

湿热-碳化下环氧树脂混凝土的抗碳化性能试验研究*

Experimental Study on Carbonation Resistance of Epoxy Resin Concrete in Damp Heat Carbonation Environment

赵怀轩¹, 张启志²

(1. 河南省育兴建设工程管理有限公司, 河南 驻马店 463000; 2. 黄淮学院, 河南 驻马店 463000)

摘要: 为制备高性能耐久性混凝土, 通过室内试验分析了环氧树脂掺量、湿热循环次数、碳化循环次数及湿热-碳化循环次数对环氧树脂混凝土抗碳化性能的影响, 结果表明: 环氧树脂的掺入能够提高混凝土的抗碳化性能。但过量的环氧树脂掺量并不能显著提高混凝土的抗碳化性能, 对于该类混凝土试件的环氧树脂最佳掺量为 1.5%; 随着湿热循环次数、碳化循环次数和湿热-碳化循环次数的增加, 混凝土的碳化深度也逐渐增加, 即抗碳化能力下降, 对混凝土抗碳化性能影响排序为: 湿热-碳化>碳化>湿热。该研究结论能够为今后高性能混凝土配制提供数据支持。

关键词: 环氧树脂掺量; 湿热-碳化循环; 混凝土; 抗碳化能力

中图分类号: TU528.45 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0028-04

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.006

ZHAO Huaixuan¹, ZHANG Qizhi²

(1. Henan Yuxing Construction Engineering Management Co., Ltd., Zhumadian 463000, China;

2. Huanghuai University, Zhumadian 463000, China)

Abstract: In order to prepare high-performance and durable concrete, the influence of epoxy resin content on the carbonation resistance of concrete, the influence of wet heat cycle number on the carbonation resistance of epoxy resin concrete, the influence of carbonation cycle number on the carbonation resistance of epoxy resin concrete, and the influence of wet heat carbonation cycle number on the carbonation resistance of epoxy resin concrete were analyzed through indoor experiments. The results showed that: the addition of epoxy resin can improve the carbonation resistance of concrete. However, excessive epoxy resin content cannot significantly improve the carbonation resistance of concrete. The optimal dosage of epoxy resin for this type of concrete specimen is 1.5%; As the number of wet heat cycles, carbonation cycles, and wet heat carbonation cycles increases, the carbonation depth of concrete gradually increases, that is, the carbonation resistance decreases; In the three tests, the order of influence on the carbonation resistance of concrete is: humid heat carbonation>carbonation>humid heat. The research conclusion can provide data support for the preparation of high-performance concrete in the future.

Keywords: epoxy resin content; hygrothermal carbonation cycle; concrete; carbonation resistance

*基金项目: 河南省 2022 高等学校重点科研项目 (ZGYGC7578); 河南省 2021 年科技发展计划项目 (JKY40067)。

作者简介: 赵怀轩 (1973—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 工程管理。

通信作者: 张启志 (1968—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 教学与工程管理。

收稿日期: 2023-10-25

0 引言

由于混凝土长期暴露于空气之中, 而一旦混凝土出现开裂则会加快混凝土及其内部钢筋的破坏, 因此混凝土的抗裂能力和抗碳化能力显得十分重要^[1-2]。通常, 可以通过在混凝土中加入环氧树脂来提高混凝土的抗裂能力, 如谭哲等^[3]研究了不同厚度下的普通环氧树脂对混凝土抗渗性能的改善作用;

金亮亮^[4]等通过采用环氧树脂胶分析了高寒地区冻融循环作用下混凝土的耐久性; 屈志英等^[5]得出相同冻融循环次数下, 环氧树脂修补法和碳纤维布修补法试件的质量损失率相对较低。

此外由于混凝土所处的环境非常复杂, 如湿热和碳化的影响对其性能的影响也较大。如江胜华等^[6]研究湿热环境下碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加固钢筋混凝土结构的耐久性问题; 刘宇森等^[7]研究碳纤维补强聚合物加固混凝土结构在湿热环境下的耐久性能; 丁杨等^[8]对泡沫混凝土展开了湿热循环的试验研究; 罗育明等^[9]研究混凝土构件长期暴露大气中, 表面形成的碳化层对自密实混凝土加固混凝土黏结界面剪切性能的影响; 蒋俊等^[10]通过模拟试验研究了缓蚀剂辅助再碱化技术对碳化钢筋混凝土结构的修复效果; 唐官保等^[11]研究应力对混凝土气渗系数和 CO_2 扩散系数的影响。

