

煤系典型岩石受载全过程光电声波多参数响应特征

张平松 刘畅

引用本文:

张平松, 刘畅. 煤系典型岩石受载全过程光电声波多参数响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(1): 204–214.

ZHANG Pingsong, LIU Chang. Optical-electrical-acoustic wave multiparameter response characteristics of typical rocks in coal-bearing strata throughout the loading process[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(1): 204–214.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.06.0378>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

加载速率影响下类硬岩声发射及破裂响应特征

Acoustic emission characteristics and fracture response behavior of hard rock-like material under influence of loading rate
煤田地质与勘探. 2022, 50(2): 115–124 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.08.0418>

深部煤层采动破坏电位响应特征与分布规律

Characteristics and distribution laws of electric potential response to mining failure of deep coal seam
煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 241–248 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.026>

损伤岩石声发射演化特征及响应机制试验研究

Experimental study on acoustic emission evolution characteristics and response mechanism of damaged rocks
煤田地质与勘探. 2024, 52(3): 96–106 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.09.0548>

煤系铝土矿中铀与钍富集特征及其自然伽马异常响应

Uranium and thorium enrichment characteristics of bauxite in coal measure strata and their natural gamma-ray responses
煤田地质与勘探. 2024, 52(3): 64–78 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.05.0277>

准格尔煤田特厚煤层开采底板破坏特征综合测试研究

Comprehensive testing research on floor damage characteristics of mining extra-thick seam in Jungar Coalfield
煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 263–269 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.029>

基于BOTDR的区段煤柱水平变形监测

BOTDR-based horizontal deformation monitoring of section coal pillars
煤田地质与勘探. 2024, 52(5): 46–55 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.10.0649>



移动阅读

张平松, 刘畅. 煤系典型岩石受载全过程光-电-声波多参数响应特征[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(1): 204–214. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.06.0378

ZHANG Pingsong, LIU Chang. Optical-electrical-acoustic wave multiparameter response characteristics of typical rocks in coal-bearing strata throughout the loading process[J]. Coal Geology & Exploration, 2025, 53(1): 204–214. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.06.0378

煤系典型岩石受载全过程光-电-声波多参数响应特征

张平松^{1,2}, 刘 畅²

(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: 【目的】岩石在载荷作用下的变形与断裂会引起潜在参数信息的变化, 通过参数的动态捕捉可表征裂隙生成、扩展、闭合过程, 是一种岩石健康评价的重要方法。【方法】基于搭建的多参数测试系统, 开展单轴加载条件下岩石试件的分布式光纤应变、电极电流、纵波波速的同步采集, 进一步构建强度-参数特征关系图谱以及参数层析成像结果, 精细描述了砂岩、灰岩、泥岩 3 类典型岩石受载全过程多参数的时空演化特征。【结果和结论】试验结果表明: 时间-压力曲线和多参数响应曲线具有较好的一致性, 螺旋布设的分布式光纤应变在试件的原生孔隙压缩和线弹性阶段表现为缓慢、稳定的增长, 在裂隙生成、扩展阶段表现为突然、快速的增长。试验中, 砂岩、灰岩、泥岩的临破裂分布式光纤应变值分别为 933×10^{-6} , 401×10^{-6} 和 3790×10^{-6} ; 电极电流在原生孔隙压缩和线弹性阶段变化微小, 在裂隙生成、扩展阶段明显地降低、裂隙闭合时有一定回升; 在原生孔隙压缩、线弹性、破裂阶段, 砂岩的纵波波速分别为 4.31、4.39、1.26 km/s, 灰岩的纵波波速分别为 4.80、4.93、3.10 km/s, 泥岩的纵波波速分别为 3.65、3.57、1.71 km/s。通过获得的岩石受载全过程能量值, 构建了损伤变量 D 来评价岩石试件的损伤演化程度, 砂岩的 D 值经历了缓增-降低-突增 3 个阶段, 灰岩的 D 值经历了缓慢增大-快增-停滞-突增 4 个阶段, 泥岩的 D 值经历了缓慢增大-快增-突增 3 个阶段。基于分布式光纤应变测试结果, 探究了不同岩性岩石试件的破裂模式, 为载荷下次生裂隙生成、扩展以及潜在破裂面位置预测提供支持。

关 键 词: 岩石受载; 响应特征; 分布式光纤; 并行电法; 数字超声波; 含煤地层

中图分类号: TD311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2025)01-0204-11

Optical-electrical-acoustic wave multiparameter response characteristics of typical rocks in coal-bearing strata throughout the loading process

ZHANG Pingsong^{1,2}, LIU Chang²

(1. State Key Laboratory for Safe Mining of Deep Coal Resources and Environment Protection, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Earth and Environment, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: [Objective] The deformations and rupture of rocks under loading will cause potential changes in parameters. Dynamic parameter capture assists in characterizing the generation, propagation, and closure processes of fractures, serving as a significant method for assessing rock quality. [Methods] Using a multiparameter test system, this study synchronously acquired strain measured using distributed optic fibers, electrode current, and compressional wave (P-wave) velocities of rock specimens under uniaxial loading. Accordingly, this study determined strength vs. parameter characteristic relationship graphs and parametric tomography results, finely describing the multiparameter spatiotemporal evolu-

收稿日期: 2024-06-08; 接收日期: 2024-12-06

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(2024ZD1004106); 安徽理工大学高层次引进人才科研启动基金项目(2024yjrc78)

第一作者: 张平松, 1971 年生, 男, 安徽六安人, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: pszhang@sohu.com

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

tional characteristics of three typical rocks (i.e., sandstone, limestone, and mudstone) throughout the loading process.

[Results and Conclusions] The test results indicate that the time vs. pressure curves were highly consistent with the multiparameter response curves. For the rock specimens, the strain measured using spirally distributed optic fibers exhibited a slow, stable growth in the compression and linear elasticity stages of primary pores but a sudden, rapid growth in the fracture generation and propagation stages. During the tests, the strain measured using distributed optic fibers for sandstone, limestone, and mudstone under critical fracturing were 933×10^{-6} , 401×10^{-6} , and 3790×10^{-6} , respectively. The electrode current changed minimally in the compression and linear elasticity stages of primary pores, decreased significantly in the fracture generation and propagation stages, and rebounded during fracture closure. In the compression, linear elasticity, and failure stages of primary pores, the P-wave velocities of the sandstone specimen were 4.31 km/s, 4.39 km/s, and 1.26 km/s, respectively; those of the limestone specimen were 4.80 km/s, 4.93 km/s, and 3.10 km/s, respectively, and those of the mudstone specimen were 3.65 km/s, 3.57 km/s, and 1.71 km/s, respectively. Based on the energy values of the rock specimens throughout the loading process, this study constructed damage variable D to assess the degrees of damage evolution of the rock specimens. Specifically, the D values of the sandstone specimen experienced gradual increase, decrease, and sudden increase stages; those of the limestone specimen underwent slow increase, rapid increase, stagnation, and sudden increase stages, and those of the mudstone specimen experienced slow increase, rapid increase, and sudden increase stages. This study explored the failure modes of different rock specimens based on the test results of the strain measured using distributed optic fibers. The results of this study will assist in predicting the generation and propagation of secondary fractures, as well as the positions of potential rupture planes, under loading.

