文章编号:1674-2869(2025)03-0310-05

紫外线辐射对水泥砂浆氯离子扩散性能的影响研究

叶子芊[1],程书凯[*1,2],谯理格[3]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074;
2. 绿色土木工程材料与结构湖北省工程研究中心,湖北 武汉 430074;
3. 中建商品混凝土有限公司,湖北 武汉 430074

摘 要:研究紫外线辐射时间(500、1 000、1 500和2 000 h)对模拟海水侵蚀下水泥砂浆中自由氯离子浓度分布、总氯离子浓度分布、结合氯离子能力及表观氯离子扩散系数影响规律。结果表明:与未受紫外线辐射砂浆相比较,紫外线辐射500、1 000、1 500 h后水泥砂浆表层0~5 mm深度下氯离子含量减少,10~20 mm深度下氯离子含量增大;海水作用下紫外线辐射增大水泥砂浆早期氯离子扩散系数,而在紫外线辐射2 000 h后对砂浆氯离子扩散系数影响有限,且随着辐射时间增加,氯离子扩散系数呈减小趋势,紫外线辐射500、1 000、1 500 h后砂浆氯离子结合能力增强,而在紫外线辐射2 000 h后砂浆氯离子结合能力减弱;水泥砂浆中自由氯离子含量和总氯离子含量存在线性关系,且相关系数均在0.96以上。

关键词:紫外线辐射;氯离子扩散性能;结合能力;自由氯离子;总氯离子
中图分类号:TU528 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202307015

Effects of ultraviolet irradiation on chloride diffusion in cement mortar

***YE Ziqian*[1], *CHENG Shukai*[*1,2], *QIAO Lige*[3]**
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Engineering Research Center for Green Civil Engineering Materials and Structure, Wuhan 430074, China;
3. China Construction Commodity Concrete Co., Ltd, Wuhan 430074, China

Abstract: The effects of ultraviolet radiation duration (500, 1 000, 1 500, 2 000 h) on distribution of free chloride ion concentration, total chloride ion concentration, chloride-binding capacity and apparent chloride ion diffusion coefficient in cement mortar were investigated under simulated seawater erosion. The results indicated that after 500, 1 000 and 1 500 h of ultraviolet (UV) radiation, the content of chloride ions in cement mortar at a depth of 0−5 mm decreases, while the same content at a depth of 10−20 mm is strengthened compared with that without UV radiation. The chloride diffusion coefficients in cement mortar increased at the early stage of UV radiation under the action of drying-wetting cycle coupled with seawater, while the impacts of UV radiation on chloride diffusion in mortar specimens after 2 000 h of UV radiation were negligible. With the increase of radiation duration, the chloride diffusion coefficients showed a downward trend. The chloride-binding ability of the mortar increased after 500, 1 000 and 1 500 h of UV radiation, while the chloride-binding ability of the mortar decreased after 2 000 h of UV radiation. There is a linear relationship between the amounts of free chloride ions and total chloride ions in cement mortar and the correlation coefficients exceed 0.96.

Keywords: ultraviolet radiation; chloride diffusion; binding capacity; free chloride ions; total chloride ions

收稿日期:2023-07-20
基金项目:国家自然科学基金(52208286);湖北省自然科学基金(2022CFB672);武汉市知识创新专项-曙光计划项目(2022020801020362);武汉工程大学第十四届研究生教育创新基金(CX2022177);中建股份科技研发计划项目(CSCEC-2021-Z-5);中建股份科技研发计划青年项目(CSCEC-2022-Z-52)
作者简介:叶子芊,硕士研究生。Email:xytyzq99@163.com
***通信作者**:程书凯,博士,讲师。Email:chengsk@wit.edu.cn
引文格式:叶子芊,程书凯,谯理格. 紫外线辐射对水泥砂浆氯离子扩散性能的影响研究[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(3):310-314.

