

# 西部盐雾腐蚀环境下基于 Wiener 模型的 纤维混凝土损伤劣化研究

于剑桥<sup>1</sup>, 乔宏霞<sup>1,2</sup>, 朱飞飞<sup>1</sup>, 王新科<sup>1</sup>

(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:** 结合我国西部地区察尔汗盐湖特点, 通过配制与盐湖卤水相同  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度的腐蚀溶液, 以钢纤维 (STF) 体积掺量 (1%、2%) 和玄武岩纤维 (BF) 体积掺量 (0.1%、0.2%) 为变化参数, 对混凝土进行共计 200 d 周期的室内盐雾腐蚀加速试验, 模拟纤维混凝土在盐湖地区的耐久性损伤劣化。采用随机效应约束条件下建立了 Wiener 相对动态弹性模量退化模型, 对混凝土剩余寿命进行可靠度预测。结果表明: 钢纤维掺量为 2%、玄武岩纤维掺量为 0.1% 的混凝土耐久性损伤变化量最小, 所预测的剩余寿命为 354 d; 掺入适量的钢-玄武岩纤维能够有效改善混凝土在盐雾腐蚀环境下的耐久性损伤劣化过程; 改进的 Wiener 模型预测结果与实测结果吻合较好, 具有较高的可靠性。研究成果可为西部盐湖地区土木建设提供理论参考依据。

**关键词:** 纤维混凝土; 盐雾腐蚀; 损伤劣化; Wiener 模型

中图分类号: TV413+.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)04-0185-09

## Damage and deterioration mechanism of fiber concrete in salt spray corrosion environment in west China based on Wiener model

YU Jianqiao<sup>1</sup>, QIAO Hongxia<sup>1,2</sup>, ZHU Feifei<sup>1</sup>, WANG Xinke<sup>1</sup>

(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:** Based on the characteristics of Chaerhan Salt Lake in west China, the corrosion solution with the same  $\text{SO}_4^{2-}$  concentration as the salt lake brine was prepared, and the volume content of steel fiber (STF) (1% and 2%) and basalt fiber (BF) (0.1% and 0.2%) were used as variable parameters in the laboratory accelerated salt spray corrosion test for a total period of 200 days to simulate the durability damage deterioration of fiber reinforced concrete in the salt lake area. In order to provide a theoretical reference for the civil engineering construction in this area, a relative dynamic elastic modulus degradation Wiener model was established with random effect constraints, with which the residual life of the concrete was predicted and the reliability of the prediction result was evaluated. The results show that when the STF content is 2% and BF content is 0.1%, the change of concrete durability damage is the smallest, and the predicted residual life of the fiber concrete is 354 d. Adding appropriate amount of steel and basalt fiber can effectively improve the durability damage deterioration of the concrete in salt spray corrosion environment. The prediction results of the improved Wiener model are in good agreement with the measured data, which indicates that the model is reliable.

**Key words:** fiber reinforced concrete; salt spray corrosion; damage deterioration; Wiener model

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51168031、51868044)

作者简介: 于剑桥 (1995-), 男, 河北承德人, 硕士研究生, 研究方向为混凝土耐久性。

通讯作者: 乔宏霞 (1977-), 女, 山西朔州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为混凝土耐久性 & 寿命预测。

## 1 研究背景

我国西部地区存在辽阔的盐湖带,由于当地环境具有昼夜温差大、风大风多、太阳光照射强烈的特点,盐湖中的碳酸盐、硫酸盐、氯盐等腐蚀性盐类极易卷入空气中形成大气盐雾<sup>[1]</sup>。当大气盐雾与混凝土材料接触时,会对结构性能造成腐蚀破坏并导致其使用寿命缩短。调查显示,在西部盐湖地区服役的建筑物,由于混凝土受到盐雾侵蚀平均寿命仅有十几年,需要频繁修补才能延长使用寿命<sup>[2]</sup>。盐湖附近的八盘峡大坝混凝土隧洞,因为长期处于硫酸盐环境形成的硫铝土矿之中,这对混凝土结构造成了严重的破坏<sup>[3]</sup>。新疆克州某节水防渗渠道在项目交工后不到3年时间,因盐胀引起了大范围开裂,最大开裂宽度达62 mm,最长裂缝有17.5 m<sup>[4]</sup>。可见盐雾腐蚀环境下的混凝土耐久性能损伤劣化速度明显高于内陆地区,尤其是盐雾中的硫酸根离子对混凝土结构使用寿命影响巨大<sup>[5]</sup>。硫酸盐侵蚀作为混凝土腐蚀的主要因素之一,每年给全球建筑领域造成的经济损失高达数十亿美元,促使土木工程界的科研人员关于硫酸盐对混凝土侵蚀机理以及耐久性能的影响进行了大量的试验和分析研究。

针对硫酸盐侵蚀混凝土的问题,研究人员<sup>[6-8]</sup>发现将纤维掺入混凝土中能够有效提高其抗硫酸盐侵蚀的能力。纤维作为一种高强度、耐用、轻质的改性材料,可以增强混凝土的密实度,延缓有害离子的渗透过程<sup>[9]</sup>。Faiz<sup>[10]</sup>指出,颗粒纤维、连续纤维、短纤维可用于混凝土材料中,能够提高其抗弯、抗冲击性能,并改变其破坏模式。Kheradmand等<sup>[11]</sup>认为,纤维的增强机制是通过纤维的桥接效应阻止微观和宏观裂纹的产生和生长。刘曙光等<sup>[12]</sup>通过扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)观察发现,在硫酸钠溶液浸泡350 d后,掺有PVA纤维的试件内部钙矾石聚集在一起并未发生脱落,PVA纤维数量的增加可强化约束效果。牛荻涛等<sup>[13]</sup>研究表明钢纤维可以显著改善混凝土内部孔结构,并通过XRD(X-rays diffraction)图谱发现钢纤维混凝土在硫酸盐干湿加速侵蚀150次后内部未有芒硝生成,且石膏衍射峰强度与普通试件相比大幅度降低,未产生破坏性晶体。张兰芳等<sup>[14]</sup>发现改善玄武岩纤维的掺量能优化混凝土耐硫酸盐腐蚀性能,其最佳掺量为0.3%。混掺纤维混凝土较单掺纤维相比具有潜在的优势,国内外对单掺纤维混凝土抗硫酸盐侵蚀的报道较多,而对混掺纤维混凝土的相关研究较少。