Keywords: rock loading; response characteristic; distributed fiber optic; concurrently electrical method; digital ultrasound; coal-bearing strata

煤炭作为兜底能源在未来国家能源结构中仍将占有重要位置,但随着开采深度的增加,灾源增多,需解决的地质问题变得复杂^[1-5]。受载岩石的变形破坏过程,携带了声、光、热、电、磁等多种信息,有效获取受载全程的多参数响应特征,构建地质体受载过程与地质地球物理多参数间相关关系,对地球物理信息数据精细解释、岩体工程稳定性评价、岩石的致灾机理认识等具有重要的理论和实践意义。

在室内岩石力学实验中,测定岩石试件的强度和变形能力是最常用的方法之一^[6],传统的应变测试以电阻应变片、引伸计、压板法等为主,近年来光纤感知越来越多地出现在岩石变形测试中。Sun Yankun 等^[7]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,加强了理论研究和应用的实验基础。Liu Chang 等^[8]提出了光纤光栅的岩石试件多倾角布设方式,测试得到了岩石试件受载破裂过程中不同倾角的光纤光栅应变响应情况,与 3D DIC 测试结果一致。Lin Shaoqun 等^[9]使用光频域反射(optical frequency domain reflectometry, OFDR)技术开展单轴加载下岩样表面的应变测试,分析了分布式光纤测试结果和应变计测试结果差异的原因是变形较大的位置处于试件中间,实验方法对检测岩样潜在的破坏位置和顺序有一定帮助。除了变形量测试外,电性、磁性、声波、温度、光学等参数,同样记录了岩石的变形破坏过程。杨彩^[10]研究了受载煤岩的自然电位响应特征,结果表明在应力峰值点附近煤岩的自然电位表现为突然的上升或下降。Wang Tianzuo 等^[11]对砂岩等幅循环加卸载过程电阻率

等特性参数测试进行了实验研究,其中岩样电阻率的变化表现为加载阶段电阻率下降,卸载阶段电阻率回弹。K. Dudzisz 等^[12]通过测试磁参数来表征循环加卸载下岩石的机械疲劳程度,认为真空加载后磁化率的微弱变化可能是由岩石表面形成的晶内微裂纹引起的。孟召平等^[13]采用沁水盆地某矿石炭-二叠系太原组 8 号煤层样品,开展不同围压下煤样的全应力-应变-渗透性-声发射测试,根据各参数响应特征将煤的变形破坏过程分为孔隙压缩与弹性阶段、塑形变形阶段和破坏阶段。陈国庆等^[14]结合红外辐射法和声发射等测试方法开展了红砂岩试样的真三轴加载试验,研究表明岩石破裂前存在 4 类前兆信息,依次为热红外温度前兆、声发射前兆、热像异常前兆及岩石宏观裂纹前兆,热像异常能指示岩石未来潜在的破裂区域。上述方法的应用,极大促进了岩石动力灾害演化机理研究,为各类岩石动力灾害危险精准评价提供了实验和理论基础。然而,随着浅部煤炭资源的不断采掘,开采深度逐渐增大,岩石动力灾害的耦合演化过程愈发复杂^[15-17],单一参数的监测与分析难以满足需求,受载岩石多参数同步测试可为地质条件评价与判识提供支撑,但由于技术缺陷,相关研究存在一定的不足。

基于安徽淮南潘谢矿区深部 A 组煤层的围岩条件,采集典型的灰岩、泥岩和砂岩样品,研究岩石单轴加载过程的应变、电性参数和纵波波速联合响应特征,可为受载岩石多参数、高精度测试,以及地质地球物理灾害条件测试分析提供数据参考。

1 测试原理与方法

1.1 OFDR 光纤测试原理

光纤中的散射光包括瑞利散射光、拉曼散射光和布里渊散射光^[18]。基于瑞利散射光的分布式光纤解调技术,具有空间分布率高、精度要求高的应变和温度测试,可将其分为光频域反射(OFDR)和光时域反射(OTDR),OFDR 具有更高的空间分辨率和信噪比^[19]。OFDR 技术通过耦合器将线性扫描光源发出的光分为两路^[20-21],分别为参考光和探测光,探测光在传播过程中产生瑞利散射信号,经过反射的参考光和瑞利信号在通过耦合器时发生拍频干涉,解调出探测光的瑞利信号,信号频率用于光纤各点定位。当光纤内部某点的应变或温度发生变化时,测量到的传输损耗量与这个扰动之间存在对应关系,可通过下式^[22]计算得到光纤的应变量及其沿长度方向的分布情况。

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

本次试验所用的 OFDR 解调仪可以在传感长度 50 m 范围内实现 1.0 mm 空间分布率和 $\pm 1.0 \times 10^{-6}$ 的测试,满足岩样受载变形破坏过程的精细化测试,获取岩样受载过程应变变化特性。

1.2 并行电法测试原理

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^[23],采集的电场包括自然场、一次场和二次场 3 种,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 ABM 法。由于采集时间间隔要尽可能地短,本文采用 AM 法进行参数采集,电极 N 和电极 B 独立设置,测线上 n 个电极依次取作为供电正极 A、建立单点电源场的工作资格,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。所以,在由 n 个电极构成的测线上,采集到 n 个电极电流和 n(n-1) 个电极电位数据,分析岩石受载过程电性变化响应。

1.3 纵波波速测试原理

超声波在岩石内部传播时受到内部裂隙和节理的影响,岩石在不同加载条件下,内部间隙会发生变化,从而导致波速变化^[24]。受载荷后微裂隙的生成、演化是改变岩石声学特性的重要因素。波速测试利用脉冲收发器和探头发送和接收声波,并通过示波器观察波形和时间参数。在波速测试中,需要在试件的左右两侧均匀涂上耦合剂,将声波发送和接收探头分别放置在试件的左右两侧,并控制发送声波。通过测量声波穿过岩样所

需的时间,并测得试件的长度,可以确定试件的波速,分析岩石受载过程结构变化特性。

$$v = l \times \Delta f \times 10^{-6} \quad (3)$$

2 岩石单轴压缩试验过程

2.1 试样来源与制备

岩心取自安徽淮南潘谢矿区某钻孔,试验所用砂岩样(S1)取自 A 组煤层顶板,灰岩样(L1)和泥岩样(M1)取自 A 组煤层底板。利用岩石取心机、切割机和打磨机对现场所取的岩心进行标准件加工。遵循 GB/T 50266—99《工程岩体试验方法标准》(ISRM)^[25] 加工为直径 50 mm、长度 100 mm 的圆柱体试样,误差小于 ± 0.5 mm,端面平行度小于 ± 0.02 mm。试件均为常态含水条件下开展,其中砂岩、泥岩、灰岩的含水率分别为 0.114%、0.152%、1.262%。岩石试件的基本参数见表 1。

表 1 岩石试件基本参数信息
Table 1 Fundamental parameters of rock specimens

试件编号	岩性	直径/mm	高度/mm	质量/g	密度/(g cm ⁻³)
S1	砂岩	50.13	100.48	535.40	2.71
L1	灰岩	50.12	100.40	520.50	2.63
M1	泥岩	50.50	100.38	518.20	2.58

2.2 测试系统

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 3 部分组成,如图 1a 所示。控制模块包含计算机控制端,加载模块为国际通用标准的岩石力学压力机 MTS 816^[26],数据采集模块包括 OFDR 解调仪、并行电法仪、WSD-4 数字声波仪,以及 0.9 mm 光纤、跳线、电极片、电法线缆、换能器和数据线。OFDR 解调仪设置空间分辨率 2 mm,采样间隔 2 s;并行电法仪采用 AM 采集法,供电电压为 96 V,采样间隔 0.1 s;WSD-4 声波仪设置采样间隔 1 s。试验受载方式为单轴持续加载,加载速率为 1.0×10^{-6} m/s,加载时试验机进行压力和位移数据同步采集。试件表面螺线缠绕光纤,采用环氧树脂胶黏贴在试件表面,电法电极和换能器通过辅助装置与试件接触,换能器和试件之间均匀涂抹凡士林确保耦合条件。分布式光纤缠绕方式和电极阵列的空间分布如图 1b 所示。应变为光纤-试件协调变形感知到的形变量,电流是各电极所在试件表面处的电流;波速是试件中部截面的纵波波速值。

