

循环载荷作用下煤岩复合结构宏-细观破坏特征及能量-损伤本构模型

王凯^{1,2,3}, 左晓欢², 杜锋^{1,2}, 孙加智², 鞠杨⁴, 丰程涛²

(1. 中国矿业大学(北京) 共伴生能源精准开采北京市重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京) 研究生院, 北京 100083; 4. 中国矿业大学(北京) 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083)

摘要: 煤炭深部开采过程中, 周期性开采扰动行为会使邻近煤层的煤岩复合结构承受循环载荷的作用, 因此, 研究不同循环载荷作用下煤岩复合试样的力学响应行为及宏-细观失效特征具有重要工程意义。选取3种不同的加(卸)载速率, 开展了2种循环加卸载路径下的单轴循环压缩试验(同步测定声发射信号), 分析了煤岩复合试样的损伤失效特征; 基于能量耗散原理, 构建了煤岩复合试样在循环载荷作用下的能量-损伤本构模型, 最后结合试验实测数据进行验证。结果表明: 加(卸)载速率与复合试样的峰值强度呈正相关, 当加(卸)载速率从0.05 mm/min增大到0.15 mm/min时, 恒定下限逐步循环加卸载路径(路径I)、变上下限等幅循环加卸载路径(路径II)下, 试样的峰值应力分别增加了22.44%和28.89%; 高加(卸)载速率下, 试样的内部裂纹扩展越快, 煤岩复合试样中煤组分的破碎程度加剧, 分形维数随之增大, 试样的内部裂纹扩展越快; 随着加(卸)载速率的增大, 煤组分中沿基质破坏增多。循环分级跨度大的路径(路径I)有助于试样内部的应力传递, 为试样内部裂纹的发育提供了有利条件, 导致对应试样的破坏程度更高。试验曲线和能量-损伤本构理论曲线具有较强的一致性, 表明所建的能量-损伤本构模型能够很好地描述煤岩复合试样在循环加卸载过程中的变形行为。

关键词: 煤岩复合结构; 循环载荷作用; 加(卸)载速率; 宏-细观特征; 能量-损伤本构模型

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)02-0767-18

Macro-mesoscopic perspective damage characteristics and energy-damage constitutive model of coal-rock composite structures subjected to cyclic loading

WANG Kai^{1,2,3}, ZUO Xiaohuan², DU Feng^{1,2}, SUN Jiazhizhi², JU Yang⁴, FENG Chengtao²

(1. Beijing Key Laboratory for Precise Mining of Intergrown Energy and Resources, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing, 100083, China; 2. School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. Graduate School of China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 4. State Key Laboratory of Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: During deep coal mining processes, periodic mining disturbances cause the neighboring coal strata to bear the effects of cyclic loading and unloading, making it essential to study the mechanical responses and macro-micro failure characteristics of the coal-rock composite structures under different cyclic loads. In this study, three different loading rates

收稿日期: 2023-12-22 修回日期: 2024-02-05 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.ST23.1733

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52130409, 52374249); 国家自然科学基金创新群体资助项目(52121003)

作者简介: 王凯(1972—), 男, 河南遂平人, 教授, 博士生导师。E-mail: kaiwang@cumb.edu.cn

通讯作者: 杜锋(1992—), 男, 山西垣曲人, 副教授, 硕士生导师。E-mail: fengducumb@126.com

引用格式: 王凯, 左晓欢, 杜锋, 等. 循环载荷作用下煤岩复合结构宏-细观破坏特征及能量-损伤本构模型[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 767-784.

WANG Kai, ZUO Xiaohuan, DU Feng, et al. Macro-mesoscopic perspective damage characteristics and energy-damage constitutive model of coal-rock composite structures subjected to cyclic loading[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 767-784.



移动阅读

were selected to perform uniaxial cyclic compression tests (with simultaneous acoustic emission signal measurement) under two types of cyclic loads, investigating the damage characteristics of coal-rock composites. Based on the principle of energy dissipation, an energy-damage constitutive model for the cyclic loading of composites was constructed and validated with experimental data. The results indicate that the loading rate is directly proportional to the peak strength of the composite specimen, where the peak stress increased by 22.44% and 28.89% for the gradual cyclic loading and unloading path (path I) and the cyclic loading and unloading path (Path II) respectively. The higher the loading rate, the faster the internal crack extension in the specimen, the crushing degree of the coal component in the coal-rock composite specimen is intensified, and the fractal dimension increases subsequently, and the faster the internal crack extension in the specimen becomes. With the increase of the loading rate, the damage along the matrix in the coal fraction increases. The paths with a large span of cyclic gradation (Path I) contribute to stress transfer within the specimen and provide favorable conditions for the development of cracks within the specimen, leading to a higher degree of damage in the corresponding specimen. The consistency between the test curves and the energy-damage constitutive model curves is relatively high, indicating that the proposed energy-damage constitutive model can well describe the deformation behavior of the coal-rock composite specimens during cyclic loading and unloading processes.

Key words: coal-rock composite structure; cyclic loading action; loading rate; macro-mesoscopic characteristics; energy-damage constitutive model

煤炭深部开采过程中, 开采保护层、煤层群卸压开采、长壁开采、房柱式开采、条带开采等采煤方式下^[1-2], 煤层的重复采动会造成邻近煤层和围岩结构产生周期性的卸压及增压区, 从而导致其承受应力的反复加卸载作用^[3-4]。除了受到开采应力的影响外, 开采扰动、爆破作业、巷道掘进等工程扰动也会造成支承压力周期性的增减, 这种由于煤层开采扰动引起的支承压力运动可以动态地对工作面前方数米甚至数十米的煤层-围岩结构施加循环加卸载应力^[5]。较于常规的准静态载荷, 循环载荷更能反应实际工程中复杂多变的采动应力, 且煤岩结构在循环载荷作用下的损伤破坏行为也更加复杂。许多学者研究了循环应力下煤岩体的强度、变形行为、弹性模量变化以及内部裂纹的演变, 发现煤岩体的力学性质比常规加载条件下的力学性质更为复杂多变, 由于反复加卸载产生的不可逆变形, 会导致应力-应变曲线会表现出明显的滞后现象^[6-8]。在实际工程中, 煤层并非独立存在^[9], 煤层和围岩需要共同承担应力载荷, 煤岩互层间会存在应力传递, 从而导致有围岩作用的开采煤层力学行为与纯煤体存在很大差异。因此, 学者们提出了一种表示煤层-围岩结构的煤岩复合试样^[10]。在以往的研究中, 前人综合考虑了可能影响煤岩复合试样力学性质和变形特征的多种因素, 主要包括界面倾角^[11]、界面效应^[12-13]、煤岩高度比^[14]、煤岩强度比^[15]、围压作用^[16]、组合模式^[17]等, 但少有对循环载荷作用下煤岩复合试样的变形破坏规律的研究报道。基于能量耗散理论的本构方程是表征煤岩体变形失效行为的一种重要研究手段, 因此, 建立循环载荷作用下煤岩复合结构的能量-损伤本构模型非常必要。

煤层及围岩的变形破坏特征多受应力状态的影响。采煤过程中, 工作面推进速度的差异决定了相邻煤层及围岩结构承受不同的加(卸)载速率, 引起不同程度的失稳破坏, 甚至可能诱发煤岩动力灾害。国内外学者主要采用2种方法来研究加载速率效应对煤岩体的作用: 一是采用实验室测试来阐明加载速率与各类煤岩体强度参数之间的关系, 包括砂岩^[18]、砂质泥岩^[19]、泥岩^[20]、纯煤体^[21]等, 研究发现岩石单体和煤单体的变形和强度参数随加载速率的增加而变化明显, 不同加载速率下岩石单体和煤单体的破坏机理与峰值强度、脆性、延性、弹性模量、破碎程度和断裂模式的变化不一致^[22-23]; 二是借助声发射(AE)技术研究不同加载速率与声发射信号的关系, 以此表征煤岩体的破坏行为。煤岩细观断面形貌是煤岩体失效特征的重要表征, 先前研究主要是通过外部宏观裂纹和最终失效形态分析煤岩试样损伤特征, 且主要集中在不同类型的岩石和煤体, 对于煤岩复合试样则多采用单轴或者三轴试验, 对循环载荷条件且考虑加载速率效应的研究鲜有报道。

目前关于煤岩体失效破坏的认识大多基于宏观介质理论, 关于细观结构对宏观破坏的影响考虑较少。然而, 煤岩体失效是一个由细观结构逐步损伤发展到宏观破坏的过程, 因此, 从细观角度分析岩石的初始结构和断裂形貌对于深入了解岩石的破碎特性和损伤规律也很重要^[24]。试样失效后的断面形态和破碎分形特征是表征煤岩体细观到宏观破坏的关键, 采用分形理论和电子扫描显微镜(SEM)技术, 从细观角度刻画煤岩体宏观结构多尺度的破坏特征, 有助于理解

煤岩体失效的内在机制^[25]。

笔者借助 SIRIUS 动态应变仪、AE、SEM 等多种手段,基于 3 种加(卸)载速率(0.05、0.10、0.15 mm/min)对煤岩复合试样开展不同路径的单轴循环加卸载试验,研究循环采动应力下煤岩复合结构的损伤特征及宏-细观破坏形态,构建循环载荷作用下煤岩复合结构的能量-损伤本构模型,对揭示深部煤岩复合结构的失稳破坏机制、科学防控深部煤岩动力灾害具有重要的理论和实际意义。

1 试验过程

1.1 循环加卸载路径

基于 3 种加(卸)载速率(0.05、0.10、0.15 mm/min)对煤岩复合试样开展单轴循环加卸载试验,其中,卸载速率与加载速率保持一致,后文不再赘述。主要设计了 2 种循环加卸载路径,分别为恒定下限逐步循环加卸载路径(下文简称路径 I,文中用“**A**”表示)和变上下限等幅循环加卸载路径(下文简称路径 II,文中用“**B**”表示)。其中,在试验过程中路径 I 的加载上限每次增加 3 MPa,循环卸载下限为 0,具体加卸载路径如图 1(a)所示。

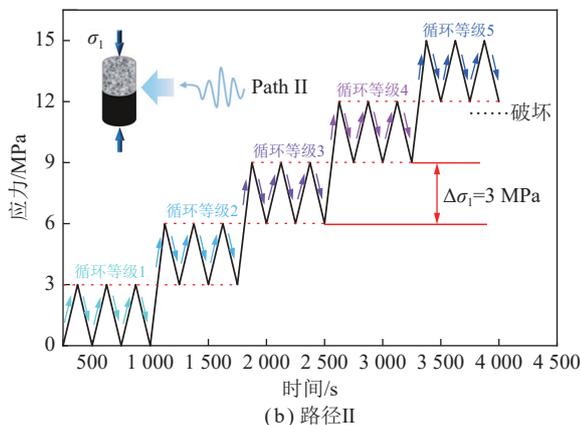
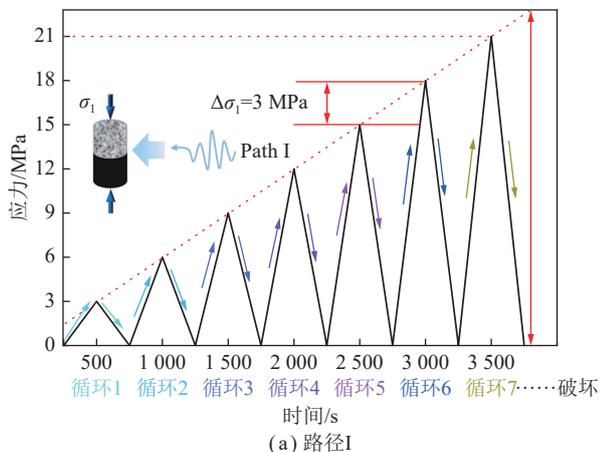


图 1 2 种循环加卸载路径

Fig.1 Two cyclic loading and unloading paths

路径 II 下每个循环等级内有 3 个等幅的小循环,每个等级的上限比前一个等级增加 3 MPa,加卸载路径如图 1(b)所示。由于路径 I 每次需卸载到 0,再次加载时,应力跨度比路径 II 大,且应力跨度逐渐增加,故路径 I 又可以称之为应力分级跨度较大的路径。

1.2 试样准备

笔者所用试样选自山西阳泉新景煤矿 8 号煤,从 8 号煤层及其顶板岩层中取出尺寸为 30 cm 以上的大块原煤和砂岩。将原煤和岩石转运到实验室后,钻取并打磨成尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱形煤、岩试样,且同步制备 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的标准纯煤(C)和纯岩试样(R)。根据 ISRM 的相关规程试样两端平整度须控制在 0.01 mm 内,以满足试验要求。取 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的圆柱形煤、岩试样组合成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形煤岩复合试样,要求试样上下端直径的偏差小于 0.02 mm。根据循环载荷加(卸)载速率的不同,将煤岩复合试样分为 6 组(A0.05、A0.10、A0.15、B0.05、B0.10、B0.15)。