为了保证混凝土材料在盐雾腐蚀环境下的安全性,有必要判断混凝土是否在设计参考期内完成了预定的使用功能,混凝土耐久性的寿命预测已成为土木工程研究的热点<sup>[15-17]</sup>。目前对纤维混凝土的寿命预测模型有确定型模型、Cl<sup>-</sup>离子扩散模型、概率退化模型等。概率退化模型能够有效捕捉失效机理和外环境引起劣化过程的不确定性。其中基于Wiener过程的方法适用于混凝土由环境侵蚀、内部材料缺陷引起的非单调退化过程,已逐渐成为混凝土损伤劣化数据处理热点模型。然而,现有的Wiener退化模型主要适用于混凝土线性劣化过程,并对不同配比的试件要求具有相同的漂移参数,具有一定的局限性。鉴于此,本文通过配制和察尔汗盐湖卤水相同浓度的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>离子腐蚀溶液,开展不同纤维掺量的混凝土室内盐雾腐蚀加速试验。根据试验结果对混凝土损伤劣化规律进行分析,利用改进后的Wiener模型来进行耐久性评价参数可靠度寿命预测,最终评估其模拟纤维混凝土抗盐雾腐蚀的可靠性。

## 2 材料与方法

### 2.1 原材料及配合比

水泥选用阿尔博波特兰P.O 42.5硅酸盐水泥,安定性合格;粉煤灰选用祁连山水泥商砼有限公司提供的Ⅱ级粉煤灰,其比表面积为440 m<sup>2</sup>/kg,胶凝材料化学组分见表1。

表1 试验用胶凝材料化学组成 W<sub>i</sub>/%

| 化学组分                           | 水泥    | 粉煤灰   |
|--------------------------------|-------|-------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.21  | 31.20 |
| CaO                            | 50.49 | 6.00  |
| MgO                            | 3.26  | 1.12  |
| K <sub>2</sub> O               | 1.20  | 1.55  |
| IL                             | 1.80  | 2.20  |
| MnO                            | 0.30  | 0.20  |
| SiO <sub>2</sub>               | 26.48 | 48.50 |
| SO <sub>3</sub>                | 2.11  | 0.62  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.24  | 6.50  |

为了改善胶凝材料的工作性能,使用甘肃省第五建设集团有限责任公司提供的聚羧酸系高效减水剂,减水剂掺量为0.13%;试验所用粗骨料为表观密度为2 780 kg/m<sup>3</sup>的碎石子,细骨料为细度模数为2.73的河砂;水选自西部先进土木工程材料创新中心;混掺钢纤维(steel fiber, STF)和玄武岩纤

维(basalt fiber, BF)可提高混凝土延性、韧性和抗硫酸盐侵蚀性,并控制裂缝的生成,两种纤维主要物理性能参数见表2。

表2 试验用纤维主要物理性能参数

| 参数                       | 钢纤维  | 玄武岩纤维 |
|--------------------------|------|-------|
| 长度/mm                    | 30   | 12    |
| 直径/mm                    | 50   | 20    |
| 弹性模量/GPa                 | 200  | 90    |
| 抗拉强度/GPa                 | 1270 | 4500  |
| 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 7800 | 2700  |
| 形状                       | 波浪形  | 单丝分散  |

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3,根据腐蚀离子SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的浓度在实验室配制浓度为23 g/L的硫酸钠溶液;试验设计混凝土强度等级为C40,经过大量试配调整,其配合比见表4。

2.2 试验过程及方法

参照表4中的配合比,根据《纤维混凝土结构技术规程》(CECS 38:2004)<sup>[18]</sup>,采用如图1所示的室内加速试验循环制度。先将称量好的水泥、粉煤灰、砂、石、钢纤维倒入搅拌机内进行干拌。高效减水剂在倒入搅拌机前与水混合,60 s后添加80%混

合溶液转为湿拌。再采用边搅拌边撒入的方式,手动将玄武岩纤维均匀撒至搅拌机内,以保证纤维均匀分散在混凝土骨料中。最后加入剩余溶液充分搅拌120 s,待搅拌完成后将拌合物装入100 mm×100 mm×100 mm模具中,经振动台机械震实后间隔24 h拆模处理,放入标准养护室养护28 d。养护完成后将干燥处理的试件放入盐水喷雾机中进行干湿交替试验,盐雾采用23 g/L的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液,试验设计的循环制度为:试块在温度为(35±2)℃,湿度为95%的喷雾状态下侵蚀16 h,在烘箱内以60℃干燥8 h,每24 h为1次试验周期,每隔20 d测量1次试验数据,试验周期为200 d。

表3 察尔汗盐湖卤水腐蚀离子含量及pH测试结果

| 测试项目 | 含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )        |       |
|------|----------------------------------|-------|
| 阳离子  | Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> | 22887 |
|      | Mg <sup>2+</sup>                 | 397   |
|      | Ca <sup>2+</sup>                 | 5840  |
| 阴离子  | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>    | 15648 |
|      | Cl <sup>-</sup>                  | 81016 |
|      | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>    | 181   |
|      | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>    | 59    |
| pH   | 9.6                              |       |

表4 试验标准混凝土配合比

| 编号    | 水泥/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 砂/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 石子/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 水/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 粉煤灰/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 减水剂/% | STF/% | BF/% |
|-------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|-------|-------|------|
| JZ    | 400                      | 635                     | 1165                     | 200                     | 100                       | 0.13  |       |      |
| SBC-1 | 400                      | 635                     | 1165                     | 200                     | 100                       | 0.13  | 1.0   | 0.1  |
| SBC-2 | 400                      | 635                     | 1165                     | 200                     | 100                       | 0.13  | 1.0   | 0.2  |
| SBC-3 | 400                      | 635                     | 1165                     | 200                     | 100                       | 0.13  | 2.0   | 0.1  |
| SBC-4 | 400                      | 635                     | 1165                     | 200                     | 100                       | 0.13  | 2.0   | 0.2  |