2.3 试验过程

将岩石试件连同辅助测试装置布设于承载台上,分别连接跳线、电法线缆和换能器数据线等装备。系统检测后启动试验机,试件加载约 1 kN 的接触力,进行采

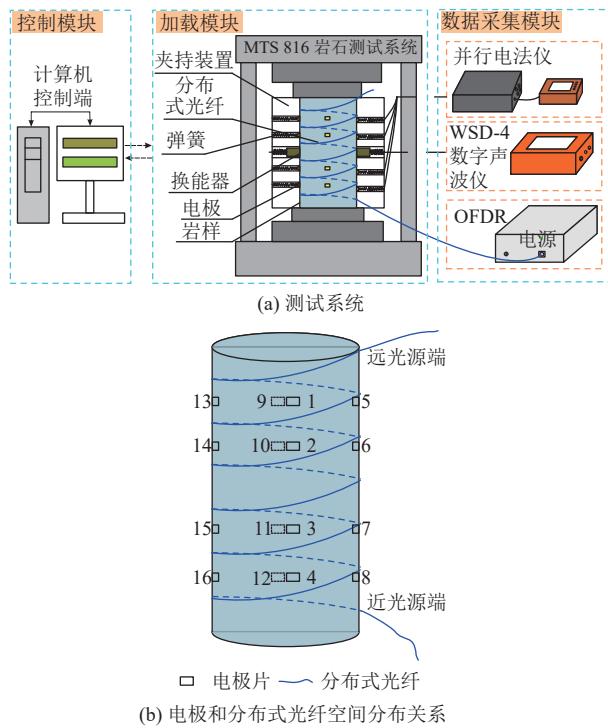


图1 岩石试件多参数测试系统组成及传感器分布
Fig.1 Composition and sensor distribution of the multiparameter test system for rock specimens

集数据, 背景值采集完成后开始单轴加载。加载过程中记录试验信息, 同时拍照记录试件形态。待试件完全破裂后, 试验件触发保护自动停止, 升起压头, 持续采集数据1 min后停止, 获得受载全过程多参数信息。

3 试验结果与分析

3.1 典型岩石受载全过程多参数响应特征

图2a、图2d、图2g为砂岩试件S1单轴加载全程的分布式光纤应变、激励电流和纵波波速的响应情况。分析可知, 砂岩试件的应变响应过程总体可分为缓慢增长、匀速增长和快速变化3个阶段, 分别为R1、R2、R3三个阶段。R1段(0~480 s), 光纤应变值从0至 184×10^{-6} 缓慢增长, 电极电流值轻微升高, 升高幅值在1.2~3.0 mA, 纵波波速在4.32~4.42 km/s之间波动, 平均值为4.35 km/s。R2段(480~788 s), 光纤应变值增速有一定提升, 多数监测点的应变值未超过 688×10^{-6} , 纤长4.286 m处的应变值在该阶段后期增长了 1073×10^{-6} , 分析为局部微裂隙生成所致, 电极电流值、纵波波速保持稳定, 纵波波速平均值为4.38 km/s。R3段(788~978 s), 光纤应变值明显增大, 砂岩试件中上部应变监测点增幅尤为显著, 多数监测点应变值大于 900×10^{-6} , 完全破裂时最大应变值为 12939×10^{-6} , 电极电流值先是缓慢降低, 降低幅值在0.1~0.3 mA, 试件完全破裂时电流值呈“断崖式”跌落至1 mA附近, 纵波波速同样骤降至1.26 km/s附近, 该阶段纵波波速平均值为2.45 km/s。

与致密砂岩不同, 灰岩内部节理和裂隙较为发育, 致使其在单轴加载过程中容易产生裂隙的生成和扩展, 这点从其压力曲线也可以得到验证。图2b、图2e、图2h为灰岩试件L1单轴加载全程的分布式光纤应变、激励电流和纵波波速的响应情况。分析可知, 灰岩试件的应变响应过程总体可分为缓慢增长、连续快速增长和持续增长3个阶段, 分别对应U1—U3三个阶段。U1段(0~522 s), 光纤应变值从0至 364×10^{-6} 缓慢增长, 电极电流值轻微降低, 降低幅值在0.1~0.3 mA, 纵波波速缓慢升高, 增值为0.13 km/s, 平均值为4.84 km/s。U2段(522~1 200 s), 该阶段试件不断发生局部破裂, 随着破裂的发生, 光纤应变值随之显著升高, 电极电流值在试件破裂发生时降低, 持续加载裂隙闭合, 电流值回升, 试件再次破裂, 电流再次降低, 至U2段结束时, 电流值降低幅值在0.8~1.6 mA, 纵波波速持续降低至3.10 km/s。U3段(1 200~1 252 s), 光纤应变值持续增大, 砂岩试件上部应变监测点增幅尤为显著, 多数监测点应变值大于 1200×10^{-6} , 完全破裂时最大应变值为 16716×10^{-6} , 电极电流值持续降低, 纵波波速同样骤降至2.85 km/s附近。

相比于砂岩和灰岩, 泥岩的强度相对较低, 具有较强的塑性变形能力, 在高应力作用下出现软化现象。单轴载荷下, 泥岩试件共加载了920 s, 在第811秒出现应力峰值, 为9.7 MPa。分析可知, 泥岩试件的应变响应过程总体可分为缓慢增长、持续增长和快速增长3个阶段, 分别对应图2c中的P1—P3三个阶段。同样地, 对于图2f、图2i, 泥岩试件的电流响应过程可分持续下降阶段、缓慢下降和快速下降阶段。P1段(0~258 s), 光纤应变随着加载逐步增大, 阶段结束时应变分布在(264~1 008) $\times 10^{-6}$ 区间, 电极电流随着压力的增大逐渐降低, 降低幅值为0.8~1.4 mA, 纵波波速出现轻微波动, P1段内平均值为3.63 km/s。P2段(258~512 s), 随着压力不断增大, 光纤应变持续增大, 增大后的应变分布在(800~3 340) $\times 10^{-6}$ 区间, 电极电流继续降低, 纵波波速由3.62 km/s降低至3.57 km/s。P3段(512~920 s), 该阶段泥岩试件不断发生局部破裂, 不同位置监测点应变值先后显著增大, 试件破坏时的应变峰值为 14315×10^{-6} , 不同空间的电极电流先后显著降低, 纵波波速同样骤降至1.71 km/s附近。

3.2 典型岩石受载全程能量演化特征

从能量角度看, 岩石材料在外载荷作用下的变形破坏是一个能量输入、积聚及耗散的动态演化过程, 在裂纹萌生、扩展甚至裂隙宏观扩展过程中均伴随着能量耗散, 硬岩材料的脆性破坏是能量突然、急剧释放导致的^[27]。因此, 研究岩石试件在变形破坏过程中的能量

