

# 高性能混凝土梁弯曲疲劳性能试验研究

Experimental Study on Bending Fatigue Performance of High-performance Concrete Beams

张志国<sup>1</sup>, 李浩然<sup>1,2</sup>, 潘冀蒙<sup>1</sup>, 郭文涛<sup>1</sup>, 苏靖海<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 山西建筑工程集团有限公司, 太原 030000;  
3. 石家庄市住建集团建筑工程检测服务有限公司, 石家庄 050000)

**摘要:** 双掺细粉料掺加到预应力混凝土在桥梁的应用较为广泛, 但对其力学性能存在一些疑虑。基于相似理论, 制作缩尺比例 1:5 的模型梁, 混凝土强度等级为 C50, 以 5 Hz 频率的半正弦波恒定应力加载, 进行 200 万次疲劳加载循环, 分析不同掺量双掺细粉料模型梁的弯曲疲劳性能。结果表明, 在 200 万次疲劳加载后模型梁没有疲劳裂缝, 疲劳性能稳定, 疲劳试验后破坏试验强度没有明显的降低, 疲劳后静力受力性能稳定, 掺加细粉料对混凝土梁有明显的改善作用。其中, 在 20 万次循环以下, 双掺细粉料混凝土梁的应变迅速增加, 弯曲刚度迅速减小; 超过 20 万次循环后, 应变增加的速度和弯曲刚度减小的速度显著减慢。综合分析表明, 所有双掺细粉料混凝土梁都表现出良好的弯曲疲劳性能, 值得在工程中推广。

**关键词:** 高性能混凝土; 疲劳性能; 等幅疲劳试验

中图分类号: U24 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0119-06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.022

ZHANG Zhiguo<sup>1</sup>, LI Haoran<sup>1,2</sup>, PAN Jimeng<sup>1</sup>, GUO Wentao<sup>1</sup>, SU Jinghai<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;  
2. Shanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Taiyuan 030000, China; 3. Shijiazhuang City Construction Group Constructional Engineering Testing Service Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** Double-mixed fine powder admixture to prestressed concrete is more widely used in bridges, but there are some doubts about its mechanical properties. Based on the similarity theory, a scaled-down model girder of 1:5 was made, and the concrete strength grade was C50, loaded with a half-sine wave constant stress at a frequency of 5 Hz, and 2 million fatigue loading cycles were carried out, to analyze the bending fatigue performance of the model girder with different dosages double-doped fine powder. The results show that there is no fatigue crack in the model beam after 2 million fatigue loading cycles, the fatigue performance is stable, the destructive test strength does not decrease significantly after the fatigue test, the static stress performance is stable after fatigue, and the doping of fine powder has an obvious improvement effect on the concrete beam. Among them, below 200,000 cycles, the strain of double-doped fine powder concrete beams increased rapidly, and the

基金项目: 河北省交通运输厅重点项目 (Y-2010024)。

作者简介: 张志国 (1971—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 桥梁与结构工程。

通信作者: 苏靖海 (1987—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 结构工程。

收稿日期: 2024-04-08

## 道桥技术

bending stiffness decreased rapidly. After more than 200, 000 cycles, the rate of strain increases, and the rate of bending stiffness reduction slows down significantly. Comprehensive analyses show that all double - mixed fine powder concrete beams exhibit good flexural fatigue performance, which is worth promoting in engineering.

**Key words:** high performance concrete; fatigue performance; constant amplitude fatigue test

### 0 引言

高性能混凝土是采用粉煤灰、磨细矿渣粉等工业废料替代混凝土中的一部分水泥, 经过特殊技术处理的一种新型高技术混凝土。作为建筑材料, 被广泛应用于桥梁工程中<sup>[1]</sup>。然而, 由于桥梁工程在运营期不可避免地承受重复性荷载, 改善桥梁的力学性能和耐久性成为保障桥梁工程质量的关键<sup>[2]</sup>。

