

DOI: 10.11779/CJGE201703015

单轴压缩下粗砂岩临界破坏的多频段声发射耦合判据和前兆识别特征

曾 鹏¹, 刘阳军², 纪洪广^{*1}, 李成江³

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古伊泰广联煤化有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;
3. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088)

摘 要: 为寻求岩石临界破坏判据和前兆特征, 在粗砂岩单轴压缩声发射(AE)试验的基础上, 研究了岩石破坏过程中 AE 信号频段占比随应力变化特征, 重点分析高、低两个特征频段占比随应力变化规律, 同时对两个特征频段中不同应力水平下 AE 幅值关联维数进行计算与分析, 并建立了基于频段占比与应力间关系的多频段 AE 信号主频识别判据模型。研究表明: AE 信号频段占比的分布特征能较好地诠释岩石破坏所经历的主要过程; 岩石破坏过程中, 较低频段 AE 信号(31.25~46.875 kHz)占比先减小后增大, 较高频段 AE 信号(140.625~156.25 kHz)占比先增大后减小。在临界破坏状态下, 高、低两个特征频段占比分别出现最大值和最小值, 且二者中 AE 幅值关联维数都下降到最低。通过对特征频段占比与应力之间的耦合分析, 利用特征频段占比、AE 幅值关联维数的变化可更准确地对岩石临界破坏前兆进行判别和预测。

关键词: 多频段; 耦合判据; 前兆; 临界破坏状态; 关联分形维数; 模型

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)03-0509-09

作者简介: 曾 鹏(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事矿山岩石力学试验与工程稳定性研究方面的工作。E-mail: zengpeng23@126.com。

Coupling criteria and precursor identification characteristics of multi-band acoustic emission of gritstone fracture under uniaxial compression

ZENG Peng¹, LIU Yang-jun², JI Hong-guang¹, LI Cheng-jiang³

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Inner Mongolia Guanglian Yitai Coal & Chemical Industry Co., Ltd., Inner Mongolia, Ordos 017000, China; 3. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to obtain the criteria and precursor characteristics of critical rock fracture, laboratory experiments on the characteristics of acoustic emission (AE) of gritstone specimens under uniaxial compression are carried out. The relationships between proportions of AE frequency bands and stresses in the process of rock failure are analyzed. The variation characteristics of proportions of two characteristic frequency bands with stresses are analyzed especially. The relevant fractal dimensions of AE amplitude at different stress levels are calculated and analyzed in the two frequency bands. A multi-band AE dominant frequency recognition criterion model is established based on the quantitative relationships between proportions of frequency bands and stresses. The results indicate that the distribution characteristics of the proportions of frequency bands can reflect the main failure stages of rock. In the process failure of rock, the proportions of AE lower frequency band signals (31.25~46.875 kHz) decrease firstly and then increase, and the proportions of AE higher frequency band signals (140.625~156.25 kHz) increase firstly and then decrease. The minimum value and the maximum value appear in the critical state of rupture in the lower and higher frequency bands. And the minimum values of the relevant fractal dimensions of AE amplitude appear in the critical state of rupture in the two frequency bands. Based on the coupling analysis of proportions of characteristic frequency bands and stresses, the accuracy for estimating and predicting the critical state of rock can be improved by using the variations of the proportions of characteristic frequency bands and the relevant fractal

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600801); 国家自然科学基金重点项目(51534002); 国家自然科学基金项目(51174015)

收稿日期: 2016-04-27

*通讯作者(E-mail: jihongguang@ces.ustb.edu.cn)

dimensions of AE amplitude.

Key words: multi-band; coupling criterion; precursor; critical state of rupture; relevant fractal dimension; model

0 引言

对岩石破坏失稳前进行有效的预测,具有重要的现实意义和工程应用背景^[1-2]。声发射(AE)技术以具备提供材料内部缺陷随载荷、时间、温度^[3]等外变量而变化的实时性和连续性的特点,使得其在岩石力学工程领域的灾害监测、预警方面,成为不可替代的重要角色^[4-5]。实践表明,岩石内部结构的特殊性,导致其在受力变形、破坏过程中所释放出的AE信号数以万计,通过对岩石AE信号的分析,可推断出岩石内部的性质变化,进一步反演岩石的破坏机制。因此,如何在大量的AE信号中提取关键信息,并建立起岩石“临界破坏状态”及其前后状态下力学特征与AE信号特征参数间的定量关系,对于揭示岩石破坏失稳机制具有尤为重要的作用,也为工程岩体稳定性的AE监测和预测技术提供重要保障。

