



## 煤矸石基功能胶结体承载过程中电磁涡流感应特性

肖猛 巨峰 何泽全 宁湃 王腾飞 王栋

### 引用本文:

肖猛, 巨峰, 何泽全, 等. 煤矸石基功能胶结体承载过程中电磁涡流感应特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 292–304.  
XIAO Meng, JU Feng, HE Zequan. Induced eddy currents characteristics of coal gangue-based functional concrete in compression process[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 292–304.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2025-0264>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 采空区煤矸石浆体充填技术研究进展与展望

Research progress and prospect of coal gangue slurry backfilling technology in goaf  
煤炭科学技术. 2023, 51(2): 143–154 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1725>

#### 煤矸石胶结充填管路输送不满管流及其防治方法研究

Research on non-full pipeline flow transportation and prevention method of coal gangue cemented backfill  
煤炭科学技术. 2020, 48(9): 117–122 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/196d092e-6bf8-4a50-8c0e-a1a1e6b078a2>

#### 煤矸石混凝土性能及提升研究进展

Research progress in performance and enhancement of coal gangue concrete  
煤炭科学技术. 2025, 53(2): 407–425 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1070>

#### 特细砂煤矸石混凝土力学性能试验研究

Experimental study on mechanical properties of superfine sand and coal gangue concrete  
煤炭科学技术. 2022, 50(9): 57–66 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/81c5f803-6bb8-4c86-b14b-46fc0c6e93f8>

#### 红土膏体充填材料及其物理特性试验研究

Experimental study on red clay paste backfilling material and its physical characteristics  
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 61–68 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.008>

#### 煤矸石资源化利用现状与进展

Current situation and progress of coal gangue resource utilization  
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 380–390 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1917>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

肖 猛, 巨 峰, 何泽全, 等. 煤矸石基功能胶结体承载过程中电磁涡流感应特性[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(6): 292–304.

XIAO Meng, JU Feng, HE Zequan, *et al.* Induced eddy currents characteristics of coal gangue-based functional concrete in compression process[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(6): 292–304.

## 煤矸石基功能胶结体承载过程中电磁涡流感应特性

肖 猛, 巨 峰, 何泽全, 宁 湃, 王腾飞, 王 栋

(中国矿业大学 深地工程智能建造与健康运维全国重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:**煤矸石基胶结体在地下空间中应用广泛, 但受制于地下工程环境复杂、空间有限等条件, 尚缺乏对其承载状态健康监测的有效手段。通过在煤矸石基胶结体中添加导电材料, 提高胶结体电敏感性, 并采用电磁涡流手段监测胶结体在受力状态下电学参数变化, 进而推算得到胶结体的受力状态, 可以克服埋入式传感器安装维护难度大的问题。设计了基于 STM32 处理器的电磁涡流试验平台, 制备了含有钢纤维的煤矸石基功能胶结体试件, 开展了力学和电磁涡流感应试验, 分析了单轴、循环 2 种受压载荷下不同钢纤维掺量试件的电磁涡流感应信号变化特征。结果表明: 电磁涡流感应信号与应力应变的阶段变化具有较强的一致性。在单轴压缩载荷下, 试件的电阻变化分数(FCR)变化可分为初始恒定阶段、快速下降阶段、缓慢下降阶段 3 个阶段, 分别与应力—应变曲线中压密阶段、弹性阶段和峰后阶段相对应; 循环压缩载荷下, 钢纤维为 0.8% 和 1.2% 的试件内部呈现“钢纤维接触—导电通路增多—钢纤维分离—导电通路减少”的循环变化, 电压差信号与应力值变化较为一致, 继续提高钢纤维掺量无法进一步提高试件电压差对循环载荷的敏感度; 随着钢纤维掺量由 0.4% 提高至 2.0%, 试件对外部载荷的敏感性呈现先增长后降低的趋势, 电磁涡流感应信号的线性误差线性减小; 当钢纤维掺量为 0.8% 时, 试件在单轴、循环载荷下应力、应变敏感系数最高, 感知能力最强。

**关键词:**煤矸石; 胶结材料; 充填开采; 电磁涡流; 自感知混凝土

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2025)06-0292-13

### Induced eddy currents characteristics of coal gangue-based functional concrete in compression process

XIAO Meng, JU Feng, HE Zequan, NING Pai, WANG Tengfei, WANG Dong

(State Key Laboratory of Intelligent Construction and Healthy Operation & Maintenance of Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Coal gangue-based cemented structures (CGCS) have been widely used in underground engineering. Due to the complex environment and limited space, there is still no effective method to monitor structural health in under-ground engineering. Adding conductive additives in coal gangue-based cemented materials, its conductive properties can be enhanced. The changes of electrical parameters during loading can be detected by eddy current testing method, and then the stress state of CGCS can be calculated. This method can overcome the drawbacks about installation and maintenance induced by embedded sensor. The eddy current testing platform based on STM32 microcontroller was designed, and the CGCS specimens containing steel fibers were prepared. The mechanical and eddy current inducing tests were conducted, and the signal changes of specimens with different steel fiber content during uniaxial compress, cyclic loading were analyzed. The results show that the change in stages of eddy current induction signal has a strong consistency with that of stress-strain curves. The fractional changes in resistivity (FCR) of specimens under uniaxial compressive loading can be divided into 3 stages, including initial constancy, rapid decline, and then slow decline. These 3 stages correspond to the compaction, elastic and after-peak stages in stress-strain curves. In cyclic loading test, the voltage difference changes of specimens with 0.8% and 1.2% steel fiber contents were

收稿日期: 2025-03-02

策划编辑: 常 琛

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.12438/cst.2025-0264

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52304162, 52474158); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2024KYJD1005)

作者简介: 肖 猛(1993—), 男, 山东泰安人, 助理研究员, 博士。E-mail: m.xiao@cumt.edu.cn

consistent to the cyclic compressive loading, and the cyclic changes of “steel fibers contact – increase of conductive paths – steel fibers separation – decrease of conductive paths” were shown. Higher steel fibers content cannot further improve the sensitivity of the voltage difference to cyclic loading. With the SF content of specimens in-creasing from 0.4% to 2.0%, the gauge factor increases first and then decreases, and the linearity of eddy current induction signal decreases linearly. The CGCS specimens with 0.8% SF content have highest gangue factor during uniaxial and cyclic compressive loading test.

**Key words:** coal gangue; cemented material; backfilling mining; eddy current; self-sensing concrete

## 0 引 言

煤矸石充填开采是绿色矿山建设的重要内容,也是规模化处理煤基固废材料的有效手段<sup>[1]</sup>。以煤矸石等矿山煤基固废为骨料的胶结充填材料,也已被广泛应用于煤矿采空区充填、井巷喷浆支护和沿空留巷等绿色开采技术中<sup>[2]</sup>。

矸石基胶结充填体力学性质对地下空间稳定性至关重要,众多学者针对矸石基胶结充填体变形、损伤、破坏进行了研究。冯国瑞等<sup>[3]</sup>基于采空区结构充填的思想,研究了早期受载对充填体力学特性的影响规律,提出了损伤演化模型并用于指导结构充填配比设计<sup>[4]</sup>;并进一步分析了尺寸结构对柱式充填体损伤的影响特征,提出不同截面边长柱式充填体损伤失稳的判断前兆<sup>[5]</sup>。考虑到充填体长时间稳定性,程爱平<sup>[6]</sup>研究了不同应力水平下胶结充填体蠕变特征,并提出了分数阶蠕变本构模型。刘炜震等<sup>[7]</sup>研究了不同养护温度下胶结充填体三轴应力下变形、破坏特征及强度准则。上述研究表明充填体的压实程度、承受应力情况是研究充填工作面矿压的重要因素。

煤矸石基胶结材料在井下形成了大量的人工构筑物。这些构筑物或与岩体形成共同承载体维护围岩结构的稳定(如巷道喷浆支护<sup>[8]</sup>),或作为单一承载结构控制岩层移动变形与矿山压力(如采空区充填、沿空留巷等)<sup>[9-10]</sup>。因此,煤矸石基胶结体(即人工构筑物)的稳定性对于围岩变形和矿山压力控制尤为重要。然而,煤矿井下环境十分复杂,且胶结材料中胶结剂(水泥)在水化过程中会产生一部分不溶于水的化合物,致使胶结体具有易渗透、易裂缝和易脆性等缺点<sup>[11]</sup>,造成煤矸石基胶结体在使用过程中强度和韧性等性能发生劣化;另外由于矸石来源多样、岩性复杂且多含裂隙,以矸石为骨料的人工构筑物更容易出现破坏失稳等问题,导致煤矸石基胶结体长期稳定性劣化,影响人工构筑体的使用寿命;同时由于井下采动应力的影响,对煤矸石基胶结体造成宏观损伤,这些损伤难以通过传统监测手段发现。因此,对煤矸石基胶结体进行健康监测,为结构破坏