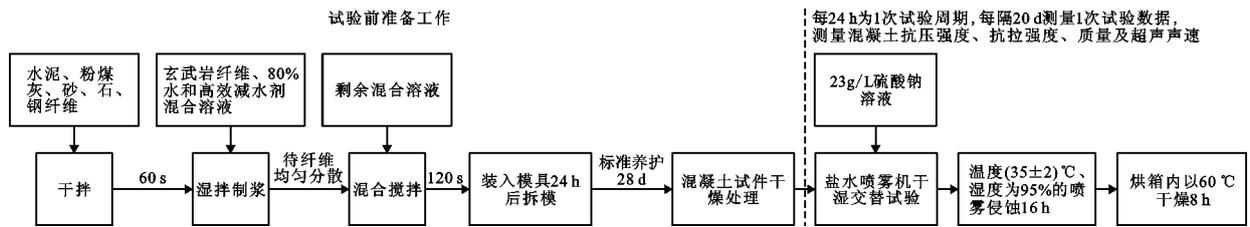


图1 混凝土室内加速试验流程图

混凝土的抗压和抗拉耐蚀系数可反映混凝土暴露在盐雾环境下由硫酸盐侵蚀而导致力学性能退化的程度,当耐蚀系数达到0.75时表明试件已经损坏,其表达式定义如公式(1)、(2)所示。

$$k_{fc} = \frac{f_{cn}}{f_{c0}} \tag{1}$$

$$k_{f/s} = \frac{f_{Isn}}{f_{Is0}} \tag{2}$$

式中: $k_{fc}$ 为抗压耐蚀系数; $f_{cn}$ 、 $f_{c0}$ 分别为 $n$ 次试验周期后和初始阶段的抗压强度,MPa; $k_{fs}$ 为抗拉耐蚀系数; $f_{tsn}$ 、 $f_{ts0}$ 分别为 $n$ 次试验周期后和初始阶段的劈裂抗拉强度,MPa。

参考《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2019)<sup>[19]</sup>相关规定,盐雾腐蚀环境下混凝土试件可以选取相对动弹性模量 $E_r$ 、相对动弹性模量评价参数 $\xi_1$ 以及相对质量评价参数 $\xi_2$ 作为耐久性评价参数,每个混凝土配合比测定6组试件数据取其平均值作为结果。当相对动弹性模量损失超过40%或质量损失率达到5%时表明试件已经损坏,具体计算方法见公式(3)~(5)。

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

$$\xi_1 = \frac{E_r - 0.6}{0.4} \quad (4)$$

$$\xi_2 = \frac{m_n - 0.95 m_0}{0.05 m_0} \quad (5)$$

式中: $E_{dn}$ 、 $E_{d0}$ 分别为 $n$ 次试验周期后和初始阶段的动弹性模量,MPa; $v_n$ 、 $v_0$ 分别为 $n$ 次试验周期后和初始阶段测得的超声波速,m/s; $m_n$ 、 $m_0$ 分别为 $n$ 次试验周期后和初始阶段测得的试件质量,kg。

### 3 结果与分析

#### 3.1 纤维掺量对强度的影响

图2为各个编号试块经过标准养护28d后所测得的基本力学性能情况。

由图2(a)可知,多尺度纤维可以显著提高混凝土的抗压强度。其中2% STF掺量的SBC-3、SBC-4两组试样的抗压强度分别为50.8和49.6 MPa,较JZ组相比提升均超过了10%。这是由于STF与BF纤维混合可起到正混杂效应,STF弹性模量远远超过了混凝土基体,当应力传递至STF附近时,刚度较大的STF率先承担部分应力。适量BF的掺入降低了试件的应力集中程度,防止了局部应力集中造成的损伤,表现出良好的承载能力。SBC-2、SBC-4与SBC-1、SBC-3相比抗压强度略有下降,说明BF掺量并非越多越好。混凝土制备过程中过量BF容易与胶凝材料搅拌不均匀,在其内部会发生团聚现象,致使有害微裂缝增多<sup>[20]</sup>,降低抗压强度的提高率。韧性是混凝土设计中必须保证的另一个力学性能参数,劈裂抗拉强度能够反映混凝土韧性的优劣<sup>[21]</sup>。

由图2(b)可知,STF和BF混掺能够提高混凝

土的抗拉强度,其中SBC-3组试样抗拉强度为4.58 MPa,优于JZ组的3.25 MPa,提高了40.92%。这是因为STF与BF的共同作用可以使水泥基体与粗骨料之间粘结更为紧密,从而在混凝土中形成三维配筋<sup>[22]</sup>,延缓混凝土的开裂。相同BF掺量下,掺有2% STF的SBC-4组试样较1% STF的SBC-2组相比,抗拉强度提高了8.11%,可以看出STF对混凝土抗拉强度提升影响显著。但是SBC-4组与SBC-3组相比,在STF掺量相同的情况下,抗拉强度降低了3.93%,这是由于过量的BF在混凝土搅拌过程中难以分散,不利于提高混凝土的抗拉效果。

#### 3.2 抗压及抗拉耐蚀系数

通过公式(1)、(2)对每隔1次试验周期所测得的力学性能指标进行计算,可以得到如图3所示的各混凝土试块抗压耐蚀系数 $k_{fc}$ 及抗拉耐蚀系数 $k_{fs}$ 随时间变化的曲线。

由图3(a)可看出,在整个试验周期结束后各配合比混凝土抗压强度均有所劣化,其损伤程度从大到小依次为:JZ > SBC-2 > SBC-1 > SBC-4 > SBC-3。其中JZ组200d后 $k_{fc}$ 降至0.8371,情况最为严重。而掺杂纤维试件的 $k_{fc}$ 值相对较高,其中SBC-3组仅减小了7.87%,为0.9213,说明STF和BF共同抑制了硫酸盐对混凝土强度的侵蚀作用。在试验开始0~40d内,混掺纤维混凝土各试块的 $k_{fc}$ 值均有小幅度增大,是由于在腐蚀初期, $SO_4^{2-}$ 还未能侵蚀混凝土内部,此时的混凝土还处于养护阶段。硫酸根离子可与混凝土表面物质生成膨胀产物,使混凝土结构致密,膨胀产物的填充作用有利于混凝土抗压强度的提高并能部分补偿硫酸盐侵蚀造成的负面影响;在40~200d,各组试块抗压强度均开始下降,1% STF掺量较2% STF掺量的混凝土试件抗压强度下降速率更快,表明STF的掺量对混凝土 $k_{fc}$ 的影响较大。

