



建筑材料学报
Journal of Building Materials
ISSN 1007-9629, CN 31-1764/TU

《建筑材料学报》网络首发论文

题目: 基于 GM(1, 1)-Markov 模型盐雾腐蚀对纤维混凝土耐久性能的影响
作者: 于剑桥, 乔宏霞, 朱飞飞, 王新科
收稿日期: 2021-08-09
网络首发日期: 2021-11-20
引用格式: 于剑桥, 乔宏霞, 朱飞飞, 王新科. 基于 GM(1, 1)-Markov 模型盐雾腐蚀对纤维混凝土耐久性能的影响[J/OL]. 建筑材料学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20211119.0953.004.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 GM(1, 1)-Markov 模型盐雾腐蚀对纤维混凝土耐久性能的影响

于剑桥¹, 乔宏霞^{1,2}, 朱飞飞¹, 王新科¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要:以玄武岩-PVA 纤维体积掺量为变化参数, 对纤维混凝土进行共计 200d 周期的室内盐雾腐蚀加速试验, 通过抗压耐蚀系数 K_f 、相对质量评价参数 ζ_1 、相对动弹性模量评价参数 ζ_2 及 SEM 图像从宏观、微观两方面进行了混凝土耐久性损伤劣化评价分析, 建立 GM(1,1)-Markov 模型对混凝土剩余寿命进行预测。研究结果表明: 在盐雾环境下, 纤维混凝土 K_f 先上升后下降, ζ_1 波动性较大, ζ_2 可作为评价混凝土损伤劣化的决定性因素。GM(1,1)-Markov 模型与实测数据吻合较好, 最佳配比为 B0.10P0.05, 该配比试件在盐雾环境下服役时间最长, 为 680d。

关键词: 盐雾环境; 损伤劣化; GM(1,1)-Markov; 纤维混凝土

Effect of salt spray corrosion on durability performance of fiber concrete based on GM(1,1)-Markov model

YU Jianqiao¹, QIAO Hongxia^{1,2}, ZHU Feifei¹, WANG Xinke¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Western Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation Engineering Research Center, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking the volume content of basalt-PVA fiber as the variable parameter, the fiber concrete was subjected to a 200d cycle indoor salt spray accelerated corrosion test. Through the compressive corrosion resistance coefficient K_f , relative quality evaluation parameter ζ_1 , relative dynamic elastic modulus evaluation parameter ζ_2 and SEM images, the durability and damage deterioration were evaluated and analyzed from both macroscopic and microscopic aspects, and the GM(1,1)-Markov model was established to predict the remaining life of the concrete. The results show that in the salt spray environment, the fiber concrete K_f increases first and then decreases, ζ_1 fluctuates greatly, and ζ_2 can be used as the decisive factor for evaluate the damage and deterioration of concrete. The GM(1,1)-Markov model agrees well with the measured data, and the best ratio is B0.10P0.05. The specimen with this ratio has the longest service time under the salt spray environment, which is 680d.

收稿日期: 2021-08-09; 修订日期: 2021-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51168031, 51868044)

第一作者: 于剑桥(1995-), 男, 河北围场人, 兰州理工大学硕士生. E-mail: 1815200102@e.gzhu.edu.cn

通讯作者: 乔宏霞(1977-), 女, 山西应县人, 兰州理工大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: qiaohx7706@163.com

Key words: salt spray environment; damage and deterioration; GM(1,1)-Markov; fiber concrete

我国西部盐湖中富含碳酸盐、硫酸盐、氯盐等多种腐蚀性离子，受当地环境特点极易卷入空中形成大气盐雾。与内陆地区建筑物相比，盐雾中的硫酸根离子对混凝土材料剩余耐久寿命影响巨大。目前，将纤维掺入混凝土中提高其抗硫酸盐侵蚀能力这一做法得到了建筑行业普遍认可^[1-2]。Guo 等^[3]指出，玄武岩纤维可以发挥桥联基体功能使水泥砂浆具有优异的抗腐蚀性能。王振山等^[4]证明，0.1%体积掺量的玄武岩纤维，可以减缓混凝土在硫酸镁溶液中孔隙率的增加速度。其他研究^[5]还报道了在混凝土中加入 PVA 纤维可确保其具有很强的抗硫酸盐侵蚀能力。此外，由于纤维间距较近的多种纤维试样比单纤维试样具有更高的耐久性能^[6]，因此可以对混杂纤维混凝土关于抗硫酸盐侵蚀的试验进行更深一步的研究。