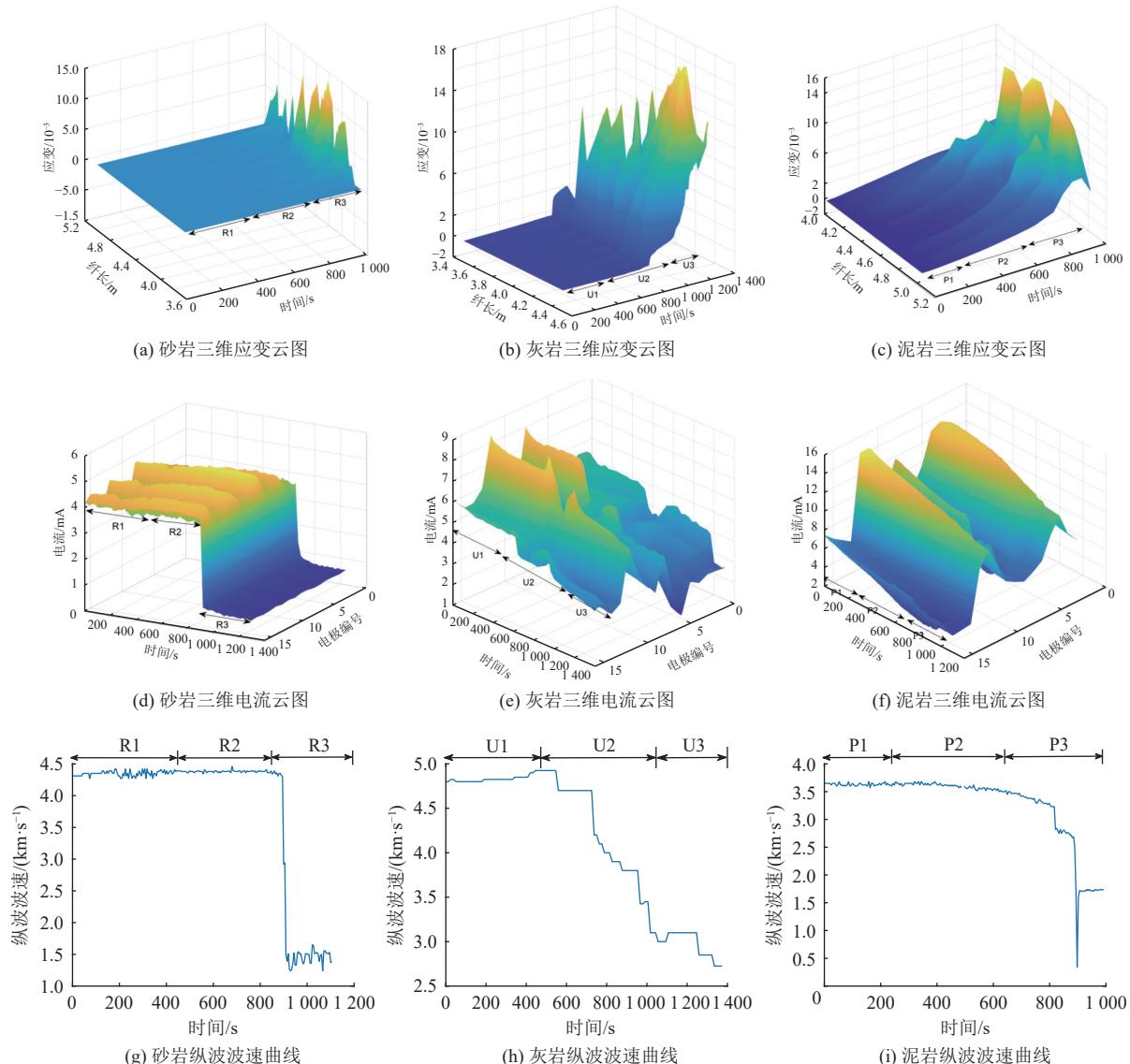


图 2 不同岩性试件加载全程各参数响应特征

Fig.2 Response characteristics of various parameters of specimens with different lithologies throughout the loading process

演化规律对揭示岩石损伤破坏机制至关重要^[28-30]。

假设岩石在外力输入机械能为 U , 吸收的能量一部分储存为弹性应变能 U_e , 其余能量则以耗散能 U_d 的形式释放^[31]。

$$U = U_e + U_d \quad (4)$$

在三轴应力状态下, 岩石试样的总能量、弹性应变能和耗散能在主应力空间可以表示为:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 + \int_0^{\varepsilon_2} \sigma_2 d\varepsilon_2 + \int_0^{\varepsilon_3} \sigma_3 d\varepsilon_3 \quad (5)$$

单轴加载时, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, 因此, 总输入能量和弹性应变能可分别表示为:

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 \quad (6)$$

$$U_e = \frac{1}{2E_i} [\sigma_1^2 + 2\sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_3)] \approx \frac{1}{2E_i}\sigma_1^2 \quad (7)$$

$$U_d = U - U_e \quad (8)$$

由式(5)—式(7)可获得岩石受载全程的能量演化特征曲线, 如图 3 所示。

现有研究表明, 能量转换与释放是岩石材料损伤的本质特征, 当达到岩石材料的抗压强度时, 岩石内部所储存的弹性应变能急剧释放, 最终导致岩石损伤甚至破坏^[32-34]。本文将岩石材料在加载破坏过程中的耗散能 U_d 与岩石破坏时的耗散能 U_{dm} 之比定义为损伤因子 q ^[31], 即

$$q = \frac{U_d}{U_{dm}} \quad (9)$$

基于能量耗散原理的岩石损伤变量 D 为:

$$D = \left(1 - \frac{\sigma_d}{\sigma_m}\right)q \quad (10)$$

残余强度以及破坏时的耗散能见表 2。

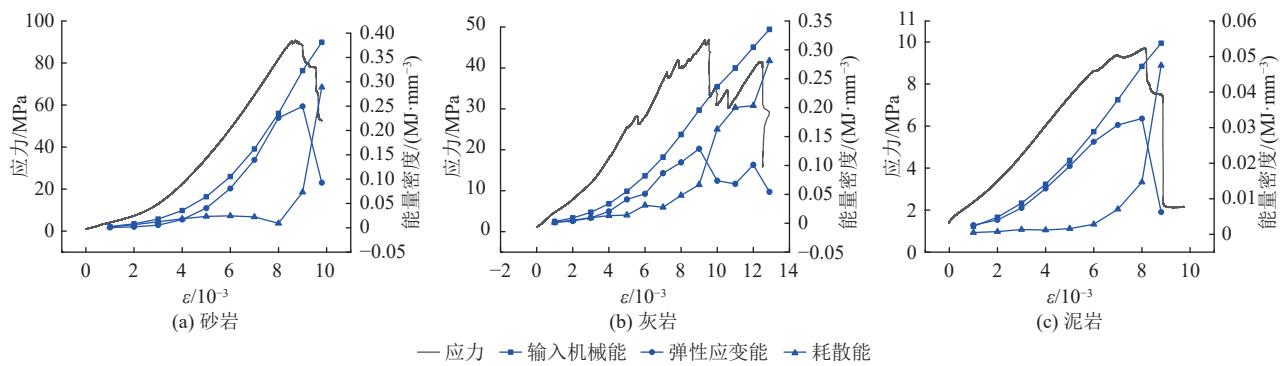


图3 3类典型岩石试件受载全程能量演化特征

Fig.3 Energy evolutionary characteristics of three typical rock specimens throughout the loading process

表2 典型岩性试件的 σ_d 、 σ_m 和 U_d Table 2 The σ_d , σ_m , and U_d values of typical rock specimens

岩性	σ_d /MPa	σ_m /MPa	U_d /(MJ·mm ⁻³)
砂岩	52.561	90.686	0.289
灰岩	16.407	46.918	0.281
泥岩	2.158	9.723	0.048

图4为3类典型岩石试件单轴加载全程的损伤演化特征曲线。砂岩的损伤变量 D 经历了3个明显的阶段:缓慢增加、降低、再突增。灰岩的损伤变量 D 分为4个阶段:缓慢增加、快速增加、停滞、再突增。泥岩的损伤变量 D 也分为3个阶段:缓慢增加、快速增加、再突增。砂岩、灰岩和泥岩在受载全程中的损伤演化规律各有特点,反映了不同岩性材料在加载过程中的力学

特性。砂岩表现出一个结构致密化的阶段,因此,其损伤变量在一段时间内有所降低;灰岩由于裂隙闭合经历了短暂的损伤停滞期;而泥岩则表现出较强的塑性变形能力,其损伤变量整体呈现快速增长和突增的趋势。其中,砂岩损伤演化曲线的下降现象并非损伤的实际减少,而是岩石在加载过程中的一种能量重分配现象。具体而言,损伤变量的下降主要发生在试件的压密和线弹性阶段。在这些阶段,岩石的原生裂隙被压缩和闭合,试件的整体结构趋于致密。这一过程中,尽管宏观上试件看似损伤减小,但实际上是由裂隙闭合使得储存的弹性应变能增大,损伤变量出现下降。这种现象通常被认为是试件结构的局部修复效应,即在外部加载下,裂隙的闭合使得损伤变量表现为暂时性的降低。

