碳纤维复合砂浆约束煤样力学增强与破裂感知方法研究

宁　杉[1],朱卫兵[1,2],许家林[2],李　竹[2],赵波智[1]
(1. 中国矿业大学 矿业工程学院,江苏 徐州　221116;2. 中国矿业大学 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室,江苏 徐州　221116)

摘要: 针对井下煤柱失稳易诱发动力灾害的防控需求,开发了一种基于碳纤维复合砂浆材料的约束增强与损伤监测方法. 综合运用理论分析、COMSOL电场模拟、电阻监测及单轴压缩试验等方法开展了系统研究,深入分析了不同碳纤维掺量下复合砂浆约束煤样的力学强度、电阻变化率及损伤特征. 研究表明:碳纤维在砂浆基体中能够形成连续网状结构,增强复合砂浆的力学强度及导电性能,抑制可溶性带电离子的迁移,促使材料的导电方式由离子导电转变为电子导电,从而显著降低电阻监测过程中的噪声干扰;碳纤维掺量为2.0%时,复合砂浆电阻率较纯水泥砂浆降低了4个数量级,电阻率监测的噪声峰峰值较纯砂浆试件减少了5个数量级,且抗压/抗拉强度分别提高了136.6%和135.1%. 采用碳纤维复合砂浆包裹约束煤样,可对煤样施加环向约束力并增强其力学强度;同时,复合砂浆能在煤样表面形成优势导电通路,对裂隙扩展感知更加敏锐;采用2.0%碳纤维掺量的复合砂浆约束煤样后,其单轴抗压强度较纯煤样提升25.0%,应力灵敏度较纯砂浆约束煤样提升了1.94倍;复合砂浆约束煤样出现破裂时,应力-应变与电阻变化率同步跌落,可通过捕捉电阻突变信号准确识别煤样破裂信息. 采用碳纤维复合砂浆约束煤样,能够同步实现煤样力学增强与破裂过程的实时、无损监测. 研究成果扩展了碳纤维复合材料在矿业领域的应用维度,为井下煤体损伤监测提供了新的技术路径.

关键词: 碳纤维复合砂浆;损伤监测;煤柱加固;力学增强;电阻变化率
中图分类号: TD 313　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)02-0484-15

Research on the mechanical reinforcement and fracture sensing of coal samples constrained by carbon fiber composite mortar

NING Shan[1], ZHU Weibing[1,2], XU Jialin[2], LI Zhu[2], ZHAO Bozhi[1]
(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: To address the prevention and control needs for dynamic disasters easily induced by instability of underground coal pillars, a constraint-enhancement and damage-monitoring method based

收稿日期: 2025-09-05　　**修回日期:** 2025-11-27　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250360
基金项目: 国家自然科学基金项目(52404148,52174212)
第一作者: 宁　杉(1993—),男,山东省枣庄市人,博士后. E-mail: shan.ning@cumt.edu.cn
通信作者: 朱卫兵(1978—),男,江苏省南通市人,教授,博士生导师. E-mail: zweibing@163.com
引用格式: 宁　杉,朱卫兵,许家林,等.碳纤维复合砂浆约束煤样力学增强与破裂感知方法研究[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):484-498.
NING Shan, ZHU Weibing, XU Jialin, et al. Research on the mechanical reinforcement and fracture sensing of coal samples constrained by carbon fiber composite mortar[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 484-498.

on carbon-fiber composite mortar was developed. A systematic study was conducted by integrating theoretical analysis, COMSOL electric-field simulations, resistance monitoring, and uniaxial compression tests to thoroughly examine the mechanical strength, resistance change rate, and damage characteristics of coal specimens confined with composite mortars at different carbon-fiber contents. The results show that carbon fibers form a continuous network structure within the mortar matrix, enhancing the mechanical strength and electrical conductivity of the composite mortar, suppressing the migration of soluble charged ions, and shifting the conduction mechanism from ionic to electronic conduction, thereby significantly reducing noise interference during resistance monitoring. At a carbon-fiber content of 2.0%, the composite mortar's resistivity is reduced by four orders of magnitude compared with plain cement mortar, the peak-to-peak noise in resistivity monitoring is reduced by five orders of magnitude relative to plain mortar specimens, and the compressive/tensile strengths increase by 136.6% and 135.1%, respectively. Wrapping coal specimens with carbon-fiber composite mortar applies circumferential confinement and enhances their mechanical strength; meanwhile, the composite mortar establishes preferential conductive pathways on the coal surface, making it more sensitive to crack propagation. With 2.0% carbon fiber content, the uniaxial compressive strength of the confined coal specimen increases by 25.0% compared with plain coal, and the stress sensitivity is 1.94 times that of coal specimens confined with plain mortar. When composite-mortar-confined coal specimens fracture, the stress-strain response and resistance change rate drop synchronously, enabling accurate identification of fracture events by capturing abrupt resistance signals. Using carbon-fiber composite mortar to confine coal specimens achieves simultaneous mechanical reinforcement and real-time, non-destructive monitoring of the fracture process. These findings expand the application scope of carbon-fiber composite materials in mining and provide a new technical pathway for damage monitoring of underground coal bodies.

Key words: carbon fiber composite mortar; damage monitoring; coal pillar reinforcement; mechanical enhancement; resistance change rate

井下煤柱长期处于高应力反复扰动环境，其内部损伤不断累积易突然失稳，引发覆岩垮落、地表塌陷、动载矿压等灾害[1-5]. 因此，如何提高煤柱的力学强度并监测其稳定性[6-9]，成为保障煤矿生产安全的重要问题.

现有工程常采用锚杆、锚索加固煤柱，将破碎煤体与煤柱内部弹性核区连接，使煤柱形成一个整体，以提高煤柱的承载能力[10-12]. 部分研究提出了充填墙加固、条带充填等方法[13-14]，通过给煤柱提供侧向约束力，使其转化为三向受力状态，限制煤柱横向变形并提高承载能力. 近年来，有研究采用碳纤维布等材料包裹煤柱以增强其强度[15-16]. 相比传统的煤柱加固方式，碳纤维布具有质量轻、耐腐蚀、施工简便等优势[17-18]，成为目前研究的热点.

煤柱应力及变形监测常采用锚杆(索)拉力计、钻孔应力计等设备，通过监测煤体应力、变形等参量评估煤柱的稳定性[19]. 部分研究通过布设高精度微震监测系统，捕捉煤柱失稳前的煤岩体破裂信号[20-21]. 此外，通过在井下布置分布式光纤，能够监测煤柱裂纹萌生至贯通过程中的微应变演化规律[22]. 然而，这些研究多侧重于煤柱加固或稳定性监测，存在力学增强与损伤监测分离的痛点.

近年来，碳纤维复合材料在土木工程中的应用为破解该难题提供了新思路[23-24]. 将碳纤维掺入水泥基材料中，一方面可以起到桥联裂缝、增强材料强度的作用[25-28]；另一方面，碳纤维相互搭接形成的导电网络对材料内部裂隙发育较为敏感，具有显著的损伤自感应特性[29-32]. 此类材料已广泛应用于桥梁、公路等基础设施的健康监测中[33-34]. 例如，在意大利罗维戈，研究人员使用短切碳纤维及骨料制作了智能路面传感器，并用于工业道路重型车辆的载荷监测[35]；美国肯塔基州，工程技术人员使用碳纤维复合材料对桥梁进行补

强加固，以修复桥梁损伤[36]. 此外，国内学者提出采用碳纤维混凝土浇筑梁、柱、板等关键部位，从而实现对结构挠度及损伤程度的实时监测[37-38].

目前，尚未有研究将碳纤维复合材料用于井下煤体的加固及损伤破裂监测. 针对这一空白，本研究提出一种基于碳纤维复合砂浆材料的约束增强与损伤监测方法. 通过向砂浆中掺入碳纤维，制备具有损伤自感应功能的碳纤维复合砂浆，并将其用于约束煤样. 该方法不仅能提升煤样的承载能力，还可通过实时监测复合砂浆的电阻变化，反映煤体损伤演化过程.

与现有监测方法相比，采用碳纤维复合砂浆约束煤柱实现力学增强与破裂感知的优点在于：可直接利用井下现有的喷浆设备施工，成本低、操作简便；适用于煤柱表面破碎、难以布设监测装置的复杂工况；无需额外布设传感器，即可通过电阻率变化连续感知裂纹的萌生与扩展；将碳纤维复合砂浆喷涂于整个煤柱表面，监测范围能够覆盖整个煤柱.

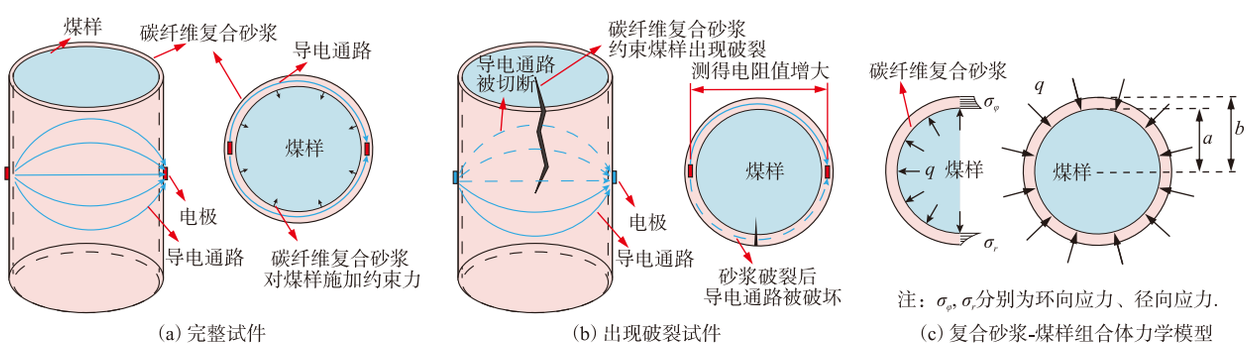
为验证上述设想，本研究综合采用理论分析、COMSOL 电场模拟、电阻监测、单轴压缩试验等手段，建立了碳纤维复合砂浆约束煤样力学-电学协同作用模型，探究了碳纤维掺量对复合砂浆力学与导电性能的增强作用，验证了碳纤维复合砂浆对煤柱的约束增强及破裂监测效果. 研究成果将碳纤维复合砂浆的应用拓展至煤矿工程领域，为井下煤体健康监测提供了新的技术路径.