失稳提前预警,是确保结构安全可靠的重要手段。

常用的充填体应力监测方法为在充填体内部埋设压力传感器<sup>[12]</sup>,该方法具有安装难度大、测点单一和数据采集不准确等缺点,且对细观损伤确定更加难以掌握,而一旦压力传感器或数据传输线损坏,该方法便无法获得有效数据。因此,亟需开发一种适用于煤矿井下人工构筑体的结构健康监测方法。近年来,混凝土领域提出本征自感知混凝土材料。该材料是一种电导基的感知材料,与传统的电阻应变片具有类似的感知机制,主要通过传统混凝土中复合导电或半导体填料(如钢纤维、碳纤维等)而提高其电导性能,进而增强其电场与力场、热场或者湿度场等之间的耦合效应,从而使其具有本征自感知性能。CHUANG<sup>[13]</sup>将碳纤维加入水泥基胶结材料中制成试样,并利用涂抹银漆和缠绕铜线的方式制备电极,测得了试样受力过程中电阻变化情况。在此基础上,AZHARI<sup>[14]</sup>利用类似方法,测得在单轴压缩载荷下,自感知混凝土电阻率由  $400\ \Omega\cdot\text{cm}$  降低到  $200\ \Omega\cdot\text{cm}$  以下,变化率超过 50%。HAN 等<sup>[15]</sup>采用嵌入式铜网电极测量自感知混凝土电阻率,该方法可更精确测量体积电阻,但同时使得电极安装方法更加繁琐。LEE 等<sup>[16]</sup>采用钢纤维作为导电添加材料,制备的自感知混凝土在单轴加载条件下具备较好的自感知能力,电阻下降了 15.65%。本征自感知混凝土目前已在土木和交通领域成功应用<sup>[17]</sup>,实现了大规模、长时、长距离感知信号稳定采集和传输。

将本征自感知混凝土的思路应用到煤矸石基胶结充填中,是实现煤矸石基胶结充填体结构健康监测的有效手段。但本征自感知混凝土仍需要设置电极和导线,难以适应井下复杂环境。涡流检测是一个基于电磁感应的无损检测方法,具有检测速度快、非接触等优势。采用涡流检测方法无需在被检测结构中设置电极和导线,有望克服本征自感知混凝土难以在地下工程中应用的难题。基于电磁感应的瞬变电磁技术已在地下工程中充分应用<sup>[18]</sup>,但瞬变电磁技术可以对地下空间内高阻值和低阻值区域进行判断,无法对特定结构的电阻率大小准确测定。与瞬变电磁技术相比,涡流监测方法测点范围小,受井



下复杂电磁环境影响弱,更适合对煤矸石基胶结充填体特定区域的应力状态进行监测。基于此,笔者研发了具有自感知性能的煤矸石基功能胶结材料,并提出了基于电磁涡流的无损监测方法,构建了煤矸石基功能胶结体电磁涡流无损监测平台,制备了不同钢纤维掺量的煤矸石基功能胶结体试件,开展了单轴、循环加载试验,探究了煤矸石基功能胶结体电磁涡流感应规律,并分析了加载条件和钢纤维掺量对涡流监测信号的影响特征。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验思路

本文研究思路如图 1 所示。传统胶结体并不具备导电能力,但是通过加入导电材料,在一定条件下,胶结体内部可以形成导电通路<sup>[19]</sup>,因此具备了导电能力,可以使用涡流监测方法对其应力和损伤状态进行监测。

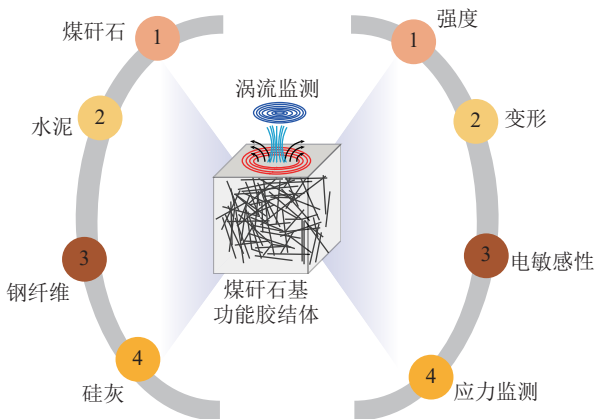


图 1 主要研究思路

Fig.1 Main research approach

涡流监测方法基于电磁感应原理(图 2)。根据法拉第电磁感应定律,当线圈内通过变化的电流  $I$  时,线圈内部及其周围会产生变化的磁场  $H$ ;当线圈靠近导体时,导体受到变化磁场  $H$  的影响,内部产生变化的涡流  $I'$ ,涡流  $I'$  的大小及相位与导体的尺寸、电磁特性等性质相关<sup>[20]</sup>;同时,试件内部的涡流  $I'$  变化也会产生变化的磁场  $H'$ ,磁场  $H$  受到磁场  $H'$  的影响,改变了线圈的磁通量,从而引起线圈感应信号(如阻抗、电压等)的变化。

功能胶结材料典型电阻变化情况如图 3 所示,材料受拉伸载荷时,由于导电材料(如钢纤维)相互远离,导电通路逐渐断裂而减少,引起电阻单调升高。材料受压缩载荷时,处于弹性阶段时导电材料相互靠近,导电通路增加,电阻减小;进入损伤阶段后,裂隙发育引起导电通路减少,电阻也相应升高。在弯

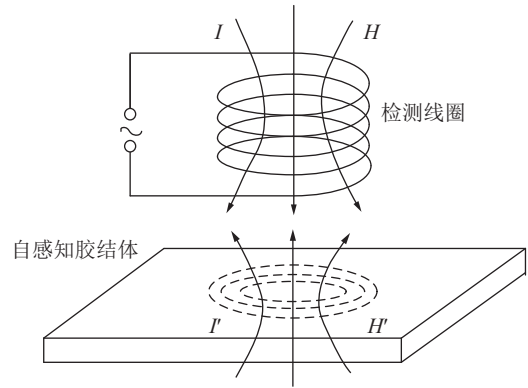
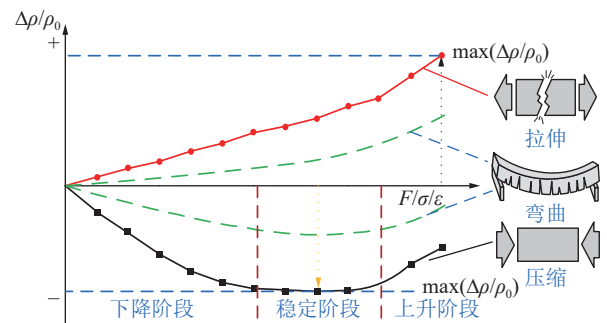


图 2 涡流监测基本原理

Fig.2 Basic mechanism of eddy current testing

曲变形时,材料压缩部分和拉伸部分分别表现相应的电阻变化特征。因此,随着功能胶结体外部载荷的变化,其内部的电导率等参数也相应地发生变化。通过对功能胶结材料施加涡流监测信号,分析感应信号的变化,进而可以得到其应力和损伤状态的变化情况<sup>[21]</sup>。



注:  $\Delta\rho$  为电阻率变化值;  $\rho_0$  为电阻率初始值;  $F/\sigma/\varepsilon$  分别为载荷、应力、应变。

图 3 自感知胶结材料典型电阻-变形曲线<sup>[19]</sup>

Fig.3 Typical resistance-deformation curve of self-sensing cemented material<sup>[19]</sup>

### 1.2 试验材料与设备

为了测量煤矸石基功能胶结材料在受力条件下电磁涡流监测信号变化情况,选取了钢纤维(SF)作为导电添加材料,制备了煤矸石基功能胶结试件,并搭建了电磁涡流监测系统对功能胶结材料电学信号变化情况进行采集,分析功能胶结材料电磁涡流监测信号的变化规律。

#### 1.2.1 试验材料

实验原材料包括煤矸石、水泥、硅灰、减水剂、水和导电添加材料。矸石为洗选矸石,取样地点为徐州市大屯煤电徐庄煤矿。首先,使用颚式破碎机将矸石破碎至 15 mm 以下,并将破碎后的矸石冲洗滤掉灰尘。破碎后的矸石粒径分布如图 4 所示。所用水泥是普通硅酸盐水泥,型号为 42.5 号,  $\text{CaO}$ 、