盐雾腐蚀对混凝土材料来说是一个长期过程，判断混凝土能否在设计参考期内完成预定的使用功能尤为重要。GM(1,1)模型以“小样本、差信息”的不确定系统为研究对象，为混凝土寿命预测提供了强有力的技术支持。然而，传统 GM(1,1)模型考虑的因素过于单一，预测精度有一定缺陷^[7]。鉴于此，本文以玄武岩-PVA 纤维混凝土为研究对象，进行 200d 盐雾腐蚀加速试验。根据耐久性试验数据及扫描电镜(SEM)观察到的腐蚀产物对混凝土损伤劣化规律进行分析，并建立了一种新的动态分析模型 GM(1,1)-Markov 对耐久性指标进行寿命预测，最终评估纤维混凝土抗盐雾腐蚀的可靠性。

1 试验

1.1 原材料与配合比

表 1 胶凝材料化学组成

Material	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	IL	MgO	MnO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂
Cement	9.2	50.5	1.2	1.8	3.3	0.3	2.1	4.2	26.5
Fly ash	31.2	6.0	1.5	2.2	1.1	0.2	0.6	6.5	48.5

表 2 察尔汗盐湖卤水腐蚀离子含量测试结果

Project	Cation content (mg / kg)			Anion content (mg / kg)				pH
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	CO ₃ ²⁻	CL ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	
Salt lake brine	5840	397	22887	59	81016	15648	181	9.60

试验采用甘肃祁连山水泥厂提供的 P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥，安定性合格；粉煤灰选

用 II 级粉煤灰，其比表面积为 $440\text{m}^2/\text{kg}$ ，胶凝材料化学组分见表 1；细骨料采用天然河砂，细度模数为 2.73；粗骨料为表观密度 $2780\text{kg}/\text{m}^3$ 的碎石子；采用聚羧酸系高效减水剂，最大减水率为 20%；所用水是自来水；单丝分散玄武岩纤维(basalt fiber,BF)长度为 12mm，等效直径 0.02mm,弹性模量 100GPa,抗拉强度不低于 4500MPa，密度为 $2700\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。束状单丝聚乙烯醇纤维(Polyvinyl alcohol fiber,PVA)密度为 $1300\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,长 12mm，等效直径 20 μm ，抗拉强度 1830MPa,弹性模量 40GPa。通过称量滴定法测得察尔汗盐湖卤水中的离子含量，具体结果见表 2，根据腐蚀离子 SO_4^{2-} 的浓度在实验室配置浓度为 23g/L 的硫酸钠溶液；为了便于试验数据处理及试验参数对比，试验设计混凝土强度等级统一为 C40，水胶比为 0.4，各配合比及混凝土抗压强度详见表 3。试件编号为“OPC”表示普通混凝土；纤维混凝土试件用“B-P”表示：B 表示 BF 体积分数，P 表示 PVA 体积分数。如“B0.05P0.05”表示 BF 体积掺量为 0.05%、PVA 体积掺量为 0.05%的试件。

表 3 标准混凝土配合比

Table 3 Standard concrete mix proportion

Number	Mixture proportion/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)						Compressive strength/MPa
	Cement	Sand	Stone	Water	Fly ash	Superplasticizer	
OPC	400	635	1165	200	100	0.65	44.8
B0.05P0.05	400	635	1165	200	100	0.65	46.5
B0.05P0.10	400	635	1165	200	100	0.65	46.8
B0.05P0.15	400	635	1165	200	100	0.65	45.2
B0.10P0.05	400	635	1165	200	100	0.65	47.0
B0.10P0.10	400	635	1165	200	100	0.65	47.2
B0.10P0.15	400	635	1165	200	100	0.65	45.0
B0.15P0.05	400	635	1165	200	100	0.65	45.5
B0.15P0.10	400	635	1165	200	100	0.65	44.7
B0.15P0.15	400	635	1165	200	100	0.65	43.2

1.2 试验过程及方法

采用图 1 所示流程图进行室内盐雾腐蚀试验，混凝土均为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体试件，各组试块在标准状态下养护至 28d 后放入 YSYW-60 型盐水喷雾机中开始试验。每隔 20 次循环试验后测量立方体试件的质量、相对动弹性模量和抗压强度。在 200 次试验

