

表面磨损与碳化作用下船闸混凝土耐久性研究

韩雪松, 钱文勋, 葛津宇, 胡家宇, 章陶然

Study on the durability of ship lock concrete under the action of abrasion and carbonization

HAN Xuesong, QIAN Wenxun, GE Jinyu, HU Jiayu, ZHANG Taoran

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220303003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海洋生物附着对混凝土结构耐久性能影响

Influence of marine organisms adhesion on durability of concrete structures

水利水电工程学报. 2020(5): 116 <https://doi.org/10.12170/20190906003>

沿海服役混凝土结构氯离子质量分数检测和分析

Detection and analysis of chloride ions in marine concrete structures in service

水利水电工程学报. 2018(4): 106 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.015>

利用灰色残差GM(1,1)-Markov模型预测水工混凝土的劣化

Prediction of hydraulic concrete degradation based on gray residual GM (1,1)-Markov model

水利水电工程学报. 2021(1): 95 <https://doi.org/10.12170/20200228002>

压剪共同作用下混凝土的损伤演化研究

Damage evolution study of concrete under joint action of compression and shear

水利水电工程学报. 2018(2): 112 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.015>

三峡库区滑坡涌浪作用下船舶锚链拉力试验研究

Experimental study of ship mooring force under action of landslide in Three Gorges Reservoir area

水利水电工程学报. 2017(6): 14 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.003>

船闸末级闸首超长输水廊道泄水水力特性数值模拟

Numerical simulation of hydraulic characteristics of the ultra-long water conveyance corridor at the head of the last-step ship lock chamber

水利水电工程学报. 2021(4): 92 <https://doi.org/10.12170/20200728003>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220303003

韩雪松, 钱文勋, 葛津宇, 等. 表面磨损与碳化作用下船闸混凝土耐久性研究 [J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 75-83. (HAN Xuesong, QIAN Wenxun, GE Jinyu, et al. Study on the durability of ship lock concrete under the action of abrasion and carbonization[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(3): 75-83. (in Chinese))

表面磨损与碳化作用下船闸混凝土耐久性研究

韩雪松, 钱文勋, 葛津宇, 胡家宇, 章陶然

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 船闸混凝土在涨水期受船体摩擦碰撞及船行波冲蚀磨损, 落水期受空气中 CO₂ 的侵蚀。采用水下钢球法模拟涨水期船闸混凝土的物理磨损, 结合快速碳化试验模拟落水期的 CO₂ 侵蚀, 研究船闸混凝土的性能退化规律。根据船闸设计服役指标和通航量确定表面磨损和碳化时长, 以及二者的交替循环机制, 宏观上通过碳化深度和抗冲磨强度反映船闸混凝土的工程性能退化规律, 微观上基于热重法和压汞法表征船闸混凝土的成分和孔结构演化。结果表明, 表面磨损作用会加速碳化反应, 表面磨损和碳化循环作用机制符合内河船闸混凝土实际破坏情况。

关键词: 内河船闸; 混凝土; 表面磨损; 碳化; 耐久性; 碳化系数; 等效模拟

中图分类号: TV43

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)03-0075-09

内河船闸混凝土耐久性主要劣化因素有通行船舶对船闸混凝土碰撞摩擦破坏和碳化破坏。现有船闸混凝土设计使用年限一般为 50 年, 其强度等级偏低、抗碳化能力有限, 船闸混凝土的性能损害较为显著。已有研究^[1-2]对比了水胶比、粉煤灰掺量等因素对船闸混凝土抗冲磨性能的影响, 结果表明混凝土孔隙率越小, 密实性越好, 抗冲磨能力越强。运营时间的增长也会导致混凝土抗冲磨能力下降^[3]。混凝土碳化影响因素众多, 可分为材料因素、环境因素、施工因素三方面^[4]。考虑单一的碳化因素, 与实际工况差异较大, 需要根据混凝土实际工况考虑其他劣化因素的共同作用。例如, 在碳化与荷载耦合作用下, 长期压应力作用可减缓混凝土的碳化进程^[5]; 在碳化与冻融循环作用下, 冻融循环导致混凝土内部孔结构劣化, 加速了二氧化碳在其内部的扩散, 加快了碳化过程^[6-7]; 在氯盐与碳化干湿循环条件下, 碳化作用不能持续增加混凝土抗压强度, 长期的碳化作用反而会引起抗压强度的降低^[8]。

上述分析表明, 现有研究未能明确船闸混凝土表面磨损对混凝土碳化的影响规律, 同时尚未建立起能够模拟船闸混凝土劣化的加速试验。本文以内河船闸实际工况为参照, 以表面磨损作用等效模拟船闸受到船体碰撞摩擦的作用, 采用表面磨损与碳化双重因素循环交替作用为劣化因素研究船闸混凝土的耐久性。分析试验过程中船闸混凝土的宏观与微观性能, 探明船闸混凝土劣化规律, 为实际工程提供理论指导。