1 复合砂浆约束煤样力学–电学协同作用原理

1.1 复合砂浆约束煤样力学–电学协同作用模型

碳纤维复合砂浆作为约束层附着于煤样表面时，其力学与电学协同作用如图 1 所示. 在外界载荷作用下，复合砂浆约束层与煤样同步变形，其内部形成拉伸应力场并对煤样施加约束力，从而增强煤样的强度. 电学上，由于复合砂浆的电阻率明显低于煤体的电阻率，电流将优先流经复合砂浆约束层，形成连续、稳定的低电阻导电通路.

如图 1b 所示，当复合砂浆-煤样组合体产生破裂时，裂纹会破坏部分导电路径，造成试样电阻增加. 随着裂纹数量逐渐增多，复合砂浆的受损程度逐步加重，使试样的电阻值持续升高.



(a) 完整试件 (b) 出现破裂试件 (c) 复合砂浆-煤样组合体力学模型

图 1 碳纤维复合砂浆约束增强及损伤监测原理

Fig. 1 Principle of confinement enhancement and damage monitoring of carbon fiber composite mortar

根据损伤力学理论，任意时刻 t 的损伤变量可定义为

$$D_t = 1 - \frac{A_t}{A_0}, \tag{1}$$

式中：D_t 为损伤变量（$0 \leqslant D_t \leqslant 1$），当 $D_t=0$ 时煤样为无损伤状态，当 $D_t=1$ 时煤样完全破坏；A_t 为时刻 t 的有效承载面积，m^2；A_0 为煤样原始横截面积，m^2.

对于一维导电材料，电阻 R 与 A_t 的关系为

$$A_t = \frac{\rho l}{R}, \tag{2}$$

式中：ρ 为材料的电阻率，$\Omega \cdot m$；l 为电极间的长度，m.

对于同一种材料，可假设破坏过程中电阻率 ρ 不变，并且忽略 l 的变化. 由此可得任意时刻损伤变量 D_t 的计算公式：

$$D_t = 1 - \frac{\rho / R_t l}{\rho / R_0 l} = 1 - \frac{R_0}{R_t}, \tag{3}$$

式中：R_0 为初次测量的电阻，Ω；R_t 为时刻 t 测量的电阻，Ω.

式(3)表明，复合砂浆约束煤样的电阻与其损伤变量间存在函数关系，因此可将材料电阻作为定量表征材料损伤情况的中间值. 基于这一机理，结合试样加载过程中电阻的变化情况及破坏瞬间

的电阻值，可以判断当前材料的受力状态及破坏风险．此外，通过在煤样表面布置多个电极，可以实现不同区域的损伤定位．

1.2　复合砂浆约束煤样力学增强机制

为了分析复合砂浆对煤样的约束作用，将复合砂浆-煤样组合体简化为图 1c 所示力学模型，将约束层视为受均匀径向压力的厚壁圆环．令应力边界条件为

$$\begin{cases}\left(\tau_{r\varphi}\right)_{r=a}=0,\\ \left(\tau_{r\varphi}\right)_{r=b}=0,\\ \left(\sigma_r\right)_{r=a}=-q,\\ \left(\sigma_r\right)_{r=b}=0,\end{cases}\tag{4}$$

式中：a，b 分别为圆环内外半径，mm；r 为半径，mm；$\tau_{r\varphi}$ 为环向切应力，MPa；q 为最大约束压力，MPa.

将式(4)代入平衡方程并按照逆解法求解，可得圆环的环向应力 σ_φ 与径向应力 σ_r：

$$\begin{cases}\sigma_r=-\left(b^2r^{-2}-1\right)\Big/\left(b^2a^{-2}-1\right)q,\\ \sigma_\varphi=\left(b^2r^{-2}+1\right)\Big/\left(b^2a^{-2}-1\right)q.\end{cases}\tag{5}$$

由于砂浆材料抗拉强度有限，根据砂浆拉应力最大值 $\sigma_{\max}$ 计算可施加的最大约束压力．同时，σ_φ 在圆环内部边界处达到最大．因此，令 $\rho=a$，$\sigma_\varphi=\sigma_{\max}$ 可求得最大约束压力 q：

$$q=\frac{\sigma_{\max}\left(b^2-a^2\right)}{b^2+a^2}.\tag{6}$$

依据莫尔-库仑(Mohr-Coulomb)强度准则，煤样受压状态下的极限抗压强度为

$$\sigma_1=\frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi}+\sigma_3\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi},\tag{7}$$

式中：φ 为煤样的内摩擦角，(°)；c 为煤样的黏聚力，MPa；σ_3 为煤样所受水平应力，MPa；σ_1 为煤样所受垂直应力，MPa.

联立式(6)及式(7)，令煤样所受水平应力 $\sigma_3=q$，可求得施加约束后的煤样强度为

$$\sigma_1=\frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi}+\frac{\sigma_{\max}\left(b^2-a^2\right)}{b^2+a^2}\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}.\tag{8}$$

按照单轴压缩试验标准煤样尺寸及常用煤的内摩擦角，设定参数：$\varphi=30°$，$b=27$ mm，$a=25$ mm．根据计算，碳纤维复合砂浆的抗拉强度 $\sigma_{\max}$ 每增加 1 MPa，煤样的单轴抗压强度增加 0.23 MPa．可见，碳纤维复合砂浆对煤样具有约束增强效果．

1.3　复合砂浆约束煤样损伤破裂感知电学模拟

为揭示碳纤维复合砂浆约束煤样的损伤破裂感知机制，采用 COMSOL 软件构建了模型，如图 2 所示．模型为二维轴对称结构，煤样直径为 50 mm，外层复合砂浆厚度为 2 mm．将煤样与水泥砂浆简化为均匀各向同性材料，电阻率分别设定为 2 000 和 200 Ω·m．模型两侧边界设置电极并施加 0.5 V 的恒定电压．为分析裂隙发育扩展对复合砂浆约束煤样损伤破裂感知性能的影响，在煤样内部设置长轴和短轴分别为 7.5×10^{-3}，0.5×10^{-3} mm 的椭圆形裂隙．

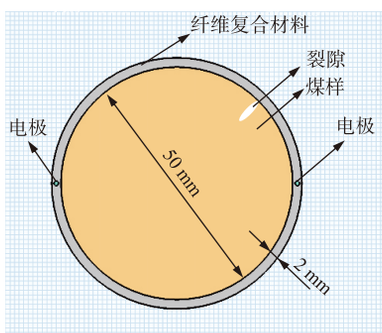


图 2　碳纤维复合砂浆约束煤样 COMSOL 模型

Fig. 2　Carbon fiber reinforced mortar constrained coal sample COMSOL model

图 3a 和 3b 分别为纯煤样及复合砂浆约束煤样的电流密度云图．在无裂隙状态下，纯煤样中部截面的平均电流密度为 1.967 mA/m^2；在复合砂浆约束煤样中部截面上，平均电流密度为 5.225 mA/m^2，较纯煤样提升了 165.0%．得益于碳纤维复合砂浆的低电阻特性，在煤样表面形成了优势导电通路，使电流主要通过复合砂浆约束层流动，优化了试样的导电性能．

图 3c 和 3d 中，裂隙扩展到碳纤维复合砂浆边界．此时纯煤样中部截面的平均电流密度为 1.943 mA/m^2，降幅为 1.2%．复合砂浆约束煤样的平均电流密度为 5.102 mA/m^2，降幅为 2.3%．复合砂浆约束煤样的电流密度降幅大于纯煤样．

当裂隙长度为 5 mm 时，裂纹完全切断碳纤维复合砂浆约束层，如图 3e 及 3f 所示．纯煤样中部截面的平均电流密度降至 1.930 mA/m^2，降幅为 1.9%．复合砂浆约束煤样中部截面的平均电流密度下降至 4.447 mA/m^2，降幅为 14.9%，电流密度降幅是纯煤样的 7.84 倍．这表明复合砂浆约束煤样对裂隙扩展的感知能力显著高于纯煤样，可利用这一特性实时监测煤样的损伤破裂过程．

