第 48 卷第 11 期
2020 年 11 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 11
November，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200292

多离子溶液浸泡环境下氯离子在砂浆中的扩散性能

邹笃建[1]，覃珊珊[1]，刘铁军[1]，龚 豪[1]，周 傲[1]，裴华富[2]

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院，广东 深圳 518055；2. 大连理工大学土木工程学院，辽宁 大连 116024)

摘 要：以深圳各港口实测海水盐类成分为基准，配置了不同盐类比例和浓度的侵蚀溶液，研究了侵蚀溶液成分及浓度比例对砂浆性能劣化和氯离子扩散的影响。结果表明：多离子溶液浸泡环境下硫酸根离子对氯离子在砂浆中传播的影响与盐类浓度有关，高浓度硫酸根离子和镁离子对氯离子在砂浆中传播前期抑制后期促进的规律不适用描述海水浸泡环境多离子相互作用对氯离子传播的影响；海水中低浓度硫酸根离子和镁离子的存在并未对氯离子的传播产生抑制作用，甚至有轻微的促进作用。

关键词：砂浆；海水侵蚀；氯离子；硫酸根离子；扩散
中图分类号：TU528.57　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)11–1817–07
网络出版时间：2020–09–18

Chloride Ion Diffusion in Cement Mortar in Multi-Ion Solutions with Various Ions

ZOU Dujian[1], *QIN Shanshan*[1], *LIU Tiejun*[1], *GONG Hao*[1], *ZHOU Ao*[1], *PEI Huafu*[2]
(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology ,Shenzhen, Shenzhen 518055, Guangdong, China;
2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Immersion solutions at different salt ratios and concentrations were prepared based on the seawater salt composition in Shenzhen ports, China. The effect of immersion solution on the deterioration of the mortar and the chloride diffusion coefficient were investigated. The results show that the influence of sulfate ions on the diffusion of chloride ions is related to the salt concentration in multi-ion solutions. The diffusion of chloride ions is inhibited by high-concentrated sulfate and magnesium ions in the early stage and promoted in the later stage. This phenomenon is not consistent with the effect of multi-ion interactions in the marine environment. The low concentration of sulfate and magnesium ions in seawater does not inhibit and even slightly promote the diffusion of chloride ions in the mortar.

Keywords: mortar; marine corrosion; chloride ions; sulfate ions; diffusion

混凝土结构的耐久性极限状态一般分为 3 种，即钢筋开始发生锈蚀的极限状态，钢筋发生适量锈蚀的极限状态和混凝土表面发生轻微损伤的极限状态[1]。对于氯离子侵蚀引起的钢筋锈蚀，钢筋开始发生锈蚀的极限状态是由钢筋表面的氯离子浓度决定的，因此明确氯离子在混凝土中的传播过程对于准确评价钢筋锈蚀起始时间至关重要，直接影响了混凝土结构是否到达耐久性寿命的判断。对于滨海混凝土结构而言，氯离子侵蚀的来源主要是海水。虽然海水中含有的氯离子浓度最高，但同时还含有硫酸根离子、钠离子和镁离子等，其中硫酸根离子进入混凝土内部会生成钙钒石等膨胀性产物以及发生“钙溶蚀”现象，会直接影响氯离子在混凝土中的传播过程。海水中多离子之间的相互作用以及内部电荷不平衡带来的局部电场对氯离子传输也存在一定的影响[2–5]。早期研究者为规避困难，往往忽略了海水中存在的硫酸根离子和镁离子对氯离子在混凝土中传输的影响，并假设氯离子在混凝土中传播不参

收稿日期：2020–04–23。　修订日期：2020–05–21。
基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFC1511000)；国家自然科学基金面上项目(51978211，51878225)。
第一作者：邹笃建(1984—)，男，博士，副教授。
通信作者：刘铁军(1976—)，男，博士，教授。

Received date: 2020–04–23.　**Revised date:** 2020–05–21.
First author: ZOU Dujian (1984–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: zoudujian@163.com
Correspondent author: LIU Tiejun (1976–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: liutiejun@hit.edu.cn