1.3 测试方案

试验采用 MTSE45.104 微控电子万能试验机,最大载荷为 300 kN,同时采用 BMB120-10AA 静态应变片记录煤组分和砂岩组分的应变数据。使用 PCI-8 AE 系统(美国物理声学公司)同步获取 AE 信号,传感器为 NANO-30。每个样品使用 6 个应变片和 6 个声发射探头(图 2(a)),其布置方式可参考前人的研究^[26]。加载完成后,采用 ACTIS015-300 电子扫描设备进行 SEM 测试。整个试验过程如图 2(b)所示。测试时,试样煤体在上方,岩石在下方,由于 MTS 试验机是通过下端的座动器上移进行加载,上座动器保持不动,所以,给煤岩复合试样施加循环加卸载荷时试验机是主动施加在岩石上的,相当于实际条件下顶板岩石与煤层的互层作用。

2 2 种循环载荷作用下煤岩复合试样损伤破坏试验结果分析

2.1 煤岩复合试样损伤破坏应变变化规律

选取 2 种加卸载路径下加(卸)载速率为 0.10 mm/min 对应的试样进行应变变化分析,如图 3 所示。从图 3 可以看出,煤岩复合试样中试样的应变和应力变化有着严格的对应关系;不同循环加卸载路径下,煤岩复合试样中煤体的轴向变形和径向变形都明显比岩石部分的大,主要原因是煤岩复合试样中煤体中存在大量的微裂隙,导致煤体抵抗变形能力较小。到达塑性阶段后,受载煤体裂纹扩展较为明显,塑性变形不断增加,临近破坏时,试样应变均出现较大的离散性,预

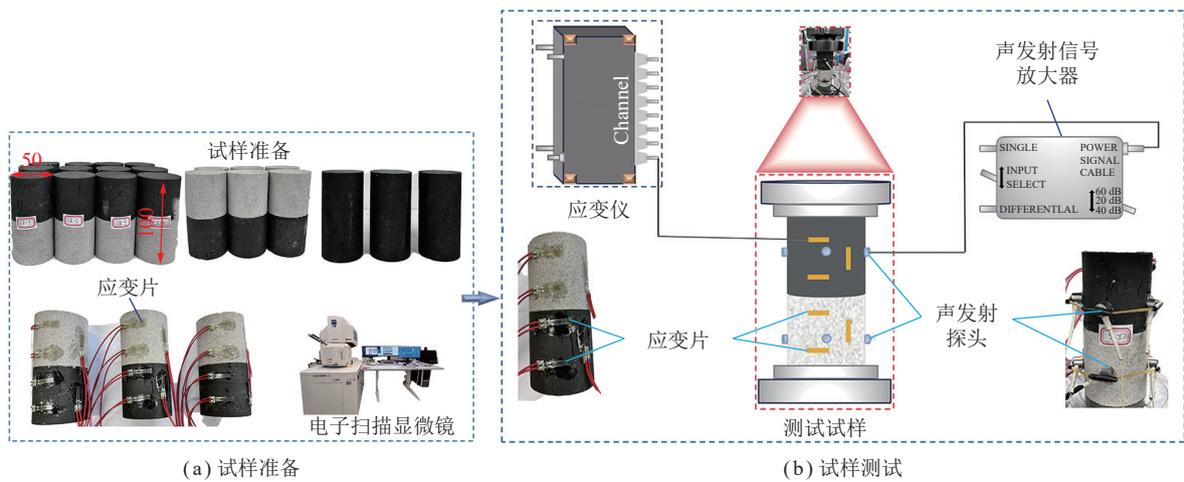


图 2 煤岩复合试样制备和试验流程

Fig.2 Procedure diagram of coal and rock combination specimen preparation and testing

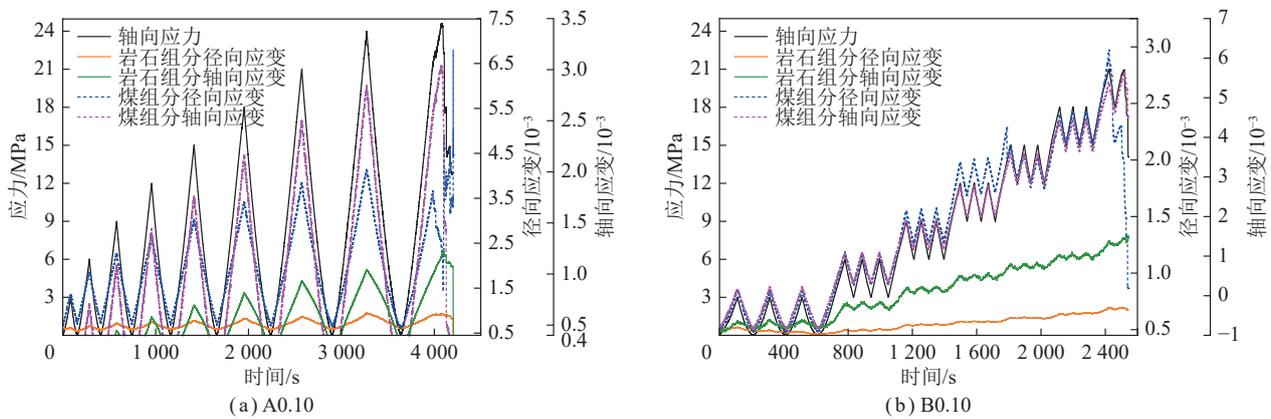


图 3 煤岩复合试样中岩组分、煤组分轴向、径向应变随时间变化曲线

Fig.3 Axial and radial strain curves of rock and coal components in coal-rock composite specimen with time

示着试样即将发生破坏。

2.2 煤岩复合试样的应力-应变特征

试样编号和试验结果见表 1, 图 4 为 2 种循环加卸载路径下煤岩复合试样应力-应变曲线及声发射监测结果。为分别监测煤组分和岩石组分的应变数据,

在煤、砂岩组分上, 各粘贴了一个轴向应变片, 分别采集煤、岩组分的轴向应变。考虑到单轴循环载荷作用下煤岩复合试样会受压膨胀变形, 为防止循环加卸载过程中径向应变片由于煤岩变形而脱落, 在煤、砂岩组分上各粘贴了 2 个径向应变片, 确保在试验过程中

表 1 2 种循环加卸载路径、不同加(卸)载速率下试样编号及试验结果

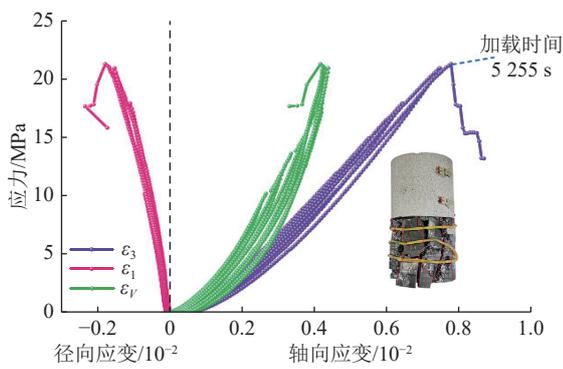
Table 1 Sample number and test results under two cyclic paths with different loading rates

循环加卸载路径	试样编号	加(卸)载速率/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	试验结果			加载峰值时间/s
			峰值应力	峰值应变/ 10^{-2}	弹性模量/GPa	
UC	C	0.10	17.23	0.946	1.73	914
	R	0.10	75.23	1.062	7.84	1 657
Path I	A0.05	0.05	21.08	1.067	2.52	5 255
	A0.10	0.10	24.58	1.054	3.42	4 213
Path II	A0.15	0.15	25.71	0.940	3.81	3 508
	B0.05	0.05	17.10	0.793	2.53	3 421
	B0.10	0.10	20.93	0.848	3.17	2 567
	B0.15	0.15	22.05	0.762	3.46	1 820

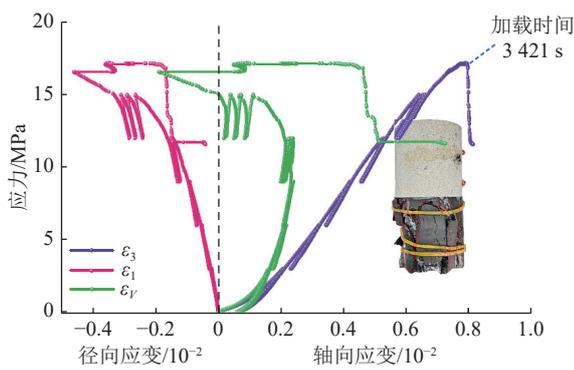
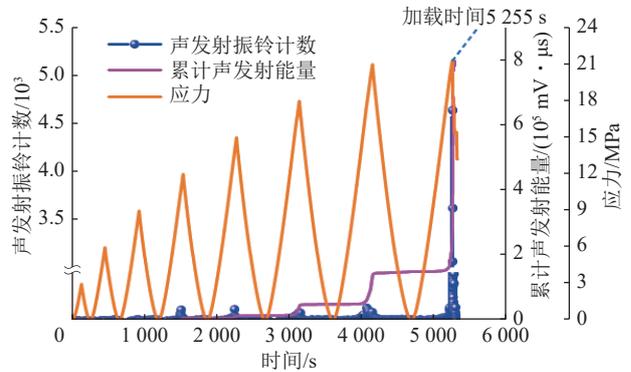
注: UC代表单轴压缩。

能够采集到径向应变数据。试验结束后各应变片均采集到了数据,因此,在本研究中选取同一位置(靠近煤岩界面的煤、砂岩径向应变片)的应变数据进行分析,得到煤、砂岩组分的径向应变数据,将煤岩径向应变之和作为煤岩复合试样的径向应变,煤岩复合试样的轴向应变数据由 MTSE45.104 微控电子万能试验机采集获得。2 种循环加卸载路径下,同一循环中的加载和卸载曲线不重合(图 4),形成应力“滞回环”,代表每次循环耗散的能量^[27]。结合表 1 和图 4 可知,由于 2 种循环加卸载方式不同,应力-应变曲线及滞回环会存在明显的差异。路径 I 下,每次加卸载随加载下限形成应力滞回环,加卸载曲线呈“牛角”状;路径 II 下,加卸载应力-应变曲线会呈现出明显的分级趋势,在每个分级内形成 3 个小的“尖叶”状曲线,表明

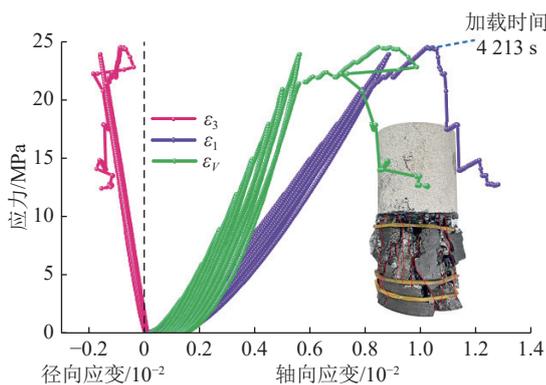
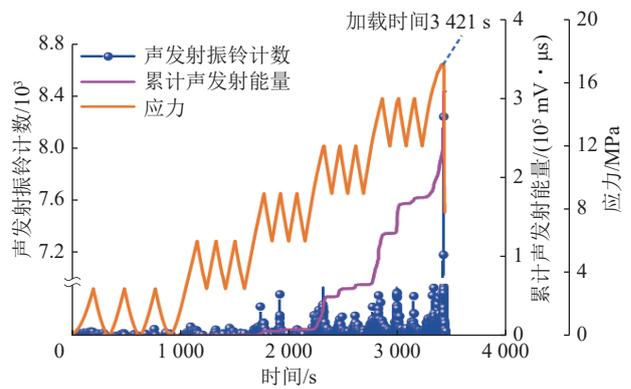
在不同循环加卸载方式下,煤岩复合试样的力学行为会存在差异。当加(卸)载速率从 0.05 mm/min 增大到 0.15 mm/min 时,路径 I 下,煤岩复合试样的峰值强度从 21.08 MPa 提高到了 25.71 MPa,峰值应变从 0.010 67 降低到了 0.009 40,弹性模量从 2.52 GPa 提高到了 3.81 GPa,加载时间从 5 255 s 下降到了 3 508 s,加载时间缩短了 33.24%;路径 II 下,煤岩复合试样的峰值应力从 17.10 MPa 提高到了 22.05 MPa,峰值应变从 0.007 93 降低到了 0.007 62,弹性模量从 2.53 GPa 提高到了 3.46 GPa,加载时间从 3 421 s 下降到了 1 820 s,加载时间缩短了 46.80%。表明煤岩复合试样的弹性模量随着加(卸)载速率的增大逐渐增大,峰值强度与加(卸)载速率呈正相关。此外,对比发现,不同循环加卸载路径对试样的应力-应变特征有不同程度的影