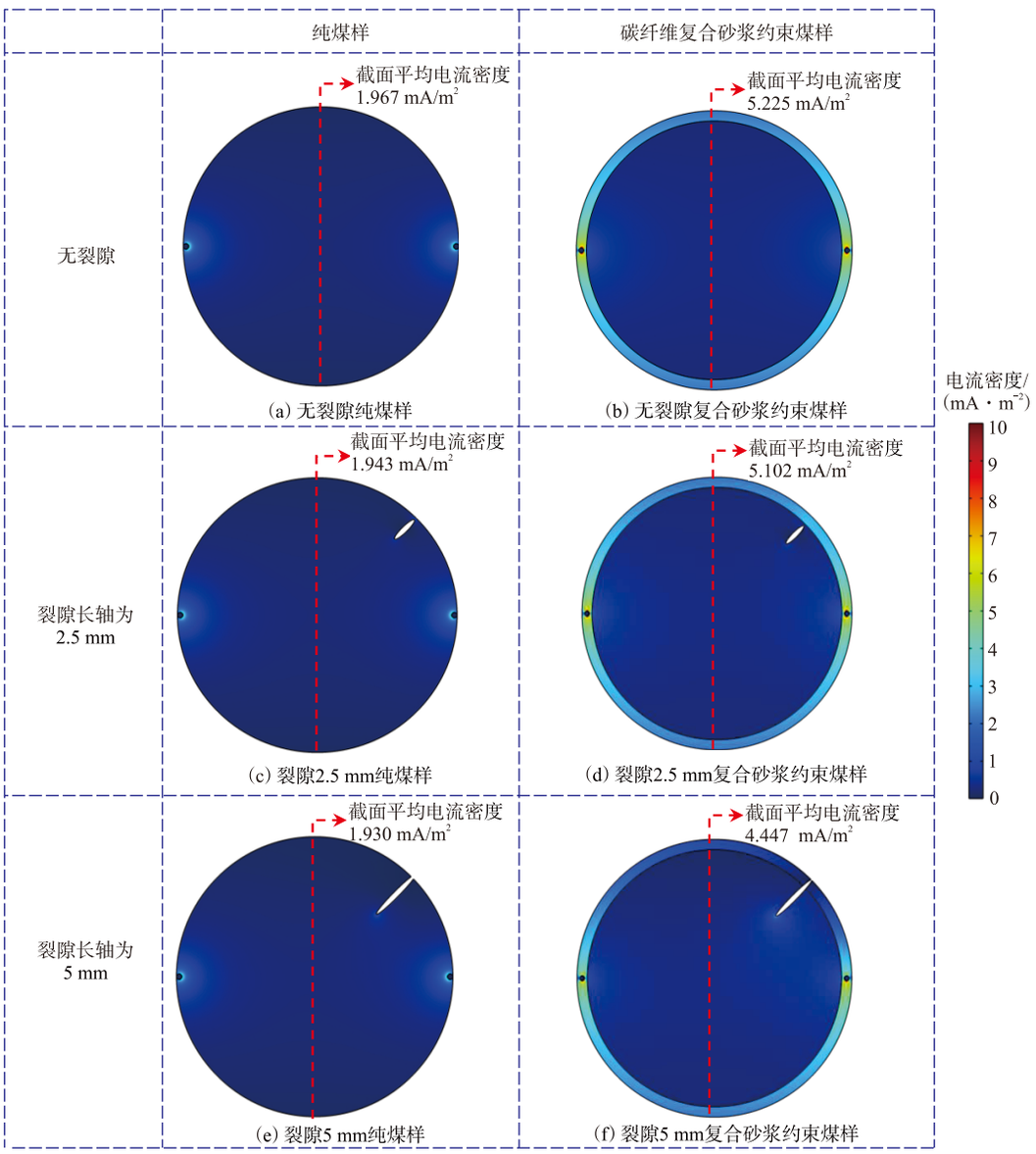


图 3 纯煤样及碳纤维复合砂浆约束煤样的电流密度云图

Fig. 3 The current density contour of coal sample and carbon fiber composite material constrained coal sample

1.4 力学-电学协同作用试验方案

为分析碳纤维掺量对复合砂浆导电性能及力学强度的影响，并验证复合砂浆约束煤样在力学增强与破裂监测中的作用，设计了5组不同碳纤维掺量的试验方案，如表1所示. 碳纤维掺量为碳纤维质量占复合砂浆总质量的百分比. 每组分别制备6个碳纤维复合砂浆试件，用于测试复合砂浆基体的力学强度与导电性能；2个碳纤维复合砂浆约束煤样，用于研究约束力学增强及损伤破裂感知性能. 此外，设置3个纯煤样为对照组.

试验采用日本东丽公司生产的6 mm短切碳纤维，抗拉强度达3 800 MPa，电阻率为100 Ω·m. 根据国标GB 8076—2008《混凝土外加剂》规定，选用混凝土外加剂检验专用的P. I 42.5硅酸盐基准水泥；选用粒径小于0.420 mm的河砂，按水泥和砂的质量比为0.66、水灰比为0.45制备碳纤维复合砂浆试件.

表 1 试样编号与碳纤维掺量对应关系

Table 1 Correspondence between specimen ID and carbon fiber content

碳纤维掺量/%	碳纤维复合砂浆试样		碳纤维复合砂浆约束煤样
	单轴压缩试验	巴西劈裂法	
0	A_1,A_2,A_3	A_4,A_5,A_6	A_7,A_8
0.5	B_1,B_2,B_3	B_4,B_5,B_6	B_7,B_8
1.0	C_1,C_2,C_3	C_4,C_5,C_6	C_7,C_8
1.5	D_1,D_2,D_3	D_4,D_5,D_6	D_7,D_8
2.0	E_1,E_2,E_3	E_4,E_5,E_6	E_7,E_8

制备步骤如下：1)采用超声波将碳纤维分散在水中，形成均匀分散液．2)按照预定质量配比，将河砂、水泥及碳纤维分散液放入搅拌机中搅拌 3 min. 3)将润滑油均匀涂抹在单轴抗压试件模具、巴西劈裂法试件模具的内壁，随后将碳纤维复合砂浆倒入模具中，制备成碳纤维复合砂浆试样(图 4a)．将脱模后的试样置于室温 25 ℃和室内相对湿度 50% 条件下养护 28 d.

碳纤维复合砂浆约束煤样的制作方法为：将直径为 50 mm、高度为 100 mm 的标准煤样放入定制模具(直径为 54 mm、高度为 100 mm)中，在煤样表面浇筑 2 mm 厚的约束层，振捣密实后刮平表面．脱模后养护 28 d，并对制取试件进行打磨，最后在试件表面涂覆导电凝胶粘贴碳纤维电极．图 4b 为所制备的碳纤维复合砂浆约束煤样．

试验采用图 4c 所示试验系统．试验机采用位移控制模式，加载速率为 0.03 mm/s. 试件电阻率监测采用同惠 LCR 数字电桥，测量所用的交流电频率为 2 000 Hz，采样率为 10 Hz，监测电压为 0.5 V. 为避免试件与试验机金属出现短路，采用绝缘纸将试件与试验机隔开．

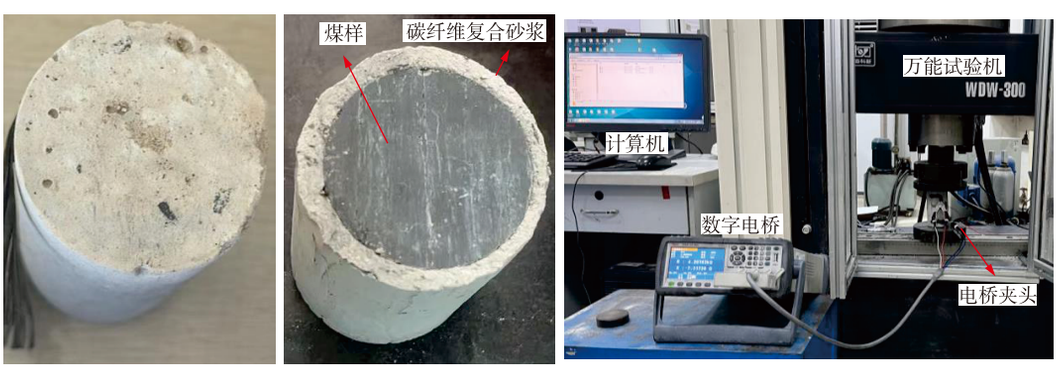
为表示单轴压缩试验中裂隙发育造成的电阻变化，定义试件的电阻变化率 R_{rc} 为

$$R_{rc}=\frac{R_t-R_0}{R_0}\times 100\%. \tag{9}$$

由于宏观裂纹扩展会引起碳纤维复合砂浆电阻的突变，因此通过相邻监测时段电阻变化率的差值来表征破裂事件的发生．定义 2 次监测数据间的电阻变化率突变值 ΔR_{rc} 为

$$\Delta R_{rc}=\left|\frac{R_{rc(i+1)}-R_{rc(i)}}{R_{rc(i)}}\right|, \tag{10}$$

式中：$R_{rc(i+1)}$ 为第 $i+1$ 次测量的电阻变化率；$R_{rc(i)}$ 为第 i 次测量的电阻变化率．



(a) 碳纤维复合砂浆试样　(b) 碳纤维复合砂浆约束煤样　(c) 试验系统

图 4　碳纤维复合砂浆约束煤样及试验测试系统

Fig. 4　Carbon fiber composite mortar constrained coal samples and experimental testing system

2　碳纤维复合砂浆力学与导电性能增强作用

2.1　碳纤维复合砂浆电化学阻抗谱和等效电路

为探究碳纤维对复合砂浆导电性的影响，测试了不同碳纤维掺量的砂浆试样电化学阻抗谱[39]．试验使用德国 Zahner PP211 型电化学工作站，施加频率范围为 0.1～10^5 Hz、幅值为 10 mV 的正弦交流电压，测定各组试样的阻抗参数．测试体系为三电极结构：直径 4 mm 的玻碳电极作为工作电极，铂电极为对电极，Ag/AgCl 电极为参比电极．

所得复平面阻抗图(Nyquist 图)及等效电路模型如图 5 所示，各参数的拟合结果如表 2 所示．图中，R_s 为溶液电阻；R_{ct} 为电极的电荷转移电阻；R_f 为膜层电阻；C_{dl} 由双电层电容 C_d 和弥散指数 n_d 组成；Q_f 由膜层电容 C_f 和弥散指数 n_f 组成．

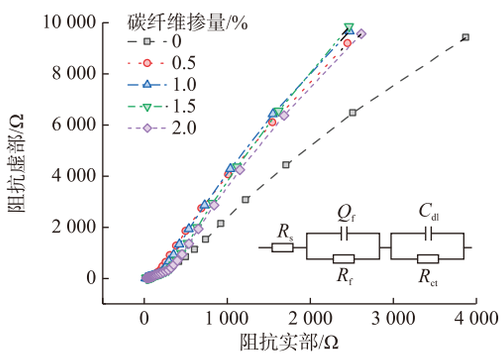


图 5　不同碳纤维掺量试样的 Nyquist 图

Fig. 5　Nyquist plots of specimens with different carbon fiber contents

表 2 等效电路拟合参数

Table 2 Equivalent circuit fitting parameters

掺量/%	R_s/Ω	C_f/μF	n_f	R_f/Ω	C_{dl}/μF	n_d	$R_{ct}/10^4$ Ω
0	30.9	152.7	0.8	180.2	520.6	0.5	2.1
0.5	22.3	554.3	0.5	175.5	160.0	0.9	8.5
1.0	17.9	151.7	1.0	443.3	525.5	0.5	6.2
1.5	25.2	606.0	0.4	2 579.0	163.0	0.8	6.7
2.0	25.2	601.6	0.4	2 366.0	166.6	0.8	5.3

膜层电阻 R_f 的大小反映砂浆表面对离子迁移的阻碍作用. 根据表 2 的拟合数据,纯砂浆(碳纤维掺量为 0)与 0.5% 碳纤维掺量样品的 R_f 最小,分别为 180.2,175.5 Ω. 当碳纤维掺量为 1.0% 时,R_f 迅速增大至 443.3 Ω. 当碳纤维掺量为 1.5% 和 2.0% 时,R_f 分别增大到 2 579.0 和 2 366.0 Ω,相较于纯砂浆提升了 1 个数量级. 这表明随着碳纤维掺量的增加,复合砂浆材料表面对带电离子的阻力有所增强. 特别是掺量大于 1.0% 时,带电离子难以渗透砂浆基体.

