

基于干湿循环法的锂渣混凝土对氯离子吸附性能研究

王晨¹, 王润锴^{1,2}, 吕志栓¹, 韩国旗^{1*}

¹喀什大学土木工程学院, 新疆 喀什

²上海工程技术大学化学化工学院, 上海

收稿日期: 2021年7月6日; 录用日期: 2021年12月23日; 发布日期: 2021年12月30日

摘要

混凝土结构所处的工作环境中, 干湿循环往往是导致结构出现严重锈蚀问题的环境之一。在干湿循环作用下, 混凝土结构耐久性一般弱于处在干燥或完全浸泡环境下的混凝土结构, 因此, 在设计和使用时需要进行重点考虑。本文通过干湿循环法研究了高浓度氯盐环境下锂渣混凝土的氯离子吸附性能。针对干湿交替环境, 探讨了锂渣掺量、抗压强度、扩散深度、氯盐浓度及侵蚀时间等因素对锂渣混凝土的氯离子吸附性能的影响。结果显示, 随着混凝土所处环境中相对湿度发生变化, 其对氯离子的吸附能力也随之变化, 并呈现出一定的规律性。基于上述实验结果, 本研究对处于干湿循环下锂渣混凝土在工程应用过程中提供了一定的参考意义。

关键词

干湿循环法, 锂渣混凝土, 氯离子, 吸附

Study on Chloride Ion Adsorption Performance of Lithium Slag Concrete Based on Dry-Wet Cycle Method

Chen Wang¹, Runkai Wang^{1,2}, Zhishuan Lv¹, Guoqi Han^{1*}

¹School of Civil Engineering, Kashi University, Kashi Xinjiang

²School of Chemistry and Chemical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai

Received: Jul. 6th, 2021; accepted: Dec. 23rd, 2021; published: Dec. 30th, 2021

*通讯作者。

Abstract

In the working environment of the concrete structure, the dry-wet cycle was often one of the environments that lead to the serious corrosion of the structure. Under the action of dry-wet cycle, the durability of concrete structure was generally weaker than that of concrete structure in dry or completely soaked environment, so it needed to be considered in design and use. In this paper, chloride ion adsorption performance of lithium slag concrete in high concentration chloride salt environment was studied by dry-wetting cycle method and the effects of lithium slag content, compressive strength, diffusion depth, chloride salt concentration and erosion time on the adsorption performance of chloride ions in lithium slag concrete were discussed. The results showed that the adsorption capacity of chloride ion was changed along with the change of relative humidity in the environment of concrete and presented certain regularity. Based on the above experimental results, this study provided certain reference significance for the engineering application of lithium slag concrete under the dry-wet cycle.

Keywords

Dry-Wet Cycle Method, Lithium Slag Concrete, Chloride Ion, Adsorption

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

身为“丝绸之路经济带的重要交通枢纽、商贸物流和文化科教中心”的新疆位于大西北，有着巨大的沙漠，离我国海洋最远，年降雨量在全国处于较低水平，属于我国干旱少雨地区。由于其日照时间长，土壤蒸发强烈，因此新疆也是盐渍土面积最大、类型最多、分布最广的地区。而且由于地理位置靠近西伯利亚，冬季寒冷且多降暴雪，为保持道路通畅而使用大剂量的除冰盐，以上各种原因导致新疆土壤中的氯盐、硫酸盐等腐蚀化学侵蚀作用以及冻融破坏、碱集料反应等多种对建筑物构成严重威胁的因素产生[1] [2] [3] [4]。钢筋和混凝土的物理和力学性能差别很大，之所以能够共同工作主要取决于硬化后的混凝土与钢筋表面有很强的粘结力，两者有着比较接近的温度膨胀系数，不会因为温度变化而产生错位，钢筋包裹在混凝土的里面，能防止钢筋锈蚀，起到了很好的保护作用，从而提高了混凝土构件的耐久性[5]。而钢筋混凝土结构在使用过程中因内部或外部因素的影响，混凝土受到碳化及硫酸盐、 Cl^- 的侵蚀等作用，使原本混凝土和钢筋之间由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的过饱和溶液存在而形成的强碱性钝化膜遭到破坏，导致钢筋锈蚀[6]。由此产生的一系列电化学反应，使锈蚀产物体积膨胀，对钢筋周围的混凝土产生应力，使混凝土顺筋裂缝产生，引起混凝土保护层脱落，又进一步引起钢筋锈蚀。如不及时进行修补维护，损坏的构件除了有效截面积减小、屈服强度下降等变化外，适用性也会降低，甚至可能导致混凝土结构整体破坏、失效[7]。

混凝土结构所处的工作环境中，干湿循环往往是导致结构出现严重锈蚀问题的环境之一。干湿循环作用下的混凝土结构耐久性一般弱于处在干燥或完全浸泡环境下的混凝土结构，在设计和使用时需要进行重点防护。一般认为混凝土结构在干湿交替的部位主要发生氯离子毛细对流以及扩散作用。氯离子在

混凝土的干湿交替区中发生对流, 主要是由于孔隙液在毛细作用下的定向渗流, 混凝土内部处于非饱和状态, 该种状态下的混凝土发生的是典型的非饱和渗透, 水分以液体和气体两种形态在孔隙间移动。此时孔隙压力梯度及孔隙率是影响该运移方式的主要因素, 氯离子吸附性作用在一定程度上减小混凝土材料孔隙率的同时也会使其他剩余孔隙的压力增加。因此, 本文针对干湿循环作用下的混凝土试块对氯离子吸附能力进行了研究, 探讨了锂渣掺量、抗压强度、氯盐浓度、侵蚀时间、扩散深度对锂渣混凝土的氯离子吸附性能的影响。

2. 材料与方法

2.1. 自然浸泡试验

本试验所用水泥为天山水泥厂生产, 42.5 级普通硅酸盐水泥; 锂渣为新疆昊鑫锂盐开发有限公司生产; 粗骨料为卵石, 5~12.5 mm 连续级配; 细骨料为乌拉泊水库河砂; 减水剂为江苏博斯特新材料有限公司生产, 聚羧酸高效减水剂; 水为乌鲁木齐市自来水。试验所用化学试剂为氯化钠, 分析纯, 含量 99.0%, 国药集团化学试剂有限公司生产; 硝酸, 分析纯, 含量 70%, 天津市科密欧化学试剂有限公司生产。

本试验主要考察锂渣掺量、抗压强度、氯盐浓度、侵蚀时间、扩散深度对锂渣混凝土的氯离子吸附性能的影响, 针对我国沿海及西北地区的海洋、盐湖和盐渍地区的高氯环境, 本试验设定了高浓度的 NaCl 溶液作为侵蚀溶液。试件选用 0.52、0.45、0.38、0.30 四种水灰比, 每种水灰比配方中的水泥分别用 0%、10%、20%、30% 的锂渣等质量替代; 侵蚀时间为 5 d、10 d、20 d、40 d; 侵蚀试件的 NaCl 浓度选用 5%、10%、20% 三种盐浓度, 试验期间每天定时测定 NaCl 溶液浓度并及时调整盐和水的量以确保浸泡试件的溶液盐浓度稳定。

在搅拌机中将上述原材料干拌 1 min, 再加水湿拌 3 min。出料后先测定拌合物的坍落度, 将符合标准的拌合物浇注、振捣成型为直径 100 mm、高 50 mm 的圆柱形混凝土试件。试件成型后带模养护 24 h, 一天之后拆模, 用记号笔在试块的各个面上写明编号, 随后置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液中标准养护 28 天。将养护完成的试件放在干燥环境中至表层干燥, 留一个圆面作为受侵蚀界面, 用涂抹环氧树脂的方式对试件的侧面和另一圆面进行密封处理。按 1:3 的比例将固化剂和环氧树脂搅拌均匀, 采取少量多次的方式刮涂在试件表面, 确保涂层厚度均匀、光滑、无明显气泡, 以减少侵蚀过程出现涂层脱落的可能性, 待涂层干燥硬化后将试件置于清水中浸泡 48 h。

取四分之一数量的试块, 再将其平均分成三份分别放入盛有质量分数为 5%、10%、20% NaCl 溶液的浸泡箱中, 在温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的环境下进行周期性自然浸泡侵蚀作用。将达到预定侵蚀时间(5 d、10 d、20 d、40 d)的试块从浸泡箱中取出, 在鼓风干燥箱中以 55°C 的温度烘干 48 h, 干燥后用固定式工业级水钻分层钻孔取样, 各层的起止深度为 0~5 mm、5~10 mm、10~20 mm、20~30 mm、30~40 mm。每层样本在钻取完成后用刷子扫出, 过 0.16 mm 孔径标准筛以减小滴定试验结果的离散性。将过筛后的粉末收集于密封袋中并按试验条件编号。将按比例调制好的环氧树脂倒入取样后的孔内, 涂抹均匀以保证孔洞内被环氧树脂层完全密封, 检查试块表面是否有涂层脱落并及时进行填补。重复上述步骤进行浸泡、取样、封口等过程直至 40 天侵蚀过程完成即为自然浸泡试验部分结束。

2.2. 滴定试验

用感量精度 0.0001 g 的天平精确称取各层粉末的重量。将称量好的粉末根据测定离子性质的不同, 分别浸泡于去离子水和稀硝酸溶液中。封住瓶口, 剧烈振荡 2 min 后静置 24 h。到达静置时间后将瓶内的清液用抽滤机抽出, 放入干净的广口瓶中准备滴定氯离子含量。参照中华人民共和国交通部 JTJ270-98

