

# 煤系砂岩受载破裂全程多尺度多参数测试及表征

张平松<sup>1,2</sup>, 刘畅<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学 地球与环境学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 淮南矿区已进入A组煤开采的关键时期,随着开采深度的增加,面临的岩石力学问题愈加复杂,煤系砂岩作为采场围岩的重要组成部分,对其力学性质、地质地球物理性质的研究至关重要.从细观、试件以及岩层实测角度出发,获得煤系砂岩的裂隙演化特征、应变和电极电流响应特征,全面认识煤系砂岩的受载破坏裂隙、参数响应特征及阈值.结果表明:细观尺度上,当荷载达到70.2%最大应力( $\sigma_{\max}$ )时,各细观参数开始有较快增长.试件尺度上,对于不同含水率的砂岩试件,临破裂时分布式光纤应变值分别为 $613 \times 10^{-6}$ ,  $787 \times 10^{-6}$ ,  $933 \times 10^{-6}$ 和 $1\,522 \times 10^{-6}$ ,裂隙水作用下砂岩试件强度降低,且含水率和应变增长率之间呈二次函数关系;电极电流整体变化趋势经历了平稳、缓慢上升、轻微下降和骤降4个阶段,不同含水率砂岩试件的破裂电流时间比( $t_1/t_2$ )值依次为95.4%, 85.7%, 73.2%和60.5%.岩层实测方面,获得了回采全程砂岩层位分布式光纤应变和电极电流响应特征,并与室内试验的多参数响应特征一致.测试结果可为深入研究A组煤系砂岩力学性质和地质地球物理性质、裂隙产生机制,以及现场探测实践和灾害预警提供支撑.

**关键词:** 煤系砂岩;多尺度研究;多场多参数;分布式光纤;并行电法

**中图分类号:** TD 311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)01-0172-14

## Multi-scale and multi-parameter testing and characterization of coal sandstone throughout loaded rupture

ZHANG Pingsong<sup>1,2</sup>, LIU Chang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection,

Huainan, Anhui 232001, China; 2. School of Earth and Environment,

Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** Huainan mine has entered the critical period of Group A coal mining, with the increase of mining depth, the rock mechanics problems faced are more and more complex, coal sandstone as an important part of the quarry perimeter rock, the study of its mechanical properties, geological and geophysical properties is crucial. From the perspectives of fine-scale observation, specimens and actual measurements of rock layers, we obtain the fracture evolution characteristics, strain and electrode current response characteristics of coal sandstone, and comprehensively recognize the load-damaged fracture, parameter response characteristics and

收稿日期: 2024-05-30 修回日期: 2024-11-06 DOI: 10.13247/j.cnki.jcumat.20240254

基金项目: 安徽省科技重大专项项目(202203a07020009);安徽理工大学高层次人才科研启动基金资助项目(2024yjrc78)

通信作者: 张平松(1971—),男,安徽省六安市人,教授,博士生导师,工学博士,从事综合地球物理勘探、矿山透明地质及工程多灾害源探测、监测与防治等方面的研究.

E-mail: pszhang@sohu.com Tel: 13955433071

引用格式: 张平松,刘畅.煤系砂岩受载破裂全程多尺度多参数测试及表征[J].中国矿业大学学报,2025,54(1):172-185.

ZHANG Pingsong, LIU Chang. Multi-scale and multi-parameter testing and characterization of coal sandstone throughout loaded rupture[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(1): 172-185.

threshold values of coal sandstone. The results show that on the fine-scale, when the load reaches  $70.2\% \sigma_{\max}$  (maximum stress), the fine-scale parameters start to have a faster growth. On the specimen scale, for sandstone specimens with different water contents, the distributed fiber-optic strain values at the time of rupture were  $613 \times 10^{-6}$ ,  $787 \times 10^{-6}$ ,  $933 \times 10^{-6}$ , and  $1\ 522 \times 10^{-6}$ , respectively. The strength of sandstone specimens was reduced by the action of fissure water, and there was a quadratic relationship between the water content and the growth rate of the strain; the overall trend of the electrode currents experienced four stages of stable, slowly rising, slightly The overall trend of the electrode current went through four stages, such as smooth, slow rise, slight decline and sudden drop, and the values of the time ratio of rupture current ( $t_1/t_2$ ) of sandstone specimens with different water contents were 95.4%, 85.7%, 73.2% and 60.5% in that order. As for the actual measurement of the rock layer, the distributed fiber-optic strain and electrode current response characteristics of the sandstone layers throughout the back-mining process were obtained and are consistent with the multi-parameter response characteristics of the indoor tests. The test results can provide support for the in-depth study of the mechanical properties and geo-geophysical properties of Group A coal sandstone, the mechanism of fissure generation, as well as on-site detection practice and disaster early warning.

**Key words:** coal measure sandstone; multi-scale research; multi-field and multi-parameter; distributed optical fiber; parallel electrical method

长期以来,煤炭在我国一次消费能源中扮演着重要角色<sup>[1-3]</sup>.经济的飞速发展伴随着日益增长的能源需求,在未来相当长的一段时间里,煤炭资源仍然是现代能源体系的“压舱石”<sup>[4-6]</sup>.随着浅部煤炭资源的减少,开采深度在逐年增大,煤炭开采面临着岩层结构、应力环境、渗流环境、破坏特征等复杂条件情况,各种矿井安全事故也更易发生,其中包括巷道变形、顶板垮塌、冲击地压等<sup>[7]</sup>.追本溯源,威胁岩体工程安全的主要因素是岩石裂隙的产生和扩展,进行荷载下岩石裂隙的实时参数测试是灾害分析的基础.砂岩作为煤系地层的主要构成岩性之一,获取其不同尺度、不同状态的地质地球物理参数阈值,对其破坏机理认识至关重要,可为煤炭安全开采监测预警提供数据支撑.

荷载条件下砂岩裂隙变形的研究尺度一般包括:细观尺度、试件尺度和岩层尺度.细观尺度上,常用测试手段包括:X射线CT扫描法<sup>[8]</sup>、扫描电镜法<sup>[9]</sup>、核磁共振法<sup>[10]</sup>等.文献[11]对泥岩试件开展了真三轴应力环境下实时CT扫描,结果表明中间主应力对岩石内部萌生裂纹扩展方向起到决定性的作用,岩石内部裂隙扩展发育过程强烈依赖中间主应力方向.文献[12]利用工业CT对岩石破裂过程进行阶段性观测扫描,量化表征岩石破裂过程中裂纹扩展情况.动态CT扫描可实时捕捉岩样内部裂纹扩展和损伤程度,使岩石试件损伤

演化三维定量表征成为可能.试件尺度上,更多的是通过参数监测来反映其内部裂隙的发育特征,包含:应力、应变、声波参数、光学参数、热学参数、电性参数、磁性参数等.文献[13]利用光纤布拉格光栅测量砂岩试件在分级加载过程中的动态应变响应.文献[14-15]用光纤布拉格光栅线进行CO<sub>2</sub>注入过程中岩芯表面的应变测试,结果显示CO<sub>2</sub>注入压力和岩芯表面应变响应线性相关.文献[16]基于光频域反射技术(OFDR)提出了一种利用分布式光纤传感技术测量单轴压缩圆柱形岩石试样表面应变的新方法.文献[17]提出了光纤光栅的岩石试件多倾角布设方式,测试获得了不同倾角的光纤光栅应变响应情况,与三维数字图像相关法(3D DIC)结果相互验证.文献[18]围绕煤岩试件,细致地研究了煤岩体时间域和频率域的电性特征,获取了应力、电性参数和声发射计数间的响应关系.文献[19]阐述了裂隙尖端放电发生的过程,解释了岩体损伤过程中自然电场异常产生的微观机理.文献[20]在实验室进行了24种不同类型的火山碎屑岩的物理力学和电阻率测试,结果表明电阻率与岩石的力学、物性参数关联较大.文献[21]制作圆柱状煤试样,获取煤样破坏过程的力学强度及电阻率变化规律.文献[22]建立了具有压力、含水率和电阻率3个参数的岩石压力-电阻率关系模型.文献[23]总结了一种表征煤

体损伤的声电法,提出了相应的电阻率特征参数.岩层尺度上,文献[24-26]采用分布式光纤,探明了鄂尔多斯准格尔煤田和淮南煤田多个工作面底板、黄陇煤炭基地工作面顶板的采动破坏情况.文献[27]基于分布式光纤传感技术建立了开采模型的监测系统,结果表明光缆应变总体上呈现压缩—拉伸—再压缩的过程.文献[28]提出采动覆岩变形多场光纤神经感知与安全保障体系构想.在电法监测方面,文献[29]提出了矿井并行电法技术体系.文献[30-31]提出钻孔电极电流法监测和表征覆岩破坏的方法,垮落带和裂缝带的钻孔电极电流值表现为降低.文献[32]研究表明工作面固定位置的电阻率响应在回采过程中会经历先降低、后升高、再降低的过程.通过对已有研究的分析、总结,可以发现现有的研究主要集中在单一尺度上开展,多尺度的研究相对较少,通过开展岩石全程多尺度、多参数的研究,更有利于系统认识岩石的力学性质、地质地球物理属性及致灾机理.