党的二十大报告强调，要发展海洋经济，加快发展海域周围经济。在众多材料中，水泥基材料是最合适的抵抗紫外线辐射和氯离子侵蚀的材料。然而我国海洋地区建筑物长时间受海水侵蚀，海拔高，日照时间长，紫外线辐射随海拔的升高而增加[1-3]。热带季风气候环境具有的强紫外线辐射、高温、高湿、高盐的自然气候条件，将对海工混凝土的耐久性产生显著影响[4]。

紫外线辐射作用下的有机材料会发生显著的老化行为，对其耐久性产生负面作用。随着我国远海环境与高原高海拔地区的工程建设逐渐发展，紫外线辐射对混凝土性能的影响已成为研究人员关注的问题。贾飞等[5]和徐帆等[6]研究认为紫外线辐射导致在冻融循环作用下混凝土表面早期损伤。紫外线对于水泥基材料表面结构和性质的影响比较显著。水中和等[7]研究表明，紫外线会加速水泥浆体表层水化产物脱水，形成更多的无水晶结构，并且加大了表层水化产物的碳化程度。兰聪等[8]发现，紫外线辐射促进混凝土碳化进程，减弱了混凝土抗碳化能力。刘名君等[9]研究表明，紫外线辐射会影响水泥水化程度，降低水泥砂浆抗压抗折强度，并增大干燥变形。目前，紫外线辐射被认为是影响水泥基材料性能的不可忽视的因素[10-14]。已有研究发现紫外线可能影响硬化水泥浆体的结构与特征，激发浆体中水或羟基的“活性”从而加速碳化反应。在其他条件相同的情况下，紫外线辐射只能对混凝土试件表层浅层砂浆造成不利作用，削弱混凝土抗碳化能力，这些将对浆体表面的物理以及化学本质造成影响，并对其混凝土耐久性造成显著影响[15-16]。

本文研究模拟海水腐蚀和紫外辐射耦合作用对水泥砂浆氯离子扩散性能的影响，分析紫外辐射对水泥基材料氯离子扩散行为的影响规律，探索紫外线辐射对砂浆中自由氯离子、结合氯离子、氯离子结合能力及表观氯离子扩散系数的影响，为热带海洋环境强紫外线辐射地区混凝土设计提供一定的指导。

1　试验部分

1.1　原　料

普通硅酸盐水泥（P·O 42.5，湖北黄石华新水泥股份有限公司），表观密度为3 150 kg/m^3，比表面积为356 m^2/kg，主要化学成分和物理力学性能分别见表1和表2。细集料选用ISO标准砂。模拟海水选用工业级氯化钠、氯化镁和硫酸钠，水为武汉市自来水。

表1　P·O 42.5普通硅酸盐水泥的主要化学成分

Tab. 1　Main chemical components of P·O 42.5 ordinary Portland cement　　%

$\omega(SiO_2)$	$\omega(Al_2O_3)$	$\omega(CaO)$	$\omega(MgO)$	$\omega(Fe_2O_3)$	$\omega(Na_2O)$	$\omega(K_2O)$	$\omega(SO_3)$	烧失量
31.28	70.14	4.17	1.68	4.67	4.96	31.28	6.68	70.16

表2　P·O42.5普通硅酸盐水泥的物理力学性能

Tab. 2　Physical and mechanical properties of P·O 42.5 ordinary Portland cement

凝结时间 / min		抗折强度 / Pa		抗压强度 / MPa	
初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
286	356	7.5	21.8	34.7	59.5

1.2　试件制备

依据《水泥胶砂强度检验方法》的检验标准，水泥砂浆试件的体积选用40 mm×40 mm×160 mm。水胶比为0.5，胶砂比1∶3，试件成型放入标准养护室养护至26 d后取出，用环氧树脂密封砂浆试块的4个40 mm×160 mm长方形面及1个40 mm×40 mm正方形面。

