

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.012

渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆力学性能 酸蚀劣化规律

张延贺¹, 徐力群^{1,2}, 赵邵峰¹, 陆誉婷³, 李 凌^{1,4}, 栗宏飞⁵, 倪 勇¹

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 南京现代综合交通实验室; 3. 中交水运规划设计院有限公司;
4. 宁波市水利水电规划设计研究院有限公司; 5. 西安市市政建设(集团)有限公司)

摘要: 为探究渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆力学性能酸蚀劣化规律,开展了不同酸性环境(pH=7、3、1)Na₂SO₄ 溶液及渗流作用下水泥砂浆侵蚀试验、单轴压缩试验和劈裂抗拉试验,揭示了渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆在不同酸度条件中的力学性能劣化机理,建立了水泥砂浆力学性能劣化分析模型。结果表明:pH 为 7 和 3 时水泥砂浆试样抗压强度和抗拉强度随侵蚀历时先增大后减小,侵蚀历时为 60、45 d 时,达到最大值,分别为 39.33、3.12 MPa 和 36.71、2.86 MPa;pH 为 1 时,水泥砂浆试样抗压强度和抗拉强度减小,其最大值分别为 31.00 和 2.30 MPa;侵蚀溶液酸度越大,水泥砂浆抗压强度与抗拉强度最大值越小,力学性能劣化效应越显著;渗流-盐侵耦合作用下,随酸度增大,水泥砂浆由主要发生溶出性侵蚀和硫酸盐侵蚀耦合作用转为酸性侵蚀为主导;渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆强度损伤系数与侵蚀历时呈现良好的二次函数关系,且抗拉强度与抗压强度之间具有线性相关性。

关键词: 水泥砂浆;渗流-盐侵;酸度;复合侵蚀;微观结构;强度损伤

Acid corrosion-induced deterioration law of mechanical properties of cement mortar under coupled seepage and salt attack

Zhang Yanhe¹, Xu Liqun^{1,2}, Zhao Shaofeng¹, Lu Yuting³, Li Ling^{1,4}, Li Hongfei⁵, Ni Yong¹

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University;
2. Nanjing Modern Multimodal Transportation Laboratory; 3. Water Transportation Consultants Co., Ltd.;
4. Ningbo Water Conservancy & Hydropower Planning and Design Institute Co., Ltd.;
5. Xi'an Municipal Construction (Group) Co., Ltd.)

Abstract: To investigate the acid corrosion-induced deterioration law of mechanical properties of cement mortar under coupled seepage and salt attack, cement mortar erosion tests, uniaxial compression tests, and splitting tensile tests were carried out under different acidic conditions (pH=7, 3, and 1) in Na₂SO₄ solution with seepage. The deterioration mechanism of the mechanical properties of cement mortar under the coupled seepage and salt attack under different acidity conditions was revealed, and a deterioration analysis model for the mechanical properties of cement mortar was established. The results show that at pH of 7 and 3, the compressive strength and tensile strength of cement mortar specimens initially increase and then decrease with increasing erosion duration, reaching their peak values at 60 d and 45 d, respectively. Specifically, the peak compressive strength and tensile strengths are 39.33 MPa and 3.12 MPa at pH of 7, as well as 36.71 MPa and 2.86 MPa at pH of 3. In contrast, at a pH of 1, the compressive strength and tensile strength of the cement mortar specimens decrease, with their maximum values being 31.00 MPa and 2.30 MPa, respectively. A higher acidity of the erosion solution indicates a lower peak compressive strength and tensile strength of cement mortar and a more pronounced deterioration effect of mechanical properties. Under coupled seepage and salt attack, as acidity increases, the deterioration of cement mortar shifts from being dominated by the coupled action of leaching erosion and sulfate attack to being dominated by acid erosion. Under the coupled seepage and salt attack, the strength damage coefficient of cement mortar exhibits a good quadratic function relationship with erosion duration, and there is a linear correlation between tensile strength and compressive strength.

Key words: cement mortar; seepage and salt attack; acidity; compound erosion; microstructure; intensity damage

水泥砂浆作为常用工程材料,广泛应用于压力隧洞、防渗帷幕及固结灌浆等工程结构中。我国南方及西南地区部分地下水泥砂浆构筑物与水电工程场地,受环境有机质降解影响,存在厌氧菌分解腐殖质的现象,该过程会释放大量二氧化碳。当水体中二氧化碳质量浓度超过 60 mg/L 时,地下水将呈现酸性特征,进而对水泥砂浆结构产生侵蚀劣化与损伤破坏^[1]。长期服役于水环境中的水泥砂浆易发生溶蚀现象,水泥水化产物氢氧化钙(CH)与水化硅酸钙(C-S-H)发生分解,导致材料力学性能劣化^[2-4],而渗流作用会进一步加剧溶蚀进程。同时,水环境中的硫酸根离子侵入水泥砂浆内部,引发材料内部微裂缝萌生与扩展^[5-7]。在不同酸度条件下,渗流与硫酸盐侵蚀的耦合作用^[8]将显著改变水泥砂浆力学特性,进而影响水泥砂浆结构的长期稳定性与运行安全性。

在酸性硫酸钠溶液侵蚀下,水泥砂浆主要发生溶出性侵蚀与硫酸盐膨胀侵蚀^[9],且不同酸度环境对硫酸盐侵蚀进程及水泥砂浆力学性能演化具有显著影响,侵蚀后期力学性能劣化程度随酸度升高而加剧。此外,水泥砂浆长期与水体接触,除发生表面溶蚀外,还会在渗流场作用下产生显著的渗透溶蚀。因此,渗流作用对水泥砂浆劣化的影响不可忽视,部分重力坝^[10-12]、地下压力隧洞^[13-15]及排水廊道^[16]等工程结构均因渗透溶蚀效应出现严重损伤破坏。在渗流作用下,水泥砂浆中 CH 与 C-S-H 分解产生的钙离子会随水流不断迁移析出^[17];而在硫酸盐侵蚀作用下,硫酸根离子与钙离子反应生成膨胀性侵蚀产物^[18-19]。在渗流-盐侵耦合环境中,渗流一方面加速钙离子运移,另一方面会降低孔隙溶液中可参与硫酸盐反应的钙离子含量。目前,渗流作用对硫酸盐侵蚀进程是否存在抑制效应仍有待进一步明确,不同酸度条件下渗流与硫酸盐耦合侵蚀机理亟须深入研究。

