

冻融循环条件下路面粉煤灰混凝土损伤检测研究

Study on Damage Detection of Road Fly Ash Concrete Under Freeze-thaw Cycle

袁茂林

(许昌市农村公路发展服务中心, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对现有损伤检测方法存在的检测精度低的问题, 在充分考虑冻融循环作用的前提下, 实现对路面粉煤灰混凝土损伤检测方法的优化设计。根据冻融循环原理, 模拟粉煤灰掺量混凝土的损伤过程; 在混凝土可能发生损伤的位置上, 利用超声脉冲波测定混凝土的声学数据; 从弹性模量、剪切模量和断裂能三个方面, 计算混凝土的力学强度衰减损伤量, 根据超声声学数据度量混凝土的表征结果损伤量; 通过定位损伤故障位置, 得出路面粉煤灰混凝土的损伤检测结果。结果表明: 损伤检测方法在力学损伤和表征结构损伤两个方面的检测误差均低于预设值, 检测精度满足设计与应用要求。

关键词: 冻融循环; 路面损伤; 粉煤灰混凝土; 损伤检测

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2023) 04-0074-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.013

YUAN MaoLin

(Xuchang Rural Road Development Service Centre, Xuchang 461000, China)

Abstract: Aiming at the problem of low detection accuracy of the existing damage detection methods, the optimization design of the damage detection method of fly ash concrete on pavement is realized on the premise of fully considering the freeze-thaw cycle. According to the principle of freeze-thaw cycle, the damage process of fly ash concrete is simulated. The acoustic data of concrete are measured by ultrasonic pulse wave at the position where concrete may be damaged. The mechanical strength attenuation damage of concrete is calculated from three aspects: elastic modulus, shear modulus and fracture energy, and the damage of concrete is measured according to ultrasonic acoustic data. By locating the damage fault position, the damage detection results of fly ash concrete on pavement are obtained. The results show that the detection errors of the damage detection method in both mechanical damage and structural damage are lower than the preset values, and the detection accuracy meets the design and application requirements.

Keywords: freeze thaw cycle; pavement damage; fly ash concrete; damage detection

0 引言

由于混凝土具有良好的刚性特征, 因此被广泛地应用到多种不同路段的建设工作中^[1]。用作水泥混凝土面层的材料包括普通混凝土、钢筋混凝土、粉煤灰混凝土等, 与其他混凝土材料相比, 粉煤灰混凝土可以在常温条件下与混凝土中的水进行二次反应, 生成硅酸钙凝胶, 在降低混凝土

作者简介: 袁茂林 (1972—), 男, 高级工程师, 研究方向: 道路交通工程, 公路试验检测等。

收稿日期: 2022-02-23

材料溶出概率的同时, 填充了混凝土内部孔隙, 对于改善混凝土的力学性能以及耐久性具有重要意义。

冻融循环是由于外界温度变化产生的自然现象, 在零度以上状态下使结构体表面的冰霜融化成水滴渗透到结构内部, 而当外界温度低于零度时, 结构内部的水分冻结成冰, 产生膨胀, 最终导致结构内部出现裂缝损伤, 并影响结构体的力学性能。由此可见, 冻融循环对粉煤灰混凝土的损伤是一个动态积累的过程。为了了解路面混凝土的实时损伤状态和程度, 提出混凝土损伤检测方法。

为了降低检测过程对混凝土产生的二次损伤, 当前检测方法均为无损检测方法。然而在实际应用过程中, 发现现有方法未考虑到冻融循环作用对损伤程度的影响, 导致最终检测结果存在较大误差。为了解决上述现有检测方法存在的问题, 对其进行优化设计, 以期能够提升粉煤灰混凝土损伤的检测精度, 为路面结构的维护提供参考依据。

1 路面粉煤灰混凝土损伤检测方法设计

在冻融循环条件下, 对路面粉煤灰混凝土产生的损伤可以分为力学性能损伤和表面结构损伤两个方面, 因此优化设计的损伤检测方法需要从上述两个方面进行检测, 从而得出较为全面的检测结果。