目前,国内外学者都在致力于岩石AE特性与岩石力学之间关系的研究,如Lei等研究了不同受力方式下的岩石AE基本特征参数,包括单轴压缩、三轴压缩、加卸载、拉伸、劈裂、剪切等^[4,6-13]。与参数分析法相比,AE波形分析法对于分析瞬息万变的岩石AE信号,则能更加全面地揭示岩石AE信号中的真实信息。因此,更多学者^[14-18]展开了对岩石破坏过程的AE信号波形特征进行研究。如凌同华等^[14]、赵奎等^[15]采用小波包分析法对岩石AE信号能量特征进行了研究;李楠等^[16]采用FFT方法研究了循环加载和分级加载损伤破裂过程中的岩石AE信号主频变化规律,得到了岩石在破裂及其发展阶段,AE信号主频增高,频带变宽,且出现次主频的结论;何满潮等^[17]在花岗岩岩爆试验中发现,随着荷载的增加,AE信号的主频变化由低频单峰转向高频多峰,再转向低频单峰,整个过程都出现了106 kHz这一频率;张艳博等^[18]在煤研石试验中发现AE信号始终有两个主频带,在岩石破坏前主频值会发生突变。这些研究成果增进了人们对不同受力方式下岩石破坏过程中AE信号参数特征的认识,却未建立起AE信号特征参数与岩石材料结构性能参数或力学参数间的定量关系^[1],且多集中在计算和分析岩石破坏过程中所有的AE特征参数。由于岩石在损伤、破坏过程中所释放的AE信号数据量庞大,计算过程繁琐,因此,十分有必要对AE信号数据进行甄选分析,进而实现对岩石临界破坏前兆信息的快速有效识别^[1]。

有鉴于此,本文对粗砂岩进行单轴压缩AE试验,

首先对岩石破坏过程中AE信号主频段进行划分与选取,研究岩石破坏过程中AE信号频段占比随应力变化的分布特征规律,重点分析高、低两个特征频段占比随应力变化规律,同时对两个特征频段中不同应力水平下的AE幅值关联分形维数进行计算与分析,最终建立基于频段占比与应力间关系的多频段AE信号主频识别判据模型。通过进行多频段AE信号特征分析及其相互之间的模式匹配,寻求力学演化过程与AE过程之间的内在联系,探求岩石临界破坏的前兆特征信息和判别模式。

1 试验简介及岩石力学基本参数

1.1 试验简介

试验测试系统如图1所示。AE仪器型号为PCI-2型,选用的AE传感器谐振频率为150 kHz,前置放大增益40 dB,采样频率为1MSPS,门槛值为30 dB。单轴压力由长春朝阳仪器有限公司生产的GAW-2000型岩石刚性压缩试验机提供,试验全过程均采用变形控制方式,加载速率为0.006 mm/min。

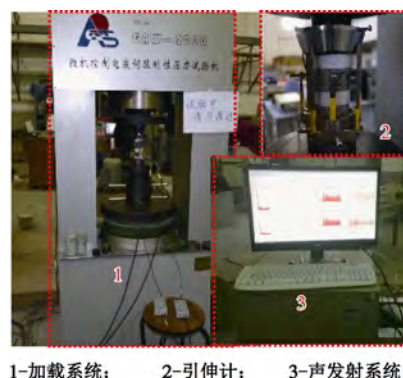


图1 试验测试系统

Fig. 1 Measurement system for experiment

试验过程中,为消除试件端部与压盘产生的摩擦噪声,在试件两端加上压缩橡胶皮,再将试件安放在引伸计上;同时使用胶带将AE传感器固定在试件侧面,并在AE传感器与试件接触面上涂抹适量耦合剂,布置完成后,先进行敲击测试,保证引伸计的轴向、径向传感器和AE传感器均工作正常。

1.2 岩石力学基本参数特征

试验样品来自内蒙某矿,平均埋深400 m。地质资料显示,该区域粗粒砂岩地层年代属于白垩纪下统志丹群伊金霍洛组(k1zh),主要成分为石英、长石,呈暗红色,岩石平均密度约 $2.62 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,平均孔隙率约21.97%,平均普氏系数约1.56,平均软化系数

约 0.50。现场取回岩块后钻芯, 获得圆柱型试件, 加工好的试件高度为 100 mm、直径为 50 mm, 上下端面平整, 无明显裂纹。图 2 为各试件轴向应力应变曲线, 单轴抗压强度分别为: 11.58 MPa(cs1)、13.40 MPa(cs2)、14.70 MPa(cs3)、11.01 MPa(cs4)、15.40 MPa(cs5)和 10.59 MPa(cs6), 平均单轴抗压强度为 12.78 MPa。

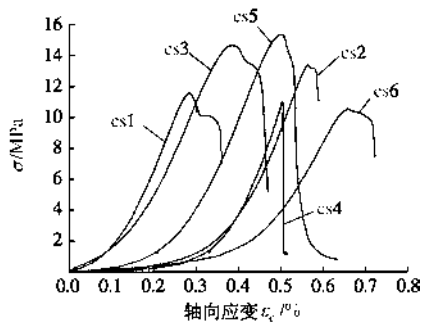


图 2 轴向应力应变曲线
Fig. 2 Axial stress-strain curves

2 岩石临界破坏前兆识别特征

2.1 声发射信号频段划分与选取

研究表明^[9, 16-19], 岩石类材料在受力变形、破坏过程中所释放出的 AE 信号主频有着不同的组合模式, 即是一个高、低频之间不断转换的过程。如果只针对某一种主频进行分析, 则该频率可能是一个从有到无、从多到少, 或从无到有、从少到多^[19]的变化过程。本文引入相对应力, 其定义为某点的应力值 σ 与峰值应力 σ_{\max} 的比值, 用百分比表示。

根据 AE 仪采样频率为 1MSPS, 得到其奈奎斯特频率 (Nyquist frequency) 为 500 kHz, 将岩石 AE 信号的主频划分成 32 等分, 得到各频段的长度为 15.625 kHz, 频段范围具体如表 1 所示。