1.3　试验方法

使用高强度的紫外线对试块进行辐射，才能在短时间内探究紫外线损伤规律，选用短波长的飞利浦紫外线消毒灯杀菌原装进口波兰灯管型灯管，其具有的辐射能量较高。灯管功率为40 W，灯管长度为1 200 mm，平均辐射强度为1.35 W/m^2。使用6根高效紫外线灯管进行试验，紫外线辐照的强度总计为240 W/m^2。

根据式（1）求出在紫外线辐射t时间后，材料表面紫外线光的辐射量M。

$$M = T \cdot t \tag{1}$$

式（1）中：T为紫外线辐照强度（μW/cm^2）；t为紫外线辐射时间（h）；M为试件表面的紫外线辐射量（MJ/m^2）。

本实验选择的辐射时间分别是500、1 000、1 500、2 000 h。

采用干湿循环箱模拟海洋侵蚀环境下水泥砂浆氯离子扩散，后将水泥砂浆置入紫外线辐射箱中进行紫外辐射。具体操作步骤如下：首先，选取上述两组砂浆试件，将它们同时放入模拟海水溶液中浸泡12 h后取出，在室温下晾干3 h后移入紫外箱进行辐射试验。对照组用遮光板覆盖住，记为M100，辐射组试件记为U-M100，辐射54 h后将

两组试件同时取出，分别在室温下静置3 h，最后将试件再次浸泡在模拟海水溶液中，以3 d为基准，表示一个循环周期。

1.4 测试方法

参考《混凝土中氯离子含量检测技术规范》(JGJ/T 322—2013)规定，将不同侵蚀深度下砂浆试样研磨至全部通过0.15 mm方孔筛，将收集的砂浆粉末放置于(105 ±5) ℃的干燥箱中干燥2 h后取出，并置于干燥器中冷却到室温备用。用天平称取砂浆粉末5 g，置于干燥的锥形瓶容器中，分别加入50 mL去离子水和50 mL稀硝酸溶液，盖上瓶塞并剧烈摇晃锥形瓶1~2 min，将溶液静置1 d。

砂浆中的游离氯化物含量(free chloride，ω_{Cf})通过硝酸银($AgNO_3$)滴定法测定，总氯化物含量(total chloride，ω_{Ct})通过硫氰化钾(KSCN)滴定法测定。ω_{Cf}和ω_{Ct}分别由式(2)和式(3)计算。

$$\omega_{Cf}=\frac{c\times V\times M_{Cl^-}}{m\times\dfrac{V_2}{V_1}}\times 100 \tag{2}$$

式(2)中：ω_{Cf}为试样自由氯离子占砂浆质量的百分比(%)；c为硝酸银标准溶液的浓度(mol/L)；m为砂浆样品质量(g)；V为滴定时硝酸银标准溶液的用量(mL)；V_1为浸泡样品的去离子水用量(mL)；V_2为滴定时提取的滤液量(mL)；M_{Cl^-}为Cl^-的摩尔质量(35.45 g/mol)。

$$\omega_{Ct}=\frac{M_{Cl^-}(c\times V-c'\times V_3)}{m\times\dfrac{V_2}{V_4}}\times 100 \tag{3}$$

式(3)中：ω_{Ct}为试样总氯离子占砂浆质量的百分比(%)；c为硝酸银标准溶液的浓度(mol/L)；c'为硫氰化钾标准溶液的浓度(mol/L)；m为砂浆样品质量(g)；V为滴定时硝酸银标准溶液的用量(mL)；V_2为滴定提取的滤液量(mL)；V_3为滴定时硫氰化钾标准溶液的用量(mL)；V_4为溶解样品时稀硝酸用量(mL)；M_{Cl^-}为Cl^-的摩尔质量(35.45 g/mol)。

表观氯离子扩散系数是一个重要的指标，用来描述混凝土中氯离子的侵入速率。在氯盐环境下，水泥基材料抗氯离子侵蚀性能用氯离子扩散系数描述，氯离子侵入水泥基材料内部的难易程度与表观氯离子扩散系数成反比。不同侵蚀时间下水泥基材料氯离子扩散系数可用Fick第二定律进行计算。

$$c_{x,t}=c_0+(c_s-c_0)\left[1-\mathrm{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}}\right)\right] \tag{4}$$