1.1 模拟冻融循环损伤过程

冻融循环对粉煤灰混凝土的损伤作用是温度场、应力场和渗流场的耦合结果, 三者之间的耦合关系如图 1 所示。

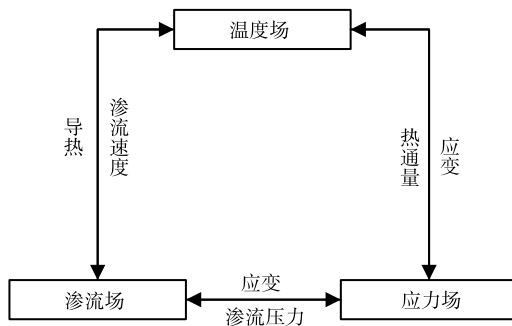


图 1 温度-应力-渗流耦合作用机制

Fig. 1 Coupling mechanism of temperature-stress-seepage

根据热力学第一定律, 路面粉煤灰混凝土在冻融循环过程中的非稳态传热方程可表示如下:

$$C_t \rho_{\text{concrete}} \frac{\partial T}{\partial t} = \rho_i \lambda \frac{\partial \eta_i}{\partial t} - C_{wv} \rho_w T_0 + Q_v \quad (1)$$

式中: T 为混凝土温度; C_v 、 C_{wv} 分别为混凝土及其内部水的比热; ρ_{concrete} 、 ρ_i 、 ρ_w 分别为混凝土、冻结冰以及液体水的密度值; 参数 λ 、 η_i 、 Q_v 分别为混凝土的导热系数、内部结构中液态水的冻结率以及热源强度; t 为冻融循环时间^[2]。

同理可以得出应力场和渗透场的关系方程如下:

$$\begin{cases} \sigma = G(\varepsilon - \varepsilon_{th}) \\ \rho_w S_s \frac{\partial P}{\partial t} + \left[-\frac{\mu}{\gamma} (P + \rho_w g H_g) \right] = \chi_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: G 为混凝土的刚度矩阵; ε 、 ε_{th} 分别为总应变和温度应变; σ 为冻融循环与渗透共同作用下产生的应力; P 为渗透压力; μ 、 γ 、 S_s 、 g 分别为渗透率、黏滞系数、储水系数以及重力加速度; H_g 、 χ_0 分别为水头高度和渗流场源。

结合上述冻融循环作用原理, 根据静水压力假设, 混凝土在内水压力的作用下处于受拉状态, 在冻融循环过程中产生损伤, 并逐渐积累^[3]。在混凝土内部, 由于孔结构是随机分布的, 混凝土处于饱水极限状态, 因此, 假定混凝土内部的静水压力也是均匀的, 假设冻融循环次数为 n , 混凝土冻融损伤演化方程如下:

$$E(D) = 1 - \exp\left\{-\left[\frac{(Kn - GP\mu)}{T}\right]^\sigma\right\} \quad (3)$$

式中: K 为时间尺度因子。

由此在考虑冻融循环作用条件的情况下, 完成对路面粉煤灰混凝土损伤过程的模拟。

1.2 超声声学数据

利用超声设备直接测出的超声信号的声学参数, 用来反映混凝土材料的性能、内部结构和成分等信息^[4]。超声声学参数的测定原理如图 2 所示。

在粉煤灰混凝土的超声声学参数测定过程中, 首先需要结合冻融循环下混凝土的损伤模拟结果确定测点位置。对于均匀介质, 超声传播纵波和

材料科学

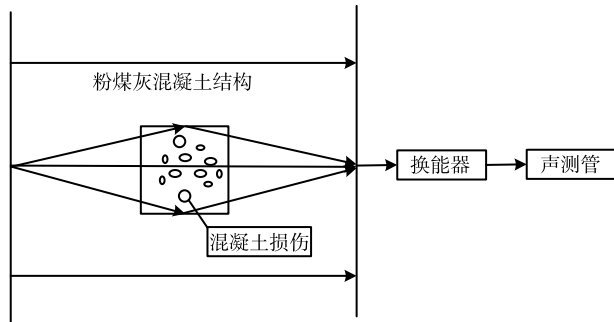


图2 超声声学参数测定原理

Fig.2 Determination principle of ultrasonic acoustic parameters

横波速度的测定结果可以表示为:

$$\begin{cases} v_{\text{vertical}} = \sqrt{\frac{E}{\rho_{\text{concrete}}(1+\beta)(1-2\beta)}} \\ v_{\text{level}} = \sqrt{\frac{W}{\rho_{\text{concrete}}}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: E 、 W 分别为弹性模量和剪切模量; β 为泊松比。接收超声波的能量参数测定结果为:

$$En = \frac{\int_0^{\infty} V^2(t) dt}{R} \quad (5)$$

式中: $V(t)$ 、 R 分别为超声检测设备的电压值和阻抗值^[5]。

同理可以得出路面粉煤灰混凝土各个测点上幅值、频率等超声声学数据的测定结果。

1.3 计算混凝土力学强度衰减损伤量

根据超声声学参数的测定结构, 计算混凝土的力学强度衰减损伤量^[6]。根据混凝土的损伤原理, 可以得出混凝土刚度损伤与声波之间的关系为:

$$\Delta G = 1 - \frac{v^*}{v} \quad (6)$$

式中: v^* 、 v 为有无损伤混凝土状态下, 声波在材料中的传播速度, 两个变量在取值时, 需要综合考虑横波和纵波两个方向, 最终得出的结果即为混凝土刚度损伤量。

从混凝土的弹性模量力学性能方面来看, 混凝土在初始冻融阶段, 试件内部存在微裂纹、微孔隙等缺陷, 对试件的损伤程度较小, 而随着冻融循环的持续进行, 试件内部因冻胀力和孔隙水压力等因素共同作用, 导致原有微裂隙不断发育,

混凝土密实度逐渐降低, 材料损伤程度不断加剧, 宏观上混凝土自振频率下降^[7]。由此可以将混凝土相对弹性模量量化表示为:

$$\Delta E = \frac{\sum_i^n |E_{dn-i} - E_{d0-i}|}{n} \quad (7)$$

式中: E_{dn-i} 、 E_{d0-i} 分别为冻融循环前后混凝土测点 i 位置上的弹性模量值; n 为测点数量。

同理可以得出混凝土的剪切模量损伤量为:

$$\Delta W = \frac{\sum_i^n |W_{dn-i} - W_{d0-i}|}{n} \quad (8)$$

式中: W_{dn-i} 、 W_{d0-i} 分别为冻融循环前后混凝土测点 i 位置上的剪切模量值。

此外还需要计算混凝土的断裂能, 用以表示混凝土裂缝扩展单位面积耗散的能量, 具体的计算公式如下:

$$F_{\text{crack}} = \frac{\int_0^{\sigma_{\text{max}}} \psi + mg\sigma_{\text{max}}}{(h-a)b} \quad (9)$$

式中: a 、 b 均为常数系数; h 为混凝土结构高度; ψ 、 m 分别为结构荷载与质量; σ_{max} 为混凝土表面的最大形变量。

通过比对冻融循环前后断裂能的变化, 即可得出断裂能损失率的度量结果^[8]。综合刚度、弹性模量、剪切模量和断裂能损失率等多个方面, 得出混凝土在冻融循环条件下的力学性能损伤量化计算结果。

1.4 表征结构损伤量

根据超声波的检测反馈数据, 分别从水平和竖直两个方向上确定路面粉煤灰混凝土表面出现结构损伤的起始位置和终止位置, 也就是超声波数据发生变化和数据恢复的节点位置, 分别将其标记为 x_{start} 、 x_{end} 、 y_{start} 和 y_{end} , 那么混凝土表面的结构损伤可以量化表示为:

$$\text{Area}_{\text{damage}} = \sum |x_{\text{start}} - x_{\text{end}}| \cdot |y_{\text{start}} - y_{\text{end}}| \cdot z \quad (10)$$