高性能混凝土目前尚无统一公认的定义, 区别仅关注强度的普通混凝土, 高性能混凝土不仅关注强度, 还关注其施工中的工作性、适用性、体积稳定性, 以及混凝土结构的耐久性、经济性, 是面向施工和长期使用性能, 具有综合要求的混凝土<sup>[2]</sup>。随着桥梁预期寿命的延长, 高性能混凝土被广泛推广应用, 从最初的试验走向工程实际, 具有代表性的实例: 广州虎门大桥用了 C50 混凝土、万县长江大桥用了 C60 混凝土等, 其应用基本覆盖各类常用跨度混凝土桥梁<sup>[3]</sup>。

目前, 大多采用标准试件或试块进行高性能混凝土构件疲劳性能的研究。如张鹏<sup>[4]</sup>研究了掺入粉煤灰的试样进行疲劳循环试验, 并进行破坏分析, 研究发现在未添加粉煤灰的试件出现了明显的脆性断裂, 掺入粉煤灰的试件, 随着荷载循环次数增加, 裂缝宽度及数量增多, 展现为延性破坏, 同时发现粉煤灰掺量存在最佳掺量区间; 李晓亮<sup>[5]</sup>为研究粉煤灰掺料对疲劳的影响, 对不同粉煤灰掺量的试件进行了疲劳试验, 研究发现随着粉煤灰掺量增加, 混凝土梁疲劳寿命逐渐增加; 张锋剑等<sup>[6]</sup>通过不同掺量粉煤灰再生混凝土梁的受弯性能试验, 研究了不同粉煤灰掺量的抗弯能力、挠度等性能。结果表明, 若粉煤灰掺量合适, 再生混凝土梁具有较好的受力性能, 可用于混凝土抗弯构件; 彭华娟等<sup>[7]</sup>通过测试混凝土立方体抗弯强度, 研究双掺粉煤灰对混凝土性能影响, 及粉煤灰对混凝土性能的作用机理。研究结果表明当粉煤灰掺量为胶凝材料的 30%,

复掺粉煤灰混凝土抗弯性能有增强; Singh 等<sup>[8]</sup>进行双掺粉煤灰和矿粉, 比例为 7:3 的小试件疲劳试验, 试验发现在 200 万次循环下耐久性提高, 但不显著; Mun 等<sup>[9]</sup>采用小试件, 双掺 30% 粉煤灰和 50% 矿粉, 对其进行弯曲疲劳分析, 研究发现在疲劳加载下, 不同掺量的试件对循环加载的曲线模式和总体形状没有显著影响; Ranjan<sup>[10]</sup>采用掺入粉煤灰和硅灰同时掺入少量钢纤维进行抗弯性能研究, 研究表明掺入粉煤灰和硅灰的混凝土试件抗弯强度大于普通混凝土; 辛雷等<sup>[11]</sup>研究了不同受力状态下混凝土疲劳试验的研究情况, 对混凝土疲劳性能分析; 张培等<sup>[12]</sup>通过对 C25 混凝土的疲劳试验总结了疲劳荷载下混凝土变形的一般规律; 肖建庄等<sup>[13]</sup>进行了疲劳试验研究高性能混凝土的疲劳性能, 分析得出影响高性能混凝土疲劳性能比普通混凝土更好, 而且随着疲劳加载次数的增加, 拉压区应变、跨中挠度均呈先快后稳的两阶段发展特点; Guo 等<sup>[14]</sup>研究活性矿物掺合料混凝土的关系, 进行循环荷载试验, 结果表明矿渣和粉煤灰进行单掺或混合双掺可显著提高混凝土的抗弯疲劳性能; 刘峰<sup>[15]</sup>研究了粉煤灰掺量对高性能混凝土的影响, 结果表明在低用水量, 粉煤灰掺量为 30%~70% 时, 混凝土的后期强度显著增加, 但缺少对试件的长期监测; Yoichi 等<sup>[16]</sup>研究了掺加和不掺粉煤灰混凝土的早期性能, 结果表明掺加后可以降低混凝土绝热温升, 强度增长变缓。宋旭明等<sup>[17]</sup>对粉煤灰预应力高性能混凝土梁进行弯曲疲劳试验研究, 以粉煤灰掺量为控制变量对疲劳性能进行研究结果表明, 疲劳荷载作用后, 由于粉煤灰掺量较少, 梁体静力及动力特性变化不明显。

