

# 砂岩破裂状态声发射梅尔倒谱系数判识方法

何学秋<sup>1,2</sup>, 杨菲<sup>1</sup>, 李振雷<sup>1,2</sup>, 李娜<sup>1</sup>, 宋大钊<sup>1,2</sup>,  
王洪磊<sup>1,2</sup>, SOBOLEV Aleksei<sup>3</sup>, RASSKAZOV Igor<sup>3</sup>

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083; 3. 俄罗斯科学院远东分院矿业研究院, 哈巴罗夫斯克 680000)

**摘要:** 岩体结构破裂是严重制约矿山、地铁、隧道等地下空间工程建设及其安全运行的重要因素。实现对岩体结构破裂状态的识别是当下研究的热点与重点之一。为此, 开展了不同条件的砂岩加载破坏实验, 提取了加载全程的声发射梅尔倒谱系数及其波动差, 研究了系数及其波动差在砂岩受载破坏全程的变化规律, 分析了1号系数(一组声发射梅尔倒谱系数包括12个, 1号系数指第1个声发射梅尔倒谱系数)及其波动差与砂岩破裂状态的相关性特征, 基于此提出了砂岩破裂状态声发射梅尔倒谱系数判识方法, 构建了判识准则并进行判识效果检验。结果表明: 随载荷增加, 1号系数整体上增大, 系数及其离散性在破坏阶段显著增大并表现出显著的规律波动性特征; 1号系数波动差具有阶段性变化特征, 波动差的大小及其起伏变化可表征砂岩的破裂, 波动差整体增大及突增的变化可反映砂岩非稳定变形和峰后破坏阶段的宏观破裂, 波动差的突增幅度可反映砂岩破裂程度; 声发射梅尔倒谱系数及其波动差对砂岩破裂表现出良好的响应特征, 该特征受不同加载条件的影响较小, 说明声发射梅尔倒谱系数在反映砂岩破裂上具有适用性; 1号系数及其波动差与砂岩破裂状态具有较好相关性, 该相关性可分为3个阶段, 即1号系数及其波动差在砂岩微破裂阶段分布集中, 在临近失稳破坏阶段分布范围急剧增大、整体值升高且出现高异常值, 在峰后破坏阶段分布范围进一步增大、整体值更高、高异常值更多; 利用1号系数的75%位点值和异常值、1号系数波动差的75%位点值和异常值构建了砂岩破裂状态判识准则, 采用三分类模型混淆矩阵对判识准则的效果进行了检验, 判识准确度和精准度分别为90.43%、94.45%。该成果可为其他种类煤岩的破裂状态识别提供借鉴, 为煤岩失稳监测预警提供参考。

**关键词:** 砂岩破裂状态; 声发射; 梅尔倒谱系数; 判识方法

中图分类号: TD76 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)02-0753-14

## Methodology for identifying the damage state of sandstone using Mel-frequency cepstral coefficient of acoustic emission

HE Xueqiu<sup>1,2</sup>, YANG Fei<sup>1</sup>, LI Zhenlei<sup>1,2</sup>, LI Na<sup>1</sup>, SONG Dazhao<sup>1,2</sup>, WANG Honglei<sup>1,2</sup>, SOBOLEV Aleksei<sup>3</sup>,  
RASSKAZOV Igor<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk 680000, Russia)

收稿日期: 2024-01-03 修回日期: 2024-02-08 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0165

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374180, 52327804); 国家高端外国专家资助项目(G2023105017L)

作者简介: 何学秋(1961—), 男, 辽宁辽阳人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: hexq@ustb.edu.cn

通讯作者: 李振雷(1988—), 男, 山东菏泽人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: lizhenlei@ustb.edu.cn

引用格式: 何学秋, 杨菲, 李振雷, 等. 砂岩破裂状态声发射梅尔倒谱系数判识方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 753-766.

HE Xueqiu, YANG Fei, LI Zhenlei, et al. Methodology for identifying the damage state of sandstone using Mel-frequency cepstral coefficient of acoustic emission[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 753-766.



移动阅读

**Abstract:** Rock mass structure rupture is an important factor that seriously restricts the construction and safe operation of underground space engineering projects such as mines, subways and tunnels. Realizing the identification of rock mass fracture state is one of the hotspots and emphases of current research. In this study, some experiments of sandstone loading failure under different conditions were carried out, the acoustic emission Mel-frequency cepstral coefficient (MFCC) and its fluctuation difference during the whole loading process were extracted, the variation law of the coefficient and its fluctuation difference during the whole loading failure process was studied, and the correlation characteristics of coefficient No.1 (According to the calculation of acoustic emission Mel-frequency cepstral coefficients, it can be seen that a set of acoustic emission Mel-frequency cepstral coefficient includes 12, and coefficient No.1 refers to the first Mel-frequency cepstral coefficient) and its fluctuation difference with the fracture state of sandstone were analyzed. Based on this, a method to identify sandstone fracture state using the Mel-frequency cepstral of acoustic emission was proposed, and the identification criteria was constructed. The identification effect was finally verified. The results show that with loading increase, the coefficient No.1 increases as a whole, and the coefficient value and its discreteness increase significantly in the failure stage and show significant regular fluctuations. The fluctuation difference of the coefficient has the characteristics of periodic variation. The size of the fluctuation difference and its fluctuation can characterize the fracture of sandstone. The overall increase and sudden increase of the fluctuation difference can reflect the macroscopic fracture of sandstone in the unstable deformation and post-peak failure stage, and the sudden increase level of the fluctuation difference can reflect the fracture degree of sandstone. The acoustic emission Mel-frequency cepstral coefficient and its fluctuation difference show good response characteristics to sandstone fracture, which is less affected by different loading conditions, thus they have applicability in reflecting sandstone fracture. The coefficient No.1 and its fluctuation difference have a good correlation with the fracture state of sandstone. The correlation can be divided into three stages as: in the micro-fracture stage of sandstone, the coefficient No.1 and its fluctuation difference are intensively distributed; in the unstable deformation stage just prior to the peak load, the distribution range increases sharply, the overall value increases and the high abnormal value appears; in the post-peak failure stage, the distribution range further increases, the overall value is higher, and more high abnormal values appear. The identification method and criteria of sandstone fracture state were constructed by using the 75% site value and outliers of coefficient No.1 and the 75% site value and outliers of the fluctuation difference of coefficient No.1. The effect of the identification criteria was tested by the confusion matrix of the three-classification model. The accuracy and precision of identification are 90.43% and 94.45%, respectively, which indicate the identification effect is good. The results can provide a reference for the identification of the fracture state of other types of coal and rocks, and for the monitoring and early warning of coal rock instability.

**Key words:** sandstone damage state; acoustic emission (AE); Mel-frequency cepstral coefficient (MFCC); identification method

岩体破裂是严重制约矿山、地铁、隧道等地下空间工程建设及其安全稳定运行的重要因素之一<sup>[1]</sup>。对岩体破裂状态的准确识别可为岩体灾害防治提供理论基础,对工程现场的监测预警具有指导意义。

声发射技术作为一种地球物理方法,通过采集岩体破裂时的声发射信号特征分析岩体的变形状态,具有工作量小、时空上动态连续等特点<sup>[2-3]</sup>。它是国内外探测地下开采过程常用的判断岩体受力状态和稳定性的有力手段之一<sup>[4-5]</sup>。同时,声发射技术被广泛应用于室内岩石破裂研究,相关成果可为工程应用提供支撑。李炜强等<sup>[6]</sup>利用高速摄像和声发射技术对岩石压缩破坏全程进行测试,发现岩石的声发射演化特征与各变形阶段有着良好的对应关系,其能够准确揭示

微裂纹演化导致岩石宏观破坏的力学行为。董陇军等<sup>[7]</sup>指出, $b$ 值、RA值(上升时间与幅值的比值)、AF值(振铃计数与持续时间的比值,平均频率)、频率等声发射参数的阶段性变化趋势能够从损伤程度、破裂尺度和破裂类型等角度揭示岩石内部微裂纹演化行为。孙飞跃等<sup>[8]</sup>对比分析了不同中间主应力下岩样的声发射特性随破坏形态的变化规律。除完整岩石外,工程实际中大多是因复杂应力环境而导致富含节理裂隙的岩石,因此大量学者也利用声发射技术聚焦于含裂隙岩石的研究。WANG等<sup>[9]</sup>采用声发射技术研究了含裂纹岩石的整个渐进破坏过程,表明声发射事件随不同裂纹角度试样的应力变化呈现出不同的特征,越到裂隙丰富发展的加载后期,声发射越活跃。

武旭等<sup>[10]</sup>利用声发射技术探究了裂隙对裂纹起裂应力、裂纹扩展路径等破裂特征的影响规律。此外,研究表明,岩石在破坏前常出现声发射能量数突增<sup>[11]</sup>、振铃计数率突增<sup>[12]</sup>、声发射  $b$  值骤降<sup>[13-14]</sup>、主频分布逐渐增强<sup>[15-16]</sup>、声发射分维数降低<sup>[17]</sup>等,这些成果有助于判识岩石破裂状态。然而,同种岩石在不同加载条件甚至同种加载条件下受载破裂时,声发射参数的变化特征和变化幅度具有较大差异性,这使得准确量化判识岩石的破裂状态较为困难。