表 1 频段范围对应的标号

Table 1 Corresponding labels to band ranges

频段标号	频段范围/kHz
1	0~15.625
2	15.625~31.25
3	31.25~46.875
⋮	⋮
32	484.375~500

对 32 个频段中的 AE 信号主频数量先按不同应力水平等间隔区间进行统计与分析。其中, 图 3 为代表试件 cs5 的各频段占比分布图, 结果表明, 粗砂岩破坏过程中所释放的 AE 信号主频分布在 0~171.875 kHz 这些频段中。分析图 3 可知, 粗砂岩的主频大部分都集中在频段 3 (31.25~46.875 kHz) 和频段 10

(140.625~156.25 kHz) 这两个频段中, 而其他频段所占比例较小或随应力水平变化分布不连续等, 故可用这两个频段来充分表征其主频特征演化规律, 并对此类频段, 称之为特征频段。也正如前文所述可适当减少计算与分析的工作量。最终提取特征频段 3 (31.25~46.875 kHz)、频段 10 (140.625~156.25 kHz) 占比随轴向相对应力水平变化规律见图 4 所示。

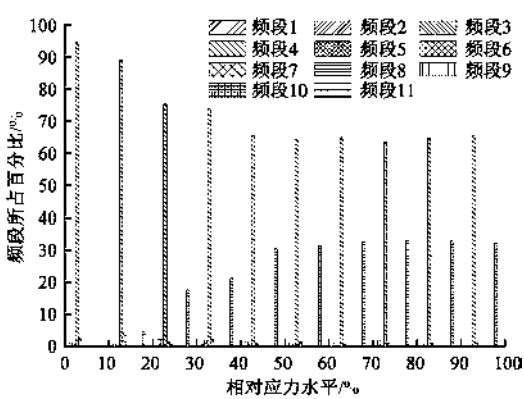


图 3 不同相对应力水平下各频段占比分布特征(试件 cs5)
Fig. 3 Distribution characteristics of percentages of frequency bands at different relative stress levels (specimen cs5)

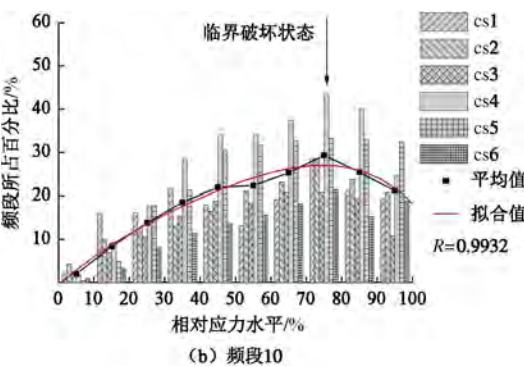
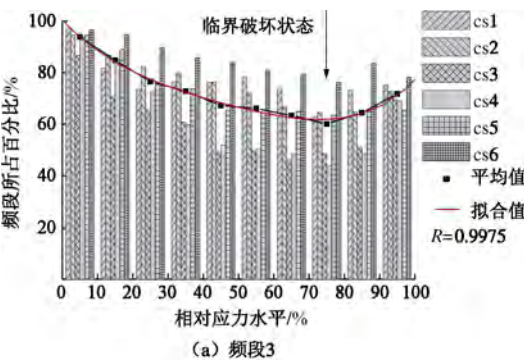


图 4 特征频段占比随轴向相对应力水平变化

Fig. 4 Variation of percentages of characteristic frequency bands with relative axial stress levels

2.2 声发射频段占比特征识别

由于岩石的各向异性, 即使相邻的两块岩石, 在受力破坏过程中也会表现出不同的变形、强度等特性,

所释放的 AE 信号也会有差别。观察图 4, 随着应力的增加, 虽各试件在频段 3 与频段 10 占比有差别, 但整体分布规律一致。其中, 频段 3 占比的分布规律: 先下降, 后上升, 在相对应力水平 70%~80%处出现最小值; 频段 10 占比的分布规律: 先上升, 后下降, 在相对应力水平 70%~80%处出现最大值。为更好得到这类岩石破坏过程的 AE 特征, 对各试件频段占比平均值进行统计, 再对所得平均值进行数据拟合。同时以岩石平均单轴抗压强度值来进行后续分析与计算。