随着侵蚀龄期的延长, $SO_4^{2-}$ 逐渐向混凝土内部迁移,当内部孔隙没有容纳膨胀产物的空间时微裂缝便会快速发展,从而使混凝土迅速破坏。STF掺量的提高能够显著约束由于硫酸盐侵蚀造成的微裂缝的发展,从而减缓 $k_{fc}$ 的减小趋势。JZ组因为没有纤维与基体之间的架桥作用, $SO_4^{2-}$ 很快便侵蚀到了混凝土内部,所以 $k_{fc}$ 值增大周期较短,仅在0~20d便有所体现,随后进入到减小阶段,在160d由于没有纤维对微裂缝发展的抑制作用, $k_{fc}$ 减小速率与前期相比明显加快。

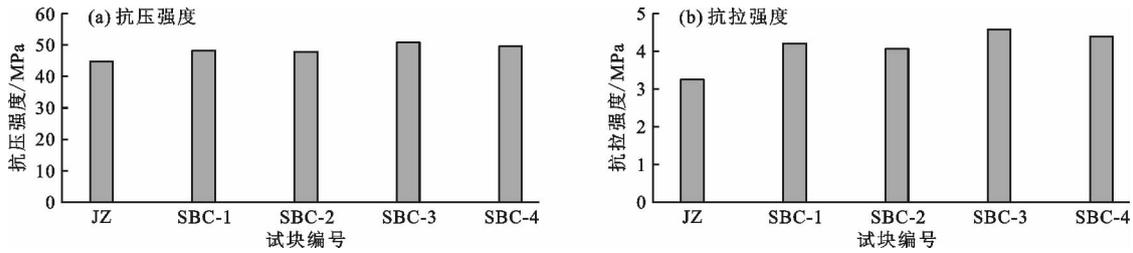


图 2 各混凝土试块经过标准养护 28 d 后的基本力学性能

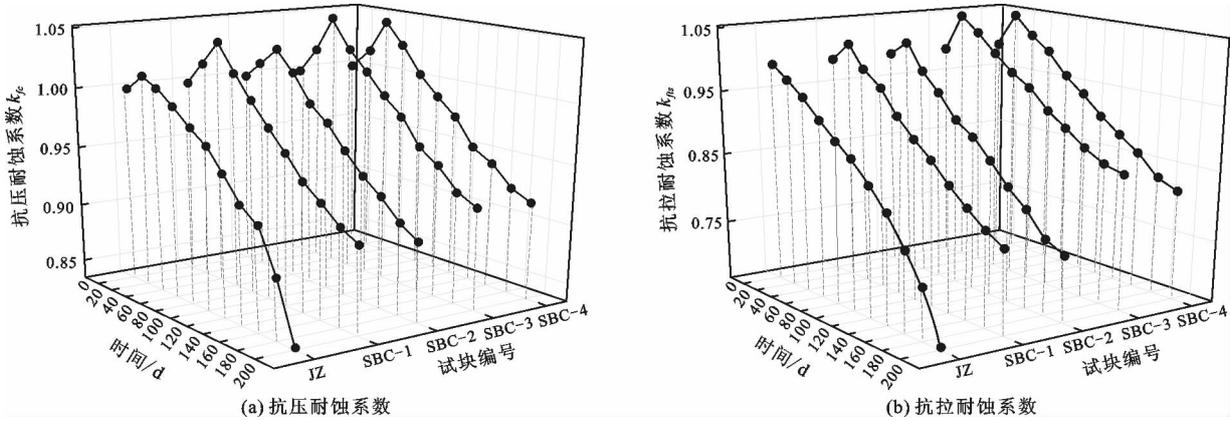


图 3 各混凝土试块抗压及抗拉耐蚀系数随时间变化曲线

由图 3(a)、3(b) 可看出, 试验周期结束后各组试件抗拉耐蚀系数  $k_{fts}$  大小排序依次为: SBC-3 > SBC-4 > SBC-1 > SBC-2 > JZ。其中 JZ 组在 200 d 后  $k_{fts}$  值减小至 0.704 6, 已经达到损坏。混凝土试块的  $k_{fts}$  与  $k_{fc}$  相比, 下降减小幅度更为明显, 如 SBC-3 组的  $k_{fts}$  值在试验周期内减小了 11.57%, 比同时期  $k_{fc}$  值降低了 3.70%。韧性差是混凝土的固有缺陷, 混凝土的抗拉强度只有抗压强度的 1/10 左右, 且两者比值会伴随着抗压强度的提高而减小<sup>[23]</sup>。因此在腐蚀初期, 混凝土  $k_{fts}$  值的提高周期相对较短。混凝土的抗拉强度主要是由水泥水化产物 C-S-H (calcium-silicate-hydrate) 凝胶的微观结构所决定, STF 和 BF 可与 C-S-H 凝胶共同作用形成纤维网状黏合结构, 密实度和抗拉强度有所上升, 增强了混凝土抗硫酸盐侵蚀能力。SBC-4 组与 SBC-3 组相比, 200 d 时  $k_{fts}$  值降低了 3.9%, 这表明高掺量 BF 会导致混凝土内部形成新缺陷, 不利于抵抗硫酸盐的侵蚀。无纤维掺入的 JZ 组  $k_{fts}$  变化规律与  $k_{fc}$  相似, 由于抗拉强度的大小对环境变化更为敏感, 从试验周期开始  $k_{fts}$  便逐渐劣化, 在 140 d 后劣化速率明显加快直至试块损坏。

综合上述试验结果, 当 STF 掺量为 2%、BF 掺量为 0.1% 时, 纤维混凝土  $k_{fc}$  和  $k_{fts}$  值最大, 即硫酸盐对混凝土的侵蚀力最小。

### 3.3 耐久性评价参数

图 4 为通过公式(3)~(5) 计算得到的不同配合比的各混凝土试块耐久性评价参数  $E_r$ 、 $\xi_1$  和  $\xi_2$  随时间变化的曲线。