近年来,部分学者利用声波领域的梅尔倒谱分析法,提取了煤岩受载破坏过程的声发射梅尔倒谱系数,发现其在研究煤岩破裂方面具有优势。WANG 等<sup>[18]</sup>研究指出不同加载速率单轴压缩下煤的声发射梅尔倒谱系数与应力状态呈线性相关,并分析了 0.7、0.9、1.0 等应力状态时的分布特征,由此评价煤的稳定状态。李振雷等<sup>[19]</sup>利用机器学习方法,提取单轴加载下煤的声发射梅尔倒谱系数作为样本特征,构建了煤破坏状态机器学习预测模型并研究得到影响预测效果的关键样本特征,提高了预测的准确性。对于岩石,通过开展不同角度预制裂纹砂岩的单轴压缩实验,研究发现<sup>[20-21]</sup>,声发射梅尔倒谱系数与传统特征参数相比具有稳定性优势,系数的波动性与砂岩的应力降及其破裂之间具有显著的对应关系,波动性变化可反映砂岩裂隙的扩展演化,利用该波动性变化探讨了砂岩破坏的前兆特征,证实了声发射梅尔倒谱系数用于岩石破裂分析的优越性,为砂岩破裂状态分析提供了一种新思路。

综上所述,声发射梅尔倒谱系数在岩石破裂分析

方面具有一定优势,但对于复杂加载路径下砂岩破坏过程声发射梅尔倒谱系数的适用性仍有待研究;此外,亟需提出一种针对于砂岩破裂状态的量化判识方法。针对此,开展了不同条件的砂岩加载破坏实验,提取了加载全程的声发射梅尔倒谱系数,分析了声发射梅尔倒谱系数与砂岩破裂状态的相关性特征,基于此构建了砂岩破裂状态判识方法,为岩体结构破裂监测预警提供支撑。

## 1 实验与方法

### 1.1 实验系统

笔者搭载了煤岩加载实验系统,如图 1 所示。实验系统主要包括动力加载控制系统和声发射数据采集处理系统。压力机采用 YAW-600 微机控制电源伺服岩石试验机,该试验机可实现煤岩的单轴压缩、分级加载、循环加卸载等实验,具备试验力、变形、位移 3 种控制方式,加载过程中可同时采集载荷、位移、时间等数据。声发射信号数据采集处理装置采用 DS5 系列全信息声发射信号分析系统,主要包括 DS5-8B 全信息声发射采集仪、传感器、放大器、DS5 声发射软件等。声发射采集仪的采样频率设置为 3 MHz,前置放大器的放大倍数为 20、40 和 60 dB 可调。实验全程用摄像机录像,采样频率为 30 fps,成像分辨率为 1 920×1 080(全高清),可获得整个实验过程的视频信息。实验中每个试样布置 8 个传感器,其中,1~4 号传感器布置在试验机压头的前后左右 4 个方向上,5~8 号传感器布置在试验机加载台的同样 4 个方向上,各传感器均距试样端面 5 mm。

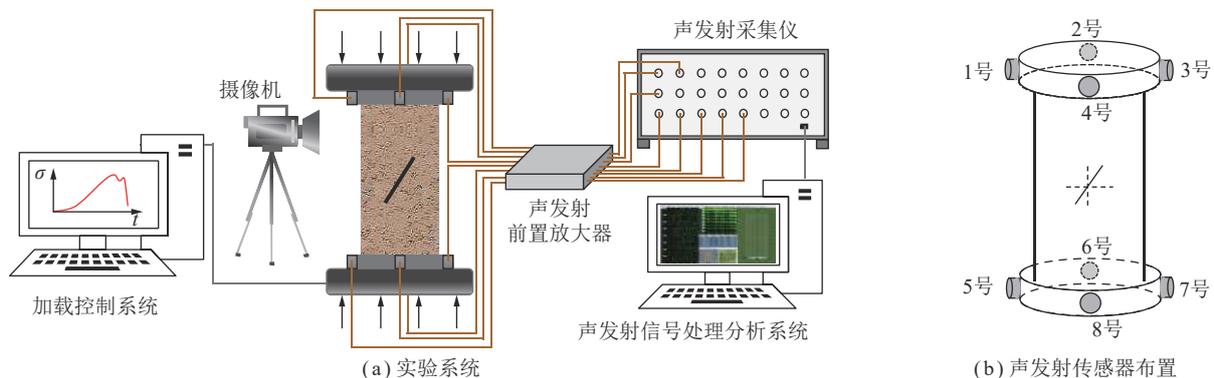


图 1 实验系统和声发射传感器布置示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system and acoustic emission sensor arrangement

### 1.2 试样制备与加载方案

实验采用质地均匀、完整性好、原生缺陷少的大块粗砂岩,按照国际岩石力学学会的标准通过切割、钻心、打磨加工成 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体砂岩试样,试样端面平整度误差不超过 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。对于预制

裂纹粗砂岩试样,使用机床岩石切割机对部分完整试样表面中部进行切割,制成长度为 40 mm、宽度为 2.5 mm、最深度处为 12.5 mm、与水平方向成  $\beta$  倾角的预制裂纹, $\beta$  分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$ ,试样如图 2 所示。

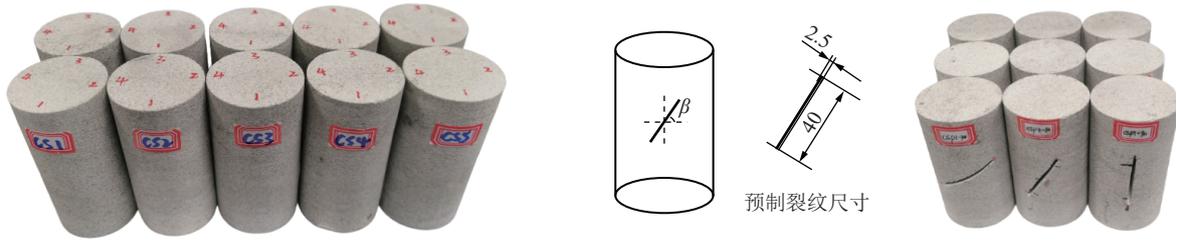


图2 预制裂纹尺寸及砂岩试样实照

Fig.2 Size of prefabricated crack and photographs of sandstone specimens

对完整试样采用单轴加载、分级加载以及循环加载卸载等 3 种加载方式,对预制裂纹试样采用单轴加载方式。实验均采用位移控制加载,单轴加载速率设为  $5 \mu\text{m/s}$ ;分级加载实验设定 5 级载荷:0、20、40、60、

80 kN,施加载荷达到每个阶段的预设载荷后保持载荷恒定 60 s,加载速率设为  $5 \mu\text{m/s}$ ;循环加载的加载率设定 5 级:0、20、40、60、80 kN,卸载载荷设为 5 kN,加载速率和卸载速率均设为  $5 \mu\text{m/s}$ 。加载方案见表 1。

表 1 加载方案

Table 1 Loading program

试样类型	与水平方向夹角 $\beta/(\circ)$	试样编号	试样数量/个	加载方式	试样平均强度/MPa
完整粗砂岩	—	DZ-1、DZ-2、DZ-3	3	单轴加载	44.75
		FJ-1、FJ-2、FJ-3	3	分级加载	
		XH-1、XH-2、XH-3	3	循环加卸载	
预制裂纹粗砂岩	30	CSP1、CSP2、CSP3	3	单轴加载	44.75
	60	CSP4、CSP5、CSP6	3		
	90	CSP7、CSP8、CSP9	3		

### 1.3 声发射梅尔倒谱系数提取方法

在声音处理领域中,梅尔频率倒谱是基于声音频率的非线性梅尔刻度的对数能量频谱的线性变换。求解梅尔倒谱系数的步骤如下:

(1) 将信号分帧。声发射数据的采样频率为 3 MHz,将信号分成 20 ms 一帧。于是信号的帧长度为 60 000 个采样点,即每帧数据的长度为 60 000。为减少帧与帧间的变化过大,相邻帧之间会重叠一段长度,称为帧长,笔者取 10 ms(30 000 个采样点),即前 60 000 个样本帧从样本 0 开始,下一个 60 000 个样本帧从采样点 30 000 开始,依此类推,直到到达信号的末尾。

(2) 加汉明窗。为了增加声发射信号分帧后每一帧与相邻帧之间的连续性,对帧信号  $s$  进行窗函数处理得到信号  $s'$ ,汉明窗能有效减少频率的泄漏,笔者选择汉明窗函数进行处理,即让波形的每一帧信号乘以汉明窗函数。可由式 (1)<sup>[22]</sup>计算:

$$s'(n) = s(n) \left[ \alpha - (1 - \alpha) \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) \right], 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

式中, $s(n)$  为信号  $s$  的第  $n$  个值; $s'(n)$  为加窗信号  $s'$  的第  $n$  个值; $N$  为每帧数据的长度; $\alpha$  为汉明窗系数,参

考文献[23]本文取 0.54。

得到帧信号后,对每一帧信号进行以下处理。

(3) 对每一帧信号进行离散傅里叶变换,将声发射信号从时域转换到频域,计算公式<sup>[24]</sup>为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s'(n) \exp \left( -i \frac{2\pi}{N} nk \right), 0 \leq k \leq N-1 \quad (2)$$

式中, $X(k)$  为功率谱  $X$  的第  $k$  个值。

并对每帧信号的频谱取模平方得到信号的功率谱,公式为

$$P(k) = |X(k)|^2 \quad (3)$$

(4) 滤波并提取对数能量谱。将所得线性的自然频谱转换为符合人类听觉特性的梅尔频谱。通过一组三角梅尔滤波器组滤波,可以得到每个梅尔滤波器的输出能量,然后取对数,得到相应频带的对数功率谱,公式如下:

$$l(m) = \ln \left( \sum_{k=1}^{N-1} P(k) H_m(k) \right), m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中, $l(m)$  为对数能量  $l$  的第  $m$  个值; $M$  为滤波器总数; $H$  为滤波器组; $H_m(k)$  为第  $m$  个滤波器转换函数的第  $k$  个值。