式中: $|x_{\text{start}} - x_{\text{end}}|$ 和 $|y_{\text{start}} - y_{\text{end}}|$ 分别为混凝土表面结构损伤, 也就是表面裂缝的长度和宽度; z 为

裂缝的深度, 可以通过计算超声波数据的变化量直接得出该变量的具体取值^[9]。

由于冻融循环导致的混凝土表征损伤呈不规则形态, 因此需要对各个损伤部分进行逐一求解, 最终的累加结果即为表征结构损伤量的最终度量结果^[10]。

1.5 损伤检测

除了混凝土损伤量外, 还需要确定混凝土的具体损伤位置^[11]。就一维声源定位即直线定位而言, 假定两传感器间的距离为 d , 则声发射源与任一传感器的距离 L 可表示为:

$$(t_1 - t_2) \times v_0 = 2L - d \quad (11)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为超声信号发射到达两个接收传感器的时间; v_0 为超声信号在对应介质中的传播速度。

在此基础上可以确定损伤故障位置坐标为:

$$\begin{cases} x_{\text{damage}} = x_1 + L_x = x_2 - L_x \\ y_{\text{damage}} = y_1 + L_y = y_2 - L_y \end{cases} \quad (12)$$

式中: (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 为接收传感器的坐标; L_x 、 L_y 分别为测距结果在 x 和 y 方向上的距离分量^[12-13]。

最终将路面粉煤灰混凝土是否损伤、损伤量以及损伤位置的检测结果以可视化的形式输出。

2 实测分析

2.1 原材料与试验仪器

为了降低此次试验对实际路面粉煤灰混凝土结构的影响, 根据混凝土结构制作试件, 因此需要在试验之前准备相关的混凝土材料以及试件制备仪器。研究的混凝土由水泥、细骨料、粗骨料和粉煤灰四个部分组成, 其中水泥采用的是 P·O 42.5R 型普通硅酸盐水泥, 其密度为 3100 kg/m^3 , 细骨料和粗骨料的品种分别为 0.075 mm 的中砂和 17.5 mm 的碎石, 表观密度分布为 2700 kg/m^3 和 2750 kg/m^3 , 堆积密度均为 1640 kg/m^3 。另外, 粉煤灰选用的是某工厂生产的 I 级粉煤灰, 密度和比表面积分别为 2.47 g/cm^3 和 $665 \text{ m}^2/\text{kg}$ 。除了上述混凝土的基本组成材料外, 还需要准备微膨胀剂、超塑化剂、引气剂等其他辅助材料, 并记录原材料的物理性

质和生产批次。试验仪器主要分为冻融循环设备和超声波测试仪器, 冻融试验设备为 TDR-1 型混凝土自动快速冻融试验机, 而选择的超声波检测分析设备型号为 CTS-45, 该仪器可实现对混凝土试件中超声波传播时的声时、振幅和频率的自动检测。

2.2 制作试件

路面粉煤灰混凝土试件的制作主要分为三个步骤, 分别为配合比计算、执行制备和试件养护。为了保证试验结果的可信度, 综合考虑多种路面粉煤灰混凝土结构情况, 试验准备四种不同配合比的试件, 均为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的立方体, 配合比见表 1。

表 1 路面粉煤灰混凝土试件配合比数据表
Table 1 Data table of mix proportion of pavement fly ash concrete specimens

试件编号	水泥含量/kg	细骨料含量/kg	粗骨料含量/kg	粉煤灰含量/%	引气剂/%	水/kg
A	350	705	1150	10	0.03	165
B	340	700	1140	20	0.06	165
C	330	695	1130	30	0.09	165
D	320	690	1120	40	0.12	165

先将物料按表 1 规定的比例分别称重, 倒入各自的容器中, 然后将称量结果依次倒入搅拌机中搅拌。装配制作试件的有机玻璃模具, 并将混合好的材料放入模具中振动压实。浇注混凝土样品 24 h 后拆模, 在标准保养室养护至 28 d 的试件作为试验用试件。