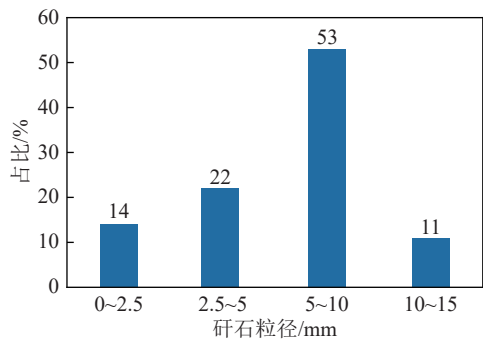


图 4 破碎矸石粒径分布  
Fig.4 Size distribution of crushed gangue

SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的质量分数分别为 65.1%、20.5% 和 5.05%，烧失量为 2.4%，比重 3.05，细度参数为 350 m<sup>2</sup>/kg；所用硅灰中硅质量分数达 92.0%，烧失量为 1.6%，比重 0.65，细度参数为 19.5 m<sup>2</sup>/kg。钢纤维

作为导电添加剂，其形状参数见表 1。

表 1 钢纤维形状参数				
Table 1 Shape parameters of steel fibers				
参数	直径/ $\mu\text{m}$	长度/mm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
取值	200	6	2 060	200

为研究钢纤维掺量对煤矸石基功能胶结体电学指标的影响，本试验参照本征自感知混凝土设计了不同钢纤维含量的试件<sup>[22]</sup>。煤矸石基功能胶结体试件各材料具体配合比见表 2。其中 S0.0 为不掺导电材料的对比组；S0.4、S0.8、S1.2、S1.6、S2.0 为钢纤维矸石胶结体试件，钢纤维在煤矸石基功能胶结体试件中的体积分数分别为 0.4%、0.8%、1.2%、1.6% 和 2.0%。

表 2 试件材料配合比  
Table 2 Mix proportion of sample materials

编号	矸石	水泥	硅灰	减水剂	水	钢纤维
S0.0	1 409.48	563.79	56.38	5.64	253.71	0.00
S0.4	1 403.84	561.54	56.15	5.62	252.69	31.40
S0.8	1 398.21	559.28	55.93	5.59	251.68	62.80
S1.2	1 392.57	557.03	55.70	5.57	250.66	94.20
S1.6	1 386.93	554.77	55.48	5.55	249.65	125.60
S2.0	1 381.29	552.52	55.25	5.53	248.63	157.00

煤矸石基功能胶结体试件制备流程如图 5 所示，首先将 30% 的水和减水剂混合，搅拌均匀并静置 20 分钟；然后将导电材料和混合液导入搅拌机并搅拌均匀；接下来将硅灰和剩余的水导入搅拌机并搅拌；最后加入水泥，低速搅拌 2~3 min。搅拌后的

功能胶结材料倒入试模中制成 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件，并在标准养护条件下养护 18 d。图 6 为养护完成后煤矸石基功能胶结体的 SEM 图像，从图像可以看出，钢纤维在水泥基体内分散较为均匀，没有明显的团聚现象。

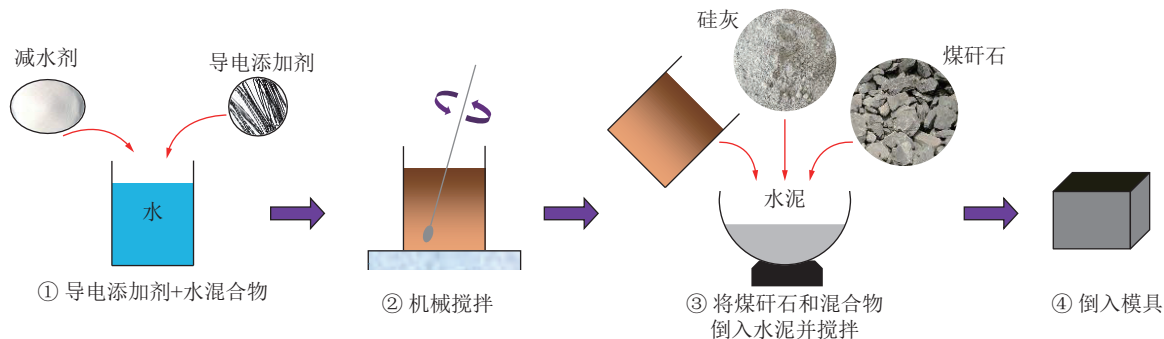


图 5 煤矸石基功能胶结体试件制备流程  
Fig.5 Prepare method of coal gangue-based cemented specimens

1.2.2 电磁涡流监测系统硬件实现

本文中的电磁涡流试验系统是基于 STM32F4-07ZGT6 单片机进行开发，主要由信号发生系统、信

号处理系统、控制系统、传感器单元组成，不同分系统之间的关系如图 7 所示。其中信号发生系统用于产生设计的电信号，经过功率放大器后，传输至由线

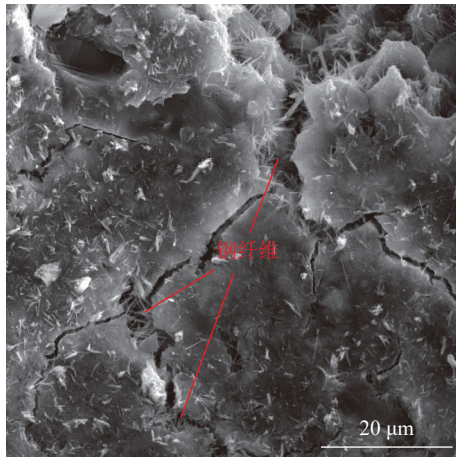


图 6 煤矸石基功能胶结体 SEM 图像

Fig.6 SEM image of coal gangue-based cemented specimens

圈构成的传感器单元。信号处理系统通过采集传感器单元中的感应信号,经过信号放大、调理后得到可以进行 A/D 转换的采集信号。控制系统用于对激励信号参数的控制,并对信号处理系统采集到的数据进行滤波、解调和同步等处理,控制系统是整个系统的控制中心。外接设备主要用于对控制系统命令写入和数据存储等工作。

(1) 激励信号发生系统

1) 微控制器。选用 STM32F407ZET6 型微处理器,该处理器由意法半导体公司生产。STM32 为基于 ARM 内核的 Cortex-M4 处理器,具有功耗低、计算能力强的特点,且该微处理器具有多路定时器,

AD 转换器等丰富的集成外设资源,其外围电路简单,程序开发简便。

2) DDS 正弦交流信号发生电路。本文所采用的 DDS 芯片为 AD9959,由美国 ADI 公司生产,具有高精度、高采样频率的特点。AD9959 芯片时钟最高取样频率可达 500 MHz,其内部包括 4 路带 10 位 DAC 的 DDS 通道。在输出通道方面,该芯片共计 4 个输出通道,且每个通道均具有独立的 32 位频率分辨率、14 位相位失调分辨率和 10 位输出幅度可缩放的分辨率,可以输出频率最高为 200 MHz 的正弦波信号。

3) 功率放大器电路。AD9959-DDS 芯片输出正弦激励信号的输出电流一般为 10 mA,不足以驱动传感器单元在试件中产生足够大的电涡流。为了达到所需的正弦激励信号驱动能力,本文选用德州仪器生产的 THS3001 功放芯片进行功率放大电路设计,对 AD9959 产生的激励信号进行放大。THS3001 为电流反馈式放大芯片,具有高输出驱动能力,在采用 $\pm 5\text{ V}$ 供电时可以输出 100 mA 激励信号,在 $\pm 15\text{ V}$ 供电时可以输出 120 mA 激励信号。

4) 稳压电源电路。监测平台供电模块包括 12 V 干电池、LM2596S 可调降压芯片和稳压电源 PCB 板。由于干电池提供 12 V 直流电源,经过降压芯片降为 5 V 直流电源为 CPU、DDS 芯片等模块供电;同时,5 V 直流电经稳压电源转为 $\pm 12\text{ V}$ 的交流电,为功率放大器电路和传感器模块进行供电。

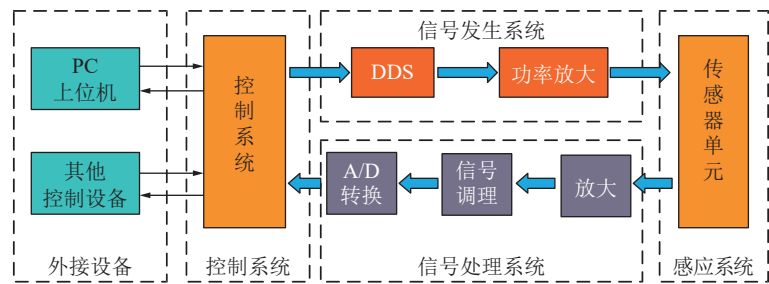


图 7 电磁涡流监测系统硬件结构

Fig.7 Hardware structure of the electromagnetic eddy current testing system

(2) 信号接收系统

1) 差分放大电路。采用 OP07 放大芯片,OP07 是一种超低失调电压、低噪声的运算放大芯片,具有偏置电流低( $\pm 2\text{ nA}$ )和开环增益高的特点。