针对渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆力学性能的酸蚀劣化问题,本文采用室内试验与机理分析相结合的方法,研究不同酸度环境中水泥砂浆在耦合作用下的表观形貌、抗压强度及抗拉强度劣化规律,探讨其力学性能劣化机理,建立不同酸度条件下水泥砂浆强度损伤系数随侵蚀时间的演化模型,并分析抗压与抗拉强度间的相关关系,以期复杂水环境下水泥砂浆构筑物的长期服役性能评估提供理论依据。

1 试验概况

1.1 水泥砂浆试样制备

水泥砂浆试样为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm 立方体,其水泥、砂子、水的质量比为 1 : 3 : 0.5。水泥选用南京龙潭镇 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥,其 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、其他组分的质量分数分别为 65.5%、21.1%、5.2%、4.1%、1.1%、3.0%,砂子选用平均细度模数为 2.75 的天然河砂,试验用水选用蒸馏水。按照 SL/T 352—2020《水工混凝土试验规程》搅拌水泥砂浆,倒入试样模具内并置于振动机上振捣抹平,静置 24 h 后脱模,按照标准养护条件养护 28 d,水泥砂浆试样制备过程如图 1 所示。

1.2 试验设备

水泥砂浆试样所受的渗流-盐侵耦合作用,通过专用渗流装置实现,该装置可使试样一侧维持稳定水压,驱动侵蚀溶液持续渗透并作用于水泥砂浆试样,从而模拟实际工程中的渗流-盐侵耦合作用环境。渗流装置主要包括水压控制系统、连接系统和渗透系统三部分(图 1),可通过调节水压控制系统与渗透系统之间的高差改变水泥砂浆试样一侧的水头值。水压控制系统用于存储侵蚀溶液,底部有阀门开关可以控制侵蚀溶液流出,连接系统通过软管连接水压控制系统与多个渗透系统,以便多个试样同时开展试验。渗透系统中放入试样,试样四周使用土工乳胶膜和环氧密封胶进行防渗密封处理,限定渗流通道由试样顶部流向底部,减少侵蚀溶液从四周流失,维持高水力梯度。试验过程中定期监测渗出液 pH、电导率及钙离子含量变化,结果显示渗出液 pH 随侵蚀进行逐步上升并趋于稳定,钙离子含量显著提高,表明水泥砂浆内部 CH 与 C-S-H 凝胶持续溶出。

1.3 试验方案

试验方案见表 1,侵蚀溶液的 pH 通过添加浓 H₂SO₄ 调节,共设计 4 种侵蚀溶液,分别是 pH 为 7 的蒸馏水与 pH 为 7、3、1 的 1 mol/L Na₂SO₄ 溶液。将养护好的水泥砂浆试样放入渗透系统中,水压控制系统与渗透系统保持高差 4.0 m^[20],在高水力梯度下对试样开展不同酸度的侵蚀试验。侵蚀 0、5、15、30、45、60、90、120、150 d 后分别取出试样进行单轴压缩试验和劈裂抗拉试验,并取每组 3 个试样的试验数据平均值进行分析。

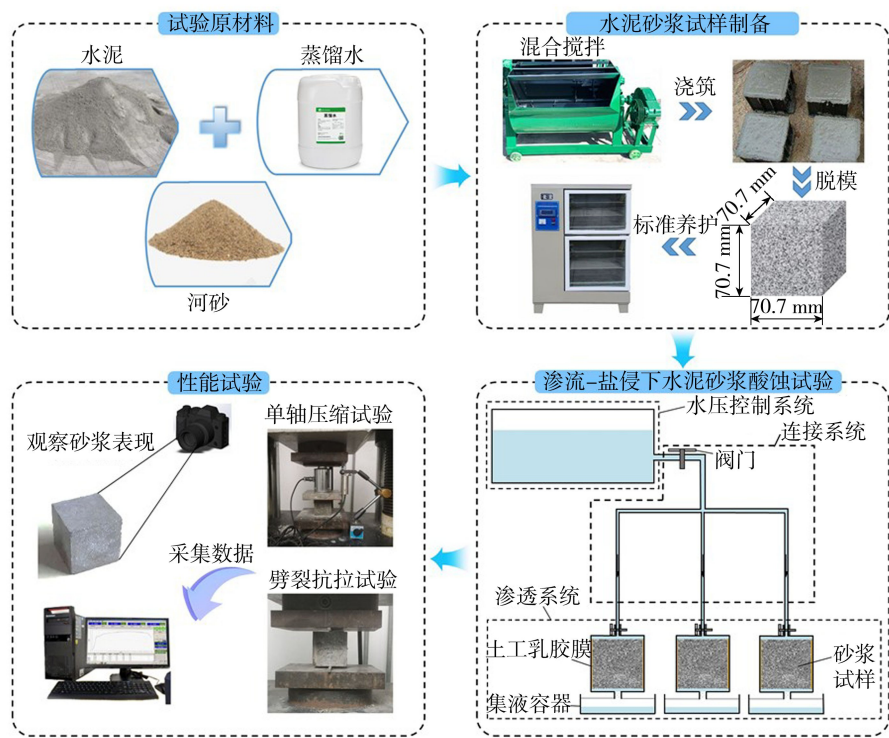


图 1 试验流程及渗流装置

Fig.1 Test flow and seepage device

表 1 试验方案

Table 1 Experimental programs

方案编号	水头/m	pH	侵蚀溶液	侵蚀历时/d	试样分组
1	4	7	蒸馏水	0、5、15、30、45、 60、90、120、150	单轴压缩试样和劈裂抗拉试样均分为 9 组,每组各 3 个
2	4	7	1 mol/L Na ₂ SO ₄ 溶液		
3	4	3			
4	4	1			
5	0	7	蒸馏水		
6	0	7	1 mol/L Na ₂ SO ₄ 溶液		
7	0	3			
8	0	1			