综上所述, 目前疲劳性能研究主要集中在单掺方式和钢筋混凝土试件进行的疲劳试验, 有关双掺预应力混凝土模型缩尺梁的研究还很有限。结合在高性能混凝土推广过程中, 遇到的桥梁结构疲劳性能存在的争议, 在总结国内外规范及研究现状基础上, 对掺加粉煤灰和矿粉的高性能混凝土大尺寸模

型梁疲劳性能进行试验研究, 考查粉煤灰和矿粉掺量对结构疲劳性能的影响。

## 1 高性能混凝土的作用机理

高性能混凝土是通过掺加一定比例的矿物掺合料来替代水泥, 减少水泥用量, 同时利用矿物掺合料活性的一种新型混凝土。矿物掺合料是配置高性能混凝土的必需组分。目前, 对常用标号混凝土大量使用的矿物掺合料主要是粉煤灰和矿粉, 根据性能要求在配合比设计时既可以采用单掺, 也可以采用混合双掺。双掺方式将矿粉和粉煤灰掺入混凝土, 两种矿物掺合料优势互补, 效果叠加, 施工和易性好, 力学性能及耐久性能也得到改善。

以粉煤灰、矿粉为代表的矿物掺合料在混凝土中的作用机理可以用3大效应来概括:

**形态效应:** 在显微镜下显示, 矿物掺合料中含有70%以上的空心微珠玻璃球, 其粒形完整, 表面光滑, 对混凝土起到减水作用、致密作用和匀质作用, 促进初期水泥水化的解絮作用, 改变拌和物的流变性质、初始结构以及硬化体的多种功能。

**活性效应:** 矿物掺合料的主要成分是活性氧化硅和氧化铝, 二者含量之和一般达60%以上, 在潮湿环境中会与水泥水化后产生的氢氧化钙等碱性物质发生化学反应, 生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝物质, 水化硅酸钙和水化铝酸钙是水泥石中提供强度的主要矿物来源。同时, 还可以堵塞混凝土中的毛细组织, 提高抗腐蚀能力。

**微集料效应:** 矿物掺合料中粒径很小的微珠和碎屑, 在水泥石中相当于未水化的水泥颗粒, 极细小的微珠相当于活泼的纳米材料, 能明显增强混凝土及制品的结构强度, 提高匀质性和致密性。

与普通混凝土相比, 高性能混凝土利用具有活性的矿物掺合料部分取代水泥, 其作用主要体现在通过“二次水化”来改变混凝土中胶凝物质的组成, 从而实现增强混凝土强度、改善和易性、减少水化热、降低收缩性、增强抗腐蚀性以及改善耐久性等方面的目的<sup>[18]</sup>。高性能混凝土在同样条件下不仅可节约水泥用量, 降低成本; 而且还能充分利用工业废料, 变废为宝, 减少环境污染, 符合环保和可持续发展的要求。

## 2 预应力高性能混凝土模型梁设计

### 2.1 模型梁设计参数

试验以相似比1:5, 将跨度为30 m的原型梁缩尺为6 m跨的模型梁来研究预应力高性能混凝土的疲劳特性。其中, 模型梁混凝土强度等级为C50, 矿物掺合料掺量比例分别为10%、20%、30%, 模型梁的配筋情况为: 腹板纵筋 $\phi 6@100$ , 顶板纵筋 $\phi 6@350$ , 底板纵筋 $\phi 8@65$ , 箍筋 $\phi 6@120$ , 预应力筋采用1 860级1×7股 $\phi_s 9.5$ 钢绞线, 模型梁钢筋编号见表1, 配筋及预应力筋布置分别如图1~2。

表1 模型梁钢筋明细表

Table 1 Model beam reinforcement list

直径/mm	编号	长度/mm	根数
8	1	5 980	2
8	2	785	4
6	3	6 060	2
6	4	6 069	10
6	5	1 034	60
6	6	330	60
6	7	166	120
6	8	413	60
6	9	5 980	2