基于细观、试件、岩层 3 种尺度下的测试与分析,获得研究区 A 组煤层砂岩的裂隙演化特征、应变和电极电流的响应特征及阈值范围,为采场的安全、高效开采及开展现场探测预报研究提供重要的支撑.

## 1 试验准备和测试技术原理

### 1.1 试件制备

测试所需的砂岩试件取自淮南潘谢矿区某矿 A 组煤层底板,遵循 GB/T50266—99《工程岩体试验方法标准》<sup>[33]</sup> 制备砂岩试件,直径 50 mm、高 100 mm,端面的不平整度小于 0.5 mm,平均密度为 2.67 g/cm<sup>3</sup>. 设置砂岩试件的含水状态有 4 种,即自然状态、半饱和状态、自然饱水状态以及加压饱水状态,对应的含水率分别为 0.114%, 0.186%, 0.224%, 0.312%. 含水率  $w_c$  的计算公式为

$$w_c = \frac{m_c - m_d}{m_d} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:  $m_c$  为含水砂岩质量,单位 g;  $m_d$  为干燥砂岩质量,单位 g.

砂岩试件如图 1 所示,对试件 S5 进一步加工成符合 CT 试验要求的尺寸,具体参数如表 1 所示.



图 1 砂岩试件

Fig. 1 Sandstone specimens

表 1 岩石试件基本参数信息

Table 1 Basic parameter information of the specimens

试件编号	直径/ mm	高度/ mm	质量/ g	密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	含水率/ %
S1	50.22	100.36	528.22	2.67	0.114
S2	50.14	100.41	531.20	2.67	0.186
S3	50.06	100.39	525.90	2.67	0.224
S4	50.10	100.36	524.90	2.67	0.312
S5	36.22	80.12	216.32	2.67	0.114

### 1.2 试验设计及技术路线

岩石试件多参数测试系统由控制模块、加载模块和数据采集模块三部分组成. 控制模块由计算机作为控制端,加载模块为 MTS 816 岩石力学压力机,数据采集模块包括分布式光纤解调仪、并行电法仪、0.9 mm 光纤线缆、AC/FC 跳线、电极片、电法线缆、数据线等组成. OFDR 解调仪设置空间分辨率为 2 mm,采样间隔 2 s;并行电法仪采用单极供电方式的数据并行采集,即“AM”采集法,供电电压为 96 V,采样间隔 0.1 s. 本次试验加载方式为单轴持续加载,加载速率为  $1.0 \times 10^{-6}$  m/s,加载时试验机进行压力和位移数据的同步采集. 试件表面螺线缠绕分布式光纤线缆,采用环氧树脂胶粘贴在试件表面,电极片通过辅助装置与试件接触. 图 2 为测试系统布置.

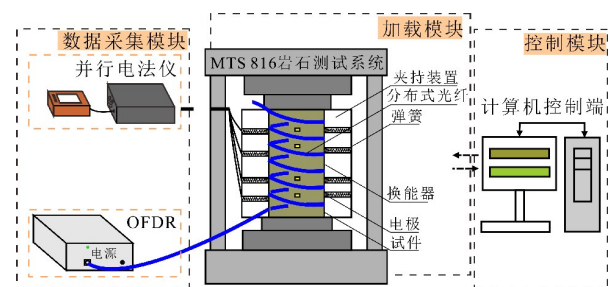


图 2 岩石试件多参数测试系统

Fig. 2 Multi parameter testing system for rock specimens

### 1.3 测试技术原理

#### 1.3.1 OFDR 测试技术

OFDR 是一种基于瑞利散射的光纤传感技术,具有极高的空间分辨率和信噪比<sup>[34-35]</sup>.测试时,通过耦合器将光源发出的连续光分为两路(图 3).其中一路作为参考光,另一路探测光向前传播时会产生瑞利散射信号,经过反射的参考光与信号光在通过耦合器时发生拍频干涉.通过光电探测器检测到这些干涉信息后,利用光学差分测量技术解调出探测光的瑞利散射信号,信号频率用于光纤各点定位.将参考光和探测光的瑞利散射信号按空间分辨率大小划分为多个信号窗口,通过互相关运算计算每个信号窗口的频谱移动.频移信息对应于光纤某点的环境温度和应变变化.试验中采用 OSI-S 型 OFDR 解调仪,其在 50 m 测量范围内的空间分辨率最高为 1 mm,温度和应变感测精度分别为 0.1 °C 和  $1.0 \times 10^{-6}$ .

$$\Delta L = (t_{str} - t_{ref}) \cdot \left(\frac{c}{N}\right) \cdot \left(\frac{1}{k}\right), \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (3)$$

式中: $\varepsilon$  为光纤应变; $\Delta L$  为光纤的变形量; $L$  为光纤原长; $t_{str}$  为光纤变形后的延迟时间; $t_{ref}$  为光纤变形前的延迟时间; $c$  为光速; $N$  为光纤的折射率; $k$  为应力光学校正因子, $k$  值需在每次测试前通过预加应变来进行标定.

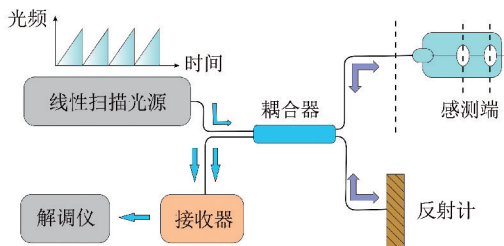


图 3 OFDR 技术原理

Fig. 3 OFDR technology principle

#### 1.3.2 并行电法测试技术

并行电法技术是一种分布式并行智能电极电位差信号采集法<sup>[36]</sup>,采集的电场包括自然场、一次场和二次场 3 种(图 4),可分为单点电源场测试的 AM 法和针对 2 个异性点电源场测试的偶极供电方式的数据并行采集 ABM 法.由于采集时间间隔要尽可能的短,试验采用 AM 法进行参数采集,电极 N 和电极 B 独立设置,测线上  $n$  个电极自动轮流取得作为供电正极 A、建立单点电源场工作资格,当某个电极取得该资格后,测线上其余  $n - 1$

个电极自动扮演采集电极 M 的角色,如图 4 所示.所以,在由  $n$  个电极构成的测线中,采集到  $n$  个电极电流和  $(n - 1) \times n$  个电极电位数据.

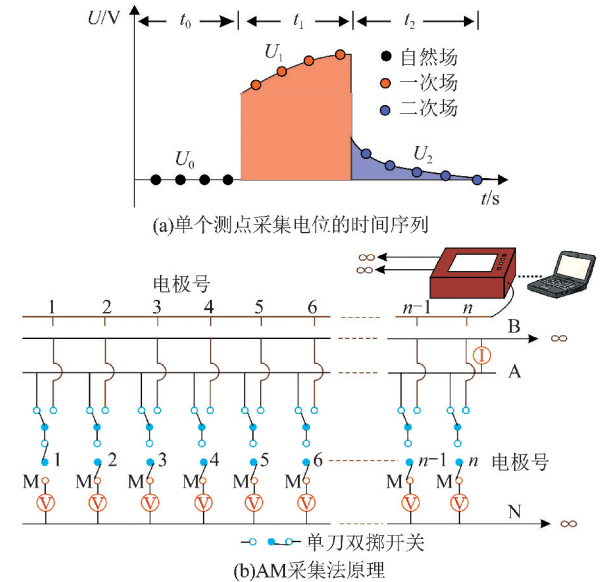


图 4 并行电法工作原理及数据采集方式

Fig. 4 Working principle and data acquisition method of parallel electrical method

#### 1.3.3 岩石 CT 测试技术

工业 CT 断层扫描是一种无损检测技术,采用 X 射线束和探测器阵列利用 X 射线的穿透性和物体对射线的吸收能力的差异获取物体内部三维断层终像<sup>[37]</sup>.当 X 射线穿透物质后,X 射线强度的衰减程度与物体的密度及物体的厚度成正比.物质的密度越大,X 射线衰减程度越高,灰度值越大,而裂隙和孔隙的成分为空气,密度小,X 射线衰减程度低,表现为黑色,灰度值小.图 5 为岩石 CT 测试原理图及试验机.

