000
	不饱和渗透率 k_1	1.220×10^{-8}

2 模拟结果与讨论

2.1 氯离子溶液浸泡下的裂缝自愈合行为

本文通过模拟混凝土裂缝自愈合前后宽度的变化,研究了不同初始裂缝宽度的混凝土在氯化钠溶液(浓度分别为 0、500、1 000、2 000 mol/m³)条件下的自愈合能力,混凝土裂缝在不同浓度氯化钠溶液中愈合 60 d 后的愈合率结果见表 2。

表 2 混凝土裂缝在不同浓度氯化钠溶液中愈合 60 d 后的愈合率

Tab. 2 Healing rate of concrete after 60 days in different sodium chloride solutions

裂缝宽度/ μm	不同浓度氯化钠溶液中愈合率/%			
	0 mol/m ³	500 mol/m ³	1 000 mol/m ³	2 000 mol/m ³
50	62.1	100.0	52.9	35.3
150	24.4	65.6	50.5	41.6
250	15.1	50.1	39.1	45.1

初始裂缝宽度为 50 μm 的混凝土在不同浓度氯化钠溶液中愈合 60 d 后的裂缝宽度和愈合率如图 3 所示。由图 3 可以看出,在 0 mol/m³ 氯化钠溶液(蒸馏水)中,混凝土裂缝宽度由 50 μm 降至 18.9 μm,愈合率为 62.1%;在 500 mol/m³ 的氯化钠溶液中,裂缝完全愈合;在 1 000 mol/m³ 的氯化钠溶液中愈合 60 d 后,混凝土裂缝宽度为 23.6 μm,愈合率为 52.9%;在 2 000 mol/m³ 的氯化钠溶液中愈合 60 d 后,混凝土裂缝宽度为 32.4 μm,愈合率为 35.3%。

分析发现,对于初始宽度为 50 μm 的裂缝,在蒸馏水中最终能达到较高的愈合率,说明水对混凝土裂缝自愈合有促进作用,是混凝土裂缝自愈合不可或缺的因素。但在裂缝宽度较大的情况下,仅靠水分产生的自愈合效果有限。初始宽度为 50 μm 的裂缝在 1 000 mol/m³ 的氯化钠溶液

中浸泡 60 d 愈合率(52.9%)远低于在 500 mol/m³ 氯化钠溶液中的愈合率(100%)。这是因为较高浓度的氯离子对水化的促进作用较大,产生水化产物的速度快,水化产物在裂缝表面堆积并填充裂缝,但生成水化产物的速度过快,裂缝表面承受着水化产物堆积所带来的压应力,导致裂缝有一定的扩展^[24];在 2 000 mol/m³ 的氯化钠溶液中,过高的氯离子浓度导致裂缝扩展,抵消了绝大部分的自愈合作用,裂缝愈合率仅为 35.3%。

初始裂缝宽度为 150 μm 的混凝土试件在不同浓度的氯化钠溶液中愈合 60 d 后的裂缝宽度和愈合率如图 4 所示。由图 4 可以看出,在蒸馏水中,裂缝宽度由 150 μm 降至 113.4 μm,愈合率为 24.4%;在 500 mol/m³ 氯化钠溶液中愈合 60 d 后,裂缝宽度为 51.6 μm,愈合率为 65.6%;在 1 000 mol/m³ 氯化钠溶液中愈合 60 d 后,裂缝宽度为 74.3 μm,愈合率为 50.5%;在 2 000 mol/m³ 氯化钠溶液中愈合 60 d 后,裂缝宽度为 87.7 μm,愈合率为 41.6%。

在蒸馏水中,初始宽度为 150 μm 的裂缝最终愈合率远低于初始宽度为 50 μm 的裂缝愈合率,这是因为对于相对较宽的裂缝,如果仅靠水促进自愈合,能达到的自愈合效果十分微弱,混凝土裂缝自愈合率与裂缝宽度息息相关。在 500 mol/m³ 氯化钠溶液中,150 μm 宽的裂缝最终愈合率为 65.6%,低于 50 μm 宽的裂缝在相同条件下的愈合率。因为此时裂缝相对较宽,裂缝很难完全愈合,但相较于在蒸馏水中的愈合率提高了 24%,体现了氯离子对于裂缝自愈合的促进作用;在 1 000 mol/m³ 氯化钠溶液中,150 μm 宽的裂缝最终愈合率为 50.5%,这时氯离子浓度较高,生成的水化产物速度较快,水化产物在裂缝表面快速堆积,对裂缝产生压应力,使裂缝有所扩展,导致