式(4)中：$c_{x,t}$为砂浆试件在x深度t时刻的自由氯离子浓度(mol/L)；c_0为砂浆试件内部初始氯离子浓度(mol/L)，计算时取0；c_s为砂浆表层氯离子浓度(mol/L)；D_a为砂浆在t时刻表观氯离子扩散系数；t为氯离子扩散龄期(s)；x为砂浆试件侵蚀深度(mm)。

2 结果与讨论

2.1 紫外线辐射对自由氯离子和总氯离子浓度影响

图1和图2分别为在紫外辐射-海水侵蚀作用下M100和U-M100砂浆深度分别为2、5、7、10、15、20 mm的总氯离子和自由氯离子的含量分布。由图1可知，相较于M100试件，经过紫外线辐射500 h后U-M100砂浆0~5 mm表层的总氯离子含量增大，随着辐射时间延长，U-M100砂浆的0~5 mm表层总氯离子含量呈现降低的趋势，且在辐射1 500和2 000 h后，U-M100砂浆0~5 mm表层自由氯离子含量变化相差不大。而紫外辐射时间对砂浆10~20 mm深度的总氯离子含量影响不大。受紫外线辐射砂浆中自由氯离子表现出类似规律(图2)。这可能是紫外线辐射促进砂浆表层碳化，密实砂浆表层结构，降低砂浆表层的总氯离子和自由氯离子含量，但对砂浆内部氯离子含量影响不大。

2.2 紫外线辐射对氯离子结合性能影响

经海水侵蚀和紫外线辐射500、1 000、1 500、2 000 h的砂浆自由氯离子和总氯离子相关性及氯离子结合能力如表3所示。由表3可知，经紫外线辐射后砂浆试件的自由氯离子和总氯离子呈线性关系，其相关系数均高于0.96，说明其具有良好的相关性。与对照组相比，500、1 000、1 500 h紫外辐射时间增大砂浆氯离子结合能力，随着辐射时间从500 h延长至1 500 h，U-M100砂浆试件的氯离子结合能力先表现出增大趋势，而在辐射2 000 h后，U-M100砂浆氯离子结合能力表现出降低趋势，甚至低于M-100砂浆。其原因可能是在紫外线辐射下水泥浆体表面碳化速率降低，使砂浆表面生成碳酸钙等碳化物质，暴露出的砂浆的碳化率将在紫外线辐射下增大。体系中部分游离氧化钙在碳化，降低砂浆溶液的pH值，进而降低氯离子的吸附程度，导致砂浆体系中氢氧化钙和弗里德尔盐的含量降低，从而降低砂浆中氯离子结合能力。

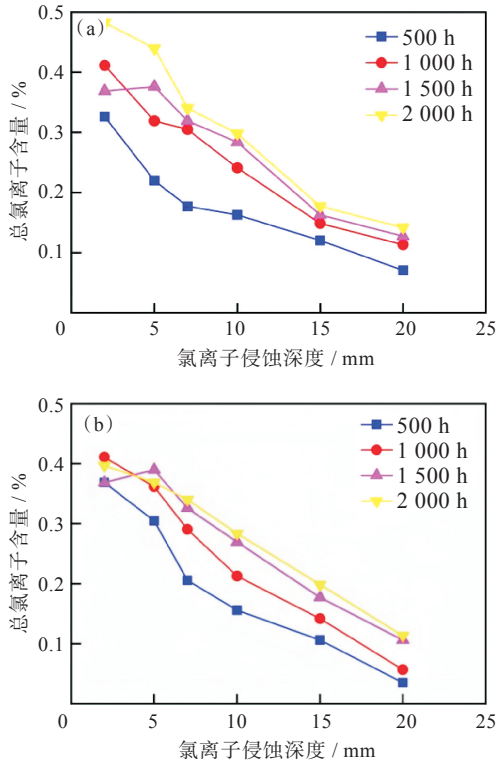


图1　砂浆试件总氯离子含量分布：
(a) M100，(b) U-M100

Fig. 1　Distribution of total chloride ions content in mortar specimens：(a) M100，(b) U-M100