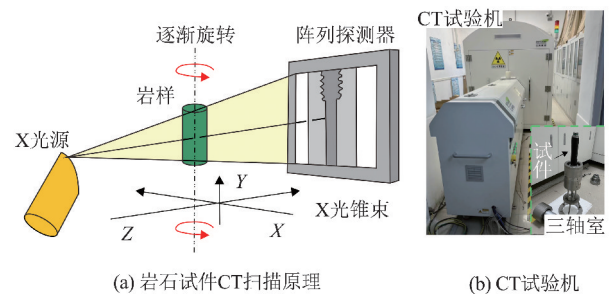


图 5 岩石 CT 测试原理及装备

Fig. 5 Principles and equipment of rock CT testing

## 2 测试结果及分析

对不同含水率的砂岩试件进行单轴加载全程的分布式光纤应变和电极电流采集,获得其应力

应变、电极电流的相应特征,同时开展砂岩受载全程的 CT 扫描,建立不同应力状态下砂岩试件的裂隙演化模型。

## 2.1 细观尺度下裂隙分布规律

### 2.1.1 砂岩细观裂隙形态及分布特征

砂岩试件 S5 的应力-应变曲线如图 6a 所示,扫描点分布如图 6b 所示。每级轴向压力增大大约 7.5 MPa,在第 14 循环中发生破裂,CT 全岩心扫描发生在静水压下(0 MPa, 0% $\sigma_{\max}$ )、第 4 次循环峰值点(29.4 MPa, 28.0% $\sigma_{\max}$ )、第 10 次循环峰值点(73.4 MPa, 70.2% $\sigma_{\max}$ )、第 13 次循环峰值点(95.4 MPa, 90.9% $\sigma_{\max}$ )和完全破裂后。

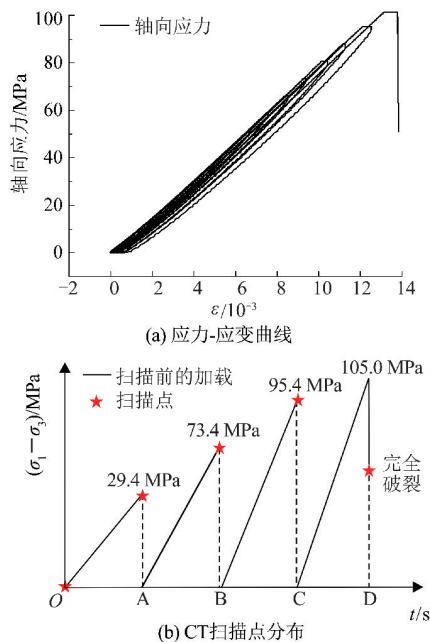


图 6 砂岩试件 S5 的应力-应变曲线及 CT 扫描点分布  
Fig. 6 Stress-strain curve and CT scan point distribution of sandstone specimen S5

通过对原生数据进行处理并导出 CT 扫描切片图像,通过三维可视化图像处理软件对 CT 切片图像堆栈进行矢量化处理<sup>[38]</sup>,获得砂岩试件裂隙的形貌以及分布特征,如图 7 所示。

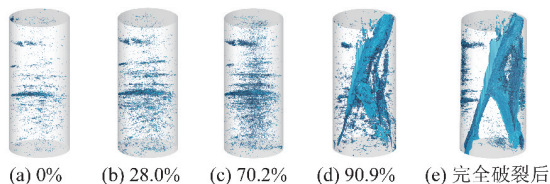


图 7 砂岩破裂过程中裂隙形貌及分布情况  
Fig. 7 Fracture morphology and distribution during sandstone fracture process

图 8 为砂岩试件破裂过程中的三维分形维数  $D$ 、孔隙率  $e$ 、内部裂隙体积  $V$ 、内部裂隙表面积  $S$

等特征参数的响应特征曲线,结合图 7 中砂岩试件内部裂纹结构分布信息分析如下:

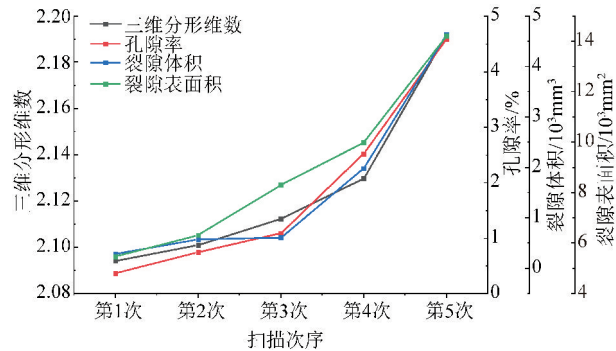


图 8 砂岩裂隙细观参数响应特征曲线  
Fig. 8 Variation curve of pore characteristic parameters in sandstone

阶段 I: 岩石试样处于静水压力状态,其内部随机分布微裂隙及微孔洞等天然原生缺陷,试件初始孔隙率为 0.36%,裂隙体积为 279.14  $\text{mm}^3$ ,裂隙表面积为 5 461.05  $\text{mm}^2$ ,三维分形维数为 2.094,试件原生孔隙较为发育。

阶段 II: 随着轴向压力不断增加,内部微缺陷生长发育并在不均匀处发生聚集,进而在其周边形成新生裂隙,并且在外力作用下新生裂隙进行初步生长延伸,岩石孔隙率增长至 0.75%,裂隙体积增长至 570.26  $\text{mm}^3$ ,裂隙表面积增长至 6 304.48  $\text{mm}^2$ ,三维分形维数增加至 2.101。

阶段 III: 此时轴向压力为 73.4 MPa(即 70.2% $\sigma_{\max}$ ),试件中的微孔隙、微裂隙不断发育扩展,并在此过程中演化出许多次生裂隙。试件孔隙率增长至 1.09%,裂隙体积增长至 604  $\text{mm}^3$ ,裂隙表面积增长至 8 303.26  $\text{mm}^2$ ,三维分形维数增加至 2.112。

阶段 IV: 此时轴向压力为 76.3 MPa(即 90.8% $\sigma_{\max}$ ),试件处于非稳定破裂发展阶段,裂隙加速扩展演化,试件内部裂隙结构特征参数均急速增加且变化幅度较大,裂隙体积增长贡献率(当前阶段裂隙体积增长量与裂隙增长总体积之比)为 69.4%,表明岩石破裂过程中裂隙扩展演化主要在此阶段进行。岩石孔隙率增长至 2.52%,裂隙体积增长至 1 977.36  $\text{mm}^3$ ,裂隙表面积增长至 9 977.28  $\text{mm}^2$ ,三维分形维数增加至 2.130。

阶段 V: 此时试件已完全破坏,局部裂隙贯通,失去承载能力。岩石孔隙率最终为 4.58%,裂隙体积最终为 4 630.00  $\text{mm}^3$ ,裂隙表面积最终为 14 208.23  $\text{mm}^2$ ,三维分形维数最终为 2.192。在外力的作用下裂隙继续演化延伸,相互交汇形成贯通裂隙,试件在宏观上发生明显变形,其内部裂隙

构成复杂网络体系结构, 裂隙体积、表面积以及三维分形维数均增加至最大值. 岩石破裂过程中裂隙结构特征参数呈现出基本不变、小幅增长、大幅激增的变化规律, 数据统计量化了岩石整体阶段性裂隙扩展过程, 与微裂隙萌生、稳定扩展、快速扩展的裂隙发育过程相对应.

### 2.1.2 砂岩三维应变场分布特征

数字体图像相关法(DVC), 是一种通过对比变形前后物体图像的位置变化, 以获取其内部的变形场信息的方法. 具体的测量步骤包括以下 3 个: 1) 对岩石试件进行全岩心 CT 扫描, 将不同加载阶段的物体进行数字化处理, 建立被测岩心的三维数字图像; 2) 开展被测岩心的位移场测量, 通过对参考体和计算体前后两阶段内部的子区块搜

索计算, 获得选定各离散计算点在变形前后的三维位移矢量场; 3) 岩石试件应变场计算, 利用差分算法对试件三维位移场进行处理, 获得试件的三维应变场. 如图 9 所示, 分别为  $10.2\% \sigma_{max}$ ,  $28.0\% \sigma_{max}$ ,  $70.2\% \sigma_{max}$  和破坏时的  $x, y, z$  三方向上的三维应力场分布. 由 DVC 结果可知, 当荷载为  $10.2\% \sigma_{max}$  时, 试件整体的应变变化较小; 当荷载为  $28.0\% \sigma_{max}$  时, 试件上部开始出现拉应变增大的情况, 分析为局部微裂隙开始生成所致; 当荷载为  $70.2\% \sigma_{max}$  时, 试件多处出现拉应变增大的情况, 分析为局部微裂隙大量生成所致; 当砂岩试件完全破坏时, 局部裂隙贯通, 主破裂面形成, 主破裂面位置出现应变的突增, 同时与裂隙周围形成拉压应变分区.