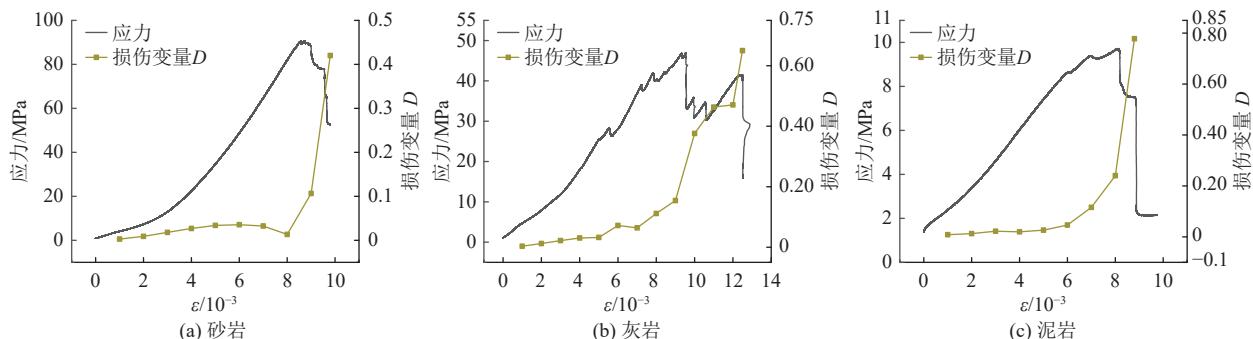


图4 3类典型岩石试件受载全程损伤演化规律

Fig.4 Evolutionary patterns of damage to three typical rock specimens throughout the loading process

图5为3种不同岩性岩石单轴加载全程的应力应变(MTS数据)、光纤应变、电极电流、纵波波速和损伤变量 D 的多参数对照结果。图5a为砂岩试件的测试结果, OB 段,随着压力持续增大,各参数均缓慢变化,岩石结构完整; BC 段为线弹性阶段结束($87.6\%\sigma_{max}$)至峰值点,光纤应变增大了27.6%,电极电流降低了1.2%,纵波波速降低了0.7%。临破裂时,光纤应变的变化剧烈。 CD 段为破坏阶段,对于破坏的感知,各参数均发生突变,光纤应变、电极电流和纵波波速的突变分别出现在884、886和880 s,差异的原因与采集频率和测试

部位有关,纵波波速测试直接感知试件内部结构,光纤同时感知内部和表面,电极则只感知试件表面,在采集频率相似的前提下,纵波波速优先感知到内部裂隙的形成,同时也证明该砂岩试件的破裂是从内部裂隙积聚开始。砂岩试件的损伤变量 D ,在线弹性阶段结束时,由于试件被压缩致密,损伤变量 D 出现一定程度的降低,参照图4a可知,损伤变量 D 降低时,弹性应变能占比输入总能量的95.7%,这表明了砂岩具有更好的储能效果。

图5b为灰岩试件的测试结果, OB 段,各参数均缓

慢变化, BC 段为破裂密集发生阶段, 加载至 555 s, 试件—压力曲线出现首个“拐点”时, 此时, 损伤变量 D 有较明显升高, 电极电流降低了 29.8%, 纵波波速降低了 4%, 电极电流先于纵波波速变化, 表明该处局部破裂主要出现在试件表面, 光纤无明显变化, 原因是裂纹并未经过任一应变监测点。峰值点前, 灰岩试件经历破裂—压密的多次循环, 光纤应变值显著增大, 电极电流在裂隙闭合时出现一定程度的回升, 如加载 750 s 至 894 s 期间, 电极电流回升 10%, 纵波波速持续降低。 BC 段, 峰值点后, 损伤变量 D 增大了 59%, 光纤应变降低了 38.9%, 表明试件出现能量释放, 同时电极电流降低 28.5%, 纵波波速降低 10.9%。

图 5c 为泥岩的测试结果, OB 段, 各参数均缓慢变化。 BC 段, 高应力作用下的泥岩软化, 该段内光纤应变从 546×10^{-6} 快速增长至 9847×10^{-6} , 电极电流从 9.8 mA 下降到 7.9 mA, 降低了 19.4%, 纵波波速呈现“抛物线”状下降, 从 3.60 km/s 下降到 3.23 km/s, 降幅 10.30%。 CD 段为破坏阶段, 试件破裂, 能量释放, 光纤应变出现一定回弹, 电极电流和纵波波速均“断崖式”下降, 损伤变量 D 突增。各阶段的参数响应幅值详见表 3。

4 基于测试参数的岩石试件破裂模式初探

在受载岩石试件分析中, 三维可视化表达可以帮助更好地理解这些参数如何影响试件的力学行为和响应, 这种方法可以帮助评估试件的稳定性、强度和耐久性等特性, 并为灾害预测提供有效支持。根据实测数据, 基于 Matlab 软件构建试件 S1、L1、M1 应变数据可视化结果, 如图 6—图 8 所示。图 6a、图 7a 和图 8a 为分布式光纤应变监测点空间分布情况。对于砂岩试件, 主破裂面位于试件中部, 破裂角约 30°。由图 6b—图 6d 可知, 加载前期应变均匀增长。加载至 780 s, 试件下部

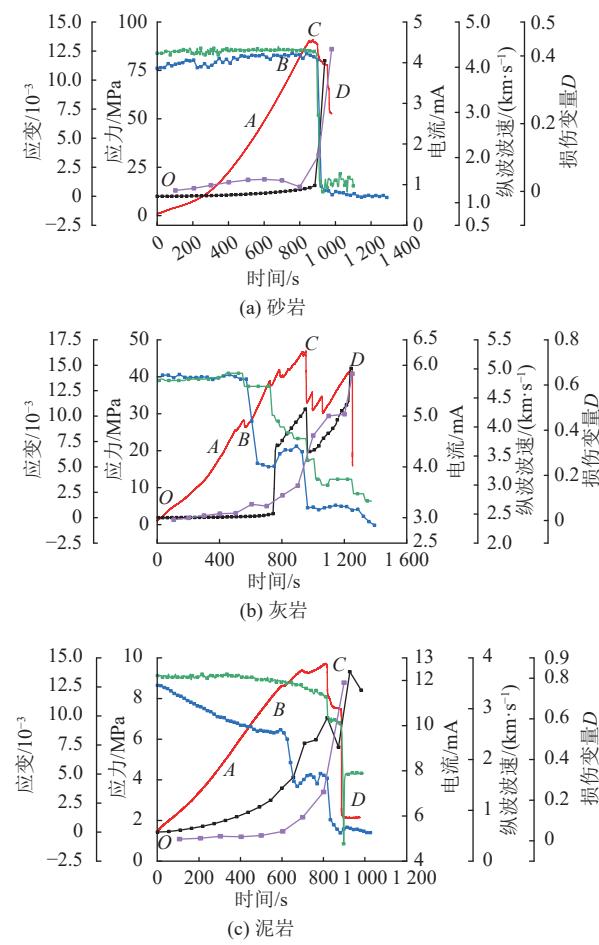


Fig. 5 3 类典型岩石受载全程多参数联合响应特征

Fig.5 Multiparameter joint response characteristics of three typical rock specimens throughout the loading process