1 试验方案

为研究船闸混凝土的长期耐久性能, 参照文献 [7,9-10] 的试验方式, 采用表面磨损与碳化循环交替破坏的方式模拟。参照洛杉矶磨耗法测定和评价混凝土的耐撞磨性能科学合理、经济实用。根据冯长伟

收稿日期: 2022-03-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2600704)

作者简介: 韩雪松(1998—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 博士研究生, 主要从事船闸混凝土耐久性研究。

E-mail: hxs905558991@qq.com 通信作者: 钱文勋(E-mail: wxqian@nhri.cn)

等^[2,11]的研究,混凝土的耐撞磨性能和抗冲击性能、抗冲磨性能具有较好的一致性,并且其磨损过程与水下钢球法类似,可以利用水下钢球法等效模拟。在混凝土表面进行加速破坏,与通航船舶对船闸混凝土表面的损害模式一致。本试验采用水下钢球法模拟涨水期船闸混凝土受到船舶通行撞击摩擦及船行波的冲蚀磨损等表面磨损,采用快速碳化试验模拟船闸混凝土落水期受到碳化破坏;并通过宏观-细观多尺度分析混凝土劣化过程中的各项性能。

1.1 混凝土配合比设计

现有船闸混凝土的设计使用年限一般不超过 50 年,根据《水运工程混凝土结构设计规范》(JTS 151—2011),内河船闸混凝土主体的最低强度等级为 C20 和 C25。《船闸工程高性能混凝土质量控制技术导则》中指出处于水位变动区的混凝土强度推荐 C35,但实际工程中多使用 C25 与 C30 混凝土;《混凝土结构耐久性设计标准规范》(GB/T 50476—2019)指出为满足 100 年使用要求,混凝土强度等级不应低于 C30。因此参考船闸工程中水位变动区常用混凝土等级,本试验方案选用强度等级为 C30 的混凝土。

试验水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,掺合料采用 F 类 II 级粉煤灰,细骨料为天然河沙(II 区中砂),粗骨料采用二级配人工碎石,其中小石颗粒粒径为 5~16 mm,大石颗粒粒径为 20.0~31.5 mm,外加剂采用聚羧酸高效减水剂。上述原材料均符合各项指标中的性能要求。混凝土试件按照设计配合比(表 1)制作,混凝土碳化试件为直径 300 mm、高度 100 mm 的圆柱体。浇筑好的混凝土试件静置 24 h 拆模,放入标准养护室养护 28 d 后进行试验。

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Concrete mix

单位: kg/m³

水泥	粉煤灰	砂	小石	中石	减水剂	水
317	60	698	569	569	7.56	163

1.2 试验步骤

室内加速试验表面磨损时间通过流域通航量进行估算^[12],碳化时间通过菲克定律进行估算^[4,13]。由于水运行业未制定明确的磨损和碳化循环相关试验的规范,因此本试验参考《水工混凝土试验规程》(SL 352—2020)中的水下钢球法进行磨损试验,依据《水运工程混凝土结构实体检测规程》(JTS 239—2015)进行快速碳化试验。结合实际涨落潮情况,参考文献 [7-8] 的循环试验方法,第一组模拟试验采用等步长的试验方法(表 2)。

表 2 试验组的循环机制

Tab. 2 Circulation mechanism of test group

周期	试验组1		阶段	试验组2	
	表面磨损累计时间/h	碳化累计时间/d		表面磨损累计时间/h	碳化累计时间/d
1	7.2	2.8	1	6	3
2	14.4	5.6	2	36	14
3	21.6	8.4	3	72	28
...			
10	72.0	28			

同时设计试验组 2,改变循环间隔时间,以对比分析循环制度对船闸混凝土劣化模式的影响,具体步骤见表 2。参考《水工混凝土试验规程》中水下钢球法相关试验步骤,在表面磨损试验中以第 6、36、72 h 为循环劣化时间节点,将混凝土试件取出烘干后放入碳化箱中碳化。参考文献 [4,12-14] 中的碳化时间模拟手段及实际工程磨损程度对应的实用年限,最终选用表面磨损 72 h+碳化 28 d 对应劣化时间 100 年,记录观测混凝土劣化过程。

1.3 试验分析方法

采用水下钢球法及快速碳化法进行分析。试验过程中,混凝土抗冲磨试验机在转速为 1 200 r/min、标准钢球粒径条件下对混凝土试件表面磨损 72 h。混凝土碳化试验在温度 (20±2) °C、相对湿度为 (70±5)%、CO₂ 浓度为 (20±3)% 的条件下碳化 28 d。试验过程中通过劣化深度反映混凝土工程性能退化程度。

采用压汞法(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)观测混凝土试件细观孔结构, 本试验采用 Auto Pore IV 9500 全自动压泵仪; 采用热重法(Thermalgravimetric Analysis, TGA)分析混凝土化学物质含量, 采用 TA-Q500 热重分析仪。通过混凝土孔隙变化、混凝土中碳化产物含量反映混凝土劣化规律。