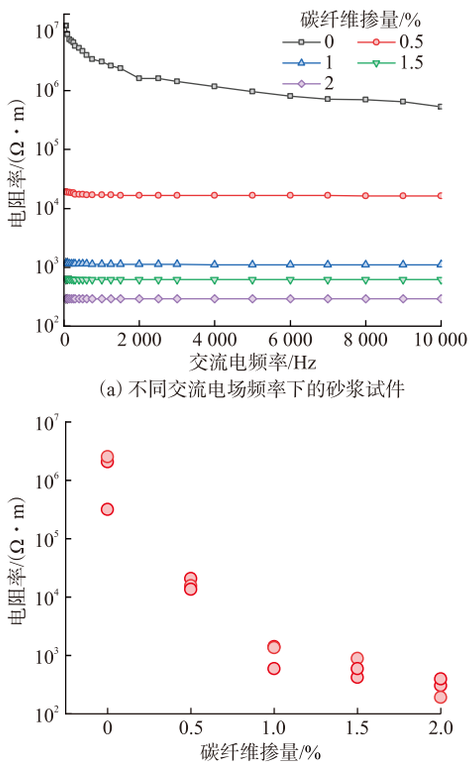
电荷转移电阻 R_{ct} 则反映由离子移动限制而导致电流流动的阻力. 未掺入碳纤维的砂浆中,R_{ct} 值最小为 2.1×10^4 Ω,说明此时电荷转移相对容易. 当碳纤维掺量为 0.5% 时,R_{ct} 增大到 8.5×10^4 Ω,此数值约为纯砂浆试样的 4 倍. 当碳纤维掺量提高 1.0%,1.5% 及 2.0% 时,R_{ct} 分别为 6.2×10^4,6.7×10^4 及 5.3×10^4 Ω,数值虽略有回落但仍远高于纯砂浆试样. 这证明碳纤维的掺入显著提高了电荷转移的阻力,从而有效抑制溶液中离子电荷转移过程.

2.2 碳纤维掺量对复合砂浆导电性能影响

水泥基材料的导电方式主要为离子导电、电子导电[29]. 离子导电源于基体中带电离子的定向迁移,因此电阻率易受环境温湿度、养护龄期等因素影响,波动幅度较大. 相较而言,电子导电不依赖于液体介质,在潮湿环境中依然具有较好的稳定性. 因此,采用 50~10 000 Hz 交流电测试了 0~2.0% 碳纤维掺量砂浆试件的电阻率,结果如图 6 所示.

图 6a 中,在频率为 50 Hz 时未掺入碳纤维的砂浆电阻率为 1.28×10^7 Ω·m,在频率为 10 000 Hz 时降低至 5.34×10^5 Ω·m,下降幅度高达 95.8%. 碳纤维掺量为 1.0% 时,50~10 000 Hz 频域内电阻率由 1.91×10^4 Ω·m 减小到 1.64×10^4 Ω·m,仅降低了 14.1%. 碳纤维掺量提高到 2.0% 时,50~10 000 Hz 频域内电阻率由 293.34 Ω·m 降低至 290.48 Ω·m,整体下降幅度仅为 1.1%. 这一变化表明,随着碳纤维掺量增大,试样的电阻率与电源频率的相关性逐渐减弱,试样中的电子导电路径逐渐占据主导地位.

图 6b 为 2 000 Hz 频率下不同碳纤维掺量砂浆试件的电阻率测试结果. 无碳纤维的砂浆试件平均电阻率为 1.70×10^6 Ω·m. 当碳纤维掺量为 0.5% 时,平均电阻率下降至 1.67×10^4 Ω·m. 当碳纤维掺量增加到 1.0% 时,平均电阻率骤降至 1 125.25 Ω·m,减小了 1 个数量级. 碳纤维掺量进一步增至 1.5% 和 2.0% 时,电阻率降幅明显趋缓,分别降至 630.11 和 289.36 Ω·m,相较纯水泥砂浆电阻率降低了 4 个数量级.



(a) 不同交流电场频率下的砂浆试件

(b) 2 000 Hz交流电场频率下的砂浆试件

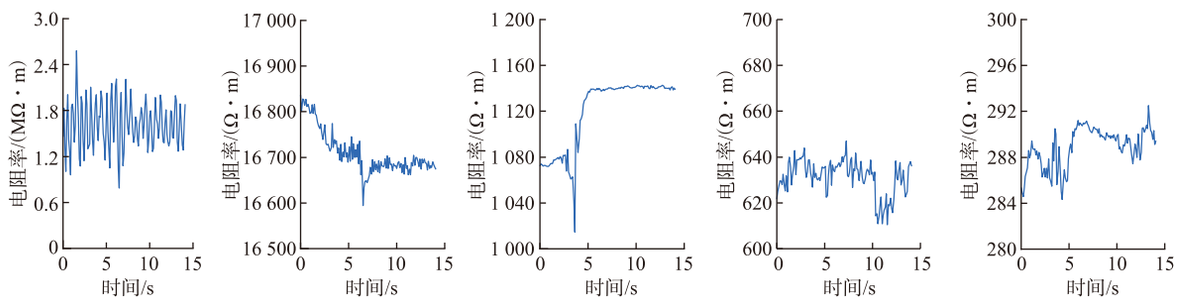
图 6 不同碳纤维掺量砂浆试件电阻率

Fig. 6 Resistivity of mortar specimens with different carbon fiber contents

为定量评估复合砂浆导电稳定性,分别对各掺量试样施加 2 000 Hz 交流电,进行了时长为 15 s 的电阻率监测,并计算了噪声峰峰值(即电阻率时域波形中最大值与最小值之差),结果如图 7 所示. 由图 7 可知,未掺碳纤维的水泥砂浆试样电阻率剧烈波动,最小值及最大值分别为 2.58×10^5,7.86×10^6 Ω·m,噪声峰峰值达 1.79×10^6 Ω·m. 掺入碳纤维后,电阻率的波动范围显著减小,碳纤维

掺量为 0.5%，1.0%，1.5% 及 2.0% 时的电阻率波动范围分别为 242.32，128.02，36.50，8.17 Ω·m，噪声峰峰值降低了 5 个数量级．

综合电阻率拐点与噪声峰峰值变化趋势可知，1.0% 碳纤维掺量是形成连续导电网络的阈值．此时，不仅电阻率显著下降，导电方式完成从离子主导到电子主导的转换，噪声峰峰值也出现大幅下降．碳纤维掺量达到 2.0% 时，电源频率对试样电阻率的影响基本消失，电子导电路径高度完善，信号稳定性最为理想．



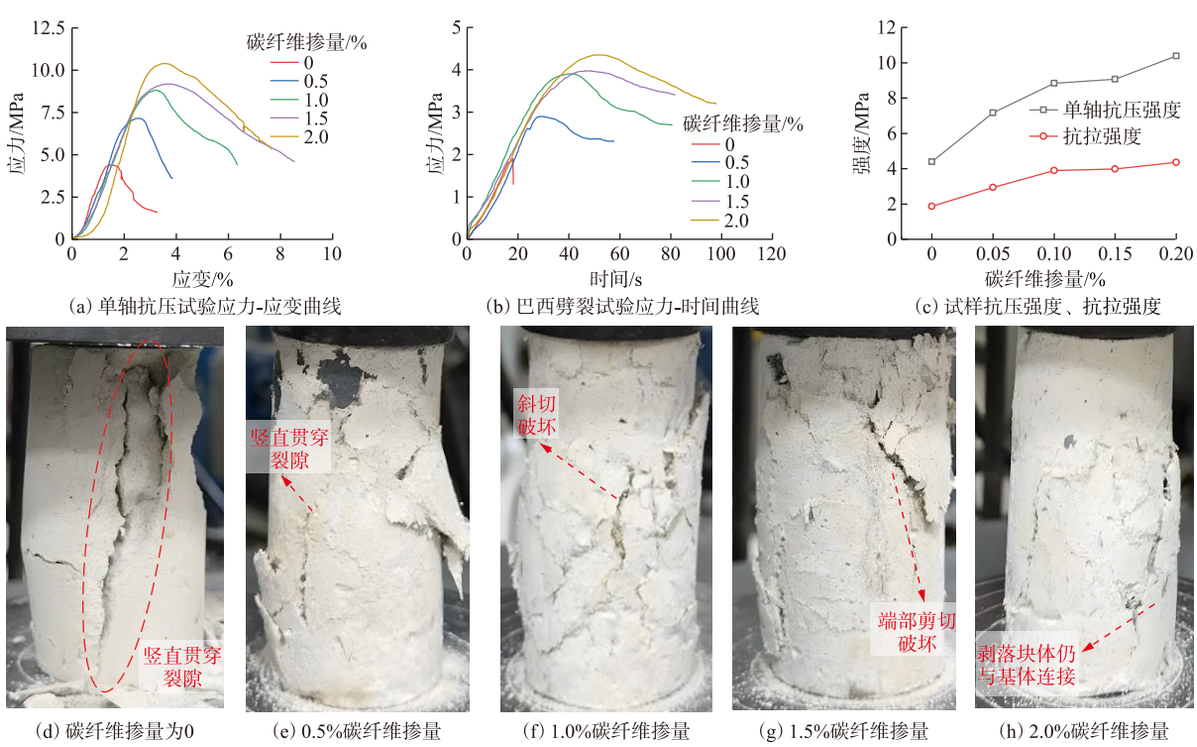
(a) 碳纤维掺量为0　(b) 0.5%碳纤维掺量　(c) 1.0%碳纤维掺量　(d) 1.5%碳纤维掺量　(e) 2.0%碳纤维掺量