(5) 离散余弦变换。对上述对数滤波能量进行离散余弦变换,用式(5)<sup>[25]</sup>计算。把频谱倒在时域上,得到一组26个MFCC系数,通常保留系数中前12、13个,本文选择前12个。

$$C(h) = a_n \sum_{m=0}^{M-1} l(m) \cos\left(\frac{n\pi}{M}\left(m + \frac{1}{2}\right)\right), h = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (5)$$

式中,  $C(h)$  为梅尔倒谱系数的第  $h$  个系数;  $L$  为梅尔倒谱系数的数量;  $a_n$  为正交系数,  $a_n = \begin{cases} 1/\sqrt{L}, n=0 \\ \sqrt{2/L}, n \neq 0 \end{cases}$ 。

每一帧声发射信号经过处理之后,就会得到一组梅尔倒谱系数(包含12个),梅尔倒谱系数就是声发射信号的另一种表征形式,可以更加直观地描述声发射信号随砂岩损伤破坏的变化。

## 2 砂岩受载破裂声发射梅尔倒谱系数响应特征

利用1.3节所述方法,将砂岩损伤破坏过程中的声发射数据分割成每段20 ms的片段,帧步长为10

ms,利用Python程序中的librosa模块提取砂岩破裂过程中所有通道的声发射梅尔倒谱系数,选取梅尔倒谱系数的前12个系数作为声发射的特征参数,MFCC- $f$ 表示第 $f$ 号声发射梅尔倒谱系数。

文献[20]研究表明,在整个加载的不同阶段,MFCC-1(即1号梅尔倒谱系数)与试样受力状态具有良好的响应特征。文献[21]研究表明,对同种砂岩的不同试样,由不同通道采集的声发射信号提取的同号梅尔倒谱系数的变化特征相似、变化量相近、偏差程度小。因此,笔者用2号声发射传感器采集的声发射信号来提取声发射梅尔倒谱系数,进一步分析MFCC-1随砂岩受载破裂的变化特征。

### 2.1 砂岩破裂过程声发射梅尔倒谱系数波动性特征

为了能更加清晰地反映出砂岩受载破坏过程中声发射梅尔倒谱系数的变化规律,以完整试样DZ-1的2号通道为例,选用rolling(g).mean()函数对砂岩试样的MFCC-1进行滑动平均处理,其中 $g$ 取10,滑动步长为0.01 s,得到图3所示的加载全程MFCC-1及应力曲线的变化关系。

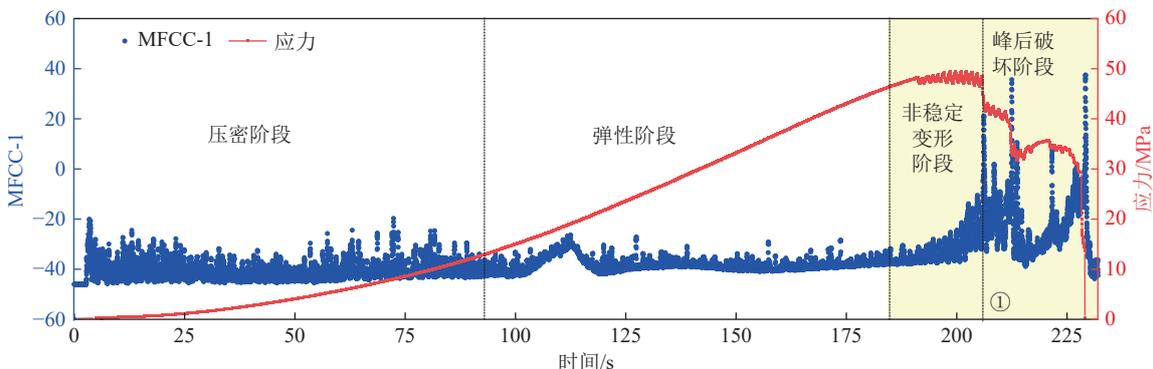


图3 完整试样DZ-1单轴加载全程MFCC-1及应力曲线变化关系

Fig.3 Relationship between MFCC-1 and stress curve of complete specimen DZ-1 under uniaxial loading

由图3可以看出,随试样载荷的增加,经过滑动平均处理后的MFCC-1的变化规律较为显著。在整个加载过程中,MFCC-1整体随载荷的增加而缓慢增长,加载前期MFCC-1大都在-20以下,愈是临近加载后期MFCC-1就越大,特别是非稳定变形和峰后破坏阶段,大量MFCC-1在-10以上,有些甚至高达40。具体而言,在压密和弹性阶段,MFCC-1的变化整体保持稳定、波动范围小,压密阶段在-48~-20以内波动,弹性阶段在-42~-25以内波动;在非稳定变形和峰后破坏阶段,MFCC-1整体增大且伴随着明显的突增突降现象,波动范围较大,主要为-40~-10,少数可达-40~40。

图4(a)给出了试样DZ-1在非稳定变形和峰后破

坏阶段的局部放大图,可知,试样由于大量破裂而产生数次应力降,应力曲线整体表现出周期性波动,与之对应,MFCC-1也出现显著的周期性波动,并且波动的增幅与应力降的降幅成正比;试样破裂越剧烈,应力降幅度越大,则MFCC-1波动增幅越大,表明MFCC-1不同波动剧烈程度可反映试样不同破裂程度。

图4(b)~(d)给出了完整砂岩分级加载、循环加载和预制裂纹砂岩单轴加载的非稳定变形及峰后破坏阶段的MFCC-1及应力曲线的变化关系。可以看出,这3种加载条件下,加载破裂后期,砂岩试样的MFCC-1都表现出显著的周期性波动性特征,并且周期性波动的幅度与应力降幅度和试样破裂剧烈程度相关联。此外还发现,在这4种加载条件下,MFCC-1

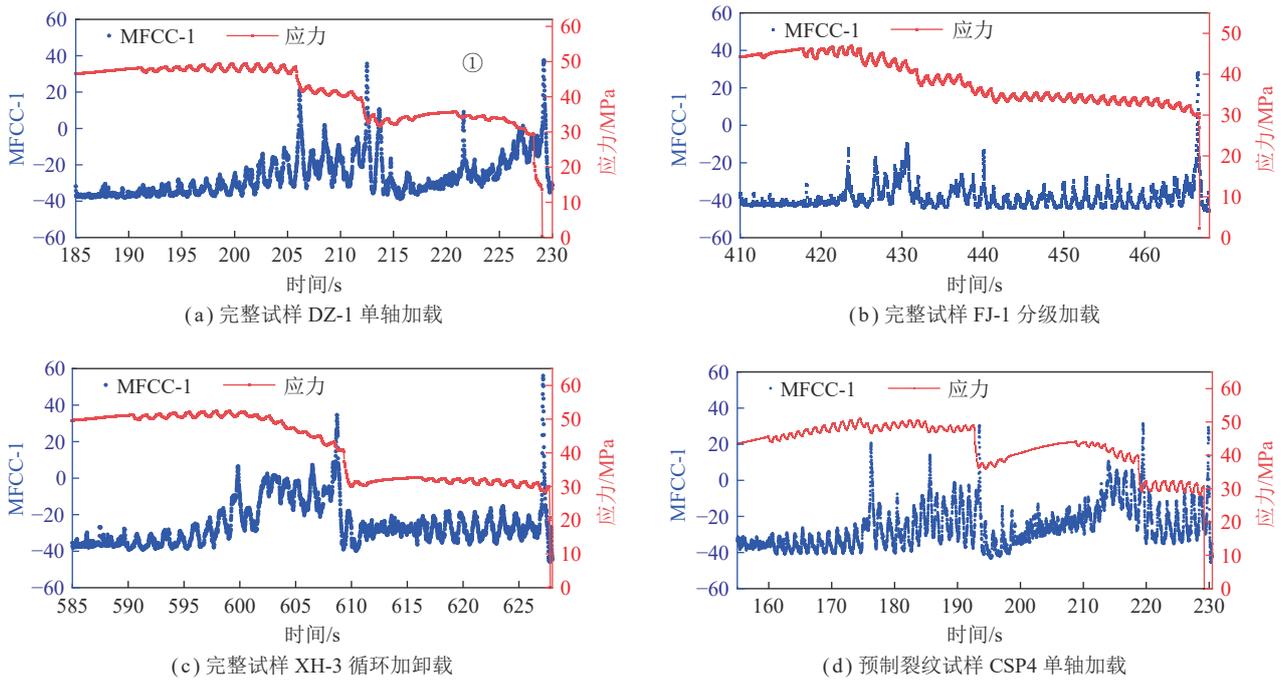


图 4 不同加载条件下砂岩试样非稳定变形及峰后破坏阶段 MFCC-1 及应力曲线的变化关系

Fig.4 Relationship between MFCC-1 and stress curves of sandstone specimens at the unstable deformation and post-peak failure stage under different loading conditions

整体都在-40~40 内波动。

综上所述,对于本研究选用的砂岩,在不同加载条件下,所有砂岩试样受载破裂过程声发射梅尔倒谱系数均表现出较为一致的响应特征,随载荷增加,其整体值增大,在破坏阶段 MFCC-1 及其离散性显著增大,且表现出显著的波动性特征,其波动变化可反映砂岩破裂程度,这表明声发射梅尔倒谱系数在反映砂岩破坏上具有普适性。