《水运工程混凝土试验规程》中氯离子含量的方法测定试样的氯离子含量，每个样本滴定两次取平均值。由试验所测得的自由氯离子含量和混凝土中氯离子总含量，并进行线性回归分析。由试验数据计算被吸附的氯离子量为：

$$C_a = C_t - C_f \quad (1)$$

其中， C_a 为被吸附的氯离子量，%； C_t 为氯离子总量，%； C_f 为自由氯离子量，%，所用数值均为氯离子质量占混凝土质量的百分比。

计算氯离子吸附能力的方法：根据 Nilsson [6] 定义的混凝土氯离子吸附能力 R 的计算公式为：

$$R = \frac{\partial C_a}{\partial C_f} \quad (2)$$

由线性回归分析得到自由氯离子量与混凝土中氯离子总量之间的线性关系式：

$$C_t = KC_f \quad (3)$$

其中， K 为试验常数。

将公式(1) (3)代入公式(2)中得到氯离子吸附能力表达式：

$$R = \frac{\partial C_a}{\partial C_f} = \frac{\partial (C_t - C_f)}{\partial C_f} = \frac{\partial C_t}{\partial C_f} - 1 = K - 1 \quad (4)$$

2.3. 干湿循环试验

利用恒湿恒温试验箱设定干湿循环作用的相对湿度分别为 40%、60%、80%，侵蚀龄期及混凝土工作环境的 NaCl 浓度与上述自然浸泡侵蚀条件相同。干湿循环制度为：喷淋 NaCl 溶液 20 min，干燥 3 h 40 min，每 4 h 为一个循环周期。取四分之三数量的试块，再将其平均分成 9 份分别放入对应的质量分数为 5%、10%、20% NaCl 溶液及相对湿度分别为 40%、60%、80% 的浸泡箱中，在温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的环境下进行周期性干湿循环侵蚀作用。余下步骤和分析计算方法与上述试验流程相同。

3. 结果与分析

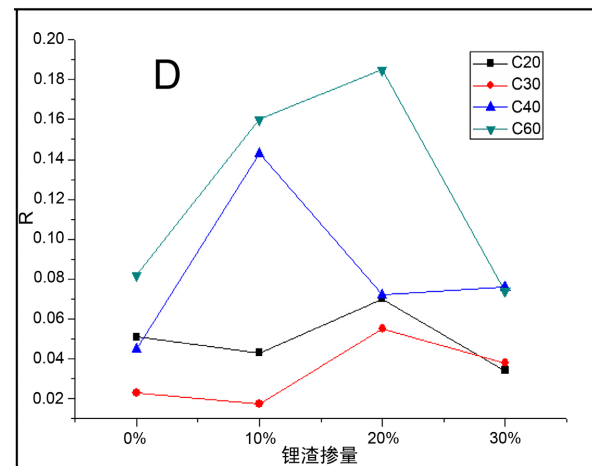
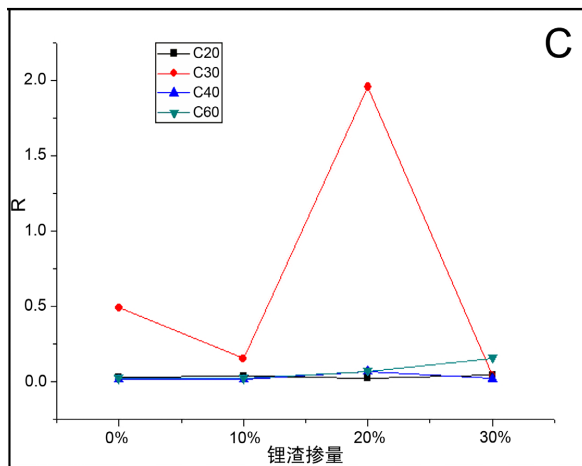
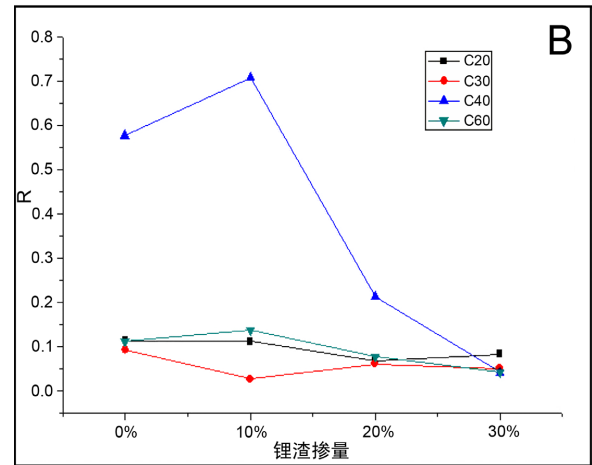
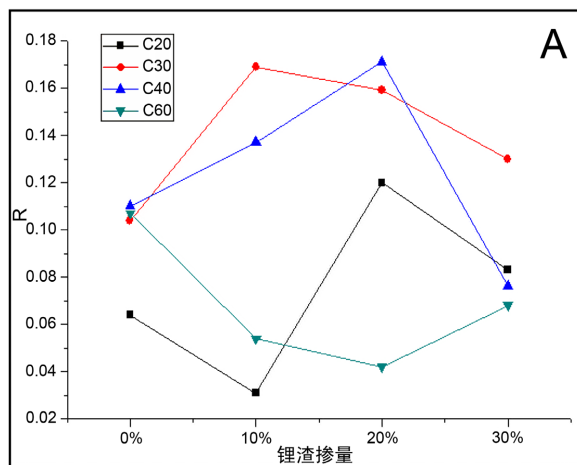
3.1. 锂渣掺量对干湿循环下混凝土的氯离子吸附能力的影响

表 1 列出了相对湿度 80% 下不同锂渣掺量的混凝土在各 NaCl 浓度下对氯离子吸附能力的不同。由图 1(A)、图 1(C)可以看出盐浓度对混凝土试件的吸附能力影响很大，不同盐浓度下的混凝土试件对氯离子吸附能力有较大差别。随着盐浓度的升高，C20、C40、C50 的吸附能力有了显著的下降。在 10% 和 20% 盐浓度下，C40 和 C30 的吸附能力远远高于其他类型的混凝土试件。在同一盐浓度下，随着锂渣掺量的增加，混凝土试件对氯离子的吸附能力未呈现规律性。表 2 列出了 60% 相对湿度下，不同锂渣掺量的混凝土试件在盐浓度分别为 10% 和 20% 的环境中表现出的吸附能力。由图 1(D)、图 1(E)的数据看出，在不加锂渣情况下，混凝土试件对氯离子的吸附能力随着盐浓度的升高而升高。在 10% 和 20% 盐浓度下，C60 表现出了较其他混凝土较高的吸附能力。随着锂渣掺量的升高，混凝土吸附能力都表现出下降趋势。从吸附能力考虑，混凝土中的锂渣掺量不应高于 20%。表 3 列出了 40% 的相对湿度条件下，5% 和 20% 盐浓度环境下不同锂渣掺量的混凝土试件对氯离子吸附能力的差别。由图 1(F)、图 1(G)可以看出，随着盐浓度的升高，混凝土试件对氯离子的吸附能力都呈下降趋势。在 20% 盐浓度下，当锂渣含量由 20% 升至 30% 时，C30 和 C40 混凝土的氯离子吸附能力呈现出大幅度升高。

Table 1. Adsorption capacity of chloride ion in lithium slag concrete with different lithium slag content (relative humidity of 80%)

表 1. 不同锂渣掺量下锂渣混凝土对氯离子吸附能力(相对湿度 80%)

| 盐浓度 | 抗压强度 | 锂渣掺量 | | | | R^2 | | | |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0% | 10% | 20% | 30% | | | | |
| 5% | C20 | 0.064 | 0.031 | 0.120 | 0.083 | 0.9976 | 0.9976 | 0.9654 | 0.9943 |
| | C30 | 0.104 | 0.169 | 0.159 | 0.130 | 0.9952 | 0.9930 | 0.9942 | 0.9788 |
| | C40 | 0.110 | 0.137 | 0.171 | 0.076 | 0.9670 | 0.9549 | 0.9703 | 0.9761 |
| | C60 | 0.107 | 0.054 | 0.042 | 0.068 | 0.9845 | 0.9813 | 0.9774 | 0.9959 |
| 10% | C20 | 0.114 | 0.112 | 0.067 | 0.084 | 0.9924 | 0.9895 | 0.9909 | 0.9944 |
| | C30 | 0.093 | 0.027 | 0.061 | 0.051 | 0.9977 | 0.9967 | 0.9936 | 0.9985 |
| | C40 | 0.578 | 0.708 | 0.214 | 0.042 | 0.9763 | 0.9883 | 0.9870 | 0.9867 |
| | C60 | 0.112 | 0.137 | 0.077 | 0.043 | 0.9934 | 0.9799 | 0.9849 | 0.9949 |
| 20% | C20 | 0.029 | 0.034 | 0.020 | 0.044 | 0.9992 | 0.9992 | 0.9995 | 0.9997 |
| | C30 | 0.489 | 0.151 | 1.955 | 0.036 | 0.9897 | 0.9973 | 0.9789 | 0.9990 |
| | C40 | 0.018 | 0.017 | 0.067 | 0.020 | 0.9996 | 0.9995 | 0.9871 | 0.9981 |
| | C60 | 0.025 | 0.024 | 0.069 | 0.157 | 0.9996 | 0.9975 | 0.9985 | 0.9997 |