结束后，选取部分混凝土样品碎片，进行扫描电镜观察。

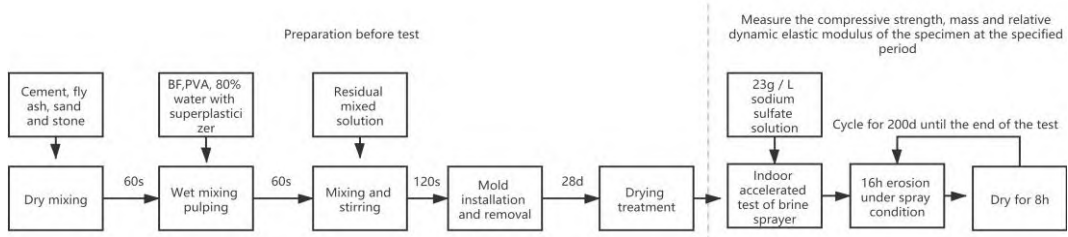


图 1 混凝土室内盐雾腐蚀试验流程图

Fig. 1 Flow chart of indoor salt spray corrosion test of concrete

耐久性评价参数对于评估混凝土材料在盐雾腐蚀环境中的损伤劣化程度至关重要，可以利用抗压耐蚀系数 K_f 、相对质量评价参数 ξ_1 、相对动弹性模量评价参数 ξ_2 进行评价。当抗压耐蚀系数达到 75%、质量损失率达到 5% 或相对动弹性模量损失超过 40% 时表明混凝土材料耐久性失效，具体评价参数计算公式由式(1)~(4)所示：

$$K_f = \frac{f_{cn}}{f_{c0}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\xi_1 = \frac{m_n/m_0 - 0.05}{0.95} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_r = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} = \frac{v_n^2}{v_0^2} \quad (3)$$

$$\xi_2 = \frac{E_r - 0.6}{0.4} \times 100\% \quad (4)$$

式中： f_{cn} 、 f_{c0} 分别为 n 次试验周期后和初始阶段的抗压强度，MPa； m_n 、 m_0 分别表示 n 次试验周期后和初始阶段测得的试件质量，kg； E_r 表示相对动弹性模量； E_{dn} 、 E_{d0} 分别表示 n 次试验周期后和初始阶段的动弹性模量，GPa； v_n 、 v_0 分别表示 n 次试验周期后和初始阶段测得的超声波速，m/s。

2 耐久性试验结果分析

图 2 为盐雾侵蚀作用下纤维混凝土抗压耐蚀系数 K_f 随时间增加的变化情况。由图 2(a) 可知，OPC 组 200d 后 K_f 降至 78.27%，损伤最为严重。纤维混凝土试件的 K_f 早期增长幅度较 OPC 组更大，后期下降速率也越低。图 2(b) 表明，混掺纤维体积分数之和在 0.20% 时，试件的 K_f 早期增长最为显著。其中 B0.10P0.10 组在 80d 时 K_f 为 105.29%，远高于其他试件。对比图 2(c) 可以看出，纤维总掺量大于 0.20% 时，对混凝土 K_f 增益效果将大幅度降低。其中 B0.15P0.15 组在 200d 时 K_f 降至 80.25%，仅比 OPC 组高出 1.98%，增益效果最差。这和 Wang 等^[8] 试验结果类似，是由于过高体积掺量的纤维不易在混凝土内部搅拌均匀，容易形成新的缺陷，难以减缓侵蚀离子对水泥基体造成的损害。