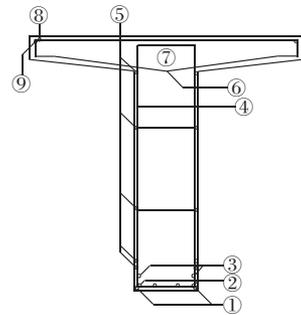


图1 模型梁普通钢筋配筋图

Fig. 1 Model beam plain reinforcement diagram

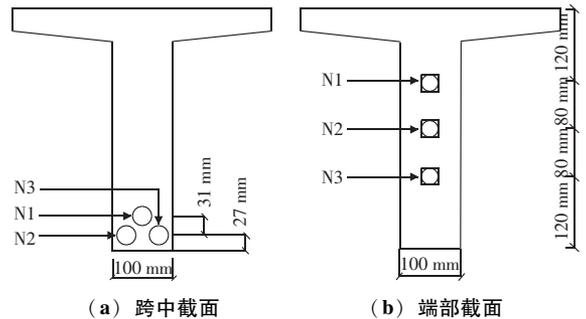


图2 跨中和端截面预应力筋配筋图

Fig. 2 Prestressing tendon configuration at mid-span and end section

## 道桥技术

### 2.2 混凝土配合比设计

混凝土的原材料、配合比等因素都会对混凝土的强度造成影响。试验模型梁按 C50 进行设计, 采用粉煤灰和矿粉双掺设计探究对疲劳性能的影响。通过试配法得到最终的混凝土配合比, 见表 2, 表中 28 d 强度为试配时的试验结果。

表 2 混凝土配合比  
Table 2 Concrete mixing ratio

组号	原材料/kg						28 d 强度 /MPa
	水泥	矿物 掺合料/	砂子	碎石	水	外加剂	
L1	436.5	48.50	687	1 100	148	8.73	59.90
L2	388.0	97.00	687	1 100	148	8.73	60.03
L3	339.5	145.50	687	1 100	148	8.73	61.50

### 2.3 模型梁制作

按照设计图纸进行模板制作, 在预制台座上进行模型梁钢筋骨架绑扎。由于截面尺寸较小, 在混凝土浇筑前先将预应力筋穿入预留波纹管, 然后再定波纹管线形, 具体流程如下: 布置和绑扎好梁底板钢筋→布置和绑扎好梁顶板和腹板钢筋→对吊筋、波纹管进行安装→调整波纹管的位置和线形→模板安装→混凝土浇筑与振捣→模板拆除→蒸汽养护→预应力钢绞线张拉→孔道灌浆。

## 3 加载试验

### 3.1 测试目的

试验分别进行静载试验和等幅疲劳试验, 按《混凝土结构试验方法标准》<sup>[19]</sup>进行试验方案设计, 采用两点集中加载, 加载点间距 1.25 m, 跨中形成纯弯区段, 加载最大循环次数 200 万次。通过采集分析模型梁在加载过程中跨中截面位移、应变以及残余应变的变化, 从而探究高性能混凝土梁的疲劳损伤发展规律。

### 3.2 测点布置

采用电阻式应变片来记录梁体典型截面位置的应变。在模型梁跨中截面腹板、上翼缘、下翼缘设置应变片测点, 在模型梁跨中布设百分表测定位移。

### 3.3 加载制度

采用等幅应力控制加载, 疲劳上限为 25 kN, 疲劳下限为 15 kN, 加载频率 5 Hz, 等幅疲劳试验包括 3 个阶段: 预加载阶段、消压加载阶段、疲劳加载阶段。

(1) 预加载阶段目的在于检验试验设备的可靠性, 加载制度 2 kN→20 kN→2 kN, 循环加、卸载两次。

(2) 消压加载阶段目的是近似确定消压荷载, 进行两轮五级静载加载 (0 kN→5 kN→10 kN→15 kN→20 kN→25 kN) 并观察梁体裂缝, 若开裂则同时记录开裂荷载值。