2) 信号调理模块。信号调理模块用于将传感器模块所采集信号的幅值差和相位差输出,该模块采用的核心部件为 AD8302 芯片。该芯片包含 1 个相位检波器、2 个精密匹配的 60 dB 对数检波器、2 组

偏置单元、2 组输出放大器组和 1 个输出参考电压缓冲器组成,可以测量从低频到 2.7 GHz 频率范围内 2 个输入波形的幅值差和相位差,满足本文的监测要求。

3) 数据采集模块。数据采集的 ADC 芯片采用 ADI 公司的 AD7606 芯片。AD7606 为 8 通道 16 位采样芯片,工作电压为 5 V,运行功耗和待机功耗较低,分别为 100 mW 和 25 mW。该芯片采样率可达



$200 \times 10^3$  次/s(转换速率为完成一次 AD 转换所需时间的倒数), 支持 $\pm 10\text{ V}$ 和 $\pm 5\text{ V}$ 的双极性输入信号。输入信号的值转换完成后, 保存在 AD7606 的寄存器中, 微控制器通过 SPI 方式读取 AD7606 模块的数据。

(3) 传感器单元

传感器单元由 2 个线圈组成, 分别是参考线圈和探测线圈。本文采用电桥法设计系统的传感器模块, 典型的电桥电路如图 8 所示。

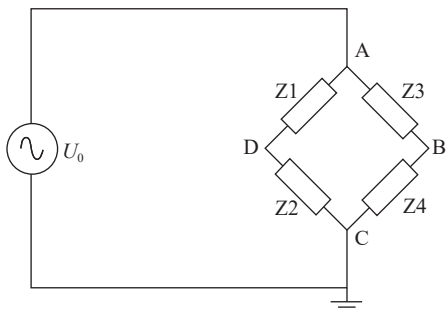


图 8 电桥电路

Fig.8 Bridge electrical circuit

电桥法可以让感应电压  $U$  在电路中自动平衡抵消, 仅保留输出感应电压变化量  $\Delta U$ , 从而保证输出信号的分辨率。如图 6 所示,  $U_0$  为电桥的激励电压,  $Z1$  和  $Z2$  表示参考线圈电阻本身电阻和外部感应电阻,  $Z3$  和  $Z4$  表示监测线圈电阻及其感应电阻。当监测线圈感应电阻变化时, BD 两点的电位差随之改变, 系统将 BD 电位差作为监测数据输出。

(4) 控制程序

信号参数产生和导出由外接 PC 设置。整个系统的各个模块由 STM32 单片机控制生成所需的激励信号, 并将监测数据采集到储存工具中。同时, 控制程序中设有中断服务程序, 用于操作人员利用计

算机进行启停控制、频率控制、数据校零等操作。整体系统如图 9 所示。

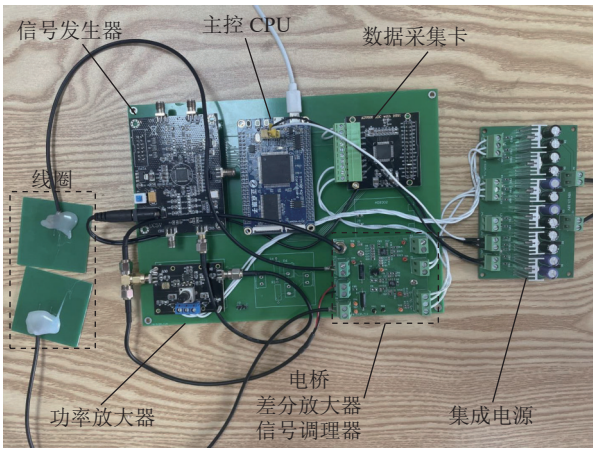


图 9 电磁涡流监测系统

Fig.9 Picture of electromagnetic eddy current testing system

1.3 试验方法

试验系统由加载设备、电磁涡流监测系统组成, 如图 10 所示。加载设备为 MTS816 液压伺服试验机, 感应涡流监测数据由电磁涡流监测系统通过外接笔记本电脑导出。试件养护到龄期后, 对试件进行力学试验。为避免加载过程产生偏心力, 加载前需将试件两端打磨平整, 并放置在压力机加载部位的中心位置。对试件侧面同样打磨平整, 将电磁涡流监测系统的探测线圈黏贴到试件表面。试验加载开始后, 先采用应力控制模式对试件缓慢施加  $0.2\text{ kN}$  压力, 随后采用位移加载控制模式以  $0.4\text{ mm/min}$  的速率对试件进行加载。加载方式包括单轴加载和循环加载, 其中单轴加载以位移加载控制恒速加载至试件破坏; 根据试件单轴抗压强度, 确定同批次试件循环加载试验中最大和最小加载力; 试件加载过程中同步监测试件的电磁涡流信号变化参数。

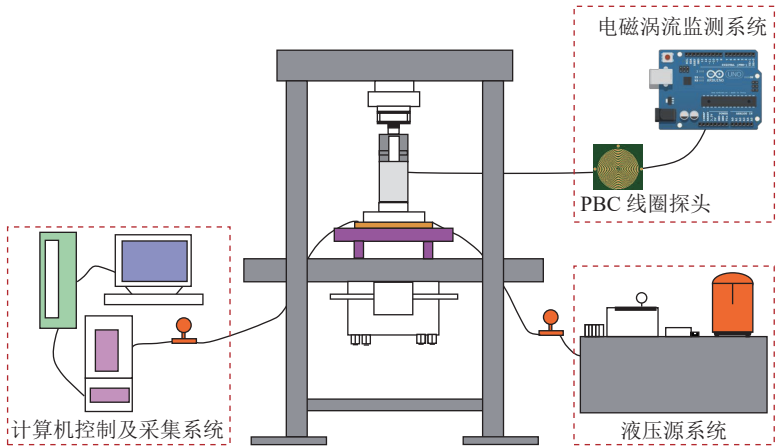


图 10 试验系统布置

Fig.10 Layout of testing system

## 2 试验结果与分析

### 2.1 单轴载荷下煤矸石基功能胶结体感知特性

图 11 表明, 钢纤维显著提升了煤矸石基功能胶凝材料的强度, 但其增强效果并非随纤维掺量增加呈线性趋势。当钢纤维掺量为 0、0.4% 和 0.8% 时, 试件的抗压强度分别为 41.9、49.8 和 55.6 MPa, 呈现出近线性增长趋势, 增幅达 32.62%。然而当钢纤维掺量超过 0.8% 后, 抗压强度变化趋于平缓: 掺量 1.6% 时抗压强度达到 63.5 MPa, 较 0.8% 掺量仅提升 14.24%; 即便掺量增至 2.0%, 其抗压强度较 0.8% 掺量的增幅也仅为 17.53%, 显著低于 0.8% 掺量以下的增长率。此外, 图 10 展示了各组试件的误差分布, 表明增加钢纤维掺量可有效缩小误差范围, 减少同组试件间的强度波动。图中还呈现了煤矸石基功能胶结体的平均峰值应变变化规律: 当钢纤维掺量从 0 增至 1.2% 时, 峰值应变由 0.015 升至 0.021, 增幅达 40%, 证实了钢纤维通过裂纹桥接机制提升材料吸能能力的有效性; 但当掺量超过 1.2% 后, 纤维团聚引发的局部应力集中现象会导致峰值应变下降。

图 12 为煤矸石基功能胶结体在单轴压缩试验中应力-应变曲线与涡流感应能力的对比图, 其中涡流感应能力采用电压差在加载过程中的变化率( $R_{FC}$ )