出现“叶片状”高应变区(图 6e), 以拉应变为主, 分析为载荷作用下产生局部裂隙, 试件径向膨胀所致。随着持续加载, 高应变区向试件上部扩张, 同时拉应变值进一步增大, 如图 6f 所示, 分析为裂隙扩展所致。峰值点后, 试件表面出现拉压应变分区, 主破裂面形成, 砂岩晶粒错动, 试件完全破坏。

表 3 各类岩石试件阶段性参数变化幅值统计

Table 3 Statistics of phased changes in the amplitude of parameters of various rock specimens

拐点	S1(砂岩)				L1(灰岩)				M1(泥岩)			
	光纤应变/ 10^{-6}	电极电流/mA	纵波波速/(km·s ⁻¹)	损伤变量D	光纤应变/ 10^{-6}	电极电流/mA	纵波波速/(km·s ⁻¹)	损伤变量D	光纤应变/ 10^{-6}	电极电流/mA	纵波波速/(km·s ⁻¹)	损伤变量D
O	0	3.86	4.31	0	0	5.80	4.80	0	0	11.78	3.65	0
A	197	4.16	4.38	0.03	55	5.72	4.83	0.03	1 002	10.40	3.65	0.02
B	427	4.19	4.39	0.01	114	5.72	4.93	0.03	3 790	9.74	3.57	0.05
C	933	4.18	4.22	0.11	16 676	3.20	3.80	0.15	9 847	7.88	3.23	0.24
D	11 664	0.96	1.26	0.42	14 701	3.15	3.10	0.65	13 797	5.50	1.71	0.78

对于 L1 试件, 图 7b—图 7d 为加载初期的三维应变分布, 试件上部出现较高应变, 分析为局部微裂隙产

生所致。随着压力持续加载, 高应变区扩张至整个试件上半部, 且应变值进一步增大, 局部裂隙进一步滋生, 试

件表面张裂。加载至 950 s, 峰值点附近, 试件的局部破裂进一步增多, 试件表面张裂破裂加剧, 如图 7f 所示。

图 7g 为试件完全破裂后的结果, 试件上端一角崩裂,

下部出现横向断裂, 中部以纵向裂隙为主, 较为密集(图 7h)。

对于 M1 试件, 加载开始时, 如图 8b 所示, 试件表

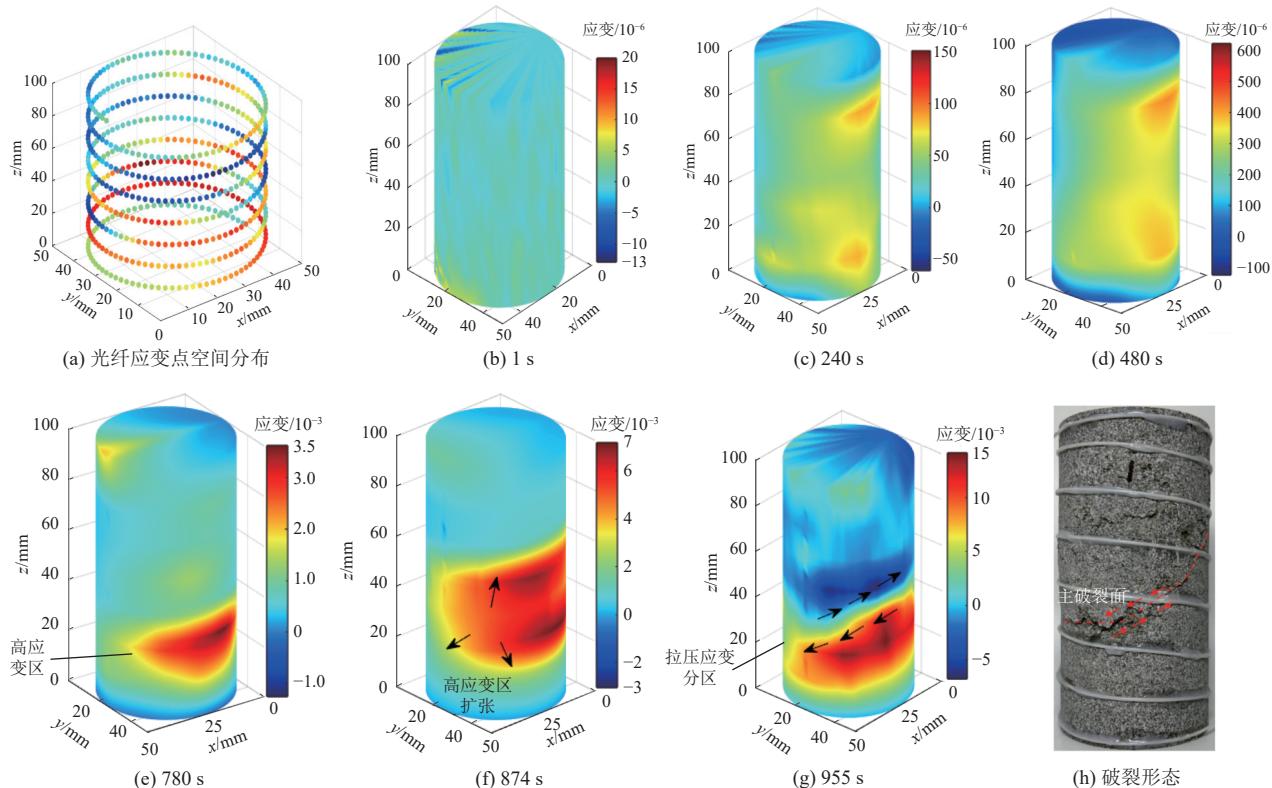


图 6 S1 试件应变参数的破裂模式分析

Fig.6 Failure mode characterization of sandstone specimen S1 based on strain parameters

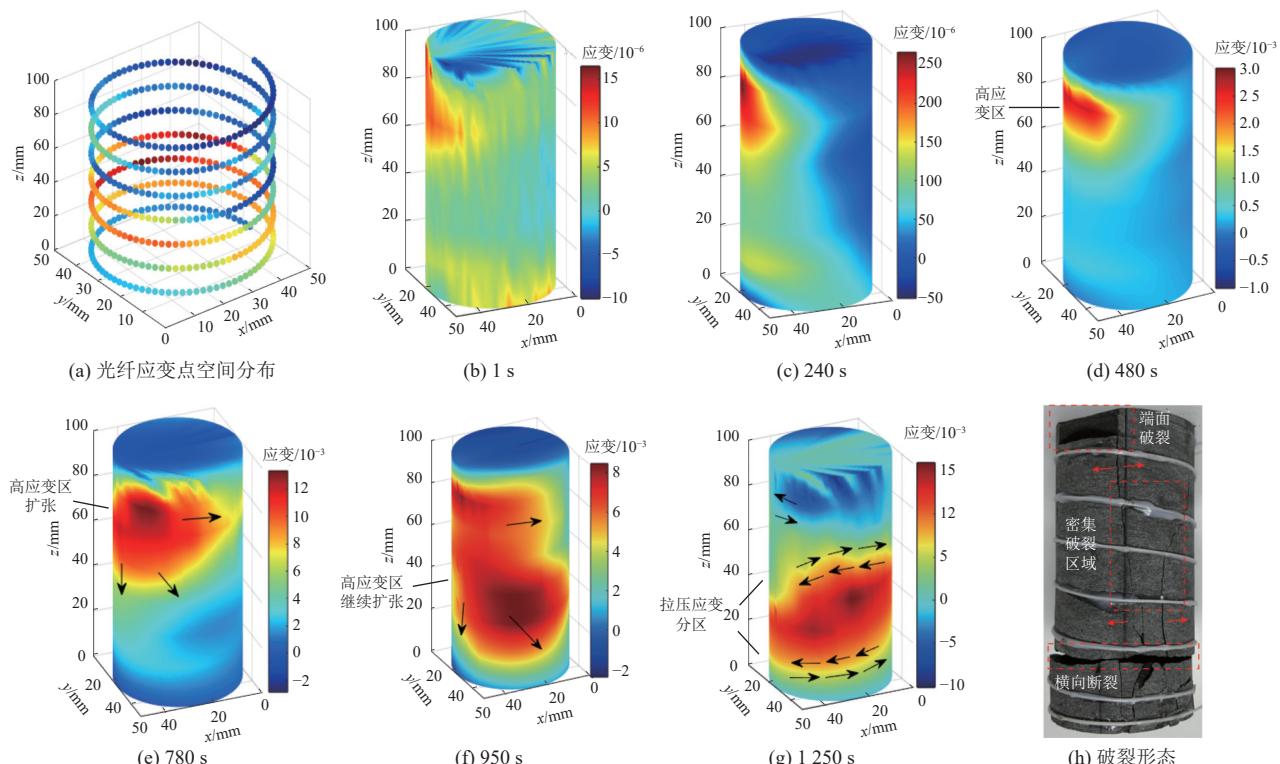


图 7 L1 试件应变参数的破裂模式表征

Fig.7 Failure mode characterization of limestone specimen L1 based on strain parameters