2.3 添加冻融循环条件

初始混凝土试件在冻融条件下, 采用快冻法处理试件。将混凝土试件浸泡 2 h 后, 将其放入到冻融试验机中, 设定低温温度为 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, 进行半小时的低温冷冻。完成冷冻后用注射器穿透保鲜膜向内注水, 将试验箱温度调整为 $+20 \text{ }^\circ\text{C}$, 执行融化操作。试验箱内温度由 $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ 降至 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, 然后逐渐升温至 $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ 为一次冻融循环, 每次冻融循环在 12~14 h 内完成。把混凝土试件分为 2 组, 冻融循环次数为 50 次、100 次, 得到试件的冻融循环结果。图 3 为不同冻融循环次数处理后得出的混凝土试件表征。

在冻融循环处理过程中, 将不同配合比试件

材料科学

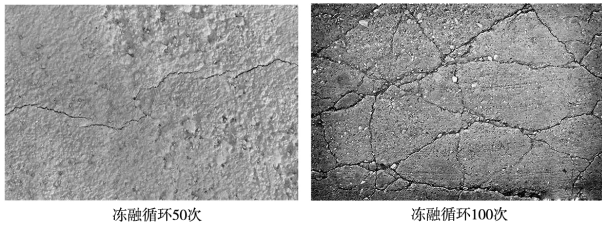


图3 不同冻融循环次数处理后的混凝土试件表征图

Fig. 3 Characterization diagram of concrete specimens treated with different freeze-thaw cycles

进行均匀分配, 保证 50 次、100 次冻融循环处理组别中包含四种不同配合比试件, 并对试件进行重新分组。

2.4 试验过程

对冻融循环处理后混凝土试件直接测量, 并将其作为验证设计损伤检测方法的对比数据。通电预测超声仪器, 设定设备的工作模式, 得出各个测点在力学性能和表面结构两个方面的检测结果。表 2 和表 3 分别为 A 混凝土试件在 50 次冻融循环处理后的力学性能检测结果和表征结构损伤检测结果。同理可以得出其他试件在不同冻融次数后的损伤检测结果。

表 2 力学性能检测结果

Table 2 Test results of mechanical properties

弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	断裂能衰减率/%
47.7	35.3	1.4

表 3 表征结构损伤检测结果

Table 3 Characterization of structural damage detection results /mm

损伤长度	损伤宽度	损伤深度	表征损伤量
22.0	2.7	8.4	523.5

2.5 设置检测性能评价指标

根据检测方法的设计目的, 试验主要针对检测精度性能进行测试, 根据 (GB/T50082-2009) 《普通混凝土力学性能试验方法标准》的要求, 设置的弹性模量变化量、剪切模量变化量、断裂能衰减率作为性能评价指标, 计算公式为:

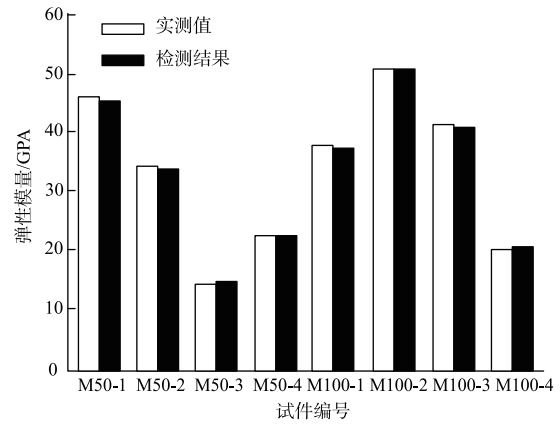
$$E_c = \frac{|X_i - X_r|}{X_r} \quad (13)$$