加任何反应，因此用 Fick 定律就能较好地描述氯离子溶液浸泡环境下氯离子在混凝土中的扩散过程。

近年来越来越多的研究者关注到混凝土在氯盐-硫酸盐共同作用下的劣化过程，并达成了一些基本结论[6–11]：氯离子在混凝土中的扩散系数要高于硫酸根离子 2 个数量级，因此氯离子会率先与水化产物生成 Friedel's 盐；硫酸根离子则与氢氧化钙首先反应生成石膏，继而生成钙矾石逐渐填充孔隙；侵蚀过程中 pH 值会降低，碱性环境的逐渐降低将导致 Friedel's 盐发生失稳分解。Guerrero 等[12]认为，氯盐和硫酸盐的相互影响主要有 2 部分，分别是硫酸盐对氯离子结合物的抑制作用和侵蚀产物积累对孔隙通道的变化影响。Loser 等[13]则认为混凝土的孔隙变化是影响氯离子扩散的最主要因素。Chen 等[14]结合物理和化学两方面，认为多离子耦合溶液会对氯离子活动产生抑制作用，并且膨胀性侵蚀产物会降低孔隙率，阻碍氯离子的传输，降低了氯离子的扩散系数。而 Maes 等[15–16]对此持不同的看法，认为硫酸根离子的存在对氯离子扩散是促进作用，并与硫酸根离子的浓度成正相关。当硫酸根离子和氯离子共存时，C_3A 与硫酸根离子的反应更稳定，导致自由氯离子含量升高；同时，Friedel's 盐会因为硫酸盐的影响失稳转化为钙矾石，从而释放部分结合氯离子。

综上所述，目前在海水侵蚀环境下多离子在混凝土内部的传播过程尚存在较大争论，并且前期研究大多采用了高浓度离子侵蚀溶液，而硫酸根离子浓度的高低直接影响了其侵蚀反应机制，这对研究海水侵蚀环境下氯离子−硫酸根离子的耦合侵蚀过程引入了较大的误差。基于此，本工作重点研究盐类浓度和比例对氯离子在砂浆中传播的影响。

1 实验

1.1 原材料

使用深圳市源流建材厂海螺牌 42.5R 普通硅酸盐水泥，其主要化学成分见表 1，水泥的相关物理力学性能指标如表 2 所示。浇筑所用的砂均为二区中砂，级配良好。其表观密度为 2 570 kg/m^3，堆积密度为 1 470 kg/m^3，细度模数 2.7。砂浆配合比见表 3。

1.2 侵蚀溶液设计

侵蚀溶液设计如表 4 所示，共设计了 5 组侵蚀溶液工况，重点考虑了硫酸根离子浓度、镁离子浓度对氯离子传输性能的影响。SEA 组选取了海水中主要离子成分，且镁离子、钠离子、硫酸根离子比上氯离子的比值为 0.070 8:0.567 6:0.115 5，与文献[17]中深圳市海水中各个离子比值相接近。

表 1 水泥化学成分

Table 1 Chemical compositions of cement materials

Composition	Mass fraction/%
Na_2O	0.13
MgO	1.07
Al_2O_3	5.21
SiO_2	21.10
CaO	65.65
Fe_2O_3	4.18
K_2O	0.58
SO_3	1.02
others	1.06

表 2 水泥物理力学参数

Table 2 Cement physical and mechanical parameters

Mass fraction/%			Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
Standard consistency	L.O.I	80 μm sieve residue	Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
26.3	3.23	0.23	165	263	5.7	8.7	28.8	49.8

表 3 砂浆配合比

Table 3 Mix proportions of mortar kg/m^3

Cement	River sand	Water
500	1 350	300

表 4 浸泡组合及试验编号

Table 4 Solution combination and test number

Sample No.	Solution combination
Cl3	3.0% NaCl
Cl3S3	3.0% NaCl+3.0% Na_2SO_4
Cl3S8	3.0% NaCl+8.0% Na_2SO_4
Cl3MS3	3.0% NaCl+3.0% $MgSO_4$
SEA	2.42% NaCl+0.16% Na_2SO_4+0.12% $MgSO_4$+0.4% $MgCl_2$

采取恒定室内温度 20 ℃自然浸泡的侵蚀制度，最长侵蚀时间为 240 d。主要的试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体 A 和 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体 B。其中棱柱体 A 试件用于测试砂浆在不同侵蚀环境下的质量变化、抗折和抗压强度等宏观力学性能测试，共 80 个。棱柱体 B 试件用于钻孔取样磨粉测定砂浆在不同侵蚀时间节点的氯离子浓度以及微观测试分析等，共 10 个。

1.3 测试方法

质量变化率为表征硫酸盐侵蚀混凝土劣化程度的常用指标，可以有效反映混凝土在不同侵蚀时间和环境下的表面剥落情况。采用 0.1 g 精度的电子秤，自侵蚀开始后每隔 30 d 对不同工况的试件称重，记录质量变化。砂浆质量变化率的计算公式如下：

$$\Delta M_t = \frac{(M_t - M_0)}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：ΔM_t 为侵蚀 t (d)后砂浆的质量变化率，%；M_t 为侵蚀 t (d)砂浆的质量，kg；M_0 未侵蚀砂浆的质量，kg。

