

文章编号: 1671-251X(2025)03-0165-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024080057

煤体损伤破坏的声发射响应及分形时变特征

任晓伟¹, 王晓开¹, 齐龙辉¹, 姬苑¹, 张超超¹, 刘国忠²

(1. 陕西陕煤曹家滩矿业有限公司, 陕西 榆林 719000;

2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘要: 针对煤体损伤破坏演化过程中声发射信号离散性强、特征参数关联性不足导致难以可靠、全面反映煤体损伤破坏特征的问题, 通过开展单轴压缩加载实验, 分析了煤体损伤破坏的声发射响应特征, 并基于分形理论计算声发射信号的信息维数, 分析了煤体损伤破坏的分形时变特征。结果表明: ① 煤体声发射能量在压实、线弹性、弹塑性、失稳破坏及残余强度 5 个阶段呈现显著的阶段性特征, 其中失稳破坏阶段的声发射能量突增可作为煤体宏观破裂的前兆信号; 该前兆信号受煤体初始损伤程度的影响, 即煤体完整性越好, 煤体损伤破坏过程中前兆信号越明显。② 煤体在加载过程中表现出良好的分形特征, 信息维数随声发射信号阈值的增大呈递减趋势; 加载初期因微裂纹闭合导致信息维数增大, 弹塑性阶段裂纹扩展使信息维数快速减小, 失稳破坏阶段宏观破裂引发信息维数再次增大, 其中信息维数快速减小阶段对应煤体内部裂纹扩展贯通的临界状态, 可作为煤体宏观破坏的有效预测指标。研究结果为煤体损伤破坏前兆识别及破坏机理分析提供了理论依据。

关键词: 煤体损伤破坏; 声发射; 单轴压缩; 分形; 信息维数

中图分类号: TD315

文献标志码: A

Acoustic emission response and fractal temporal evolution characteristics of coal body damage and failure

REN Xiaowei¹, WANG Xiaokai¹, QI Longhui¹, JI Yuan¹, ZHANG Chaochao¹, LIU Guozhong²

(1. Shaanxi Shanmei Caojiatan Mining Co., Ltd., Yulin 719000, China; 2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: To address the issue that the discrete nature of acoustic emission (AE) signals and the insufficient correlation of characteristic parameters during coal body damage and failure make it difficult to reliably and comprehensively reflect the damage and failure characteristics, uniaxial loading experiments were conducted. The AE response characteristics of the coal body during damage and failure were analyzed. Additionally, based on fractal theory, the information dimension of AE signals was calculated to analyze the fractal temporal evolution characteristics of coal body damage and failure. The results showed that: ① The AE energy of the coal body exhibited distinct stage-dependent characteristics across five phases: compaction, linear elasticity, elastoplasticity, instability failure, and residual strength. A sharp increase in AE energy during the instability failure phase served as a precursor signal of macroscopic coal body fracture. This precursor signal was influenced by the initial damage level of the coal: the better the integrity of the coal, the more obvious the precursor signal during the damage and failure process. ② The coal body demonstrated prominent fractal characteristics throughout the loading process, with the information dimension decreasing as the AE signal threshold increased. At the initial loading stage, the information dimension increased due to the closure of microcracks. In the elastoplastic phase, crack propagation caused a rapid decrease in the information dimension, while in the instability failure phase, macroscopic fracture led to a subsequent increase. The stage of rapid decrease in information dimension

收稿日期: 2024-08-21; 修回日期: 2025-01-20; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0735)。

作者简介: 任晓伟(1996—), 男, 陕西渭南人, 现从事通风与安全方面的工作, E-mail: 2192227584@qq.com。

引用格式: 任晓伟, 王晓开, 齐龙辉, 等. 煤体损伤破坏的声发射响应及分形时变特征[J]. 工矿自动化, 2025, 51(3): 165-171.

REN Xiaowei, WANG Xiaokai, QI Longhui, et al. Acoustic emission response and fractal temporal evolution characteristics of coal body damage and failure[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(3): 165-171.



扫码移动阅读

corresponded to the critical state of internal crack propagation and coalescence, which served as an effective predictor of macroscopic coal body failure. These findings provide a theoretical foundation for the identification of precursors of coal body damage and failure and the analysis of coal failure mechanisms.