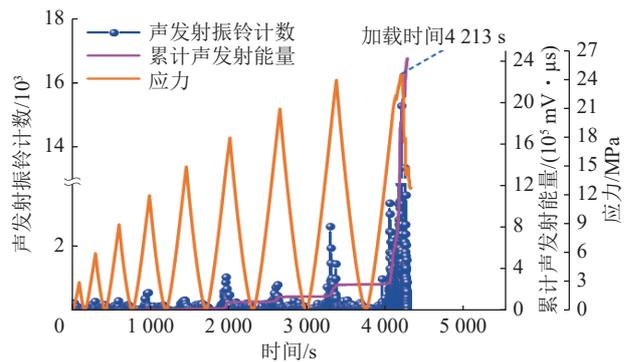
(a) A0.05



(b) B0.05



(c) A0.10



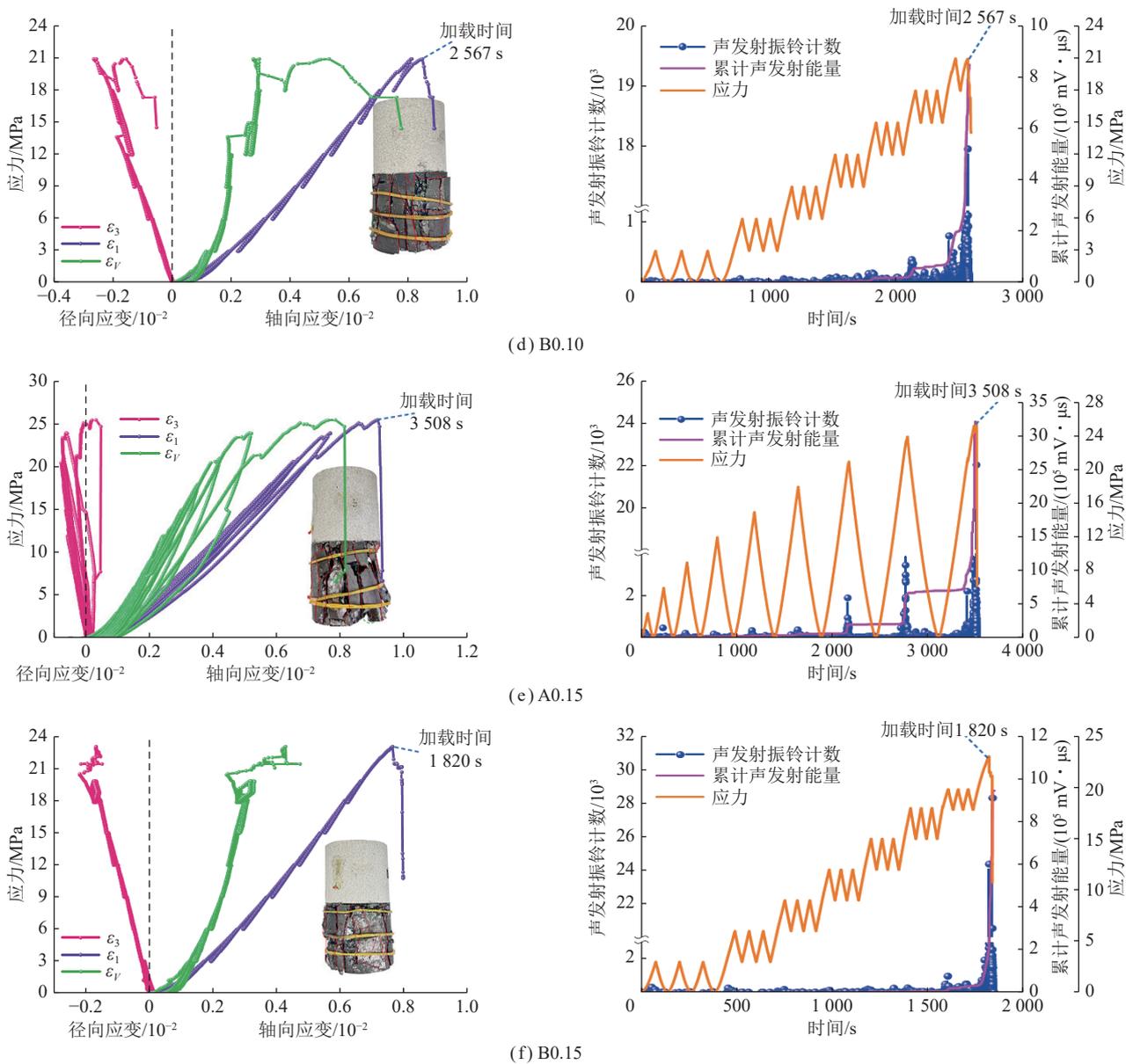


图4 2种循环加卸载作用下煤岩复合试样应力-应变曲线及声发射监测结果

Fig.4 Stress-strain curves and acoustic emission monitoring results of coal-rock composite specimens under two cycles of loading and unloading

响, 路径 I 下试样的峰值强度大于路径 II。全文图中 ε_1 为轴向应变, ε_3 为径向应变, ε_V 为体积应变; 0.05、0.10、0.15 分别代表 0.05、0.10、0.15 mm/min 三种加(卸)载速率。

2.3 煤岩复合试样损伤破坏声发射演化特征

图4给出了2种循环加卸载路径下, 煤岩复合试样的声发射振铃计数、累计声发射能量、加载应力与时间的关系。分别对比图4(a)、(c)、(e)及图4(b)、(d)、(f)可以发现, 煤岩复合试样的声发射信号特征受加(卸)载速率的影响显著。当加(卸)载速率为0.05 mm/min时, 路径 I、路径 II 下试样峰值声发射振铃计数分别为4 642、8 248; 而当加(卸)载速率为0.10、

0.15 mm/min时, 路径 I 下煤岩复合试样的峰值处声发射振铃计数分别15 282、22 039, 与0.05 mm/min相比分别增大了3.29倍和4.75倍; 路径 II 下煤岩复合试样的峰值声发射信号数目分别为17 959、24 685, 与0.05 mm/min相比分别增大了2.17倍和2.99倍。当加(卸)载速率从0.05 mm/min提高到0.15 mm/min时, 路径 I 下, 煤岩复合试样的累计声发射能量从 1.2×10^6 mV · μ s 增加到了 3.2×10^6 mV · μ s, 扩大了2.59倍; 路径 II 下, 试样的累计声发射能量从 3.1×10^5 mV · μ s 增加到了 9.4×10^5 mV · μ s, 扩大了3.03倍。可以看出, 加(卸)载速率越大, 峰值处的声发射信号强度越大, 对应的声发射累计振铃计数及累计声发射能量越大。主要是由于加(卸)载速率越高, 试件的脆性越强, 破

坏前,其声发射信号活跃度越低,试样的峰值强度越大。试样失效时,释放的能量更多,声发射信号更加活跃且强度也随之增大,同时破裂瞬间煤岩复合试样内部裂纹的发育和扩展也促进了 AE 信号的产生。

2.4 煤岩复合试样的失稳劣化特征分析

由 2.2 节分析可知,2 种循环加卸载作用下试样的弹性模量随加(卸)载速率的增加而增大。由于煤岩材料属于弹塑性材料,仅用总体弹性模量 E 和峰值强度不足以表征试样的变形特征。笔者将计算煤岩复合试样在循环加卸载路径下的加载弹性模量和卸载弹性模量,分别选取加载和卸载曲线的弹性段(即近线性段)计算其斜率后获得加(卸)载弹性模量(式(1)),为确保弹性模量计算的线性段始终处于加载和卸载曲线内,将选取每个循环应力峰值的 30% 作为近线性段的起点,峰值的 70% 作为近线性段的终点。此外,在循环加卸载应力作用下会产生弹性应变和不可恢复的塑性变形,根据式(2)、(3)可计算出试样在加载过程中的塑性应变和弹性应变。

加(卸)载弹性模量的计算如下:

$$E_n^+ = \frac{\sigma_{n70\%}^+ - \sigma_{n30\%}^+}{\varepsilon_{n70\%}^+ - \varepsilon_{n30\%}^+}, E_n^- = \frac{\sigma_{n70\%}^- - \sigma_{n30\%}^-}{\varepsilon_{n70\%}^- - \varepsilon_{n30\%}^-} \quad (1)$$

式中, E_n^+ 为第 n 次循环的加载弹性模量; E_n^- 为第 n 次循环的卸载弹性模量; $\sigma_{n70\%}^+$ 、 $\sigma_{n30\%}^+$ 分别为第 n 次循环加载曲线峰值的 70% 应力和 30% 应力; $\varepsilon_{n70\%}^+$ 、 $\varepsilon_{n30\%}^+$ 分别为加载应力 $\sigma_{n70\%}^+$ 、 $\sigma_{n30\%}^+$ 对应的应变; $\sigma_{n70\%}^-$ 、 $\sigma_{n30\%}^-$ 分别为第 n 次循环卸载曲线峰值的 70% 应力和 30% 应力; $\varepsilon_{n70\%}^-$ 、 $\varepsilon_{n30\%}^-$ 分别为卸载应力 $\sigma_{n70\%}^-$ 、 $\sigma_{n30\%}^-$ 对应的应变; n 为循环次序。

第 n 个循环等级的塑性应变 $\Delta\varepsilon_n^s$ 的计算方法为

$$\Delta\varepsilon_n^s = \Delta\varepsilon_n - \Delta\varepsilon_n^t \quad (2)$$

式中, $\Delta\varepsilon_n^s$ 、 $\Delta\varepsilon_n^t$ 分别为每个循环对应的塑性应变、弹性应变; $\Delta\varepsilon_n$ 为每个循环等级上限对应的应变。

每个循环的累计塑性应变 ε_n^s 的计算如下:

$$\varepsilon_n^s = \sum_{j=1}^n \Delta\varepsilon_j^s \quad (3)$$

图 5 为煤岩复合试样的加(卸)载弹性模量及塑性、弹性应变的演化关系。由图 5 可知,在路径 I 和路径 II 下,弹性模量变化与应力-应变曲线存在良好的对应关系。路径 I 下,试样的加(卸)弹性模量随循环加卸载应力先增大后减小,路径 II 下加(卸)弹性模量呈阶梯型先增大后减小。试样的加(卸)载弹性模量随循环加卸载应力呈现出明显的非线性特征,且随着循环加卸载应力的增加总体均呈现出先增大后逐

渐减小的趋势,与前人研究煤体和岩石循环加卸载得出的结论一致^[28]。主要原因是试样内部存在大量的微裂隙,在初始循环加卸载时,试样的微裂隙逐渐闭合,弹性模量进入强化阶段。随着循环加卸载次数的增加,加卸载弹性模量逐渐靠近,此时,意味着试样内微裂隙被压实,煤岩复合试样的刚度增加;随着循环载荷的进行,试样内部的塑性应变逐渐积累,新裂纹逐渐萌生和扩展,塑性变形的增加导致煤岩复合试样内部损伤加剧,弹性模量开始逐渐降低,塑性变形积累量增多,此时,预示着煤岩复合试样即将发生失稳破坏。说明煤岩复合试样内部裂纹发育进程与弹性模量和塑性应变的演化密切相关。

2.5 2 种循环载荷作用下煤岩复合试样宏-细观破坏特征

2.5.1 煤岩复合试样的裂纹宏观扩展模式

在 2 种循环加卸载作用下,煤岩复合试样的宏观破坏模式如图 6 所示。图 6 中右小图为等比例的煤岩复合试样宏观破坏模式素描图,借助红色线条标注了煤岩复合试样的表面裂纹(其中 S 表示剪切裂纹, T 表示拉伸裂纹)。从图 6 可以看出,砂岩表面几乎没有明显的宏观裂纹,岩样保持完整,而煤组分破碎程度较高,大量裂纹交错产生。2 种循环加卸载路径下,随着加(卸)载速率的增大,煤样表面裂纹的数目和类型发生显著变化。对比图 6(a)~(c)和图 6(d)~(f)可知,总体上,煤样表面产生大量裂纹,主要为平行于轴线方向的拉裂纹且沿拉裂纹产生了少量不同缓倾角的次生剪切裂纹,同时煤样部分区域产生崩脱现象。当加(卸)载速率从 0.05 mm/min 增加到 0.15 mm/min 时,剪切裂纹增多,试样总体宏观裂纹数目明显增大,试样的破坏模式从平行轴线的拉破坏过渡到拉剪复合破坏,其中对失效起主导作用的是张拉破坏裂缝。这表明加(卸)载速率的增大有助于总体裂纹和次生剪切裂纹的萌生。循环加卸载作用时,复合试样的裂纹易沿着煤组分的原生裂隙和弱面扩展,煤样破碎严重,造成复合试样的整体失效,该发现与前人的研究结果一致^[29-30]。