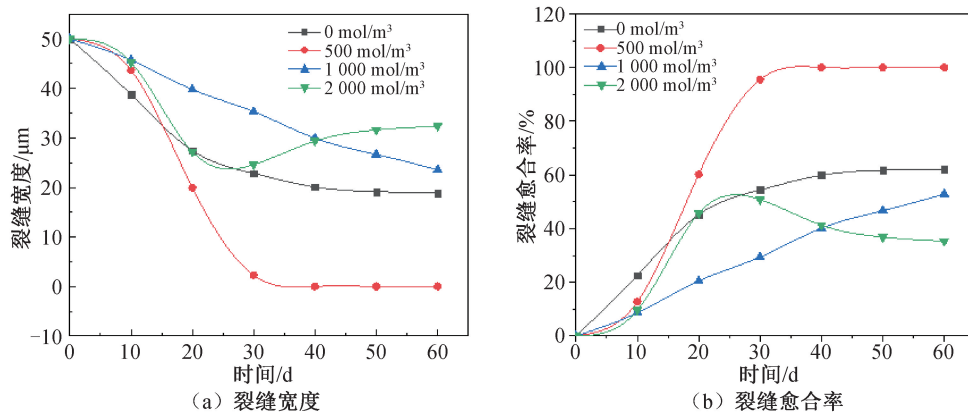


图 3 50 μm 的混凝土裂缝在不同浓度 NaCl 溶液中的裂缝宽度、裂缝愈合率变化曲线

Fig. 3 Variation curves of crack size and crack healing rate of 50 μm concrete cracks in NaCl solutions

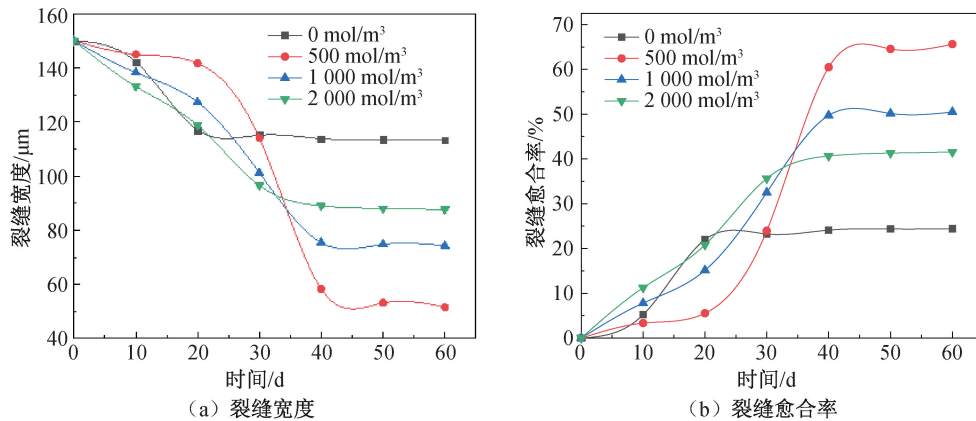


图4 150 μm 混凝土裂缝在不同浓度 NaCl 溶液中的裂缝宽度、裂缝愈合率变化曲线

Fig. 4 Variation curves of crack size and crack healing rate of 150 μm concrete cracks in NaCl solutions

最终裂缝愈合率下降;在 2 000 mol/m³ 氯化钠溶液中,150 μm 宽的裂缝最终愈合率为 41.6%,其作用机理与 1 000 mol/m³ 氯化钠溶液中的情况相似。