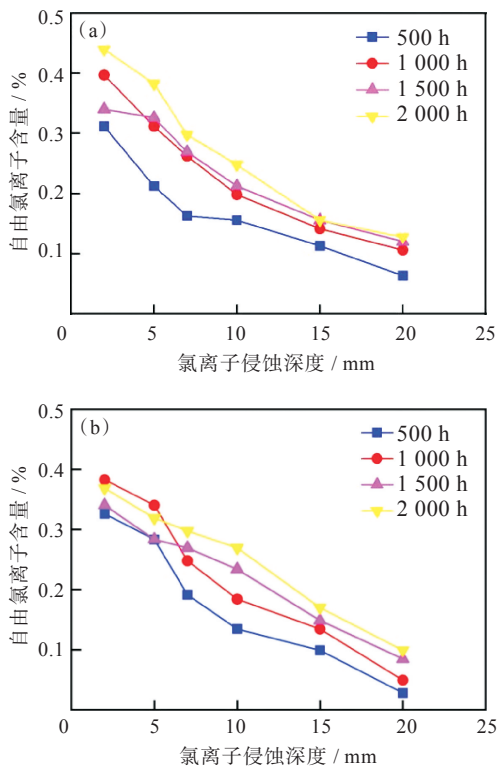


图2　砂浆自由氯离子含量分布：
(a) M100，(b) U-M100

Fig. 2　Distribution of free chloride ions content in mortar：(a) M100，(b) U-M100

表3　砂浆试件自由氯离子和总氯离子相关性及氯离子结合能力

Tab. 3　Correlation between free chloride ions and total chloride ions in mortar and binding ability

砂浆	辐射时间 / h	拟合函数	结合能力	相关系数
M100	500	y=1.037 9x	0.037 9	0.999 0
	1 000	y=1.044 6x	0.044 6	0.983 0
	1 500	y=1.145 9x	0.145 9	0.974 7
	2 000	y=1.120 6x	0.120 6	0.996 3
U-M100	500	y=1.101 0x	0.101 0	0.997 2
	1 000	y=1.077 0x	0.145 2	0.994 5
	1 500	y=1.177 3x	0.177 3	0.960 6
	2 000	y=1.098 4x	0.098 4	0.992 8

2.3　紫外线辐射对氯离子扩散系数的影响

图3为不同辐射时间下砂浆表观氯离子扩散系数。由图3可知，两组试件的氯离子扩散系数均随着辐射时间增大而降低，其中，与M100相比，紫外线辐射500 h的砂浆试件表观氯离子扩散系数略有增大，但随着辐射时间延长，砂浆氯离子扩散系数没有明显的差异。这可能是由于在侵蚀早期，紫外线辐射增大早期砂浆表层的碳化速率，影响水泥水化程度，使得砂浆表面层出现微裂缝和孔隙结构增大，造成其氯离子扩散系数增大。而在侵蚀后期，砂浆中氯离子扩散系数主要受海水离子侵蚀影响，此时，紫外线对砂浆氯离子扩散系数影响较小。