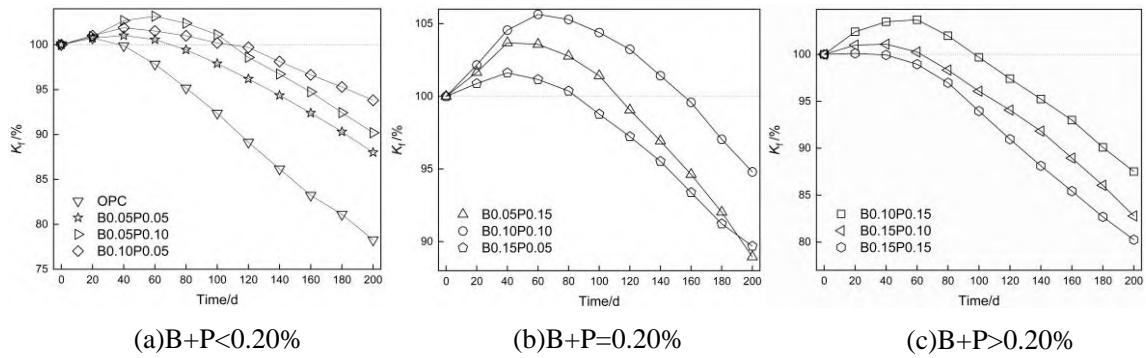


图 2 抗压耐蚀系数经时变化曲线

Fig. 2 Time variation curve of compressive corrosion resistance coefficient

图 3 为纤维混凝土相对质量评价参数 ζ_1 随盐雾侵蚀时间的变化关系。对比图 3(a)~(c) 可知, 各组试件的 ζ_1 波动性很大, 掺有纤维的试件在很长一段侵蚀龄期内 ζ_1 均大于 100%。OPC 组在 200d 时为 8.85%, 损伤最为严重。而 B0.10P0.05 组劣化趋势远低于其他试件, ζ_1 早期随时间不断增长, 在 80d 时达到最大峰值 151.86%, 远高于 OPC 组。这是由于集中在混凝土内部孔隙中的硫酸盐侵蚀产物具有膨胀性, 产生的张力使水泥剥落会导致混凝土试件的质量减小^[9]。而纤维可以良好地分担孔隙中积存的膨胀应力, 使得混凝土进一步水化, 密实度持续增加, 因此 ζ_1 得到有效提升。

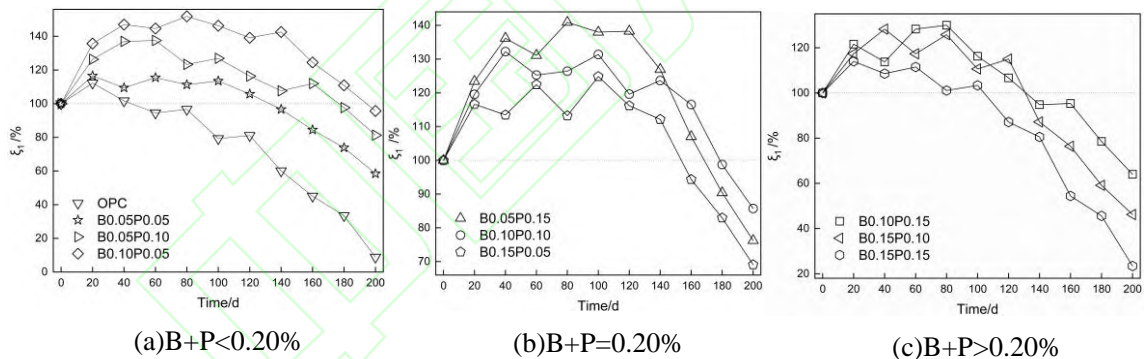


图 3 相对质量评价参数经时变化曲线

Fig. 3 Time variation curve of relative quality evaluation parameters

图 4 为纤维混凝土相对动弹性模量评价参数 ζ_2 在不同盐雾侵蚀龄期下的变化。对比图 4(a)~(c) 可知, 盐雾侵蚀对混凝土 ζ_2 的影响类似于对 K_f 的影响, 经历了增长和下降两个阶段。乔宏霞等^[10]通过 COMSOL 模拟表明, 由于盐雾侵蚀环境早期沉积的硫酸盐类晶体提高了混凝土的密实度, 因此相对动弹性模量有所增加。随着侵蚀不断进行, 生成的膨胀产物和硫酸盐结晶促使微裂缝发展, 最终导致相对动弹性模量下降。OPC 组在 180d 时已经达到失效标准, 而掺纤维的混凝土 200d 时仍具有服役能力。其中 B0.10P0.05 组为最佳掺量, 在 200d 时 ζ_2 仅降至 68.15%。此外, 随着纤维总体积掺量的提高, ζ_2 的提升效果逐渐降低。以

B0.15P0.15 组为例，其 ξ_2 在 200d 时降至 0.26%，已接近耐久性破坏状态。这表明虽然在混凝土中引入混杂纤维可以提高其抗盐雾侵蚀的能力，但需要找出最佳掺量。纤维含量的增加可以逐渐缩小相互之间的平均间距，当达到最小值时纤维可以形成最佳搭接长度的三维空间结构。因此在最佳纤维掺量下，混凝土抵抗盐雾侵蚀能力最强。但是当纤维掺量逐步超过最佳值时，纤维之间会发生团聚现象并造成有效间距的增长，对混凝土的密实度产生不利影响，最终导致抗盐雾侵蚀性能下降。

通过耐久性评价参数可知，在盐雾侵蚀试验结束后，各组试件有出现相对动弹性模量低于 60% 的试块，但相对质量和抗压耐蚀系数仍超过 95% 和 75%。因此 K_f 和 ξ_1 只能作为盐雾环境下混凝土耐久性劣化的两个参考因素，而由相对动弹性模量 E_r 所推导的 ξ_2 可作为混凝土盐雾侵蚀试验的关键指标。