### 2.2 砂岩破裂过程声发射梅尔倒谱系数波动差特征

#### 2.2.1 预制裂纹试样受载破裂声发射梅尔倒谱系数波动差特征

由 2.1 节可知声发射梅尔倒谱系数的周期波动性变化可反映砂岩受载破裂情况,为量化分析上述周期

性波动特征,参考文献[21],把声发射梅尔倒谱系数周期性波动的波峰与波谷之差定义为声发射梅尔倒谱系数周期性波动差(以下简称“波动差”),以 3 s 时间窗和 1 s 滑移步长来提取砂岩加载全程 MFCC-1 的波动差数据。

图 5 为预制裂纹试样 CSP6 单轴加载全程 MFCC-1 的波动差变化曲线,可以看出,压密阶段(A<sub>1</sub>B),波动差起伏大,这是由于试样内部原生裂隙在压密过程伴随摩擦错动而产生大量声发射信号;弹性阶段(BC),试样状态较为稳定,波动差整体也呈现一个较为稳定的状态,起伏很小,与该阶段产生破裂数量少和声发射信号少有关;非稳定变形和峰后破坏阶段(C点以后),波动差整体呈现逐渐增大的态势,应力曲线出现

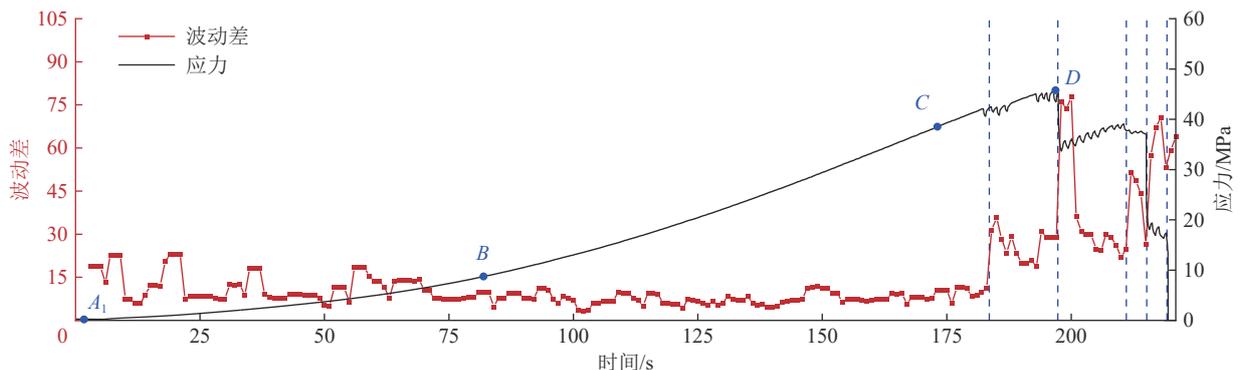


图 5 预制裂纹试样 CSP6 单轴加载全程 MFCC-1 波动差变化曲线

Fig.5 Variation of MFCC-1 fluctuation difference in the whole uniaxial loading process of prefabricated cracked specimen CSP6

较大应力降时,波动差有突增,可达之前的3倍以上,同时,波动差的增幅与应力降的降幅呈正相关,而应力降的降幅可反映试样的破裂程度。由此,在峰值应力前产生的微小破裂、峰后每一次破裂及其剧烈程度上,MFCC-1波动差都可表现出较好的响应,其对破裂表现出良好的前兆响应特征。

### 2.2.2 不同加载条件砂岩破裂声发射梅尔倒谱系数波动差特征

对于不同加载条件下砂岩破裂过程,MFCC-1波动差也表现出类似的响应特征。图6给出了完整砂岩试样单轴加载、分级加载、循环加卸载等实验条件下的MFCC-1波动差变化曲线。

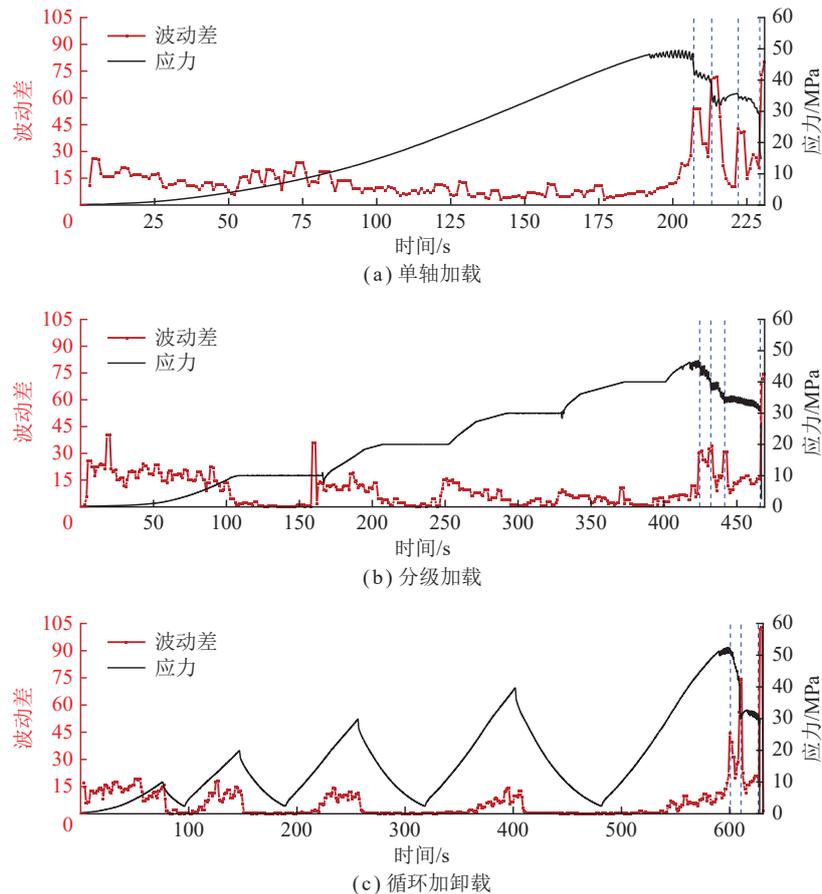


图6 不同加载条件下完整试样加载全程MFCC-1波动差变化曲线

Fig.6 Variation of MFCC-1 fluctuation difference in different loading conditions of intact sandstone specimens

对比图6(a)和图5可看出,试样本身是否存在预制裂纹对单轴加载条件的MFCC-1波动差变化特征的影响较小,单轴加载试样的MFCC-1波动差表现出一致的响应特征,具体表现为:压密阶段起伏较大,弹性阶段变化稳定,破坏阶段波动差整体逐渐增大,大幅度的应力降与波动差急剧增大相对应。

在分级加载的保载阶段和循环加卸载的卸载阶段,MFCC-1波动差小且分布稳定;在分级加载和循环加卸载的每一级加载阶段,MFCC-1波动差均较高且有起伏变化,如图6(b)、(c)所示。在保载阶段和卸载阶段,试样不出现原生裂隙的进一步压密且不产生新的破裂,与之相反,在每一级加载阶段,试样会出现旧破裂的进一步压密或产生新的破裂,这说明,MFCC-1波动差仅对新破裂产生和旧破裂摩擦导致的振动具

有显著响应。

进一步,分级加载和循环加卸载的第1、2级加载阶段可对应试样压密阶段,MFCC-1波动差及其起伏均较大;此后的各级加载阶段至非稳定变形之前可对应试样弹性阶段,MFCC-1波动差及其起伏均有明显降低。进行分级加载和循环加卸载的试样,在非稳定变形和峰后破坏阶段内的MFCC-1波动差的变化特征,与进行单轴加载试样的相同阶段内MFCC-1波动差的变化特征具有较高一致性:临近峰值应力前,波动差表现为逐渐增大,在峰后破坏阶段,裂纹发育扩展导致多次应力降,波动差整体增大,并且,波动差急剧增大与大幅度的应力降相对应,波动差的增幅与应力的降幅呈正相关。分级加载和循环加卸载的各个加载阶段仍可分别对应试样变形破裂的压密、弹性、

非稳定变形和峰后破坏阶段,且各个典型阶段的MFCC-1波动差变化特征与单轴加载条件下分别对应。

综上,在不同加载条件下,本研究的所有砂岩试样受载破裂过程的声发射梅尔倒谱系数波动差表现出较为一致的响应特征。MFCC-1波动差的大小及其起伏变化可表征砂岩的破裂,波动差整体值增大以及突增的变化可反映试样非稳定变形和峰后破坏阶段的宏观破裂,波动差的突增幅度可反映试样破裂程度,波动差对砂岩破裂表现出良好的响应特征,再次证明声发射梅尔倒谱系数在反映砂岩破坏上具有普适性。

### 3 声发射梅尔倒谱系数与砂岩破裂状态的相关性特征

#### 3.1 声发射梅尔倒谱系数随砂岩破裂状态的分布特征

以某时刻试样承受的载荷与其能承受的峰值载荷之比作为此时刻试样的破裂状态。峰值载荷前,各类破裂状态使用正值表示,以0.1为标度,把(0,0.1]范围内的破裂状态定义为0.1破裂状态,以此类推,1破裂状态指的是(0.9,1]范围内的破裂状态;峰值载荷后,破裂状态以负值表示,标度为-0.2,则-0.8破裂状态对应(1,-0.8]范围内的破裂状态。由此可知,由正值表示的破裂状态值越大、越接近1,则表示试样越接近其强度极限、越容易破坏,而由负值表示的破裂状态