2.5.2 煤岩复合试样分形破坏特征

(1) 煤岩复合试样颗粒破碎特征。

试验开始前,在试验台上铺上保鲜膜,收集加载过程中掉落的试样颗粒。试验结束后,岩样保持完整,未收集到破碎的岩颗粒,主要收集到破碎的煤组分颗粒。利用分级筛将破碎煤按照 20、15、10、4、2.36、1.25、0.60 mm 七个等级进行筛分并称量,得到煤组分的颗粒破碎特征,如图 7 所示,并计算出煤组分颗粒

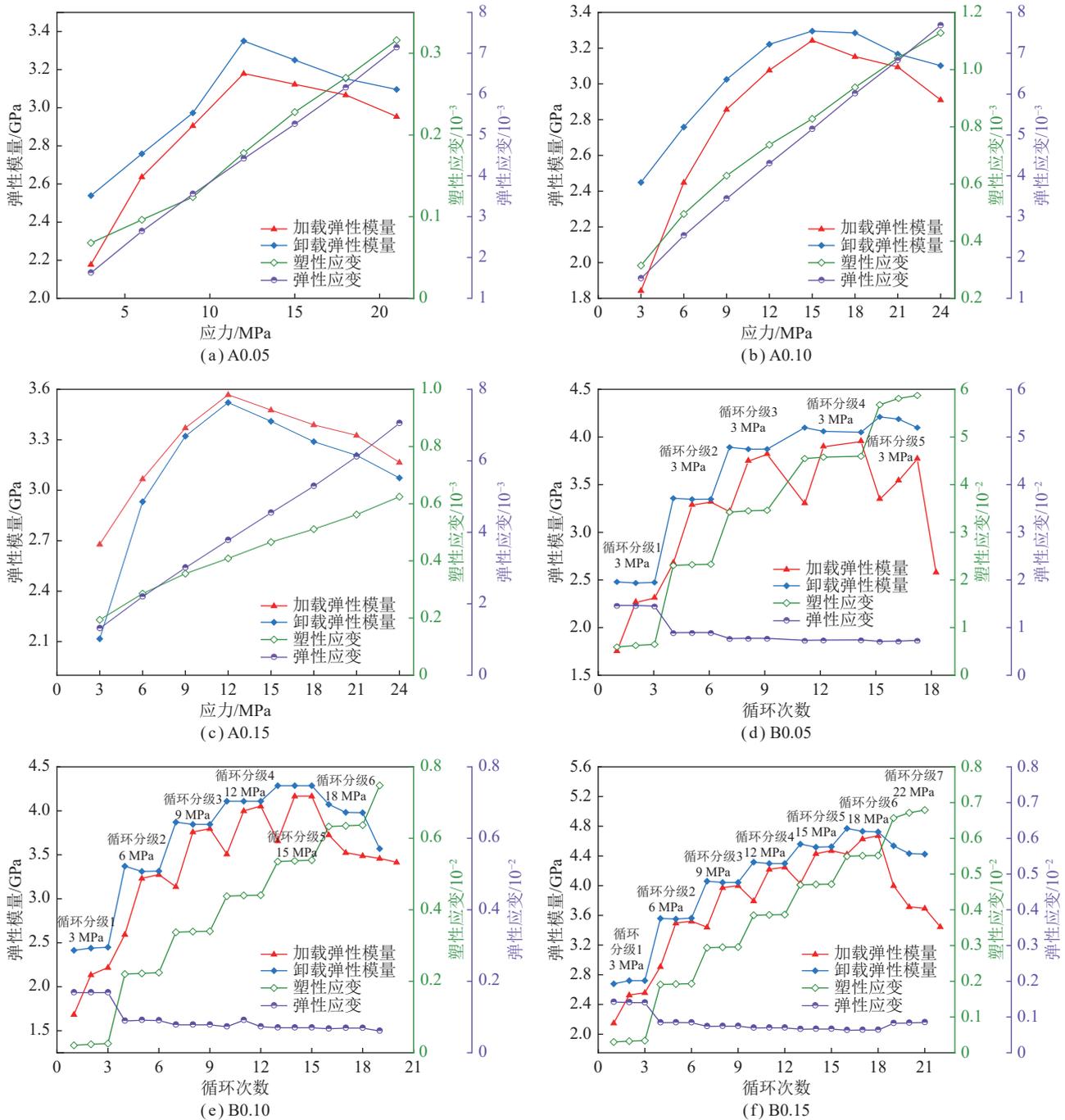


图5 2种循环加卸载作用下煤岩复合试样的加(卸)载弹性模量及塑性、弹性应变的演化关系

Fig.5 Evolution of loading (unloading) elastic modulus and plastic strain, elastic strain of coal-rock composite specimens under two types of cyclic loading and unloading

破碎分布规律,如图8所示。

由图8可知,随着加(卸)载速率的提高大尺寸煤组分破碎颗粒占比逐渐减少,小尺寸颗粒比例增加。当加(卸)载速率从0.05 mm/min提高至0.15 mm/min时,路径I下,小于4 mm的破碎颗粒占比从23.07%增加到了36.81%,增加了13.74%。路径II下,小于4 mm的破碎颗粒占比从27.54%增加到了35.34%,增加了7.8%。表明媒体部分的破碎分布规律与加

(卸)载速率呈正相关。分析表明循环加卸载作用下,不同加(卸)载速率是影响煤岩复合试样中媒体部分破碎分布规律的重要因素。此外,由于路径I每次需卸载到0,再次加载时,应力跨度比路径II大,分别对比不同路径下试样的累积质量分布规律可知,在同一加(卸)载速率下路径I的质量分数曲线总是高于路径II,说明路径I试样的颗粒破碎程度大于路径II,说明循环加卸载分级大的路径有利于试样内部的应力

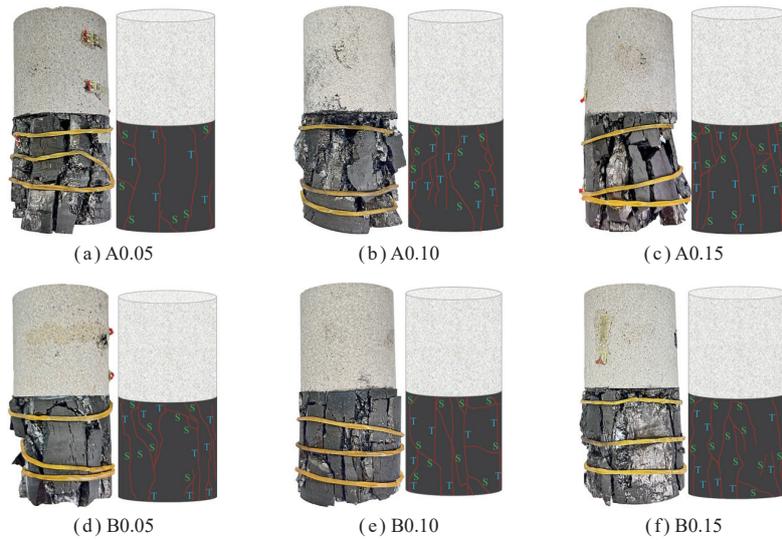


图 6 2 种循环加卸载作用下煤岩复合试样的宏观破坏模式

Fig.6 Macroscopic damage patterns of coal-rock composite specimens under two types of cyclic loading and unloading

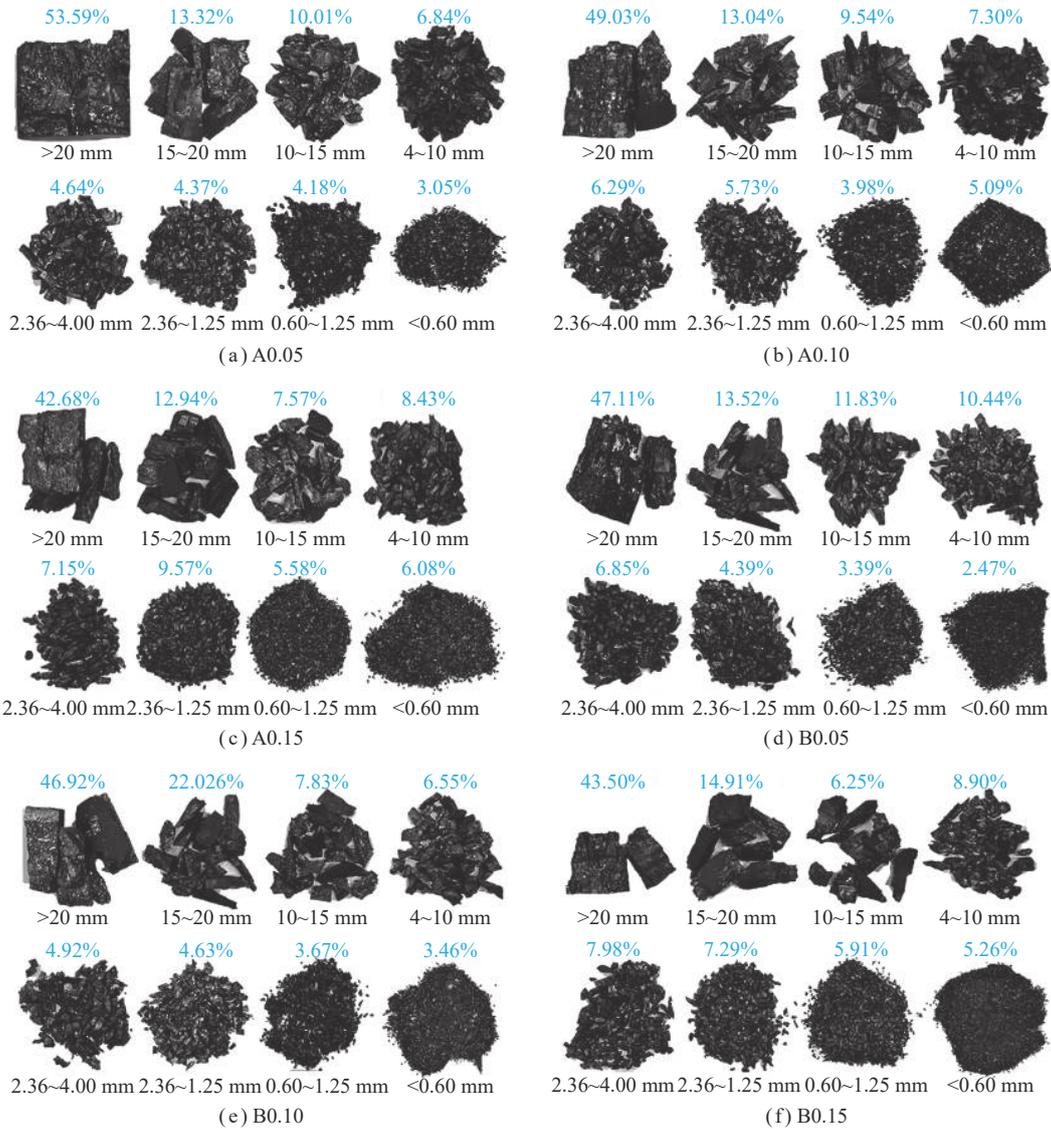


图 7 2 种循环加卸载作用下煤岩复合试样煤组分颗粒破碎特征

Fig.7 Particle fragmentation features of coal fractions in coal-rock composite specimens under two types of cyclic loading and unloading

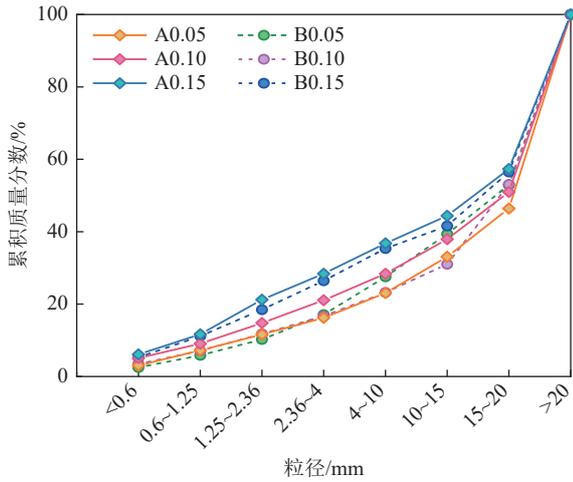


图8 2种循环加卸载作用下煤岩复合试样煤组分颗粒破碎分布规律

Fig.8 Particle fragmentation distribution of coal fractions in coal-rock composite specimens under two types of cyclic loading and unloading