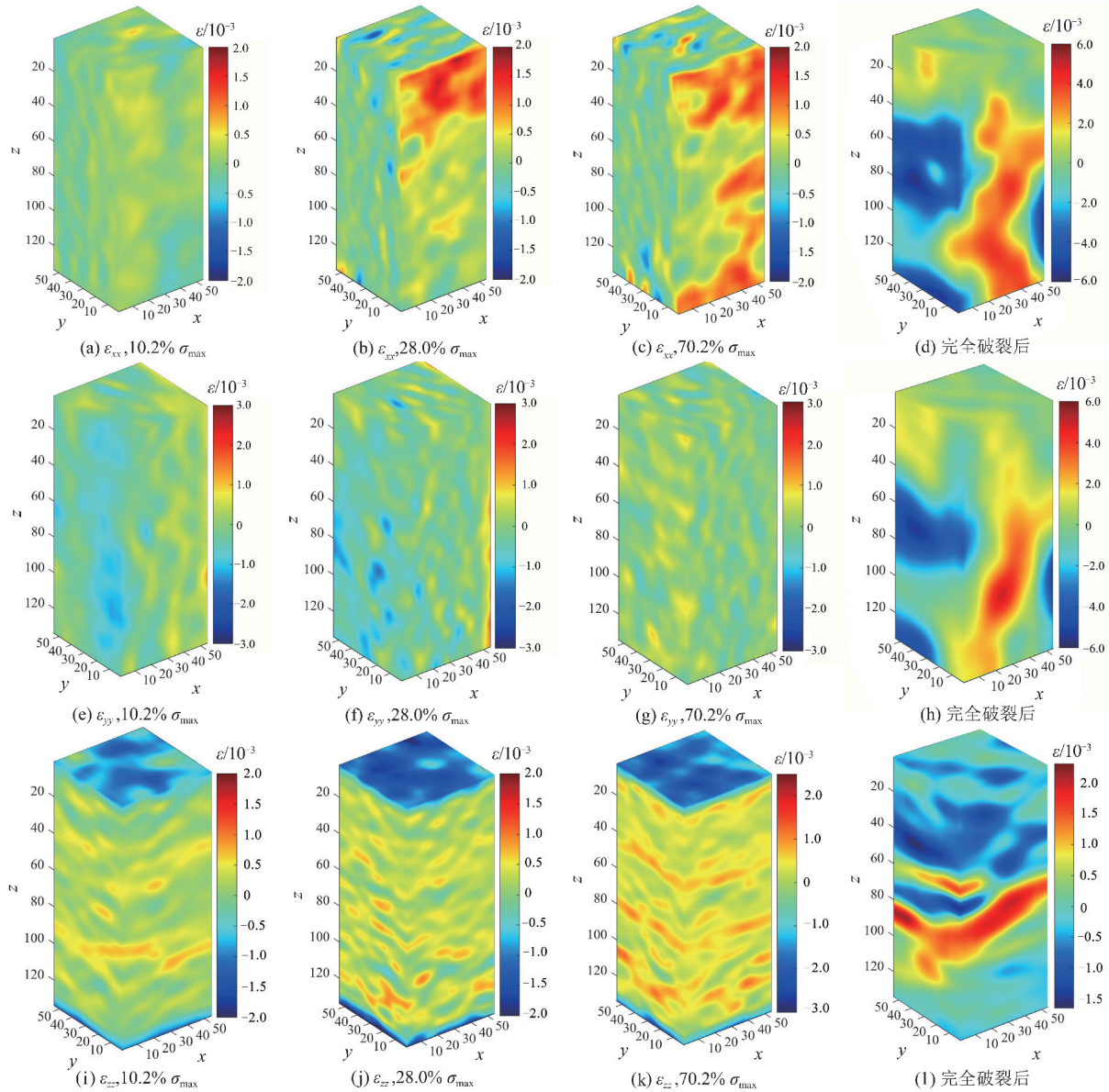


图 9 不同应力状态下砂岩试件三维应变场 DVC 重构

Fig. 9 DVC reconstruction of three-dimensional strain field of sandstone specimens under different stress states

### 2.1.3 裂隙分布与三维应变场分布对比分析

对比图 7 和图 9 可知:1)裂隙分布与应变场分布具有良好的对应关系,在砂岩试件的加载过程中,通过 CT 扫描获取了裂隙的三维分布数据,并结合 DVC 技术重建了相应的三维应变场.随着轴向压力的增加,裂隙的萌生、扩展与应变场中的拉应变集中区域具有较强的对应关系.尤其是在应力达到  $70.2\% \sigma_{\max}$  时,裂隙的扩展与应变场中多处拉应变的增大区域高度吻合,表明此时裂隙的扩展是导致应变局部集中的主要原因.2)裂隙扩展与应变突增的同步性.在裂隙扩展的过程中,应变场的变化具有明显的阶段性特征.分析显示,当裂隙开始萌生时,应变场中的局部应变值开始缓慢增大;随着裂隙的进一步扩展,应变值显著增大,尤其是在压力达到峰值前后,应变场的变化趋

于剧烈,与裂隙的快速扩展过程同步进行.3)高应变区域与裂隙网络的形成.细观尺度下的裂隙扩展导致应变场中形成明显的高应变区域,这些区域往往位于裂隙集中或贯通的部位.应变场分布图(图 9)显示,试件在临破裂时刻,主破裂面所在的位置应变显著增大,并且在裂隙贯通时,应变场中形成了明显的拉压应变分区,这进一步验证了裂隙的扩展路径与应变集中的关系.

## 2.2 试件尺度多参数响应特征与分析

### 2.2.1 力学参数响应特征

对不同含水率的砂岩试件分别开展单轴加载试验,得到应力-应变曲线如图 10 所示.图 10a 为自然状态、半饱和状态、自然饱水状态以及加压饱水状态下砂岩的应力-应变曲线,各试件的力学参数统计在表 2 中.

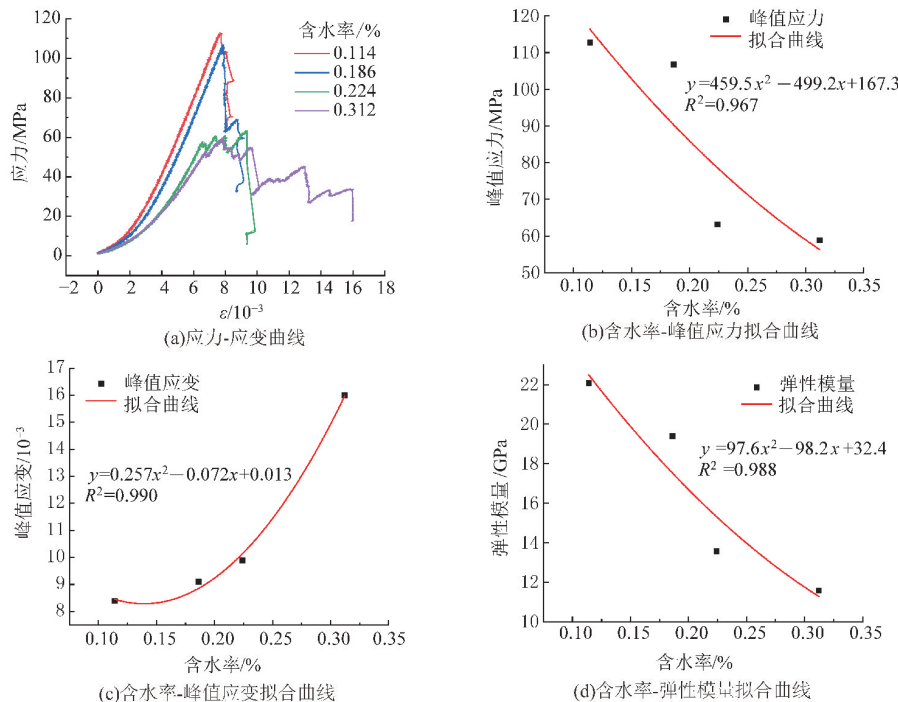


图 10 不同含水率的砂岩试件测试曲线对比及拟合结果

Fig. 10 Comparison of test curves and fitting results of sandstone specimens with different water contents

表 2 不同含水率的砂岩试件力学参数统计结果

Table 2 Statistical results of mechanical parameters of sandstone specimens with different water contents

试件编号	含水率/%	峰值应力/MPa	峰值应变/ $10^{-3}$	弹性模量/GPa
S1	0.114	112.8	8.4	22.08
S2	0.186	106.8	9.1	19.40
S3	0.224	63.2	9.9	13.57
S4	0.312	58.9	16.0	11.58

由图 10a 可知,4 种状态的砂岩试样在单轴压

缩过程中均经历了初始压密阶段、线弹性变形阶段、塑性变形阶段以及峰后破坏阶段,但其应力-应变特征有所不同.当含水率较低时,由于砂岩试样原生孔隙中仅有少量水填充,因此压密阶段相对较短;破坏前,砂岩试样的变形几乎是线弹性的,没有明显的塑性变形,表现出显著的脆性破坏.当含水率较高时,在整个变形破坏过程中,砂岩试样的变形较大,应力-应变曲线在加载不久后就呈现上凸状,线弹性变形阶段的持续时间相对较短;在峰前阶段,出现显著的塑性变形,高压饱水状态下

甚至出现屈服平台. 由此可见, 含水率对砂岩试样的力学性质、断裂损伤特征具有显著的影响. 将 4 种岩石的含水率和峰值应力、峰值应变、弹性模量分别拟合(图 10 b~10 d), 含水率和峰值应变正相关, 含水率和峰值应力、弹性模量负相关.