由图 4 可知, 各组试件的  $E_r$  和  $\xi_1$  变化幅度较为明显, 而  $\xi_2$  呈波动式变化, 劣化幅度较为缓慢。JZ 组  $E_r$  和  $\xi_1$  在 200 d 时接近 0.6、0, 基本达到所规定的失效标准。加入纤维的 4 组试件的  $E_r$  和  $\xi_1$  劣化趋势呈同步变化, 其损伤程度为: SBC-2 > SBC-1 > SBC-4 > SBC-3, 较 JZ 组相比曲线下降段相对缓慢, 在试验周期结束时均未失效。在盐雾腐蚀的初始阶段, 由于  $SO_4^{2-}$  离子在水化硅酸钙 (C-S-H) 表面吸附量较少, C-S-H 胶凝结构较为完整<sup>[24]</sup>, 各组试件  $E_r$  和  $\xi_1$  均有不同程度的波动性提升。随着时间的增加, 混凝土内部胶凝体系逐渐丧失, 内部形成的缺陷造成测试时超声波速下降, 进而体现为  $E_r$  和  $\xi_1$  的降低。

从试验数据可以看出, STF 掺量的增加能够减少  $SO_4^{2-}$  造成的  $E_r$  和  $\xi_1$  损失, 但是当 BF 掺量超过 0.1% 时, 则  $E_r$ 、 $\xi_1$  损失又会增加。各组试件  $\xi_2$  在很长一段侵蚀龄期内大于 1.0, 其中 JZ 组在 100 d 后开始小于 1.0, 在 200 d 时为 0.78, 质量损失最为严重; SBC-3 在 160 d 后才小于 1.0, 在 200 d 时为 0.95, 未产生胶凝材料脱落现象。早期  $\xi_2$  的增加可

以用硫酸盐与水泥水化产物来解释,新生成的膨胀产物为块状石膏和钙矾石,增加了混凝土内部的密实度。随着侵蚀龄期的增加,积累的膨胀产物在混凝土内部形成微裂缝,裂缝间断产生的集中应力造成胶凝材料的脱落,进而导致混凝土质量的下降。由于试件中积存的膨胀应力可以被纤维分担,在试验结束后,掺有纤维的各组试件  $\xi_2$  较 JZ 组相比质

量损失并不明显,从而使其耐久性提高。

通过不同配合比的各混凝土试块耐久性评价参数随时间变化规律可知,  $E_r$  和  $\xi_1$  对于环境的影响因素具有敏感性,能较好地体现试件的损伤劣化程度。而  $\xi_2$  上下波动幅度较低,不能够完全反映盐雾环境对质量变化的影响规律,因此所体现的耐久性退化指标相对较差。

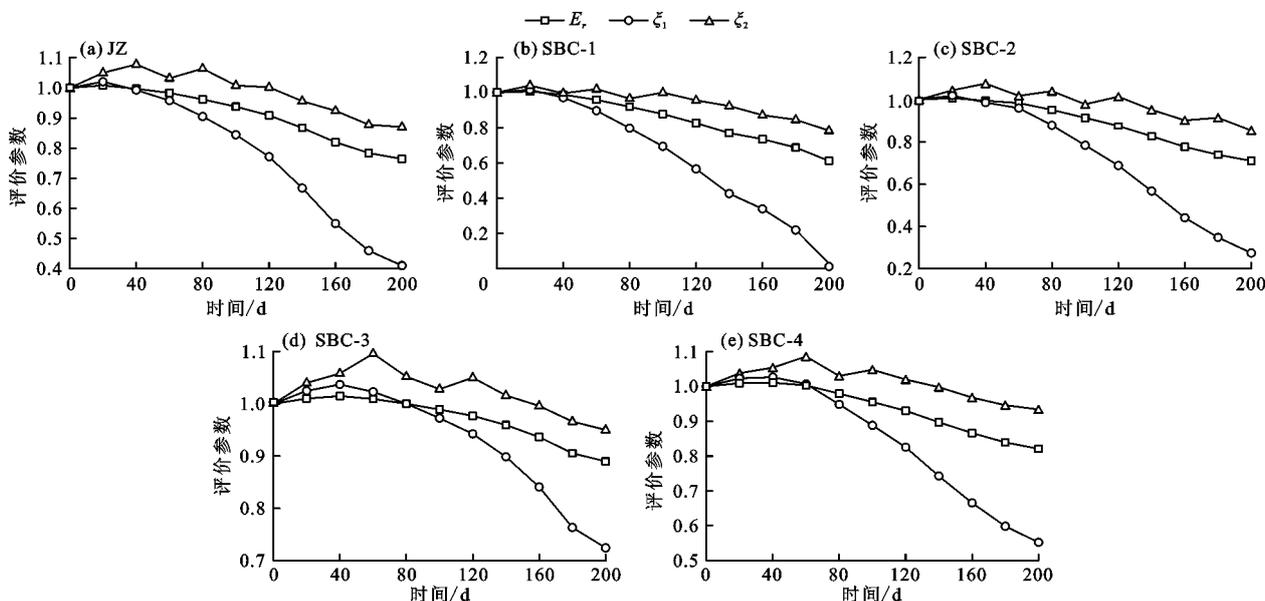


图4 各混凝土试块耐久性评价参数  $E_r$ 、 $\xi_1$  和  $\xi_2$  随时间变化曲线

### 3.4 基于改进 Wiener 模型的可靠性寿命预测

由于混凝土耐久性的劣化趋势具有一定的随机性,可以建立基于 Wiener 随机过程下的纤维混凝土损伤劣化模型,使用概率分布函数来预测混凝土的剩余寿命。本文选取相对动弹性模量评价参数作为 Wiener 随机分布函数的预测目标,建立了反映纤维混凝土在盐雾腐蚀环境下试件寿命的可靠性模型。

3.4.1 模型的改进 标准的 Wiener 模型假设每个性能指标的劣化趋势由随机过程描述,它具有以下性质:(1)初始退化值的概率为0;(2)退化增量对于不同的时间间隔是相互独立的;(3)服从随机过程的分配。但对于纤维混凝土在实际的盐雾加速试验中,相对动弹性模量的损伤走向还会沿着某一概率趋势逐步偏离初始阶段,所以需要考虑带漂移系数的 Wiener 模型。