传递,在拉伸和剪切裂纹的同步作用下,试样破坏更彻底,产生更多的细颗粒。

(2) 试样的破碎分形特征。

煤岩体的破坏是一个细观逐渐发展到宏观的分形演化过程^[31]。煤岩破碎后的分形特征与内部损伤发育密切相关^[32]。由于岩石破碎块体和粒径无法一一精确测量,一些学者提出了岩石破碎分形的计算方法,又称之为破碎分形维数,用于表征破碎岩石的颗粒分布特征。G-G-S分形维数(Gate-Gaudin-Schuhmann)计算模型适用于试样破碎形态中含有细粒度颗粒的煤岩体。G-G-S分布函数^[33]表达如下:

$$y = (r/R_1)^b \quad (4)$$

式中, r 为某一碎块粒径; R_1 为碎块最大尺寸粒径; b 为岩石块体分布参数。

设 M_r 为小于 r 粒径时碎块的累积质量,则碎块累积质量 M_r 与碎块总质量 M 的比值也满足G-G-S函数。则式(4)可转化为

$$\frac{M_r}{M} = \left(\frac{r}{R_1}\right)^b \quad (5)$$

通过求解式(5)的导数,可得到

$$dM_r \propto r^{b-1} dr \quad (6)$$

由于块体和质量增量之间的关系满足:

$$dm \propto r^3 dN \quad (7)$$

根据Turcotte研究发现,分形维数 D ,碎块粒径 r 和该碎块粒径下的等效粒度 N 的碎块数目满足:

$$N \propto r^{-D} \quad (8)$$

根据分形的定义,分形维数 D 可以表示为

$$D = \frac{\ln N_r}{\ln(1/r)} \quad (9)$$

式中, N_r 为粒径为 r 时的碎块数目。

联立式(4)~(9)可得

$$y = \frac{M_r}{M} = \left(\frac{r}{R_1}\right)^{3-D} \quad (10)$$

通过对式(10)两边同时取对数可得

$$\ln \frac{M_r}{M} = (3-D) \ln \frac{r}{R_1} \quad (11)$$

基于式(11),结合试验获取破碎颗粒质量和粒径数据,绘制 $\ln(M_r/M)-\ln(r/R_1)$ 的双对数图,并进行线性拟合,其斜率为 $3-D$,从而确定分形维数 D 。图9为2种循环加卸载路径下,煤岩复合试样破碎煤体的分形维数分布。

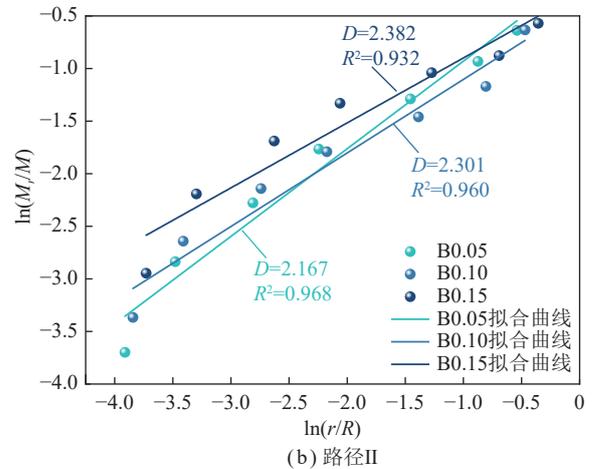
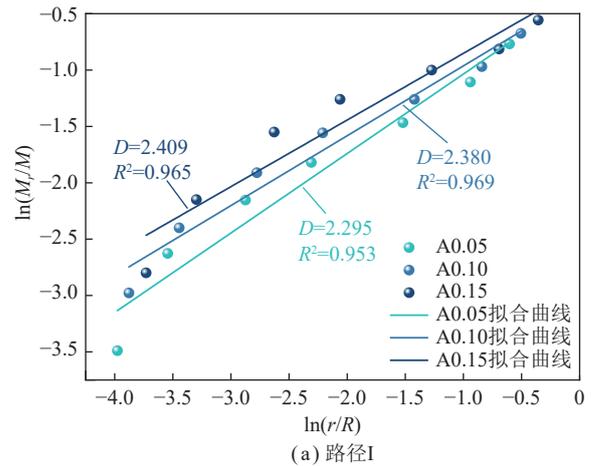


图9 2种循环加卸载作用下煤岩复合试样中破碎煤组分的分形维数

Fig.9 Fractal dimensions of the fractured coal fraction in a coal-rock composite sample under two types of cyclic loading and unloading

通过图 9 可以看出, 在 2 种循环加卸载作用下, 分形维数拟合优度较高, 拟合系数 R^2 的范围为 0.932~0.969。当加(卸)载速率从 0.05 mm/min 提高至 0.15 mm/min 时, 路径 I 下, 分形维数从 2.295 增大到了 2.409, 增加了 0.114, 路径 II 下, 分形维数从 2.167 增大到了 2.382, 增加了 0.215。同一加(卸)载速率下, 路径 I 的分形维数均比路径 II 高, 说明路径 I 下试样破碎更彻底。分形维数随加(卸)载速率的增加而增大。产生该现象的原因是由于低加(卸)载速率下, 煤体内的主裂纹有充分的时间发育, 输入的能量因裂纹扩展被消耗, 而高加(卸)载速率下, 输入的能量没有足够的时间在煤体内耗散, 煤体内积聚了大量的弹性应变能, 这部分能量沿着微裂纹释放, 当加载到煤岩复合试样的峰值强度时, 内部剩余的弹性应变能会突然释放, 加剧了煤体的破坏。因此, 高加(卸)载速率下, 煤体的破碎程度加剧, 分形维数随之增大, 试样的内部裂纹扩展加快。

2.5.3 煤岩复合试样细观结构特征

由 2.5.2 节分析可知, 煤岩复合试样在不同循环加卸载和不同加(卸)载速率下, 宏观破坏模式和裂纹发育特征存在差异。而宏观力学特性和细观裂纹发育形态有密切联系, 因此, 借助 SEM 对煤岩复合试样破碎煤组分的断面形貌进行扫描, 对试样断面的细观

形貌进行分析。首先放大 500 倍在断面形貌上找到具有明显特征的研究区域, 然后在 2 000 倍放大倍数下观察破碎煤组分断面的结构特征。图 10 为煤岩复合试样中煤组分断面细观结构特征图。煤组分中拉伸裂纹细观特征主要表现为河流花纹、鳞片状花纹、台阶花纹, 剪切裂纹的细观特征包括韧窝、滑移分离。根据裂纹位置与煤基质的关系, 又可将裂纹分为穿基质裂纹和沿基质裂纹。从图 10(a)、(b) 可知, 当加(卸)载速率为 0.05 mm/min 时, 试样有足够的时间积累应变能, 穿基质裂纹较多, 同时, 穿基质裂纹的产生会导致新的界面相互摩擦, 裂纹表面更加粗糙, 沿基质裂纹较少; 且剪切裂纹特征和拉伸裂纹特征同时伴随产生。从图 10(e)、(f) 可知, 当循环加(卸)载速率为 0.15 mm/min 时, 断裂煤体表面粗糙度大幅降低。高加(卸)载速率下剪切裂纹和拉伸裂纹增多, 且拉伸裂纹特征明显, 呈现出明显的脆性破坏形态, 与 2.5.1 节煤体的宏观裂纹形态基本一致。产生该现象的细观原因是: 低加(卸)载速率下, 穿基质裂纹较多, 内部耗散能增多; 而高加(卸)载速率下, 没有足够的时间产生穿基质破坏, 更趋向于产生沿基质裂纹, 相比穿基质裂纹需要更少的能量, 这也解释了高加(卸)载速率下, 内部裂纹扩展和发育速度越快。此外, 对比 2 种循环加卸载下的细观结构特征可以发现, 路径 I 作

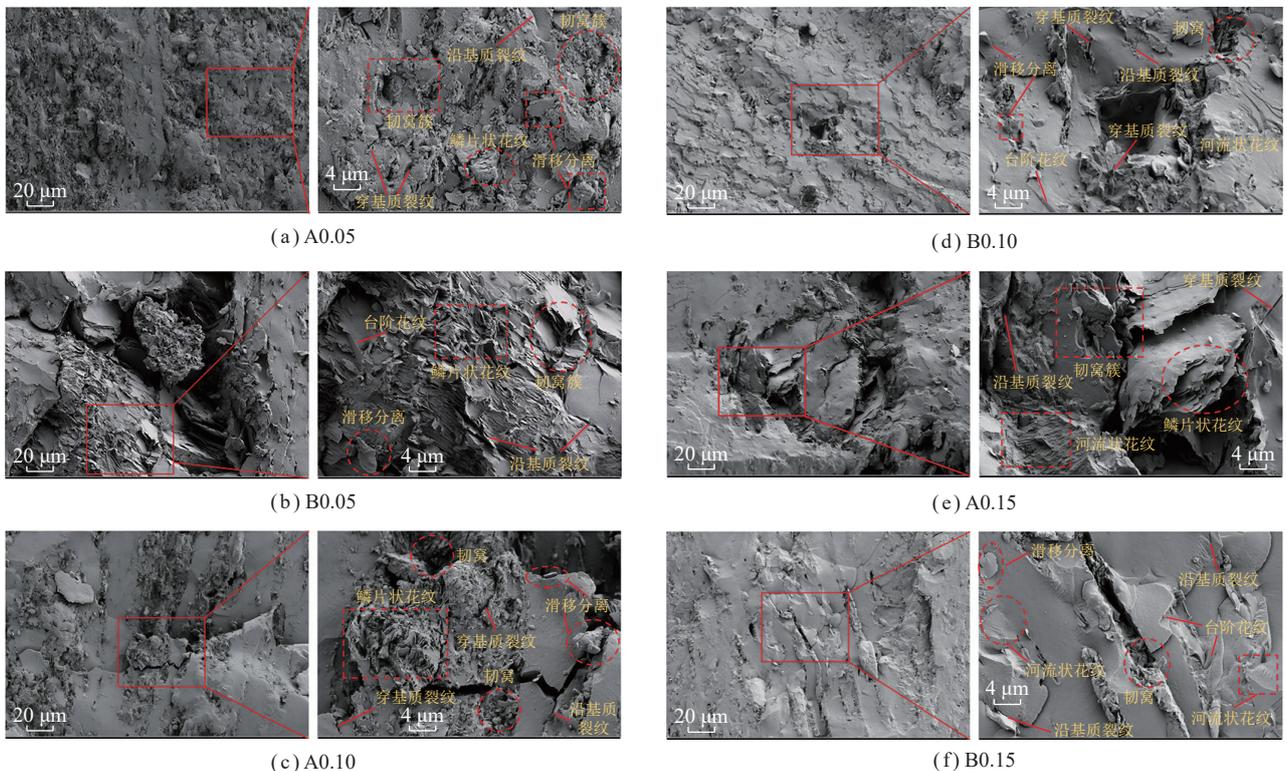


图 10 2 种循环加卸载作用下煤岩复合试样中煤组分断面细观结构特征

Fig. 10 Characteristics of the cross-section microstructure of the coal component in a coal-rock composite sample under two cycles of loading and unloading

用下的煤体破坏面明显比路径 II 作用下更粗糙,产生的裂纹特征更丰富,该发现为 2.5.2 节路径 I 下试样的分形维数和破碎程度比路径 II 大提供了微观层面的解释,循环加卸载分级跨度较大的路径更有利于试样内部裂纹的发育,导致试样的破坏程度更高。

3 循环载荷作用下煤岩复合试样能量-损伤本构模型

3.1 循环加卸载作用下煤岩复合试样能量计算原理

假设试样在加载过程中与外界没有热交换,根据能量守恒定律和热力学第一定律,外力对试样所做的功将以其他能量的形式存储在试样内部^[34],则试样内部的能量关系^[35]可表示为

$$U = U_e + U_d \quad (12)$$

式中, U 为加载输入的总能量; U_e 为弹性能; U_d 为耗散能。

循环加卸载与常规的加载路径不同,每次循环加卸载产生的“滞回环”面积代表每次循环加卸载试样内部损伤或塑性变形损耗的能量^[36]。在图形上(图 11),加载曲线和横坐标(应变)包围的面积是总能量,而卸载曲线和横坐标(应变)包围的面积是弹性能,总能量与弹性能的差值为耗散能。根据积分定律,将加载曲线和卸载曲线与横坐标围成的面积分别划分为 η 、 μ 个区域,当 η 、 μ 足够大时,加载曲线和卸载曲线与横坐标围成的面积可近似视为直角梯形的面积(图 11)。在单轴循环加载中, σ_1 为煤岩复合试样的轴向应力; ε_1 为煤岩复合试件的轴向应变。图 11 中加载曲线第 i 部分的积分上限轴向应变表示为 $\varepsilon_{1,i}$, 对应的轴向应力表示为 $\sigma_{1,i}$; 积分下限轴向应变表示为 $\varepsilon_{1,i+1}$, 对应的轴向应力表示为 $\sigma_{1,i+1}$ 。卸载曲线第 γ 部分的积分上限轴向应变表示为 $\varepsilon'_{1,\gamma}$, 对应的轴向应力表示为 $\sigma'_{1,\gamma}$; 积分下