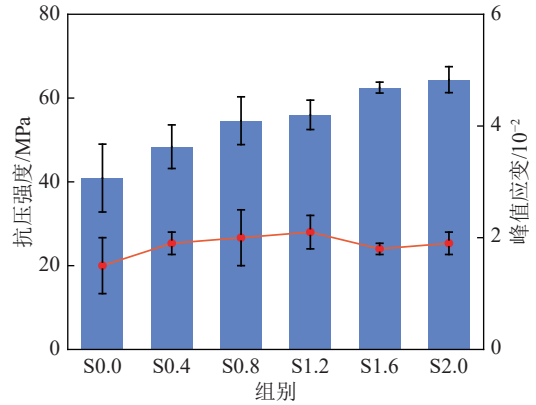


图 11 抗压强度及峰值应变结果

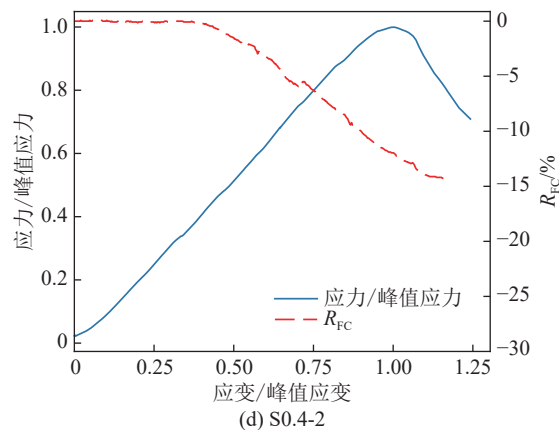
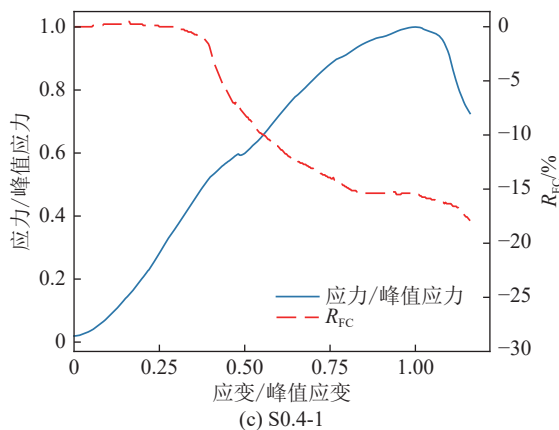
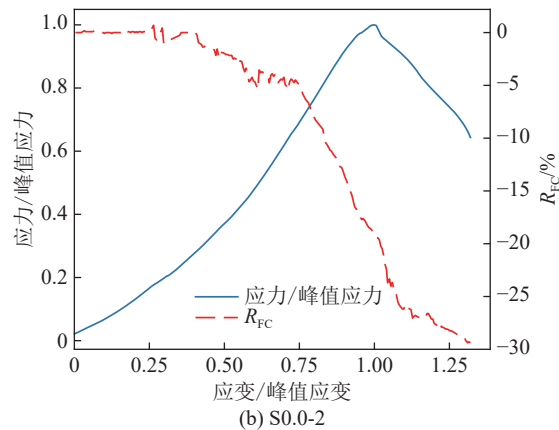
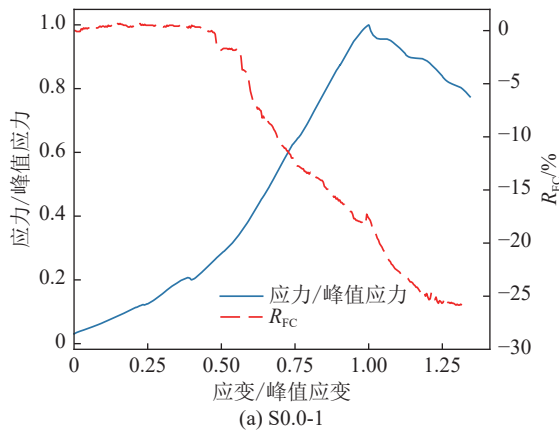
Fig.11 Testing results of compressive strength and peak strain

来表征<sup>[23]</sup>。当  $R_{FC}$  较高时, 试件在加载过程中电压差变化明显, 说明涡流信号对试件变形更加敏感。 $R_{FC}$  的计算式如下:

$$R_{FC} = (u_t - u_0) / u_0 \quad (1)$$

式中:  $u_t$  为  $t$  时刻电压差的测试值, mV;  $u_0$  为电压差初始测试值, mV。

从图 12 可以看出, 随着应变的增加,  $R_{FC}$  的变化大致可以分为 3 个阶段: ① 初始恒定阶段, 该阶段试件的涡流感应电压差基本没有变化, 对应的应力-应变曲线中的压密阶段, 试件内部孔隙在轴向载荷下





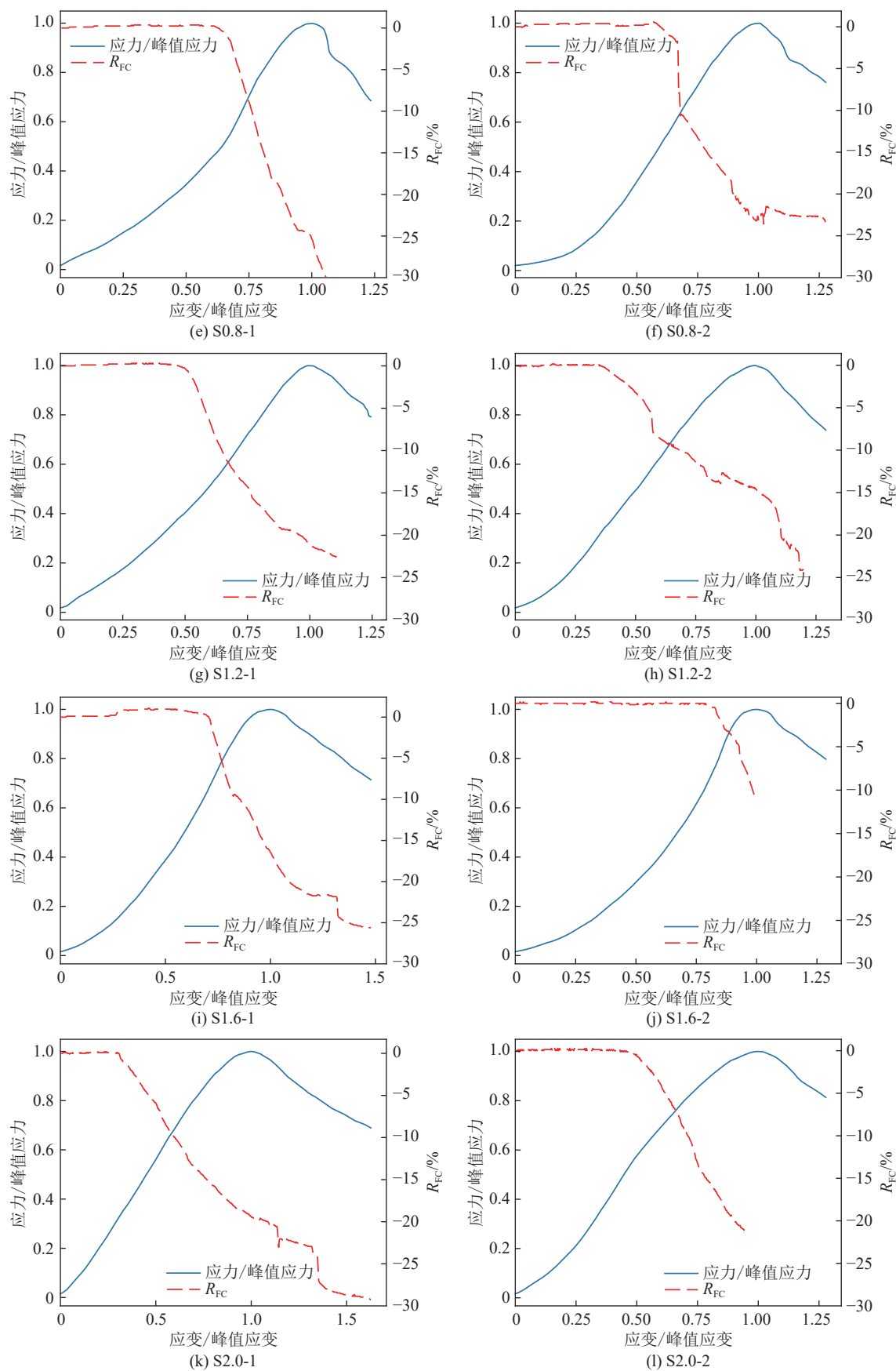


图 12 单轴载荷下矸石功能胶结体时间感知测试结果

Fig.12 Testing results of gangue-based cemented samples under uniaxial stress

闭合,但内部的钢纤维相对位置变化不大,没有产生新的导电通路;②快速下降阶段,该阶段试件涡流感应电压差快速下降,对应应力-应变曲线弹性变形至峰值应力阶段,这一阶段试件孔隙完成闭合,内部发生弹性变形,钢纤维相对位置发生明显变化,新的导电通路形成,试件整体电阻下降,因此电压差也随之下降;③缓慢下降阶段,该阶段试件涡流感应电压差下降速率明显放缓,对应应力-应变曲线的峰后阶段,这一阶段试件内部裂隙快速发育,钢纤维形成的导电通路被裂隙切断,导致试件电阻变化速率下降。