2 结果分析

2.1 表面磨损-碳化循环作用下的混凝土劣化

试验过程中, 试验组 1 在第 1、3、5、7、10 循环周期取样, 分别对应该试验组的第 1、2、3、4、5 试验阶段; 试验组 2 则在每一循环周期取样分别对应该试验组的第 1、2、3 阶段, 测量 CO₂ 宏观碳化深度, 并测量混凝土试件的整体高度以计算表面磨损作用下混凝土破坏程度, 利用大尺寸卡规测量劣化前后混凝土试件的损失厚度 d_1 , 利用酚酞试剂法测量劣化后混凝土试件的碳化深度 d_2 , 即可得到混凝土劣化深度 $d=d_1+d_2$, 结果见表 3。

表 3 混凝土劣化深度
Tab. 3 Depth of concrete deterioration

组别	试验类型	劣化深度/mm				
		阶段1	阶段2	阶段3	阶段4	阶段5
试验组1	基准碳化试验	0.9	7.7	10.2	12.4	14.4
	表面磨损-碳化循环	3.3	15.9	22.0	31.0	39.8
试验组2	基准碳化试验	0.7	8.7	12.9		
	表面磨损-碳化循环	4.2	20.7	44.3		

从表 3 可见, 在表面磨损破坏与碳化循环作用下, 混凝土试件的劣化深度显著高于单一碳化作用下的混凝土试件劣化深度, 表面磨损-碳化循环作用在一定程度上加速了混凝土的劣化。

试验组 1 与试验组 2 劣化深度曲线(见图 1)说明劣化趋势基本一致, 在基础碳化试验过程中, 混凝土试件的劣化深度在达到一定值后会趋于平缓, 表面磨损-碳化循环作用下的混凝土劣化深度则一直保持较快的增长趋势, 没有平缓迹象。

从图 2 可见, 在实际可信度较大的 10~10 000 nm 范围^[15], 表面磨损-碳化循环作用下混凝土的孔隙体积质量分数在纳米尺度存在较大差别。随着表面磨损-碳化循环作用的进行, 根据图 2 数据换算可得总孔隙率从 5.55% 持续增长至 8.92%, 表面磨损-碳化循环作用破坏了混凝土表面孔结构, 且孔径大于 50 nm 的孔隙率依次为 3.70%、4.04%、4.30%、5.53%, 呈增大趋势。

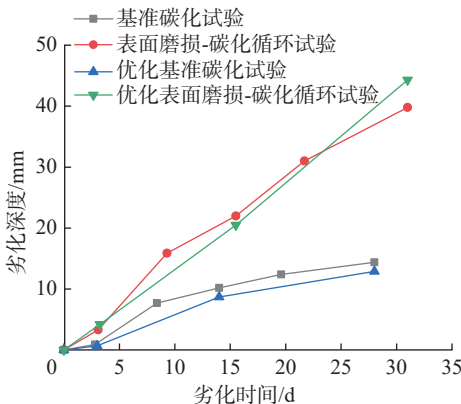


图 1 混凝土劣化深度变化曲线

Fig. 1 Variation curve of concrete deterioration depth

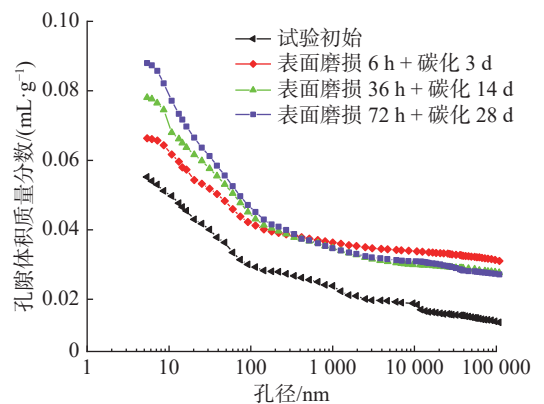


图 2 MIP 法混凝土累积孔隙孔隙体积质量分数-孔径曲线

Fig. 2 Cumulative porosity-pore diameter curve of concrete by MIP method

参照文献 [16], 将图 3 中孔径分为无害级孔 ($d < 20$ nm)、少害级孔 ($d = [20, 50]$ nm)、有害级孔 ($d = [50, 200]$ nm) 和多害级孔 ($d \geq 200$ nm), 其中 D_1 代表差异侵入。图中总孔隙率与各分组孔隙体积分数见表 4。

表 4 MIP 法测试混凝土孔隙率结果
Tab. 4 Results of concrete porosity test by MIP method

阶段	孔径分布/%				最可几孔径/%	总孔隙率/%
	$d \geq 200$ nm	$d = [50, 200]$ nm	$d = [20, 50]$ nm	$d < 20$ nm		
初始阶段	2.79	0.91	0.67	1.18	60.10	5.55
表面磨损 6 h + 碳化 3 d	2.82	1.22	0.84	1.28	60.18	6.16
表面磨损 36 h + 碳化 14 d	3.12	1.18	1.12	1.53	74.57	6.95
表面磨损 72 h + 碳化 28 d	3.83	1.70	1.26	2.13	67.15	8.92