选用 SHT-4605 微机控制电液伺服万能试验机进行了棱柱体 A 砂浆试件的抗折和抗压强度测定，试验方法根据 GB/T17671—1999《水泥胶砂强度检验方法》[18]。试验加载制度为应力控制，抗折和抗压的加载速率分别为 2 400 N/s 和 50 kN/s。

选用 NJCL-C 型混凝土氯离子含量快速测定仪对不同侵蚀工况下砂浆试件沿深度方向的氯离子浓度进行了测定。从 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体 B 中钻孔取芯，按第 1 层厚度 2.5 mm，往后 5 mm 厚度切片，磨粉称取质量。

使用扫描电镜(SEM)观察砂浆表层微观形貌的变化。利用工程转机在棱柱体试块中钻取内芯，内芯尺寸约 ϕ20 mm×100 mm；再使用切割机对芯样切片，取表层 2.5 mm 厚的薄片作为观测试样，观测盐类侵蚀对砂浆微观结构的影响。将薄片进行研磨成粉末放入烘箱以 60 ℃恒温烘干 24 h 后采用 D8ADVANCE 型 X 射线差分仪进行 XRD 衍射分析。

2 结果与讨论

2.1 质量变化率

图 1 为砂浆试件在 5 种侵蚀溶液中长期浸泡后的质量变化。由图 1 可见，各工况试件在 240 d 侵蚀时间内质量变化趋势为：总体上砂浆质量随着侵蚀时间的增加而增长，逐渐趋于平缓，除 Cl3MS3 组试件之外，其他工况组试件并未出现质量下降(主要受侵蚀时间的限制，并未观测到全部工况的质量下降段)。前期砂浆质量的快速上升主要是由 2 方面引起的，一是未水化水泥的持续水化；二是硫酸盐侵蚀初期，生成的膨胀性产物沉淀于孔隙中尚未造成破坏。至侵蚀 240 d，Cl3、Cl3S3、Cl3MS3、Cl3S8 与 SEA 中砂浆的质量变化率分别为 1.01%、1.16%、1.25%、1.20%和 1.06%。在整个侵蚀过程中，单一氯盐溶液浸泡下的试件质量变化比复合溶液小。比较 Cl3、Cl3S3 与 Cl3S8 组，发现砂浆试件的质量增长与硫酸根离子浓度成正比。在侵蚀时间为 240 d 时，Cl3S8 组的质量增长比 Cl3S3 组和 Cl3 组分别提高了 7.76%和 23.8%。这是因为硫酸根离子浓度越高，进入混凝土内部反应生成钙钒石含量的越多。这与 SEM 微观分析中观测到的结果相吻合，如图 2a 和图 2b 所示。

在 5 种工况中，Cl3MS3 组砂浆试件的质量最早进入了下降阶段，试件在 0~90 d 质量提升很快，在 90~180 d 呈平缓波动趋势，180 d 后出现下降。相比于其他溶液，镁离子的存在将 $Ca(OH)_2$ 转化为溶解度很低的 $Mg(OH)_2$ 沉淀，使得质量增加较快。随着侵蚀进一步进行，溶液 pH 值不断降低，水化硅酸钙分解，生成软化的无粘性 M-S-H 凝胶(图 2c)，导致混凝土表层的剥落。金祖权[19]指出混凝土在硫酸镁作用下的侵蚀劣化机理是镁离子与硫酸根离子侵蚀作用的叠加，加速了混凝土剥落和劣化过程。

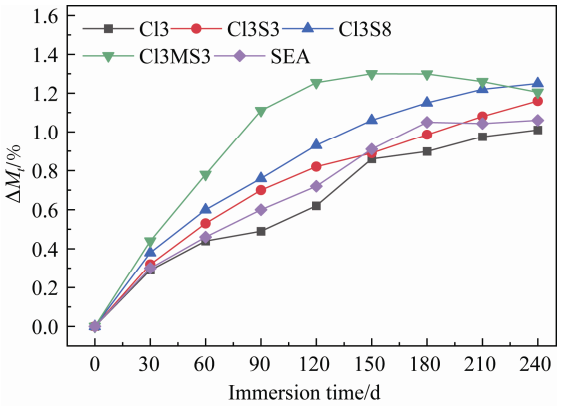


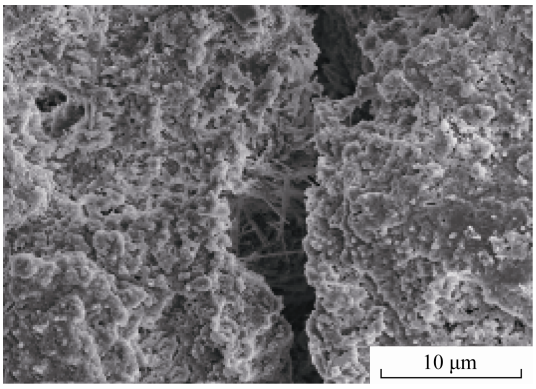
图 1　砂浆在不同侵蚀溶液下的质量变化

Fig. 1　Change of mass fraction (ΔM_t) of mortars in different immersion solutions