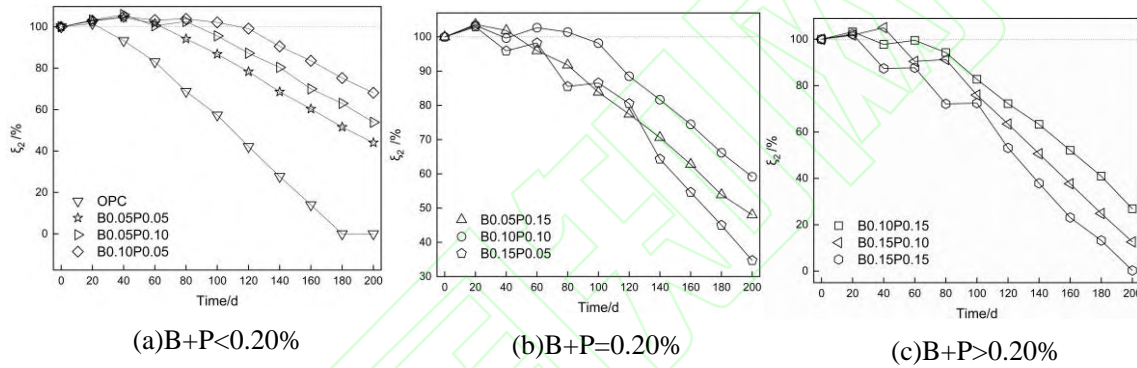
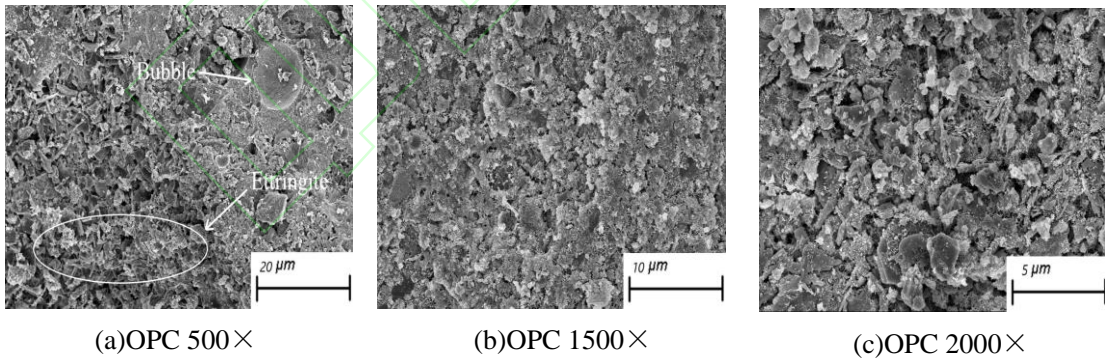


图 4 相对动弹性模量评价参数经时变化曲线

Fig. 4 Time variation curve of relative dynamic elastic modulus evaluation parameters