面的应变开始出现变化,平面图像不连续是由数据的剧烈变化导致的。随着压力持续加载,试件下部出现应变增高区(图 8c、图 8d)。进一步加载,试件下部应变增高区变为高应变集中区(图 8e)。加载至 800 s,高应变集

中区进一步扩张,局部裂隙密集产生,挤压作用形成压应变集中区,剪切作用形成拉压应变分区(潜在破裂面)。加载至 1 252 s,宏观破裂面形成,同时形成纵向的高应变“竖条带状”区域,为纵向裂隙生成所致。

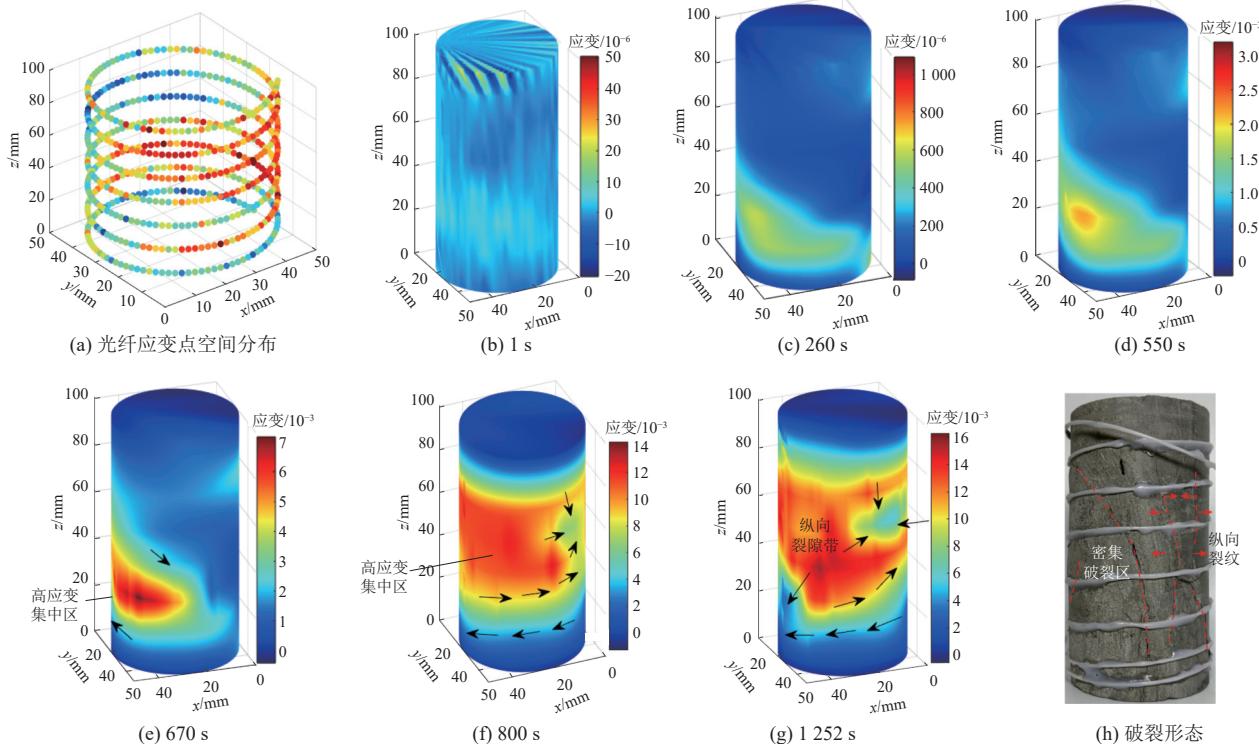


图 8 M1 试件应变参数的破裂模式表征

Fig.8 Failure mode characterization of mudstone specimen M1 based on strain parameters

总体而言,在裂隙生成的早期,光纤应变会缓慢增长,随着应力逐渐增加,试件内部的微裂隙开始在局部区域出现。这一过程伴随着应变的局部增加,通过三维应变云图,可以直观地观察到裂隙在不同阶段的扩展路径及其走向,尤其是在高应变区域,裂隙的扩展往往表现为径向膨胀或沿着试件的弱面扩展。在裂隙扩展的后期,光纤应变的增速明显加快,这时裂隙已经形成并开始贯通,岩石试件的应变数据会呈现出突增的趋势。在加载的后期,裂隙的扩展路径和裂缝的发展趋势在三维应变数据中表现得尤为明显,尤其是在破裂临界点时,主裂隙面形成,并伴随着明显的能量释放和试件的整体破坏。

5 结论

(1) 搭建了单轴加载条件下岩石试件多参数同步采集系统,对煤系 3 类典型岩石受载全程的分布式光纤应变、电极电流和纵波波速等同步采集,建立了特征参数图谱,实现了岩石试件变形破坏全程的多参数精细表征。

(2) 求解了岩石试件受载全程的输入机械能 U 、弹性应变能 U_e 和耗散能 U_d ,获得 3 类典型岩石试件受载

全程能量演化特征。构建了用岩石损伤变量 D 来评价其损伤演化过程,砂岩的 D 值经历了缓增-降低-突增 3 个阶段,破裂前后 D 值分别为 0.11、0.42;灰岩的 D 值经历了缓慢增大-快增-停滞-突增 4 个阶段,破裂前后 D 值分别为 0.47、0.65;泥岩的 D 值经历了缓慢增大-快增-突增 3 个阶段,破裂前后 D 值分别为 0.24、0.78。

(3) 基于应变参数探究了岩石试件的破裂模式。砂岩试件在加载前中期结构稳定,加载后期随着局部裂隙的出现形成高应变区,持续加载高应变区扩张,之后晶粒滑移,拉压应变分区形成,试件破坏;灰岩试件在加载前中期局部原生裂隙致使出现高应变区,持续加载局部裂隙频繁滋生,最终多处局部裂隙彼此贯通,试件破坏;泥岩试件出现高压力下软化现象,前中期应变较均匀增大,后期试件两端压力共同作用中部,促使试件中部径向胀裂,形成了以中部为主的多处纵向破裂。分布式光纤感知信息可为岩石受载过程次生裂隙生成、扩展以及潜在破裂面位置预测提供支持。