图 7　不同碳纤维掺量砂浆试件电阻率噪声监测结果

Fig. 7　Resistivity noise monitoring results of mortar specimens with different carbon fiber content

2.3　复合砂浆试样力学强度和破坏模式

为研究碳纤维掺量对砂浆力学强度及破坏特征的影响，测试了碳纤维掺量为 0，0.5%，1.0%，1.5% 和 2.0% 时的砂浆试件抗压强度与抗拉强度，同时记录了试样的破裂形态，结果如图 8 所示．



(a) 单轴抗压试验应力-应变曲线　(b) 巴西劈裂试验应力-时间曲线　(c) 试样抗压强度、抗拉强度

(d) 碳纤维掺量为0　(e) 0.5%碳纤维掺量　(f) 1.0%碳纤维掺量　(g) 1.5%碳纤维掺量　(h) 2.0%碳纤维掺量

图 8　不同碳纤维掺量试件的强度及破坏特征

Fig. 8　Strength and failure characteristics of specimens with different carbon fiber contents

由图 8a～8c 可知，随着碳纤维掺量的增加，试件的抗压强度与抗拉强度均显著增大．当碳纤维掺量由 0 增至 2.0% 时，试件抗压强度由 4.39 MPa 提升至 10.39 MPa，增大了 136.6%；抗拉强度则由 1.85 MPa 增长至 4.35 MPa，增大了 135.1%．

观察试样的破坏形态可发现，图 8d 中纯砂浆试件为拉伸破坏，形成贯穿试样的竖直裂缝并伴随大块基质剥落．当碳纤维掺量为 0.5% 时，试件

仍为拉伸破坏，但主裂缝周边可见纤维连接碎块，如图 8e 所示．当碳纤维掺量达到 1.0% 时，试件出现斜切破坏，纤维连接的碎块进一步增多，如图 8f 所示．图 8g 及图 8h 为碳纤维掺量增至 1.5% 和 2.0% 时的试件破坏形态，此时试件出现端部剪切破坏，形成的破碎块体更小，在破坏后仍保持较为完整的状态．

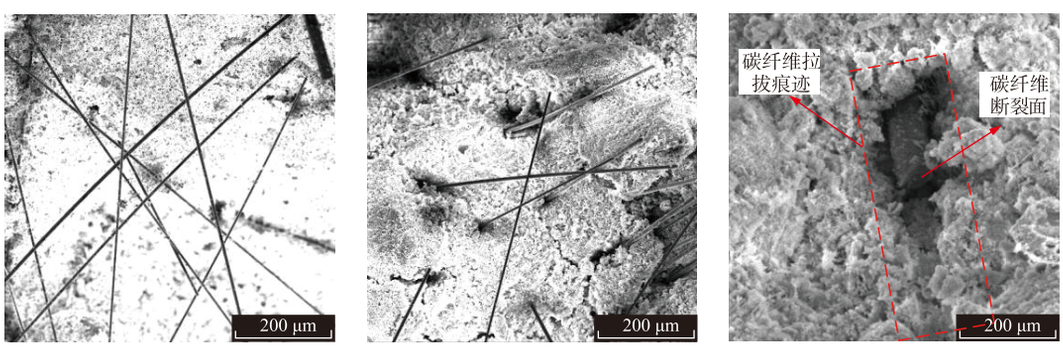
2.4 复合砂浆微观结构与增强机制分析

基于前述章节研究，碳纤维对复合砂浆导电性能与力学强度具有显著影响．为深入探究其作用机理，采用扫描电子显微镜（SEM）观察了碳纤维复合砂浆的微观结构，结果如图 9 所示．

图 9a 为复合砂浆未损伤破裂时的微观形貌．可见碳纤维在砂浆基体中呈随机、多向分布，纤维相互搭接形成贯穿基体的连续导电网络结构．由于碳纤维具有较好的导电性，该网络结构可为电流提供低阻通路，从而显著降低复合砂浆的电阻率并提高其导电稳定性．

图 9b 中，复合砂浆在破坏后其微观形貌发生显著变化．原本随机搭接的纤维趋向于同一方向，导致原有连续导电网络结构破坏．这是由于破坏过程中碳纤维主要承受轴向拉应力，因此被牵拉至受力方向．对破裂试样进一步放大，可以清晰看到碳纤维的拉拔沟槽与部分断裂纤维的断面，如图 9c 所示．这表明碳纤维在复合砂浆破坏过程中承担了较大的拉力．

综合对复合砂浆破坏模式的分析可以确定，碳纤维通过桥联作用有效抑制了裂纹的扩展，将破碎的块体连接在一起，防止大块碎片完全脱离基体．因此，随着碳纤维掺量的增加，试件破坏模式由拉伸破坏向剪切破坏转变，且试件中的贯穿裂缝逐渐被细小裂隙所替代；在试件完全破坏后，碳纤维依然能发挥作用，维持砂浆试件的连续性和完整性．



(a) 未损伤试件微观形貌　(b) 试件受载破坏后的微观形貌　(c) 碳纤维拉拔破断痕迹

图 9　碳纤维复合砂浆微观形貌

Fig. 9　Microstructure of carbon fiber composite mortar

3 复合砂浆约束煤样力学增强及破裂感知

3.1 单轴压缩试验力学-电学响应特征

为研究复合砂浆约束煤样的力学强度及破裂感知性能，开展复合砂浆约束煤样单轴压缩试验，并同步监测其破裂过程中的电阻变化率，所得结果如图 10 所示．

图 10a 为无约束煤样的单轴压缩试验结果．煤样的单轴抗压强度为 8.59 MPa，应力-应变曲线在达到峰值应力后迅速跌落，试件完全丧失承载能力，呈脆性破坏特征．整个加载过程中，电阻变化率 R_{rc} 呈波动递增趋势，在煤样完全破坏后达到最大值 175.0%．

图 10b 为纯砂浆约束煤样单轴压缩试验结果，其单轴抗压强度为 9.23 MPa，较无约束煤样增长了 7.4%．试件的应力-应变曲线在达到峰值应力后出现波动下降，持续一段时间后迅速跌落；此过程中，电阻变化率曲线呈现“下降-回升”变化特征．在加载的初始阶段，R_{rc} 逐渐下降至 −98.0%；随着轴向应力增大，R_{rc} 逐渐回升，并在峰值强度时达到最大值 148.5%；试件破坏后，R_{rc} 维持在 104.0% 左右．

随着碳纤维掺量增加，试件抗压强度进一步增大，应力-应变曲线与电阻变化率变化趋势逐渐趋于一致．以碳纤维掺量为 2.0% 的复合砂浆约束煤样为例（图 10f），此时试件抗压强度达 10.74 MPa，相较于纯煤样提升 25.0%．在峰值强度前，电阻变化率曲线与应力-应变曲线呈递增趋势；在峰后阶段，应力每次降低时 R_{rc} 相应减小，但随着应力回升 R_{rc} 也相应增大，呈现明显的同步跌落现象．

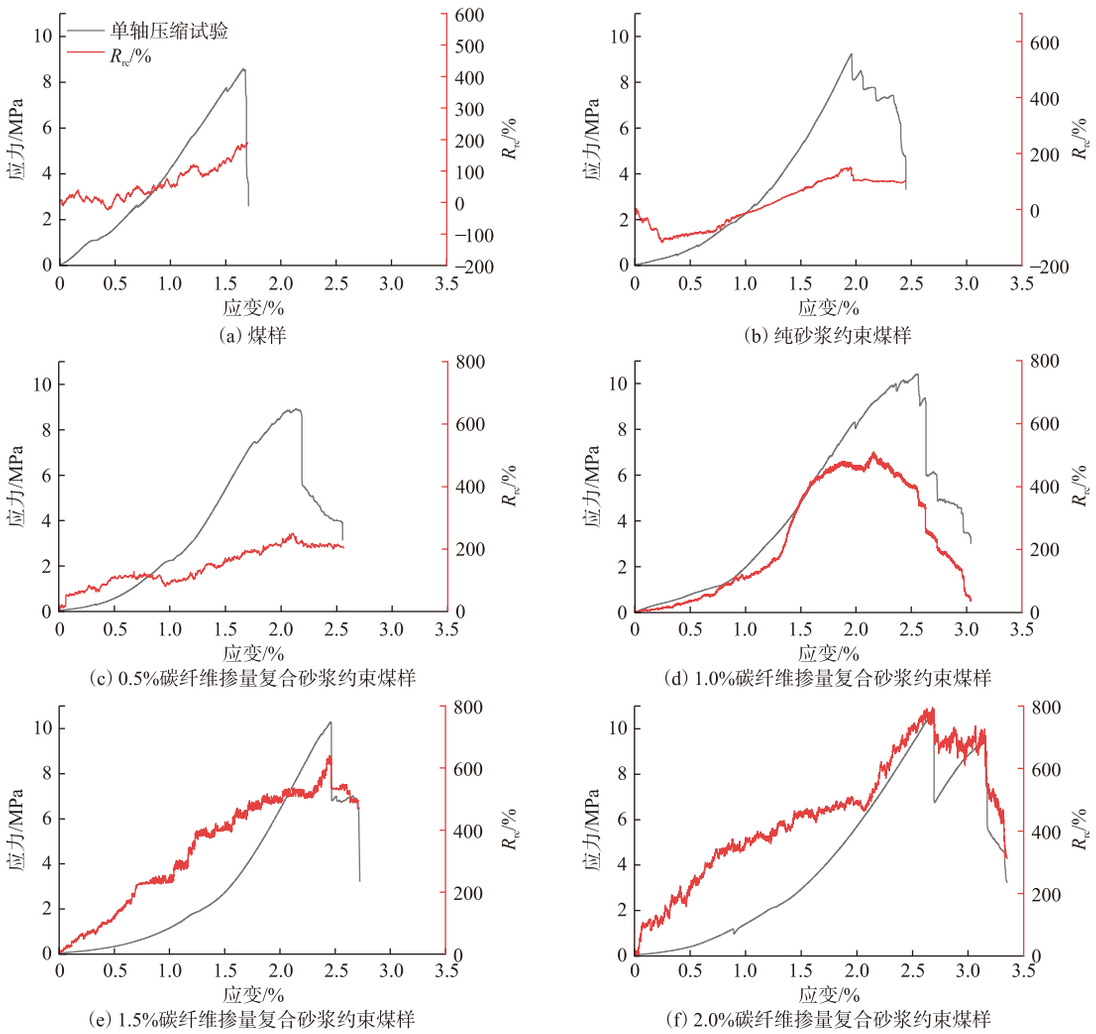


图 10　不同约束条件下的单轴压缩试验应力-电阻变化率-应变对应关系

Fig. 10　Uniaxial compressive stress and R_{rc} variation characteristics under different constraint conditions.