### 2.2.2 分布式光纤应变和电极电流响应特征

通过对不同含水率的砂岩试件单轴加载全程进行多参数的采集, 得到如图 11 所示的时间-压

力-应变、时间-压力-电极电流联合响应结果. 分析可知, 砂岩试件 S1 和 S2 的参数响应特征较为相似, 分布式光纤应变在峰值应力点前表现为缓慢增大, 其中砂岩 S1 的临破裂应变值为  $613 \times 10^{-6}$ , 应变增长率为  $0.987 \times 10^{-6}/s$ ; 砂岩 S2 的临破裂应变值为  $787 \times 10^{-6}$ , 应变增长率为  $1.145 \times 10^{-6}/s$ . 分布式光纤应变在峰值应力点处突然增大, 原因是破裂后的试件沿径向膨胀所致.

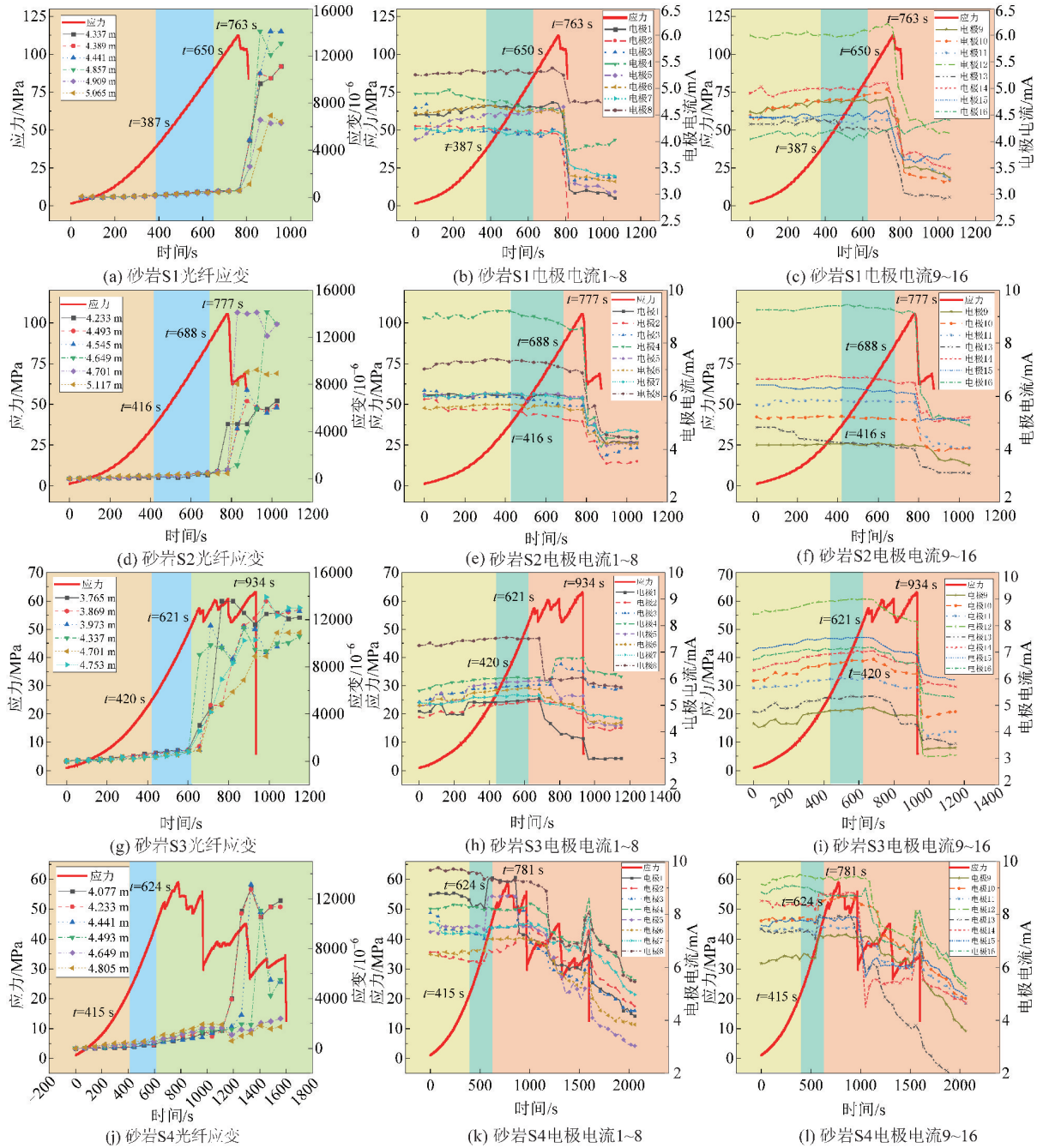


图 11 不同含水态砂岩单轴加载全程光纤应变和电极电流结果

Fig. 11 Results of fiber optic strain and electrode current during uniaxial loading of sandstone with different water content states

砂岩试件 S3 和 S4 的参数响应特征较为相似, 分布式光纤应变在峰值应力点前表现为缓慢

增大, 其中砂岩 S3 的临破裂应变值为  $933 \times 10^{-6}$ , 应变增长率为  $1.502 \times 10^{-6}/s$ ; 砂岩 S4 的临破裂

应变值为  $1.522 \times 10^{-6}$ , 应变增长率为  $2.439 \times 10^{-6}/s$ ; 分布式光纤应变在峰值应力点处表现为明显增大, 之后在持续荷载的作用下, 砂岩试件不断发生局部破裂, 分布式光纤局部应变值先后显著增大, 局部破裂伴随着弹性能的释放, 试件完全破裂时, 应变逐渐趋于稳定. 对于电极电流, 砂岩 S1、S2 和 S3 的电极电流值响应为先轻微升高, 后轻微下降, 但下降的点略有不同, 砂岩 S4 的电极电流值表现为持续的降低.

为了深入分析电流数据, 统计了各砂岩试件的平均电流值变化情况, 如图 12 所示. 表 3 统计分析了单轴加载过程中电极电流极大值出现时刻  $t_1$ 、破裂时刻  $t_2$  以及破裂电流时间比  $t_1/t_2$ , 当砂岩试件的含水率为 0.114%, 0.186%, 0.224% 和 0.312% 时, 破裂电流时间比依次为 95.4%,

85.7%, 73.2% 和 60.5%, 对含水率和破裂电流时间比进行拟合, 两者线性负相关(图 13). 出现这种现象的原因: 随着含水率的升高, 对砂岩试件的软化作用愈加明显, 软化后的砂岩试件在荷载作用下储能能力下降, 更易通过裂隙的扩展向外界释放能量.