本文再引入相对应变, 其定义为某点的应变 ε 与峰值应力处应变 ε_f 的比值, 得到轴向相对应力应变曲线见图 5 所示。

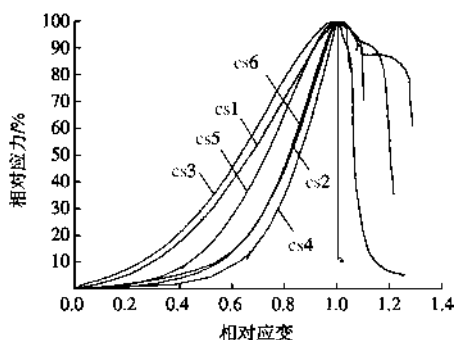


图 5 轴向相对应力应变曲线

Fig. 5 Relative axial stress-strain curves

综合分析图 4, 5, 相对应力水平 <10% 左右, 主要出现较低频段 AE 信号 (31.25~46.875 kHz), 从图 4 中频段占比平均值曲线可以看出, 频段 3 所占比例达 93.85%, 此时岩石处于压密阶段, 岩石内部微结构面 (或缺陷) 在外力作用下发生微小变化, 所释放的 AE 信号主要为较低频信号; 而随应力的增加, 岩石逐渐进入到弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段, 在此阶段岩石内部晶粒间的错动与显微裂纹将随应力的增加也逐渐增多, 较高频段 AE 信号 (140.625~156.25 kHz) 持续增加, 而较低频段 AE 信号所占比例则随着应力的增加逐渐减少; 进入塑性阶段, 岩石内部发生质的变化, 原来的显微裂纹扩展也变为宏观裂纹, 并伴随高振幅的低频弹性振动, 释放出大量较低频 AE 信号^[19], 与前一阶段比较高频 AE 信号占比明显减少, 而较低频 AE 信号占比继而上升, 出现转折。随着应力的继续增加, 宏观裂纹也将继续扩展, 出现更多的较低频 AE 信号。这一转折点的出现也预示着岩石即将发生主破裂^[5], 失去其最大承载力。

由此可见, AE 频段占比分布特征能较好的诠释岩石破坏所经历的主要过程, 通过对 AE 频段占比进行分析, 利用其变化趋势可对岩石临界破坏前兆进行识别。赖于树等^[19]在混凝土 AE 试验中, 提出将低频

段能量占比达到某一阈值时, 作为其临界破坏前兆特征。本文将较低频段 (频段 3)、较高频段 (频段 10) 占比均达到某一阈值时, 作为岩石临界破坏前兆识别的特征信息, 相对于运用单一信息和变化趋势来判断岩石内部结构变化的明显识别特征而言^[20], 这一做法可进一步提高岩石临界破坏前兆预判的准确性。

2.3 声发射信号幅值分形特征识别

(1) 声发射信号幅值基本特征

信号的基本参数一般会用频率和幅值来表示, AE 信号幅值作为信号中的另一个重要特征参数, 通常会用对应于传输元件所输出 1 微伏的分贝数来表示。

图 6 为 AE 信号主频-幅值-时间三维空间图 (试件 cs1)。分析图可知, 较低应力水平 AE 信号幅值整体水平较低, 随着应力水平的增加会出现更多较高幅值信号。由此说明, 岩石临近主破裂, 有大量高幅值 AE 信号产生^[21], AE 信号幅值的大小能反映岩石破坏强度。即岩石破坏强度大时出现高幅值信号, 破坏强度小出现低幅值信号^[22], 也揭示了岩石受力变形、破坏过程中整体上是一个从微小破裂到宏观破裂的过程。

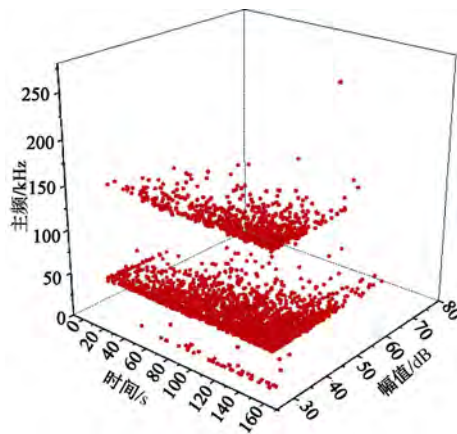


图 6 AE 信号主频-幅值随时间变化 (试件 cs1)

Fig. 6 Variation of AE dominant frequency-amplitude with time (specimen cs1)

(2) 声发射分形维计算

岩石 AE 信号中的参数可视为一个单变量的时间序列集, 具有明显的分形特征^[7, 23-26]。关联维数是常用的一个表征分形特征的分形维数^[15]。通过分析岩石破坏过程中 AE 信号参数关联维数的变化, 可进一步揭示岩石内部裂纹产生、扩展的演化过程^[24-25]。

基于以上分析, 将上述两个特征频段中的岩石 AE 信号幅值均单独作为研究对象, 分别计算不同应力水平下 AE 幅值关联维数 D 值分布规律。具体操作如下:

a) 以某特征频段中某应力水平下的 AE 信号幅值为研究对象, 可得到容量为 n 的序列集:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

由于每个频段在不同应力水平的 AE 信号数量不尽相同, 因此式 (1) 中 n 的取值将视具体数量而定。

b) 选取嵌入维数 m 和延迟时间 τ , 构造一个 m 维的欧氏空间, 得到 N 个 m 维的相点。

$$X_n(m, \tau) = (x_n, x_{n+\tau}, \dots, x_{n+(m-1)\tau}), \quad (n = 1, 2, 3, \dots, N_m), \quad (2)$$

式中, $\tau = k\Delta t$ 为固定时间间隔, Δt 为邻近两次采样时间间隔, k 为常数, $N_m = N - (m-1)\tau$ 。

c) 计算这些相点的关联维数如下。

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - |X_i - X_j|) \quad (3)$$

式中, H 为 Heaviside 函数, $H(u) = \begin{cases} 0 & (u < 1) \\ 1 & (u \geq 1) \end{cases}$; r 为量测尺度。当 r 很小时, 式 (3) 逼近式 (4), 可求得一系列的点, 如果这些点为直线, 则认为此 AE 幅值参数在给定的 r 范围内具有明显分形特征。

$$\ln(C_m(r)) = \ln C - D(m) \times \ln r \quad (4)$$

最终, 相应的关联维数可表达为

$$D(m) = -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\partial \ln C_m(r)}{\partial \ln r} \quad (5)$$