为对比有无渗流作用对不同酸度下硫酸盐侵蚀的水泥砂浆性能劣化的影响,对水泥砂浆开展无渗流作用侵蚀试验,侵蚀溶液与检测内容同渗流作用下的试验方案一致。将养护好的水泥砂浆试样浸入侵蚀溶液中,每 30 d 更换一次溶液,保证 pH 与硫酸盐浓度稳定,水泥砂浆试样与侵蚀溶液的体积比约为 1 : 50,任意两个试样之间的距离均大于 10.0 cm。在侵蚀过程中,试样所有表面均能接触到侵蚀溶液。

2 试验结果与分析

2.1 表观形态

侵蚀历时 30、60、120 d 的水泥砂浆试样表观形态如图 2 所示,蒸馏水工况下有无渗流作用对试样表观形态影响区别不大,仅在渗流作用下侵蚀历时为 120 d 的试样表面出现砂化,主要是水泥反应生成的胶凝材料 CH 和 C-S-H 溶解,水泥生成物有一定程度的脱落,出现砂化现象。

当侵蚀历时为 120 d,渗流作用下 pH 分别为 7、3、1 的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀的试样表面分别出现砂化、棱角脱落和大孔洞现象,表明在硫酸盐侵蚀下,随着酸度增大,表观形态劣化愈加严重。其中 pH 为 1 的强酸环境下,渗流与无渗流工况试样表面均出现明显的褐色析出物,该沉淀物为水泥中铁相组分溶出后,在试样局部微环境 pH 回升条件下生成的 Fe(OH)₃ 沉淀物。相同侵蚀龄期下,渗流-盐侵耦合作用工况试样表面剥落面积较无渗流工况提高约 20%~40%,pH 为 1 时两者差异最为显著。在强酸条件下,水泥砂浆主要发生酸

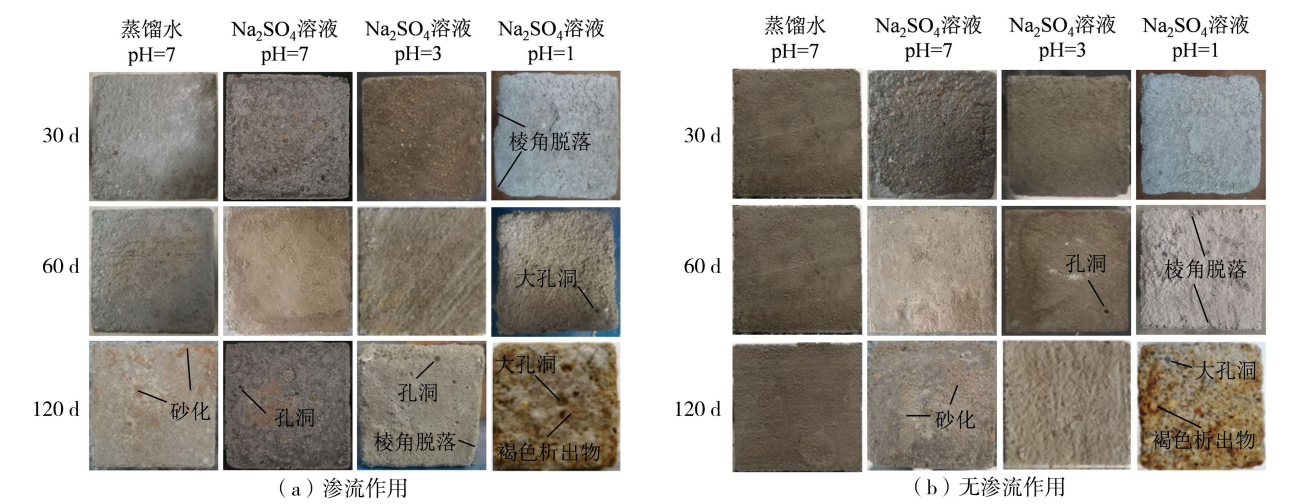


图 2 不同侵蚀条件下水泥砂浆试样不同历时性表现形态图

Fig. 2 Time-dependent apparent morphology of cement mortar specimens under different erosion conditions
性侵蚀,且渗流作用加速了CH和C-S-H分解速率,因此,渗流-盐侵耦合作用下的水泥砂浆表面形态劣化效应相比无渗流的硫酸盐作用下更加严重。

2.2 抗压强度

不同工况下水泥砂浆抗压强度历时变化如图 3 所示,试样初始抗压强度为 31.00 MPa。蒸馏水侵蚀下,试样抗压强度均随侵蚀历时增加先增大后趋于稳定,渗流作用的试样抗压强度增长主要发生在前 60 d,无渗流作用的试样抗压强度增长主要发生在前 90 d,渗流作用下水泥砂浆试样水化速率更快,从而提高了试样抗压强度。

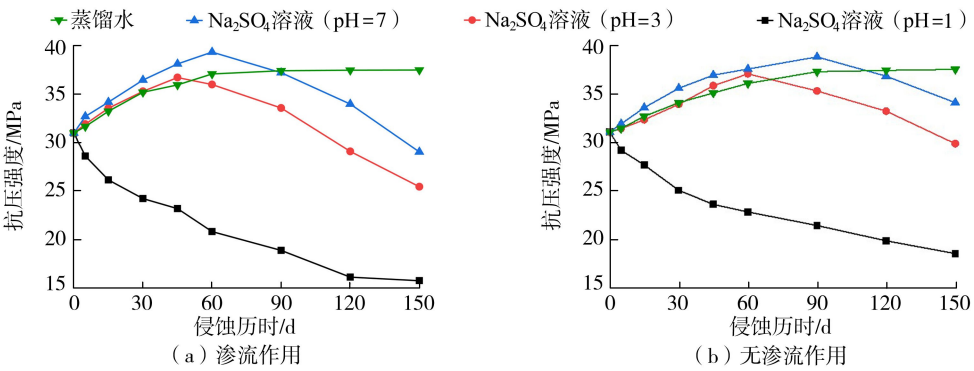


图 3 不同侵蚀条件下试样抗压强度历时变化

Fig. 3 Time-dependent variation of compressive strength of specimens under different erosion conditions
在 pH 为 7 和 3 的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀下,随着侵蚀历时增加,试样的抗压强度先增大后减小,渗流作用的试样分别在 60、45 d 抗压强度达到最大值 39.33、36.71 MPa,无渗流作用的试样分别在 90、60 d 抗压强度达到最大值 38.68、36.97 MPa。在侵蚀前期硫酸盐侵蚀占主导地位,硫酸根离子与水泥水化产物生成的石膏晶体使试样密实度增大,试样的抗压强度整体呈上升状态,渗流作用下试样相比无渗流作用下试样的抗压强度最大值提前约 15~30 d,渗流作用加速了硫酸盐侵蚀速率。随着侵蚀历时增加,硫酸盐侵蚀产物堆积膨胀至裂缝发育扩张,溶出性侵蚀与硫酸盐膨胀侵蚀损伤效果叠加使抗压强度急剧减小。