Key words: coal body damage and failure; acoustic emission; uniaxial compression; fractal; information dimension

0 引言

煤体在开采过程中受复杂应力场和地质条件影响,内部结构不断变化,产生多种地球物理信号,其中声发射信号备受关注^[1-2]。声发射信号源自煤体内部微裂纹的产生与扩展,是煤体损伤的直观体现,对于监测煤体损伤状态、了解煤体破坏特征具有重要价值^[3-6]。

声发射检测作为一种无损检测技术^[7],能够精准捕获煤体在受载发生损伤变形过程中所产生的声发射序列的各类时变参数^[8],其中典型的参数包括振铃计数、能量等。通过将这些特征参数与煤体的破裂进程相关联,有助于深入揭示煤体的损伤破坏程度及其内在作用机理^[9-11]。针对煤体的声发射响应特性,已有研究人员从时域与空间域 2 个维度出发,提出了一系列用于表征煤体损伤破坏的方法^[12]。然而,声发射信号易受加载速率、环境温湿度、煤体自身性质等因素影响,导致信号离散性强,基于声发射信号确定的煤体损伤破坏特征的稳定性和可靠性欠佳。另外,当前研究对声发射信号的单一或少数几个特征参数进行分析,缺乏对信号整体特征的系统研究,无法全面、动态地反映煤体损伤破坏的全过程。

近年来,随着非线性科学的快速发展,分形理论逐渐应用于煤体损伤研究,用来量化煤体损伤破坏的几何特征^[13-14]。在分形理论的应用中,分形维数作为一个关键量化指标,能够有效表征煤体在外载荷作用下的损伤破坏特征^[15]。当前,众多学者通过分形维数来表征声发射响应特性,系统研究声发射信号多个特征参数的分形特征,并建立分形维数与应力^[16]、时间^[17]、位移^[18]等变量之间的关系,为深入理解煤体力学行为提供了新的方法^[19-20]。信息维数作为分形维数的概率化扩展,用于反映复杂非线性系统的不确定性或结构复杂程度,擅长处理自然界中较为复杂的非线性现象。而煤破裂过程中产生的声发射信号具有较强的非线性和离散特征,信息维数能很好地表征声发射信号在不同尺度上的分形效应。因此,本文通过开展单轴压缩加载实验,研究外载荷作用下煤体声发射动态响应规律;基于分形

理论,计算声发射信号的信息维数,分析煤体损伤破坏全过程的分形时变特征,为工程实践中通过声发射检测实现煤体损伤演化评估及灾害预警提供理论依据。

1 工程概况

实验使用的煤体采集自山西某矿 3 号煤层。该矿处于第三系红层盆地与古生代基底隆起之间的过渡带,受大型山脉断裂带的影响,区域内断层较为发育,褶皱构造复杂。矿区内主要可采煤层为 3 号煤层,平均厚度为 1.8~3.5 m,煤质以无烟煤为主,灰分含量较低,硫分为 0.5% 左右。顶板主要由砂岩和泥岩构成,强度较高,但局部区域因断层影响而存在破碎带;底板则多为粉砂岩,稳定性较好,但遇水易软化。

在长期的开采过程中,该矿面临多种复杂灾害:① 煤与瓦斯突出。该矿属于煤与瓦斯突出矿井,尤其是 3 号煤层的煤与瓦斯突出风险较高。② 顶板冒落。由于矿区地质条件复杂,特别是在断层发育区,顶板管理难度大,存在顶板冒落的风险。③ 水害。矿区地下水丰富,特别是雨季期间,矿井排水压力增大。④ 火灾。矿区存在具有自燃倾向性的煤层。

2 实验装置与方案

实验装置如图 1 所示。采用峰值频率为 300 kHz 的声发射传感器,将 8 个声发射探头附着在试件表面,用于测量声发射信号。设置单轴压缩加载速率为 50 N/s,前置放大器增益为 40 dB,信号采样频率为 1 MHz,采样长度为 1 024 点(前 1/4 为预触发)。

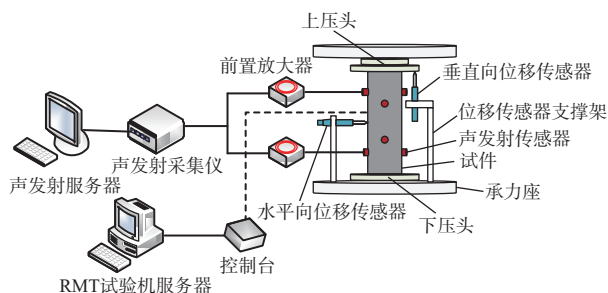


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

实验前通过多次测量煤体的声波传播速度(波速)来评估煤体的初始损伤状态。选取 3 种不同波

速的煤体制成标准试件, 编号分别为 M-01, M-02 和 M-03, 尺寸均为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。试件波速与初始损伤状态对应关系: 试件 M-01 的波速为 $2\,057\text{ m/s}$, 代表低损伤状态, 即具有较少的微裂纹, 结构相对完整; 试件 M-02 的波速为 $1\,892\text{ m/s}$, 代表中等损伤状态, 即存在一定数量的微裂纹, 但整体结构仍然较稳定; 试件 M-03 的波速为 $1\,674\text{ m/s}$, 代表高损伤状态, 即具有较多的裂纹和缺陷, 结构稳定性较差。