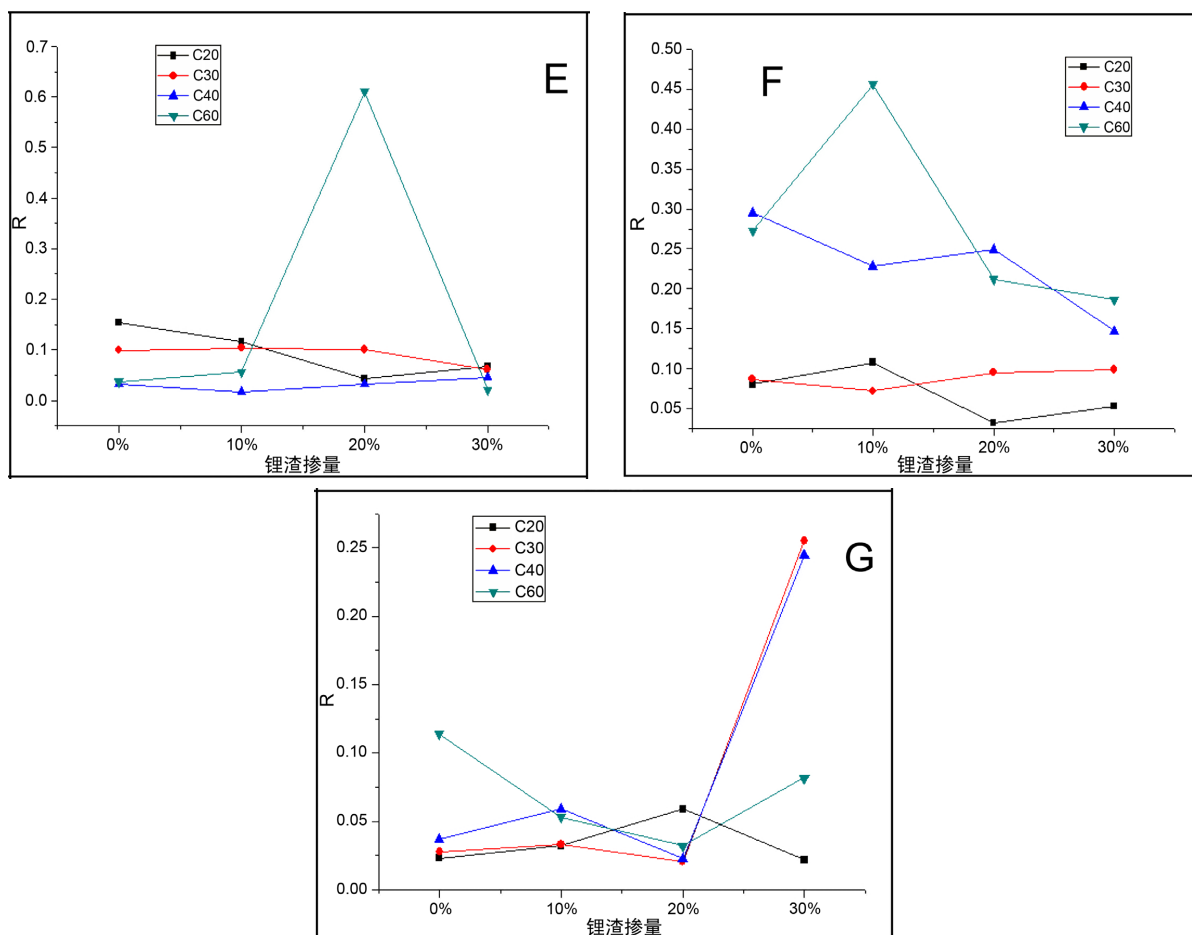


Figure 1. The adsorption capacity of chloride ions on lithium slag concrete varies with the content of lithium slag (A~C stand for the NaCl solution from 5% to 20% with the relative humidity of 80%; D and E stand for the NaCl solution of 10 and 20% with the relative humidity of 60%; E and G stand for the NaCl solution of 5% and 20% with the relative humidity of 40%)

图 1. 锂渣混凝土对氯离子吸附能力随锂渣掺量变化趋势(A~C 为相对湿度 80% 的 5%~20% NaCl 溶液; D, E 为相对湿度 60% 的 10% 和 20% NaCl 溶液; F, G 为相对湿度 40% 的 5% 和 20% NaCl 溶液)

Table 2. Adsorption capacity of chloride ion in lithium slag concrete with different lithium slag content (relative humidity of 60%)

表 2. 不同锂渣掺量下锂渣混凝土对氯离子吸附能力(相对湿度 60%)

| 盐浓度 | 抗压强度 | 锂渣掺量 | | | | R^2 | | | |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0% | 10% | 20% | 30% | | | | |
| 10% | C20 | 0.051 | 0.043 | 0.070 | 0.034 | 0.9978 | 0.9961 | 0.9938 | 0.9862 |
| | C30 | 0.023 | 0.017 | 0.055 | 0.038 | 0.9959 | 0.9976 | 0.9871 | 0.9886 |
| | C40 | 0.045 | 0.143 | 0.072 | 0.076 | 0.9883 | 0.9601 | 0.9824 | 0.9596 |
| | C60 | 0.082 | 0.160 | 0.185 | 0.074 | 0.9789 | 0.9719 | 0.9420 | 0.9777 |
| 20% | C20 | 0.153 | 0.115 | 0.043 | 0.067 | 0.9416 | 0.9272 | 0.9823 | 0.9455 |
| | C30 | 0.099 | 0.104 | 0.101 | 0.061 | 0.9151 | 0.9820 | 0.8929 | 0.9844 |
| | C40 | 0.032 | 0.017 | 0.033 | 0.045 | 0.9988 | 0.9978 | 0.9938 | 0.9940 |
| | C60 | 0.037 | 0.056 | 0.610 | 0.021 | 0.9946 | 0.9808 | 0.9871 | 0.9932 |

Table 3. Adsorption capacity of chloride ion in lithium slag concrete with different lithium slag content (relative humidity of 40%)**表 3.** 不同锂渣掺量下锂渣混凝土对氯离子吸附能力(相对湿度 40%)

| 盐浓度 | 抗压强度 | 锂渣掺量 | | | | R^2 | | | |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0% | 10% | 20% | 30% | | | | |
| 5% | C20 | 0.080 | 0.108 | 0.032 | 0.053 | 0.9900 | 0.9785 | 0.9861 | 0.9804 |
| | C30 | 0.087 | 0.072 | 0.095 | 0.099 | 0.9826 | 0.9714 | 0.9640 | 0.9778 |
| | C40 | 0.295 | 0.228 | 0.249 | 0.147 | 0.9549 | 0.8290 | 0.9439 | 0.9693 |
| | C60 | 0.273 | 0.456 | 0.212 | 0.186 | 0.9738 | 0.9417 | 0.8727 | 0.9412 |
| 20% | C20 | 0.023 | 0.032 | 0.059 | 0.022 | 0.9992 | 0.9993 | 0.9990 | 0.9993 |
| | C30 | 0.028 | 0.033 | 0.021 | 0.255 | 0.9978 | 0.9996 | 0.9995 | 0.9984 |
| | C40 | 0.037 | 0.059 | 0.023 | 0.244 | 0.9973 | 0.9941 | 0.9988 | 0.2952 |
| | C60 | 0.114 | 0.053 | 0.032 | 0.082 | 0.6991 | 0.9942 | 0.9919 | 0.9944 |