表 3 砂岩试件单轴加载全程参数变化统计分析  
Table 3 Statistical analysis of parameters change during uniaxial loading of sandstone specimen

试件编号	应变增长率/ $10^{-6} s^{-1}$	$t_1/s$	$t_2/s$	$t_1/t_2$
S1	0.987	728	763	95.4%
S2	1.145	666	777	85.7%
S3	1.502	684	934	73.2%
S4	2.439	583	964	60.5%

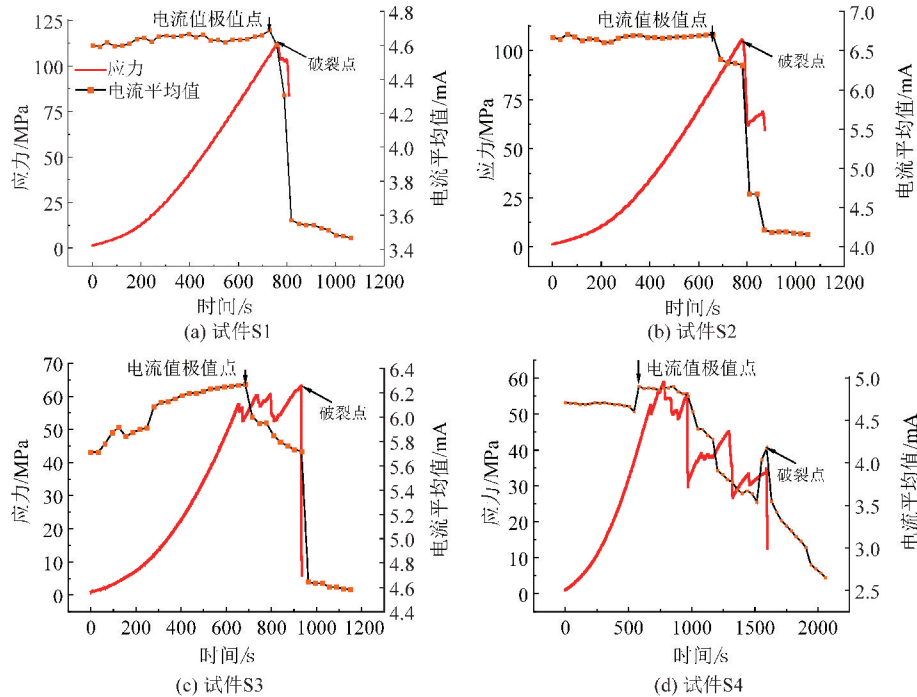


图 12 电极电流平均值统计结果曲线

Fig. 12 Average electrode current statistical result curve

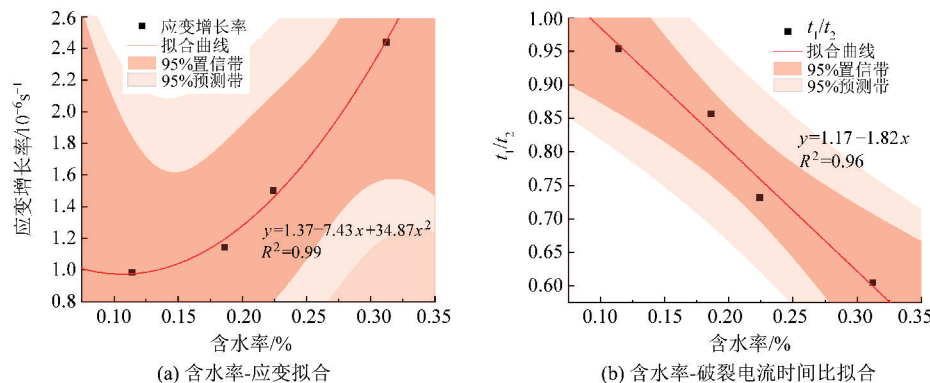


图 13 砂岩试件含水率和统计参数值拟合结果

Fig. 13 Fitting results of water content and statistical parameter values of sandstone specimens

### 2.3 岩层尺度多参数响应特征及分析

#### 2.3.1 观测系统设计

监测钻孔位于 A 组煤层底板(图 14), 贯穿底板砂岩层, 在监测孔中植入分布式光纤和电法电极, 实现采动全程的砂岩层应变和电极电流采集. 全孔采用水泥分段注浆, 确保传感线缆和目标岩层的高度耦合.

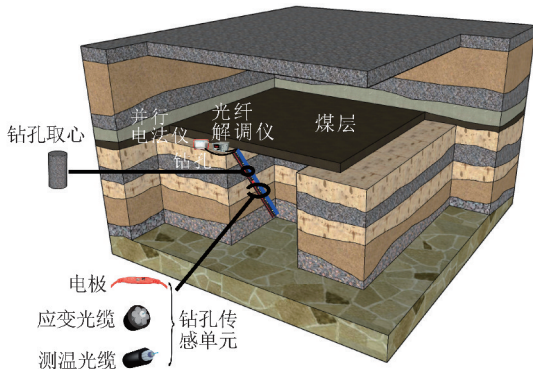


图 14 底板岩层监测系统组成

Fig. 14 Composition of bottom layer monitoring system

#### 2.3.2 测试结果分析

图 15a 为煤层回采过程中光纤应变监测结果,

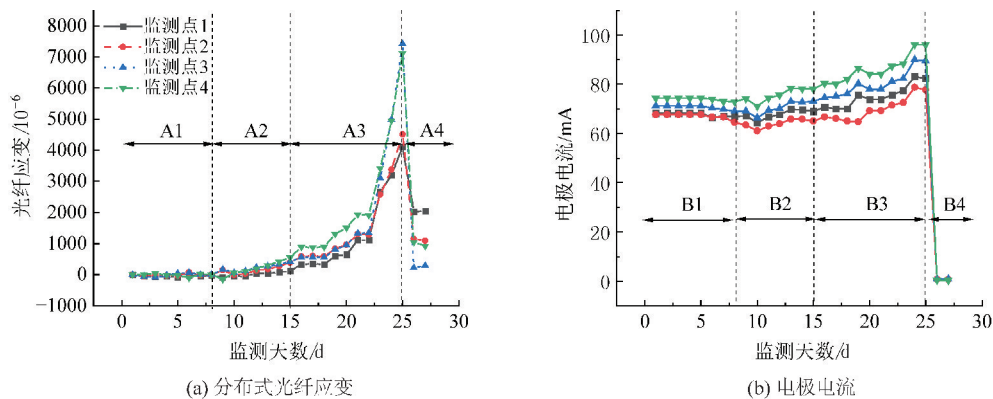


图 15 煤层回采过程中砂岩层多参数监测曲线

Fig. 15 Full range pressure and response curves of various parameters for sandstone specimens under uniaxial loading

为明晰回采过程中底板岩层变形破坏情况, 采用多参数联合表征与分析. 图 16a 为砂岩层中的 2 号监测点的多参数对比情况, 分析可知: 监测初期, 光纤应变值和电极电流值较为稳定, 应变值变化在  $100 \times 10^{-6}$  以内, 电极电流值保持在 65.0 mA 上下; 继续监测, 第 6~15 d, 光纤应变从  $2 \times 10^{-6}$  增至  $387 \times 10^{-6}$ , 电极电流从 64.4 mA 增至 65.0 mA; 第 16~25 d, 光纤应变先增大到  $1305 \times 10^{-6}$ , 接着突增至  $4507 \times 10^{-6}$ , 电极电流则先波动

底板砂岩岩层的损伤演化可分为无影响阶段(A1)、微影响阶段(A2)、显著影响阶段(A3)和岩层破裂阶段(A4). A1 阶段几乎不受采动影响, 光纤应变值变化极小; A2 阶段为微影响阶段, 回采工作面逐渐靠近监测钻孔, 监测孔围岩在支承压力作用下逐渐压密, 分布式光纤应变值增大; A3 为显著影响阶段, 此时回采工作面位于钻孔控制范围内, 监测孔内砂岩层位受到采动影响, 岩层内部裂隙扩展, 光纤拉应变大幅增长; A4 为岩层破裂阶段, 积聚能量释放, 应变值减小. 对现场采集的电极激励电流进行解编与处理, 采集数据伊始, 监测孔内各电极电流值均在 60 mA 以上, 电极接地情况良好. 如图 15b 所示, B1 阶段, 回采工作面远离监测孔, 砂岩层位电极电流保持平稳; B2 阶段, 随工作面回采推进, 监测孔内的各电极电流值出现轻微升高; B3 阶段, 回采工作面接近孔口, 钻孔围岩被进一步压实, 电流值变化显著, 具体为在支承压力作用下岩层压实, 使得电流值先升高, 之后岩层出现局部裂隙或破坏, 电流值降低; B4 阶段, 监测点的电流值骤降至 1 mA 以下, 为岩层破裂时电性参数响应特征.

增长至 78.7 mA, 然后略下降至 77.7 mA, 这种临破裂时的参数响应特征与 2.2 节中室内岩石试验的结果相一致, 原位测试是对室内试验结果的有效验证. 监测后期该处岩层拉应变值超出最大承载范围, 岩层破裂, 电极电流值骤降至 1 mA 以下, 呈岩层破坏特征, 光纤拉应变随之骤降. 图 16b 为监测点 4 的多参数响应对比分析, 虽数值存在差异, 但整体变化趋势与监测点 2 一致.