3 声发射响应特征

3.1 声发射能量时变特性

声发射能量作为煤体破裂的特征信号, 其大小反映了煤体损伤程度。声发射能量和累计声发射能量随时间变化曲线如图 2 所示, 将煤在单轴压缩加载条件下的损伤破坏过程分为压实阶段、线弹性阶段、弹塑性阶段、失稳破坏阶段和残余强度阶段。

1) 压实阶段。该阶段声发射能级较弱, 累计声发射能量呈缓慢增长趋势。这是因为煤体内部的孔隙在压力作用下变得致密, 只产生微弱的声发射信号。对于初始裂纹数量较多、损伤程度较高的试件, 大量裂纹闭合的叠加效应使试件在加载初期声发射能量较大, 且该阶段持续时间较短。

2) 线弹性阶段。煤体内部孔隙被压实后, 应力不足以在煤体中形成新的裂隙。煤体在应力作用下只是逐渐压缩变形, 但变形处于可逆区间。煤体的弹性变形导致煤体内部大量的弹性能量积累, 形成连续稳定的声发射信号, 累计声发射能量随时间变化曲线的斜率为恒定值。

3) 弹塑性阶段。当外加载荷强度超过屈服强度时, 煤体内部发生不可逆变形。屈服强度较低的部位开始形成新的破坏, 而屈服强度较高的部位仍处于弹性变形状态。这在一定程度上限制了新生裂纹的扩展和贯通, 导致裂纹的扩展速度较慢。受初始裂纹的影响, 虽然这一阶段累计声发射能量曲线偏离线性, 但累计声发射能量曲线斜率的增加幅度相对较小。

4) 失稳破坏阶段。在该阶段, 煤体完全进入塑性变形。煤体内部的新裂隙开始扩展并与原裂隙连接, 形成宏观破裂。由于煤体在线弹性阶段积累了大量弹性能, 在短时间内会发生宏观破裂, 损伤迅速发生。此时, 大量能量迅速释放, 声发射能量急剧增加, 累计声发射能量曲线斜率急剧上升。

5) 残余强度阶段。破坏煤体中存在不同程度的残余强度, 说明现阶段煤体仍具有一定的承载能

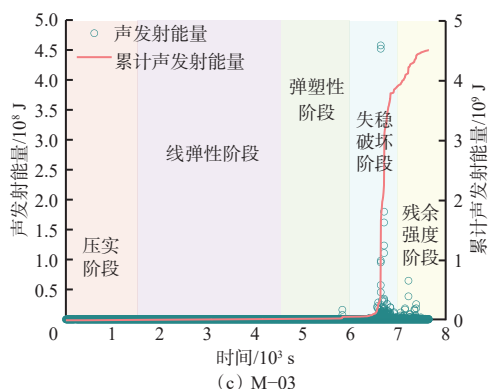
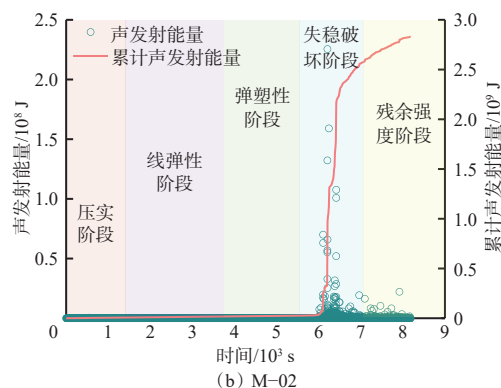
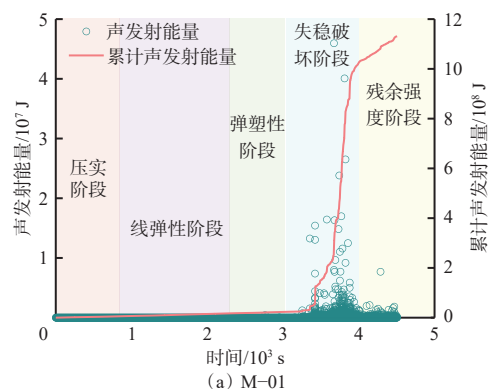


图 2 声发射能量和累计声发射能量随时间变化曲线

Fig. 2 Time-dependent variation curves of acoustic emission energy and cumulative acoustic emission energy