在 pH 为 1 的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀下,试样的抗压强度随侵蚀历时增加而减小,渗流作用和无渗流作用的试样抗压强度分别在 150 d 降低至 15.79 MPa 和 18.55 MPa,分别为初始抗压强度的 51%和 60%。试样主要受到酸性侵蚀,抗压强度持续减小,且未出现增长阶段。渗流作用下 pH 分别为 7、3、1 的 Na₂SO₄ 溶液侵蚀的试样抗压强度最大值分别为 39.33、36.71、31.00 MPa,随着酸度的增大,抗压强度最大值逐渐降低,单轴抗压性能劣化现象逐渐严重。

2.3 抗拉强度

不同工况下试样抗拉强度历时变化如图 4 所示,试样初始抗拉强度为 2.30 MPa,各工况下试样抗拉强

度随侵蚀历时的劣化规律基本和抗压强度一致。蒸馏水工况下,试样抗拉强度均随侵蚀历时增加先增大后趋于稳定,且渗流作用的试样抗拉强度增长主要发生时间比无渗流作用的提前约 30 d。

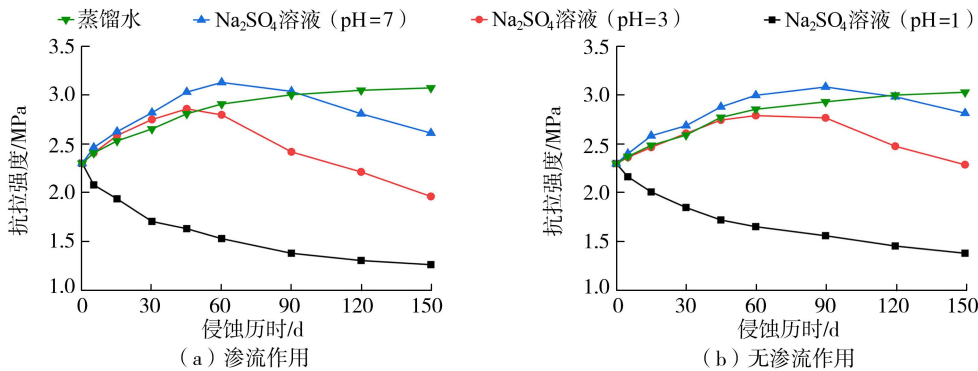


图 4 不同侵蚀条件下试样抗拉强度历时变化

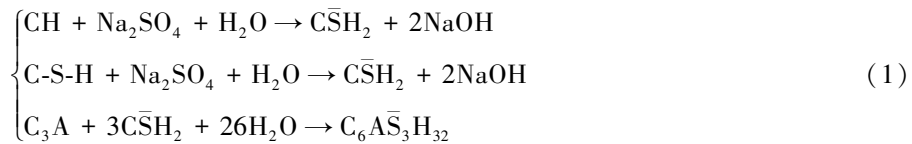
Fig. 4 Time-dependent variation of tensile strength of specimens under different erosion conditions

pH 为 7、3 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀条件下,抗拉强度随侵蚀历时增加先增大后减小,渗流作用的试样分别在 60 d 和 45 d 抗拉强度达到最大值 3.12 MPa 和 2.86 MPa,无渗流作用的试样分别在 90 d 和 60 d 抗拉强度达到最大值 3.08 MPa 和 2.79 MPa,渗流作用的试样相比无渗流作用的试样抗拉强度最大值提前约 15~30 d。pH 为 1 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀条件下,抗拉强度随侵蚀历时增加而减小,渗流作用和无渗流作用的试样抗拉强度分别在 150 d 降低至 1.26 MPa 和 1.38 MPa,分别为初始抗拉强度的 55% 和 60%,渗流作用的试样相比无渗流作用的试样抗拉强度衰减速度更快。渗流作用下 pH 分别为 7、3、1 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀的试样抗拉强度最大值分别为 3.12、2.86、2.30 MPa,渗流-盐侵耦合作用下随着酸度的增大,抗拉强度最大值逐渐降低,劈裂抗拉性能劣化现象逐渐严重。

3 水泥砂浆力学性能劣化机理

渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆在不同酸度条件下的力学性能呈现出不同的变化趋势,结合试验强度变化规律,从化学反应与微观层面对试样的劣化机理进行分析。水灰比为 0.5 的水泥砂浆材料经过 28 d 养护后水化程度范围为 70%~75%,养护 180 d 后水化程度范围为 75%~80%^[21]。水泥在水化过程中,生成胶凝材料 CH 与 C-S-H,将会提升水泥砂浆材料的力学性能,且渗流作用会加速水化过程,这与蒸馏水工况下有无渗流作用的水泥砂浆试样的抗压强度与抗拉强度均随侵蚀历时增加先增大后趋于稳定、渗流作用的试样抗压强度与抗拉强度增长速率比无渗流作用的试样抗压强度与抗拉强度增长速率更快的趋势一致。

渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆侵蚀示意图如图 5 所示,当试样处于 pH 为 7 的 Na_2SO_4 溶液环境时,水泥砂浆以溶出性侵蚀和硫酸盐侵蚀为主。试验结果表明,该工况下试样抗压、抗拉强度均呈现先增大后减小的规律,并在 60 d 达到峰值,这与微观机理相吻合。侵蚀前期,渗流作用加速水分渗透并与水泥生成水化产物 C-S-H 凝胶和 CH 晶体,从而填充缝隙;且部分胶凝物质 CH 与 C-S-H 分解产生的钙离子会同硫酸根离子结合生成难溶性膨胀产物石膏,石膏又与铝酸钙盐等物质发生反应生成难溶性膨胀产物钙矾石,其主要的化学反应式见式(1)。孔隙被水化产物和膨胀产物填充,试样结构逐渐致密,力学性能增强,这解释了 pH 为 7 条件下,水泥砂浆试样抗压强度与抗拉强度在侵蚀前期随侵蚀历时增加而增大。



式中: $\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ 为石膏; C_3A 为水化铝酸三钙; $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ 为钙矾石 AFt。

当试样内部孔隙被生成的膨胀性产物填充至一定程度时,孔隙壁将承受膨胀应力;当该膨胀应力超过材料自身强度极限时,孔隙壁发生破坏,膨胀应力得以释放,进而导致孔隙扩展增大、内部裂缝进一步发育延伸。在渗流作用下,裂缝表面与 Na_2SO_4 侵蚀溶液的物质交换速率加快,局部始终维持稳定的浓度梯度,使得钙离子持续被化学反应消耗。为补充孔隙溶液中的钙离子,水泥砂浆内部的 CH 与 C-S-H 相不断溶解,这一

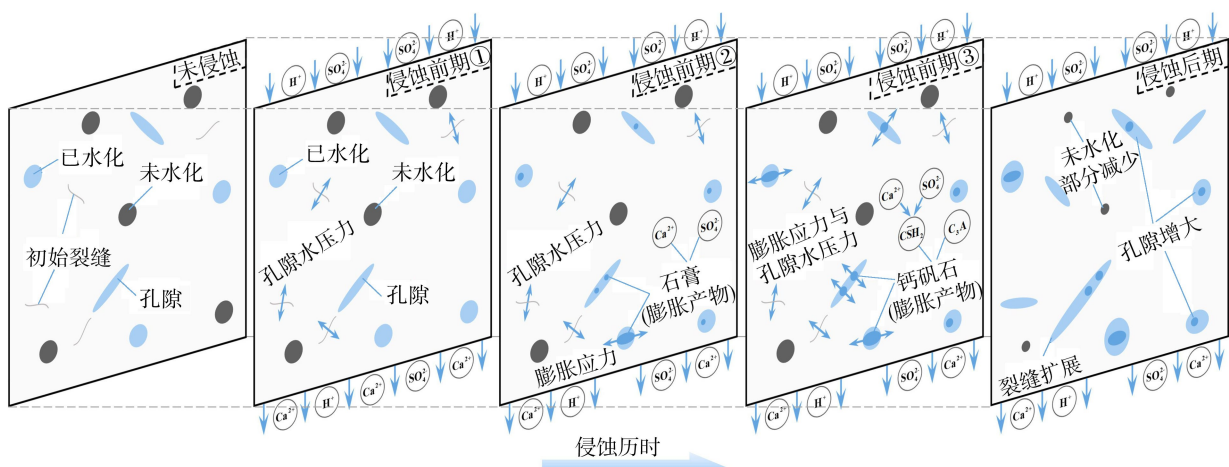
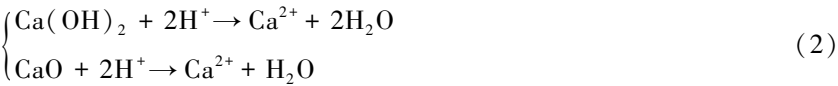


图 5 渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆侵蚀示意图

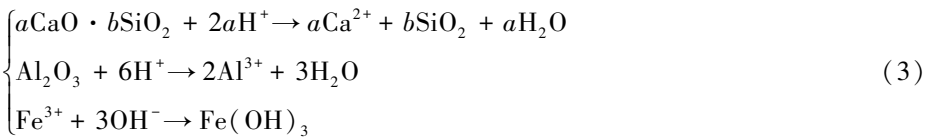
Fig. 5 Schematic diagram of cement mortar erosion under coupled seepage and salt attack

过程会加速裂缝的扩展与贯通,最终形成更大规模的贯通裂缝。与此同时,上述侵蚀过程会显著降低水泥砂浆内部的黏结性能,进一步加剧试样力学强度的劣化速率。

当试样处于 pH 为 3 的 Na_2SO_4 溶液环境时,水泥砂浆主要发生硫酸盐侵蚀和酸性侵蚀。该工况下试样强度同样先增大后减小,但峰值时间提前至 45 d,且后期劣化速率更快。侵蚀前期,试样内部水化产物 CH 和 CaO 易与 H^+ 发生式(2)的化学反应,生成易溶于水的矿物,但 H^+ 对初始裂缝和孔隙的影响程度小于硫酸盐侵蚀和水化作用,硫酸盐侵蚀反应生成的石膏、钙矾石等难溶性膨胀产物填充试样内部孔隙,且渗流作用下水分加速渗透并与水泥生成水化产物 C-S-H 凝胶和 CH 晶体填充缝隙,试样变得更加密实,力学性能增强。随着侵蚀时间增长,酸性侵蚀逐步加剧,膨胀产物开裂与溶蚀损伤叠加,裂缝扩展速率加快,使得强度峰值较 pH 为 7 工况提前 15 d 出现,且后期下降更为明显,与试验得到的强度演化规律相符。



当试样处于 pH 为 1 的 Na_2SO_4 溶液环境时,由于 H^+ 浓度很大,一直处于酸性侵蚀阶段,CH 和 C-S-H 的分解反应对水泥砂浆的影响占据主要地位,进行式(3)的化学反应,生成物大部分为可溶于水的盐,对水泥砂浆微观结构骨架形成破坏。在渗流作用下,试样内部结构持续松散、孔隙骨架破坏加剧,表层砂浆脱落、骨料外露,力学性能持续下降,150 d 时抗压、抗拉强度较初始值分别下降 49.06% 和 45.22%,与强酸主导下的快速劣化机理完全一致。且反应生成的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀物附着在试样表面使其外观呈红褐色。