因此, 本文在上述研究成果的基础之上, 构建湿热-碳化耦合试验, 并通过加入环氧树脂材料来分析外加掺量、湿热循环次数、碳化循环次数和湿热-碳化循环次数对混凝土抗碳化性能的影响。

1 制备方法

为研究混凝土在湿热环境、碳化环境和湿热-碳化耦合环境下的抗碳化性能, 根据 GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准制备 C40 混凝土, 其配合比为: 水泥: 粗砂: 碎石: 水 = 1 : 1.35 : 2.81 : 0.38。其中水泥为山东金湖水泥有限公司生产, 型号为 P·O 42.5R 水泥, 其化学成分比例见表 1; 粗砂为连云港市加贝碳化硅有限公司生产, 其粒径约为 0~8 mm 之间, 堆积密度约为 1830 kg/m^3 ; 碎石为连云港市加贝碳化硅有限公司生产, 其粒径约为 8~20 mm 之间, 堆积密度约为 1630 kg/m^3 , 压碎指标为 5%; 水为蒸馏水, 无其余有害成分; WSR6101 双酚 A 型环氧树脂由廊坊邦华环保科技有限公司生产, 其外观为透明黏稠液, 软化点在 10~18 °C 之间, 环氧值为 0.43 g/100g, 有机氯为 0.03 g/100g, 无机氯为 0.001 g/100g, 按照水泥掺量的体积百分比进行掺入, 其掺入量为 0、0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0%。将混凝土试件放入标准养护室内进行养护, 温度为 $(25 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度在 98% 以上。

表 1 水泥化学成分比例

Table 1 Chemical proportion of cement /%					
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
26.02	4.13	2.97	62.22	1.97	2.69

湿热环境: 根据 GB/T 12000—2003 《塑料暴露于湿热、水喷雾和盐雾中影响的测定》方法, 将混凝土放入恒温恒湿箱中进行湿热循环, 初始环境温度为 20 °C、相对湿度为 60%, 目标环境温度为 80 °C、相对湿度为 20%; 从初始环境至目标环境时间为 4 h, 以此作为一个循环次数。对混凝土试件分别进行 6、12、24 和 42 次湿热循环后, 分析混凝土试件在 100% 的碳化环境下 6 h 后的抗碳化性能, 即碳化深度。其中碳化性能测试根据 GB/T 50082—2009 《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》进行测试。

碳化环境: 根据 GB/T 11974—1997 《加气混凝土碳化试验方法》方法, 将混凝土放入碳化箱中进行碳化循环, 初始碳化环境为 20%, 目标碳化环境为 80%, 从初始环境至目标环境时间为 4 h, 以此作为一个循环次数。对混凝土试件分别进行 6、12、24 和 42 次循环后, 分析混凝土试件的抗碳化性能, 即碳化深度。

湿热-碳化循环, 根据上述两种环境, 先将混凝土放入湿热环境循环 6 次, 然后将混凝土放入碳化环境中循环 6 次, 以此为 1 次耦合循环, 对混凝土分别进行 1、2、3 和 4 次耦合循环后, 分析混凝土试件的抗碳化性能, 即碳化深度。

2 结果与讨论

2.1 湿热循环次数对环氧树脂混凝土抗碳化性能影响

根据湿热试验方案, 将 0、0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 不同含量的环氧树脂掺入混凝土中, 分析在该条件下的混凝土抗碳化性能, 如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 在相同的湿热循环次数下, 随着环氧树脂掺量的增加, 混凝土的抗碳化性能呈现先增加而后下降的趋势。如湿热循环次数为 24 次时, 未掺环氧树脂的混凝土试件碳化深度为 19 mm; 掺入 0.5% 环氧树脂的混凝土试件碳化深度为 18 mm; 掺入 1.0% 环氧树脂的混凝土试件碳化深度为 16 mm; 掺入 1.5% 环氧树脂的混凝土试件, 其碳化深度为