由表 4 可见, 混凝土试件的总孔隙率与混凝土受到的劣化时间有较好的相关性, 并且不同孔隙率下的孔径分布规律基本一致。混凝土初始状态最可几孔径为 60.1 nm, 表面磨损 36 h 碳化 14 d 的最可几孔径 74.6 nm, 最可几孔径总体呈上升趋势, 这说明混凝土的劣化试验过程使得粗孔的比例增加。总孔隙率从 5.55% 增至 8.92%, 混凝土表面孔隙体积增大。混凝土劣化时间增长, 混凝土中的多害孔与有害孔比例增加, 这进一步验证了表面磨损-碳化循环作用对混凝土微观孔结构的破坏, 且增加了混凝土内的粗孔比例。

图 4 表明混凝土内的间隙主要来源是多害级孔 ($d \geq 200$ nm), 并且水化产物的间隙孔 ($d = [20, 200]$ nm) 的体积分数与其对应的最可几孔径具有较好的相关性。随着劣化时间增加, 混凝土总孔隙率变大, 无害级孔 ($d < 20$ nm) 与少害级孔 ($d = [20, 50]$ nm) 的孔隙体积分数增加。按照国际理论和应用化学联合会 (International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC) 标准将固体孔隙按平均孔径分类^[17], 图 4 中 4 个阶段平均孔径大于 50 nm 的大孔在劣化过程中所占体积分数较高, 分别为 78.74%、79.22%、77.99% 和 76.13%, 这使得 CO_2 在混凝土中的扩散速率更快。相关研究^[18-20]表明, CO_2 在混凝土中的扩散速度与混凝土孔隙率相关。孔隙率增大会加快 CO_2 的扩散速度, 进而加速混凝土劣化。因此, 表面磨损-碳化循环作用使混凝土的劣化速度更快, 劣化深度更大。