力。除主要的宏观破裂部分外, 其余部分还会产生许多次生裂缝。因此, 声发射能量在煤体损伤后不会迅速消失, 而是随着二次裂纹的扩展逐渐减小。

煤体损伤破坏过程中的声发射信号具有明显的阶段性特征, 失稳破坏阶段声发射能量显著增加的现象可作为煤体损伤破坏的前兆。但煤体损伤破坏的前兆信号受煤体初始损伤程度的影响, 煤体完整性越好, 其破坏过程中前兆信号越明显。

3.2 声发射能量分布特性

在煤体损伤破坏的复杂进程中, 声发射现象贯穿始终, 这一过程涉及煤体内部微观结构从初始微裂隙萌生、逐渐扩展连通, 直至宏观破裂的多个阶段。由于不同阶段煤体内部结构变化特征存在显著

差异,其所产生的声发射信号强度也呈现出明显的阶段性变化。为了深入剖析这一动态变化过程,本文基于低、中、高 3 个梯度分别设置声发射信号阈值

为 0~8, 10~80, 100~800 dB, 通过系统收集并分析不同阈值下的声发射数据, 研究煤体损伤破坏不同阶段的声发射能量分布概率, 结果如图 3 所示。

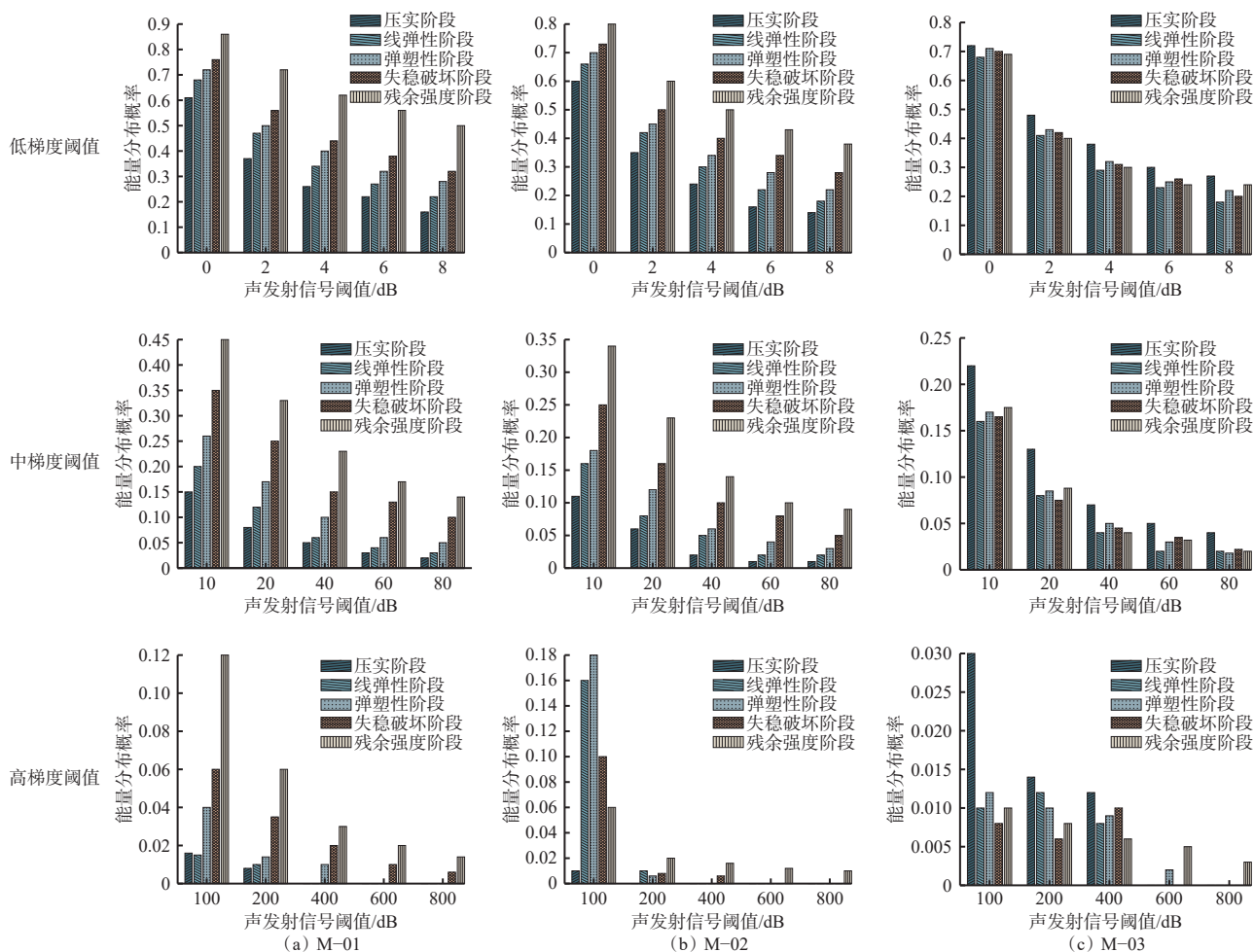


图 3 不同声发射信号阈值下声发射能量分布概率

Fig. 3 Probability distribution of acoustic emission energy at different thresholds of acoustic emission signals

煤体声发射能量存在大量零值数据点, 零值数据点对应时间段煤体尚未发生变形损伤, 仅当声发射能量高于阈值 $x_T=0$ 时, 方可判定煤体内部产生微结构活动。在低梯度阈值条件下, 全过程声发射能量超过阈值概率较高, 且随着加载进程推进, 声发射能量超过阈值概率呈递增趋势, 表明加载后期声发射信号更趋密集。