初始裂缝宽度为 250 μm 的混凝土试件在不同浓度氯化钠溶液中愈合 60 d 后的裂缝宽度和愈合率如图 5 所示。在蒸馏水中愈合 60 d 后,裂缝宽度由 250 μm 降至 212.4 μm,愈合率为 15.1%;在 500 mol/m³ 氯化钠溶液中愈合 60 d 后,裂缝宽度为 124.8 μm,愈合率为 50.1%;在 1 000 mol/m³ 氯化钠溶液中愈合 60 d 后,裂缝宽度为 152.4 μm,愈合率为 39.1%;在 2 000 mol/m³ 氯化钠溶液中愈合 60 d 后,裂缝宽度为 137.4 μm,愈合率为 45.1%。

对于初始宽度为 250 μm 的裂缝,在 500 mol/m³ 氯化钠溶液中的裂缝愈合率,相较于在蒸馏水中的愈合率提升了 35%,可以看出氯离子对于裂缝自愈合具有有效促进作用。在 1 000 mol/m³ 和 2 000 mol/m³ 氯化钠溶液中,250 μm 宽的裂缝最终愈合率分别为 39.1%、45.1%。

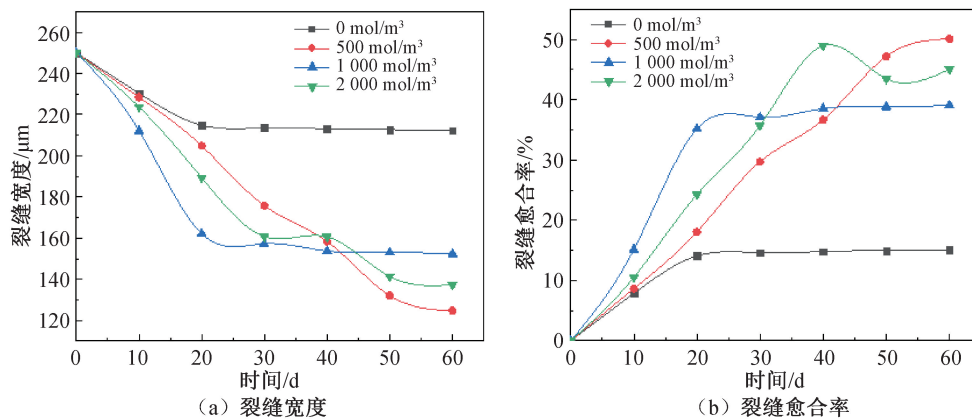


图5 250 μm 裂缝在不同浓度 NaCl 溶液中的裂缝宽度、裂缝愈合率变化曲线

Fig. 5 Variation curves of crack size and crack healing rate of 250 μm concrete cracks in NaCl solutions

2.2 自愈合对于氯离子传输的影响

为了更贴近实际地研究自愈合对氯离子在混凝土内部传输的影响,本文建立了包含水泥砂浆、骨料和界面过渡区的裂缝混凝土细观二维模型。模型的尺寸为 100 mm×100 mm,在模型底部中间设置一条宽度 0.25 mm、深度 30 mm 的裂缝,下侧设定为 400 mol/m³ 的氯化钠溶液环境,探究混凝土裂缝自愈合对裂缝周边 5 mm 处氯离子浓度的影响,结果如图 6 所示。

混凝土裂缝周边 5 mm 处氯离子浓度随侵蚀时间的延长而增加,前期增长速度较快,6 h 后氯离子扩散的速度逐渐减慢,且氯离子浓度随深度的增加而减小。在裂缝右侧 5 mm、深度 30 mm 处,氯离子侵蚀 2 h 后,自愈合前氯离子平均浓度为 135.5 mol/m³,考虑裂缝愈合后氯离子平均浓度为 132.5 mol/m³,降低了 3 mol/m³;氯离子侵蚀 4、6、8、10、12 h 后,考虑裂缝自愈合后氯离子平均浓度分别降低了 3.7、5.0、4.9、3.8、2.6 mol/m³,其原因是裂缝自愈合后有效减少了裂缝表面与氯离子的