## 2.2 循环载荷下煤矸石基功能胶结体感知特性

煤矸石基功能胶结体作为传感器使用,其在未发生破坏时的感知稳定性是评价其感知能力的重要内容,因此需要对其在弹性阶段循环载荷下感知信

号的变化规律进行分析。

图 13 为 3 次循环载荷下应力和电压差随时间变化的情况。从图 13a 中可以看出,在不掺钢纤维的 S0 组,前 2 次循环加载过程中电压差并没有根据循环载荷出现规律性的变化,这说明循环应力所引起的试件变形,不足以改变试件内部离子导电通道,因此试件的导电性能不产生明显的变化。在第 2 次循环卸载过程中,电压差出现了下降,说明此时试件内部出现微小裂隙<sup>[24]</sup>,孔隙连通产生新的离子导电通路,造成试件电阻降低;在第 3 次循环加载过程中,微小裂隙在压缩载荷作用下闭合,离子导电通道又被切断,因此试件电阻再次升高。

试件掺入钢纤维后,涡流感应信号对循环载荷变化的敏感性明显增强,各种钢纤维掺量下电压差

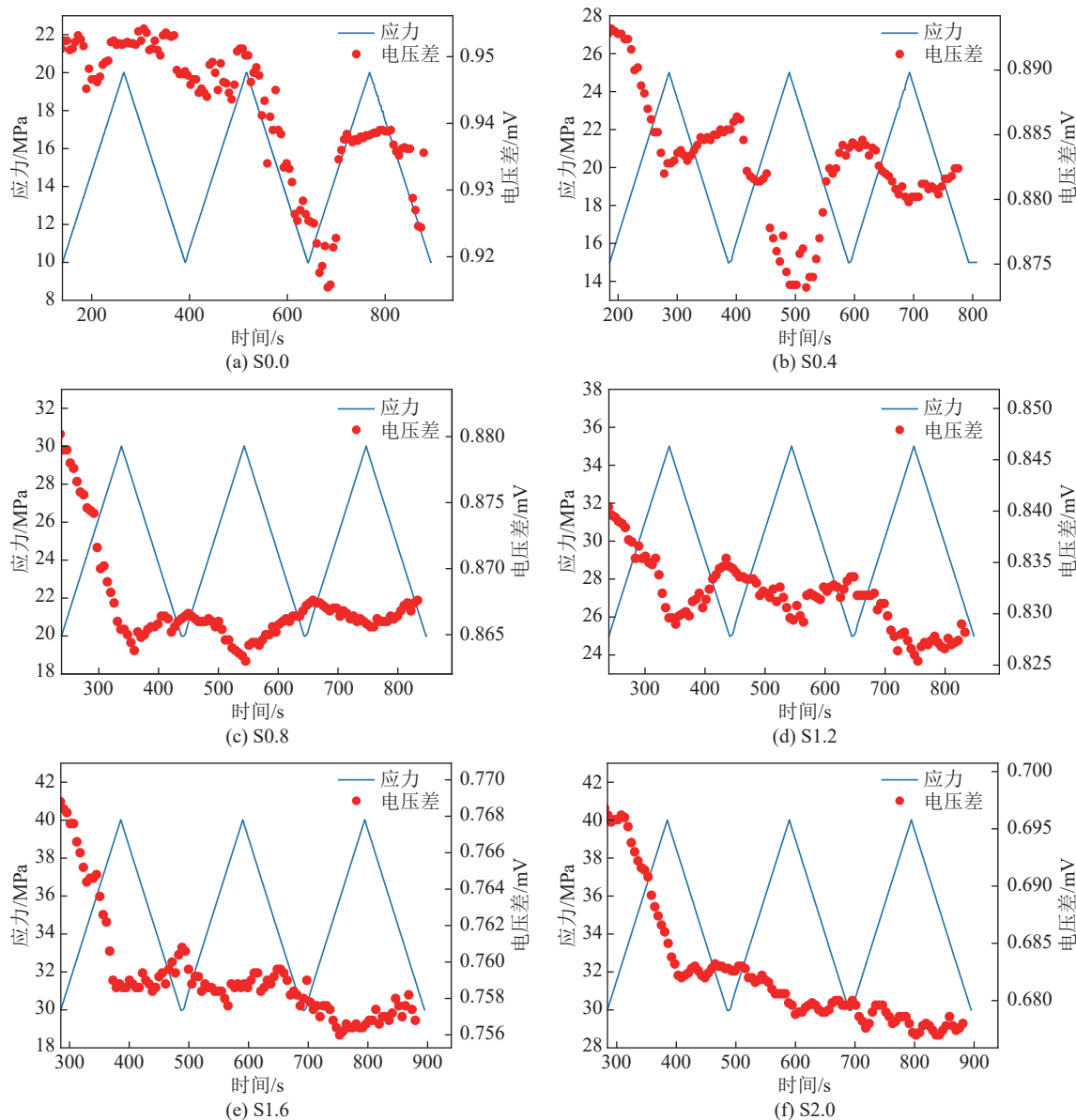


图 13 循环载荷下矸石功能胶结体时间感知测试结果

Fig.13 Testing results of gangue-based cemented samples under cyclic loading

都随着载荷变化出现同步变化。图 12b 为钢纤维掺量为 0.4% 时电压差变化情况, 每次加载过程中电压差下降, 试件电阻降低; 在卸压阶段电压差升高, 试件电阻升高。需要说明的是, 第 2 次加卸载循环时, 试件电压差最小值明显低于其他 2 次加卸载循环, 这可能因为涡流监测区域较小, 试件加载过程中, 探头附近短时间形成钢纤维导电通路, 使得压力差信号下降幅度较大, 但由于此时钢纤维掺量较低, 上述导电通路形成具有偶然性, 因此在第 3 次循环中这一现象没有重复出现。

图 13c 为钢纤维掺量为 0.8% 时电压差变化情况, 在 3 次加载循环中, 电压差基本与应力同步变化, 且 3 次循环中, 电压差变化范围基本相同, 表现出稳定的感知能力。当钢纤维掺量提高到 1.2% 时 (图 13d), 试件在循环加载中涡流感知能力也较为稳定, 但在第 3 次循环中电压差下降值更大, 这是因为随着钢纤维含量增大, 微裂纹造成钢纤维拉拔现象增多, 以往研究表明拉拔现象会降低试件电阻值, 进而造成电压差进一步下降<sup>[25]</sup>。

图 13e 和图 13f 为钢纤维掺量 1.6% 和 2.0% 时电压差变化情况。随着钢纤维掺量进一步提高, 试件对循环加卸载应力不再敏感, 且试件电阻随循环加载次数增多呈现单调递减现象。上述现象的原因是钢纤维含量较高, 在未加载时已经形成了大量导电通路, 在试件变形过程中新产生的导电通路较少, 因此试件电阻变化较小。另一方面, 随着循环加载次数增多, 试件内部的微裂纹增多, 钢纤维的拉拔现象使得试件电阻单调递减。

图 14 为不同钢纤维掺量试件在循环载荷下应力和电位差对比情况, 其中试验为应力加载路径, 点线为电位差。从图中可以看出, 随着钢纤维掺量的

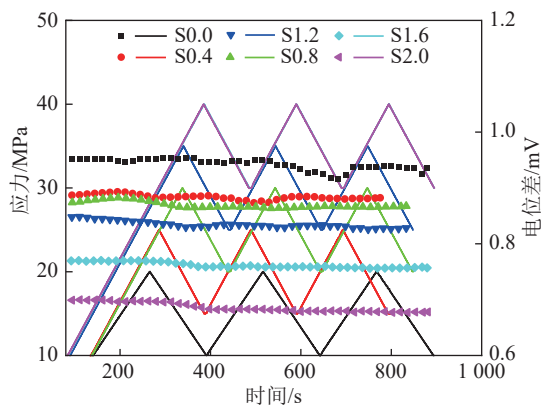


图 14 循环载荷下矸石功能胶结体时间感知信号对比

Fig.14 Testing results comparison of gangue-based cemented samples under cyclic loading

提高, 试件电位差幅值逐渐降低。这说明钢纤维的掺入提高了试件的初始导电性, 使得电位差收到变形的作用程度降低, 表现为电位差变化幅度的减小。

### 2.3 钢纤维掺量对煤矸石基功能胶结体感知特性的影响

1) 钢纤维掺量对  $R_{FC}$  值的影响。由前述试验结果可以看出, 钢纤维掺量对煤矸石基功能胶结体的感知性能具有明显的影响。煤矸石基功能胶结体的承载性能主要在峰前阶段, 根据 2.1 节的试验结果可知,  $R_{FC}$  绝对值在弹性-峰前阶段基本呈现单调递增的趋势, 因此本节选择不同钢纤维掺量试件在峰值应力处的  $R_{FC}$  处的绝对值 ( $R_{pFC}$ ) 进行对比分析。