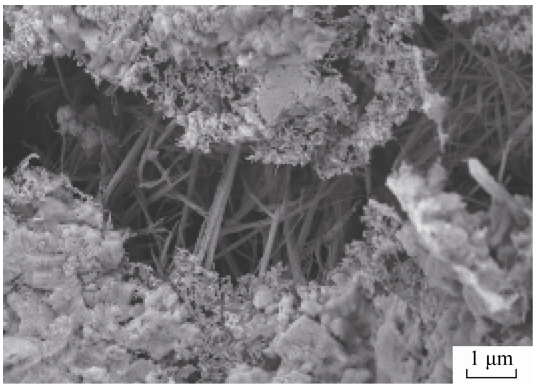
2.2 抗折和抗压强度

图 3 和图 4 分别给出了砂浆在 5 种不同溶液中侵蚀后抗折强度和抗压强度随侵蚀时间的变化规律，抗折和抗压强度随侵蚀时间变化的总体规律较为一致，强度随着侵蚀时间的增长先上升后下降。对于 Cl3 组砂浆前中期强度提高，主要是由水泥水化反应和 Friedel's 盐等侵蚀产物填充孔隙，提高了砂浆的密实性。侵蚀时间为 240 d 时强度降低，主要可能是由水泥基材料长期在纯水或低 pH 值溶液中易发生钙溶蚀引起的。

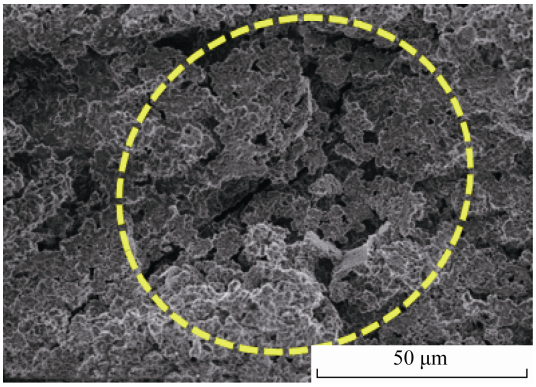
对比 Cl3 组、Cl3S3 组和 Cl3S8 组强度，发现在侵蚀 120 d 以前，复合溶液侵蚀下的抗折和抗压强度大于单一氯盐溶液侵蚀下砂浆强度，且硫酸盐浓度越大，砂浆的强度越大。侵蚀 180 d 时，Cl3S8



(a) Cl3S3



(b) Cl3S8



(c) Cl3MS3

图 2 砂浆在不同溶液侵蚀 180 d 后 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of mortar after immersing in different solutions for 180 d

组强度率先下降，Cl3S3 组强度持续增大并超过 Cl3S8 组。与早期砂浆质量随侵蚀时间的增加而增长的原因相同，强度的增长也主要是由未水化水泥的持续水化和硫酸盐侵蚀产物的生成使混凝土内部更加密实而导致的。在侵蚀前期，钙钒石和石膏等膨胀性产物不断积累填充砂浆孔隙，致使砂浆试件密实度提高而强度增大；在后期钙矾石等膨胀性侵蚀产物生成过多对孔隙壁产生膨胀压力，导致微裂缝开展和水泥水化产物黏性的丧失，引起了砂浆强度的降低。硫酸根离子含量越大，生成的钙钒石含量越多，前期对强度增强作用更加明显，同时也更快地表现出由于膨胀开裂导致强度的降低。这与文献[8]中的结果一致。

图 4 中对比 Cl3S3、Cl3MS3 和 SEA 组，发现镁离子存在的使得抗压强度大幅降低。Cl3MS3 和 SEA 两组的抗压强度都低于 Cl3S3 组，且 Cl3MS3 组在侵蚀 240 d 后其抗压强度首先低于初始值。镁离子进入混凝土内部生成了无胶结能力 $Mg(OH)_2$、M-S-H 等侵蚀产物。SEM 微观分析 Cl3MS3 组发现其砂浆的凝胶体已大量减少，外层遍布着松软的层状水镁石，如图 2c 所示。混凝土黏结力性能的丧失使得混凝土抗压强度出现了显著降低。