在中梯度阈值条件下, 各阶段声发射能量超过阈值概率显著降低, 该阈值已滤除大部分声发射信号, 但破坏阶段声发射能量超过阈值概率显著高于其他阶段, 证明该阶段声发射能级远高于其他阶段。在高梯度阈值条件下, 各阶段声发射极值信号被有效筛选。

4 声发射分形时变特征

4.1 声发射时间序列的分形特征

基于分形理论^[21-24], 将煤体损伤破坏的声发射

时间序列按箱标度 δ 进行划分, 统计箱标度 δ 内的声发射能量信号 $I(\delta)$ 。在单轴压缩条件下, 通过线性回归拟合煤体声发射能量信号与箱标度双对数关系, 可获得信息维数 D_I , 如图 4 所示。可看出线性回归的决定系数 R^2 均大于 0.9, 表明曲线拟合度高, 线性关系强, 分形特征显著。随着声发射信号阈值从 0 逐步提升至 400 dB, 信息维数呈递减趋势。这是由于当阈值较大时, 加载初期产生的低能量声发射信号被大量滤除, 导致分形统计中有效声发射能量信号减少, 而保留的高能量声发射信号对应煤体内部裂纹萌生、扩展甚至宏观破裂形成的过程, 由高能量声发射信号构成的信息在微观层面具有有序性, 其本质在于煤体某一阶段内高能量声发射信号的离散性弱于全程加载过程。

4.2 声发射时间序列的分形分布特征

不同声发射信号阈值条件下, 声发射能量超过

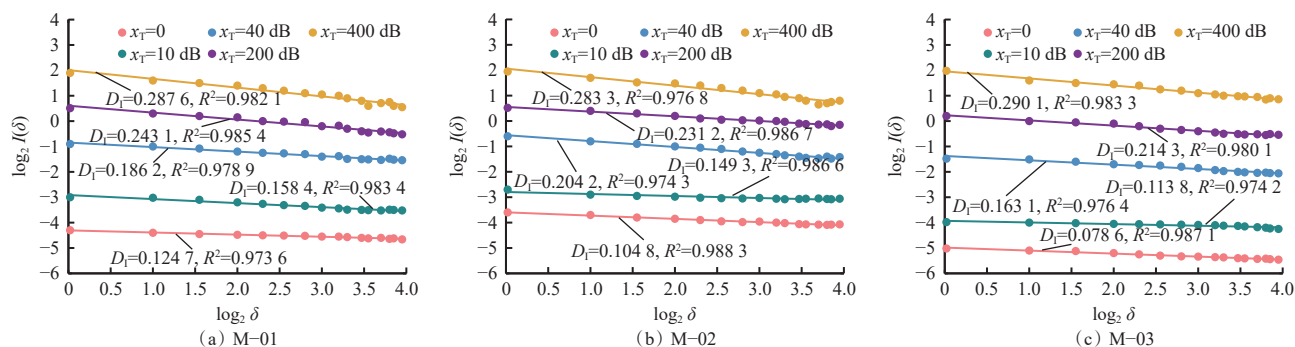


图4 声发射能量信号与箱标度的双对数拟合曲线

Fig. 4 Double-logarithmic fitting curves of acoustic emission energy signals versus box scale