嵌入维数 m 的取值对 AE 关联分维 D 值有较大影响。因此, 计算不同应力水平的岩石 AE 幅值关联维数 D 值时, 都取相同的 m 值。当 m 取值逐渐增大时, D 值趋于稳定, 此时的 m_{\min} 可确定为 m 取值。以试件 cs1 为例, 计算得到双对数曲线见图 7 所示, 分析可知, m 取值为 4 时, 满足要求^[27]。

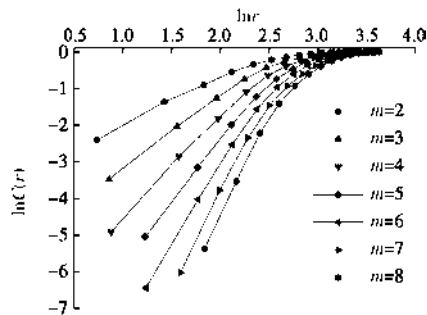


图 7 $\ln C(r) - \ln r$ 关系曲线

Fig. 7 Curves of $\ln C(r) - \ln r$

(3) 声发射分形维结果分析

图 8 (a) ~ (b) 为两个特征频段关联维数 D 值随应力水平变化规律, 图 8 (c) 为不同应力水平下关联维数 D 值平均值。关联维数 D 值的增加或减小, 标志着岩石内部破坏形式有序度的降低和提高^[27]。

分析图 8 (c) 可知, 岩石加载初期, 较低频 (频段 3) 关联维数 D 值要明显小于较高频段 (频段 10) 中, 前期研究表明, 此时频段 3 所占比例很大, 岩石

内部以有序出现小尺度微裂纹滑移为主, 释放大量较低频信号; 随着应力的增加, 较大尺度的裂纹张开逐渐增加明显^[24-25] (较高频信号有序的逐步上升), 小尺度的微裂纹滑移也在持续扩展, 故频段 10 中 D 值下降明显, 而频段 3 中 D 值变化相对稳定; 随应力继续加载至临界破坏状态, 两个特征频段中 D 值都突然快速的下降。基于前期分析结果可知, 频段 3 和频段 10 中都出现大量高幅值的信号, 且二者的占比出现明显的转折点 (最小值和最大值), 这一阶段岩石内部形成宏观裂纹, 有序释放出大量高幅低频弹性波的同时, 较大尺度的裂纹也在扩展、延伸并向宏观破裂面靠近, 产生高幅值高频弹性波, 故此时 D 值均下降明显; 完全进入塑性阶段后, 宏观裂纹完全形成, 且其他各种裂纹也在继续扩展和延伸, 此时的 AE 信号较混沌无序, 故两种特征频段中 D 值又有所上升。

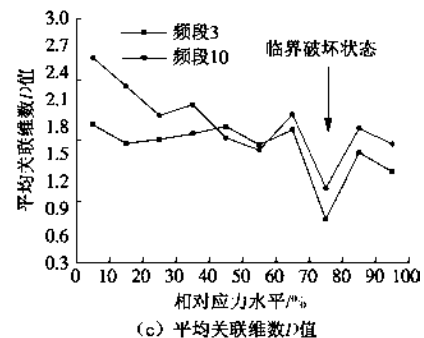
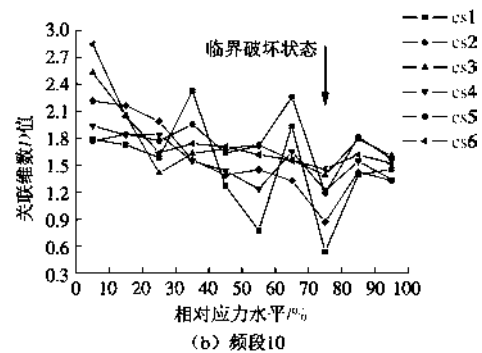
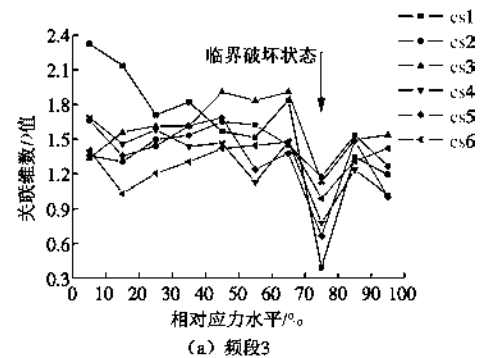


图 8 特征频段中 AE 幅值关联维数随应力水平变化

Fig. 8 Variation of relevant fractal dimensions of AE amplitude with stress levels in characteristic frequency bands