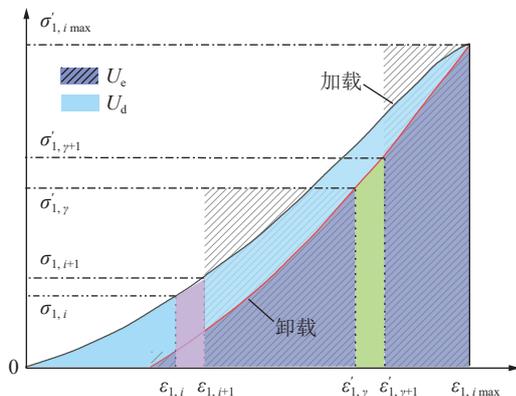


图 11 循环加卸载作用下煤岩复合试样能量计算原理

Fig.11 Schematic diagram of energy calculation of coal-rock composite specimen under cyclic loading and unloading action

限轴向应变表示为 $\varepsilon'_{1,\gamma+1}$, 对应的轴向应力表示为 $\sigma'_{1,\gamma+1}$; $\sigma_{1,n}$ 为第 n 次循环目标应力, $\varepsilon_{1,n}$ 为对应的应变。

循环加卸载作用下,输入的总能量、积聚的弹性能及耗散能之间的关系可以通过每个循环加卸载的应力应变关系曲线计算得到(图 11)。煤岩复合试样的总能量可以通过式(13)计算得到。

$$U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 \approx \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} (\sigma_{1,i+1} + \sigma_{1,i}) (\varepsilon_{1,i+1} - \varepsilon_{1,i}) \quad (13)$$

单轴压缩条件下,围压为 0,即中间主应力 σ_2 、最小主应力 σ_3 均为 0,则总能量为

$$\begin{cases} U = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 \\ \varepsilon_{1(C+R)} = \frac{\sigma_1}{E_c} \end{cases} \quad (14)$$

式中, E_c 为煤岩复合试样的弹性模量。

单轴压缩下煤岩复合试样的弹性能可表示为

$$U_e = \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_c = \frac{1}{2E_c} \sigma_1^2 \approx \sum_{\gamma=0}^{\mu} \frac{1}{2} (\sigma'_{1,\gamma+1} + \sigma'_{1,\gamma}) (\varepsilon'_{1,\gamma+1} - \varepsilon'_{1,\gamma}) \quad (15)$$

式中, ε_c 为煤岩复合试样的弹性应变。

结合式(13)和式(15),可得到耗散能的计算方程为

$$U_d = \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_1 d\varepsilon_1 - \frac{1}{2} \sigma_1 \varepsilon_1 \approx \sum_{i=0}^n \frac{1}{2} (\sigma_{1,i+1} + \sigma_{1,i}) (\varepsilon_{1,i+1} - \varepsilon_{1,i}) - \sum_{\gamma=0}^{\mu} \frac{1}{2} (\sigma'_{1,\gamma+1} + \sigma'_{1,\gamma}) (\varepsilon'_{1,\gamma+1} - \varepsilon'_{1,\gamma}) \quad (16)$$

选取选择路径 I 下加(卸)载速率为 0.10 mm/min 的试样(A0.10)作为此次循环加卸载本构验证的对象,根据能量计算原理,可以计算 A0.10 试样在循环加卸载路径 I 作用下每个循环加卸载等级的总输入能、弹性能、耗散能。图 12 为 A0.10 试样在循环加卸载路径 I 作用下的能量计算结果^[37]。

3.2 循环加卸载荷能量-损伤变量

煤岩复合试样失稳破坏的主要原因是内部能量的突然释放,而内部损伤及不可逆变形的产生主要是因为能量的耗散^[38]。因此,从能量耗散的角度定义损伤变量,计算出煤岩复合试样的损伤变量,能更直观地揭示循环加卸载作用下试样内部的损伤演化规律。因此,有学者利用耗散能定义煤岩体的损伤演化行为^[39], GONG 等^[40]基于岩石破坏的能量原理重新定义了其损伤变量,即

$$D_s = U_d / U_p \quad (17)$$

式中, D_s 为损伤变量; U_p 为峰前本构能,可以通过应力-应变曲线下的峰前面积计算得到。

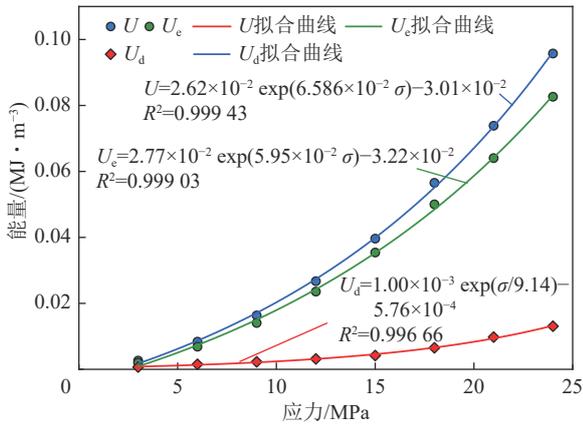


图 12 A0.10 试样在循环加卸载路径 I 作用下的能量计算结果

Fig.12 Calculated energy of A0.10 specimen under cyclic loading and unloading path I

根据煤岩复合试样 A0.10 在循环加卸载路径 I (加(卸)载速率为 0.10 mm/min) 下的试验结果, 计算每个循环加卸载的弹性能、耗散能和本构能 (A0.10 试样各循环加卸载等级的能量计算结果见表 2), 可计算出煤岩复合试样在每个循环加卸载的损伤变量。图 13 为煤岩复合试样的循环加卸载损伤变量及其拟合曲线, 分析发现煤岩复合试样的损伤变量 D_s 可通过指数函数准确拟合 (式 (18)), 其拟合系数大于 0.99。

$$\begin{cases} D_s = 0.012 3 \exp(2.254 7 \times 10^2 \varepsilon) - 0.017 5 \\ R^2 = 0.998 8 \end{cases} \quad (18)$$

表 2 试样 A0.10 在循环加卸载路径 I 下的能量指标
Table 2 Energy index of sample A0.10 under cyclic loading and unloading path I MJ/m³

循环加卸载次数	输入总能量 U	弹性能 U_e	耗散能 U_d
1	0.002 66	0.002 00	0.000 665
2	0.008 38	0.006 86	0.001 520
3	0.016 34	0.014 05	0.002 290
4	0.026 71	0.023 56	0.003 150
5	0.039 61	0.035 42	0.004 190
6	0.056 54	0.050 03	0.006 510
7	0.073 84	0.064 05	0.009 790
8	0.095 74	0.082 65	0.013 090

3.3 基于线性储能定律的煤岩复合试样损伤变量表征

通过 3.1 节能量计算原理可知总能量、耗散能和弹性能三者之间的关系, 以往大量研究^[40-41]表明岩石试样在受载过程中各部分能量之间的转化导致了最

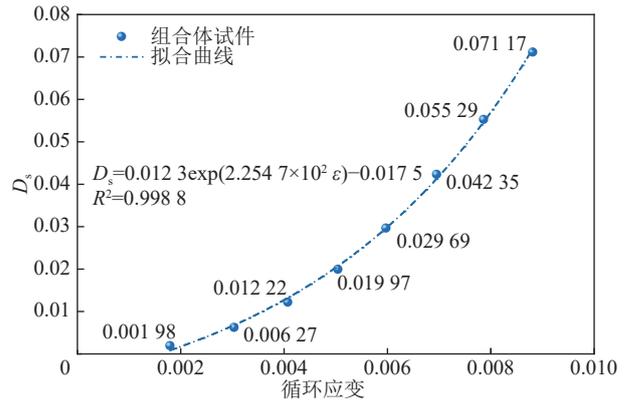


图 13 试样 A0.10 在循环加卸载路径 I 下的损伤变量拟合关系曲线

Fig.13 Damage variables fitting relationship curve for specimen A0.10 under cyclic loading and unloading path I

终的失效, 试样的 3 个能量参数之间存在着良好的线性关系, 即线性储能和能量耗散的规律可以表示为

$$\begin{cases} U_{en} = aU_{0n} \\ U_{dn} = (1-a)U_{0n} = b_1U_{0n} \end{cases} \quad (19)$$

式中, U_{en} 为第 n 个循环的弹性能; U_{dn} 为第 n 个循环的耗散能; U_{0n} 为第 n 个循环的总输入能; a 、 b_1 分别为煤岩复合试样的储能参数和耗能参数。

试样 A0.10 每个循环加卸载等级的耗散能和输入的总能量之间的关系可以通过线性拟合表示, 图 14 为 A0.10 的线性储能拟合示意, 其拟合的相关系数大于 0.99, 拟合关系式见式 (20)。

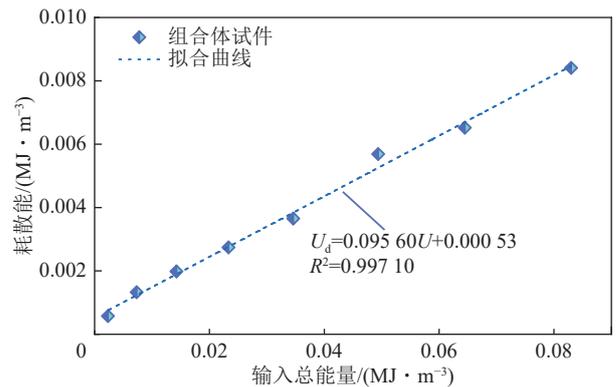


图 14 试样 A0.10 在循环加卸载路径 I 下的线性储能拟合关系曲线

Fig.14 Linear energy storage fitting relationship curve for specimen A0.10 under cyclic loading and unloading path I

$$\begin{cases} U_d = 0.095 60U + 0.000 53 \\ R^2 = 0.997 1 \end{cases} \quad (20)$$

由 3.2 节可知, 煤岩复合试样的损伤变量可以通过耗散能与峰前输入本构能表示, 基于线性储能定律, 煤岩复合试样的能量-损伤变量表示为

$$D_{sn} = \frac{U_{dn}}{U_p} = \frac{bU_{0n}}{U_p} \quad (21)$$

式中, D_{sn} 为第 n 个循环加卸载的损伤变量; U_p 为试样 A0.10 循环加卸载的本构能。

3.4 循环加卸载作用下煤岩复合试样损伤本构模型修正

LEMAITRE 在 1971 年提出应变等效假说^[42], 该假说将受载材料划分为受损部分和原始材料(完全未受损)2 部分组成, 受损材料的应变行为可由未受损材料本构方程表达, 其中应力表示为有效应力。基于经典的 LEMAITRE 应变假说, 单轴载荷作用下煤岩体的损伤本构模型表示为

$$\sigma = (1 - D_s)E_c \varepsilon \quad (22)$$

刘学生等^[43]将压实系数定义为实际应力-应变曲线的变形模量与试样弹性模量的比值(图 15)。从图 15 可以看出试样完全压实前, 煤岩复合试样的变形模量呈对数增加。