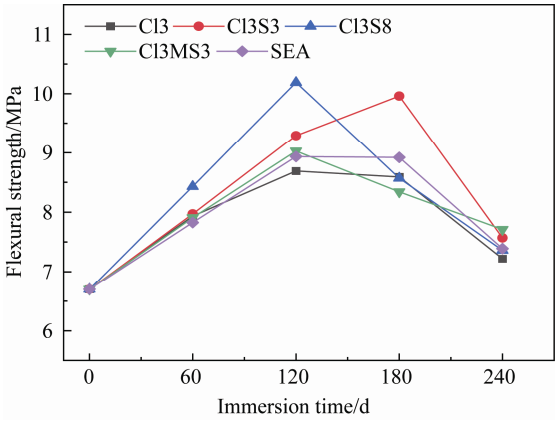


图 3 抗折强度随侵蚀时间的变化

Fig. 3 Variation of flexural strength with immersion time

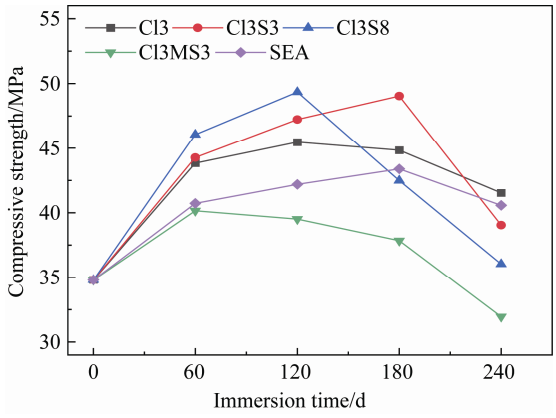


图 4 抗压强度随侵蚀时间的变化

Fig. 4 Variation of compressive strength with immersion time

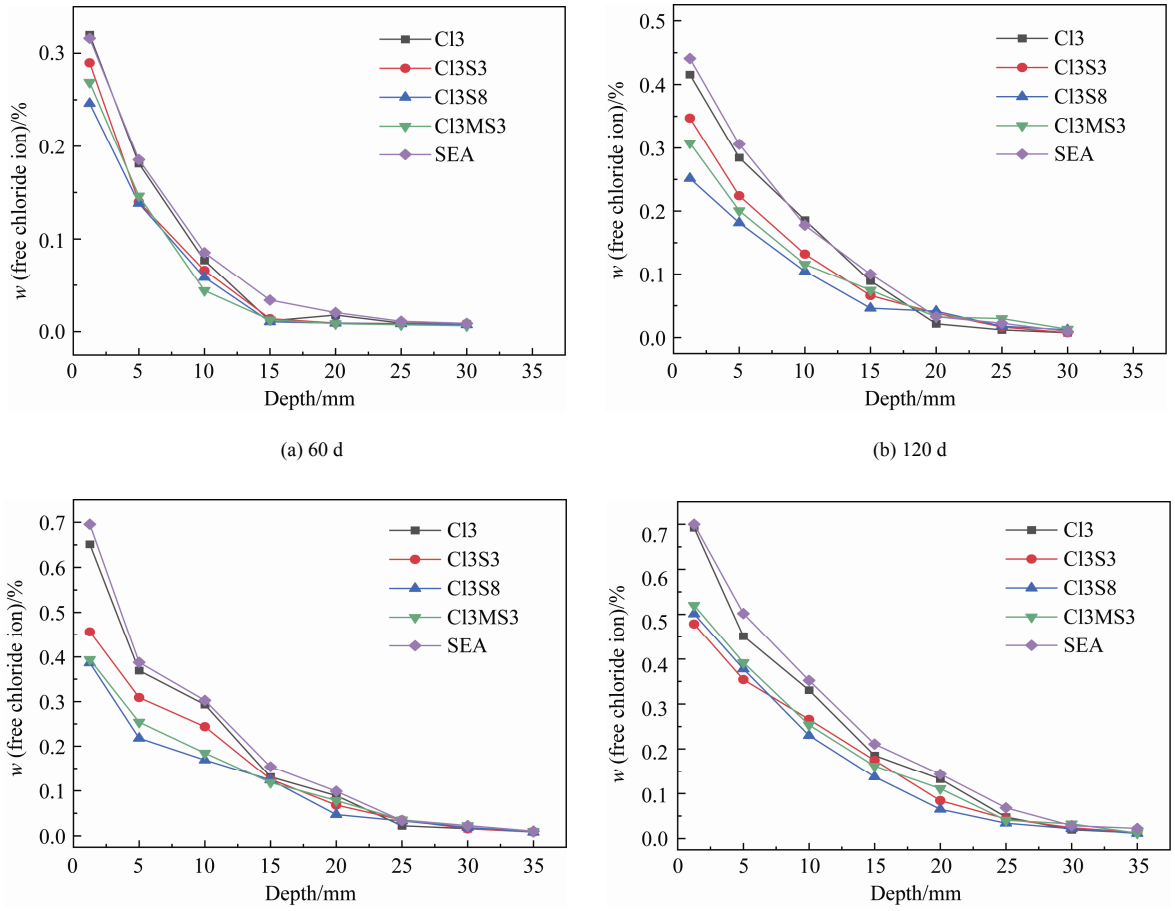
2.3 氯离子浓度分布时变规律

图 5 为砂浆在不同工况中氯离子浓度随深度的分布曲线。从图 5 可以看出：对于同种工况，随着侵蚀时间增加氯离子浓度逐渐增长；相同侵蚀时间下，Cl3 组和 SEA 组的氯离子浓度最大，并且 SEA

组氯离子浓度稍大于 Cl3 组，其次是 Cl3S3 组、Cl3MS3 组，氯离子浓度最小的为 Cl3S8 组。

为更清晰地对比不同工况下的氯离子浓度差异，并弱化个别误差导致的不准确性，引入氯离子浓度分布积分面积来对比不同工况下氯离子在砂浆内部的分布。氯离子浓度积分面积为氯离子浓度分布曲线与相应直线(x=0，y=0)所围成的面积。各工况下的氯离子积分面积如图 6 所示，Cl3、Cl3S3、Cl3S8 的氯离子浓度随硫酸根离子浓度增大而降低。这表明硫酸根离子的存在对氯离子的传输产生一定的抑制作用[14–15, 19–21]。