整体来看,两个特征频段中 AE 关联维数 D 值都由较高值向较低值变化,并在临界破坏状态下都出现最小值,故可将两个特征频段中 AE 关联维数 D 值都较快速下降的现象,作为岩石临界破坏前兆特征的识别信息。实际应用中,AE 关联维数 D 值究竟会降低到什么程度往往无法预计^[7, 24-26]。李元辉等^[24]为提高预测岩石破坏的准确性,提出将 AE 分形维 D 值与 b 值的同时快速下降相结合。因此,本文提出将两个特征频段中 AE 幅值关联维数 D 值都较快速下降,作为岩石临界破坏前兆的一个特征信息,从而也可进一步提高岩石临界破坏前兆预判的准确性。

3 岩石临界破坏的耦合判据

3.1 判据模型的建立

实践表明,有时仅凭一种信息来预判岩石临界破坏前兆是有难度的。AE 是岩石受力损伤破坏过程的伴生现象,和应力之间存在某些对应关系^[20]。因此,获取岩石应力与 AE 特征参数之间的关系,并通过二者的耦合分析,进而提高岩石临界破坏前兆预判的可靠性和准确性亦是有必要的。根据岩石类材料受力变形破坏过程中的 AE 信号主频组合模式^[9, 16-19],结合本文试验结果,提出建立一种基于 AE 信号频段占比与岩石应力关系的多频段 AE 信号主频识别判据模型。具体如下:

(1)假设试验过程中岩石峰值应力前所检测到的 AE 信号主频集合 F , 将其划分为 n 个频段, 即

$$F: \{f_1, f_2, \dots, f_n\} \quad (6)$$

继续设 η_{ij} 为频段 f_i 中的主频数量占应力阶段 j 内所有主频数量之和的百分比, 则可表达为

$$\eta_{ij} = \frac{N_{(f_i)_j}}{\sum_{i=1}^n N_{(f_i)_j}} \times 100\% \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (7)$$

式中, i 为不同频段标号, j 为所对应的应力阶段。

对其中任一频段信号 f_i 进行分析, 提取特征集合 K , 即

$$K: \{\eta_{i1}, \eta_{i2}, \dots, \eta_{in}\} \quad (8)$$

对不同频段中的 AE 信号主频数量按应力阶段进行统计, 得到不同应力阶段内不同频段所占百分比, 进行信号特征的耦合提取与对比分析。

(2)在频谱集合 F 中任取 l 个观测频段, 设: $f_1, f_2, \dots, f_l, (l \leq n)$ 。可构成频段特征集合 Q :

$$Q: \begin{pmatrix} \eta_{11}, \eta_{12}, \dots, \eta_{1p} \\ \eta_{21}, \eta_{22}, \dots, \eta_{2p} \\ \vdots \\ \eta_{l1}, \eta_{l2}, \dots, \eta_{lp} \end{pmatrix} \quad (9)$$

通过对 AE 信号频段进行从低频到高频排列, 进行两个或两个以上不同频段的信号特征耦合分析。

(3)将岩石在受力破裂过程中的应力可以表达为一特征集合 M , 即

$$M: \{\sigma_{ij}\} \quad (10)$$

(4)最后将 AE 信号特征矩阵 Q 与集合 M 进行联合分析, 得到特殊力学状态的识别条件:

$$\{\eta_{ij}\}_c \Leftrightarrow M_c \quad (11)$$

从而实现岩石破坏失稳及临界破坏状态的准确判别和预测。

3.2 粗砂岩临界破坏的耦合判据

根据前文建立的 AE 多频段主频识别判据模型及 2.1 节和 2.2 节中的分析结果, 在粗砂岩破坏全过程的 AE 信号频段取两个观测频段(特征频段 3, 10)进行分析。计算得到其频段特征集合 Q 中这两个特征频段 η_3, η_{10} 占比与应力之间关系的表达式为

$$\begin{bmatrix} \eta_3 \\ \eta_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0.1119 & 0.0176 & -0.0018 & 0.00008 \\ 0 & 0.0591 & -0.0063 & 0.0006 & -0.00003 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \sigma \\ \sigma^2 \\ \sigma^3 \\ \sigma^4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

拟合得到 $R_3=0.9975, R_{10}=0.9932$, 研究表明, 拟合后数据与原始数据高度相关^[5]。得到粗砂岩临界破坏状态下的识别条件如下:

$$\begin{bmatrix} 63.46\% \\ 26.28\% \end{bmatrix} \Leftrightarrow \{9.585(\text{MPa})\} \quad (13)$$

需指出, 由于篇幅所限, 本文仅给出粗砂岩临界破坏状态下的识别式, 后续继续通过对式(12)分析, 可得到其临界破坏状态前后的一系列识别式。通过分析应力和两个特征频段占比的关系发现, 应力和两个特征频段占比之间存在两种典型耦合判别模式如下:

(1)临界破坏状态前: 应力增加- η_3 下降- η_{10} 上升模式, 这种模式是指岩石内部应力增加的过程, 频段 3 占比下降, 频段 10 占比上升。此时应注意, 岩石内部的应力值是否已经接近其极限强度。如果接近了岩石的临界强度, 则必须引起重视。

(2)临界破坏状态后: 应力增加- η_3 上升- η_{10} 下降模式, 这种模式是指岩石内部应力增加的过程, 频段 3 占比上升, 频段 10 占比下降。一旦出现这种模式, 说明岩石已经开始失稳。