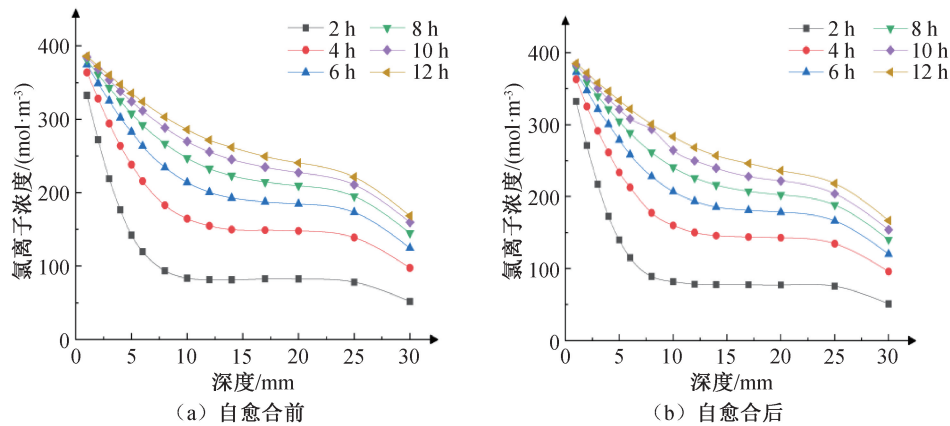


图6 裂缝自愈合前、后氯离子浓度随时间和深度变化曲线

Fig. 6 Variation curves of chloride ion concentration with time and depth before and after the self-healing of cracks

直接接触面积,阻碍了氯离子直接通过开裂面侵入混凝土内部的路径。绝大部分氯离子只能从混凝土表面侵入混凝土内部,其传输速率远低于直接通过裂缝表面侵入的速率。因此,裂缝自愈合后能够有效降低氯离子的侵入量。以上结果是仅考虑一条裂缝自愈合的影响,在实际工程中混凝土构件往往会出现很多裂缝,如果多条裂缝同时自愈合,将更大程度地抑制氯离子在混凝土中的扩散行为。

3 结论

本文通过数值模拟研究了氯离子作用下的混凝土裂缝自愈合行为,分析了自愈合对氯离子传输的影响,以及不同氯离子浓度对于裂缝自愈合的影响。模型可靠性和计算精度高,能够真实反映工程中带裂缝试件服役过程中面临不同氯盐环境的裂缝变化情况。主要结论如下:

1) 宽度为 50、150、250 μm 的初始裂缝在水中愈合 60 d 后的愈合率分别为 62.1%、24.4%、15.1%,裂缝的愈合率随裂缝宽度的增大而减小。水对裂缝愈合的促进作用有限,在水中仅能有效地愈合尺寸较小的裂缝,裂缝的宽度一般在 50 μm 以内。

2) 500、1 000、2 000 mol/m^3 3 种氯离子浓度对不同宽度裂缝自愈合的促进程度不同。当氯离子浓度较低且裂缝尺寸较小时,氯离子表现出对裂缝自愈合更好的促进作用。

3) 在 400 mol/m^3 氯化钠溶液中愈合 12 h 后,250 μm 宽的初始裂缝完全愈合,裂缝周边 5 mm 处的氯离子平均浓度下降 2.6~5.0 mol/m^3 。

参考文献:

- [1] 高红霞,倪修全. 浅谈混凝土结构裂缝修复方法[J]. 四川建筑, 2008,28(6): 183-184.
GAO H X, NI X Q. A brief discussion on repair methods for cracks in concrete structures [J]. Sichuan Architecture, 2008,28(6): 183-184.
- [2] BEGLARIGALE A, EYICE D, SEKI Y, et al. Sodium silicate/polyurethane microcapsules synthesized for enhancing self-healing ability of cementitious materials: optimization of stirring speeds and evaluation of self-healing efficiency [J]. Journal of Building Engineering, 2021, 39: 102279.
- [3] LI Z, YUAN J. Phase change microcapsules with high encapsulation efficiency using Janus silica particles as stabilizers and their application in cement [J]. Construction and Building Materials, 2021, 307: 124971.
- [4] 刘承超. 自修复混凝土的工作机理及试验研究 [D]. 福州: 福州大学, 2005.
LIU C C. Functional mechanism and experimental research of self-repairing concrete [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [5] QIU J S, TAN H S, YANG E H. Coupled effects of crack width, slag content, and conditioning alkalinity on auto-genous healing of engineered cementitious composites [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 73: 203-212.
- [6] FAUCON P, ADENOT F, JACQUINOT J F, et al. Long-term behaviour of cement pastes used for nuclear waste disposal: review of physico-chemical mechanisms of water degradation [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(6): 847-857.
- [7] 武少赞. 混凝土裂缝自愈合机理研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
WU S Y. Study on self-healing mechanism of the concrete cracks [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