式中: E_c 为力学损伤检测误差, 结果应该不超过 2%。 X_i 、 X_r 分别为混凝土力学性能损伤的检测结果和实测结果。

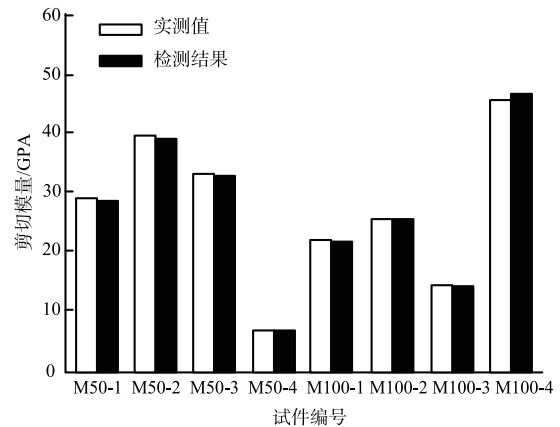
2.6 结果分析

图 4 为反映力学强度衰减损伤检测误差的测

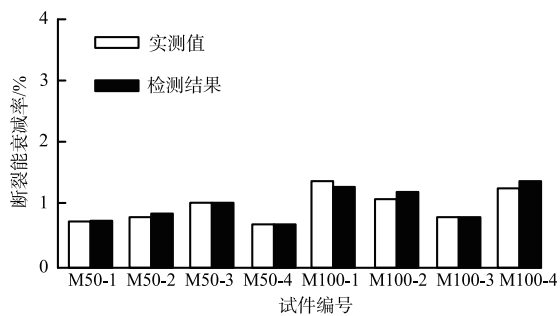
试结果。



(a) 弹性模量衰减量



(b) 剪切模量衰减量



(c) 断裂能衰减率

图 4 力学强度衰减损伤检测误差对比结果

Fig. 4 Comparison results of mechanical strength attenuation damage detection errors

从图 4 中可以直观的看出, 设计检测方法的输出结果与实测结果之间无明显差别, 将图 4 中的数据代入到式 (13) 中, 可以得出设计方法的弹性模量变化量、剪切模量变化量、断裂能衰减率分别为 0.32%、0.27% 和 1.4%, 均低于 2%。

测试不同试件的表征结构损伤情况, 结果见表 4。

表 4 混凝土表征结构损伤检测结果
Table 4 Concrete represents structural damage detection results

冻融次数 /次	试件 编号	实测			检测		
		长度	宽度	深度	长度	宽度	深度
50	M50-1	22.0	2.7	8.5	22.0	2.7	8.5
	M50-2	33.2	1.1	6.7	33.2	1.1	6.7
	M50-3	18.4	1.5	3.9	18.4	1.4	3.9
	M50-4	16.8	0.8	4.4	16.8	0.8	4.3
100	M100-1	36.1	2.3	9.6	36.1	2.3	9.6
	M100-2	45.7	2.9	7.5	45.7	2.9	7.5
	M100-3	27.6	3.0	4.9	27.6	3.0	4.9
	M100-4	25.3	1.6	5.2	25.3	1.6	5.1

由表 4 中的检测结果可知, 设计检测值与实测值基本相同, 两者的误差相差很小。由此可见, 在不同的冻融循环次数条件下, 设计方法的检测精度满足设计要求。

3 结束语

从试验结果中可以看出, 通过对冻融循环条件的充分考虑, 优化设计的损伤检测方法实现了检测性能的有效提升, 但依然存在一定程度的检测误差, 误差产生的原因主要是未考虑到路面荷载对混凝土损伤造成的影响, 因此需要在今后的研究中针对检测精度进一步优化。

参 考 文 献

[1] 刘燕, 王泽坤, 李忠献, 等. 冻融-干湿耦合循环下粉煤灰

混凝土损伤度分析 [J]. 混凝土, 2020 (5): 32-35+39.