根据上述判别模式和识别条件, 则可对其临界破坏状态及前后进行准确判别。

4 结 论

通过对单轴压缩下的粗砂岩 AE 试验分析, 得到

了以下结论:

(1) AE 是岩石受力损伤破坏过程的一种伴生现象, 岩石破坏过程的不同阶段, 有着不同的 AE 频率组合模式。AE 信号频段占比的分布特征对岩石破坏所经历的主要过程有着较好地诠释。

(2) 岩石破坏过程中, 较低频段 AE 信号(31.25~46.875 kHz) 数量占比, 是一个先减小后增大的过程, 在临界破坏状态下出现最小值; 而较高频段 AE 信号(140.625~156.25 kHz) 数量占比, 则是一个先增大后减小的过程, 在临界破坏状态下出现最大值。因此, 提出当两个频段占比均达到某一阈值时, 作为岩石临界破坏前兆的特征信息。

(3) 岩石临界破坏状态下, 两个特征频段中的 AE 幅值关联维数 D 值都较快的下降到最低值。这一现象为岩石临界破坏前兆提供了重要的识别信息。

(4) 建立了基于 AE 频段占比与应力关系的多频段主频识别判据模型, 该模型有望为岩石破坏失稳及临界破坏状态的预判提供一定的参考依据。通过对粗砂岩的特征频段占比与应力之间进行耦合分析, 得到其临界破坏状态及前后的识别条件和判别模式, 同时结合利用特征频段占比和 AE 幅值关联维数 D 值的变化, 可更加准确地对岩石临界破坏前兆进行判别和预测。

致 谢: 感谢孙利辉博士、蒋华博士、陈波硕士、高宇博士对本文试验的帮助!

参考文献:

- [1] 孙 强, 薛晓辉, 朱术云. 岩石脆性破坏临界信息综合识别[J]. 固体力学学报, 2013, **34**(3): 311 - 319. (SUN Qiang, XUE Xiao-hui, ZHU Shu-yun. The identification method of critical information for rock brittle failure[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, **34**(3): 311 - 319. (in Chinese))
- [2] KUI Z, ZHICHENG Z, PENG Z, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of phyllite specimens under uniaxial compression[J]. Journal of Engineering Science & Technology Review, 2015, **8**(3): 53 - 60.
- [3] 吴 刚, 翟松韬, 王 宇. 高温下花岗岩的细观结构与声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(增刊 1): 351 - 356. (WU Gang, ZHAI Song-tao, WANG Yu. Research on characteristics of mesostructure and acoustic emission of granite under high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(S1): 351 - 356. (in Chinese))
- [4] LEI X, FUNATSU T, MA S, et al. A laboratory acoustic emission experiment and numerical simulation of rock fracture driven by a high-pressure fluid source[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, **8**(1): 27 - 34.
- [5] 曾 鹏, 纪洪广, 孙利辉, 等. 不同围压下岩石声发射不可逆性及其主破裂前特征信息试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(7): 1333 - 1340. (ZENG Peng, JI Hong-guang, SUN Li-hui, et al. Experimental study on characteristics of irreversibility and fracture precursors of acoustic emission in rock under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(7): 1333 - 1340. (in Chinese))
- [6] 张朝鹏, 张 茹, 张泽天, 等. 单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(4): 770 - 778. (ZHANG Zhao-peng, ZHANG Ru, ZHANG Ze-tian, et al. Experimental research on effects of bedding plane on coal acoustic emission under uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(4): 770 - 778. (in Chinese))
- [7] 李庶林, 林朝阳, 毛建喜, 等. 单轴多级循环加载岩石声发射分形特性试验研究[J]. 工程力学, 2015, **32**(9): 92 - 99. (LI Shu-lin, LIN Chao-yang, MAO Jian-xi, et al. Experimental study on fractal dimension characteristics of acoustic emission of rock under multilevel uniaxial cyclic loading[J]. Engineering Mechanics, 2015, **32**(9): 92 - 99. (in Chinese))
- [8] 杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 98 - 104. (YANG Yong-jie, WANG De-chao, GUO Ming-fu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 98 - 104. (in Chinese))
- [9] 纪洪广, 卢 翔. 常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(4): 694 - 702. (JI Hong-guang, LU Xiang. Characteristics of acoustic emission and rock fracture precursors of granite under conventional triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(4): 694 - 702. (in Chinese))
- [10] 刘建锋, 徐 进, 杨春和, 等. 盐岩拉伸破坏力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 580 - 586. (LIU Jian-feng, XU Jin, YANG Chun-he, et al. Mechanical characteristics of tensile failure of salt rock[J]. Chinese

- Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 580 – 586. (in Chinese))
- [11] 黄彦华, 杨圣奇. 饱水灰岩巴西试验准静态加载应变率效应研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(5): 802 – 811. (HUANG Yan-hua, YANG Sheng-qi. Quasi-static loading strain rate effects on saturated limestone based on Brazilian splitting test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(5): 802 – 811. (in Chinese))
- [12] 程立朝, 许江, 冯丹, 等. 岩石剪切破坏裂纹演化特征量化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 31 – 39. (CHENG Li-chao, XU Jiang, FENG Dan, et al. Quantitative analysis on development of surface cracks of rocks upon shear failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(1): 31 – 39. (in Chinese))
- [13] SHKURATNIK V L, FILIMONOV Y L, KUCHURIN S V. Features of the Kaiser effect in coal specimens at different stages of the triaxial axisymmetric deformation[J]. Journal of Mining Science, 2007, **43**(1): 1 – 7.
- [14] 凌同华, 廖艳程, 张胜. 冲击荷载下岩石声发射信号能量特征的小波包分析[J]. 振动与冲击, 2010, **29**(10): 127 – 130. (LING Tong-hua, LIAO Yan-cheng, ZHANG Sheng. Application of wavelet packet method in frequency band energy distribution of rock acoustic emission signals under impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, **29**(10): 127 – 130. (in Chinese))
- [15] 赵奎, 王更峰, 王晓军, 等. 岩石声发射 Kaiser 点信号频带能量分布和分形特征研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11): 3082 – 3088. (ZHAO Kui, WANG Geng-feng, WANG Xiao-jun, et al. Research on energy distributions and fractal characteristics of Kaiser signal of acoustic emission in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(11): 3082 – 3088. (in Chinese))
- [16] 李楠, 王恩元, 赵恩来, 等. 岩石循环加载和分级加载损伤破坏声发射实验研究[J]. 煤炭学报, 2010, **35**(7): 1099 – 1103. (LI Nan, WANG En-yuan, ZHAO En-lai, et al. Experiment on acoustic emission of rock damage and fracture under cyclic loading and multi-stage loading[J]. Journal of China Coal Society, 2010, **35**(7): 1099 – 1103. (in Chinese))
- [17] 何满潮, 赵菲, 张昱, 等. 瞬时应变型岩爆模拟试验中花岗岩主频特征演化规律分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(1): 1 – 33. (HE Man-chao, ZHAO Fei, ZHANG Yu, et al. Feature evolution of dominant frequency components in acoustic emissions of instantaneous strain-type granitic rockburst simulation tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(1): 1 – 33. (in Chinese))
- [18] 张艳博, 梁鹏, 刘祥鑫, 等. 基于声发射信号主频和熵值的岩石破裂前兆试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 1): 2959 – 2967. (ZHANG Yan-bo, LIANG Peng, LIU Xiang-xin, et al. Experimental study on precursor of rock burst based on acoustic emission signal dominant-frequency and entropy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 2959 – 2967. (in Chinese))
- [19] 赖于树, 熊燕, 程龙飞. 受载混凝土破坏全过程声发射信号频带能量特征[J]. 振动与冲击, 2014, **33**(10): 177 – 182. (LAI Yu-shu, XIONG Yan, CHENG Long-fei. Frequency band energy characteristics of acoustic emission signals in damage process of concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, **33**(10): 177 – 182. (in Chinese))
- [20] 纪洪广, 乔兰, 张树学, 等. 深部岩体稳定性评价的声发射-压力耦合模式[J]. 中国矿业, 2001, **10**(2): 51 – 54. (JI Hong-guang, QIAO Lan, ZHANG Shu-xue, et al. Mode of acoustic emission coupled with pressure measurement to diagnose stability of deep rockmass[J]. China Mining Magazine, 2001, **10**(2): 51 – 54. (in Chinese))
- [21] 龚鹵, 李长洪, 赵奎. 不同应力水平下红砂岩短时蠕变声发射特征[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2015, **36**(9): 1347 – 1352. (GONG Cong, LI Chang-hong, ZHAO Kui. Acoustic emission characteristics during short-time creep process of red sandstone under different stress level[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2015, **36**(9): 1347 – 1352. (in Chinese))
- [22] 苏国韶, 石焱炯, 冯夏庭, 等. 岩爆过程的声音信号特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(6): 1190 – 1201. (SU Guo-shao, SHI Yan-jiong, FENG Xia-ting, et al. Acoustic signal characteristics in rockburst process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(6): 1190 – 1201. (in Chinese))
- [23] 赵奎, 闫道全, 钟春晖, 等. 声发射测量地应力综合分析方法与实验验证[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(8): 1403 – 1411. (ZHAO Kui, YAN Dao-quan, ZHONG Chun-hui, et al. Comprehensive analysis method and experimental verification for in-situ stress measurement by acoustic emission tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(8): 1403 – 1411. (in Chinese))

- [24] 李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(9): 2559 - 2563. (LI Yuan-hui, LIU Jian-po, ZHAO Xing-dong, et al. Study on b-value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(9): 2559 - 2563. (in Chinese))
- [25] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕. 岩石破坏声发射强度分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(19): 3512 - 3516. (YIN Xian-gang, LI Shu-lin, TANG Hai-yan. Study on strength fractal features of acoustic emission in process of rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(19): 3512 - 3516. (in Chinese))
- [26] 张黎明, 任明远, 马绍琼, 等. 大理岩卸围压破坏全过程的声发射及分形特征[J]. 岩石力学与工程学报 2015, **34**(增刊 1): 2862 - 2867. (ZHANG LI-ming, REN Ming-yuan, MA Shao-qiong, et al. Acoustic emission and fractal characteristics of marble during unloading failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 2862 - 2867. (in Chinese))
- [27] 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. (CHONG Yu, FENG Xia-ting, ZHENG Yin-ren, 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. (in Chinese))

《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 (www.cgejournal.com) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)