(3) 采用正弦波加载, 荷载频率为 5 Hz, 加载 200 万次模拟正常使用状态。疲劳加载至 1、5、10、20、50、100、150、200 万次停机进行静载试验 (0→5 kN→10 kN→15 kN→20 kN→25 kN), 并记录梁体跨中挠度、混凝土应变, 再进行一次静载试验, 加载到极限荷载观测裂缝情况、挠度和混凝土应变并详细记录。

## 4 试验结果及分析

### 4.1 矿物掺合料掺量对模型梁位移的影响

200 万次疲劳加载后的荷载位移曲线如图 3 所示。模型梁在经历循环荷载作用后荷载位移关系曲线基本呈线性变化趋势, 可以得出疲劳加载后各模型梁变形性能较稳定。相同荷载工况、相同混凝土强度条件下, 模型梁 L1 (10% 矿物掺合料) 的位移最大, L2 (20% 矿物掺合料) 次之, L3 (30% 矿物掺合料) 位移最小, 但三者差别不大, 表明提高矿物掺合料掺量可以改善高性能混凝土梁的弯曲疲劳性能, 但影响幅度较小。

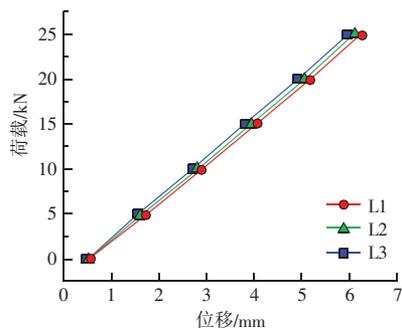


图 3 不同矿物掺合料掺量荷载-位移曲线  
Fig. 3 Load-displacement curves for different mineral admixture dosages

### 4.2 矿物掺合料掺量对模型梁应变的影响

200 万次疲劳加载后再进行一轮静载试验, 跨中截面荷载应变关系曲线如图 4 所示。整体来看, 模型梁混凝土应变随荷载增大基本呈线性增大趋势, 说明高性能混凝土疲劳变形性能稳定。随着矿物掺合

料掺量的增加,各模型梁跨中截面应变有小幅度的减小,说明掺加矿物掺合料对模型梁的疲劳变形性能有一定的改善作用。而且可以看出矿物掺合料在30%以内时,掺量越高,梁体跨中截面混凝土应变增量越小,表明提高矿物掺合料掺量有利于控制截面应变。

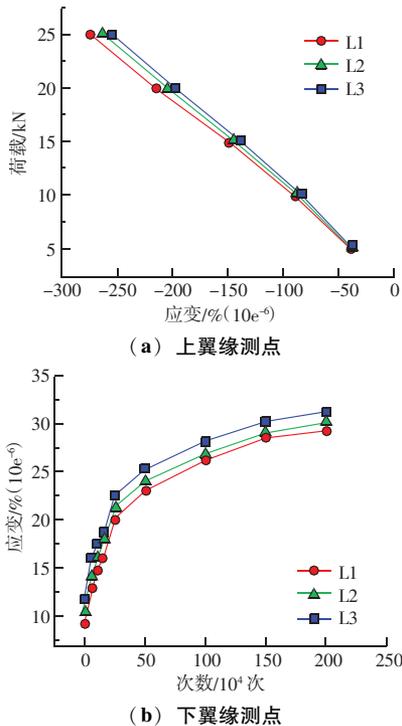


图4 混凝土梁疲劳后静载应变曲线

Fig. 4 Static load strain curve of concrete beams after fatigue

### 4.3 矿物掺合料掺量对模型梁的压区残余应变的影响

模型梁经历反复加载后残余应变与疲劳次数关系曲线如图5所示。混凝土强度等级相同的条件下,随矿物掺合料掺量提高,混凝土残余应变有所减小,说明掺加矿物掺合料对改善混凝土疲劳性能有一定的作用。