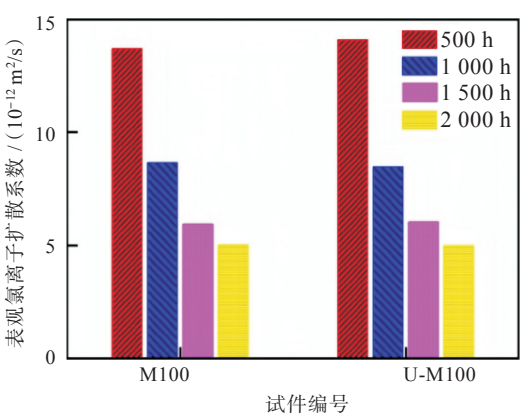


图3　砂浆的表观氯离子扩散系数

Fig. 3　Apparent chloride ions diffusion coefficients of mortar

3　结　论

(1)相比于未受辐射砂浆，早期受紫外线辐射500 h的砂浆，表层0~5 mm深度下的总氯离子和

自由氯离子含量偏高。随着辐射时间的增加，砂浆在0~5 mm下氯离子含量呈现降低趋势，在10~20 mm下氯离子含量逐渐增加，且增大的趋势显著。

(2)砂浆在紫外线辐射下的结合性能呈先增大后降低的趋势。与对照组相比，500、1 000、1 500 h紫外辐射时间增大砂浆氯离子结合能力，但是在紫外辐射2 000 h后砂浆的氯离子结合能力降低。

(3)砂浆早期氯离子扩散系数在紫外线辐射下变化较大，这可能是由于紫外线辐射损伤了早期的水泥基材料表面，氯离子扩散系数增大。

参考文献

[1] 刘志萍，王秀明，龙余良.紫外线辐射强度分析[C]//中国气象学会.中国气象学会2005年年会论文集.苏州：中国气象学会，2005：809-812.

[2] 陈琨.南疆紫外线-碳化作用对沙漠砂混凝土性能影响研究[D].阿拉尔：塔里木大学，2024.

[3] 李尧，刘厚元，郑康琳，等.青藏高原混凝土梁桥的常见病害及工程对策分析[J].西部交通科技，2016(10)：33-37，60.

[4] 王志刚，李鑫，刘数华.紫外线辐射对水工混凝土耐久性影响研究与展望[J].水力发电，2013，39(5)：46-47，54.

[5] 贾飞，王瑞骏，贺新星，等.紫外线辐射及冻融循环双因素下面板混凝土力学性能研究[J].水利水电技术，2018，49(6)：191-197.

[6] 徐帆，贺新星，王瑞骏，等.紫外线与冻融循环作用下的混凝土耐久性研究[J].水资源与水工程学报，2018，29(3)：188-193.

[7] 水中和，余杰，余睿，等.紫外线对硬化水泥浆表层物理化学性质的影响[J].武汉理工大学学报，2018，40(5)：14-18.

[8] 兰聪，刘东，张远，等.紫外照射对混凝土性能的影响研究[J].新型建筑材料，2020，47(3)：12-14.

[9] 刘名君，王海旭，黎建波，等.强紫外线辐照下水泥砂浆的强度与干缩及水化性能[J].中国建材科技，2023，32(1)：30-37.

[10] WANG H X，LONG G C，XIE Y J，et al. Effects of intense ultraviolet irradiation on drying shrinkage and microstructural characteristics of cement mortar [J]. Construction and Building Materials，2022，347：128513.

[11] PRAK L，SUMRANWANICH T，TANGTERMSIRIKUL S. Experimental investigation on the degradation of coating on concrete surfaces exposed to accelerated and natural UV in chloride environment [J]. Journal of Adhesion Science and Technology，2023，37(2)：240-256.

[12] 叶奋，黄彭.沥青紫外线老化仿真系统的建立[J].建筑材料学报，2005，8(5)：567-571.

[13] 扶兴国，王信刚，陈皓，等.紫外线对树脂-水泥界面特性的影响[J].南昌大学学报(理科版)，2018，42(5)：424-430.

[14] SHI X C，SHUI Z H，XIAO X G. Use of ultraviolet pretreatment to enhance carbonation properties of fly-ash cement under accelerated carbonation at different CO_2 concentrations [J]. Journal of Building Engineering，2023，75：106983.

[15] 屠艳平，陈国夫，徐雄，等.再生混凝土微粉对沥青及沥青混合料性能的影响[J].武汉工程大学学报，2023，45(3)：349-354.

[16] 周启，陈旭勇，程书凯，等.再生粗骨料对不同强度等级混凝土性能的影响[J].武汉工程大学学报，2022，44(5)：534-539.

本文编辑：苗 变