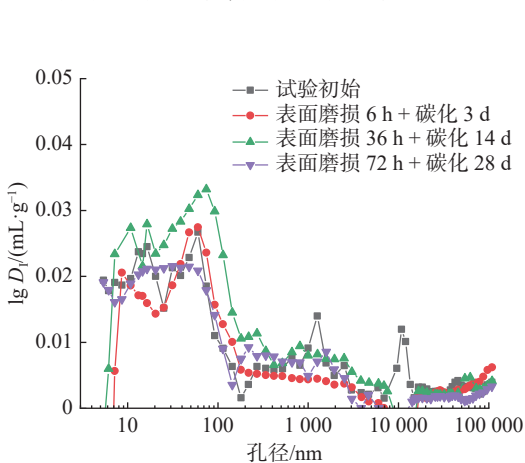


图 3 混凝土孔径分布

Fig. 3 Concrete pore diameter distribution

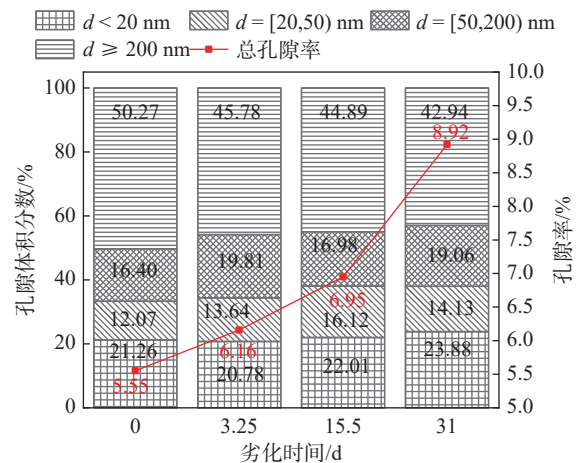


图 4 孔隙率及不同时段孔隙体积分数

Fig. 4 Porosity and pore volume fraction in different periods

2.2 表面磨损作用促进混凝土碳化

以试验组 2 为基础, 在试验阶段取混凝土试件表面 1 mm 处的试样进行热重分析, 其热重 (TG) 与差分热重 (DTG) 分析结果如图 5 所示。

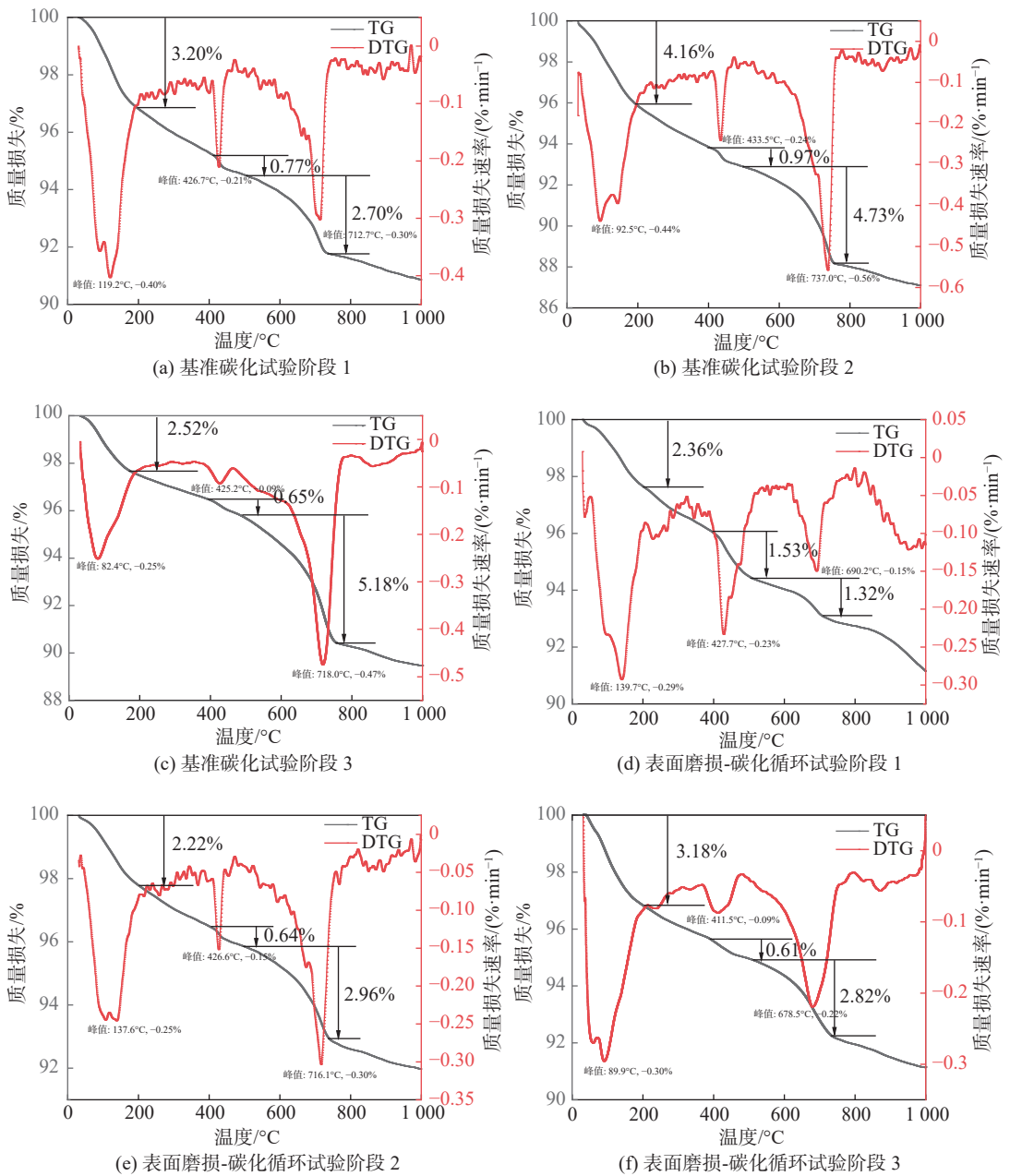


图 5 混凝土不同阶段 TG-DTG 分析

Fig. 5 TG-DTG analysis of concrete in different periods

从图 5 可见: 在 400~500 °C 时, 混凝土试件表面水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 出现明显的质量损失; 在 500~750 °C 时, 碳化产物 CaCO_3 同样出现明显的质量损失, 这表明混凝土试件已经发生了碳化反应。上述结果与文献 [20] 中碳化的热重结果一致, 因此可以判断本试验混凝土试件表面碳化反应正常进行, 并且反应程度有加剧趋势。同样劣化过程也适用于表面磨损-碳化循环作用(图 5(d)~(f)), 该过程进一步验证混凝土试件中发生的碳化反应。为研究碳化反应程度, 从图 5 中总结详细数据见表 5。

表 5 总结计算了两种试验工况下混凝土表面 1 mm 处碳化产物的含量。基准碳化组的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量开始上升, 原因是混凝土内部继续发生水化反应。为更加直观表明水化过程, 建立混凝土内 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CaCO_3 含量的时变模型(图 6 和图 7)。

表 5 TGA 法产物量化
Tab. 5 Quantification of TGA method products

分组	试验阶段	质量分数/%	
		Ca(OH) ₂	CaCO ₃
基准碳化试验	初始阶段	0.66	1.20
	碳化3 d	0.77	2.70
	碳化14 d	0.97	4.73
	碳化28 d	0.65	5.18
	初始阶段	0.66	1.20
表面磨损-碳化循环试验	表面磨损6 h+碳化3 d	1.53	1.32
	表面磨损36 h+碳化14 d	0.64	2.96
	表面磨损72 h+碳化28 d	0.61	2.82