式中: a 、 b 为系数。

不同酸度条件下渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆会受到溶出性侵蚀与硫酸盐膨胀侵蚀,随侵蚀溶液酸度增大,逐渐由溶出性溶蚀与硫酸盐膨胀侵蚀耦合作用转为酸性侵蚀为主,水泥砂浆力学性能劣化效应逐渐严重,与不同 pH 工况下的强度试验结果相印证。

4 力学性能劣化分析模型

4.1 力学性能损伤系数劣化模型

为定量表征水泥砂浆试样力学性能劣化程度,分别以抗压强度、抗拉强度相对初始强度的衰减比例定义抗压强度损伤系数 K_c 、抗拉强度损伤系数 K_t (式(4)),可反映水泥砂浆在不同侵蚀条件下力学性能劣化程度:

$$K_c = f_c / f_{c0} \quad K_t = f_t / f_{t0} \quad (4)$$

式中： f_c 、 f_t 分别为水泥砂浆试样的抗压强度、抗拉强度； f_{c0} 、 f_{t0} 分别为水泥砂浆试样的初始抗压强度、初始抗拉强度。

分析试验数据的残差,将超出置信区间的点视为离群数据并去除。采用二次函数对有无渗流作用下试样抗压、抗拉强度损伤系数随侵蚀历时的演化规律进行拟合,构建相应的力学性能损伤系数劣化模型,模型公式与决定系数 R^2 如图 6 所示。各工况下模型 R^2 均大于 0.84,相关性较好,表明二次函数能较好地捕获 150 d 内的抗压、抗拉强度损伤系数变化趋势。

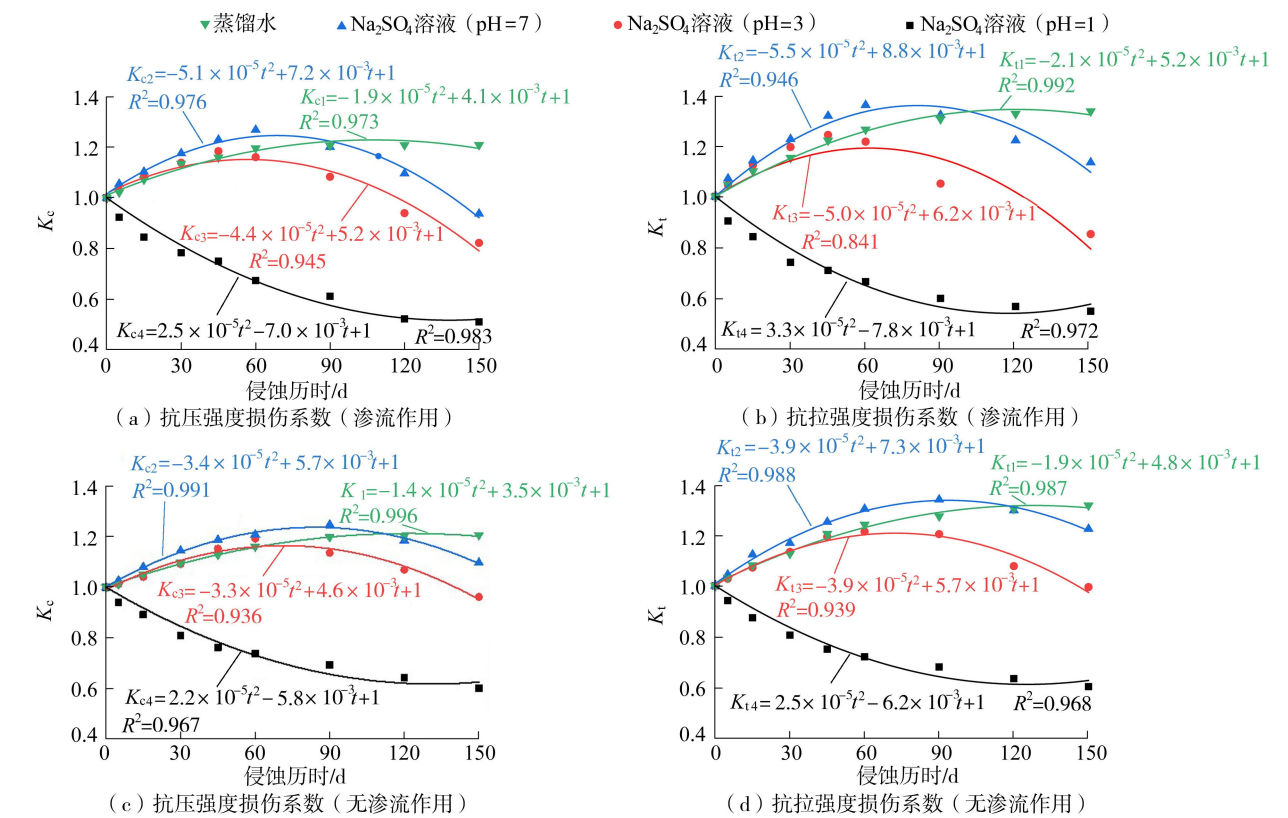


图 6 水泥砂浆强度损伤系数拟合曲线

Fig. 6 Fitted curves of strength damage coefficient of cement mortar

pH 为 7 蒸馏水工况下,损伤系数整体稳定,曲线呈先缓慢上升后小幅缓慢下降的特征。强度损伤系数前期上升主要是由于蒸馏水环境中无外部侵蚀性离子,试样内部水泥熟料可在渗流水环境下继续发生水化反应,生成 C-S-H 凝胶与 CH 晶体填充内部孔隙,使基体密实度与力学性能小幅提升;后期因少量水化产物轻微溶出,导致强度略有减小。与之相比,盐溶液侵蚀工况劣化更为显著,渗流作用和无渗流作用下 pH 为 7、3 工况的抗压、抗拉强度损伤系数均先增大后减小,pH 为 1 条件的抗压强度和抗拉强度损伤系数均持续减小。