(a)OPC 500×

(b)OPC 1500×

(c)OPC 2000×

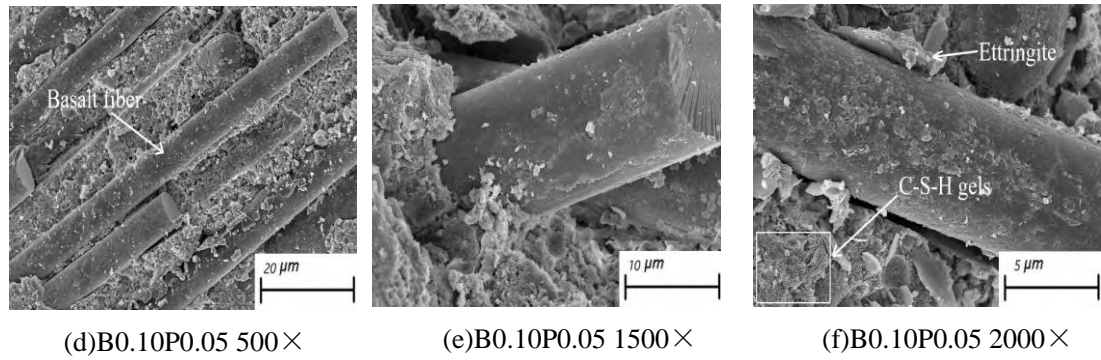


图 5 200d 盐雾侵蚀作用下混凝土 SEM 形貌图

Fig. 5 SEM micrographs of concrete under 200 days salt spray erosion

选取 200d 盐雾腐蚀加速试验后的 OPC 和 B0.10P0.05 样品碎片进行扫描电镜分析，普通混凝土和纤维混凝土微观形貌如图 5 所示。由图 5(a)~(c)可见，OPC 表面存在大量多孔微观结构和爆米花状、短杆状腐蚀产物松散分布，并带有大厚度的微裂纹。腐蚀产物大多为钙矾石和石膏，此类物质一方面力学性能不同于水泥水化产物，这将影响混凝土材料的抗压强度。另一方面腐蚀产物会产生不均匀的附加应力于混凝土内部，引起巨大的膨胀应变，从而导致裂缝大量生成，造成耐久性损伤。由图 5(d)~(f)可见，B0.10P0.05 的结构明显比 OPC 的结构紧密。从图 5(d)可以看到纤维均匀定向分布在基体中，形成大量微加强筋。从图 5(e)可见，纤维与基体间存在很强的粘长效应，使应力均匀分散在纤维单丝上，界面结合强度的提高带来了较大的纤维桥接能力，从而增强了混凝土的抗压强度，抑制了裂缝的产生和发展。尽管也在图 5(f)中观察到少量钙矾石等腐蚀产物，但明显可以看出 B0.10P0.05 内部存在致密的 C-S-H 凝胶。这说明掺有纤维的混凝土对盐雾腐蚀的耐受性比普通混凝土更好。

3 基于 GM(1,1)-Markov 模型推导

对混凝土耐久性劣化时间的准确预测有助于在建筑工程中做出重要决策，灰色系统理论已成为解决离散数据和不完全信息不确定问题的一种有效方法。假设 $X^{(0)}(t) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$ 是不规则分布的原始数据序列，进行累加生成运算处理后可以得到 $X^{(1)}(t)$ 如下：

$$X^{(1)}(t) = \left\{ \sum_{i=1}^1 X^{(0)}(i), \sum_{i=1}^2 X^{(0)}(i), \dots, \sum_{i=1}^n X^{(0)}(i) \right\} \quad (5)$$

GM(1,1)模型可用式(6)所示一阶微分方程表示：

$$X^{(0)}(t) + aZ^{(1)}(t) = u \quad (6)$$

式中： a 为发展系数； u 为灰色输入系数； $Z^{(1)}(t)$ 为关于 $X^{(1)}(t)$ 的背景值。

$Z^{(1)}(t)$ 可由式(7)计算得到：

$$Z^{(1)}(t) = 0.5 \times (X^{(1)}(t) + X^{(1)}(t+1)) \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)，通过拉普拉斯逆变换，即可得到 GM(1,1)模型的通解如下：

$$\hat{X}^{(1)}(t) = (X^{(0)}(1) - u/a) e^{-a(t-1)} + u/a \quad (8)$$

通过式(9)~(11)可以确定系数 a 和 u 的数值：

$$[a \quad u]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_n \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(1) & -Z^{(1)}(2) & \cdots & -Z^{(1)}(n) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}^T \quad (10)$$

$$Y_n = [X^{(0)}(2) \quad X^{(0)}(3) \quad \cdots \quad X^{(0)}(n)]^T \quad (11)$$

最终经过式(12)进行累减还原，即可获得 GM(1,1)预测值：

$$\hat{X}^{(0)}(t) = \hat{X}^{(1)}(t) - \hat{X}^{(1)}(t-1) \quad (12)$$

单一的 GM(1,1)模型不能将盐雾腐蚀环境下所有影响因素都考虑在内，当试验数据随机性较大时，GM(1,1)的预测精度并不理想。因此本文将 Markov 链与 GM(1,1)相结合，以提高预测精度。新模型定义为 GM(1,1)-Markov，首先通过计算得到 GM(1,1)预测值和原始数据之间的残差并建立序列预测模型，然后利用 Markov 转移矩阵判断残差的转移行为，最后根据修正后的残差得出 GM(1,1)-Markov 预测值。