带有漂移系数  $\alpha$  的 Wiener 模型可由公式(6)所示,并需要满足以下条件:(1) $Y(t)$  为一个单独稳定的变量;(2) $Y(0) = 0$ ,  $Y(t)$  通过  $\alpha$  逐步远离初始退化值;(3) $Y(t) \sim N(\alpha, \sigma^2 t)$  的正态分布。

$$Y(t) = \alpha t + \sigma W(t) \quad (6)$$

式中: $\alpha$  和  $\sigma$  分别为漂移系数和布朗扩散系数; $W(t)$  为一次标准的 Wiener 过程,能够反映盐雾腐蚀环境下由不确定性造成的数据误差。

目前,大多数带有漂移系数的 Wiener 模型均将研究对象的劣化过程假设成关于时间叠加的线性函数,但是在本次试验中可以明显地观察到,纤维混凝土的动弹性模量存在非线性退化过程,需要进行线性转化。此外,不同配合比的混凝土具有各自不同的漂移系数,因此本文考虑了随机效应约束对漂移系数的影响,并对传统带漂移系数的 Wiener 模型进行了改进。

相对动弹性模量从初始时间 0 到  $t$  的退化过程可由公式(7)表示:

$$Y(t) = Y(0) + \int_0^t W(t; \eta) \quad (7)$$

式中: $W(t; \eta)$  为关于  $t$  的非线性函数; $\eta$  为函数  $W(t; \eta)$  的中间变量。

在退化的全过程中必然存在一个  $t$  时刻的正向单调增函数:

$$\gamma(t) = \int_0^t \frac{W(t; \eta)}{k} \quad (8)$$

使得  $Y(t) = Y(0) + b\gamma$ , 其中  $b$  为函数的斜率。令  $Y(0) = a$ ,  $a$  为常数, 最终可将非线性函数转化为关于  $\gamma$  的线性关系式:

$$Y(\gamma) = a + b\gamma \quad (9)$$

在混凝土耐久性劣化过程中, 试件耐久性能退化量  $Y(t)$  经过侵蚀龄期  $T$  第 1 次达到规定的失效标准  $D_t$  所用的时间即为失效时间, 表达式为:

$$T = \inf\{t \mid Y(t) \geq D_t\} \quad (10)$$

即  $Y(t)$  取  $T \in [0, t]$  内的最大值, 在未考虑随机效应约束对漂移系数的影响时,  $t$  时刻试件耐久性的可靠度  $R_1(t)$  为:

$$R_1(t) = \Phi\left(\frac{D_t - \mu_\alpha t}{\sqrt{\sigma^2 t}}\right) - \exp\left(-\frac{2\mu_\alpha D_t}{\sigma^2}\right) \cdot \Phi\left(\frac{D_t - \mu_\alpha t}{\sigma^2 \sqrt{t}}\right) \quad (11)$$

式中:  $\Phi(x)$  表示服从标准正态分布  $N(0, 1)$  的取值概率,  $x \in (-\infty, x)$ 。

对于不同配比的混凝土试样, 可能会由于每隔一定测试龄期时测量的读数具有误差等不确定因素, 使得每组试样拥有不同的  $\alpha$ ; 即对于公式 (11), 令  $\alpha \sim N(\mu_\alpha, \sigma_\alpha^2)$ , 考虑  $\alpha$  为一个随机变量, 服从期望为  $\mu_\alpha$ 、方差为  $\sigma_\alpha^2$  的一个随机变量。根据王小林<sup>[25]</sup>

的研究可求得随机效应约束下的 Wiener 模型, 其可靠度  $R_2(t)$  为:

$$R_2(t) = \Phi\left(\frac{D_t - \mu_\alpha t}{\sqrt{\sigma^2 t + \sigma_\alpha^2 t^2}}\right) - \exp\left[-\left(\frac{2\mu_\alpha D_t}{\sigma^2} + \frac{2\sigma_\alpha^2 D_t^2}{\sigma^4}\right)\right] \cdot \Phi\left[-\frac{2\sigma_\alpha^2 D_t t + \sigma^2(\mu_\alpha t + D_t)}{\sigma^2 \sqrt{\sigma^2 t + \sigma_\alpha^2 t^2}}\right] \quad (12)$$

当有  $n$  组研究对象时,  $\mu_\alpha$ 、 $\sigma_\alpha^2$  分别为:

$$\mu_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (13)$$

式中:  $\mu_i = \Delta y_{i, \max} / \Delta t_{\max}$ ,  $\Delta y_{i, \max}$  为第  $i$  个试样个体在  $\Delta t_{\max}$  龄期时相对动弹性模量的最大变化量。

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu_\alpha)^2}{n} \quad (14)$$

3.4.2 可靠性评估 本文选取耐久性能较好的 SBC-3 组试样为例, 对其相对动弹性模量进行剩余寿命可靠度预测。在 2.2 小节中已经讲到当混凝土  $E_t$  的损失达到 0.4 时可认定其已破坏。SBC-3 中所测 6 组试件的相对动弹性模量随时间损伤变化值如表 5 所示。

表 5 相对动弹性模量随时间损伤变化值

| 试块编号   | 20d       | 40d       | 60d       | 80d       | 100d     | 120d     | 140d     | 160d     | 180d     | 200d     |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| SBC-3A | -0.010232 | -0.009860 | -0.015420 | 0.000930  | 0.011750 | 0.020754 | 0.037942 | 0.066376 | 0.093250 | 0.127412 |
| SBC-3B | -0.012005 | -0.013248 | -0.012852 | -0.000325 | 0.012300 | 0.019870 | 0.039851 | 0.071554 | 0.104820 | 0.130251 |
| SBC-3C | -0.008990 | -0.009742 | -0.000841 | 0.000001  | 0.006354 | 0.017485 | 0.045771 | 0.048771 | 0.089724 | 0.097335 |
| SBC-3D | -0.004951 | -0.025880 | -0.008362 | -0.000006 | 0.012549 | 0.035842 | 0.030080 | 0.067144 | 0.082384 | 0.110000 |
| SBC-3E | -0.014252 | -0.014076 | -0.006541 | -0.000955 | 0.014735 | 0.029241 | 0.060622 | 0.073944 | 0.109710 | 0.098028 |
| SBC-3F | -0.009330 | -0.015640 | -0.011244 | -0.000065 | 0.008276 | 0.014928 | 0.029202 | 0.054219 | 0.088282 | 0.098774 |
| 平均值    | -0.009960 | -0.014741 | -0.009210 | -0.000070 | 0.010994 | 0.023020 | 0.040578 | 0.063668 | 0.094695 | 0.110300 |