3.2. 抗压强度对干湿循环下的混凝土氯离子吸附能力的影响

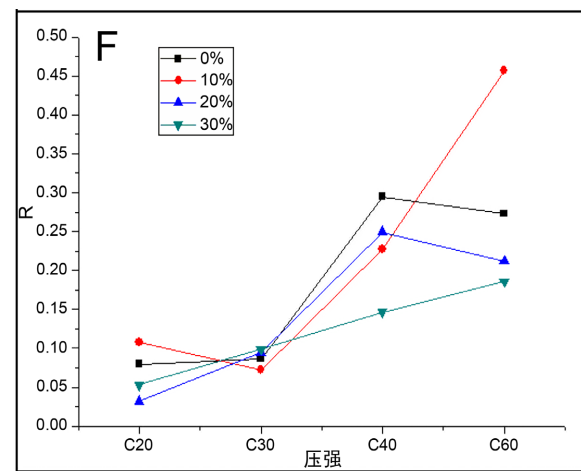
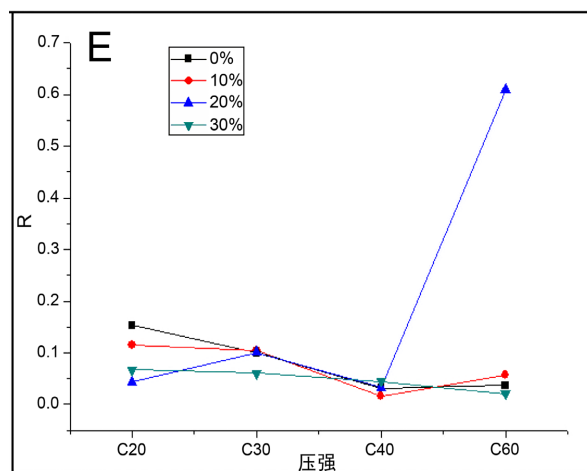
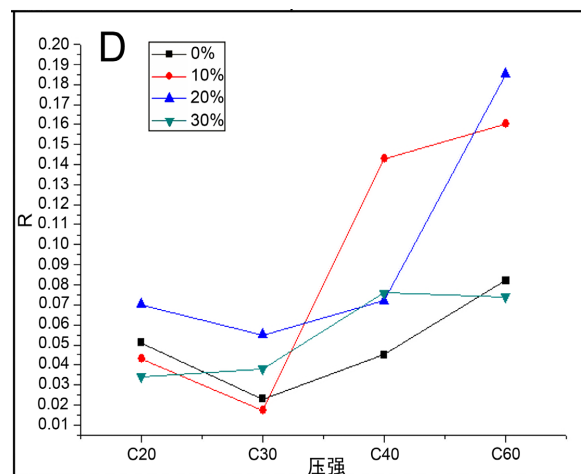
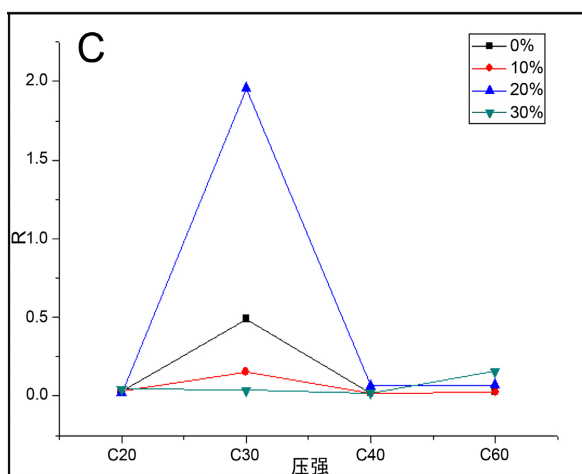
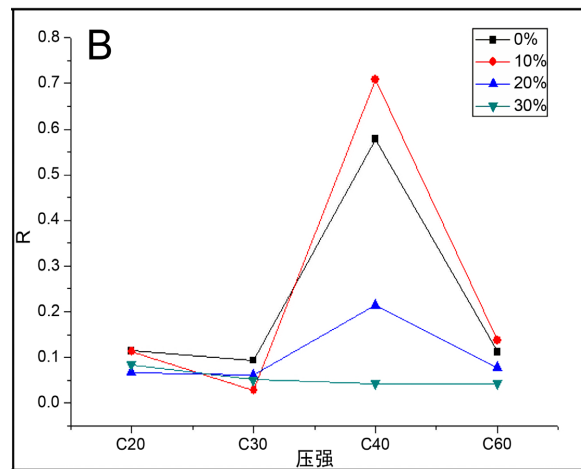
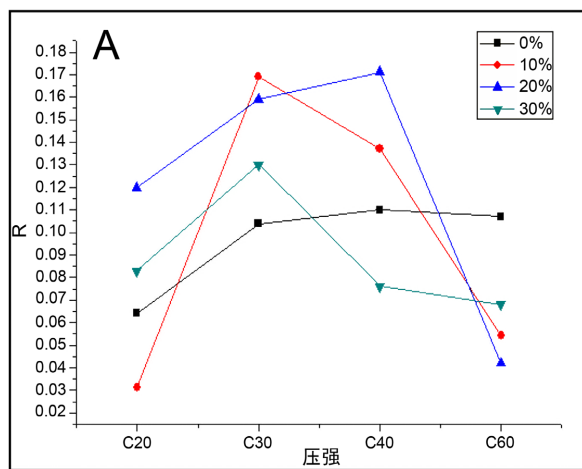
表 4 列出了不同抗压强度锂渣掺量混凝土氯离子吸附能力。由图 2(A)~(C)可以看出, 在 5% 盐浓度下, C20、C30、C40、C60 分别在锂渣掺量为 20%、10%、20%、0% 情况下, 其对氯离子的吸附达到最大值。随着盐浓度的升高, 混凝土试件的吸附能力都有升高趋势。当混凝土试件处在高盐浓度时(20%), 在不同锂渣掺量的情况下, C20 对氯离子的吸附都是 0, 而 C40 和 C60 对氯离子的吸附能力和锂渣掺量的变化没有关系。表 5 列出了在相对湿度为 60% 时, 不同抗压强度下, 锂渣掺量对混凝土试件的氯离子吸附能力的影响数据。由图 2(D)、图 2(E)可以看出, 当混凝土试件处在 10% 盐浓度时, 在同一锂渣掺量下, 随着抗压强度的增加, 混凝土试件对氯离子的吸附能力都呈上升趋势; 但是在盐浓度较高的情况下(20%), 混凝土试件的吸附能力和抗压强度并没有显著规律。在 20% 锂渣掺量情况下, 抗压强度由 C40 到 C60 时出现大幅度上升。表 6 列出了在 40% 的相对湿度下, 不同抗压强度时锂渣掺量对混凝土试件氯离子吸附能力的影响。在 5% 的盐浓度下, 随着抗压强度的升高, 混凝土试件对氯离子的吸附能力总体呈上升趋势; 而在 20% 的高盐浓度下, 30% 的锂渣掺量的 C30 和 C40 的氯离子吸附能力明显高于 C20 和 C60 (图 2(F)、图 2(G))。

Table 4. Influence of lithium slag content on the adsorption capacity under different compressive strength (relative humidity of 80%)**表 4.** 不同抗压强度下锂渣掺量对混凝土吸附能力的影响(相对湿度 80%)

| 盐浓度 | 锂渣掺量 | 抗压强度 | | | | R^2 | | | |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | C20 | C30 | C40 | C60 | | | | |
| 5% | 0% | 0.064 | 0.104 | 0.110 | 0.107 | 0.9976 | 0.9952 | 0.9670 | 0.9845 |
| | 10% | 0.031 | 0.169 | 0.137 | 0.054 | 0.9976 | 0.9930 | 0.9549 | 0.9813 |
| | 20% | 0.120 | 0.159 | 0.171 | 0.042 | 0.9654 | 0.9942 | 0.9703 | 0.9774 |
| | 30% | 0.083 | 0.130 | 0.076 | 0.068 | 0.9943 | 0.9788 | 0.9761 | 0.9959 |
| 10% | 0% | 0.114 | 0.093 | 0.578 | 0.112 | 0.9924 | 0.9895 | 0.9909 | 0.9944 |
| | 10% | 0.112 | 0.027 | 0.708 | 0.137 | 0.9977 | 0.9967 | 0.9936 | 0.9985 |
| | 20% | 0.067 | 0.061 | 0.214 | 0.077 | 0.9763 | 0.9883 | 0.9870 | 0.9867 |
| | 30% | 0.084 | 0.051 | 0.042 | 0.043 | 0.9934 | 0.9799 | 0.9849 | 0.9949 |

Continued

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 0% | 0.029 | 0.489 | 0.018 | 0.025 | 0.9992 | 0.9992 | 0.9995 | 0.9997 |
| 20% | 10% | 0.034 | 0.151 | 0.017 | 0.024 | 0.9897 | 0.9973 | 0.9789 | 0.9990 |
| | 20% | 0.020 | 1.955 | 0.067 | 0.069 | 0.9996 | 0.9995 | 0.9871 | 0.9981 |
| | 30% | 0.044 | 0.036 | 0.020 | 0.157 | 0.9996 | 0.9975 | 0.9985 | 0.9997 |



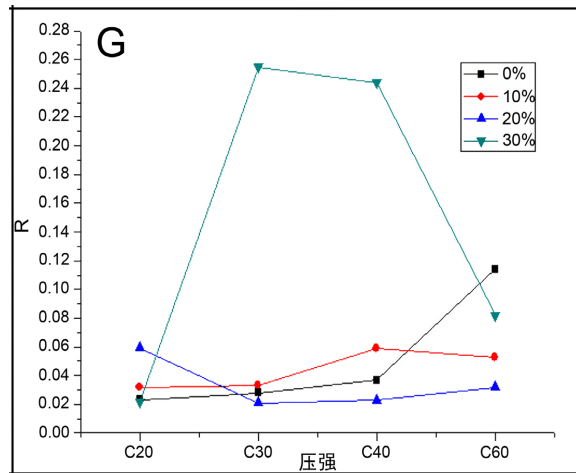


Figure 2. The adsorption capacity of chloride ions on lithium slag concrete varies with the content of lithium slag (A~C stand for the NaCl solution from 5% to 20% with the relative humidity of 80%; D and E stand for the NaCl solution of 10 and 20% with the relative humidity of 60%; E and G stand for the NaCl solution of 5% and 20% with the relative humidity of 40%)

图 2. 锂渣混凝土对氯离子吸附能力随抗压强度变化趋势(A~C 为相对湿度 80%的 5%~20% NaCl 溶液; D, E 为相对湿度 60%的 10%和 20% NaCl 溶液; F, G 为相对湿度 40%的 5%和 20%NaCl 溶液)

Table 5. Influence of lithium slag content on the adsorption capacity under different compressive strength (relative humidity of 60%)

表 5. 不同抗压强度下锂渣掺量对混凝土吸附能力的影响(相对湿度 60%)

| 盐浓度 | 锂渣掺量 | 抗压强度 | | | | R^2 | R^2 | R^2 | R^2 |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | C20 | C30 | C40 | C60 | | | | |
| 10% | 0% | 0.051 | 0.023 | 0.045 | 0.082 | 0.9978 | 0.9959 | 0.9883 | 0.9789 |
| | 10% | 0.043 | 0.017 | 0.143 | 0.160 | 0.9961 | 0.9976 | 0.9601 | 0.9719 |
| | 20% | 0.070 | 0.055 | 0.072 | 0.185 | 0.9938 | 0.9871 | 0.9824 | 0.9420 |
| | 30% | 0.034 | 0.038 | 0.076 | 0.074 | 0.9862 | 0.9886 | 0.9596 | 0.9777 |
| 20% | 0% | 0.153 | 0.099 | 0.032 | 0.037 | 0.9416 | 0.9151 | 0.9988 | 0.9946 |
| | 10% | 0.115 | 0.104 | 0.017 | 0.056 | 0.9272 | 0.9820 | 0.9978 | 0.9808 |
| | 20% | 0.043 | 0.101 | 0.033 | 0.610 | 0.9823 | 0.8929 | 0.9938 | 0.9871 |
| | 30% | 0.067 | 0.061 | 0.045 | 0.021 | 0.9455 | 0.9844 | 0.9940 | 0.9932 |

Table 6. Influence of lithium slag content on the adsorption capacity under different compressive strength (relative humidity of 40%)

表 6. 不同抗压强度下锂渣掺量对混凝土吸附能力的影响(相对湿度 40%)

| 盐浓度 | 锂渣掺量 | 抗压强度 | | | | R^2 | R^2 | R^2 | R^2 |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | C20 | C30 | C40 | C60 | | | | |
| 5% | 0% | 0.080 | 0.087 | 0.295 | 0.273 | 0.9976 | 0.9952 | 0.9670 | 0.9845 |
| | 10% | 0.108 | 0.072 | 0.228 | 0.456 | 0.9976 | 0.9930 | 0.9549 | 0.9813 |
| | 20% | 0.032 | 0.095 | 0.249 | 0.212 | 0.9654 | 0.9942 | 0.9703 | 0.9774 |
| | 30% | 0.053 | 0.099 | 0.147 | 0.186 | 0.9943 | 0.9788 | 0.9761 | 0.9959 |