3.2　碳纤维复合砂浆环向约束效应

为探究碳纤维复合砂浆对煤样的约束作用，对比分析不同碳纤维掺量下试件的环向应变峰值，结果如图 11a 所示．纯煤样的环向应变峰值为 0.5%．采用复合砂浆约束煤样后，试件的环向应变峰值随碳纤维掺量增大而增大．在碳纤维掺量为 2.0% 时，环向应变峰值增大至 1.9%，较纯煤样增大 2.86 倍．这表明碳纤维复合砂浆对煤样形成了有效约束．

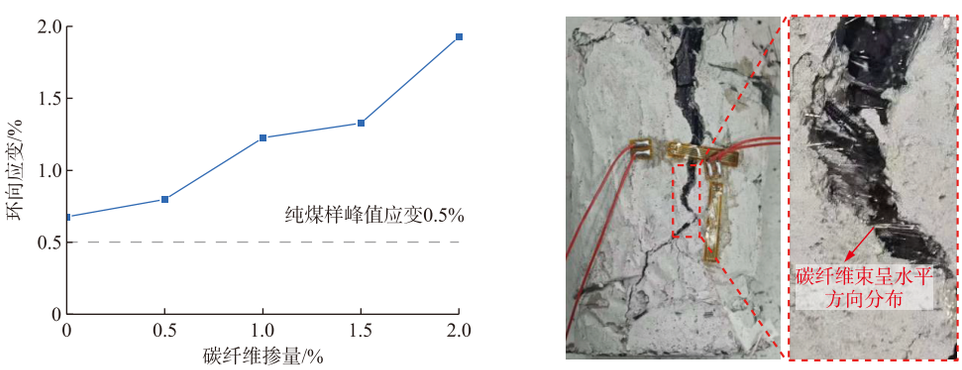


图 11　复合砂浆约束煤样环向应变及破坏形态

Fig. 11　Composite mortar-constrained coal sample circumferential strain and failure mode

图 11b 为碳纤维掺量 2.0% 的复合砂浆约束煤样裂纹形貌，可见试件表面产生一条较大裂纹，其他区域保持完整. 在裂纹两侧可观察到大量沿水平方向分布的碳纤维束，表明碳纤维在裂缝扩展过程中有效承载并限制裂缝扩展，进一步验证了其对煤样的约束作用.

3.3 约束煤样应力/应变的电阻响应灵敏度测定

为探究复合砂浆约束煤样对载荷及变形的灵敏度，借鉴文献[40]提出的灵敏度计算方法，将灵敏度 S 定义为电阻率对外部应力/应变的响应程度，其计算公式如下：

$$S_\sigma = \left| \frac{R_{\mathrm{rc},t}}{\sigma_t} \right|, \tag{11}$$

$$S_\varepsilon = \left| \frac{R_{\mathrm{rc},t}}{\varepsilon_t} \right|, \tag{12}$$

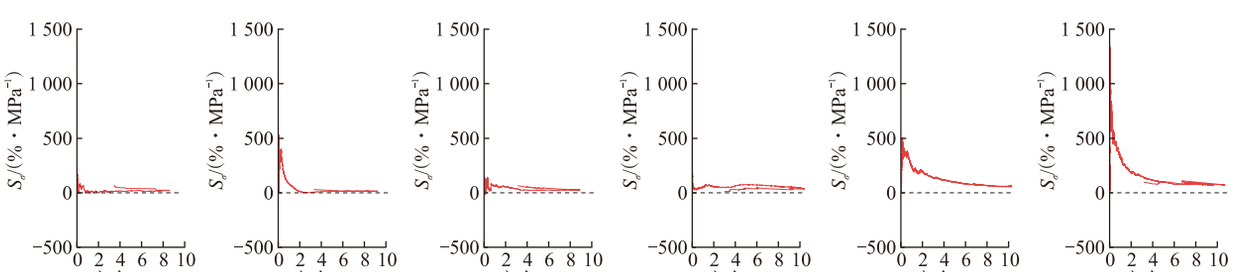
式中：S_σ 为应力灵敏度，%/MPa；S_ε 为应变灵敏度；$R_{\mathrm{rc},t}$ 为 t 时刻的电阻变化率，%；σ_t 为 t 时刻沿加载方向的应力，MPa；ε_t 为 t 时刻沿加载方向的应变，%.

根据表 3、图 12 及图 13 所示结果，纯煤样的平均应力灵敏度 S_{σ_avg} 与平均应变灵敏度 $S_{\varepsilon_\mathrm{avg}}$ 分别为 77.22%/MPa 和 19.17. 采用碳纤维复合砂浆约束煤样后，S_σ 和 S_ε 均随碳纤维掺量增加而增大. 当碳纤维掺量从 0 增加到 2.0% 时，S_{σ_avg} 从 115.38%/MPa 增大到 338.83%/MPa，提高了 1.94 倍；$S_{\varepsilon_\mathrm{avg}}$ 亦由 72.05 增大到 242.98，提高约 2.37 倍. 这表明，随着碳纤维掺量的增大，复合砂浆基体中形成了更密集、更有效的导电网络通路，使复合砂浆电阻率对外部载荷的敏感性增强.

表 3 应力/应变灵敏度计算结果

Table 3 Stress-strain sensitivity calculation results

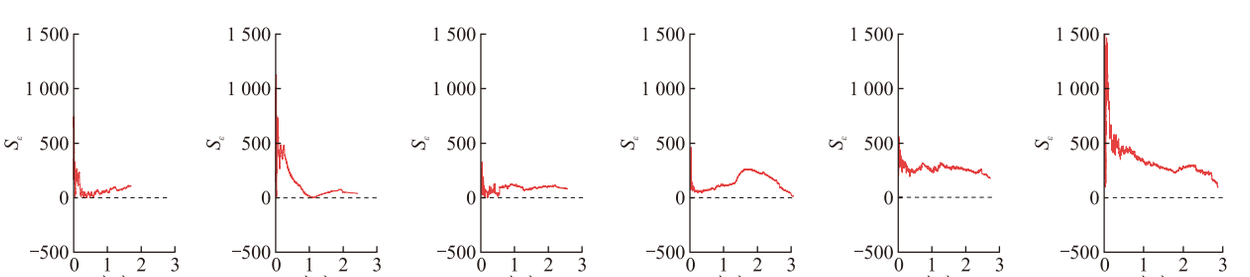
试样	S_σ/(%·MPa^{-1})		S_ε	
	平均值 S_{σ_avg}	最大值 S_{σ_max}	平均值 $S_{\varepsilon_\mathrm{avg}}$	最大值 $S_{\varepsilon_\mathrm{max}}$
煤样	19.17	169.50	77.22	748.16
纯砂浆约束煤样(碳纤维掺量为0)	72.05	526.25	115.38	1 129.89
0.5% 碳纤维掺量复合砂浆约束煤样	42.03	139.09	88.91	327.02
1.0% 碳纤维掺量复合砂浆约束煤样	51.26	1 371.92	142.41	463.05
1.5% 碳纤维掺量复合砂浆约束煤样	196.88	504.36	259.91	560.12
2.0% 碳纤维掺量复合砂浆约束煤样	242.98	1 341.87	338.83	3 222.55



(a) 纯煤样 (b) 碳纤维掺量为0 (c) 0.5%碳纤维掺量 (d) 1.0%碳纤维掺量 (e) 1.5%碳纤维掺量 (f) 2.0%碳纤维掺量

图 12 应力灵敏度 S_σ 与应力的动态变化曲线

Fig. 12 Dynamic change curve of stress sensitivity S_σ and stress



(a) 纯煤样 (b) 碳纤维掺量为0 (c) 0.5%碳纤维掺量 (d) 1.0%碳纤维掺量 (e) 1.5%碳纤维掺量 (f) 2.0%碳纤维掺量

图 13 应变灵敏度 S_ε 与应变的动态变化曲线

Fig. 13 Dynamic change curve of strain sensitivity and strain

对于 1.5% 和 2.0% 碳纤维掺量的试样，随着施加载荷增大，S_σ 及 S_ε 呈现先大幅度下降，后趋于平缓的变化趋势. 这与内部导电路径的损伤破坏相关：在加载初期，碳纤维导电网络连通性较好且纤维间接触紧密，微小的应力/应变变化、裂隙萌生等即可改变纤维间的接触状态或间距，因此灵敏度较高；随着裂纹扩展及局部断裂增多，新生的局部断裂点对整体导电性能的影响减弱，电阻率的变化速率随之放缓，灵敏度逐渐降低并趋于稳定.

3.4　约束煤样损伤破裂的电阻突变响应特征

根据 3.1 节研究，复合砂浆约束煤样破裂过程中电阻信号与应力-应变曲线存在同步跌落现象，因此可以利用这一现象监测试样的破裂过程. 对比分析纯煤样、1.0% 及 2.0% 碳纤维掺量复合砂浆约束煤样的电阻变化率突变值 ΔR_{rc}，结果如图 14 所示.