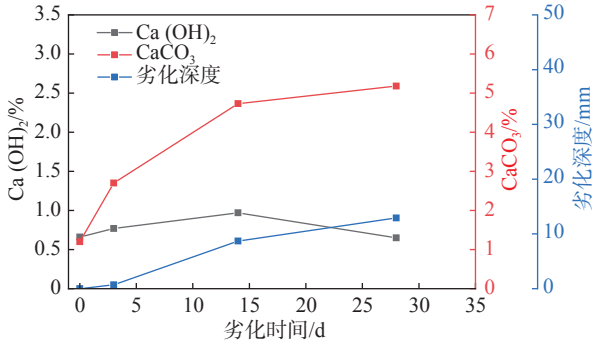


图 6 基准碳化组 TGA 产物质量分数变化曲线

Fig. 6 Variation curve of TGA products in carbonized group

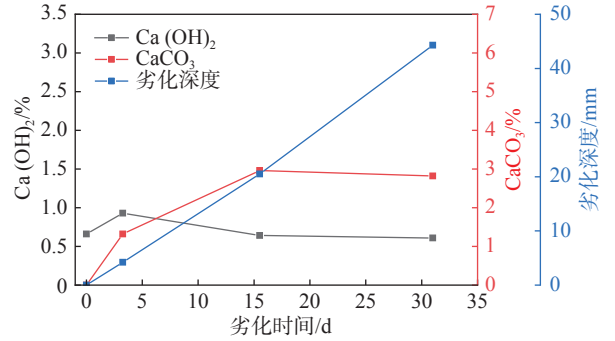


图 7 表面磨损-碳化循环劣化组 TGA 产物质量分数变化曲线

Fig. 7 Variation curve of TGA products in surface wear-carbonized group

在基准碳化的条件下,当水化反应减慢, Ca(OH)₂ 含量最终在碳化反应的影响下呈现下降趋势。而 CaCO₃ 的含量一直处于增长趋势,并且与碳化反应模型 $x_c = k\sqrt{t}$ ^[21] (其中 x_c 为碳化深度, k 为碳化影响因子, t 为碳化时间)有良好的相关性(见图 6)。这说明在本试验环境中,混凝土中碳化反应是正常进行的。

表面磨损-碳化循环作用下的 CaCO₃ 含量一直处于较低的状态(图 7),其主要原因在于表面磨损将碳化产物一同带走,并且随表面磨损时间的增加,尚未碳化的混凝土部分暴露。碳化反应在表面磨损作用下一直处于活性较高的状态,与 2.1 节中混凝土劣化深度曲线有较好的相关性。可以推断,在表面磨损作用下碳化反应将呈现出反应速率高且维持时间长的特点。

CO₂ 在混凝土中扩散受多方面因素影响,其中孔隙率对 CO₂ 扩散系数影响因子如式(1)^[22]所示:

$$D_{CO_2}^0 = 1.64 \times 10^{-6} \times (\varepsilon_p^0)^{1.8} \quad (1)$$

式中: $D_{CO_2}^0$ 为标准环境条件下混凝土 CO₂ 的扩散系数 (m²/s); ε_p^0 为水泥水化和矿物掺合料二次水化完成后、碳化发生前的混凝土孔隙率。

表面磨损-碳化作用混凝土试件在劣化过程中的孔隙率逐渐增大,参考式(1)模拟表面磨损-碳化交替循环作用下的 CO₂ 扩散影响因子。结果显示, CO₂ 扩散系数呈上升趋势(见图 8)。

图 8 显示,在表面磨损-碳化循环劣化情况下,其混凝土表面 CO₂ 扩散系数随劣化过程呈现二次曲线上涨趋势。这表明在表面磨损-碳化循环劣化作用下,混凝土的

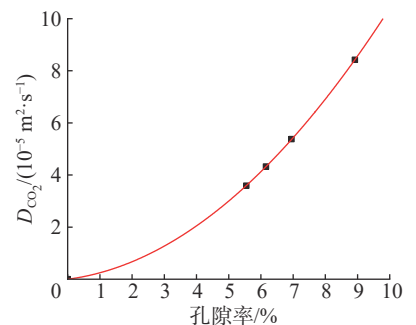


图 8 扩散系数-孔隙率拟合曲线

Fig. 8 Diffusivity-porosity fitting curve

CO₂ 扩散相较于基准碳化情况下更为迅速。在单独碳化作用下,随着碳化反应的发生,混凝土孔隙率会缓慢减小,改善孔结构,对应的扩散系数也会下降,在一定程度上阻碍 CO₂ 的扩散。在表面磨损-碳化循环作用下混凝土的碳化速率更高。表面磨损作用下混凝土表面孔结构遭到破坏并且能带走混凝土表面部分碳化产物,使得混凝土孔隙率增加,CO₂ 的扩散速度加快,加速混凝土碳化。