值越小、越远离1,则表示试样已经发生破坏且破坏程度越高。据此,提取不同实验条件各试样处于不同破裂状态的MFCC-1进行分析。

图7为4种实验条件下MFCC-1随试样不同破裂状态的分布特征。可以看出,对本研究选定的不同实验条件,试样受载破坏全程中MFCC-1的变化特征相似,在不同破裂状态下的变化特征可分为3个阶段:①峰值载荷前的(0,0.9]范围内的各个破裂状态下,不同实验条件试样的MFCC-1分布较为密集且值相近,大部分在-40左右,且异常值的数量随破裂状态的增大逐渐减小;②临近峰值载荷阶段,即破裂状态(0.9,1],MFCC-1分布较为离散且整体有所增大,MFCC-1高值数量增多;③峰值载荷之后的各个破裂状态下,MFCC-1较于之前整体快速增大,使得均值和中值显著增大,MFCC-1分布范围变大,而不同实验条件的MFCC-1数值范围略有差异,这与试样不同的破裂情况有关,比如,对比图7(d)及图3,2者的变化情况一致,特别是峰值载荷之后,各个破裂状态的MFCC-1分布特征可反映出试样的破裂特征,试样212s时的破裂发生在-0.8破裂状态下,其MFCC-1突增,可高达20及以上。

从4种实验条件中各选出一个试样,DZ-1、FJ-1、XH-3、CSP6,用于对第4节提出的判识方法进行检验,以上述方法对其余试样进行处理,得到14个砂岩试样在不同破裂状态下MFCC-1的统计分布特征,如

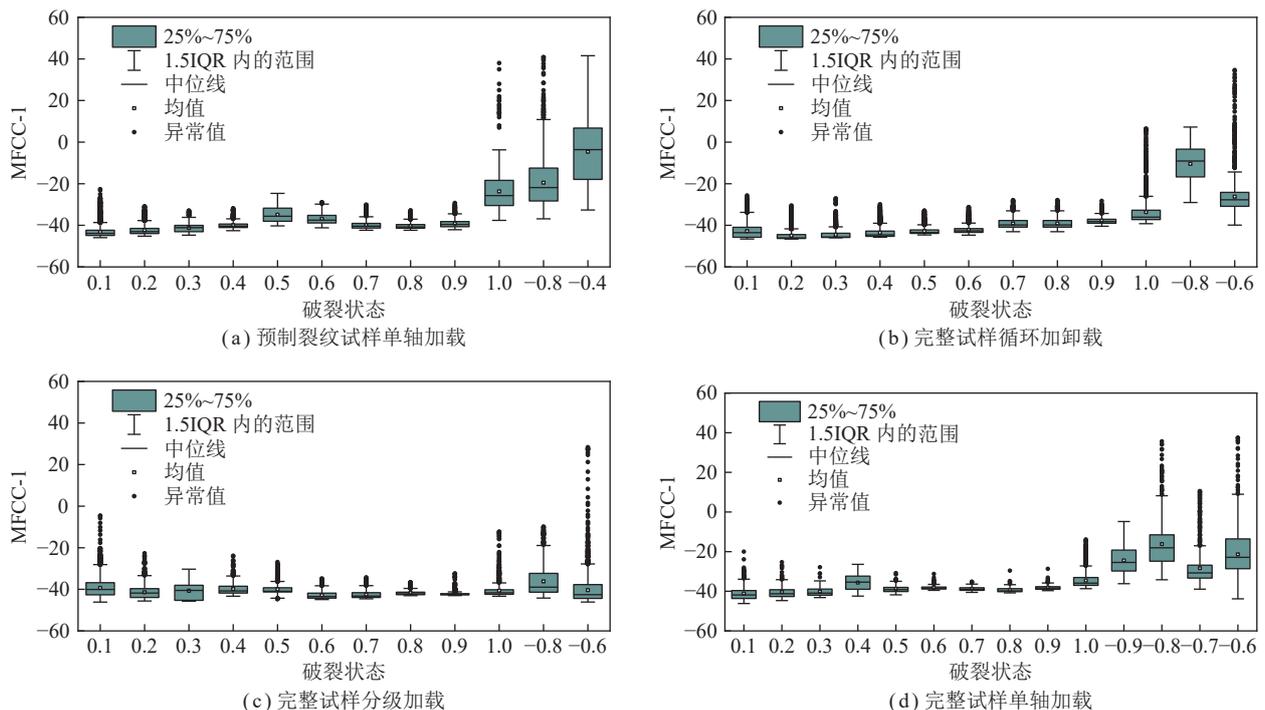


图7 不同实验条件下MFCC-1随砂岩破裂状态的分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of MFCC-1 with sandstone fracture state under different experimental conditions

图 8 所示。对比图 7 和图 8 可知, 14 个砂岩试样 MFCC-1 随破裂状态的统计分布特征与不同实验条件下单个试样的分布特征具有一致性。

根据 MFCC-1 的分布特征将砂岩破裂状态分为 3 个阶段, 具有如下规律: ① 峰值载荷前的 (0, 0.9] 范围内, 各破裂状态下超过 75% 的 MFCC-1 处于 -28 以下, 异常值大多在 0 以下; ② 临近峰值载荷阶段, MFCC-1 逐渐增大, 75% 位点值在 -28 ~ -18, 异常值增大, 大部分为 0 以上; ③ 峰值载荷之后的各个破裂状态下, MFCC-1 及离散性持续增大, 75% 位点值大于 -18, 高异常值增多, 异常值均大于 0。上述 3 个阶段分别对应 3 类破裂状态, 即试样内部产生微破裂阶段、临近失稳破坏阶段和峰后破坏阶段。

### 3.2 声发射梅尔倒谱系数波动差随砂岩破裂状态的分布特征

图 9 为 4 种实验条件下 MFCC-1 波动差随试样不同破裂状态的分布特征。可以看出, 与 MFCC-1 类似, 不同破裂状态下 MFCC-1 波动差的变化特点同样可划分为相同的 3 个阶段: ① 峰值载荷前 (0, 0.9] 内, 不同实验条件下 MFCC-1 波动差的分布范围随破裂状态增大表现为从宽到窄, 这种特征与压密阶段微裂隙被压实产生大量声发射信号、弹性阶段试样状态稳定产生少量声发射信号的现象对应; ② 临近峰值载荷阶段 (0.9, 1] 内, MFCC-1 波动差正态分布范围变大, 波动差出现突升, 与之对应, 临近失稳时宏观裂隙产生; ③ 峰值载荷之后的各个破裂状态下, 破裂愈发剧

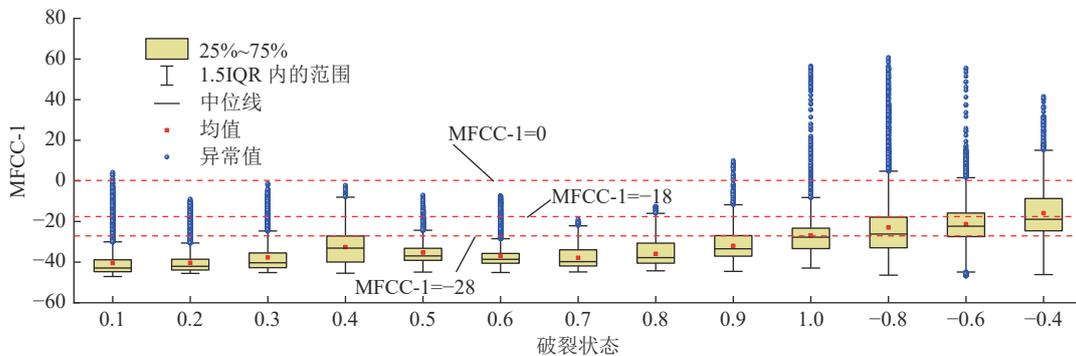


图 8 各实验条件砂岩试样不同破裂状态下 MFCC-1 统计分布特征

Fig.8 Statistical distribution characteristics of MFCC-1 under different fracture states of sandstone specimens under various experimental conditions