表 5 中时间变化量为 20 d, 所有试样初始损伤变化值均为 0, 当损伤变化值达到 0.4 时判定混凝土失效。为反映在盐雾腐蚀环境下混凝土相对动弹性模量损失的增加过程, 取失效值与初始值之差 0.4 作为退化量  $Y(t)$ 。

将各组试块损伤变化的平均值通过最小二乘法与幂函数进行损伤劣化方程拟合, 得出拟合度大于 96% 的退化轨迹:

$$Y(t) = 9.61292 \times 10^{-9} t^{3.08098} \quad (15)$$

对公式 (15) 两边取对数, 根据公式 (7) ~ (9), 令  $x = \ln Y(t) - \ln a$ ,  $\gamma = \ln t$ , 则将非线性幂函数方

程转化成  $x$  关于  $\gamma$  的线性关系式:

$$x(\gamma) = \ln Y(t) - \ln a = b \ln t = b\gamma \quad (16)$$

式中:  $b \sim N(\mu_b, \sigma_b^2)$  为正态分布,  $b(t)$  为一次标准的 Wiener 过程。

从定义  $x(0) = 0$  出发, 可计算参数  $\ln a$  的值如公式 (17) 所示:

$$\ln a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln Y_i(1) = -5.29628 \quad (17)$$

此时失效标准  $D_t$  为:

$$D_t = \ln 0.4 - \ln a = 4.38 \quad (18)$$

其余参数计算值分别为:  $\mu_\alpha = 0.845$ 、 $\sigma_\alpha^2 =$

0.00077,  $\sigma^2 = 0.0028$ 。将上述计算值代入公式(11)、(12)中可分别得到不带随机效应和带随机效

$$R_1(t) = \Phi\left(\frac{4.38 - 0.845 \ln t}{\sqrt{0.0028 \ln t}}\right) - \exp^{-2643.642857} \cdot \Phi\left(\frac{4.38 - 0.845 \ln t}{0.0028 \sqrt{\ln t}}\right) \quad (19)$$

$$R_2(t) = \Phi\left(\frac{4.38 - 0.845 \ln t}{\sqrt{0.0028 \ln t + 0.00077(\ln t)^2}}\right) - \exp^{-6412.007143} \cdot \Phi\left(-\frac{0.009112 \ln t + 0.012264}{0.0028 \sqrt{0.0028 \ln t + 0.00077(\ln t)^2}}\right) \quad (20)$$

由此可得出图5所示的可靠度函数变化图,通过此类方法可以运用改进后的Wiener模型对各组

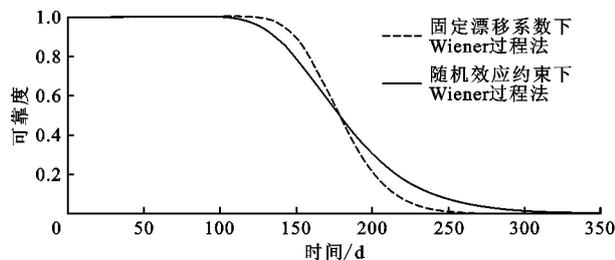


图5 不同分析模型下的可靠度变化曲线对比

由图5可以看出,固定漂移系数的Wiener退化过程预测结果偏保守,整体可靠度相对较低。随机效应约束下的Wiener退化过程能够考虑各个试样不同的劣化速率,因此可靠度变化曲线较为平缓。根据改进的Wiener预测模型可以看出SBC-3组试样在115 d后的相对动弹性模量开始逐渐劣化,基本符合试验所呈现的劣化过程,在354 d时达到失效标准,其可靠度降为0。通过图6对比各组混凝土剩余寿命可靠度曲线可得,JZ组在208 d时遭到破坏,这和试验过程中 $E_r$ 和 $\xi_1$ 在200 d时接近0.6、0的数据相吻合,表明改进Wiener模型能够较好地适用于盐雾腐蚀环境下混凝土耐久性可靠性评估。多尺度混杂纤维的加入可以提高混凝土在盐雾环境中的服役寿命,就结果而言,服役时长的大小为:SBC-3 > SBC-4 > SBC-1 > SBC-2,具体时间由高到低分别为:354、330、270、230 d。

## 4 结论

(1) 本文通过对察尔汗盐湖实地取样分析其卤水主要腐蚀离子含量后,制备同浓度硫酸钠盐雾对纤维混凝土进行室内加速试验,较好地还原了西部盐雾地区对混凝土材料的破坏过程,明确了混杂纤维的掺入能够显著提升混凝土在该地区的耐久性。

(2) 通过对比各组试件力学试验数据可知,掺入纤维能够显著提高混凝土的抗压及抗拉强度。混凝土的抗压及抗拉耐蚀系数随着STF掺量的提高而增强,过高BF掺量的加入会导致力学耐蚀系数

应时的Wiener剩余寿命可靠度函数关系式,如公式(19)、(20)所示:

混凝土试块的动弹性模量进行剩余寿命可靠度评估,其结果如图6所示。

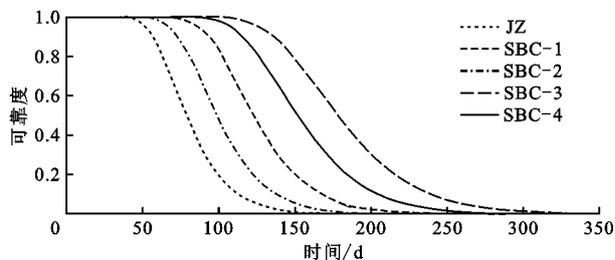


图6 各组混凝土试块剩余寿命可靠度函数曲线

降低。其中SBC-3组较JZ组相比,抗压强度提高了13.39%,抗拉强度提高了40.92%,处于盐雾腐蚀环境下200 d后抗压及抗拉耐蚀系数分别提高了10.06%和25.50%。