由于残差预测模型的推导步骤与 GM(1,1)模型推导过程相似，限于篇幅有限，详细计算过程参考文献^[11]，在此直接得出残差预测模型 $\hat{\varepsilon}^{(1)}(t)$ 及残差预测值 $\hat{\varepsilon}^{(0)}(t)$ 如下：

$$\begin{cases} \hat{\varepsilon}^{(1)}(t) = \left(\varepsilon^{(0)}(2) - \frac{u}{a} \right) e^{-a(t-1)} + \frac{u}{a} \\ \hat{\varepsilon}^{(0)}(t) = \hat{\varepsilon}^{(1)}(t) - \hat{\varepsilon}^{(1)}(t-1) \end{cases} \quad (13)$$

对于残差中存在的一些规律性信息，可建立 Markov 转移矩阵规定其状态：残差是正数时为状态 1，是负数时为状态 2，根据状态的正负性可得到状态转移概率如下：

$$P_{ij} = \frac{M_{ij}}{M_i}, \quad i = 1, 2; j = 1, 2 \quad (14)$$

式中： P_{ij} 是从状态 i 到状态 j 的转移概率； M_{ij} 是从状态 i 到状态 j 的过渡时间； M_i 是属于第 i 个状态的数据数量。

由状态转移概率可推出状态概率转移矩阵如式(15)所示：

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

最终可获得 GM(1,1)-Markov 模型 $\hat{Y}^{(1)}(t)$ 及预测值 $\hat{Y}^{(0)}(t)$ 如式(16)所示：

$$\begin{cases} \hat{Y}^{(1)}(t) = \hat{X}^{(1)}(t) + 1_{\{P(+)\geq P(-)\}} \hat{\varepsilon}^{(1)}(t) - 1_{\{P(+)<P(-)\}} \hat{\varepsilon}^{(1)}(t) \\ \hat{Y}^{(0)}(t) = \hat{Y}^{(1)}(t) - \hat{Y}^{(1)}(t-1) \end{cases} \quad (16)$$

4 预测结果分析

本节选取耐久性能较好的 B0.10P0.05 组试验数据为例，使用 GM(1,1)-Markov 模型对其相对动弹性模量 E_r 进行寿命预测。可以通过式(17)验证两种模型的拟合精度，图 6 为两种模型拟合结果的对比。

$$RE = |e(i)| \quad (17)$$

式中：当拟合值为 GM(1,1)模型推导结果时， $e(i) = |X^{(0)}(t) - \hat{X}^{(0)}(t)|$ ；当拟合值为 GM(1,1)-Markov 模型推导结果时， $e(i) = |X^{(0)}(t) - \hat{Y}^{(0)}(t)|$ 。

通过对比可以看出，Markov 的引入明显提高了 GM(1,1)模型的预测精度。改进后的模型能够较好地匹配试验数据的波动性变化，其拟合值的相对误差整体上明显低于 GM(1,1)模型。准确的预测将有助于提前对处于盐雾腐蚀环境中的纤维混凝土进行检测和维护。

为了进一步了解其余配比混凝土的劣化趋势，通过 GM(1,1)-Markov 模型对各组混凝土试样的 E_r 进行剩余寿命预测结果如图 7 所示。结果表明，OPC 组在 180d 时遭到破坏，这和试验过程中 E_r 的数据相吻合，侧面印证了 GM(1,1)-Markov 模型具有很高的预测精度。B0.15P0.15 在 220d 达到失效标准，这说明尽管混掺 BF 和 PVA 可以提高混凝土在盐雾环境中的服役寿命，但总体积掺量不宜过多。盐雾腐蚀环境下耐久性能最好的一组为 B0.10P0.05，服役时长为 680d，远超其余试件。