根据二次函数建立的力学性能损伤系数劣化模型,渗流作用下 pH 为 7、3 条件的抗压强度分别在 141、118 d 降低至初始抗压强度,抗拉强度分别在 160、124 d 降低至初始抗拉强度;无渗流作用下 pH 为 7、3 条件的抗压强度分别在 167、139 d 降低至初始抗压强度,抗拉强度分别在 187、146 d 降低至初始抗拉强度。侵蚀溶液的酸度越大,水泥砂浆试样的抗压强度和抗拉强度损伤越快,且随后的强度随侵蚀历时增加逐渐降低。在相同的酸度条件下,渗流作用下水泥砂浆抗压强度和抗拉强度降低至初始抗压强度和抗拉强度的时间比无渗流作用下提前约 20~30 d,渗流作用加剧了水泥砂浆试样的劣化程度,该时间可为受渗流-盐侵耦合作用的水泥砂浆材料服役时间提供参考。

4.2 抗压强度与抗拉强度相关性分析

由图 3 和图 4 可知,渗流-盐侵耦合作用下水泥砂浆在不同酸度条件中抗拉强度与抗压强度变化规律大体一致,不同酸度的 Na_2SO_4 溶液侵蚀下水泥砂浆抗压强度与抗拉强度的相关关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知,不同酸度的 Na_2SO_4 溶液侵蚀下水泥砂浆试样抗压强度和抗拉强度之间存在着良好的相关性,通过回归

分析得到了线性拟合关系式 $f_t = \alpha f_c$,其关系式 R^2 均大于 0.90,拟合效果较好,验证了线性拟合关系式 $f_t = \alpha f_c$ 的准确性与在不同酸度下的适用性。

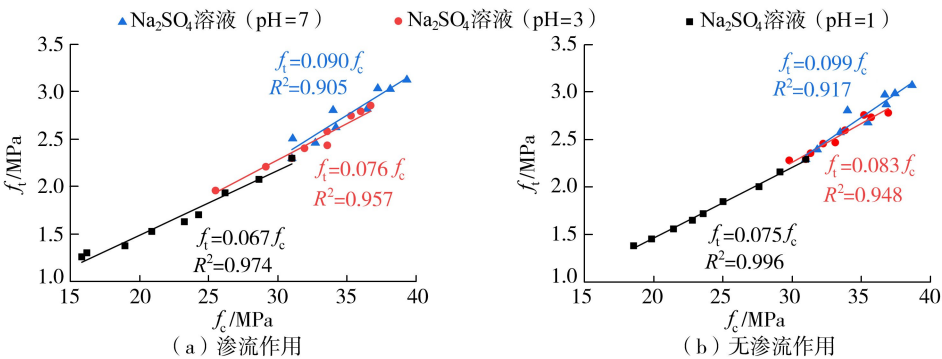


图 7 水泥砂浆抗拉强度与抗压强度关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between tensile strength and compressive strength of cement mortar

不同工况下线性拟合关系式 $f_t = \alpha f_c$ 中的 α 略有差异,渗流作用和无渗流作用下水泥砂浆的 α 均随侵蚀溶液酸度的增大而减小,如图 8 所示,表明酸度的增大对水泥砂浆的抗压强度影响更为敏感,导致水泥砂浆抗压强度的劣化效应更加显著。在相同的酸度条件下,渗流作用的线性拟合关系式系数 α 比无渗流作用的小,说明渗流作用下水泥砂浆的抗压强度劣化速率更快。

5 结 论

a. pH 为 7、3 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀下水泥砂浆抗压强度和抗拉强度均先增大后减小,侵蚀历时为 60、45 d 时,达到最大值,分别为 39.33、3.12 MPa 和 36.71、2.86 MPa;pH 为 1 的 Na_2SO_4 溶液侵蚀下水泥砂浆抗压强度和抗拉强度减小,其最大值分别为 31.00、2.30 MPa,较其他两种溶液环境下劣化程度明显增大,在 150 d 时其抗压强度和抗拉强度较初始状态分别减小 49.06% 和 45.22%。随着酸度增大,水泥砂浆抗压强度与抗拉强度最大值逐渐减小,力学性能劣化效应增强。

b. pH 为 7、3 的 Na_2SO_4 溶液环境中,侵蚀前期,水化产物和侵蚀产物填充砂浆试样内部孔隙,其密实度增大,抗压强度和抗拉强度提高;侵蚀后期,大量侵蚀产物堆积膨胀至裂缝发育扩张,在渗流作用下裂缝会更快地扩展、贯通,形成更大的裂缝,试样抗压强度和抗拉强度急剧减小。pH 为 1 的 Na_2SO_4 溶液环境中,砂浆一直处于酸性侵蚀阶段,生成物大部分为可溶于水的盐,对砂浆微观结构骨架形成破坏,在渗流作用下,试样结构松散加剧、表层砂浆脱落且骨料外露,力学性能持续下降。渗流-盐侵耦合作用下,随侵蚀溶液酸度增大,水泥砂浆由主要发生溶出性侵蚀和硫酸盐侵蚀耦合作用转为酸性侵蚀为主导。

c. 不同酸度条件下水泥砂浆试样抗压强度与抗拉强度的损伤系数和侵蚀历时之间的关系可用二次函数较好地描述;不同酸度条件下水泥砂浆试样抗拉强度与抗压强度之间的相互关系可用数学模型 $f_t = \alpha f_c$ 准确表征,可为酸性硫酸盐-渗流耦合环境下水泥砂浆力学性能劣化分析及耐久性评估提供参考。

参考文献:

[1] 甘磊,沈振中,徐力群,等. 不同 pH 值硫酸盐侵蚀下水泥砂浆断裂韧度[J]. 应用基础与工程科学学报,2023,31(3):690-702. (Gan Lei, Shen Zhenzhong, Xu Liqun, et al. Fracture toughness of cement mortar under sulfate attack with different pH values[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2023,31(3):690-702. (in Chinese))

[2] Phung Q, Maes N, Jacques D, et al. Investigation of the changes in microstructure and transport properties of leached cement pastes accounting for mix composition[J]. Cement and Concrete Research,2016,79:217-234.