3 结 语

(1)基于室内加速试验的研究表明,在表面磨损-碳化循环作用下混凝土的劣化速度更快、劣化程度更为严重。表面磨损-碳化循环试验劣化 9.3 d 混凝土劣化深 15.9 mm,超过基准碳化试验中劣化 28 d 混凝土劣化深 14.4 mm。表面磨损-碳化循环劣化试验模拟得到劣化时间 100 年的平均劣化深度为 42.05 mm,远超现有混凝土保护层厚度。

(2)表面磨损作用使得混凝土碳化作用保持速率高、时间长的特点。利用热重分析法分析发现,在表面磨损-碳化循环试验中,CaCO₃ 含量在劣化期间一直小于基准碳化试验 CaCO₃ 含量,碳化反应物 Ca(OH)₂ 含量在反应后期无明显下降趋势,这表面磨损作用在带走部分碳化产物的同时,将内部未完全碳化的部分暴露出来,使得碳化反应处于较为活跃状态。

(3)表面磨损作用加速碳化反应。通过压汞法观察微观孔结构变化发现,表面磨损作用下混凝土孔隙体积处于上升趋势,混凝土孔隙体积由 5.55% 上升至 8.92%,孔径大于 50 nm 的大孔平均占孔隙体积分数为 78.02%。高孔隙率对应更高的 CO₂ 扩散速率。表面磨损作用加速了 CO₂ 在混凝土内部的扩散。

(4)新建立的船闸混凝土室内加速试验方法,更符合船闸工程在长江中下游流域的实际破坏情况,是一种更加科学合理的试验方法。在等步长的基础上将劣化时间分别优化为表面磨损 6 h+碳化 3 d 对应劣化时间 10 年、表面磨损 36 h+碳化 14 d 对应劣化时间 50 年、表面磨损 72 h+碳化 28 d 对应劣化时间 100 年,极大减少了工作量,缩短了试验时长。

参 考 文 献:

- [1] 陈守开,张政男,郑永杰,等.再生骨料透水混凝土耐撞磨性试验研究[J].长江科学院院报,2020,37(7):153-159.(CHEN Shoukai, ZHANG Zhengnan, ZHENG Yongjie, et al. Experimental study on impact-abrasion resistance of recycled aggregate pervious concrete[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(7): 153-159. (in Chinese))
- [2] 冯长伟,李思胜,秦鸿根,等.闸室墙混凝土抗冲击和耐撞磨性能的影响因素研究[J].混凝土与水泥制品,2008(2):38-41.(FENG Changwei, LI Sisheng, QIN Honggen, et al. Study on the influencing factors of impact resistance and abrasion resistance of sluice chamber wall concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2008(2): 38-41. (in Chinese))
- [3] 王东英,李思胜,秦鸿根,等.船闸闸室墙纤维混凝土的应用[J].建筑技术,2011,42(2):138-140.(WANG Dongying, LI Sisheng, QIN Honggen, et al. Application of fibre reinforced concrete for lock chamber wall[J]. Architecture Technology, 2011, 42(2): 138-140. (in Chinese))
- [4] 肖佳,勾成福.混凝土碳化研究综述[J].混凝土,2010(1):40-44,52.(XIAO Jia, GOU Chengfu. Overview of the research for concrete carbonation[J]. Concrete, 2010(1): 40-44, 52. (in Chinese))
- [5] 赵庆新,何小军,张津瑞.长期荷载作用对粉煤灰混凝土抗碳化性能的影响[J].硅酸盐学报,2017,45(2):254-259.(ZHAO Qingxin, HE Xiaojun, ZHANG Jinrui. Effect of long-term loading on carbonation resistance of fly ash concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(2): 254-259. (in Chinese))
- [6] 于琦,牛荻涛,屈锋.冻融环境下混凝土碳化深度预测模型[J].混凝土,2012(9):3-5,8.(YU Qi, NIU Ditao, QU Feng. Model for predicting carbonation depth of concrete in freezing-thawing circumstance[J]. Concrete, 2012(9): 3-5, 8. (in Chinese))