符号注释:

c 为光速常量, km/s; D_m 为岩石试件破坏后的损伤

变量; E_0 为砂岩试样的弹性模量, MPa; E_i 为砂岩试样在相应时刻的卸荷弹性模量, MPa; Δf 为声波频率, Hz; I_0 为初始电极电流, mA; 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; d 为试件直径, mm; L 为光纤原长, mm; ΔL 为光纤的变形量, mm; N 为光纤的折射率; t_{st} 为光纤变形后的延迟时间, s; t_{ref} 为光纤变形前的延迟时间, s; v_0 为初始纵波波速, km/s; v 为纵波波速, km/s; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为砂岩试样的最大主应力、中间主应力和最小主应力, MPa; σ_d 为岩石试件的残余强度, MPa; σ_m 为岩石试件的单轴抗压强度, MPa; μ 为砂岩试样的泊松比; ε 为光纤应变; ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为 3 个主应力方向上的应变; ε_l 为试件破裂前的最大光纤应变测量值。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 袁亮, 吴劲松, 杨科. 煤炭安全智能精准开采关键技术与应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 861–868.
YUAN Liang, WU Jinsong, YANG Ke. Key technology and its application of coal safety intelligent precision mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 861–868.
- [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] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716–725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716–725.
- [5] 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.
- [6] ZHANG Linfan, YANG Duoxing, CHEN Zhouhui, et al. Deformation and failure characteristics of sandstone under uniaxial compression using distributed fiber optic strain sensing[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12: 1046–1055.
- [7] SUN Yankun, LI Qi, YANG Duoxing, et al. Investigation of the dynamic strain responses of sandstone using multichannel fiber-optic sensor arrays[J]. Engineering Geology, 2016, 213: 1–10.
- [8] LIU Chang, YAO Duoxi, ZHANG Pingsong, et al. Deformation and damage characteristics of deep rock specimens based on 3D-DIC and FBG[J]. Lithosphere, 2022(10): 4329713.
- [9] LIN Shaoqun, TAN Duoyuan, YIN Jianhua, 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.
- [10] 杨彩. 煤岩体电性时频特征研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 60–89.
YANG Cai. Electrical time-frequency characteristics research of coal-rock mass[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 60–89.
- [11] WANG Tianzuo, WANG Chunli, XUE Fei, et al. Acoustic emission characteristics and energy evolution of red sandstone samples under cyclic loading and unloading[J]. Shock and Vibration, 2021(2): 1–15.
- [12] DUDZISZ K, WALTER M, KRUMHOLZ R, et al. Effect of cyclic loading at elevated temperatures on the magnetic susceptibility of a magnetite-bearing ore[J]. Geophysical Journal International, 2022, 228(2): 1346–1360.
- [13] 孟召平, 章朋, 田永东, 等. 围压下煤储层应力-应变、渗透性与声发射试验分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2544–2551.
MENG Zhaoping, ZHANG Peng, TIAN Yongdong, et al. Experimental analysis of stress-strain, permeability and acoustic emission of coal reservoir under different confining pressures[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2544–2551.
- [14] 陈国庆, 张岩, 李阳, 等. 岩石真三轴加载破坏的热-声前兆信息链初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1764–1776.
CHEN Guoqing, ZHANG Yan, LI Yang, et al. Thermal-acoustic precursor information chain of rock failure under true triaxial loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1764–1776.
- [15] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 726–746.
HE Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 726–746.
- [16] 高明忠, 王明耀, 谢晶, 等. 深部煤岩原位扰动力学行为研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2691–2703.
GAO Mingzhong, WANG Mingyao, XIE Jing, et al. In-situ disturbed mechanical behavior of deep coal rock[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2691–2703.
- [17] 谢和平, 高峰, 鞠杨, 等. 深地煤炭资源流态化开采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 547–556.
XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Theoretical and technological conception of the fluidization mining for deep coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 547–556.
- [18] SHI Bin, ZHANG Dan, ZHU Honghu, et al. DFOS applications to geo-engineering monitoring[J]. Photonic Sensors, 2021, 11(2): 158–186.
- [19] 程刚, 王振雪, 朱鸿鹄, 等. 基于分布式光纤感测的岩土体变形

- 监测研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 51–70.
- CHEUNG Gang, WANG Zhenxue, ZHU Honghu, et al. Research review of rock and soil deformation monitoring based on distributed fiber optic sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(19): 51–70.
- [20] 吴涵, 朱鸿鹄, 周谷宇, 等. 考虑变形协调的土体剪切位移分布式测试研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 716–724.
- WU Han, ZHU Honghu, ZHOU Guyu, et al. Experimental study on distributed monitoring of soil shear displacement considering deformation compatibility[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(4): 716–724.
- [21] WANG Lihan, REN Lingyun, WANG Xiangchuan, et al. Time-resolution enhanced multi-path OTD measurement using an adaptive filter based incoherent OFDR[J]. *Chinese Optics Letters*, 2024, 22(1): 158–163.
- [22] 付彩玲, 彭振威, 李朋飞, 等. OFDR 分布式光纤温度/应变/形状传感研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(11): 100–110.
- FU Cailing, PENG Zhenwei, LI Pengfei, et al. Research on distributed fiber temperature/strain/shape sensing based on OFDR[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(11): 100–110.
- [23] 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.
- [24] 王宇, 李晓, 胡瑞林, 等. 岩土超声波测试研究进展及应用综述[J]. 工程地质学报, 2015, 23(2): 287–300.
- WANG Yu, LI Xiao, HU Ruilin, et al. Review of research process and application of ultrasonic testing for rock and soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2015, 23(2): 287–300.
- [25] 中华人民共和国建设部. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—99[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 1–62.
- [26] 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.
- [27] 韦天下, 林加剑, 施国栋, 等. 三轴循环加载下玄武岩纤维混凝土能量跌落系数及演化特征[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(8): 2173–2181.
- WEI Tianxia, LIN Jiajian, SHI Guodong, et al. Energy drop coefficient and evolution characteristics of basalt fiber reinforced concrete under triaxial cyclic compression[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(8): 2173–2181.
- [28] 孟庆彬, 辛学奎, 宋子鸣, 等. 巷道开挖过程中围岩能量耗散特征[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(1): 142–150.
- MENG Qingbin, XIN Xuekui, SONG Ziming, et al. The energy dissipation characteristics of surrounding rock during roadway excavation[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2024, 41(1): 142–150.
- [29] 张培森, 许大强, 颜伟, 等. 应力–渗流耦合作用下不同卸荷路径对砂岩损伤特性及能量演化规律的影响研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 325–339.
- ZHANG Peisen, XU Daqiang, YAN Wei, et al. Influence of unloading paths on sandstone damage characteristics and energy evolution law under stress–seepage coupling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(2): 325–339.
- [30] 王二博, 王志丰, 王亚琼. 含裂隙岩石单轴压缩下力学性能及能量演化机制研究[J]. 高压物理学报, 2024, 38(1): 119–132.
- WANG Erbo, WANG Zhifeng, WANG Yaqiong. Mechanical properties and energy evolution characteristics of fracture-bearing rocks under uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(1): 119–132.
- [31] 党亚倩, 吴亚敏, 王团结, 等. 不同含水率下岩石材料的能量与损伤演化特征[J]. 高压物理学报, 2023, 37(3): 62–71.
- DANG Yaqian, WU Yamin, WANG Tuanjie, et al. Energy and damage evolution characteristics of rock material under different water contents[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(3): 62–71.
- [32] 赵光明, 刘之喜, 孟祥瑞, 等. 真三轴循环主应力作用下砂岩能量演化规律[J]. 岩土力学, 2023, 44(7): 1875–1890.
- ZHAO Guangming, LIU Zhixi, MENG Xiangrui, et al. Energy evolution of sandstone under true triaxial cyclic principal stress[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(7): 1875–1890.
- [33] LIU Chang, ZHANG Pingsong, OU Yuanchao, et al. Analytical stress analysis method of interbedded coal and rock floor over confined water: A study on mining failure depth[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2022, 204: 104720.
- [34] 张平松, 欧元超. 煤层采动底板突水物理模拟试验研究进展与展望[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 44–56.
- ZHANG Pingsong, OU Yuanchao. Physical simulation experiments on mining-induced water inrushes from coal seam floors: Advances in research and prospects[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(6): 44–56.

(责任编辑 聂爱兰)