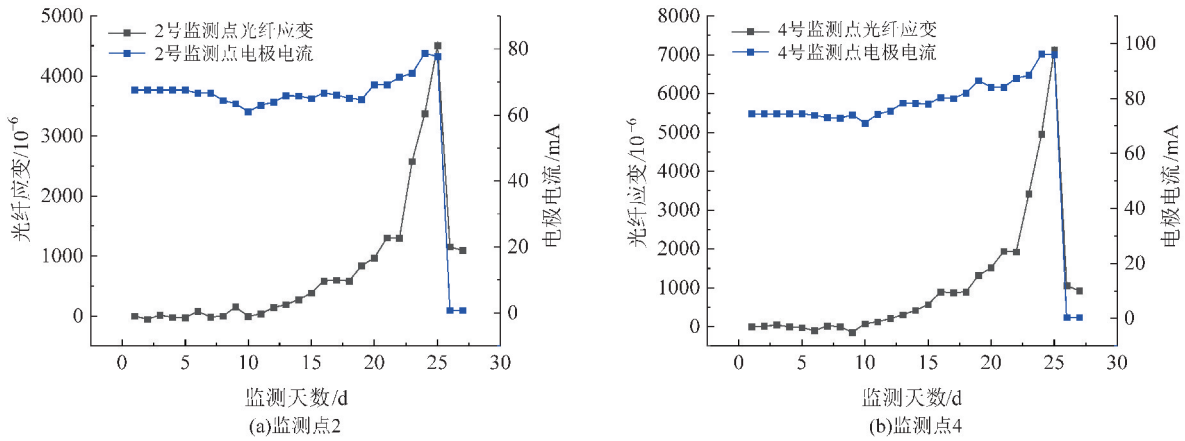


图 16 两参数对比分析

Fig. 16 Comparative analysis of two parameters

## 2.4 多尺度多参数间对比分析

不同尺度的多参数响应具有一定关联性,将砂岩的受载过程划分为受载前期、受载中期和破裂阶段,对不同尺度的砂岩在 3 个受载阶段的参数响应及结构演化综合分析.受载初期,试件尺度上以砂岩试件 S1 测线上 5.065 m 处的测点为例,前 766 s 内,光纤拉应变从 0 增长至  $561 \times 10^{-6}$ ,电极电流从 4.48 mA 增长至 4.79 mA;对比岩层尺度上的监测点 1,在回采初期,拉应变从 0 增长至  $341 \times 10^{-6}$ ,电极电流从 74.4 mA 增长至 80.0 mA;细观尺度上,由 CT 扫描结果可知,砂岩试件在加载前期主要以原生孔隙的压密为主,有少量微裂隙滋生,但整体结构完整,具有较好的承载能力.综上,在砂岩的原生孔隙压密阶段,光纤应变、电极电流均表现为缓慢增长.

受载中期,砂岩试件 S1 测线上 5.065 m 处的测点,在 767~814 s 内,光纤拉应变值较快增长至  $1\ 095 \times 10^{-6}$ ,电极电流从 4.79 mA 增长至 4.97 mA;对比岩层尺度上的监测点 1,在回采面靠近监测孔孔口过程中,光纤拉应变从  $341 \times 10^{-6}$  增长至  $1\ 107 \times 10^{-6}$ ,电极电流从 80.0 mA 增长至 96.0 mA;细观尺度上,结合 CT 扫描结果可知,当荷载达到  $70.2\% \sigma_{\max}$  时,砂岩内部裂隙出现较快和明显的增长.综上,在砂岩的整体微裂隙大量滋生阶段,光纤拉应变、电极电流均出现较明显变化.

破裂阶段,砂岩试件 S1 测线上 5.065 m 处的测点,在 814~900 s 内,拉应变值较快增长至  $6\ 921 \times 10^{-6}$ ;对比岩层尺度上的监测点 1,回采工作面临近监测孔孔口时,拉应变从  $1\ 107 \times 10^{-6}$  增长至  $4\ 112 \times 10^{-6}$ ,电极电流骤降至 0.4 mA;细观尺度上,由 CT 扫描结果可知,该阶段裂隙持续扩张,相互交汇形成贯通裂隙,试件发生明显变形,

内部裂隙构成复杂网络体系结构.综上,在砂岩的破裂阶段,局部裂隙贯通形成裂隙网络,光纤拉应变突增、电极电流骤降.

## 3 结 论

1) 细观尺度的研究上,基于岩石 CT 动态扫描,构建了循环加卸载全程应力和各细观参数间的关系图谱,定量描述了岩石裂隙扩展规律.当压力达到  $70.2\% \sigma_{\max}$  时,各细观参数开始出现较快增长.裂隙分布与应变场分布具有良好的对应关系,细观尺度下的裂隙扩展形成明显的高应变区域.

2) 试件尺度的研究上,搭建了岩石试件受载全程的多参数同步采集系统,实现了砂岩试件受载全程的应力、应变及电极电流等参数的连续采集.当砂岩试件的含水率分别为 0.114%, 0.186%, 0.224% 和 0.312% 时,其临破裂时的分布式光纤应变值依次为  $613 \times 10^{-6}$ ,  $787 \times 10^{-6}$ ,  $933 \times 10^{-6}$  和  $1\ 522 \times 10^{-6}$ ,裂隙水的作用促使砂岩试件强度降低.电极电流的整体变化趋势为平稳、缓慢上升、轻微下降、突然降低,且不同含水率砂岩试件的破裂电流时间比 ( $t_1/t_2$ ) 值分别为 95.4%, 85.7%, 73.2% 和 60.5%,含水率和破裂电流时间比负相关.

3) 岩层尺度的研究上,获得了现场回采过程中岩层的应变和电极电流响应特征,结果表明,随着回采工作面靠近监测钻孔,初期,分布式光纤应变增值在  $100 \times 10^{-6}$  以内,电极电流值保持在 65.0 mA 上下;中期,分布式光纤应变先较快增长、后突增,电极电流表现为波动上升,上覆岩层作用下滋生了局部裂隙;后期,分布式光纤应变和电极电流值均表现为突然降低.现场监测与实验

室测试结果具有较好的一致性,多尺度研究为煤系砂岩的破裂监测和灾害预警提供了可靠依据。

#### 参考文献:

- [1] 袁亮,马衍坤,黄勤豪,等.煤岩动力灾害模型试验灾变地层模拟材料研制现状与展望[J].中国矿业大学学报,2024,53(5):827-856.  
YUAN Liang, MA Yankun, HUANG Qin hao, et al. Development status and prospects of simulation materials for catastrophic prone strata in the physical model experiments on coal and rock dynamic disasters[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(5): 827-856.
- [2] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.  
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [3] 袁亮,张平松.煤矿透明地质模型动态重构的关键技术与路径思考[J].煤炭学报,2023,48(1):1-14.  
YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Key technology and path thinking of dynamic reconstruction of mine transparent geological model[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 1-14.
- [4] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等.深部采矿岩石力学进展[J].煤炭学报,2024,49(1):75-99.  
HE Manchao, WU Yiyi, GAO Yubing, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75-99.
- [5] 彭苏萍.我国煤矿安全高效开采地质保障系统研究现状及展望[J].煤炭学报,2020,45(7):2331-2345.  
PENG Suping. Current status and prospects of research on geological assurance system for coal mine safe and high efficient mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2331-2345.
- [6] 张平松,许时昂,傅先杰,等.煤层采动巨厚松散层全断面监测及内部变形特征[J].煤炭学报,2024,49(1):628-644.  
ZHANG Pingsong, XU Shiang, FU Xianjie, et al. Internal deformation characteristics and full section monitoring for extremely thick loose layers under mining conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 628-644.
- [7] 田雨桐,张平松,吴荣新,等.煤层采动条件下断层活化研究的现状分析及展望[J].煤田地质与勘探,2021,49(4):60-70.  
TIAN Yutong, ZHANG Pingsong, WU Rongxin, et al. Research status and prospect of fault activation under coal mining conditions[J]. Coalfield Geology & Exploration, 2021, 49(4): 60-70.
- [8] WU K, MENG Q S, WANG C, et al. Investigation of damage characteristics of coral reef limestone under uniaxial compression based on pore structure[J]. Engineering Geology, 2023, 313: 106976.
- [9] XUE D J, ZHOU H W, ZHAO Y W, et al. Real-time SEM observation of mesoscale failures under thermal-mechanical coupling sequences in granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 112: 35-46.
- [10] ZHANG T, YUAN L, TANG M, et al. Investigation on the coupling response of stress-fracture-seepage field during oil-bearing coal mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2024, 174: 105648.
- [11] 李兆霖,周伟,王连国,等.含随机裂隙岩石真三轴破裂演化数值模拟[J].中国矿业大学学报,2023,52(1):43-51.  
LI Zhaolin, ZHOU Wei, WANG Lianguo, et al. Numerical simulation of fracture evolution of rock with random cracks during true triaxial tests process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 43-51.
- [12] 张艳博,徐跃东,刘祥鑫,等.基于CT的岩石三维裂隙定量表征及扩展演化细观研究[J].岩土力学,2021,42(10):2659-2671.  
ZHANG Yanbo, XU Yuedong, LIU Xiangxin, et al. Quantitative characterization and mesoscopic study of propagation and evolution of three-dimensional rock fractures based on CT[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2659-2671.
- [13] SUN Y K, LI Q, YANG D X, et al. Investigation of the dynamic strain responses of sandstone using multichannel fiber-optic sensor arrays[J]. Engineering Geology, 2016, 213: 1-10.
- [14] 范成凯,孙艳坤,李琦,等.页岩单轴压缩破坏试验的光纤布拉格光栅测试技术研究[J].岩土力学,2017,38(8):2456-2464.  
FAN Chengkai, SUN Yankun, LI Qi, et al. Testing technology of fiber Bragg grating in the shale damage experiments under uniaxial compression conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2456-2464.
- [15] FAN C K, LI Q, MA J L, et al. Fiber Bragg grating-based experimental and numerical investigations of CO<sub>2</sub> migration front in saturated sandstone under subcritical and supercritical conditions[J]. Greenhouse Gases, 2019, 9(1): 106-124.