Continued

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | 0% | 0.023 | 0.028 | 0.037 | 0.114 | 0.9924 | 0.9895 | 0.9909 | 0.9944 |
| 20% | 10% | 0.032 | 0.033 | 0.059 | 0.053 | 0.9977 | 0.9967 | 0.9936 | 0.9985 |
| | 20% | 0.059 | 0.021 | 0.023 | 0.032 | 0.9763 | 0.9883 | 0.9870 | 0.9867 |
| | 30% | 0.022 | 0.255 | 0.244 | 0.082 | 0.9934 | 0.9799 | 0.9849 | 0.9949 |

3.3. 氯盐浓度对干湿循环下的混凝土氯离子吸附能力的影响

表 7 列出了 80% 的相对湿度下, 不同盐浓度下锂渣混凝土的氯离子吸附能力数据。由图 3 可以看出, C20 混凝土对氯离子的吸附能力随着盐浓度的升高有着明显的降低, 而在其他抗压强度下则并无此规律。由此可以看出, 混凝土试件对氯离子的吸附能力和其所处环境中盐浓度的变化并无明显关系。

Table 7. Adsorption capacity of chloride ions on lithium slag concrete with different salt concentrations (relative humidity of 80%)

表 7. 不同盐浓度下锂渣混凝土对氯离子吸附能力(相对湿度 80%)

| 强度 | 锂渣掺量 | 盐浓度 | | | R^2 | | |
|-----|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| | | 0% | 10% | 20% | | | |
| C20 | 0% | 0.064 | 0.114 | 0.029 | 0.9976 | 0.9924 | 0.9992 |
| | 10% | 0.031 | 0.112 | 0.034 | 0.9976 | 0.9895 | 0.9992 |
| | 20% | 0.120 | 0.067 | 0.020 | 0.9654 | 0.9909 | 0.9995 |
| | 30% | 0.083 | 0.084 | 0.044 | 0.9943 | 0.9944 | 0.9997 |
| C30 | 0% | 0.104 | 0.093 | 0.489 | 0.9952 | 0.9977 | 0.9897 |
| | 10% | 0.169 | 0.027 | 0.151 | 0.9930 | 0.9967 | 0.9973 |
| | 20% | 0.159 | 0.061 | 1.955 | 0.9942 | 0.9936 | 0.9789 |
| | 30% | 0.130 | 0.051 | 0.036 | 0.9788 | 0.9985 | 0.9990 |
| C40 | 0% | 0.110 | 0.578 | 0.018 | 0.9670 | 0.9763 | 0.9996 |
| | 10% | 0.137 | 0.708 | 0.017 | 0.9549 | 0.9883 | 0.9995 |
| | 20% | 0.171 | 0.214 | 0.067 | 0.9703 | 0.9870 | 0.9871 |
| | 30% | 0.076 | 0.042 | 0.020 | 0.9761 | 0.9867 | 0.9981 |
| C60 | 0% | 0.107 | 0.112 | 0.025 | 0.9845 | 0.9934 | 0.9996 |
| | 10% | 0.054 | 0.137 | 0.024 | 0.9813 | 0.9799 | 0.9975 |
| | 20% | 0.042 | 0.077 | 0.069 | 0.9774 | 0.9849 | 0.9985 |
| | 30% | 0.068 | 0.043 | 0.157 | 0.9959 | 0.9949 | 0.9997 |

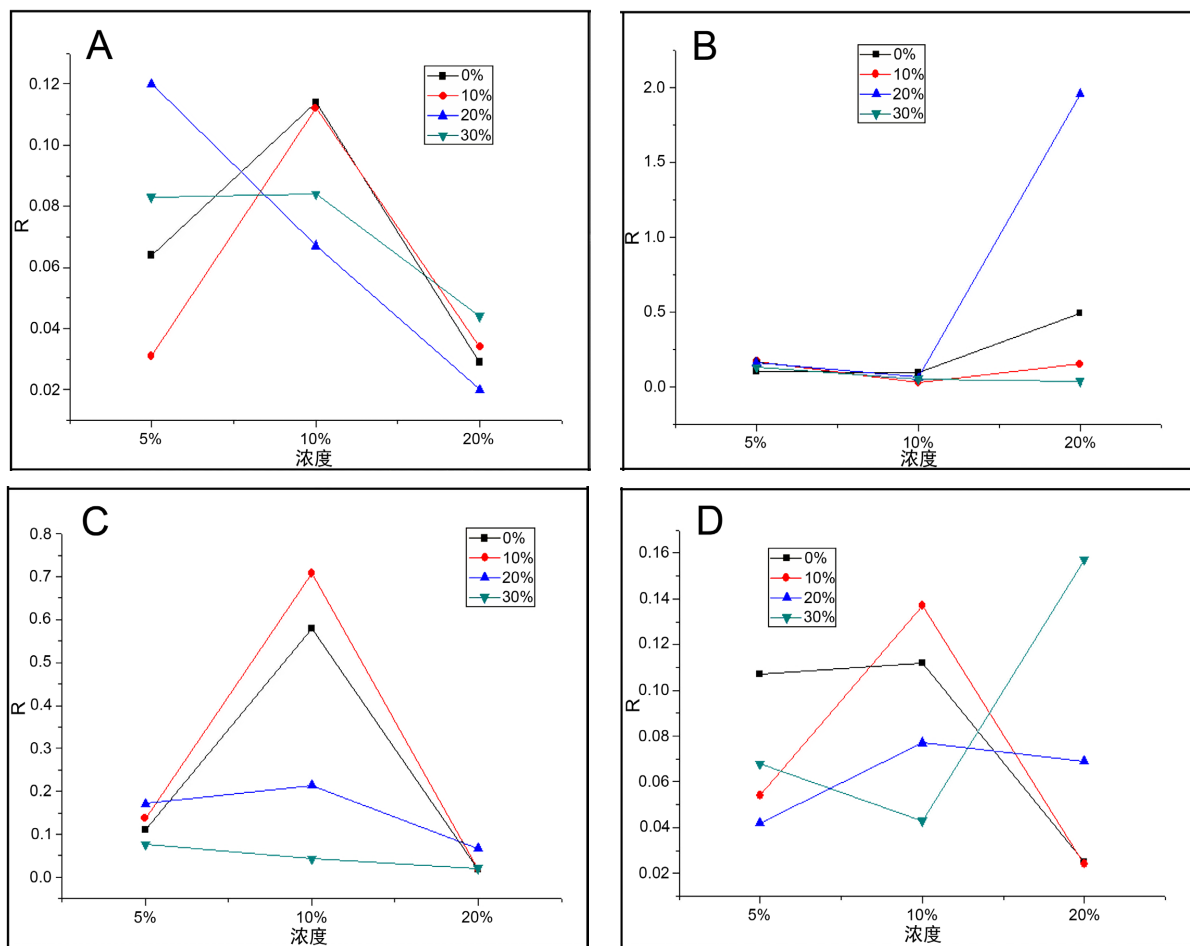


Figure 3. The change of chloride ion adsorption capacity of concrete under different NaCl concentration with the relative humidity of 80% (A: C20 concrete, B: C30 concrete, C: C40 concrete, D: C60 concrete)

图 3. 相对湿度 80% 时不同 NaCl 浓度下混凝土对氯离子吸附能力变化(A 为 C20 混凝土, B 为 C30 混凝土, C 为 C40 混凝土, D 为 C60 混凝土)

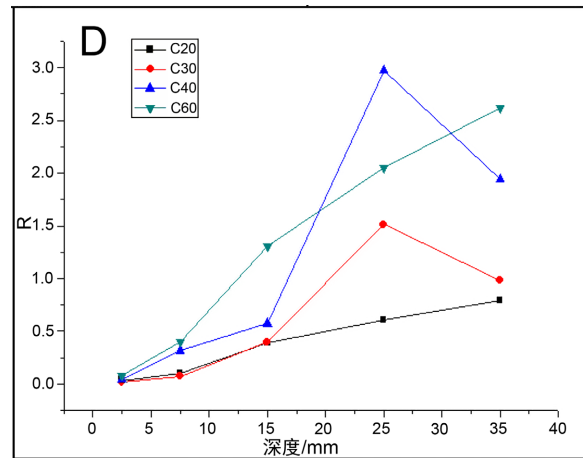
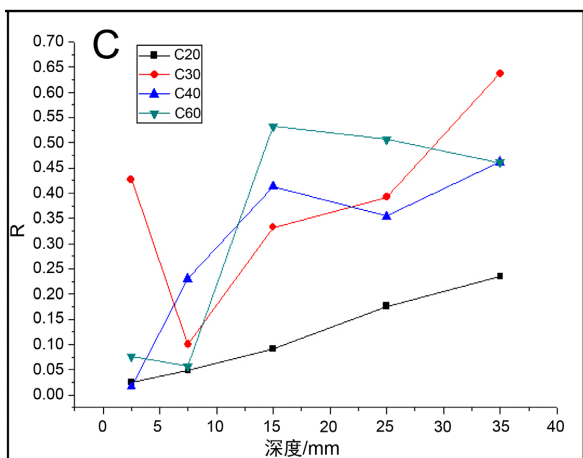
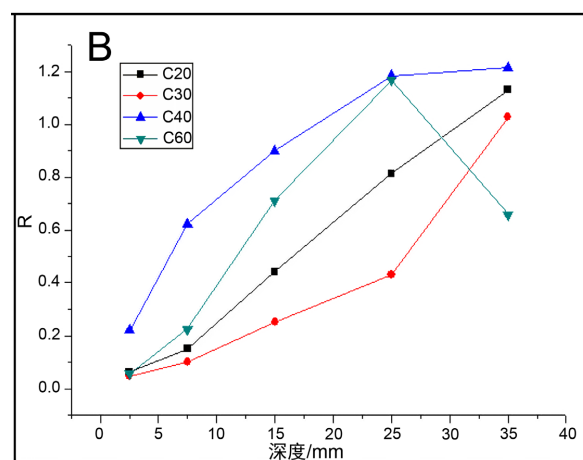
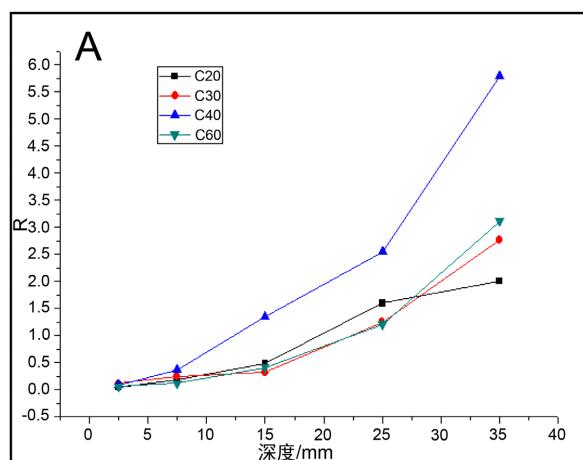
3.4. 扩散深度对干湿循环下的混凝土氯离子吸附能力的影响