- [7] 刘明辉, 韩冰, 马金泉. 冻融循环作用下混凝土抗冲磨性能研究[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(7): 100-109. (LIU Minghui, HAN Bing, MA Jinquan. Research on the anti-abrasion capacity of concrete under freeze-thaw cycle[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(7): 100-109. (in Chinese))
- [8] 钱文勋, 陈迅捷, 蔡跃波, 等. 应力和氯盐环境下海工混凝土的碳化性能[J]. *混凝土与水泥制品*, 2018(5): 1-5. (QIAN Wenxun, CHEN Xunjie, CAI Yuebo, et al. Carbonation performance of marine concrete under stress and chloride environment[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2018(5): 1-5. (in Chinese))
- [9] WANG L, DAI L Z, BIAN H B, et al. Concrete cracking prediction under combined prestress and strand corrosion[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019, 15(3): 285-295.
- [10] BAO J W, XUE S B, ZHANG P, et al. Coupled effects of sustained compressive loading and freeze-thaw cycles on water penetration into concrete[J]. *Structural Concrete*, 2020, 22: E944-E954.
- [11] 冯长伟, 秦鸿根, 常僇宇. 闸室墙混凝土的耐撞磨试验[J]. *水利水电科技进展*, 2009, 29(4): 51-54. (FENG Changwei, QIN Honggen, CHANG Xuanyu. Test on the impact and abrasion resistance of lock chamber wall concrete[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, 29(4): 51-54. (in Chinese))
- [12] 宋贤良, 龚丽菊, 耿艳. 常州市魏村水利枢纽现有通航能力分析[J]. *水利建设与管理*, 2011, 31(12): 69-70. (SONG Xianliang, GONG Liju, GENG Yan. Analysis of the current navigation capacity of Weicun Water Control Project in Changzhou City[J]. *Water Resources Development & Management*, 2011, 31(12): 69-70. (in Chinese))
- [13] 陈正, 胡以婵, 赵宇飞, 等. 标准碳化环境下基于材料参数的混凝土碳化深度多因素计算模型[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(6): 1681-1687, 1693. (CHEN Zheng, HU Yichan, ZHAO Yufei, et al. Multi-factor computation model of concrete carbonation depth based on material parameters in standard carbonization environment[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(6): 1681-1687, 1693. (in Chinese))
- [14] 俞亮, 张雷, 郭家琛. 水性环氧砂浆抗冲磨特性研究[J]. *人民黄河*, 2022, 44(1): 134-138, 148. (YU Liang, ZHANG Lei, GUO Jiachen. Research on anti-abrasion property of water-borne epoxy mortar[J]. *Yellow River*, 2022, 44(1): 134-138, 148. (in Chinese))
- [15] 闫西乐. 孔结构对水泥基材料抗盐冻性能影响规律的研究[D]. 南京: 东南大学, 2015. (YAN Xile. Influence of pore structure on cement-based materials frost resistance property[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese))
- [16] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999. (WU Zhongwei, LIAN Huizhen. High performance concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999. (in Chinese))
- [17] GREGG S J, SING K S W, SALZBERG H W. Adsorption surface area and porosity[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 114(11): 279C.
- [18] 杨毅. 混凝土碳化深度数值模型的分析研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. (YANG Yi. The analysis of the numerical model in concrete carbonation depth[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014. (in Chinese))
- [19] QIN L, GAO X J. Properties of coal gangue-Portland cement mixture with carbonation[J]. *Fuel*, 2019, 245: 1-12.
- [20] 李蓓, 金南国, 田野, 等. 热重分析法在混凝土碳化深度检测中的应用[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(10): 80-82, 86. (LI Bei, JIN Nanguo, TIAN Ye, et al. Application of thermogravimetric analysis method in detecting carbonation depth of concrete[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2020(10): 80-82, 86. (in Chinese))
- [21] 曹明莉, 丁言兵, 郑进炫, 等. 混凝土碳化机理及预测模型研究进展[J]. *混凝土*, 2012(9): 35-38, 46. (CAO Mingli, DING Yanbing, ZHENG Jinxuan, et al. Overview the mechanism and forecast model of concrete carbonization[J]. *Concrete*, 2012(9): 35-38, 46. (in Chinese))
- [22] 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.

Study on the durability of ship lock concrete under the action of abrasion and carbonization

HAN Xuesong, QIAN Wenxun, GE Jinyu, HU Jiayu, ZHANG Taoran

(*Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: In the actual working conditions, the concrete of the ship lock is affected by the friction and collision of the ship's hull and the erosion and wear of the ship's traveling wave during the rising water period, and is damaged by CO₂ in the air during the falling water period. In order to study the performance degradation law of the ship lock concrete under this working condition, the underwater steel ball method was used to approximate the physical wear of the ship lock concrete in the rising water period, and the rapid carbonation test was used to simulate the CO₂ erosion in the falling water period. The duration of abrasion and carbonization, as well as the alternate cycle mechanism, is determined according to the design service index of the lock and the characteristics of navigability. The engineering performance degradation law of the ship lock concrete is reflected by the carbonation depth and anti-abrasion strength, and the composition and pore structure evolution of the ship lock concrete are characterized based on the thermalgravimetric analysis and mercury intrusion porosimetry. The simulation test and analysis show that the abrasion accelerates the carbonization reaction to a certain extent. The mechanism of abrasion and carbonation cycle is consistent with the actual failure of the inland ship lock concrete.

Key words: ship lock; concrete; abrasion; carbonation; durability; carbonation coefficient; equivalent simulation

著作权使用声明

本刊声明: 本刊图文版权归编辑部所有, 未经允许不得任意转载、摘编。本刊已许可相关媒体、数据库、网络平台等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议, 请在投稿时说明, 本刊将按作者说明处理。

《水利水电工程学报》编辑部