材料科学

13 mm；掺入 2.0% 环氧树脂的混凝土试件碳化深度为 14 mm。从试验结果可以看出，环氧树脂的掺入能够提高混凝土的抗碳化性能。但过量的环氧树脂掺量并不能显著地提高混凝土的抗碳化性能，因此，从成本角度上来说，对于该类混凝土环氧树脂最佳掺量为 1.5%。

当环氧树脂掺量为固定值时，随着湿热循环次数的增加，混凝土的碳化深度也逐渐增加，即抗碳化能力下降。当环氧树脂的掺量为 1.5% 时，湿热循环 6 次后，混凝土的碳化深度为 3 mm；湿热循环 12 次后，混凝土的碳化深度为 7 mm；湿热循环 24 次后，混凝土的碳化深度为 13 mm；湿热循环 42 次后，混凝土的碳化深度为 21 mm。可见，随着湿热循环次数的增加，混凝土的抗碳化能力下降。这是因为混凝土周围环境湿度发生变化时，会引起混凝土发生干湿变形，从而加速碳化过程^[12-13]。

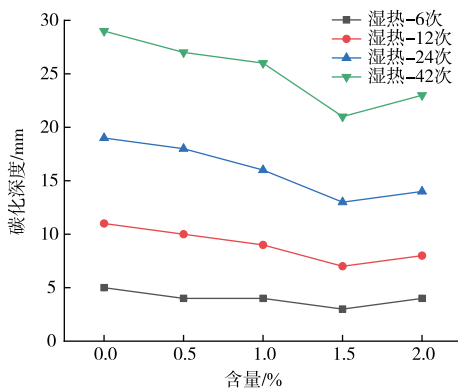


图1 湿热循环和环氧树脂掺量对混凝土抗碳化性能影响规律
Fig.1 Effect of damp heat cycle and epoxy resin content on carbonation resistance of concrete

2.2 碳化环境对环氧树脂混凝土抗碳化性能影响

根据碳化试验方案，将 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 环氧树脂掺入混凝土中，分析在该条件下混凝土抗碳化性能，如图 2 所示。从图 2 中可以看出，在相同的碳化循环次数下，随着环氧树脂掺量的增加，混凝土的抗碳化性能呈现先增加而后下降的趋势。在碳化循环次数为 24 次时，未掺环氧树脂的混凝土试件，其碳化深度为 22 mm；掺入 0.5% 环氧树脂的混凝土试件，其碳化深度为 21 mm；掺入 1.0% 环氧树脂的混凝土试件，其碳化深度为 19 mm；掺入 1.5% 环氧树脂的混凝土试件，其碳化深度为 16 mm；掺入 2.0% 环氧树脂的混凝土试件，其碳化深度为 18 mm。从试验结果可以看出，环氧树脂的掺入能够提

高混凝土的抗碳化性能。但过量的环氧树脂含量并不能显著地提高混凝土的抗碳化性能，因此从成本经济的角度上来说，对于该类混凝土试件的环氧树脂最佳掺量为 1.5%。

当环氧树脂的掺量为固定值时，随着碳化循环次数的增加，混凝土的碳化深度也逐渐增加，即抗碳化能力下降。当环氧树脂的掺量为 1.5% 时，碳化循环 6 次后，混凝土的碳化深度为 4 mm；碳化循环 12 次后，混凝土的碳化深度为 8 mm；碳化循环 24 次后，混凝土的碳化深度为 16 mm；碳化循环 42 次后，混凝土的碳化深度为 25 mm。可见，随着碳化循环次数的增加，混凝土的抗碳化能力下降，这是因为在不同二氧化碳浓度环境下，会导致浓度梯度的产生，即混凝土会受到外界压力的影响，从而加速二氧化碳的侵蚀^[14-15]。同时从实验结果可以看出，碳化循环对混凝土抗碳化能力的影响比湿热循环的影响要大。