阈值概率 $p(\delta)$ 与箱标度 δ 的双对数拟合曲线如图5所示。可看出在相同箱标度下,随着阈值增大,声发射能量超过阈值概率呈递减趋势。加载初期声发射能量较低,小箱标度内包含高能量声发射信号的概率较小;而加载后期煤体发生变形损伤并产生更多高能量声发射信号,大箱标度内包含高能量声发射信号的概率增大。随着阈值增大,满足绝对参与分形条件($p(\delta)=1$)的事件出现时间越晚(表现为拟合曲线与横轴交点逐渐右移),这表明声发射能量超过阈值概率相对于箱标度的无标度区间逐渐扩展,临界箱标度($p(\delta)=1$ 时对应的箱标度)随阈值增大而增大。在高阈值条件下,超过阈值采集的声发射信号更为稀疏,仅当箱标度增大至一定程度时,才能保证每个箱标度内均发生超过阈值的声发射事件。当箱

标度超过临界箱标度后,临界箱标度右侧点集平行于横轴排列,此时声发射能量信号落入箱标度的概率不再与箱标度大小相关,表明当箱标度大于临界箱标度时,每个箱标度内声发射能量超过阈值的事件必然发生。

4.3 声发射信息维数的时变特征

将试件单轴压缩加载过程的声发射时间序列按一定间隔划分为多个小段,分别计算每个小段的信息维数,得到声发射信息维数随时间变化曲线,如图6所示。可看出在整个加载过程中,信息维数呈“增大—减小—增大”的变化趋势。在加载初期,煤体内部微裂隙被压实闭合,煤体整体处于弹性变形和能量积累阶段,该阶段信息维数显著增大;随着轴向载荷不断增大,煤体弹塑性阶段微裂缝逐渐扩大,信息

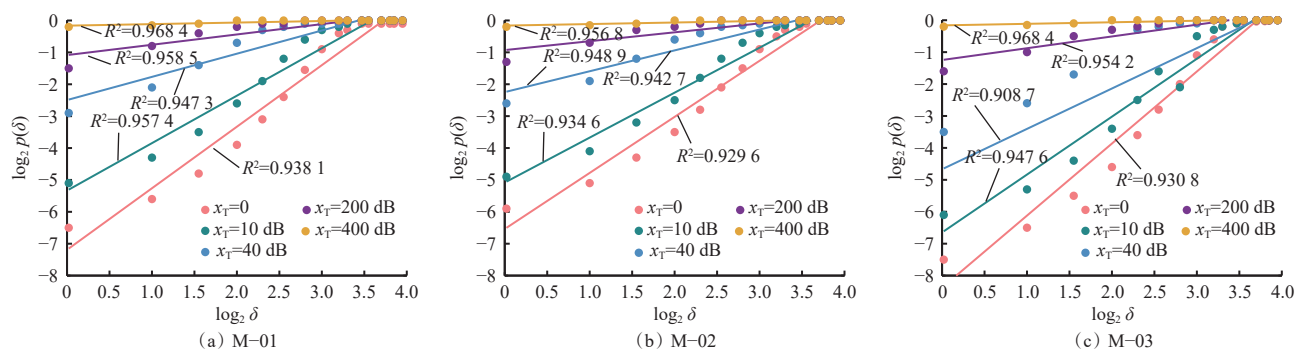


图5 声发射能量超过阈值概率与箱标度的双对数拟合曲线

Fig. 5 Double-logarithmic fitting curves of probability of acoustic emission energy exceeding the threshold versus box scale

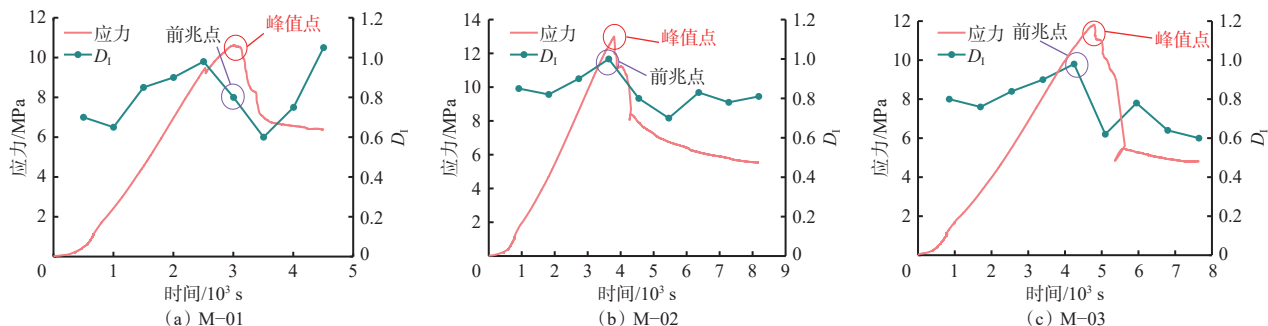


图6 声发射信息维数随时间变化曲线

Fig. 6 Time-dependent variation curves of acoustic emission information dimension