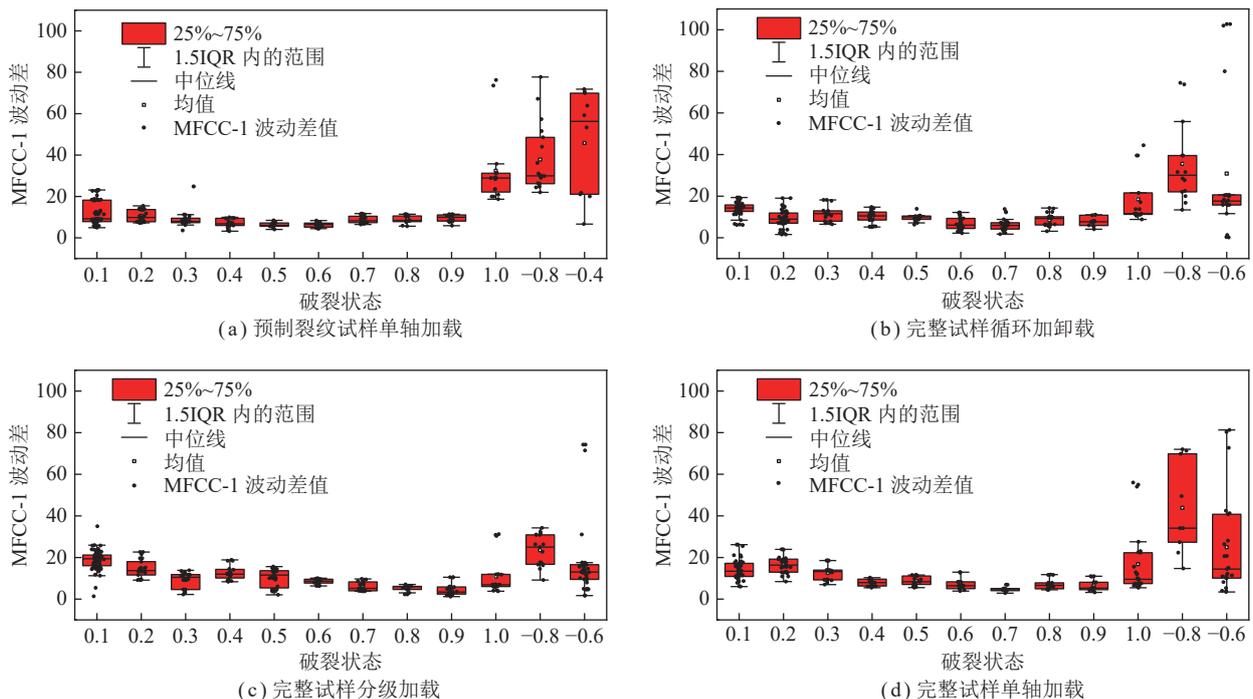


图 9 不同实验条件下 MFCC-1 波动差随砂岩破裂状态下的分布特征

Fig.9 Distribution characteristics of MFCC-1 fluctuation difference with sandstone fracture state under different experimental conditions

烈, MFCC-1 波动差突升的值越来越多, 导致 MFCC-1 波动差的中值和均值升高, 箱型图的垂直位置上移。

选取与 3.1 节同样的 14 个试样提取数据, 得到 14 个试样在不同破裂状态下 MFCC-1 波动差的统计分布特征, 如图 10 所示。对比图 10 和图 8 可知, MFCC-1 波动差变化特征与 MFCC-1 相似, MFCC-1 波动差可更加明显的划分为 3 个阶段, 对应 3 类破裂状态: 首先是试样产生微破裂状态, 试样在压密阶段发生原生裂隙摩擦、错动等, 导致大量低幅声发射信号产生, 弹性阶段试样状态稳定使得声发射信号产生

少且幅值较小, 该状态对应 (0, 0.9] 范围, MFCC-1 波动差表现为由分布较广逐渐转变为分布密集, 超过 75% 的波动差都在 19 以下; 其次是临近失稳破坏阶段, 初步产生宏观破裂, 对应 (0.9, 1] 范围的波动差分布, 波动差整体增大, 75% 位点值接近 30, 波动差分布范围增大, 异常值高达 60; 最后是峰后破坏阶段, 试样产生大量破裂且宏观破裂连接贯通, 使得高幅声发射信号密集产生, 对应峰值载荷后各破裂状态下的波动差分布, 波动差较阶段 2 进一步增大, 使得中值和均值大幅增加, 75% 位点值超过 30, 异常值增多增大, 超过 60。

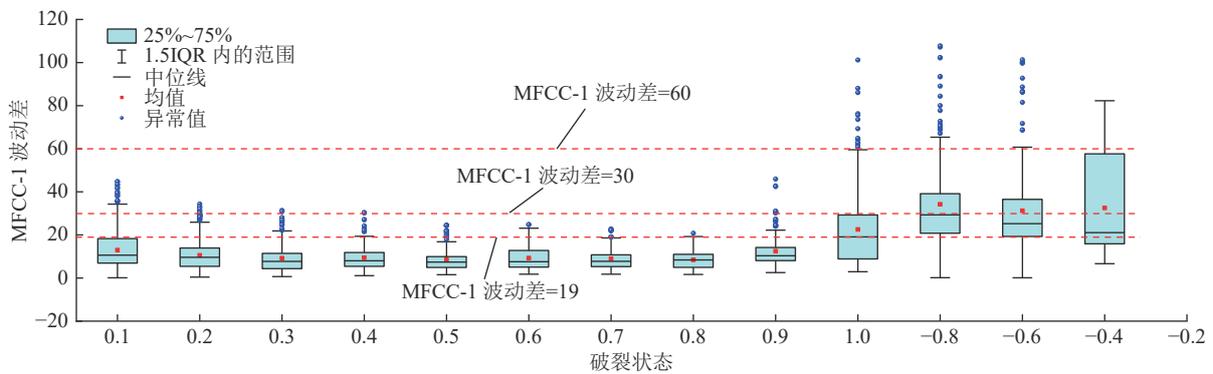


图 10 各实验条件砂岩试样不同破裂状态下 MFCC-1 波动差统计分布特征

Fig. 10 Statistical distribution characteristics of MFCC-1 fluctuation difference under different fracture states of sandstone specimens under various experimental conditions

## 4 砂岩破裂状态声发射梅尔倒谱系数判识方法

### 4.1 判识方法提出

如前文所述, MFCC-1 及其波动差随砂岩破裂状态的不同而表现出不同的响应特征, 因此, 本节利用 MFCC-1 及其波动差来量化构建砂岩破裂状态判识方法。

数据的箱型图利用盒和线来显示数据的四分位数, 并显示出落在箱子之外的异常值数据, 这些值可以快速评估数据的集中趋势、方差和偏度。因此, 本方法综合考虑 MFCC-1 及其波动差的箱型图特征, 具体步骤如下:

(1) 对于需要判识破裂状态的砂岩, 通过实验采集砂岩加载破裂全程的声发射信号, 并将声发射数据分为 2 组, 一组用于构建判识准则, 另一组用于检验判识准则的可靠性, 本文中检验组试样为 DZ-1、FJ-1、XH-3、CSP6, 其余试样为构建组。

(2) 提取砂岩加载全程的声发射梅尔倒谱系数并计算波动差, 笔者选用 MFCC-1 并以 3 s 时间窗和 1 s 滑移步长来计算波动差。

(3) 根据试样承受载荷大小计算砂岩破裂状态, 将

声发射梅尔倒谱系数及其波动差按照不同破裂状态范围归类, 绘制所有构建组试样在不同破裂状态范围内的声发射梅尔倒谱系数及其波动差的箱型图, 笔者以 0.1(峰值载荷前) 和 -0.2(峰值载荷后) 为标度区分试样的不同破裂状态范围。

(4) 按照试样内部微破裂阶段、临近失稳破坏阶段和峰后破坏阶段将试样破裂状态分为 3 种类别, 分析 3 种类别所对应的破裂状态范围内声发射梅尔倒谱系数及其波动差的共性分布特征, 据此构建砂岩破裂状态的判识准则。

(5) 将检验组试样的声发射梅尔倒谱系数及其波动差按照时间序列以固定时间窗绘制出箱型图, 根据箱型图特征来检验和完善构建的判识准则。

(6) 利用完善后的判识准则对同种类砂岩受载过程的破裂状态进行连续实时判识。

### 4.2 判识准则构建

#### 4.2.1 判识指标及其阈值

由第 3 节分析知, 砂岩 3 种破裂状态所对应的 MFCC-1 及其波动差的共性分布特征主要表现在箱型图的第 3 个四分位数 (75% 位点值) 和异常值, 由此, 构建砂岩破裂状态的判识指标包括 4 个, 分别为

MFCC-1 的 75% 位点值、MFCC-1 的异常值、MFCC-1 波动差的 75% 位点值和 MFCC-1 波动差的异常值,

各个判识指标对应的砂岩 3 种破裂状态的指标阈值见表 2。

表 2 砂岩破裂状态判识指标及分级判识准则  
Table 2 Identification indexes and criteria of sandstone damage state

MFCC-1		MFCC-1 波动差		试样破裂状态	状态分类
75%位点值	异常值	75%位点值	异常值		
< -28	< 0	< 19	< 60	微破裂产生阶段, 试样状态较为稳定	I
[-28,-18)	> 0	[19, 30)	> 60	临近失稳破坏阶段, 试样产生宏观破裂	II
≥ -18	> 0	≥ 30	> 60	峰后破坏阶段, 试样宏观破裂贯通并破坏	III

4.2.2 判识准则

根据 4 个判识指标的指标值综合判定砂岩的破裂状态, 判识准则为: 当 4 个判识指标中的 3 个及以上指标满足某一状态的判识条件时, 则判定砂岩处于该破裂状态; 当 4 个判识指标中的 2 个指标满足某一状态的判识条件, 而另外 2 个指标分别满足另外 2 种状态的判识条件时, 则判定砂岩处于 2 个指标满足的破裂状态; 当 4 个判识指标中的 2 个指标满足某一状态的判识条件, 而另外的 2 个指标满足另一状态的判识条件时, 则判定砂岩处于 2 种状态中更为严重的破裂状态。

4.3 判识方法可靠性检验

利用第 3 节选取的 4 种实验条件下的 4 个检验组砂岩试样为对象, 来检验声发射梅尔倒谱系数判识方法对于识别砂岩破裂状态的适用性和判识效果。按照时间序列对 4 个检验组试样加载全程各个时刻的破裂状态分别判识, 采用评价机器学习模型预测效果的常用指标进行效果检验, 包括准确度 (A)、精准度 (P)、召回率 (R)、F1-score(F1) 等。因砂岩破裂状态分为 3 类, 笔者采用三分类模型混淆矩阵进行检验, 见表 3, 正确的分类样本分布在左上到右下的对角线上。