(3) 在室内盐雾腐蚀加速寿命试验中,相对动弹性模量与质量损失相比,对环境因素的影响更具有敏感性。在试验达到规定龄期200 d时,各组混凝土相对动弹性模量评价参数大小分别为:SBC-3 > SBC-4 > SBC-1 > SBC-2 > JZ。其中未掺纤维混凝土已经接近破坏标准,而掺有纤维的各组试样远远未达到失效标准。说明STF、BF的掺入可以提高混凝土的耐久性,能够克服西部硫酸盐盐雾环境下建筑物易于损伤破坏的问题。

(4) 将相对动弹性模量损失作为关键劣化因素,建立西部盐雾腐蚀环境下纤维混凝土寿命预测模型是可行的。改进后的Wiener模型能够凸显出个体差异,考虑了随机效应约束对漂移系数的影响,在已测得部分使用寿命的情况下,预测出的剩余寿命可靠度和试验情况更为相符。在实际工程中,提前对处于盐雾腐蚀环境的纤维混凝土进行检测和维护将更为方便。

## 参考文献:

- [1] 向正林,向利,陈川. 大气盐雾分布影响因素与监(检)测及评价方法[J]. 装备环境工程,2020,17(4):20-26.
- [2] 王珑霖,张文,张卫红,等. 盐渍土腐蚀钢筋混凝土研究现状及展望[J]. 科学技术与工程,2020,20(3):883-891.
- [3] 罗素蓉,王圳,王德辉. 掺石灰石粉混凝土抗硫酸盐侵

- 蚀性能及改善机理[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3175-3183.
- [4] 王成, 葛广华, 侯建国, 等. 南疆地区混凝土结构耐久性现状与影响因素研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(3): 447-453.
- [5] 方五军, 李伟文, 曹文昭. 深圳地区混凝土结构耐久性评定及影响因素分析[J]. 工业建筑, 2020, 50(6): 117-122.
- [6] JAGARAPU D, ELURU A. Strength and durability studies of lightweight fiber reinforced concrete with agriculture waste [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 27 (Pt 2): 914-919.
- [7] GUO Xiaolu, XIONG Guiyan. 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(2): DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2020.121326.
- [8] 闫长旺, 曹云飞, 刘曙光, 等. PVA 纤维混凝土抗盐侵蚀性能的试验研究[J]. 混凝土, 2020, (12): 56-60.
- [9] 周美容, 张雪梅. 混杂纤维增强混凝土材料的力学性能和耐久性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(1): 1133-1138.
- [10] FAIZ U. Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 43: 37-49.
- [11] KHERADMAND M, MASTALI M, ABDOLLAHNEJAD Z, et al. Experimental and numerical investigations on the flexural performance of geopolymers reinforced with short hybrid polymeric fibres [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 126: 108-118.
- [12] 刘曙光, 赵晓明, 张菊, 等. 聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料在长期浸泡作用下抗硫酸盐侵蚀性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6): 60-66.
- [13] 牛荻涛, 王家滨, 马蕊. 干湿交替喷射混凝土硫酸盐侵蚀试验[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 82-89.
- [14] 张兰芳, 王道峰. 玄武岩纤维掺量对混凝土耐硫酸盐腐蚀性和抗渗性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 1946-1950.
- [15] 余红发, 孙伟, 麻海燕, 等. 基于损伤演化方程的混凝土寿命预测方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 1-7.
- [16] 毛江鸿, 金伟良, 李志远, 等. 氯盐侵蚀钢筋混凝土桥梁耐久性提升及寿命预测[J]. 中国公路学报, 2016, 29(1): 61-66.
- [17] 王萧萧, 刘畅, 尹立强, 等. 天然浮石混凝土冻融损伤及寿命预测模型[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 98-105.
- [18] 中国工程建设标准化协会. 纤维混凝土结构技术规程: CECS 38:2004[S]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [20] 刘清顺. 玄武岩纤维对轻集料混凝土性能影响的研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2017.
- [21] 徐路, 刘子璐. BF 分散效应对喷射混凝土韧性影响机制[J]. 煤炭技术, 2021, 40(5): 72-76.
- [22] YANG Liyun, XIE Huanzhen, FANG Shizheng, et al. Experimental study on mechanical properties and damage mechanism of basalt fiber reinforced concrete under uniaxial compression[J]. *Structures*, 2021, 31: 330-340.
- [23] 周宝民. 超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)压缩疲劳性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [24] 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(3): 119-125.
- [25] 王小林. 基于非线性 Wiener 过程的产品退化建模与剩余寿命预测研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.

(上接第 184 页)

- [10] 戴礼荣, 张仕良. 深度语音信号与信息处理: 研究进展与展望[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(2): 171-179.
- [11] 施俊, 汪琳琳, 王珊珊, 等. 深度学习在医学影像中的应用综述[J]. 中国图象图形学报, 2020, 25(10): 1953-1981.
- [12] 崔相辉, 谢剑锋, 张丰, 等. 基于深度学习的 PM2.5 预测模型建立[J]. 北京测绘, 2017(6): 22-27.
- [13] DEY R, SALEMT F M. Gate-variants of gated recurrent unit (GRU) neural networks[C]//2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Boston, America, 2017.
- [14] 张进, 牛志伟, 齐慧君, 等. K-means++ 和 LSTM 模型在大坝监测资料分析中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 25-30.
- [15] 杨恒, 岳建平, 邢尹, 等. 基于深度全连接神经网络的大坝变形预测研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(2): 162-166.
- [16] 郭张军, 黄华东, 屈旭东. 基于深度学习的大坝变形预测模型[J]. 水电能源科学, 2020, 38(3): 83-86+185.
- [17] JONES DR, SCHONLAU M, WELCH WJ. Efficient global optimization of expensive black-box functions[J]. *Journal of Global Optimization*, 1998, 13(4): 455-492.
- [18] 崔佳旭, 杨博. 贝叶斯优化方法和应用综述[J]. 软件学报, 2018, 29(10): 3068-3090.
- [19] 任婷玉, 梁中耀, 刘永, 等. 基于贝叶斯优化的三维水动力-水质模型参数估值方法[J]. 环境科学学报, 2019, 39(6): 2024-2032.
- [20] 吴中如. 大坝与坝基安全监控理论和方法及其应用研究[R]. 南京: 河海大学, 2002.