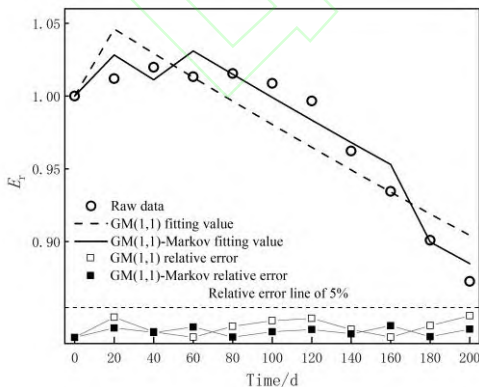


图 6 拟合效果比较

Fig. 6 Comparison of fitting effects

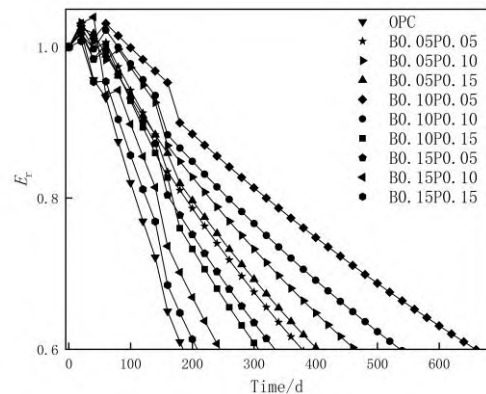


图 7 各组试验剩余寿命预测

Fig.7 Residual life prediction of each group

5 结论

(1)本文进行了纤维混凝土的盐雾腐蚀加速试验,腐蚀溶液浓度参考了察尔汗盐湖卤水中 SO_4^{2-} 的含量,较好的还原了西部盐湖地区混凝土材料的破坏过程,明确了混掺玄武岩纤维和 PVA 纤维对混凝土在该地区耐久性能能够显著提升的可行性。

(2)混杂纤维可以延缓 SO_4^{2-} 离子对混凝土内部的侵蚀速率,从而提高混凝土的抗盐雾侵蚀能力。当玄武岩纤维体积分数为 0.10%、PVA 纤维体积分数为 0.05%时,混凝土在盐雾环境中表现的耐久性能最佳。当总体积达到 0.30%时,纤维对混凝土耐久性提升效果显著降低。

(3)将相对动弹性模量 E_r 为关键劣化因素,所建立的 GM(1,1)-Markov 动态模型能够有效预测纤维混凝土损伤劣化趋势。新的动态分析模型预测出的剩余寿命和试验情况更为相符。

参考文献:

[1]张广泰,张晓旭,田虎学.盐冻环境下混杂纤维锂渣混凝土梁受弯承载力研究[J].建筑材料学报,2020,23(04):831-837.

ZHANG Guangtai,ZHANG Xiaoxu,TIAN Huxue.Bending bearing capacity of hybrid fiber lithium slag concrete beam under salt freezing environment.Journal of Building Materials,2020, 23(04):831-837.(in Chinese)

[2]MENG C,LI W,CAI L,et al.Experimental research on durability of high-performance synthetic fibers reinforced concrete: Resistance to sulfate attack and freezing-thawing[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262.

[3]GUO X, XIONG G. Resistance of fiber-reinforced fly ash-steel slag based geopolymer mortar to sulfate attack and drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2021, 269.

[4]王振山,李浩炜,吴波,等.玄武岩纤维混凝土的耐碱腐蚀性及其力学性能试验研究[J].应用力学学报,2019,36(05):1088-1095+1258-1259.

WANG Zhenshan,LI Haowei,WU Bo,et al. Experimental research on durability and mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete in sodium hydroxide environment[J]. Journal of applied mechanics, 2019,36 (05): 1088-1095 + 1258-1259.(in Chinese)

[5]GUO L,WU Y,XU F,et al. Sulfate resistance of hybrid fiber reinforced metakaolin geopolymer composites[J]. Composites Part B, 2019, 183.

[6]王力,徐礼华,邓方茜,等.波纹型钢纤维-混杂纤维混凝土界面黏结性能[J].建筑材料学报,2020,23(04):865-874.

- WANG Li,XU Lihua,DENG Fangqian,et al. Interfacial bonding performance between corrugated steel fiber and hybrid fiber concrete matrix[J].Journal of Building Materials,2020,23(04):865-874.(in Chinese)
- [7]YOUSUF M, AI B, AVCI E. A modified GM(1,1) model to accurately predict wind speed[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 43 : 100905.
- [8]WANG Q, YI Y, MA G,et al. Hybrid effects of steel fibers, basalt fibers and calcium sulfate on mechanical performance of PVA-ECC containing high-volume fly ash[J].Cement and Concrete Composites, 2019, 97, 357-368.
- [9]CHENG H,LIU T,ZOU D,et al. Compressive strength assessment of sulfate-attacked concrete by using sulfate ions distributions[J]. Construction and Building Materials, 2021, 293, 123550.
- [10]乔宏霞,乔国斌,路承功.硫酸盐环境下基于 COMSOL 混凝土损伤劣化模型[J].华中科技大学学报(自然科学版),2021,49(03):119-125.
- QIAO Hongxia,QIAO Guobin,LU Chenggong. Damage and deterioration model of concrete based on COMSOL in sulfate environment[J].Journal of Huazhong University of science and Technology (Natural Science Edition), 2021,49 (03): 119-125.(in Chinese)
- [11]JIA Z,ZHOU Z,ZHANG H,et al. Forecast of coal consumption in Gansu Province based on Grey-Markov chain model[J]. Energy, 2020, 199.