图 15 为不同钢纤维掺量的煤矸石基功能胶结体试件峰值强度处  $R_{FC}$  ( $R_{pFC}$ ) 值的对比图。从图中可以看出, 对比组 S0.0 在峰值应力时电阻下降 16.15%, 原因是裂隙闭合造成单位孔隙含水量增大, 离子导电通道增多。钢纤维掺量达到 0.4% 后, 试件的平均  $R_{pFC}$  值略有下降, 这是因为试件内部钢纤维周围存在与水泥基体结合的界面, 这些界面切断离子导电通道; 同时因为试件内部钢纤维含量较少, 还不足以相互接触形成导电通路, 因此电阻变化较小。钢纤维掺量达到 0.8% 时, 试件的  $R_{pFC}$  值最大, 此时试件内部钢纤维形成的导电通路成为试件的主要导电方式, 当试件出现变形, 钢纤维相互接触进而增加了内部导电通路, 电阻下降幅度较大。钢纤维掺量超过 0.8% 以后, 试件  $R_{pFC}$  值开始减小并趋于稳定, 这是因为试件在加载前已经有较多钢纤维相互接触形成导电通路, 在后续的加载过程中, 由于试件变形而新产生的导电通路占比较小, 因此试件电阻变化量较低<sup>[26]</sup>。

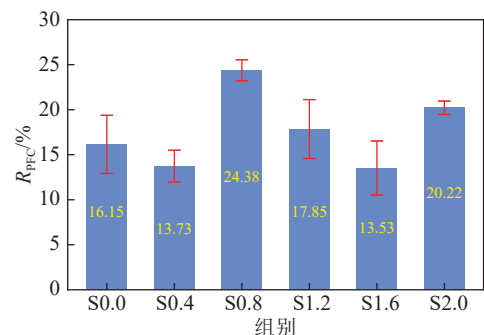


图 15 不同钢纤维掺量试件的  $R_{pFC}$  值

Fig.15  $R_{pFC}$  value of samples with different SF content

2) 钢纤维掺量对应力/应变敏感系数的影响。为分析监测值对试件所受应力和应变的感知性能, 引入应力和应变敏感系数, 其计算式如下<sup>[27]</sup>:



$$G_{F,s} = |R_{FC}|/\Delta\varepsilon \quad (2)$$

$$G_{F,f} = |R_{FC}|/\Delta\sigma \quad (3)$$

式中:  $G_{F,s}$  为应变敏感系数;  $G_{F,f}$  为应力敏感系数;  $\Delta\varepsilon$  为应变在峰值前的变化值;  $\Delta\sigma$  为应力在峰值前的变化值, MPa;  $R_{FC}$  为电压差在应力/应变对应区间上的变化值。

由 2.1 节分析可知, 各组试件在弹性阶段的应力应变曲线和  $R_{FC}$ -应变曲线均表现出较好的线性关系, 因此本文选取 20%~80% 峰值应力作为研究对象, 计算得出不同试件的应变、应力敏感系数如图 16 和图 17 所示。从图 16 可以看出, 所有试件的应变敏感系数均较高(试验用应变片敏感系数为 2), 说明该监测方法对试件变形的敏感度较好。不同钢纤维掺量的应变敏感系数变化规律与  $R_{FC}$  值变化规律基本相同, 随着钢纤维的掺入, 应变敏感系数首先略有降低(S0.4), 随后升高(S0.8), 继而降低并趋于稳定(S1.2、S1.6、S2.0)。不同于  $R_{FC}$ , 对比组 S0.0 的应变敏感系数除低于 S0.8 组外, 均高于其他掺加钢纤维的试件, 这是因为钢纤维与水泥基体界面的存在增加了试件的孔隙率<sup>[28]</sup>, 使得钢纤维煤矸石基胶结体试件在弹性阶段的应变变化值(平均 0.86)高于对比组(0.71)。

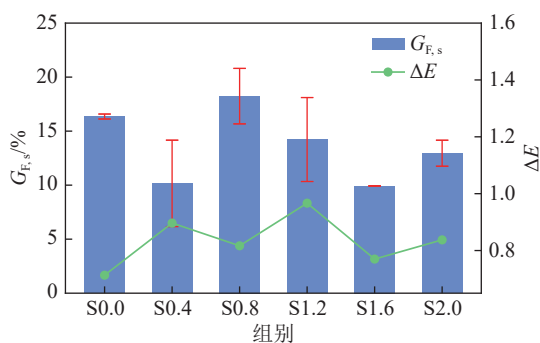


图 16 不同钢纤维掺量的应变敏感系数

Fig.16 Strain gage factor of samples with different SF content

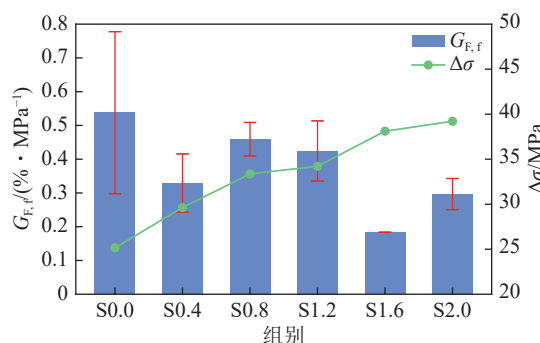


图 17 不同纤维掺量的应力敏感系数

Fig.17 Stress gage factor of samples with different SF content

根据图 17 的试验结果可以看出, 对比组的应力敏感系数高于掺加钢纤维的试件, 这是因为钢纤维的加入提高了试件的整体强度, 因此弹性阶段的应力变化值更大, 单位应力变化范围内的电阻变化相对较小。对比不同钢纤维掺量的试件, S0.8 的应力敏感系数最高, 说明钢纤维掺量为 0.8% 时, 钢纤维随着单位应力加载所形成的新的导电通路最多, 自感知效果最好。

3) 钢纤维掺量对信号稳定性的影响。线性度  $L_E$  为表征测量值数据离散性的重要指标, 该值越小, 表明测量值线性越好。本文选取了  $R_{FC}$  值与应变之间的线性度, 其计算式<sup>[29]</sup>下:

$$L_E = \frac{\Delta\max}{R_{fs}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $\Delta\max$  为  $R_{FC}$  值与线性拟合线之间的最大差值;  $R_{fs}$  为  $R_{FC}$  值的最大值与最小值之差。

图 18 为不同钢纤维掺量试件在弹性阶段的感应信号线性度变化情况。从图中可以看出, 未掺加钢纤维的对比组线性度高于 20%; 掺入钢纤维至 0.4% 含量后, 线性度下降明显; 继续提高钢纤维掺量, 感应信号的线性度基本随着钢纤维掺量线性减小, 数据的离散性降低, 说明加入钢纤维能够有效提高煤矸石基功能胶结体涡流监测信号的稳定性。

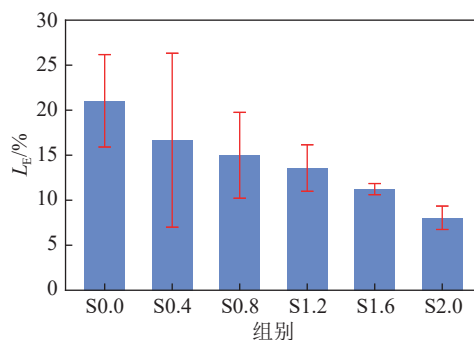


图 18 不同钢纤维掺量试件的线性度

Fig.18 Linearity error of samples with different SF content

### 3 讨 论

煤矿充填开采近年来发展迅速, 但充填体应力监测一直是亟待解决的难题。煤矿充填空间主要为工作面后方的采空区, 受矿井水、充填物料等因素的影响, 传统的应力传感器无法长时间正常工作, 且一旦传感器损坏, 无法进入采空区维修, 使得难以有效对采空区胶结充填体支撑应力大小及空间分布进行监测和分析, 制约了充填开采工作面岩层控制、冲击地压防治等方面的理论发展。

文中试验结果表明, 掺有钢纤维的煤矸石基胶结充填体在受力过程中对电磁涡流信号更加敏感。在单轴压缩阶段, 电压差随着压密、弹性、峰后加载阶段呈现出不同的变化特征; 在弹性阶段循环加载过程中, 电压差随着应力的加卸载也表现出与之对应的下降和增长趋势。此外, 当钢纤维掺量为 0.8% 时, 煤矸石基功能胶结体应变敏感系数为 18.24, 远高于电阻应变片的应变敏感系数(其值为 2), 因此可以通过分析电磁涡流感应信号判断充填体所处的应力状态。

在实际工程现场中, 当胶结充填工作面采空区充填体凝固后, 由工作面巷道或工艺巷向采空区不同区域施工钻孔, 并将电磁涡流探头安装至钻孔底部, 进而获得采空区充填体应力状态的实时变化。当探头出现故障时, 可以通过钻孔更换探头, 以维护监测系统正常运行。有许多需要将充填开采与地下储热、储能、CO<sub>2</sub> 封存等地下空间功能化利用工程相结合, 进一步使得充填体应力环境复杂化。本文提出的监测方法可以应用到上述工程中, 提高地下空间利用的安全性。