图 14a 为纯煤样的应力-应变曲线及对应的电阻值监测结果. 整个加载过程中 ΔR_{rc} 平均值为 1.3%. 随着轴向应变的增加，电阻变化率 R_{rc} 呈现波动上升趋势，期间监测到数次电阻突变信号，ΔR_{rc} 最大值达 25.0%. 但未观测到与 ΔR_{rc} 突变所对应的应力跌落现象.

图 14b 为 1.0% 碳纤维掺量复合砂浆约束煤样的应力-应变曲线与电阻突变信号监测结果. 在应变 1.9% 和 2.4% 处观察到应力波动，但 ΔR_{rc} 未出现相应的变化. 在峰后阶段，应变达到 2.6% 时，应力出现明显的跌落现象，同时 ΔR_{rc} 达到 40.7%，是普通煤样的 1.63 倍.

图 14c 为 2.0% 碳纤维掺量复合砂浆约束煤样的应力-应变曲线与电阻突变信号监测结果. 在应变达到 0.9% 和 1.2% 时，观察到应力曲线出现明显波动，ΔR_{rc} 分别为 17.8% 和 23.6%. 随着加载进入峰后阶段，ΔR_{rc} 变化幅度显著增大，在峰值应力处激增至 55.3%，随后伴随应力跌落呈现多次波动. 当应变为 3.1% 时，ΔR_{rc} 达到 99.9%，此时试件完全破坏，最终形成贯通破裂面.

对比试验结果发现，碳纤维掺量低于 1.0% 时，复合砂浆约束煤样电阻信号对峰前破裂事件响应微弱，仅在峰后阶段出现与破裂事件对应的电阻信号突变. 当碳纤维掺量达到 2.0% 时，电阻信号可响应峰前破裂事件，并完整记录裂隙扩展贯通过程，此时力学增强效果与破裂监测性能均达到最优；当监测到 ΔR_{rc} 大于 15.0% 时，说明结构内部已有较明显损伤、承载能力开始下降，存在潜在破坏风险.

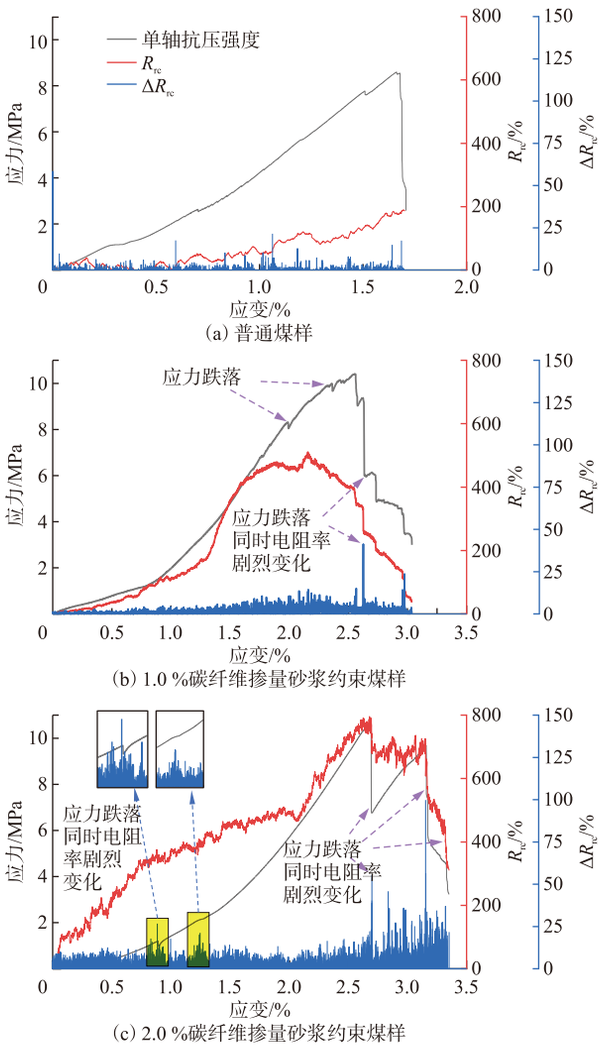


图 14　煤样破裂过程中的 ΔR_{rc} 变化特征

Fig. 14　ΔR_{rc} variation characteristics during the fracture process of coal samples

4　结　论

1）碳纤维在砂浆基体中形成连续导电网络，能够增强复合砂浆导电性，并且抑制可溶性带电离子迁移，使材料导电方式由离子导电逐步转变为电子导电. 碳纤维掺量小于 1.0% 时，碳纤维复合砂浆的导电方式以离子导电为主；当掺量达到 1.0% 时，开始形成电子导电通路，并随着掺量持续增大使电阻率不断降低；掺量达到 2.0% 时，复合砂浆的导电方式转变为电子导电为主，其电阻率较纯砂浆试件降低 4 个数量级，电阻率噪声幅值减小 5 个数量级.

2）随着碳纤维掺量增大，复合砂浆抗压强度及抗拉强度显著提高，破坏模式也从拉伸破坏转变为剪切破坏. 碳纤维掺量为 2.0% 条件下，复合砂浆的抗压强度较纯砂浆提升 136.6%，抗拉强度

增加135.1%. 采用此掺量的复合砂浆约束煤样后,试样单轴抗压强度较纯煤样提升25%,环向应变极值较纯煤样增加2.86倍.

3)碳纤维复合砂浆能够在煤体表面形成优势导电通路,对煤样裂隙扩展、应力变化及变形较为敏感. 采用2.0%碳纤维掺量的复合砂浆约束煤样后,对应力的灵敏度较纯砂浆约束煤样提升了1.94倍;复合砂浆约束煤样破裂时,应力-应变曲线与电阻变化率出现同步跌落现象,且电阻变化率出现明显突变,可通过捕捉这一信号追踪试样的破裂演化过程.

4)碳纤维复合砂浆所具有的低电阻、高稳定性以及对裂纹发育的敏感性,弥补了传统加固材料和监测设备功能单一的不足,实现了力学增强与损伤监测的协同作用. 未来研究应深入分析复合砂浆与煤岩界面的黏结性能和影响因素,以及碳纤维与水泥砂浆基体间的界面结构与相互作用,进一步优化碳纤维复合砂浆的力学强度及损伤感知性能.

参考文献:

[1] 杨健锋,刘泽宇,柴 敬,等.区段煤柱内部变形光纤监测应用研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2025,7(2):224-237.
YANG Jianfeng, LIU Zeyu, CHAI Jing, et al. Applied research on fiber optic monitoring of internal deformation in section coal pillars[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(2): 224-237.

[2] 李 昂,吕璐娜,周永根,等.大埋深强矿压扰动下窄煤柱支护加固机理及应用研究[J].中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 355-371.
LI Ang, LYU Luna, ZHOU Yonggen, et al. Study on the mechanism and application of support reinforcement for narrow coal pillars under highpressure disturbances in deep mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 355-371.

[3] 李 竹,冯国瑞,朱卫兵,等.柱式采空区蹬空复采充填体高-强协调机制及其临界高度研究[J].采矿与安全工程学报, 2021, 38(3): 469-478.
LI Zhu, FENG Guorui, ZHU Weibing, et al. Height-strength coordination mechanism of filling body in pillar goaf and its critical height in kick-off mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(3): 469-478.

[4] 冯国瑞,白锦文,马俊彪,等.残采区群柱遗煤资源绿色开采与地下空间开发技术挑战[J].绿色矿山, 2023, 1(1): 91-100.
FENG Guorui, BAI Jinwen, MA Junbiao, et al. Technical challenge of coal pillars resource green mining and under ground space developing in the residual mining area[J]. Journal of Green Mine, 2023, 1(1): 91-100.

[5] 朱斯陶,张 翔,姜福兴,等.深井高应力大巷煤柱释能改性防冲机理及应用[J].煤炭学报, 2024, 49(9): 3711-3727.
ZHU Sitao, ZHANG Xiang, JIANG Fuxing, et al. Mechanism and application of energy release modification of coal pillar in high stress roadway in deep well[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(9): 3711-3727.

[6] 陆银龙,韩 磊,吴开智,等.特厚煤层沿空掘巷力源结构特征与围岩协同控制策略[J].中国矿业大学学报,2024,53(2): 238-249.
LU Yinlong, HAN Lei, WU Kaizhi, et al.Characteristics of stress sources and comprehensive control strategies for surrounding rocks of gob-side driving entry in extra thick coal seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(2): 238-249.

[7] 黄万朋,赵同阳,江东海,等.双巷掘进留窄小煤柱布置方式及围岩稳定性控制技术[J].岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 617-629.
HUANG Wanpeng, ZHAO Tongyang, JIANG Donghai, et al. Arrangement of double entry driving with a narrow coal pillar in the middle and stability control technology of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 617-629.

[8] 朱卫兵,许家林,陈 璐,等.浅埋近距离煤层开采房式煤柱群动态失稳致灾机制[J].煤炭学报, 2019, 44(2): 358-366.
ZHU Weibing, XU Jialin, CHEN Lu, et al. Mechanism of disaster induced by dynamic instability of coal pillar group in room-and-pillar mining of shallow and close coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 358-366.

[9] 柴 敬,王佳琪,杨健锋,等.区段煤柱变形光纤光栅监测应用研究[J].煤炭科学技术, 2024, 52(1): 126-137.
CHAI Jing, WANG Jiaqi, YANG Jianfeng, et al. Research on the application of fiber bragg grating monitoring for deformation of coal pillar in sections[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 126-137.

[10] 徐青云,黄庆国,张广超.综放剧烈采动影响煤巷窄煤柱破裂失稳机理与控制技术[J].采矿与安全工程学报, 2019, 36(5): 941-948.
XU Qingyun, HUANG Qingguo, ZHANG Guangchao. Fracture and instability mechanism and control technology of a narrow coal pillar in an entry in fully mechanized caving mining under intense effect mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(5): 941-948.