可能有这几方面的原因：其一，多离子传输与单离子传输的结果存在明显差异[3]，多离子共存下，其他较高浓度的盐离子浓度降低了氯离子的化学活度[14]，从而影响氯离子的传输性能；其二，硫酸根离子侵蚀混凝土的产物对内部孔隙产生填充作用，在一定程度上阻碍氯离子的扩散过程[19–20]。而当孔隙不能容纳更多的膨胀性产物时，孔隙膨胀开裂形成新的微裂缝，为氯离子进入砂浆内部提供了新的通道，硫酸盐侵蚀引起的抑制效应开始减弱甚至转而起促进作用。将不同工况下氯离子积分面积做归一化分析，分别除以 Cl3 组氯离子积分面积，结果如图 7 所示。随着侵蚀时间的增长，Cl3S8 组氯离子积分面积比值早期持续减小，在 180 d 时到达最小值。然后反弹转而增长，240 d 时氯离子积分面积比值相较 180 d 出现明显恢复。这说明后期硫酸根离子对氯离子的抑制作用越来越小，侵蚀一定时间后会由于裂缝的发展对氯离子传输起到一定的促进作用[21]。

从图 6 可以看出：含有镁离子 Cl3MS3 组的氯离子浓度早期低于 Cl3S3 组，侵蚀 240 d 后，其氯离子浓度略大于 Cl3S3 组，约为 4.5%。可能原因是早期生成的 $Mg(OH)_2$ 沉淀加大了对孔隙的填充作用，降低了氯离子扩散能力；而由于镁离子对混凝土黏结性能的破坏使得表层产生剥落，以及硫酸根离子生成的膨胀性产物更易导致砂浆内部微裂纹的产生会在后期加快氯离子向混凝土内部传输。



(a) 60 d　(b) 120 d

(c) 180 d　(d) 240 d

图 5　砂浆不同侵蚀时间下的氯离子浓度分布

Fig. 5　Distribution of free chloride ion along concrete depth under different immersion times