[3] 赵邵峰,徐力群,张宏伟,等. 考虑坝基防渗体渗透溶蚀效应的特高土心墙堆石坝服役年限可靠性分析[J]. 水利学报,2024,55(11):1391-1403. (Zhao Shaofeng, Xu Liqun, Zhang Hongwei, et al. Reliability analysis of service life for ultra-high core-wall rockfill dam considering the seepage-dissolution effect of dam foundation impervious structure[J]. Journal of Hydraulic

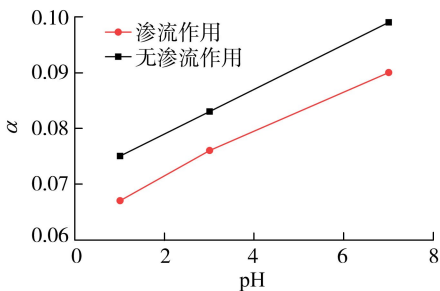


图 8 系数 α 随 pH 变化曲线

Fig. 8 Variation of coefficient α with pH

Engineering,2024,55(11):1391-1403. (in Chinese))

[4] 吴佳雯,王少伟,刘毅,等. 冻融溶蚀耦合作用下混凝土劣化机理及预测模型[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):53-60. (Wu Jiawen,Wang Shaowei,Liu Yi,et al. Mechanism and prediction model of concrete deterioration under coupled freeze-thaw and leaching action[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(6):53-60. (in Chinese))

[5] Yu Xiaotong,Zhu Yuwen,Liao Yingdi,et al. Study of the evolution of properties of mortar under sulfate attack at different concentrations[J]. Advances in Cement Research,2016,28(10):617-629.

[6] 张卫兵,李晓,雷过,等. 冻融-干湿循环下硫酸盐渍土的微观孔隙研究[J]. 地下空间与工程学报,2023,19(2):465-473. (Zhang Weibing,Li Xiao,Lei Guo,et al. Study of microscopic pores in sulfate saline soils under freeze-thaw-dry-wet cycles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2023,19(2):465-473. (in Chinese))

[7] 曾涛,刘亮,丁金华,等. 渗流溶蚀作用下盐渍土变形特性与微观结构[J]. 水利水电科技进展,2025,45(6):61-67. (Zeng Tao,Liu Liang,Ding Jinhua,et al. Deformation characteristics and microstructure of saline soil under seepage dissolution effects [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(6):61-67. (in Chinese))

[8] 刘子铭,熊锐,关博文,等. 不同 pH 值条件下水泥砂浆硫酸盐侵蚀损伤评价[J]. 硅酸盐通报,2016,35(7):2247-2253. (Liu Ziming,Xiong Rui,Guan Bowen,et al. Damage evaluation of sulfate erosion to cement mortar under different pH-value conditions[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2016,35(7):2247-2253. (in Chinese))

[9] Ragoug R,Metalssi O,Barberon F,et al. Durability of cement pastes exposed to external sulfate attack and leaching:Physical and chemical aspects[J]. Cement and Concrete Research,2019,116:134-145.

[10] 王少伟,包腾飞. 渗透溶蚀对高混凝土坝长期变形影响的数值分析[J]. 长江科学院院报,2020,37(6):62-69. (Wang Shaowei,Bao Tengfei. Numerical analysis on influence of leakage dissolution on long-term deformation of high concrete dam[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2020,37(6):62-69. (in Chinese))

[11] 曾奕滔,沈振中,甘磊,等. 弯应力作用下混凝土结构水力劈裂试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):72-77. (Zeng Yitao,Shen Zhenzhong,Gan Lei,et al. Experimental study on the hydraulic fracture of concrete structure under bending stress[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(1):72-77. (in Chinese))

[12] 齐翠阁,邱莉婷,马福恒,等. 大坝混凝土非连续变形的并发多尺度区域分解法[J]. 水利水运工程学报,2023(2):121-128. (Qi Cuige,Qiu Liting, Ma Fuheng, et al. Concurrent multi-scale domain decomposition simulation of discontinuous deformation of dam concrete[J]. Hydro-Science and Engineering,2023(2):121-128. (in Chinese))

[13] Li Chen,Wu Mengxue,Chen Qing,et al. Chemical and mineralogical alterations of concrete subjected to chemical attacks in complex underground tunnel environments during 20-36 years[J]. Cement and Concrete Composites,2018,86:139-159.

[14] Ye Fei,He Biao,Tian Chongming,et al. Influence of sodium aluminate on calcium leaching of shotcrete in tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021,117:104156.

[15] Zhang Ziwei,Li Guoxin,Zhang Ge,et al. Influence of liquid accelerators on shotcrete in karst area tunnels[J]. Case Studies in Construction Materials,2022,16:e01002.

[16] 朱瑞恒,岑威钧,薛阳,等. 坝基廊道开裂对心墙坝渗流特性的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):22-28. (Zhu Ruiheng,Cen Weijun,Xue Yang,et al. Influence analysis of dam foundation gallery cracks on seepage characteristics of core dam[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2024,52(4):22-28. (in Chinese))

[17] 徐力群,赵邵峰,沈振中,等. 特高土心墙堆石坝坝基防渗体渗流-溶蚀特征研究[J]. 水利学报,2023,54(8):942-954. (Xu Liqun,Zhao Shaofeng,Shen Zhenzhong,et al. Seepage and dissolution analyses for impervious structure of dam foundation in super-high rockfill dams with soil core[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(8):942-954. (in Chinese))

[18] Zhou Changlin,Zhu Zheming,Wang Zhihong,et al. Deterioration of concrete fracture toughness and elastic modulus under simulated acid-sulfate environment[J]. Construction and Building Materials,2018,176:490-499.

[19] 郭文华,吴彪,陈定市. 多因素耦合的混凝土结构硫酸盐传输多尺度模拟分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2024,55(4):1374-1387. (Guo Wenhua,Wu Biao,Chen Dingshi. Multi-scale simulation analysis of sulfate transport in concrete structures coupled with multiple factors[J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2024,55(4):1374-1387. (in Chinese))

[20] Xu Liqun,Zhao Shaofeng,Zhang Hongwei,et al. Hydraulic fracturing in cement mortar subjected to seepage-sulfate coupled attack under varying pH levels[J]. Construction and Building Materials,2024,449:138325.

[21] Chen Xudong,Wu Shenxin. Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar[J]. Construction and Building Materials,2013,38:804-812.