表 8 列出了 80% 的相对湿度下, 不同扩散深度时锂渣掺量对混凝土试件的氯离子吸附能力影响数据。由图 4(A)~(C) 可以看出, 在混凝土试件处在 5% 和 10% 盐浓度时, 不同抗压强度下, 其对氯离子的吸附能力随着扩散深度的升高而升高。且随着盐浓度的升高, 不同抗压强度下混凝土试件的氯离子吸附能力都有明显的下降趋势。表 9 列出了 60% 相对湿度下, 不同扩散深度时锂渣掺量对混凝土试件的氯离子吸附能力影响数据。由图 4(D)、图 4(E) 可以看出, 在 10% 的盐浓度下, 随着扩散深度的升高, 不同抗压强度下混凝土试件对氯离子的吸附能力都有提升, 且随着抗压强度升高, 其对氯离子的吸附能力有明显的提高。而在较高盐浓度下, 扩散深度对混凝土试件氯离子吸附能力的影响则和抗压强度没有明显的关系。表 10 列出了 40% 相对湿度下, 不同扩散深度锂渣掺量混凝土氯离子吸附能力。由图 4(F)、图 4(G) 可以看出, 在 5% 的盐浓度下, 混凝土试件的氯离子吸附能力随着扩散深度的升高而升高, 其中, C30 混凝土试件的升高幅度最大。而当试件处在较高盐浓度的环境时, 除 C40 的氯离子吸附能力会随扩散深度变大而变大之外, 其他抗压强度下的混凝土试件并无此规律, C20 和 C30 混凝土的氯离子吸附能力随扩散深度的变化不大。

Table 8. Adsorption capacity of chloride ions in concrete mixed with lithium slag at different diffusion depths (relative humidity of 80%)

表 8. 不同扩散深度锂渣掺量混凝土氯离子吸附能力(相对湿度 80%)

| 盐浓度 | 强度 | 扩散深度 | | | | | R^2 | | | | |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 2.5 | 7.5 | 15 | 25 | 35 | | | | | |
| 5% | C20 | 0.046 | 0.190 | 0.476 | 1.594 | 2.009 | 0.9995 | 0.9837 | 0.8062 | 0.6588 | 0.8089 |
| | C30 | 0.119 | 0.242 | 0.312 | 1.240 | 2.767 | 0.9990 | 0.9846 | 0.9155 | 0.9566 | 0.9995 |
| | C40 | 0.091 | 0.364 | 1.353 | 2.550 | 5.792 | 0.9986 | 0.9895 | 0.8780 | 0.8279 | 0.9579 |
| | C60 | 0.058 | 0.112 | 0.407 | 1.208 | 3.112 | 0.9998 | 0.9950 | 0.9817 | 0.8391 | 0.9166 |
| 10% | C20 | 0.063 | 0.151 | 0.441 | 0.814 | 1.131 | 0.9996 | 0.9983 | 0.9988 | 0.9682 | 0.9933 |
| | C30 | 0.048 | 0.101 | 0.252 | 0.432 | 1.027 | 0.9992 | 0.9982 | 0.9928 | 0.9771 | 0.9879 |
| | C40 | 0.220 | 0.623 | 0.899 | 1.183 | 1.213 | 0.9658 | 0.9649 | 0.9869 | 0.9730 | 0.8697 |
| | C60 | 0.056 | 0.225 | 0.712 | 1.166 | 0.659 | 0.9994 | 0.9923 | 0.9658 | 0.9724 | 0.9462 |
| 20% | C20 | 0.025 | 0.048 | 0.092 | 0.176 | 0.235 | 0.9999 | 0.9999 | 0.9976 | 0.9959 | 0.9988 |
| | C30 | 0.427 | 0.100 | 0.332 | 0.392 | 0.637 | 0.8535 | 0.9972 | 0.9915 | 0.9550 | 0.9451 |
| | C40 | 0.017 | 0.230 | 0.414 | 0.354 | 0.462 | 1.0000 | 0.9809 | 0.9929 | 0.9523 | 0.9921 |
| | C60 | 0.076 | 0.056 | 0.533 | 0.507 | 0.461 | 0.9967 | 0.9990 | 0.9533 | 0.9812 | 0.9667 |



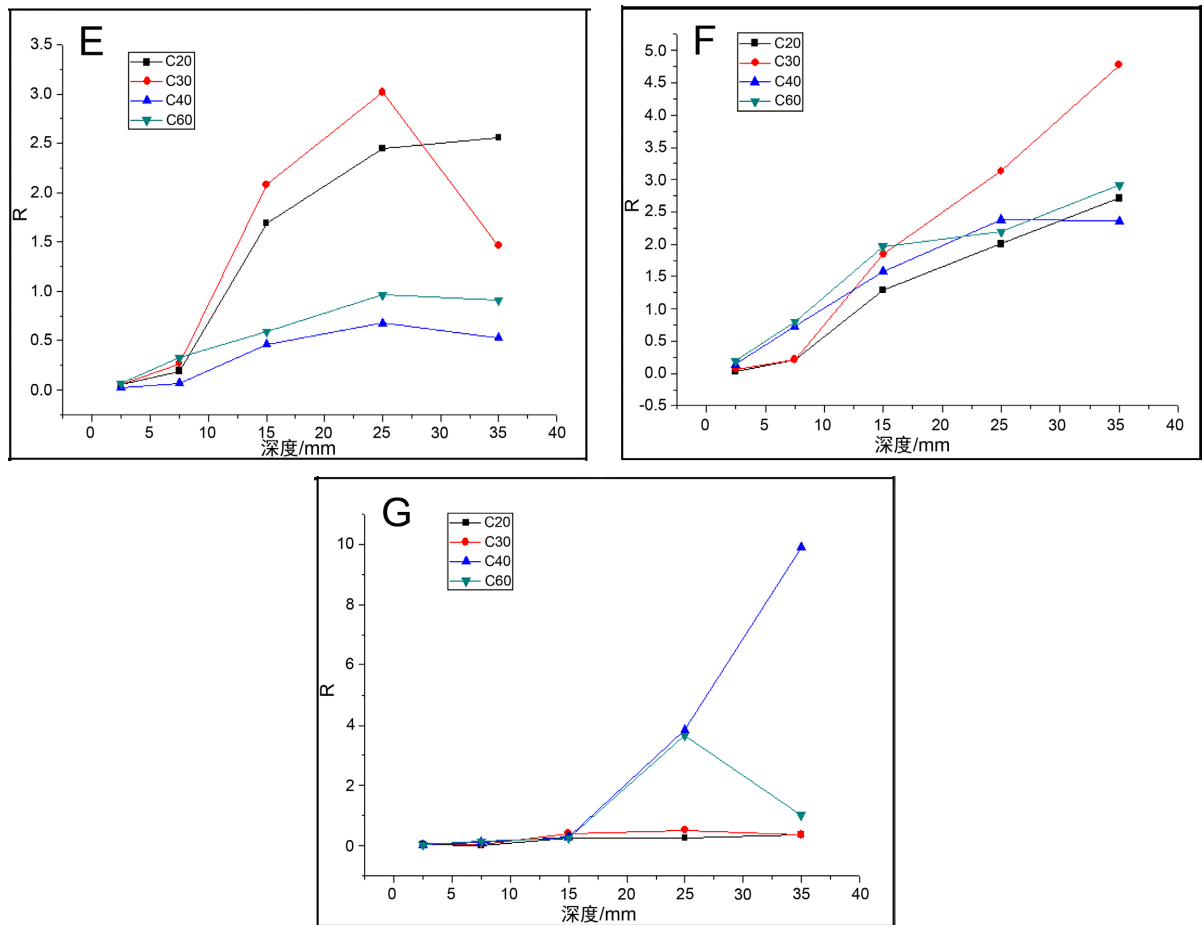


Figure 4. The adsorption capacity of chloride ions on lithium slag concrete varies at the different diffusion depths (A~C stand for the NaCl solution from 5% to 20% with the relative humidity of 80%; D and E stand for the NaCl solution of 10 and 20% with the relative humidity of 60%; E and G stand for the NaCl solution of 5% and 20% with the relative humidity of 40%)