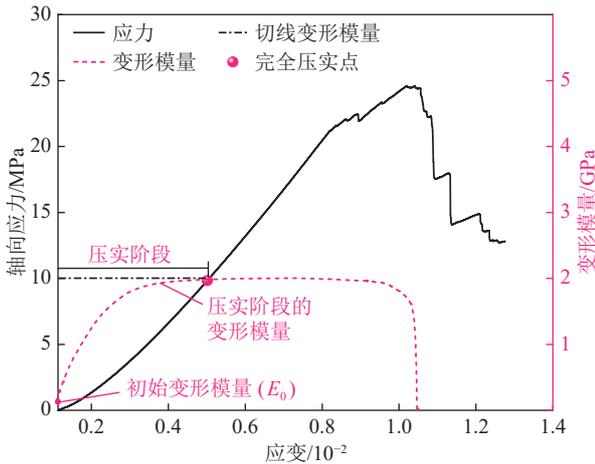


图 15 压实系数示意

Fig.15 Illustration of compaction factor

$$C = E_d/E_c \quad (23)$$

式中, E_d 为试样的变形模量; C 为试样的压实系数。

在每个循环加卸载过程中, 初始阶段都会存在压密阶段, 随着应变的增加, 试样的变形模量与弹性模量之间的差值逐渐减小, 并呈非线性变化, 直至变形模量接近切线变形模量。若选取损伤力学中的 Weibull 分布函数来描述完全压实阶段的压实系数^[44], 则压实系数可表示为

$$C' = 1 - \exp\left(-(\varepsilon/\alpha)^\beta\right) \quad (24)$$

式中, α 、 β 为分布参数。

压实阶段的应力应变关系为

$$\sigma_c = \varepsilon_c E_c \quad (25)$$

式中, σ_c 为压实点的应力; ε_c 为压实点对应的应变; E_c 为压实点处的变形模量。

结合式 (23)~(25), 可以得到压实阶段的本构模型为

$$\sigma = E_0 + (E_c - E_0) \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^\beta\right) \right] \quad (26)$$

其中, E_0 为初始变形模量。在完全压实点, 确保式 (26) 必须满足以下的边界条件:

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_c, \varepsilon = \varepsilon_c \\ \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{(\sigma = \sigma_c, \varepsilon = \varepsilon_c)} = E_c \end{cases} \quad (27)$$

根据式 (26)、(27), 可求解出 α 、 β 这 2 个 Weibull 分布函数, 表示为

$$\begin{cases} \alpha = \varepsilon_c \beta^{1/\beta} \\ \beta = 1 / \ln \left[\frac{(E_c - E_0)\varepsilon_c}{E_c \varepsilon_c - \sigma_c} \right] \end{cases} \quad (28)$$

结合式 (26)~(28), 可以得到新的压实系数为

$$\lambda = \begin{cases} \frac{E_0 + (E_c - E_0)}{E_0} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^\beta\right) \right], & \varepsilon < \varepsilon_c \\ 1, & \varepsilon \geq \varepsilon_c \end{cases} \quad (29)$$

式中, λ 为新的压实系数。

以每个循环加卸载等级的压实点为本构模型的分界, 本文中, 将每个循环中加载曲线的变形模量趋于稳定的第 1 个点确定为完全压实点, 构建的循环加卸载分段本构模型如下:

$$\sigma_{nr} = \begin{cases} \frac{E_{nr0} + (E_{nr\tau} - E_{nr0})}{E_{nr0}} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^\beta\right) \right] E_{nr\tau} \varepsilon, & \varepsilon < \varepsilon_c \\ \sigma_{nr\tau} + E_{nr\tau}(\varepsilon - \varepsilon_{nr\tau}) \left(1 - \frac{b_1 U_{0n}}{U_p} \right), & \varepsilon \geq \varepsilon_c \end{cases} \quad (30)$$

式中, σ_{nr} 为循环加(卸)载应力; $\tau=1, 2$, $\tau=1$ 时代表循环加载曲线, $\tau=2$ 时代表循环卸载曲线; E_{nr0} 为每个循环的初始变形模量; $E_{nr\tau}$ 、 $E_{nr\tau}$ 分别为每个循环的弹性模量和变形模量; $E_{nr\tau}$ 为每个循环压实点对应的变形模量; $\sigma_{nr\tau}$ 、 $\varepsilon_{nr\tau}$ 分别为压实点对应的应力、应变。

3.5 循环加卸载作用下煤岩复合试样能量-损伤本构模型验证

根据 3.4 节对煤岩复合试样循环加卸载本构模型的修正, 压实阶段的模型参数可由式 (28) 求得, 模型验证参数列于表 3 中。

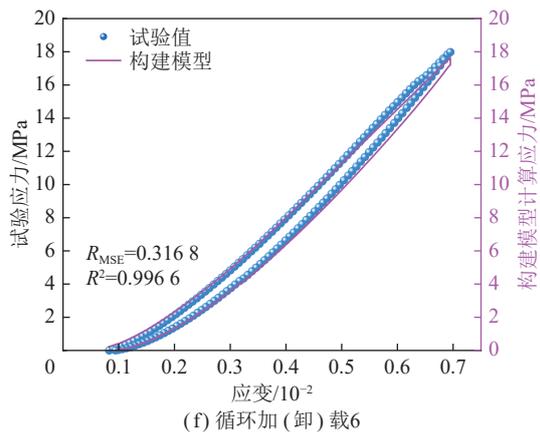
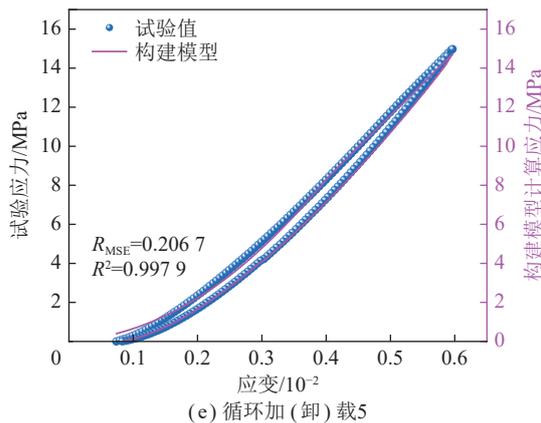
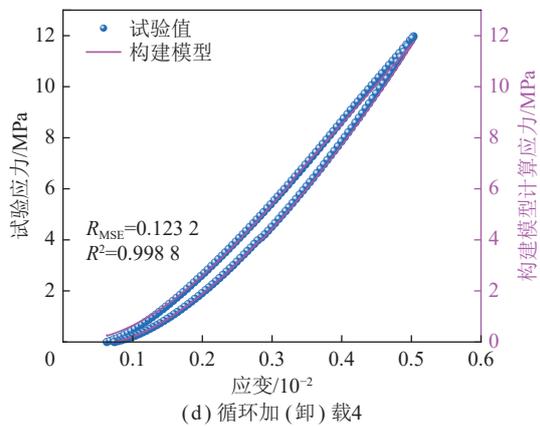
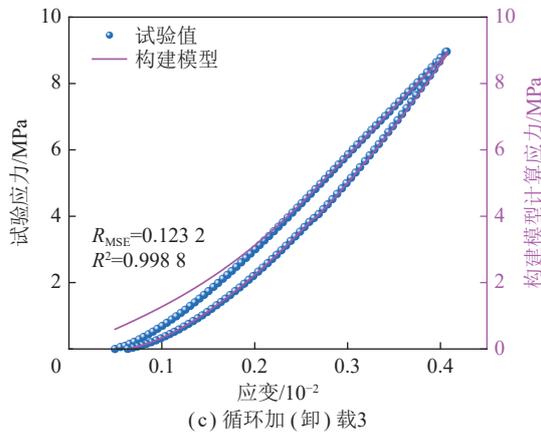
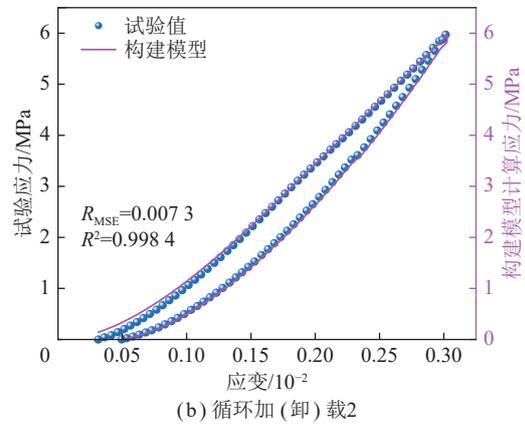
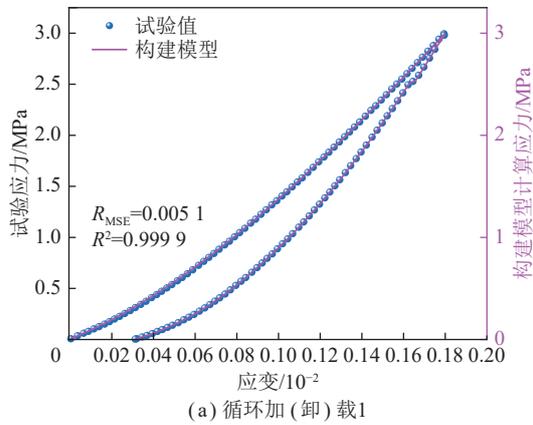
本研究构建的模型同时考虑了煤岩复合试样的线性储能定律和初始压密阶段对本构模型的影响。

结合表 3 计算的循环加卸载本构参数, 可以计算得到试样 A0.10 的理论模型与试验实测数据的应力-应变对比 (图 16)。从图 16 可以看出, 构建模型与整个试验变形曲线的吻合度较高。为了定量评估上述理论模型的优越性, 引入了均方根误差 (Root Mean Square Error(R_{MSE})) 以及决定系数 (R -squared value (R^2)) 来进行判断^[45]。其中, R_{MSE} (式 (31)) 用于提出模型与实测数据之间的标准差, R^2 (式 (32)) 用于评价提出模型与实测数据之间的拟合优度。

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^K (\sigma_k - \sigma'_k)^2} \quad (31)$$

表 3 试样 A0.10 在循环加卸载路径 I 下本构验证参数
Table 3 Parameters for intrinsic validation of specimen A0.10 under cyclic loading and unloading path I

循环加卸载次数	β	α	R_{MSE}	R^2
1	1.147 9	0.001 7	0.005 1	0.999 9
2	0.956 2	0.001 6	0.007 3	0.998 4
3	2.139 6	0.003 8	0.223 5	0.990 8
4	2.163 9	0.005 8	0.123 2	0.998 8
5	2.163 9	0.006 6	0.206 7	0.997 9
6	1.801 1	0.006 5	0.316 8	0.996 6
7	1.894 6	0.008 2	0.445 6	0.995 0
8	1.454 4	0.007 9	0.613 2	0.992 8



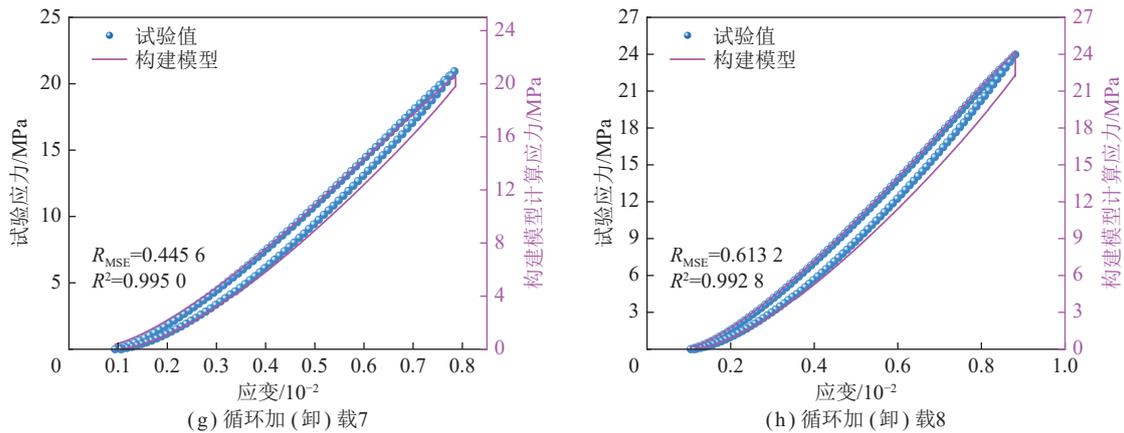


图 16 试样 A0.10 在循环加(卸)载路径 I 下的理论模型与试验获取的应力-应变曲线对比

Fig. 16 Comparison of theoretical model and experimentally obtained stress-strain curves for specimen A0.10 under cyclic loading and unloading path I

$$R^2 = 1 - \frac{(k-1) \sum_{k=1}^K (\sigma_k - \sigma'_k)^2}{(k-2) \sum_{k=1}^K (\sigma_k - \sigma_\mu)^2} \quad (32)$$

式中, K 为总数据量; σ_k 和 σ'_k 分别为第 k 个数据点应力的实测值和理论值; σ_μ 为总数据量的平均实测应力。

计算发现与实测数据相比, 构建模型计算的每个循环加卸载的决定系数 (R^2) 均大于 0.99, 均方根误差 (R_{MSE}) 有效范围为 0.005 1~0.613 2, 说明实测数据和提出模型误差较小, 具有较好的一致性。本研究建立的分段循环加卸载本构模型能够有效反映煤岩复合试样强度与变形之间的关系, 为研究煤岩复合试样在复杂加载应力下的变形失效行为奠定了理论基础。