[11] 马振乾,姜耀东,宋红华,等.构造破碎区沿空掘巷

偏应力分布特征与控制技术[J].采矿与安全工程学报，2017，34(1)：24-31.
MA Zhenqian，JIANG Yaodong，SONG Honghua，et al. Distribution characteristics of deviatoric stress and control technology of gob-side entry driving in structure fracture zone [J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2017，34(1)：24-31.

[12] 孟巧荣，王慧娴，王朋飞，等.深埋倾斜特厚煤层窄煤柱护巷机理与围岩控制[J].煤炭科学技术，2024，52(3)：38-52.
MENG Qiaorong，WANG Huixian，WANG Pengfei，et al. Gate road protection mechanism and surrounding rock control for gob-side entry with slender pillar in deep and inclined extra-thick coal seams[J]. Coal Science and Technology，2024，52(3)：38-52.

[13] 陈绍杰，张俊文，尹大伟，等.充填墙提升煤柱性能机理与数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报，2017，34(2)：268-275.
CHEN Shaojie，ZHANG Junwen，YIN Dawei，et al. Mechanism and numerical simulation of filling walls improving performance of coal pillar[J]. Journal of Mining & Safety Engineering，2017，34(2)：268-275.

[14] 张俊文，邓雪杰，郑通达.充填开采防治坚硬顶板型冲击地压综述研究[J].绿色矿山，2024，2(2)：103-121.
ZHANG Junwen，DENG Xuejie，ZHENG Tongda. A review on hard roof rock burst prevention and control by backfill technology [J]. Journal of Green Mine，2024，2(2)：103-121.

[15] 李庆文，胡露露，曹　行，等.CFRP布均匀约束煤圆柱轴压性能[J].复合材料学报，2022，39(11)：5611-5624.
LI Qingwen，HU Lulu，CAO Hang，et al. Axial compressive behavior of CFRP uniformly wrapped coal in circular columns [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2022，39(11)：5611-5624.

[16] 周淑春，吕恒林，吴元周，等.CFRP加固中(重)度劣化钢筋混凝土梁抗弯性能[J].中国矿业大学学报，2016，45(1)：62-69.
ZHOU Shuchun，LYU Henglin，WU Yuanzhou，et al. Flexural behavior of middle(serious) deteriorated RC beams strengthened with CFRP [J]. Journal of China University of Mining & Technology，2016，45(1)：62-69.

[17] 刘洪林，贡霄汉，赵红超，等.循环加卸载作用下CFRP约束煤样破坏及能量演化规律[J].煤炭学报，2025，50(6)：2892-2908.
LIU Honglin，GONG Xiaohan，ZHAO Hongchao，et al. Failure and energy evolution of CFRP-confined coal samples under cyclic loading and unloading[J]. Journal of China Coal Society，2025，50(6)：2892-2908.

[18] 白锦文，杨欣宇，史旭东，等.FRP包裹对煤充结构体劈裂破坏特征的影响[J].岩石力学与工程学报，2023，42(增1)：3541-3557.
BAI Jinwen，YANG Xinyu，SHI Xudong，et al. Influence of FRP restricting on the splitting failure characteristics of coal-backfilling composite structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2023，42(Sup 1)：3541-3557.

[19] 张后全，石　浩，李　明，等.基于锚杆轴力实测的综采工作面区段煤柱稳定性分析[J].煤炭学报，2017，42(2)：429-435.
ZHANG Houquan，SHI Hao，LI Ming，et al. Stability analysis of section coal pillar at a fully-mechanized working face based on axial bolt loadtests[J]. Journal of China Coal Society，2017，42(2)：429－435.

[20] 李术才，王　雷，江　贝，等.动压影响煤柱下方巷道微震特征及破坏机制[J].中国矿业大学学报，2019，48(2)：247-257.
LI Shucai，WANG Lei，JIANG Bei，et al. Microseismic characteristic and failure mechanism of roadway below coal pillar under dynamic pressure [J]. Journal of China University of Mining & Technology，2019，48(2)：247-257.

[21] 牟文强，李连崇，刘洪磊，等.遗留煤柱诱发岩层破断微震响应及前兆特征[J].东北大学学报(自然科学版)，2024，45(8)：1167-1177.
MU Wenqiang，LI Lianchong，LIU Honglei，et al. Microseismic response and precursory characteristics of rock failure induced by residual coal pillar [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science)，2024，45(8)：1167-1177.

[22] 柴　敬，郝鸿儒，杨健锋，等.基于BOTDR的区段煤柱水平变形监测[J].煤田地质与勘探，2024，52(5)：46-55.
CHAI Jing，HAO Hongru，YANG Jianfeng，et al. BOTDR-based horizontal deformation monitoring of section coal pillars[J]. Coal Geology & Exploration，2024，52(5)：46-55.

[23] 杜　刚，李　亮，王子晨，等.碳纤维混凝土高温冷却后动态压缩性能试验研究[J].材料导报，2025，39(6)：103-108.
DU Gang，LI Liang，WANG Zichen，et al. Experimental study on dynamic compressive behaviors of carbon fiber reinforced concrete after high temperature cooling[J]. Materials Reports，2025，39(6)：103-108.

[24] 岳健广，王　健，吴　瑶，等.3D打印碳纤维混凝土断裂力学性能试验研究[J].建筑结构学报，2024，45(5)：243-252.
YUE Jianguang，WANG Jian，WU Yao，et al. Experimental study on fracture mechanical properties of

3D printed carbon-fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(5): 243-252.

[25] 徐世烺,张秀芳.混凝土结构裂缝扩展全过程的新G_R阻力曲线断裂判据[J].土木工程学报, 2006, 39(10):19-28.
XU Shilang, ZHANG Xiufang. The new GR crack extension resistance as a fracture criterion for complete crack propagation in concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(10):19-28.

[26] 朱昌星,吴大志,孙家鑫.碳纤维增韧注浆体试块动态压缩力学特性及其数值模拟[J].中国矿业大学学报, 2024, 53(3): 600-612.
ZHU Changxing, WU Dazhi, SUN Jiaxin. Dynamic compression performance of carbon fiber reinforced grout and its numerical simulation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(3): 600-612.

[27] 柳根金.混掺纤维与纳米炭黑对智能混凝土裂缝自感知性能的影响[D].大连:大连理工大学, 2021.
LIU Genjin. Effect of hybrid fiber and nano carbon black on the self-sensing ability of crack for smart concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.

[28] 张景峰,仝朝康,张智超,等.CFRP加固钢筋混凝土梁抗冲击性能试验[J].中国公路学报, 2022, 35(2): 181-192.
ZHANG Jingfeng, TONG Chaokang, ZHANG Zhichao, et al. Impact performance of reinforced-concrete beam strengthened by CFRP[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 181-192.

[29] 李 明,朱浮声,赵云鹏.基于断裂力学的CFRP加固桥梁疲劳裂纹扩展研究[J].中国公路学报, 2014, 27(11): 63-68.
LI Ming, ZHU Fusheng, ZHAO Yunpeng. Study on fatigue crack propagation of CFRP reinforced bridge basedon fracture mechanics[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(11): 63-68.

[30] 尹世平,曲烽豪,王 飞,等.纤维编织网增强混凝土加固砌体墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报, 2023, 44(增1): 75-82.
YIN Shiping, QU Fenghao, WANG Fei, et al. Experimental study on seismic performance of masonry walls strengthened with textile-reinforced concrete[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(Sup 1): 75-82.

[31] LI H D, LI Y B, PAN Y F, et al. Compressive properties of a novel slurry-infiltrated fiber concrete reinforced with arc-shaped steel fibers[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2023, 24(6): 543-556.

[32] 丁 聪,任金明,王永明,等.高延性水泥基复合材料用短切PVA纤维的长度优选研究[J].材料导报, 2023, 37(13): 253-260.
DING Cong, REN Jinming, WANG Yongming, et al. Study on PVA fiber length optimization for high ductility cementitious composites[J]. Materials Reports, 2023, 37(13): 253-260.

[33] 程伟峰,林星平,丁一宁,等.掺硅粉、钢纤维湿喷混凝土的工程应用研究[J].岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2321-2329.
CHENG Weifeng, LIN Xingping, DING Yining, et al. Application research on silica fume and steel fiberre in forced wet-shotcrete[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2321-2329.

[34] 杜国平,刘新荣,祝云华,等.隧道钢纤维喷射混凝土性能试验及其工程应用[J].岩石力学与工程学报, 2008(7): 1448-1454.
DU Guoping, LIU Xinrong, ZHU Yunhua, et al. Performance examination of steel fiber reinforced shotcrete in tunnel and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(7): 1448-1454.

[35] BIRGIN H B, D'ALESSANDRO A, FAVARO M, et al. Field investigation of novel self-sensing asphalt pavement for weigh-in-motion sensing[J]. Smart Materials Structures, 2022, 31(8): 085004.

[36] PEIRIS A, HARIK I. Carbon fiber-reinforced polymer rod panels for strengthening concrete bridges[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(4): 557-570.

[37] XIAO H G, LI H, OU J P. Modeling of piezoresistivity of carbon black filled cement-based composites under multi-axial strain[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 160(1): 87-93.

[38] ZHAO B Z, NING S, XU J M, et al. A carbon fiber-reinforced backfill composite with self-sensing capability for mine stability monitoring[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2025, 58(11): 12737-12754.

[39] LI R H, DENIZ BULUCU D, CHOU T, et al. Enhanced ion conductivity in a poly(ionic liquid)-grafted nanoparticle-based single-ion conductor[J]. Macromolecules, 2024, 57(8): 3807-3815.

[40] 王 艳,李奥阳,张少辉,等.导电超高性能混凝土的弯敏感知特性和荷载-挠度关系[J].硅酸盐学报, 2025, 53(2): 416-427.
WANG Yan, LI Aoyang, ZHANG Shaohui, et al. Bending sensitive characteristics and load-deflection relationships of conductive ultra-high performance concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2025, 53(2): 416-427.

(责任编辑 沈 菊 宋 爽)