图 4. 锂渣混凝土对氯离子吸附能力随扩散深度变化趋势(A~C 为相对湿度 80% 的 5%~20% NaCl 溶液; D, E 为相对湿度 60% 的 10% 和 20% NaCl 溶液; F, G 为相对湿度 40% 的 5% 和 20% NaCl 溶液)

Table 9. Adsorption capacity of chloride ions in concrete mixed with lithium slag at different diffusion depths (relative humidity of 60%)

表 9. 不同扩散深度锂渣掺量混凝土氯离子吸附能力(相对湿度 60%)

| 盐浓度 | 强度 | 扩散深度 | | | | | R^2 | R^2 | R^2 | R^2 | R^2 |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 2.5 | 7.5 | 15 | 25 | 35 | | | | | |
| 10% | C20 | 0.034 | 0.101 | 0.393 | 0.604 | 0.796 | 0.9998 | 0.9924 | 0.9929 | 0.9243 | 0.9924 |
| | C30 | 0.018 | 0.074 | 0.398 | 1.514 | 0.982 | 0.9999 | 0.9935 | 0.9739 | 0.9623 | 0.8336 |
| | C40 | 0.040 | 0.316 | 0.574 | 2.973 | 1.942 | 0.9995 | 0.9839 | 0.8155 | 0.9542 | 0.9650 |
| | C60 | 0.079 | 0.396 | 1.309 | 2.049 | 2.616 | 0.9986 | 0.9626 | 0.9145 | 0.9451 | 0.9562 |
| 20% | C20 | 0.057 | 0.192 | 1.688 | 2.450 | 2.555 | 0.9994 | 0.9979 | 0.9953 | 0.9750 | 0.8948 |
| | C30 | 0.053 | 0.265 | 2.080 | 3.017 | 1.462 | 0.9994 | 0.9538 | 0.9349 | 0.9849 | 0.9965 |
| | C40 | 0.022 | 0.068 | 0.463 | 0.676 | 0.528 | 0.9999 | 0.9989 | 0.9907 | 0.9579 | 0.8816 |
| | C60 | 0.064 | 0.325 | 0.591 | 0.963 | 0.907 | 0.9782 | 0.9487 | 0.9589 | 0.9847 | 0.9327 |

Table 10. Adsorption capacity of chloride ions in concrete mixed with lithium slag at different diffusion depths (relative humidity of 40%)**表 10.** 不同扩散深度锂渣掺量混凝土氯离子吸附能力(相对湿度 40%)

| 盐浓度 | 强度 | 扩散深度 | | | | | R^2 | | | | |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 2.5 | 7.5 | 15 | 25 | 35 | | | | | |
| 5% | C20 | 0.037 | 0.214 | 1.284 | 2.005 | 2.713 | 0.9996 | 0.9979 | 0.9454 | 0.8966 | 0.6984 |
| | C30 | 0.067 | 0.215 | 1.846 | 3.132 | 4.776 | 0.9999 | 0.9901 | 0.9104 | 0.9100 | 0.8204 |
| | C40 | 0.139 | 0.732 | 1.573 | 2.377 | 2.360 | 0.9990 | 0.9864 | 0.9089 | 0.7483 | 0.8875 |
| | C60 | 0.194 | 0.800 | 1.966 | 2.191 | 2.917 | 0.9941 | 0.9758 | 0.8046 | 0.7103 | 0.7809 |
| 20% | C20 | 0.032 | 0.020 | 0.250 | 0.249 | 0.360 | 0.9998 | 0.9999 | 0.9957 | 0.9883 | 0.9650 |
| | C30 | 0.068 | 0.049 | 0.417 | 0.522 | 0.371 | 0.9923 | 0.9999 | 0.9925 | 0.9950 | 0.9699 |
| | C40 | 0.029 | 0.112 | 0.288 | 3.838 | 9.903 | 0.9999 | 0.9900 | 0.9886 | 0.4228 | 0.5500 |
| | C60 | 0.039 | 0.141 | 0.255 | 3.649 | 1.017 | 0.9995 | 0.9994 | 0.9909 | 0.6172 | 0.9380 |

3.5. 侵蚀时间对干湿循环下的混凝土氯离子吸附能力的影响

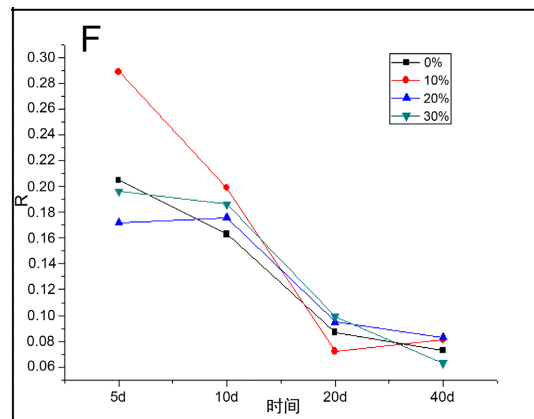
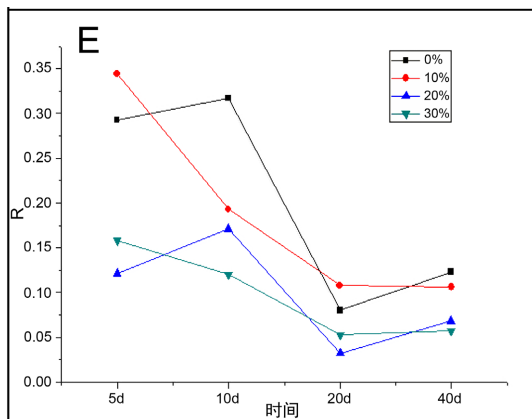
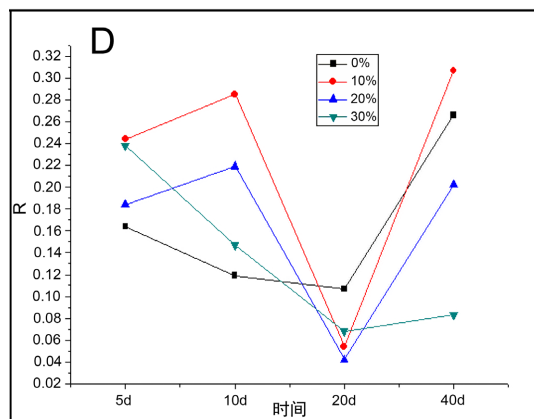
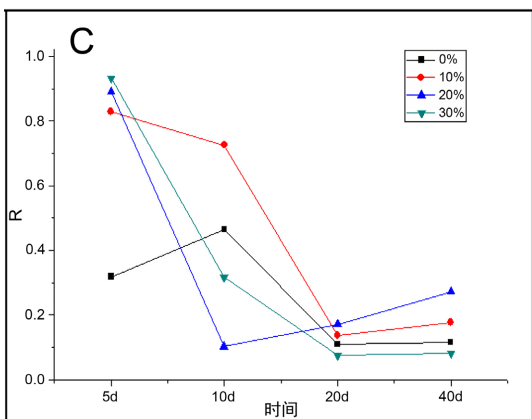
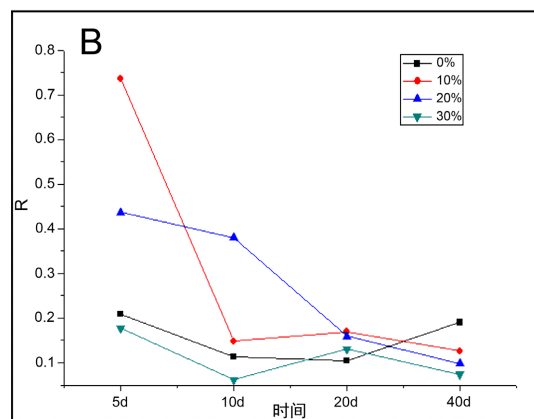
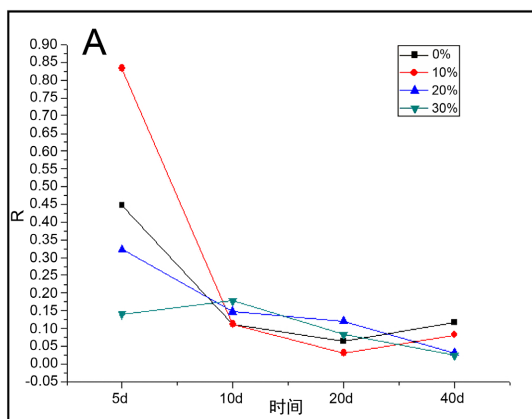
表 11 列出了 80% 的相对湿度下, 处在不同盐浓度下的锂渣混凝土试件对氯离子吸附随时间变化的数据。由图 5(A)~(D) 可以看出不同强度和锂渣掺量下的混凝土试件随着时间的增长, 其对氯离子的吸附能力呈现下降趋势。且早期对氯离子的吸附能力较强, 随后快速下降, 最后趋于平缓。但是在相同实验条件下, C60 混凝土试件对氯离子的吸附能力呈现先减小后增大的趋势, 并且在 20 天时达到最小值。表 12 列出了 40% 相对湿度下, 不同盐浓度下锂渣混凝土试件对氯离子吸附能力随时间变化的数据。由图 5(E)~(H) 可以看出不同强度和锂渣掺量下的混凝土试件随着时间的增长, 其氯离子吸附能力呈现下降趋势。当环境的相对湿度为 40% 时, 各混凝土试件对氯离子吸附能力下降得较为均匀, 其中 C30 混凝土基本呈线性下降。但是处于较高强度时, C60 混凝土试件的氯离子的吸附能力与其所含锂渣掺量相关性较大, 较低锂渣掺量的 C60 混凝土试件对氯离子吸附能力随着时间的增长呈现下降趋势, 而较高锂渣掺量的 C60 混凝土试件对氯离子吸附能力呈现先上升再下降的趋势, 峰值为浸泡时间为 10 天左右。