维数快速减小;在失稳破坏阶段,受媒体残余应力的影响,信息维数再次增大。煤体破坏前兆点在应力峰值点之前出现,表明在单轴加载条件下,在应力达到峰值之前煤体就开始出现破坏特征。

5 结论

1) 单轴压缩加载条件下,煤体损伤破坏过程划分为压实、线弹性、弹塑性、失稳破坏及残余强度 5 个阶段,各阶段声发射能量呈显著差异:压实阶段声发射能量微弱且增长缓慢,线弹性阶段声发射能量稳定增长,弹塑性阶段声发射能量增速趋缓,失稳破坏阶段声发射能量突增并达到峰值,残余强度阶段声发射能量逐渐衰减。其中,失稳破坏阶段的声发射能量突增与煤体宏观破裂行为具有强相关性,可作为煤体破坏的前兆信号。

2) 基于分形理论对声发射能量信号的分析表明,煤体在全加载过程中具有良好的分形特征。具体来说,信息维数随着声发射信号阈值的增大呈递减趋势,揭示了高能量声发射信号的分形结构更趋有序。加载初期因微裂纹闭合导致信息维数增大,弹塑性阶段裂纹扩展使信息维数快速减小,失稳破坏阶段宏观破裂引发信息维数再次增大。其中,信息维数快速减小阶段对应煤体内部裂纹扩展贯通的临界状态,可作为煤体宏观破坏的有效预测指标。

参考文献(References):