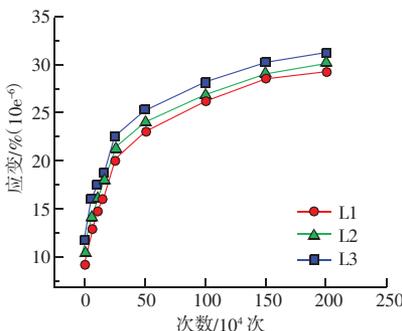


图5 矿物掺合料对残余应变的影响

Fig. 5 Effect of mineral admixture on residual strain

## 5 结论

通过对预应力混凝土模型梁进行等幅疲劳试验,主要得出以下结论:

(1) 矿物掺合料掺量有利于改善试验梁疲劳性能,其中掺量10%~20%作用明显,20%~30%作用相对较小。

(2) 疲劳加载200万次后模型梁位移较小,并且没有产生疲劳裂缝,表明高性能混凝土梁的疲劳性能稳定;疲劳试验后模型梁的极限破坏强度没有明显降低,表明高性能混凝土疲劳后静力受力性能稳定。

## 参 考 文 献

- [1] 黄土元, 蒋家奋, 杨南如. 近代混凝土技术 [M]. 西安: 陕西科技出版社, 1998.
- [2] 陈冰. 高性能混凝土技术发展与应用初探 [J]. 科技风, 2014 (14): 165.
- [3] 刘青臣. 高性能混凝土在桥梁工程中的应用 [J]. 交通世界, 2021 (34): 137-138.
- [4] 张鹏. 高掺量粉煤灰对绿色建筑疲劳性能影响测试 [J]. 煤化工, 2023, 51 (2): 66-69, 100.
- [5] 李晓亮. 泡沫轻质土疲劳性能影响因素研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49 (3): 82-85.
- [6] 张锋剑, 马政伟, 冯旭东, 等. 加掺粉煤灰再生混凝土梁受弯性能试验研究 [J]. 河南城建学院学报, 2016, 25 (3): 9-14, 57.
- [7] 彭华娟, 陈建国. 双掺粉煤灰及聚羧酸减水剂再生混凝土性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2018 (1): 3-6.
- [8] SINGH S, SHARMA S K, AKBAR M A. Evaluation of mechanical and durability properties along with flexural fatigue life of pavement quality geopolymer concrete [J]. Innov. Infrastruct. Solut, 2024, 9, 4.
- [9] MUN J S, YANG K H, KIM S J. Tests on the Compressive Fatigue Performance of Various Concretes [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28 (10): 04016099.
- [10] RANJAN A. Study on mechanical properties of high strength concrete with silica fume, flyash and steel fiber [J]. Ijeast, 2021 (1).
- [11] 辛雷, 姜福香, 蒋金洋, 等. 混凝土疲劳性能试验研究现状 [J]. 青岛理工大学学报, 2011, 32 (3): 14-20.
- [12] 张培, 雷冬. 疲劳荷载作用下的混凝土变形规律 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2015, 43 (1): 34-38.
- [13] 肖建庄, 陈德银, 查全璠. 高性能混凝土筒支梁正截面抗弯疲劳试验 [J]. 结构工程师, 2006 (4): 72-76.

(下转第144页)