- [2] 李肖. 盐酸环境下粉煤灰混凝土的冻融循环衰减特性研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45 (2): 6-8.
- [3] 屈锋, 胡松, 石卫华, 等. 冻融循环作用对电化学除氯混凝土的损伤程度影响 [J]. 应用力学学报, 2020, 37 (6): 2611-2616+2708-2709.
- [4] 王宗熙, 姚占全, 何梁, 等. 腐蚀介质下粉煤灰混凝土宏观性能时变损伤 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (8): 133-138.
- [5] 肖家浩, 饶玉龙, 李勇. 基于压电波动法的混凝土损伤检测 [J]. 四川建材, 2019, 45 (9): 32-33+68.
- [6] 徐存东, 王铭岩, 王燕, 等. 超声波平测法在混凝土早期受冻损伤检测中的应用研究 [J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (4): 1-9.
- [7] 皇星星, 梁西建. 某预应力混凝土组合箱梁桥损伤检测与加固 [J]. 低温建筑技术, 2020, 42 (8): 145-147+151.
- [8] 许颖, 郑倩, 曹宇萌. 基于激光超声二次谐波法检测混凝土早期损伤 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2021, 48 (5): 63-72.
- [9] 冯向侠, 赵福荣. 某工业构筑物混凝土基座腐蚀损伤检测 [J]. 甘肃冶金, 2019, 41 (2): 117-122.
- [10] 许颖, 王青原, 罗聪聪, 等. 基于激光热激励红外热成像纤维增强聚合物复合材料加固混凝土结构界面损伤无损检测 [J]. 复合材料学报, 2020, 37 (2): 472-481.
- [11] 刘娟, 胡小芳. 改性粉煤灰填充 SBS 复合材料流动性能研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2009, 38 (4): 22-24+39.
- [12] 陈猛, 贾益铭, 陈耕野, 等. 轴压荷载下钢管钢筋混凝土损伤状态超声检测研究 [J]. 工程力学, 2019, 36 (10): 172-179.
- [13] 陈剑, 吴瑾炎. 混凝土损伤的无损检测方法分析 [J]. 中国建材科技, 2020, 29 (6): 20-21.

(上接第 63 页)

参 考 文 献

- [1] 刘钰坤. 市政污泥与生活垃圾协同焚烧处理技术分析 [J]. 低碳世界, 2021, 11 (10): 12-13.
- [2] 王碧茹, 贾里, 王彦霖, 等. 污泥和煤泥的共燃烧行为研究 [J/OL]. 煤炭科学技术, 1-11 [2021-10-29]
- [3] 刘燕, 马若男, 李国学, 等. 基于添加剂使用的污泥堆肥厂经济效益分析 [J]. 农业环境科学学报, 1-9 [2021-10-25]
- [4] 陈冠益, 余洋, 李宁, 等. 污泥生物炭基催化剂在高级氧化水处理的应用 [J/OL]. 精细化工, 1-11 [2021-10-25]
- [5] 周易, 邓文义, 胡明涛, 等. 不同热解活化条件下制备的污泥炭常温催化氧化 NO [J/OL]. 燃料化学学报, 1-10 [2021-10-25]
- [6] 王中慧, 岳汉, 陈沛波, 等. 生物质电厂掺烧污泥衍生燃料试验研究 [A]. 中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科

学学会 2021 年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集 (二) [C]. 中国环境科学学会环境工程分会: 《环境工程》编辑部, 2021: 6.

- [7] 王碧茹, 贾里, 王彦霖, 等. 污泥和煤泥的共燃烧行为研究 [J/OL]. 煤炭科学技术, 1-11 [2021-10-25]
- [8] 高琦, 张宇驰, 巴明芳, 等. 重金属污泥磨细粉对硅酸盐水泥基材料性能的影响 [J/OL]. 硅酸盐通报, 1-13 [2021-10-25]
- [9] 赵国浩. 铁尾矿砂与干化污泥制备免压免烧砖的研究 [J]. 砖瓦, 2021 (8): 15-16.
- [10] 马磊, 刘振, 赵绘婷, 等. 造纸污泥-煤矸石陶粒轻骨料的制备及性能研究 [J]. 河南科学, 2021, 39 (7): 1149-1154.
- [11] 鲁浩. 污泥钢渣陶粒滤料的制备及其在生活污水处理中的应用研究 [D]. 安徽工业大学, 2014.
- [12] 彭明国, 葛秋凡, 李美娟, 等. 利用电镀污泥制备水处理用陶粒滤料 [J]. 电镀与涂饰, 2018, 37 (3): 142-146.