- [1] 崔峰,张廷辉,来兴平,等.冲击地压矿井科学产能确定初步构想[J].采矿与安全工程学报,2023,40(1): 48-59.
CUI Feng, ZHANG Tinghui, LAI Xingping, et al. Preliminary conception of scientific productivity determination in rock burst mines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 48-59.
- [2] 潘一山,肖永惠,罗浩,等.冲击地压矿井安全性研究[J].煤炭学报,2023,48(5): 1846-1860.
PAN Yishan, XIAO Yonghui, LUO Hao, et al. Study on safety of rockburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1846-1860.
- [3] 孔彪,钟建辉,陆伟,等.煤自燃过程中声波效应及前兆特征研究进展[J/OL].煤炭科学技术: 1-9[2024-08-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240407.1948.003.html>.
KONG Biao, ZHONG Jianhui, LU Wei, et al. Progress in the study of acoustic effects and precursor characteristics during spontaneous combustion of coal[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-9[2024-08-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20240407.1948.003.html>.
- [4] 李金雨,雷文杰,赵洪宝,等.重复爆破采动下煤岩冲击破坏的微震响应特征[J].中国矿业大学学报,2019,48(5): 966-974.
LI Jinyu, LEI Wenjie, ZHAO Hongbao, et al. Micro-seismic characteristics during impact failure of coal and rock under repetitive blast mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(5): 966-974.
- [5] 艾迪昊,李成武,赵越超,等.煤体静载破坏微震、电磁辐射及裂纹扩展特征研究[J].岩土力学,2020,41(6): 2043-2051.
AI Dihao, LI Chengwu, ZHAO Yuechao, et al. Investigation on micro-seismic, electromagnetic radiation and crack propagation characteristics of coal under static loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2043-2051.
- [6] 曹树刚,李勇,郭平,等.型煤与原煤全应力-应变过程渗流特性对比研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5): 899-906.
CAO Shugang, LI Yong, GUO Ping, et al. Comparative research on permeability characteristics in complete stress-strain process of briquettes and coal samples[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 899-906.
- [7] 陈结,刘博,朱超,等.基于煤样破坏声发射特征的冲击地压评价预警研究[J].煤炭科学技术,2023,51(2): 116-129.
CHEN Jie, LIU Bo, ZHU Chao, et al. Early-warning evaluation and warning of rock burst using acoustic emission characteristics of coal sample failure[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 116-129.
- [8] 邵秋冬,李其平,赵鹏翔,等.含构造煤组合体加载破裂声发射特征试验研究[J].西安科技大学学报,2024,44(2): 279-288.
SHAO Qiudong, LI Qiping, ZHAO Pengxiang, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of loading rupture of tectonic coal assembly[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(2): 279-288.
- [9] 张志博,李树杰,王恩元,等.基于声发射事件时-空维度聚类分析的煤体损伤演化特征研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊2): 3338-3347.
ZHANG Zhibo, LI Shujie, WANG Enyuan, et al. Research on the damage evolution characteristics of coal based on cluster analysis of temporal-spatial dimension of acoustic emission events[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(S2): 3338-3347.
- [10] 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.
- [11] 王笑然, 李楠, 王恩元, 等. 岩石裂纹扩展微观机制声发射定量反演[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(7): 2627-2643.
WANG Xiaoran, LI Nan, WANG Enyuan, et al. Microcracking mechanisms of sandstone from acoustic emission source inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(7): 2627-2643.
- [12] 舒龙勇, 王凯, 张浪, 等. 突出煤体受载变形破坏声发射行为演化特征[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(3): 589-597.
SHU Longyong, WANG Kai, ZHANG Lang, et al. Investigation on acoustic emission behaviour evolution characteristics of outburst coal under uniaxial compression[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(3): 589-597.
- [13] 王伟, 汪涛, 熊德发, 等. 三轴循环加卸载下砂岩声发射分形特征试验[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(2): 90-100.
WANG Wei, WANG Tao, XIONG Defa, et al. Experiment of fractal characteristics of acoustic emission of sandstone under triaxial cyclic loading and unloading[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(2): 90-100.
- [14] 孙博, 任富强, 刘冬桥. 基于声发射多重分形特征的层状板岩失稳前兆研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(3): 749-760.
SUN Bo, REN Fuqiang, LIU Dongqiao. Research on the failure precursors of layered slate based on multifractal characteristics of acoustic emission[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(3): 749-760.
- [15] 侯鹏, 高峰, 张志镇, 等. 基于声发射和能量演化规律评价岩石脆性的方法[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(4): 702-708.
HOU Peng, GAO Feng, ZHANG Zhizhen, et al. Evaluation method of rock brittleness based on acoustic emission and energy evolution[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(4): 702-708.
- [16] 姬红英, 王文博, 辛亚军, 等. 水力耦合下煤样声发射分形-渗透率模型及试验研究[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(8): 3381-3398.
JI Hongying, WANG Wenbo, XIN Yajun, et al. Acoustic emission fractal-permeability model and experimental study of coal specimens under hydraulic-loading coupling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(8): 3381-3398.
- [17] 葛兆龙, 张翔宇, 刘浩, 等. 超临界 CO₂ 作用下无烟煤孔隙结构演化时间效应规律[J]. *天然气工业*, 2024, 44(7): 97-108.
GE Zhaolong, ZHANG Xiangyu, LIU Hao, et al. Time effect laws of pore structure evolution in anthracite reservoirs under the action of supercritical CO₂[J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(7): 97-108.
- [18] 赵鹏翔, 刘云川, 韩霜莹, 等. 构造煤组合体单轴加载下裂隙演化及分形规律[J]. *西安科技大学学报*, 2023, 43(6): 1035-1044.
ZHAO Pengxiang, LIU Yunchuan, HAN Shuangying, et al. Fracture evolution and fractal law of tectonic coal combinations under uniaxial loading[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2023, 43(6): 1035-1044.
- [19] JANSSEN H. A critique on "Predicting capillary absorption of porous stones by a procedure based on an intermingled fractal units model"[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2023, 190. DOI: 10.1016/j.ijengsci.2023.103900.
- [20] WU Tao, GAO Xiangyun, AN Feng, et al. The complex dynamics of correlations within chaotic systems[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2023, 167. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.113052.
- [21] 刘洪涛, 刘勤裕, 韩子俊, 等. 基于三轴压缩的脆性煤体力学性质及其本构关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(12): 2932-2944.
LIU Hongtao, LIU Qinyu, HAN Zijun, et al. Study on mechanical properties and constitutive relation of brittle coal based on triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(12): 2932-2944.
- [22] 王登科, 魏强, 魏建平, 等. 煤的裂隙结构分形特征与分形渗流模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(1): 103-109, 122.
WANG Dengke, WEI Qiang, WEI Jianping, et al. Fractal characteristics of fracture structure and fractal seepage model of coal[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(1): 103-109, 122.
- [23] 丁鑫, 肖晓春, 吕祥锋, 等. 煤体破裂分形特征与声发射规律研究[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(11): 3080-3087.
DING Xin, XIAO Xiaochun, LYU Xiangfeng, et al. Investigate on the fractal characteristics and acoustic emission of coal fracture[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(11): 3080-3087.
- [24] 郝家旺, 李庆文, 乔兰, 等. 高温作用后砂岩的孔隙分形特征与岩石本构模型研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(2): 142-148.
HAO Jiawang, LI Qingwen, QIAO Lan, et al. Study on pore fractal characteristics and rock constitutive model of sandstone after high temperature[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2024, 52(2): 142-148.