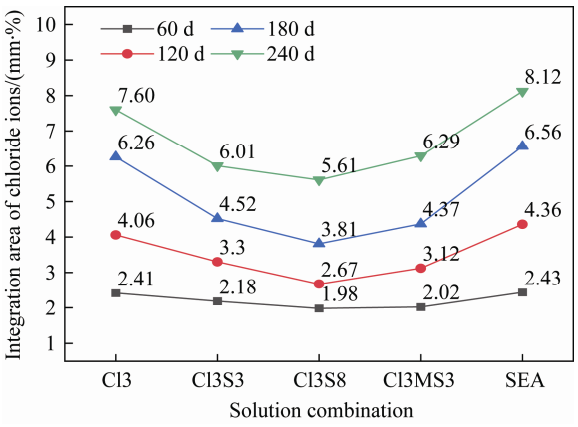


图 6 氯离子浓度积分面积

Fig. 6 Integration area of chloride

上述试验现象已被一些研究者发现并形成了较为一致的结论，然而大多数研究者都忽略了得到上述结论的前提是多离子侵蚀溶液中氯离子浓度和硫酸根离子浓度是相当的，该规律并不宜直接适用于描述海水侵蚀环境中氯离子在混凝土中的传播。图 7 中，与 Cl3S3、Cl3S8 和 Cl3MS3 组氯离子积分面积比值下降相反，不同侵蚀时间下 SEA 组氯离子积分面积比值皆稍大于 1，这说明在高浓度溶液配比下硫酸根离子对氯离子传输的抑制作用几乎没有在 SEA 组中表现出来。根据 SEA 组中各个离子与氯离子的比值可知，氯离子浓度是硫酸根离子浓度的 8.6 倍，镁离子的 14.1 倍，钠离子的 1.76 倍。氯离子的浓度远远高于其它各个离子浓度，占据主导地位，其他离子对氯离子传输的影响非常微弱。且高浓度氯离子在一定程度上会延缓硫酸根离子与水化产物的反应[15]，更加降低硫酸根离子生成侵蚀产物对孔隙结构的影响。从图 8 也可以看出，SEA 组与 Cl3 组 2 组各类侵蚀产物的衍射峰强度都非常接近。这与文献[22]中的结果也相接近。

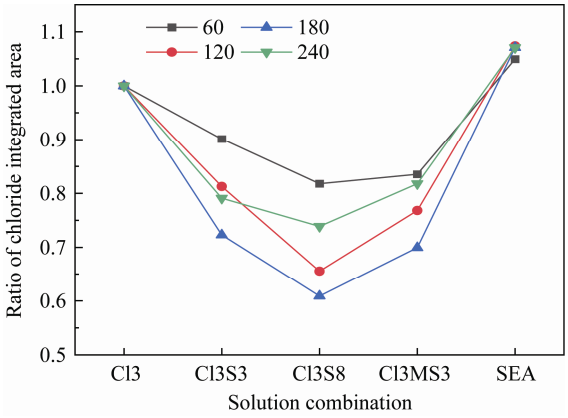
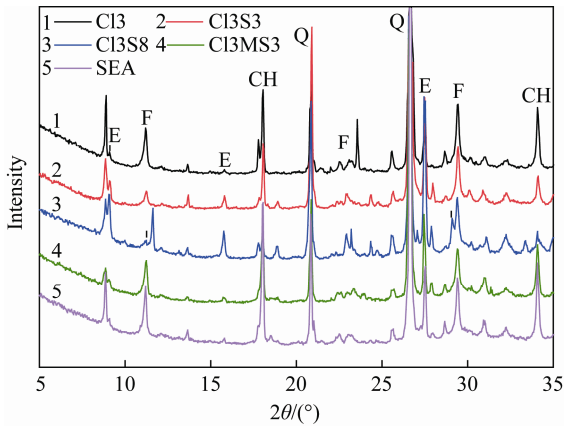


图 7 积分面积比值

Fig. 7 Ratio of chloride integration area



E—Ettringite; F—Friedel's salt; Q—Quartz; CH—Portlandite.

图 8 砂浆在不同溶液侵蚀 120 d 后的 XRD 谱

Fig. 8 XRD patterns of mortar after immersing in different solutions for 120 d

3 结论

1) 氯离子、硫酸根离子等多离子溶液全浸泡环境下，砂浆的质量、抗折和抗压强度随着侵蚀时间增加先增长后降低，砂浆质量处于上升段时，抗折和抗压强度已进入下降段。

2) 在侵蚀周期内，高浓度复合溶液中硫酸根离子和镁离子的存在都会对氯离子的传输产生一定的抑制作用，但在侵蚀后期该抑制作用由于硫酸根离子和镁离子侵蚀导致混凝土内部损伤的发展而逐渐降低，当超过一定侵蚀周期后会对氯离子扩散起到促进作用。

3) 海水环境中由于硫酸根离子、镁离子浓度远远低于氯离子浓度，在侵蚀周期内氯离子在砂浆中传输的过程并未受到其显著影响。因此试验中高浓度试验得到的结果并不直接适用于描述海水侵蚀环境中氯离子在混凝土中的传播。

参考文献:

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50476-2019 混凝土结构耐久性设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社.

[2] CAZENAVE F, BERNADA P, COUTURE F, et al. Modelling of solid formation by heterogeneous reactions through a multicomponent transport model of diluted ionic species: Simulation of barite fouling in a geothermal heat exchanger[J]. Can J Chem Eng, 2020, 98: 979–997.