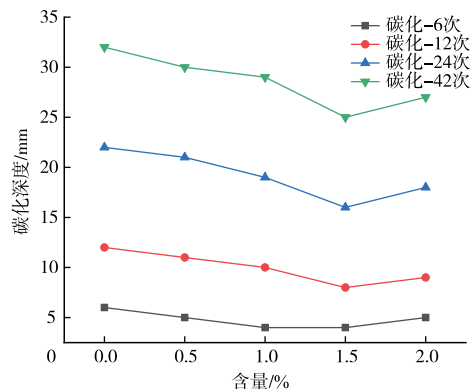


图2 碳化循环和环氧树脂掺量对混凝土抗碳化性能影响规律
Fig.2 Effect of carbonation cycle and epoxy resin content on carbonation resistance of concrete

2.3 湿热-碳化环境对环氧树脂混凝土抗碳化性能影响

根据湿热-碳化试验方案，将 0.5%、1.0%、1.5% 和 2.0% 环氧树脂掺入混凝土中，分析在该条件下的混凝土抗碳化性能，如图 3 所示。从图 3 中可以看出，在相同的湿热-碳化循环次数下，随着环氧树脂掺量的增加，混凝土的抗碳化性能呈现先增加而后下降的趋势，如在湿热-碳化循环次数为 4 次时，未掺环氧树脂的混凝土试件，碳化深度为 39 mm；掺入 0.5% 环氧树脂的混凝土试件碳化深度为 38 mm；掺入 1.0% 环氧树脂的混凝土试件，碳化深度为 36 mm；掺入 1.5% 环氧树脂的混凝土试件，碳化深度为 33 mm；掺入 2.0% 环氧树脂，混凝土试件的碳

化深度为 35 mm。从试验结果可以看出, 环氧树脂的掺入能够提高混凝土的抗碳化性能。但过量的环氧树脂含量并不能显著地提高混凝土的抗碳化性能, 因此从成本经济的角度上来说, 对于该类混凝土试件的环氧树脂最佳掺量为 1.5%。

当环氧树脂的掺量为固定值时, 随着湿热-碳化循环次数的增加, 混凝土的碳化深度也逐渐增加, 即抗碳化能力下降。当环氧树脂的掺量为 1.5% 时, 湿热-碳化循环 1 次后, 混凝土的碳化深度为 7 mm; 湿热-碳化循环 2 次后, 混凝土的碳化深度为 13 mm; 湿热-碳化循环 3 次后, 混凝土的碳化深度为 21 mm; 湿热-碳化循环 4 次后, 混凝土的碳化深度为 33 mm。可见, 随着湿热-碳化循环次数的增加, 混凝土的抗碳化能力迅速下降, 并且其抗碳化能力要低于碳化循环过程和湿热循环过程, 这是因为湿热-碳化过程是一个互相作用的过程, 能够加速二氧化碳的侵蚀。

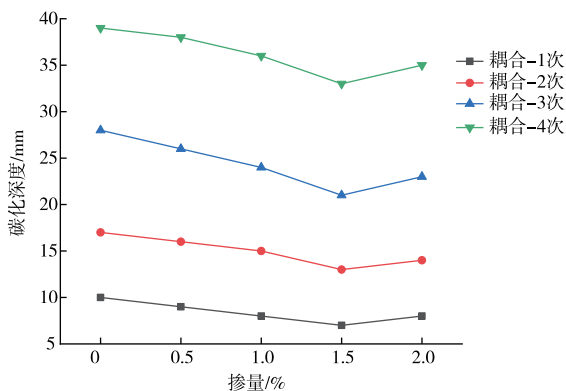


图3 湿热-碳化循环和环氧树脂掺量对混凝土抗碳化性能影响规律
Fig.3 Effect of damp heat carbonation cycle and epoxy resin content on carbonation resistance of concrete

3 结论

开展不同掺量环氧树脂混凝土在不同环境(湿热环境、碳化环境和湿热-碳化耦合环境)下的抗碳化能力测试, 得到了以下结论:

(1) 结合经济性和试验结果, 环氧树脂在混凝土中的最佳掺量为 1.5%, 该掺量能够极大的发挥环氧树脂在混凝土中的性价比。

(2) 当环氧树脂的掺量为 1.5% 时, 湿热循环 6 次后混凝土的碳化深度为 3 mm; 湿热循环 12 次后混凝土的碳化深度为 7 mm; 湿热循环 24 次后混凝土的碳化深度为 13 mm; 湿热循环 42 次后混凝土的碳化深度为 21 mm。

(3) 当环氧树脂的掺量为 1.5% 时, 碳化循环 6 次后混凝土的碳化深度为 4 mm; 碳化循环 12 次后混凝土的碳化深度为 8 mm; 碳化循环 24 次后混凝土的碳化深度为 16 mm; 碳化循环 42 次后混凝土的碳化深度为 25 mm。

(4) 当环氧树脂的掺量为 1.5% 时, 湿热-碳化循环 1 次后混凝土的碳化深度为 7 mm; 湿热-碳化循环 2 次后混凝土的碳化深度为 13 mm; 湿热-碳化循环 3 次后混凝土的碳化深度为 21 mm; 湿热-碳化循环 4 次后混凝土的碳化深度为 33 mm。

参 考 文 献

- [1] 葛子毅, 逯静洲, 王晨, 等. 轴压荷载对半浸泡混凝土硫酸盐侵蚀的影响 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (1): 134-138, 165.
- [2] 范志宏, 杨海成、于方. 基于暴露试验的大掺量粉煤灰混凝土耐久性试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (8): 267-272, 294.
- [3] 谭哲, 郭思瑶, 赵铁军, 等. 石墨烯增强环氧树脂涂层对混凝土与 SHCC 的抗渗性能研究 [J]. 混凝土, 2020, (10): 131-135.
- [4] 金亮亮, 杨树桐. 冻融循环作用下嵌入式 FRP 筋与混凝土粘结性能研究 [J]. 复合材料科学与工程, 2020 (8): 70-75.
- [5] 屈志英, 赵堃. 季冻区公路混凝土桥梁台身开裂加固行为研究 [J]. 公路工程, 2020, 45 (4): 206-210.
- [6] 江胜华, 姚国文, 刘超越, 等. 湿热环境作用下 CFRP 加固钢筋混凝土梁的抗弯性能 [J]. 西南交通大学学报, 2020, 055 (1): 175-183.
- [7] 刘宇森, 姚国文, 向文, 等. 湿热耦合环境下碳纤维布加固混凝土界面耐久性能 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (15): 266-271.
- [8] 丁杨, 董晶亮, 王中平, 等. 耐候性试验下泡沫混凝土孔结构与热工性能演变规律 [J]. 中国材料进展, 2019 (12): 1199-1204.
- [9] 罗育明, 张建仁, 张旭辉, 等. 自密实混凝土加固碳化混凝土界面剪切性能试验 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2019, 39 (2): 65-72.
- [10] 蒋俊, 孙珂, 陈健, 等. 缓蚀剂辅助再碱化技术对碳化钢筋混凝土的修复 [J]. 腐蚀与防护, 2019, 40 (4): 254-260.
- [11] 唐官保, 姚燕, 王玲, 等. 应力作用下混凝土碳化深度预测模型 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (2): 304-308.
- [12] 杨文瑞, 袁娇, 冯中敏, 等. 蒸养高温养护对混凝土中 FRP 筋吸湿行为影响研究 [J]. 建筑结构, 2019, 49 (22): 101-105.
- [13] 丁杨, 周双喜, 王中平, 等. 多场耦合循环作用下屋面保温材料耐候性能 [J]. 建筑材料学报, 2019 (4): 638-644.
- [14] 苏滔, 陈彝, 农喻媚, 等. 含侵蚀性 CO₂ 地下水环境下混凝土的碳化试验方法对比分析 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (10): 51-61.
- [15] 李永靖, 潘铖, 张淑坤, 等. 冻融-碳化作用下掺粉煤灰混凝土强度劣化试验 [J]. 非金属矿, 2019, 42 (1): 59-61.