4 结 论

(1) 2 种循环载荷作用下, 加(卸)载速率越大, 煤岩复合试样的声发射累计能量越大, 当加(卸)载速率从 0.05 mm/min 提高到 0.15 mm/min 时, 路径 I 和路径 II 下, 试样的声发射累计能量分别扩大了 2.59 倍和 3.03 倍; 煤岩复合试样的损伤破坏主要表现在煤体部分。在 2 种循环加(卸)载作用下, 总裂纹数目和剪切裂纹占比随加(卸)载速率的增加而逐渐增大, 对试样失效起主导作用的是张拉破坏裂缝。

(2) 在 2 种循环载荷作用下, 加(卸)载速率对煤岩复合试样的分形维数影响显著, 随着加(卸)载速率的增加, 煤体破碎的分形维数随之增大。循环加(卸)载分级大的路径有利于试样内部的应力传递, 更有利于试样内部裂纹的发育, 导致试样的破坏程度更高。在同一加(卸)载速率下, 路径 I 下煤岩复合试样煤组分的破碎颗粒质量百分比和分形维数均比路径 II 高, 路径 I 下细观断面特征比路径 II 更粗糙, 产生的细观

裂纹特征也更加丰富。

(3) 高加(卸)载速率下, 裂纹更易沿着原生弱面扩展, 且扩展速度更快。试样破坏时弹性能释放越剧烈, 更易沿基质断裂。这也是煤岩复合试样失效的细观作用机制。低加(卸)载速率下, 内部能量耗散和较长的加载时间为试样产生穿基质断裂提供了条件。

(4) 基于能量耗散理论和统计损伤理论, 提出了一种考虑煤岩复合试样压密特征以及线性储能定律的循环加(卸)载能量-损伤本构模型。此外, 通过引入均方根误差 (R_{MSE}) 和决定系数 (R^2) 发现了改进后模型曲线与试验数据之间的吻合度较高。构建模型计算的每个循环的决定系数 (R^2) 均大于 0.99, 均方根误差 (R_{MSE}) 有效范围为 0.005 1~0.613 2, 说明实测数据和模型计算误差较小, 具有较好的一致性。

参考文献(References):

- [1] 左建平, 谢和平, 孟冰冰, 等. 煤岩组合体分级加卸载特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(5): 1287-1296.
ZUO Jianping, XIE Heping, MENG Bingbing, et al. Experimental research on loading-unloading behavior of coal-rock combination bodies at different stress levels[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1287-1296.
- [2] 张村. 高瓦斯煤层群应力-裂隙-渗流耦合作用机理及其对卸压抽采的影响[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
ZHANG Cun. Coupling mechanism of stress-fracture-flow in high gas coal seam group and its impact on pressure relief extraction[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [3] FAN Long, LIU Shimin. Evaluation of permeability damage for stressed coal with cyclic loading: An experimental study[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 216: 103338.
- [4] 张英, 苗胜军, 郭奇峰, 等. 循环荷载下花岗岩应力门槛值的细观能量演化及岩爆倾向性[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(7): 864-873.
ZHAN Ying, MIAO Shengjun, GUO Qifeng, et al. Meso-energy

- evolution and rock burst proneness of the stress thresholds of granite under triaxial cyclic loading and unloading test[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(7): 864–873.
- [5] 李欣慰, 姚直书, 黄献文, 等. 循环加卸载下砂岩变形破坏特征与能量演化研究[J]. *岩土力学*, 2021, 42(6): 1693–1704.
- LI Xinwei, YAO Zhishu, HUANG Xianwen, et al. Investigation of deformation and failure characteristics and energy evolution of sandstone under cyclic loading and unloading[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(6): 1693–1704.
- [6] ZHANG Anlin, XIE Heping, ZHANG Ru, et al. Mechanical properties and energy characteristics of coal at different depths under cyclic triaxial loading and unloading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 161: 105271.
- [7] REN Qiangqiang, ZHANG Yufei, ARAUZO Inmaculada, et al. Roles of moisture and cyclic loading in microstructures and their effects on mechanical properties for typical Chinese bituminous coals[J]. *Fuel*, 2021, 293: 120408.
- [8] MENG Qingbin, LIU Jiangfeng, REN Li, et al. Experimental study on rock strength and deformation characteristics under triaxial cyclic loading and unloading conditions[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(2): 777–797.
- [9] 茹文凯, 胡善超, 李地元, 等. 煤岩组合体卸围压能量演化规律及耗散能损伤本构模型研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(12): 1–12.
- RU Wenkai, HU Shanchao, LI Diyu, et al. Study on energy evolution of unloading confining pressure and dissipative energy damage constitutive model of coal-rock combination[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(12): 1–12.
- [10] LIU Congliang, TAN Zhixiang, DENG Kazhong, et al. Synergistic instability of coal pillar and roof system and filling method based on plate model[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, 23(1): 145–149.
- [11] GU Xuebin, GUO Weiyao, ZHANG Chengguo, et al. Effect of interfacial angle on the mechanical behaviour and acoustic emission characteristics of coal-rock composite specimens[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 1933–1943.
- [12] 王凯, 付强, 徐超, 等. 原生煤岩组合体界面力学效应数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(S1): 623–633.
- WANG Kai, FU Qiang, XU Chao, et al. Numerical simulation of interface mechanical effects of primary coal-rock combination[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(S1): 623–633.
- [13] WANG Kai, FU Qiang, XU Chao, et al. The strength characteristics and competitive failure mechanism of primary coal-rock combination considering interface damage quantity[J]. *Fuel*, 2023, 352: 129057.
- [14] YANG Erhao, LI Shugang, LIN Haifei, et al. Influence mechanism of coal thickness effect on strength and failure mode of coal-rock combination under uniaxial compression[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022, 81(17): 429.
- [15] LIU Jie, LI Qiuping, WANG Xiaoran, et al. Dynamic multifractal characteristics of acoustic emission about composite coal-rock samples with different strength rock[J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2022, 164: 112725.
- [16] WANG Kai, ZHANG Xiang, DU Feng, et al. Numerical study on damage response and failure mechanism of gas-containing coal-rock combination under confining pressure effect[J]. *Fuel*, 2023, 349: 128683.
- [17] LI Faxin, YIN Dawei, WANG Feng, et al. Effects of combination mode on mechanical properties of bi-material samples consisting of rock and coal[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 19: 2156–2170.
- [18] CHANG Jucai, HE Kai, PANG Dongdong, et al. Study on the influence of anchorage length and pretension on the working resistance of rock bolt based on its tensile characteristics[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2021, 8(6): 16.
- [19] ZHAO Kang, YU Xiang, ZHOU Yun, et al. Energy evolution of brittle granite under different loading rates[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132: 104392.
- [20] ZHOU Lei, ZHU Zheming, QIU Hao, et al. Study of the effect of loading rates on crack propagation velocity and rock fracture toughness using cracked tunnel specimens[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 25–34.
- [21] LIU Xuewei, CHEN Haixiao, LIU Bin, et al. Experimental and numerical study on failure characteristics and mechanism of coal under different quasi-static loading rates[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 121: 103478.
- [22] LIU Xiling, LIU Zhou, LI Xibing, et al. Experimental study on the effect of strain rate on rock acoustic emission characteristics[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 133: 104420.
- [23] LI X B, LOK T S, ZHAO J. Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2005, 38(1): 21–39.
- [24] LAI Yanming, ZHAO Kang, HE Zhiwei, et al. Fractal characteristics of rocks and mesoscopic fractures at different loading rates[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2023, 33: 100431.
- [25] 刘保国, 于明圆, 孙景来, 等. 水-力耦合作用下页岩力学特性及其损伤本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(5): 1041–1054.
- LIU Baoguo, YU Mingyuan, SUN Jinglai, et al. Study on mechanical properties and damage constitutive model of shale under hydro-mechanical coupling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(5): 1041–1054.
- [26] SONG Hongqiang, ZUO Jianping, LIU Haiyan, et al. The strength characteristics and progressive failure mechanism of soft rock-coal combination samples with consideration given to interface effects[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 138: 104593.
- [27] DING Z W, JIA J D, TANG Q B, et al. Mechanical properties and energy damage evolution characteristics of coal under cyclic loading and unloading [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,

- 2022, 55(8): 4765–4781.
- [28] 裴润生, 包含, 兰恒星, 等. 循环加卸载下黑云母石英片岩的弹性模量与能量演化特征研究[J]. 工程地质学报, 2022, 40(10): 1–13.
PEI Runsheng, BAO Han, LAN Hengxing, et al. Characteristics of elastic modulus and energy evolution of bioquartz schist under cyclic loading and modulus of elasticity and energy evolution characteristics of bioquartz schist under cyclic loading and unloading tests[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 40(10): 1–13.
- [29] 杨科, 刘文杰, 窦礼同, 等. 煤岩组合体界面效应与渐进失稳特征试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1691–1700.
YANG Ke, LIU Wenjie, DOU Litong, et al. Experimental investigation into interface effect and progressive instability of coal-rock combined specimen[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1691–1700.
- [30] 杨磊, 高富强, 王晓卿, 等. 煤岩组合体的能量演化规律与破坏机制[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3894–3902.
YANG Lei, GAO Fuqiang, WANG Xiaqing, et al. Energy evolution law and failure mechanism of coal-rock combined specimen[J]. *Journal of the China Coal Society*, 2019, 44(12): 3894–3902.
- [31] 王登科, 曾凡超, 王建国, 等. 显微工业 CT 的受载煤样裂隙动态演化特征与分形规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1165–1174.
WANG Dengke, ZENG Fanchao, WANG Jianguo, et al. Dynamic evolution characteristics and fractal law of loaded coal fractures by micro industrial[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(6): 1165–1174.
- [32] 王成, 雷彬彬, 王春, 等. 分段高温硬煤轴向静载作用下的声发射及破碎分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(7): 1394–1408.
WANG Cheng, LEI Binbin, WANG Chun, et al. Research on acoustic emission and fragmentation characteristics of segmented high temperature hard coal under axial static loads[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(7): 1394–1408.
- [33] 赵昕, 徐世焱, 李庆华. 高温后超高韧性水泥基复合材料冲击破碎分形特征分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(2): 44–55.
ZHAO Xin, XU Shilang, LI Qinghua. Fractal characteristics of fire-damaged ultra high toughness cementitious composite after impact loading[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(2): 44–55.
- [34] XIE Heping, LI Liyun, PENG Ruidong, et al. Energy analysis and criteria for structural failure of rocks[J]. *Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering*, 2009, 1(1): 11–20.
- [35] NING Jianguo, WANG Jun, JIANG Jinquan, et al. Estimation of crack initiation and propagation thresholds of confined brittle coal specimens based on energy dissipation theory[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(1): 119–134.
- [36] SHIRANI Faradonbeh Roohollah, TAHERI Abbas, KARAKUS Murat. Failure behaviour of a sandstone subjected to the systematic cyclic loading: insights from the double-criteria damage-controlled test method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(11): 5555–5575.
- [37] PENG Kang, SHI Shaowei, ZOU Quanle, et al. Gas permeability characteristics and energy evolution laws of gas-bearing coal under multi-level stress paths[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(5): 3137–3158.
- [38] 王磊, 袁秋鹏, 谢广祥, 等. 冲击载荷下煤样能量耗散与破碎分形的长径比效应[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1534–1546.
WANG Lei, YUAN Qiupeng, XIE Guangxiang, et al. Length-diameter ratio effect of energy dissipation and fractals of coal samples under impact loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(4): 1534–1546.
- [39] XIAO Jianqing, DING Dexin, JIANG Fuliang, et al. Fatigue damage variable and evolution of rock subjected to cyclic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2010, 47(3): 461–468.
- [40] GONG Fengqiang, ZHANG Peilei, DU Kun. A novel staged cyclic damage constitutive model for brittle rock based on linear energy dissipation law: modelling and validation[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2022, 55(10): 6249–6262.
- [41] HE Zhichao, GONG Fengqiang, LUO Song. Evaluation of the rock-burst proneness of red sandstone with prefabricated boreholes: an experimental study from the energy storage perspective[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2021, 12(1): 2117–2154.
- [42] LEMAITRE Jean. A continuous damage mechanics model for ductile fracture[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1985, 107(1): 83–89.
- [43] LIU X S, NING J G, TAN Y L, et al. Damage constitutive model based on energy dissipation for intact rock subjected to cyclic loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 85: 27–32.
- [44] GAO Feng, XIONG Xin, XU Chaoshui, et al. Mechanical property deterioration characteristics and a new constitutive model for rocks subjected to freeze-thaw weathering process[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 140: 104642.
- [45] WENG Lei, ZHANG Haoliang, ZHANG Yong, et al. Dynamic mechanical properties and the constitutive models of the water-saturated siltstones under frozen conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2022, 39(6): 1096–1107, 1134.