表 3 砂岩破裂状态效果检验三分类混淆矩阵

Table 3 Three classification confusion matrix for sandstone damage state identification effect analysis

混淆矩阵		真实状态		
		I	II	III
预测状态	I	TP <sub>11</sub>	TP <sub>12</sub>	TP <sub>13</sub>
	II	TP <sub>21</sub>	TP <sub>22</sub>	TP <sub>23</sub>
	III	TP <sub>31</sub>	TP <sub>32</sub>	TP <sub>33</sub>

注: TP<sub>ij</sub>指实际是j类样本, 但被判识为i类样本的数量。

精确度 A 的定义为分类正确 (对角线上) 的样本数占总样本数的比例, 计算如下:

$$A = \frac{TP_{11} + TP_{22} + TP_{33}}{TP_{11} + TP_{21} + TP_{31} + TP_{12} + TP_{22} + TP_{32} + TP_{13} + TP_{23} + TP_{33}} \quad (6)$$

精准度 (P) 和召回率 (R), 主要针对某一分类的特性, 需要单独计算, 其精准度定义为正确预测为第 i 类的样本数占有所有预测为第 i 类的样本数的比例, 召回率定义为正确预测为第 i 类的样本数占实际为第 i 类的总样本数的比例; 单独用精确率或召回率不能很好地评估模型好坏, 所以引入 F1, 以状态 I 为例, 状态 I 的 P<sub>I</sub>、R<sub>I</sub>、F1<sub>I</sub> 计算如下:

$$P_I = \frac{TP_{11}}{TP_{11} + TP_{12} + TP_{13}} \quad (7)$$

$$R_I = \frac{TP_{11}}{TP_{11} + TP_{21} + TP_{31}} \quad (8)$$

$$F1_I = \frac{2P_I R_I}{P_I + R_I} \quad (9)$$

由于处于不同破裂状态的样本数量之间具有很大差异, 为评估本方法的综合判识性能, 利用 Weighted-average 思想对不同类别的精准度 (P)、召回率 (R)、F1 进行处理, 最终得到综合评估此判识方法的 P<sub>Z</sub>、R<sub>Z</sub>、F1<sub>Z</sub>。计算公式如下:

$$\begin{aligned} P_Z &= \omega_I P_I + \omega_{II} P_{II} + \omega_{III} P_{III} \\ R_Z &= \omega_I R_I + \omega_{II} R_{II} + \omega_{III} R_{III} \\ F1_Z &= \omega_I F1_I + \omega_{II} F1_{II} + \omega_{III} F1_{III} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, ω<sub>I</sub>、ω<sub>II</sub>、ω<sub>III</sub> 分别为实际为状态 I、II、III 的样本数量占总样本数量的比例, 即权重; P<sub>II</sub>、P<sub>III</sub> 分别为状态 II、III 的精准度; R<sub>II</sub>、R<sub>III</sub> 分别为状态 II、III 的召回率; F1<sub>II</sub>、F1<sub>III</sub> 分别为状态 II、III 的 F1。

以完整试样 DZ-1 为例来说明对判识方法的检验过程。以 3 s 为时间窗按照时间序列做出试样 DZ-1 的 MFCC-1 及其波动差的箱型图, 如图 11 所示。由图 11 可知, 该试样一共有 78 个样本数据 (即针对 78 个时间点) 需要判识。在 0~198 s 的 67 个样本中, 所有样本的 MFCC-1 的 75% 位点值都在 -28 以下, 没有

出现 0 以上的异常值, MFCC-1 波动差没有出现大于 60 的异常值, 除图 11(b) 中红色方框标记的 3 个样本之外, 其余样本的 MFCC-1 波动差 75% 位点值都在 19 以下, 由此可知, 这 67 个样本符合状态 I 的 4 项或

3 项判识条件, 则判识为状态 I; 砂岩的峰值应力时刻为 205 s, 这 67 个样本实际处于状态 I, 判识结果正确。处于 201 s 的样本, MFCC-1 及其波动差的 75% 位点值分别在 -28~-18 和 19~30 内, MFCC-1 及其波动

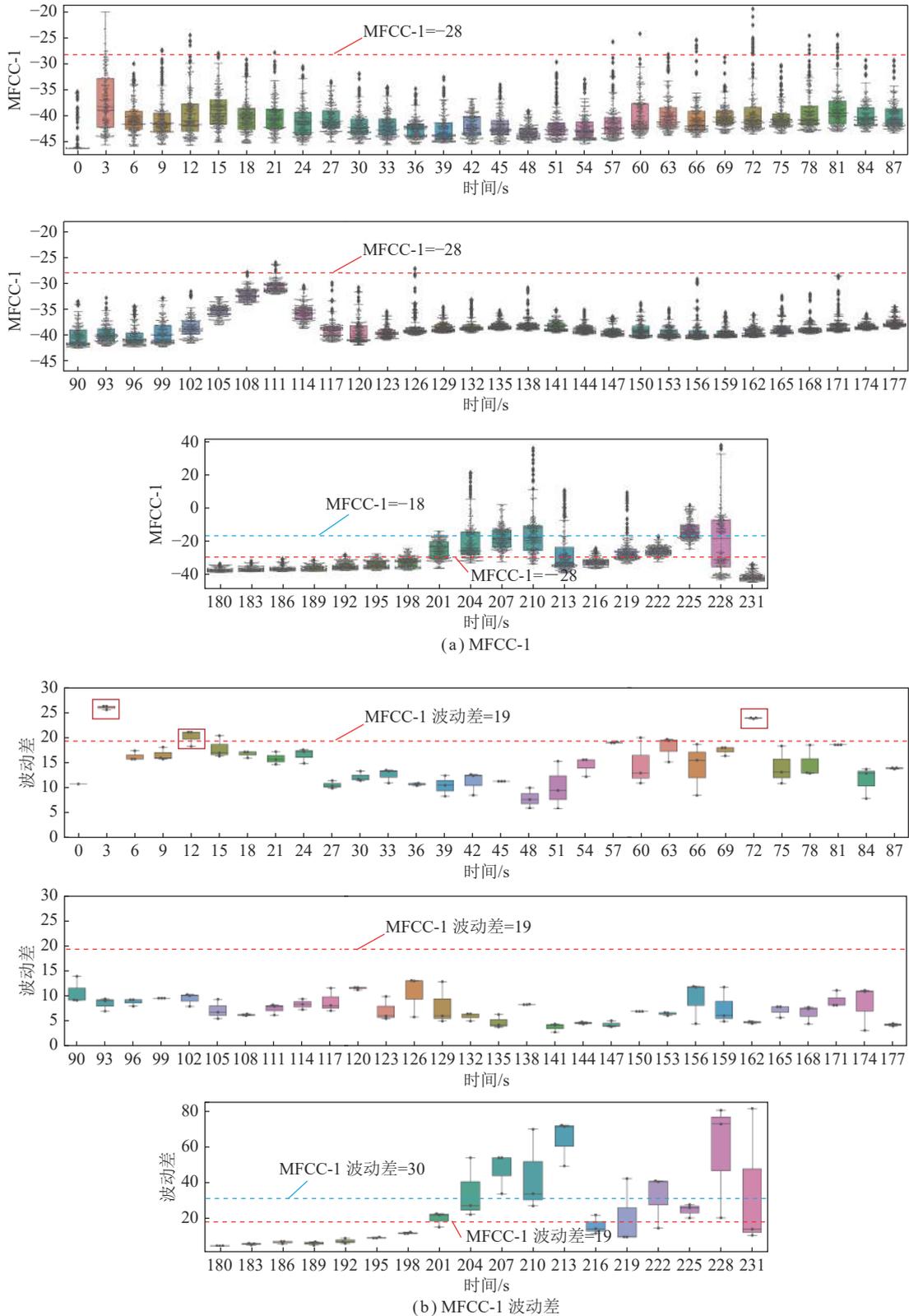


图 11 砂岩试样加载全程 MFCC-1 及其波动差箱型图时序分布

Fig.11 Box plot distribution in time serial of MFCC-1 and its fluctuation difference at the whole loading process of sandstone specimen

差无异常值,符合状态 II 的指标数值范围,则判识为状态 II,实际上砂岩处于临近峰值载荷阶段,判识结果正确。204 s 的样本根据准则判定为状态 III,实际砂岩处在临近峰值载荷阶段,判识错误。根据表 2 的判识准则,204 s 后的 9 个样本的判识结果分别为: 8 个样本判定为状态 III, 1 个样本判识为状态 II; 由砂岩破裂实际状态可知,判识为状态 III 的结果正确。

根据以上判识过程,分别对 4 个检验组试样的样本数据逐个判识,得到表 4 的混淆矩阵分类结果,再根据 4.3 节所述计算公式,得到该判识方法的准确度为 90.43%、精准度为 94.45%、召回率为 90.43%、 $F1$  为 91.97%。由此说明,该声发射梅尔倒谱系数判识方法能够较好地判识出砂岩在加载过程中的破裂状态,判识准确度较高,判识效果较好。

表 4 砂岩破裂状态混淆矩阵分类结果

Table 4 Classification results of sandstone damage state confusion matrix

混淆矩阵		真实状态		
		I	II	III
预测状态	I	305	2	8
	II	17	5	6
	III	2	1	30

## 5 结 论

(1) 对本研究选用的砂岩,在不同加载条件下,所有试样受载破坏全过程的声发射梅尔倒谱系数表现出较为一致的响应特征;随载荷增加,1 号梅尔倒谱系数整体上增大,加载后期破坏阶段, MFCC-1 及其离散性显著增大,并且表现出显著的规律性波动特征,该系数的波动性特征可反映砂岩破裂过程。