- [8] PENG C, WU Q, XU J. Effect of non-isothermal flow on chloride ion transport in saturated concrete[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 248(3): 01022.
- [9] DARQUENNES A, OLIVIER K, BENBOUDJEMA F, et al. Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 1017-1028.
- [10] 刘素瑞, 杨久俊, 王战忠, 等. 氯化钠溶液环境下混凝土的自愈合性能[J]. 混凝土, 2016(1): 79-83.
LIU S R, YANG J J, WANG Z Z, et al. Self-healing capacity of concrete in the sodium chloride solution environment [J]. Concrete, 2016(1): 79-83.
- [11] 叶东忠. 氯化钠对粉煤灰水泥性能与水化程度的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 437-441.
YE D Z. The effects of sodium chloride on the performance and hydration degree of fly ash cement[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science), 2010, 38(3): 437-441.
- [12] 石达, 史才军, 吴泽媚, 等. 基于水泥基材料组分的自愈合研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(7): 7096-7106.
SHI D, SHI C J, WU Z M, et al. Advances in autogenous self-healing of cementitious materials [J]. Materials Reports, 2021, 35(7): 7096-7106.
- [13] 姚武, 钟文慧. 混凝土损伤自愈的机理[J]. 材料研究学报, 2006, 20(1): 24-28.
YAO W, ZHONG W H. Mechanism for self-healing of concrete damage [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2006, 20(1): 24-28.
- [14] 蒋建华, 师效哲, 吴琦, 等. 干燥条件下老化混凝土内部含湿量演变规律研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2025, 42(1): 26-32.
JIANG J H, SHI X Z, WU Q, et al. Research on the evolution law of internal moisture content of aging concrete under dry conditions[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2025, 42(1): 26-32.
- [15] HUANG H L, YE G. Simulation of self-healing by further hydration in cementitious materials[J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34(4): 460-467.
- [16] OSBORNE G J. Durability of portland blast-furnace slag cement concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 1999, 21(1): 11-21.
- [17] SCRIVENER K L, NONAT A. Hydration of cementitious materials, present and future [J]. Cement and Concrete Research, 2011, 41(7): 651-665.
- [18] 苏彦, 张向东, 周林林. 岩石分数阶蠕变损伤本构模型研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, 37(1): 19-23.
SU Y, ZHANG X D, ZHOU L L. Study on constitutive model of fractional creep damage of rocks[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2020, 37(1): 19-23.
- [19] RAVIKUMAR D, PEETHEMPARAN S, NEITHALATH N. Structure and strength of NaOH activated concretes containing fly ash or GGBFS as the sole binder [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(6): 399-410.
- [20] SAKULICH A R, ANDERSON E, SCHAUER C, et al. Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(8): 2951-2957.
- [21] PAPADAKIS V G, VAYENAS C G, FARDIS M N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(4): 363-373.
- [22] GABRISOVA A, HAVLICA J, CEMENT S S J, et al. Stability of calcium sulphoaluminate hydrates in water solutions with various pH values[J]. Cement and Concrete Research, 1991, 21(6): 1023-1027.
- [23] 刘素瑞. 化学环境激励条件下混凝土自愈合能力的演变机制研究[D]. 天津: 天津城建大学, 2015.
LIU S R. Study on the evolution mechanism of concrete self-healing performance under the condition stimulated by chemical environment[D]. Tianjin: Tianjin Chengjian University, 2015.
- [24] 彭琛. 混凝土裂缝自愈合对氯离子传输及钢筋锈蚀影响的数值研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
PENG C. Numerical study on the influence of concrete crack self-healing on chloride ion transmission and steel corrosion[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.

(责任编辑 张爱丽)