Table 11. Regularity of chloride ion adsorption capacity of concrete mixed with lithium slag with time (relative humidity of 80%)**表 11.** 锂渣掺量混凝土氯离子吸附能力随时间变化规律(相对湿度 80%)

| 强度 | 锂渣掺量 | 浸泡时间 | | | | R^2 | | | | |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | | 5 d | 10 d | 20 d | 40 d | | | | | |
| C20 | 0% | 0.447 | 0.112 | 0.064 | 0.118 | 0.965 | 0.990 | 0.998 | 0.990 | |
| | 10% | 0.833 | 0.112 | 0.031 | 0.082 | 0.847 | 0.985 | 0.998 | 0.993 | |
| | 20% | 0.323 | 0.148 | 0.120 | 0.032 | 0.926 | 0.976 | 0.965 | 0.991 | |
| | 30% | 0.140 | 0.178 | 0.083 | 0.025 | 0.963 | 0.968 | 0.994 | 0.994 | |
| C30 | 0% | 0.209 | 0.114 | 0.104 | 0.190 | 0.935 | 0.995 | 0.995 | 0.989 | |
| | 10% | 0.736 | 0.148 | 0.169 | 0.126 | 0.966 | 0.977 | 0.993 | 0.991 | |
| | 20% | 0.436 | 0.380 | 0.159 | 0.098 | 0.930 | 0.949 | 0.994 | 0.974 | |
| | 30% | 0.178 | 0.062 | 0.130 | 0.074 | 0.982 | 0.990 | 0.979 | 0.983 | |

Continued

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C40 | 0% | 0.319 | 0.465 | 0.110 | 0.115 | 0.881 | 0.903 | 0.967 | 0.983 |
| | 10% | 0.828 | 0.726 | 0.137 | 0.177 | 0.937 | 0.219 | 0.955 | 0.954 |
| | 20% | 0.889 | 0.103 | 0.171 | 0.273 | 0.913 | 0.933 | 0.970 | 0.939 |
| | 30% | 0.932 | 0.318 | 0.076 | 0.081 | 0.850 | 0.959 | 0.976 | 0.968 |
| C60 | 0% | 0.164 | 0.119 | 0.107 | 0.266 | 0.985 | 0.990 | 0.985 | 0.989 |
| | 10% | 0.244 | 0.285 | 0.054 | 0.307 | 0.956 | 0.927 | 0.981 | 0.956 |
| | 20% | 0.184 | 0.219 | 0.042 | 0.202 | 0.983 | 0.968 | 0.977 | 0.938 |
| | 30% | 0.238 | 0.147 | 0.068 | 0.083 | 0.994 | 0.994 | 0.996 | 0.990 |



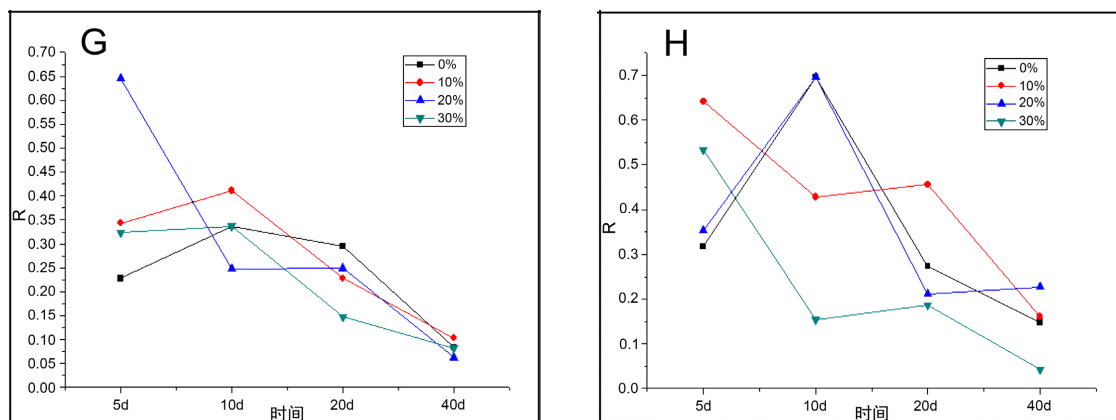


Figure 5. Changes of chloride ion adsorption capacity of concrete with different NaCl concentrations (A: C20 concrete with the relative humidity of 80%, B: C30 concrete with the relative humidity of 80%, C: C40 concrete with the relative humidity of 80%, D: C60 concrete with the relative humidity of 80%, E: C20 concrete with the relative humidity of 40%, F: C30 concrete with the relative humidity of 40%, G: C40 concrete with the relative humidity of 40%, H: C60 concrete with the relative humidity of 40%)

图 5. 不同 NaCl 浓度下混凝土对氯离子吸附能力变化图(A 为相对湿度 80% 下 C20 混凝土, B 为相对湿度 80% 下 C30 混凝土, C 相对湿度 80% 下为 C40 混凝土, D 相对湿度 80% 下为 C60 混凝土, E 为相对湿度 40% 下 C20 混凝土, F 为相对湿度 40% 下 C30 混凝土, G 相对湿度 40% 下为 C40 混凝土, H 相对湿度 40% 下为 C60 混凝土)

Table 12. Regularity of chloride ion adsorption capacity of concrete mixed with lithium slag with time (relative humidity of 40%)

表 12. 锂渣掺量混凝土氯离子吸附能力随时间变化规律(相对湿度 40%)

| 强度 | 锂渣掺量 | 浸泡时间 | | | | R^2 | | | | |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | | 5 d | 10 d | 20 d | 40 d | | | | | |
| C20 | 0% | 0.293 | 0.317 | 0.080 | 0.123 | 0.979 | 0.950 | 0.990 | 0.997 | |
| | 10% | 0.344 | 0.193 | 0.108 | 0.106 | 0.919 | 0.970 | 0.978 | 0.991 | |
| | 20% | 0.121 | 0.171 | 0.032 | 0.068 | 0.974 | 0.987 | 0.986 | 0.995 | |
| | 30% | 0.158 | 0.120 | 0.053 | 0.057 | 0.989 | 0.992 | 0.980 | 0.989 | |
| C30 | 0% | 0.205 | 0.163 | 0.087 | 0.073 | 0.989 | 0.977 | 0.983 | 0.993 | |
| | 10% | 0.289 | 0.199 | 0.072 | 0.081 | 0.975 | 0.974 | 0.971 | 0.994 | |
| | 20% | 0.172 | 0.176 | 0.095 | 0.083 | 0.959 | 0.948 | 0.964 | 0.984 | |
| | 30% | 0.196 | 0.186 | 0.099 | 0.063 | 0.967 | 0.982 | 0.978 | 0.994 | |
| C40 | 0% | 0.228 | 0.336 | 0.295 | 0.083 | 0.988 | 0.963 | 0.955 | 0.987 | |
| | 10% | 0.343 | 0.411 | 0.228 | 0.103 | 0.920 | 0.929 | 0.829 | 0.973 | |
| | 20% | 0.645 | 0.248 | 0.249 | 0.063 | 0.873 | 0.896 | 0.944 | 0.993 | |
| | 30% | 0.324 | 0.337 | 0.147 | 0.082 | 0.899 | 0.923 | 0.969 | 0.982 | |
| C60 | 0% | 0.317 | 0.696 | 0.273 | 0.148 | 0.939 | 0.882 | 0.974 | 0.962 | |
| | 10% | 0.642 | 0.428 | 0.456 | 0.160 | 0.892 | 0.941 | 0.942 | 0.975 | |
| | 20% | 0.354 | 0.696 | 0.212 | 0.227 | 0.892 | 0.936 | 0.873 | 0.956 | |
| | 30% | 0.534 | 0.154 | 0.186 | 0.043 | 0.917 | 0.939 | 0.941 | 0.995 | |

4. 结论

本文以锂渣作为矿物掺合料,研究了在干湿循环作用下掺入锂渣的混凝土试件对氯离子的吸附性能。当混凝土试件处在相对湿度 80%的环境时,其对氯离子的吸附能力随锂渣掺量的增加呈减小趋势,随抗压强度的增强呈现先增加后减小趋势,随渗透深度的增加呈逐渐增长趋势,随氯盐浓度的增加呈先增加后减少的趋势;当相对湿度 60%时,其对氯离子的吸附能力随锂渣掺量的增加呈现先增加后减小的趋势,随抗压强度的增强逐渐增加的趋势,随侵蚀龄期的延长呈逐渐降低的趋势,随渗透深度的增加呈逐渐增长趋势,随氯盐浓度的增加呈先增加后减少的趋势;当相对湿度 40%时,其对氯离子的吸附能力随锂渣掺量的增加呈逐渐减小趋势,随抗压强度的增强呈逐渐增加的趋势,随侵蚀龄期的延长呈逐渐降低的趋势,随渗透深度的增加整体呈逐渐增强的趋势,随氯盐浓度的增加呈先增加后减少的趋势。

参考文献

- [1] 莫利伟, 耿健, 柳俊哲, 等. 粉煤灰和矿粉双掺对水泥基材料固化氯离子能力的研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(12): 2443-2448.
- [2] 匡琪, 余红发, 张小平, 等. 矿渣混凝土的氯离子结合能力研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(12): 3085-3089, 3096.
- [3] 温勇, 宋亚峰, 阿不拉·坎杰, 等. 磨细锂渣粉对新拌混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2011(10): 58-60.
- [4] 邓雷. 多因素作用下锂渣混凝土渗透性系数的定量分析[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [5] 韩国旗. 干湿循环作用下锂渣混凝土抗氯离子侵蚀性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [6] Nilsson, L.O., Massat, M. and Tang, L. (1994) The Effect of Non-Linear Chloride Binding on the Prediction of Chloride Penetration into Concrete Structures. In: Malhotra, V.M., Ed., *Durability of Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, ACI SP-145, 469-486.
- [7] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002.