(2) 随载荷增加,声发射梅尔倒谱系数波动差具有阶段性变化特征,即压密阶段起伏较大,弹性阶段变化稳定,破坏阶段整体增大并伴有突升高值;波动差的大小及其起伏变化可较好表征砂岩的破裂,波动差整体增大及突增可反映砂岩后期破坏阶段的宏观破裂,波动差的突增幅度可反映试样破裂程度;声发射梅尔倒谱系数及其波动差对砂岩破裂的响应受不同加载条件的影响较小,其在反映砂岩破裂上具有普适性。

(3) MFCC-1 及其波动差与砂岩破裂状态具有较好相关性:在微破裂阶段, MFCC-1 及其波动差分布集中,其 75% 位点值分别小于 -28 和 19,异常值分别小于 0 和 60;在临近失稳破坏阶段, MFCC-1 及其波动

差分布范围急剧增大,整体值升高且出现高异常值,其 75% 位点值分别在 -28~-18 和 19~30 范围内,异常值分别高于 0 和 60;在峰后破坏阶段, MFCC-1 及其波动差分布范围进一步增大、整体值更高、高值异常值更多,75% 位点值分别大于 -18 和 30。

(4) 提出了砂岩破裂状态声发射梅尔倒谱系数判识方法,构建了判识指标,包括 MFCC-1 的 75% 位点值和异常值、MFCC-1 波动差的 75% 位点值和异常值,根据判识指标在砂岩实际破裂状态内的分布特征确定了判识准则;采用三分类模型混淆矩阵对判识方法的效果进行了检验,判识准确度、精准度、召回率、 $F1$  分别为 90.43%、94.45%、90.43% 和 91.97%。

## 参考文献(References):

- [1] 韦梦菡. 岩体破裂近场低频电磁定位方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023: 1-2.  
WEI Menghan. A near-field localization method for rock fractures using generated low-frequency electromagnetic field[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023: 1-2.
- [2] 王恩元, 刘晓斐, 何学秋, 等. 煤岩动力灾害声电协同监测技术及预警应用[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 942-948.  
WANG Enyuan, LIU Xiaofei, HE Xueqiu, et al. Acoustic emission and electromagnetic radiation synchronized monitoring technology and early-warning application for coal and rock dynamic disaster[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 942-948.
- [3] 曹安业, 窦林名, 白贤栖, 等. 我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1894-1918.  
CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianxi, et al. State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1894-1918.
- [4] 梁正召, 唐春安, 黄明利, 等. 岩石破裂过程中声发射模式的数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(10): 1008-1011.  
LIANG Zhengzhao, TANG Chun'an, HUANG Mingli, et al. Numerical simulation of acoustic emission patterns during rock fracture processes[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2002, 23(10): 1008-1011.
- [5] 杨永杰, 陈绍杰, 韩国栋. 煤样压缩破坏过程的声发射试验[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5): 562-565.  
YANG Yongjie, CHEN Shaojie, HAN Guodong. Experimental on acoustic emission during compression rupture procedure of coal sample[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 562-565.
- [6] 李炜强, 许沁舒, 成功, 等. 单轴压缩下砂岩微破裂演化力学行为研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 60-67.  
LI Weiqiang, XU Qinshu, CHENG Gong, et al. Study on mechanical behavior of sandstone micro-fracture evolution under uniaxial compression test[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 60-67.
- [7] 董陇军, 张义涵, 孙道元, 等. 花岗岩破裂的声发射阶段特征及裂纹不稳定扩展状态识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(1): 120-131.  
DONG Longjun, ZHANG Yihan, SUN Daoyuan, et al. Stage characteristics of acoustic emission and identification of unstable crack state for granite fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and En-

- gineering, 2022, 41(1): 120–131.
- [8] 孙飞跃, 郭佳奇, 刘希亮, 等. 真三轴单面卸荷条件下中间主应力对深埋洞室岩爆影响特征[J/OL]. 煤炭学报, 1–19 [2024-02-29]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0165>.  
SUN Feiyue, GUO Jiaqi, LIU Xiliang, et al. Study on the influence of intermediate principal stress on rockburst in deep cavern under true triaxial condition with single face unloading[J/OL]. Journal of China Coal Society, 1–19 [2024-02-29]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0165>.
- [9] WANG Yuanyuan, DENG Hucheng, DENG Yong, et al. Study on crack dynamic evolution and damage-fracture mechanism of rock with pre-existing cracks based on acoustic emission location[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201: 108420.
- [10] 武旭, 王帆, 席迅, 等. 正交型交叉裂隙岩石强度特征与破裂机理试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2681–2690.  
WU Xu, WANG Fan, XU Xun, et al. Experimental investigation on the strength characteristics and fracture mechanism of rock with orthogonally crossed cracks[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2681–2690.
- [11] 赵毅鑫, 姜耀东, 祝捷, 等. 煤岩组合体变形破坏前兆信息的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 339–346.  
ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, ZHU Jie, et al. Experiment study on precursory information of deformations of coal-rock composite samples before failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 339–346.
- [12] 刘倩颖, 张茹, 高明忠, 等. 煤卸荷过程中声发射特征及综合破坏前兆分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(S2): 67–74.  
LIU Qianying, ZHANG Ru, GAO Mingzhong, et al. Acoustic emission characteristics and comprehensive failure precursors of coal under unloading conditions[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2016, 48(S2): 67–74.
- [13] 冯增朝, 沈永星. 基于表面位移的岩石失稳前兆识别研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3024–3032.  
FENG Zengchao, SHEN Yongxing. Study on precursor identification of rock instability based on surface displacement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S2): 3024–3032.
- [14] 苏晓波, 纪洪广, 权道路, 等. 劈裂条件下岩石应变空间变异性与  $b$  值关系[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 239–246.  
SU Xiaobo, JI Hongguang, QUAN Daolu, et al. Relationship between spatial variability of rock strain and  $b$  value under splitting condition[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 239–246.
- [15] 赵奎, 杨道学, 曾鹏, 等. 单轴压缩条件下花岗岩声学信号频域特征分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2189–2197.  
ZHAO Kui, YANG Daoxue, ZENG Peng, et al. Frequency-domain characteristics of acoustic signals of granite under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2189–2197.
- [16] 龚函, 包涵, 王文杰, 等. 红砂岩破坏过程声发射震源演化规律及其主频特征[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2326–2339.  
GONG Cong, BAO Han, WANG Wenjie, et al. Evolution law and dominant frequency characteristics of acoustic emission sources during red sandstone failure process[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2326–2339.
- [17] 丛宇, 冯夏庭, 郑颖人, 等. 不同应力路径大理岩声发射破坏前兆的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1193–1201.  
CONG Yu, FENG Xiating, ZHENG Yingren, et al. Experimental study on acoustic emission failure precursors of marble under different stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1193–1201.
- [18] WANG H L, SONG D Z, LI Z L, et al. Acoustic emission characteristics of coal failure using automatic speech recognition methodology analysis[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 136: 104472.
- [19] 李振雷, 李娜, 杨菲, 等. 基于声发射特征提取和机器学习的煤破坏状态预测[J]. 工程科学学报, 2023, 45(1): 19–30.  
LI Zhenlei, LI Na, YANG Fei, et al. Applying feature extraction of acoustic emission and machine learning for coal failure forecasting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(1): 19–30.
- [20] 李振雷, 杨菲, 李娜, 等. 预制裂纹砂岩受载破裂声发射梅尔倒谱系数响应特征[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(4): 713–726.  
LI Zhenlei, YANG Fei, LI Na, et al. Response characteristics of Mel-frequency cepstral coefficient of acoustic emission to fracture of sandstone specimens with prefabricated cracks[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(4): 713–726.
- [21] 李振雷, 李娜, 杨菲, 等. 声发射梅尔倒谱系数在砂岩破裂分析中的应用[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 714–729.  
LI Zhenlei, LI Na, YANG Fei, et al. Applying Mel-frequency cepstral coefficient of acoustic emission for analyzing fracture and failure of sandstone specimens[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 714–729.
- [22] 何正祥, 彭平安, 廖智勤. 基于梅尔倒谱系数的矿山复杂微震信号自动识别分类方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(12): 41–47.  
HE Zhengxiang, PENG Pingan, LIAO Zhiqin. An automatic identification and classification method of complex micro seismic signals in mines based on Mel-frequency cepstral coefficients[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(12): 41–47.
- [23] 乔兵, 吴庆林, 阴玉梅. 语音识别算法的 VC++ 实现[J]. 光机信息, 2011, 28(4): 50–55.  
QIAO Bing, WU Qinglin, YIN Yumei. Implementation of speech recognition algorithm in VC++[J]. *Opto Information*, 2011, 28(4): 50–55.
- [24] 陈润航, 黄汉明, 柴慧敏. 地震和爆破事件源波形信号的卷积神经网络分类研究[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1331.  
CHEN Runhang, HUANG Hanming, CHAI Huimin. Study on the discrimination of seismic waveform signals between earthquake and explosion events by convolutional neural network[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(4): 1331.
- [25] 蒋磊, 马六章, 杨克虎, 等. 基于 MFCC 和 FD-CNN 卷积神经网络的综放工作面煤研智能识别[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 1109–1117.  
JIANG Lei, MA Liuzhang, YANG Kehu, et al. Coal and gangue intelligent separation based on MFCC and FD-CNN convolutional neural network for top coal caving mining[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 1109–1117.