本文提出的基于电磁涡流的煤矸石基功能胶结体结构健康状态监测方法可以为地下空间充填体应力状态监测提供新的思路, 但该方法仍存在一定局限性。① 涡流现象具有趋肤效应, 因此有效监测范围主要在探头与被测体接触面, 如何保障监测数据能够反映充填体整体受力状态是亟待解决的问题, 需要研究多探头在不同位置同步监测体系, 建立综合评价方法。② 电磁涡流监测平台激励信号类型、探头线圈参数等因素对监测信号的影响尚不明确, 需要进一步完善监测平台, 提高信号的稳定性和准确度。

## 4 结 论

1) 单轴压缩载荷下煤矸石基功能胶结体电磁感应信号与应力-应变曲线有较强的相关关系。试件的  $R_{fc}$  值变化可分为 3 个阶段: 初始恒定阶段、快速下降阶段、缓慢下降阶段, 上述 3 个阶段分别与应力-应变曲线中压密阶段、弹性阶段和峰后阶段相对应。随着试件变形, 孔隙闭合和钢纤维接触使得内部导电通路增多, 试件电阻快速下降; 峰后虽然钢纤维进一步相互接触, 但内部裂隙产生使得试件电阻下降速度减小。

2) 在循环载荷作用下煤矸石基功能胶结体试件内部呈现“钢纤维接触—导电通路增多—钢纤维分

离—导电通路减少”的循环。随着钢纤维的掺入, 试件电压差与应力值变化更为一致, 且不同循环周期内电压差变化趋势的可重复性更好, 钢纤维掺量为 0.8% 和 1.2% 时, 试件在循环载荷下电压差变化最为稳定; 继续增加钢纤维掺量, 试件内部在加载前已形成较多导电通路, 加载变形过程中新产生的导电通路占比较小, 无法进一步提高试件电压差对循环载荷的敏感度。

3) 随着钢纤维掺量的提高, 试件对外部载荷的敏感性呈现先增长后降低的趋势, 在掺量为 0.8% 时, 试件应力、应变敏感系数最好, 电磁感应性能最好; 通过线性度分析可知, 钢纤维的掺入可有效降低感应信号的线性误差, 随着钢纤维掺量的提高, 线性误差呈现线性降低的趋势。

## 参考文献(References):

- [1] 杨科, 赵新元, 何祥, 等. 多源煤基固废绿色充填基础理论与技术体系[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4201-4216.  
YANG Ke, ZHAO Xinyuan, HE Xiang, et al. Basic theory and key technology of multi-source coal-based solid waste for green backfilling[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4201-4216.
- [2] 张吉雄, 张强, 周楠, 等. 煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4167-4181.  
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [3] 冯国瑞, 杜献杰, 郭育霞, 等. 结构充填开采基础理论与地下空间利用构想[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 74-84.  
FENG Guorui, DU Xianjie, GUO Yuxia, et al. Basic theory of constructional backfill mining and the underground space utilization concept[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 74-84.
- [4] 冯国瑞, 解文硕, 郭育霞, 等. 早期受载对矸石胶结充填体力学特性及损伤破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(4): 775-784.  
FENG Guorui, XIE Wenshuo, GUO Yuxia, et al. Effect of early load on mechanical properties and damage of cemented gangue backfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(4): 775-784.
- [5] 郭育霞, 赵永辉, 冯国瑞, 等. 矸石胶结充填体单轴压缩损伤破坏尺寸效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(12): 2434-2444.  
GUO Yuxia, ZHAO Yonghui, FENG Guorui, et al. Study on damage size effect of cemented gangue backfill body under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(12): 2434-2444.
- [6] 程爱平, 付子祥, 邓代强, 等. 高低应力水平下胶结充填体蠕变特征及分数阶本构模型[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(2): 276-285, 299.

- CHENG Aiping, FU Zixiang, DENG Daiqiang, et al. Creep characteristics and fractional order constitutive model of cemented backfill under high and low stress levels[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(2): 276–285, 299.
- [7] 刘炜震, 郭忠平, 黄万朋, 等. 不同温度养护后胶结充填体三轴卸围压力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(11): 2268–2282.
- LIU Weizhen, GUO Zhongping, HUANG Wanpeng, et al. Experimental study on mechanical characteristics of cemented backfill under triaxial unloading confining pressure after cured at different temperatures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(11): 2268–2282.
- [8] XIAO M, JU F, HE Z Q. Research on shotcrete in mine using non-activated waste coal gangue aggregate[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120810.
- [9] 刘浪, 罗屹骁, 朱梦博, 等. 建筑物下特厚煤层镁渣基全固废连采连充开采技术与实践[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(4): 83–92.
- LIU Lang, LUO Yixiao, ZHU Mengbo, et al. Mining technology and practice of full-solid waste cemented backfilling in narrow strip of extra-thick coal seam under buildings[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(4): 83–92.
- [10] 张自政, 柏建彪, 王襄禹, 等. 我国沿空留巷围岩控制技术研究进展与展望[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(11): 3979–4000.
- ZHANG Zizheng, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. Review and development of surrounding rock control technology for gob-side entry retaining in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 3979–4000.
- [11] ZHAO S Y, FAN S L, YANG J, et al. Numerical and experimental investigation of electro-mechanical impedance based concrete quantitative damage assessment[J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(5): 055025.
- [12] 魏晓明, 郭利杰, 周小龙, 等. 高阶段胶结充填体全时序应力演化规律及预测模型研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3613–3620.
- WEI Xiaoming, GUO Lijie, ZHOU Xiaolong, et al. Full sequence stress evolution law and prediction model of high stage cemented backfill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3613–3620.
- [13] CHUNG D D L. Cement reinforced with short carbon fibers: A multifunctional material[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2000, 31(6-7): 511–526.
- [14] AZHARI F, BANTHIA N. Cement-based sensors with carbon fibers and carbon nanotubes for piezoresistive sensing[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(7): 866–873.
- [15] HAN B G, GUAN X C, OU J P. Electrode design, measuring method and data acquisition system of carbon fiber cement paste piezoresistive sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 135(2): 360–369.
- [16] LEE S Y, LE H V, KIM D J. Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 220: 149–160.
- [17] 丁思齐, 韩宝国, 欧进萍. 本征自感知混凝土及其智能结构[J]. *工程力学*, 2022, 39(3): 1–10.
- DING Siqi, HAN Baoguo, OU Jinping. Intrinsic self-sensing concrete for smart structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(3): 1–10.
- [18] 孙怀凤, 李术才, 苏茂鑫, 等. 基于场路耦合的隧道瞬变电磁超前探测正演与工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S1): 3362–3369.
- SUN Huaifeng, LI Shucai, SU Maoxin, et al. Forward of transient electromagnetic method for geological prediction in tunnels based on field-circuit coupling and its engineering application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(S1): 3362–3369.
- [19] HAN B G, DING S Q, YU X. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review[J]. *Measurement*, 2015, 59: 110–128.
- [20] 李肖寒. 基于高频涡流的热障涂层厚度检测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- LI Xiaohan. Research on thermal barrier coating thickness measurement based on high frequency eddy current[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [21] TIAN Z, LI Y C, ZHENG J J, et al. A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 177: 107437.
- [22] DINESH A, SUJI D, PICHUMANI M. Electro-mechanical investigations of steel fiber reinforced self-sensing cement composite and their implications for real-time structural health monitoring[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 51: 104343.
- [23] DEMIRCILIOĞLU E, TEOMETE E, SCHLANGEN E, et al. Temperature and moisture effects on electrical resistance and strain sensitivity of smart concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 224: 420–427.
- [24] SHI Z M, LI J T, ZHAO Y. Study on damage evolution and constitutive model of sandstone under the coupled effects of wetting-drying cycles and cyclic loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 253: 107883.
- [25] LE H V, KIM D J. Detecting crack and damage location in self-sensing fiber reinforced cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 240: 117973.
- [26] ALLAM H, DUPLAN F, AMZIANE S, et al. About the self-sensing behavior of smart concrete and its interaction with the carbon fiber percolation status, sand connectivity status and grain size distribution[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 324: 126609.
- [27] LI X P, LI M. Multifunctional self-sensing and ductile cementitious materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 123: 105714.
- [28] HWANG J P, KIM M, ANN K Y. Porosity generation arising from steel fibre in concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 94: 433–436.
- [29] DEMIRCILIOĞLU E, TEOMETE E, OZBULUT O E. Strain sensitivity of steel-fiber-reinforced industrial smart concrete[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2020, 31(1): 127–136.