[3] 刘清风. 基于多离子传输的混凝土细微观尺度多相数值模拟[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8): 1074–1080.
LIU Qingfeng. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(8): 1074–1080.

[4] LIU Q F, FENG G L, XIA J, et al. Ionic transport features in concrete composites containing various shaped aggregates: a numerical study[J]. Compos Struct, 2018, 183: 371–380.

[5] LIU Q F, EASTERBROOK D, YANG J, et al. A three-phase,

multi-component ionic transport model for simulation of chloride penetration in concrete[J]. Eng Struct, 2015, 86: 122–133.

[6] JIN Z Q, GAO S, ZHAO X, et al. Corrosive crack and its 3D defects identification of reinforced concrete subjected to coupled effect of Chloride ions and sulfate ions[J]. Int J Electrochem, 2015, 10(1): 625–636.

[7] JIN Z, ZHAO X, ZHAO T, et al. Effect of $Ca(OH)_2$, NaCl, and Na_2SO_4 on the corrosion and electrochemical behavior of rebar[J]. Chin J Oceanol Limnol, 2017, 35(3): 681–692.

[8] 刘其跃. 氯盐—硫酸盐侵蚀下混凝土的损伤劣化机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
LIU Qiyue. Research on damage deterioration mechanism of concrete under chloride-sulfate attack (in Chinese, dissertation). Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.

[9] 陈晓斌, 唐孟雄, 马昆林. 地下混凝土结构硫酸盐及氯盐侵蚀的耐久性实验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2803–2812.
CHEN Xiaobin, TANG Mengxiong, MA Kunlin. J Centr South Univ (in Chinese), 2012, 43(7): 2803–2812.

[10] STROH J, MENG B, EMMERLING F. Deterioration of hardened cement paste under combined sulphate-chloride attack investigated by synchrotron XRD[J]. Solid State Sci, 2016, 56: 29–44.

[11] 李长成, 姚燕, 王玲. 氯离子对碳硫硅钙石形成的影响[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(1): 25–29.
LI Changcheng, YAO Yan, WANG Ling. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(1): 25–29

[12] GUERRERO A, GONI S, ALLEGRO V R, et al. Effect of temperature on the durability of class C fly ash belite cement in simulated radioactive liquid waste: Synergy of chloride and sulphate ions[J]. J Hazard Mater, 2009, 165(1): 903–908.

[13] LOSER R, LOTHENBACH B, LEEMANN A, et al. Chloride resistance of concrete and its binding capacity–Comparison between experimental results and thermodynamic modeling[J]. Cem Concr Compos, 2010, 32(1): 34–42.

[14] CHEN Y J, GAO J M, TANG L P, et al. Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying-wetting cycles [J]. Constr Build Mater, 2016, 106: 650–658.

[15] MAES M, DE B N. Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate[J]. Cem Concr Compos, 2014, 53: 59–72.

[16] SOTIRIADIS K, RAKANTA E, MITZITHRA M E, et al. Influence of sulfates on chloride diffusion and chloride-induced reinforcement corrosion in limestone cement materials at low temperature[J]. J Mater Civ Eng, 2017, 29(8): 04017060.

[17] 杨巧凤. 深圳海岸带地表水和浅层地下水的水文地球化学[D]. 中国地质大学(北京), 2009.
YANG Qiaofeng. Hydrogeochemistry of surface water and shallow groundwater in coastal area of Shenzhen (in Chinese, dissertation). Beijing: China university of geosciences (Beijing), 2009.

[18] 王文义. GB/T 17671-1999 水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)实施中的若干问题[J]. 水泥, 2000(7): 1–3.
WANG Wenyi. Cement (in Chinese), 2000(7): 1–3.

[19] 金祖权. 西部地区严酷环境下混凝土的耐久性与寿命预测[D]. 东南大学, 2006.
JIN Zuquan. Durability and service life prediction of concrete exposed to harsh environment in West of China (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2006.

[20] 於德美. 疲劳荷载与环境耦合作用下混凝土氯离子传输行为及模型研究[D]. 长安大学, 2017.
YU Demei. Research on chloride ion transport behaviour and model of concrete under coupling of fatigue load and environment (in Chinese, dissertation). Xi'an: Chang'an University, 2017.

[21] JIN Z Q, SUN W, ZHANG Y S, et al. Interaction between sulfate and chloride solution attack of concretes with and without fly ash[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(8): 1223–1232.

[22] JENSEN M M, WEERDT B, JOHANNESSON M R, et al. Use of a multi-species reactive transport model to simulate chloride ingress in mortar exposed to NaCl solution or sea-water[J]. Comput Mater Sci, 2015, 105: 75–82.