## 研究与应用

- 2022, 12 (10): 252–255.
- [42] 刘亚辉, 冯建林, 许传华. 空心玻璃微珠在反射隔热涂料中的应用 [J]. 现代涂料与涂装, 2014, 17 (2): 22–23, 33.
- [43] 王福强, 戴国军, 潘建中, 等. 一种无机反射隔热轻质陶彩石涂料及其制备方法 [P]. 浙江省: CN114525046A, 2022–05–24.
- [44] 缪松兰, 马光华, 李清涛, 等. 建筑陶瓷抛光废渣制备轻质陶瓷材料的研究 [J]. 陶瓷学报, 2005 (2): 71–79.
- [45] 税安泽, 夏海斌, 曾令可, 等. 利用抛光砖废料制备多孔保温建筑材料 [J]. 硅酸盐通报, 2008, 166 (1): 191–195.
- [46] 张三明, 陈湛, 余其康, 等. 利用废弃煤矸石生产保温砖及其在自保温墙体中的应用 [J]. 新型建筑材料, 2009, 36 (9): 22–26.
- [47] 汪学彬, 杨重卿, 张祥伟, 等. 工业固体废弃物制备陶粒及其应用研究进展 [J]. 中国粉体技术, 2021, 27 (2): 1–8.
- [48] RILEY C M. Relation of chemical properties to the bloating of clays [J]. Journal of the American ceramic society, 2006, 34 (4): 121–128.
- [49] 姜中宏, 胡丽丽. 玻璃的相图结构模型 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1996 (5): 395–404.
- [50] 范佳乐. 利用钨尾矿制备泡沫微晶玻璃的研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2020.
- [51] 岳东亭. 利用污泥/赤泥/钢渣等固体废物制备新型多孔陶粒的膨胀机理研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [52] 叶晓春. 煤矿固体废弃物泡沫隔热陶瓷组成与性能一体化设计和制备 [D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- [53] 李颖, 吴保华, 倪文, 等. 矿渣-钢渣-石膏体系早期水化反应中的协同作用 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2020, 41 (4): 581–586.
- [54] 王亚光. 赤泥-粉煤灰-脱硫石膏新型胶凝材料微结构演变与复合协同效应 [D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [55] 刘晓晓, 王美娜, 王振方, 等. 全固废泡沫混凝土性能研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2018 (10): 4.
- [56] 杨世钊. 固废基硫铝系绿色节能保温材料的制备及优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2021.

(上接第 123 页)

- [14] GUO P G, CARPINTERI A, SPAGNOLI A, et al. Effects of mechanical properties of concrete constituents including active mineral admixtures on fatigue behaviours of high performance concrete [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33 (1): 66–75.
- [15] 刘峰. 粉煤灰掺量对高性能混凝土性能的影响 [J]. 科技与企业, 2012 (12): 316–317.
- [16] YOICHI M, VANISSORN V, ITARU H, et al. Tensile mechanical properties of fly ash concrete at early age for thermal stress analysis [J]. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2020, 1 (1): 1–14.
- [17] 宋旭明, 戴公连, 龚雪芬. 粉煤灰高性能混凝土疲劳性能试验研究 [C]. 中国公路学会 2007 年学术年会论文集 (下). 2007: 226–230.
- [18] 曹兴龙. 绿色高性能混凝土配合比设计与性能预测 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [19] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构试验方法标准: GB/T 50152 [S]. 北京: 中国标准化出版社, 2012.

(上接第 128 页)

- [7] 王延仓, 李笑芳, 张文胜, 等. 基于高光谱技术公路路基土壤压实度定量反演的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43 (7): 2294–2300.
- [8] 王如会. 基于改进灰色 Markov 模型的建筑工程造价预测研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (6): 122–127.
- [9] 赵得杰, 毕经东, 李浩. 基于 ARIMA 模型的基坑变形预测研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (5): 40–45.
- [10] 李风增. 基于人工神经网络模型预测混凝土抗压强度 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (3): 126–133.
- [11] KURNAZ T F, KAYA Y. The performance comparison of the soft computing methods on the prediction of soil compaction parameters [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 13 (4): 1–13.
- [12] JAYAN J, SANKAR N. Prediction of compaction parameters of soils using artificial neural network [J]. Asian Journal of Engineering and Technology, 2015, 3 (4): 1–13.
- [13] WANG H, YIN Z. High performance prediction of soil compaction parameters using multi expression programming [J]. Engineering Geology, 2020, 276: 105758.
- [14] MOINFAR A, SHAHGHOLI G, GILANDEH Y A, et al. Investigating the effect of the tractor driving system type on soil compaction using different methods of ANN [J]. Anfis and Step Wise Regression, 2022, 222: 105444.
- [15] WANG X, DONG X, ZHANG Z, et al. Compaction quality evaluation of subgrade based on soil characteristics assessment using machine learning [J]. Transportation Geotechnics, 2022, 32: 100703.
- [16] LIU G, PIE L, LI S. Compactness prediction of airport soil field based on artificial neural network [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2021, 38 (1): 54–60.