- [16] LIN S Q, TAN D Y, YIN J H, et al. A novel approach to surface strain measurement for cylindrical rock specimens under uniaxial compression using distributed fibre optic sensor technology[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(12): 6605-6619.
- [17] LIU C, YAO D X, ZHANG P S, et al. 2022. Deformation and damage characteristics of deep rock specimens based on 3D-DIC and FBG[J]. *Lithosphere*, 2022(10): 4329713.
- [18] YANG C, LIU S D, FENG Y, et al. Influence of electrode polarization on the potential of DC electrical exploration[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 149: 63-76.
- [19] 刘静, 刘盛东, 曹煜. 基于裂隙尖端放电机制的深部岩体损伤自电特征分析[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(1): 323-330.  
LIU Jing, LIU Shengdong, CAO Yu. Self-potential characteristics in deep rock mass damage based on point discharge mechanism[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(1): 323-330.
- [20] KAHRAMAN S. Estimating the physico-mechanical properties of pyroclastic rocks from electrical resistivity[J]. *Pure Apply Geophysics*, 2022, 179(1): 301-309.
- [21] 胡千庭, 宋明洋, 李全贵, 等. 单轴压缩破坏下分层型煤电阻率响应分析[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 211-219.  
HU Qianting, SONG Mingyang, LI Quanguai, et al. Analysis of resistivity response of stratified briquette during uniaxial compression[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 211-219.
- [22] QU C Q, XUE Y G, SU M X, et al. Quantitative modeling of rock electrical resistivity under uniaxial loading and unloading[J]. *Acta Geophysica*, 2023, 72(1): 195-212.
- [23] SONG M Y, LI Q G, HU Q T, et al. Evolution and correlation of acoustic emission and resistance parameters during coal fracture propagation[J]. *Natural Resources Research*, 2024, 33(5): 2135-2154.
- [24] 张平松, 刘畅, 欧元超, 等. 准格尔煤田特厚煤层开采底板破坏特征综合测试研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 263-269.  
ZHANG Pingsong, LIU Chang, OU Yuanchao, et al. Comprehensive testing research on floor damage characteristics of mining extra-thick seam in Jungar Coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 263-269.
- [25] ZHANG P S, OU Y C, LIU C, et al. Stability of a roadway below a coal seam under dynamic pressure: A case study of the 11123 floor gas drainage roadway of a mine in Huainan, China[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8478043.
- [26] 孙斌杨, 袁亮, 张平松, 等. 巨厚砾岩下采场覆岩运移与离层演化的光-电感知试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2024, 53(5): 977-992.  
SUN Binyang, YUAN Liang, ZHANG Pingsong, et al. Study on the optic-electric perception experiment of overburden movement and separation evolution in the mining area under super-thick conglomerates[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2024, 53(5): 977-992.
- [27] ZHANG D, WANG J C, ZHANG P S, et al. Internal strain monitoring for coal mining similarity model based on distributed fiber optical sensing[J]. *Measurement*, 2016, 97: 234-241.
- [28] 程刚, 王振雪, 施斌, 等. 采动覆岩变形多场光纤神经感知与安全保障体系构建研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(11): 104-118.  
CHENG Gang, WANG Zhenxue, SHI Bin, et al. Research on multi-field fiber optic neural sensing and safety guarantee system constructing for mining overburden deformation[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(11): 104-118.
- [29] 刘盛东, 刘静, 戚俊, 等. 矿井并行电法技术体系与新进展[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2336-2345.  
LIU Shengdong, LIU Jing, QI Jun, et al. Applied technologies and new advances of parallel electrical method in mining geophysics[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2336-2345.
- [30] WU R X, HU Z A, HU X W. Principle of using borehole electrode current method to monitor the overburden stratum failure after coal seam mining and its application[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, 179: 104111.
- [31] 吴荣新, 吴茂林, 曹建富, 等. 厚松散层薄基岩坚硬顶板工作面覆岩破坏电法监测[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(1): 239-245.  
WU Rongxin, WU Maolin, CAO Jianfu, et al. Electrical monitoring of overburden failure in hard roof working face with thick loose layer and thin bedrock[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(1): 239-245.
- [32] 鲁晶津. 工作面采动破坏过程电阻率动态响应特征研究[J]. *工矿自动化*, 2023, 49(1): 36-45.  
LU Jingjin. Study on dynamic response characteristics of resistivity in mining failure process of working face[J]. *Journal of Mine Automation*, 2023, 49

- (1):36-45.
- [33] 中华人民共和国建设部. 工程岩体试验方法标准: GB/T50266—99[S]. 北京:中国计划出版社,1999:1-62.  
Ministry of Construction of the PRC. Standard for tests method of engineering rock massas: GB/T50266—99 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999:1-62.
- [34] 刘刚,鲜杰,臧冬冬. 岩土工程模型试验监测技术研究、应用与方向[J]. 中国矿业大学学报,2022,51(6):1069-1085.  
LIU Gang, XIAN Jie, ZANG Dongdong, et al. The concept, model and reserve forecast of green coal resources in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(6): 1069-1085.
- [35] SHI B, ZHANG D, ZHU H H, et al. DFOS Applications to geo-engineering monitoring [J]. Photonic Sensors, 2021, 11(2): 158-186.
- [36] 刘盛东,吴荣新,张平松,等. 三维并行电法勘探技术与矿井水害探查[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 927-932.  
LIU Shengdong, WU Rongxin, ZHANG Pingsong, et al. Three-dimensional parallel electric surveying and its applications water disaster exploration in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 927-932.
- [37] LI Y Y, CUI H Q, ZHANG P, et al. Three-dimensional visualization and quantitative characterization of coal fracture dynamic evolution under uniaxial and triaxial compression based on mu CT scanning [J]. Fuel, 2020, 262: 116568.
- [38] HUANG Y H, YANG S Q, TIAN W L. Crack coalescence behavior of sandstone specimen containing two pre-existing flaws under different confining pressures[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 99: 118-130.

(责任编辑 沈菊全 腾)

(上接第160页)

- [29] 邹雨. 宁武-静乐盆地中生代沉积-构造演化及其后期改造研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.  
ZOU Yu. Mesozoic sedimentary-tectonic evolution and its late reformation in Ningwu-Jingle Basin[D]. Taiyuan: Taiyuan University of technology, 2014.
- [30] 李勇,徐立富,张守仁,等. 深煤层含气系统差异及开发对策[J]. 煤炭学报,2023,48(2):900-917.  
LI Yong, XU Lifu, ZHANG Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 900-917.
- [31] 贾承造,庞雄奇,宋岩. 论非常规油气成藏机理: 油气自封闭作用与分子间作用力[J]. 石油勘探与开发,2021,48(3):437-451.  
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. The mechanism of unconventional hydrocarbon formation: Hydrocarbon self-containment and intermolecular forces [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 437-451.
- [32] 秦勇. 中国深部煤层气地质研究进展[J]. 石油学报,2023,44(11):1791-1811.  
QIN Yong. Progress on geological research of deep coalbed methane in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1791-1811.
- [33] 徐凤银,聂志宏,孙伟. 大宁-吉县区块深部煤层气高效开发理论技术体系[J/OL]. 煤炭学报,1-17(2023-11-22)[2024-09-24]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1290>.  
XU Fengyin, NIE Zhihong, SUN Wei. Theoretical and technological system for highly efficient development of deep coalbed methane in Daning-Jixian Block [J/OL]. Journal of China Coal Society, 1-17(2023-11-22)[2024-09-24]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1290>.

(责任编辑 沈春妮 全 腾)