

DOI: 10.11779/CJGE201706016

岩石破裂失稳声发射监测频段信息识别研究

刘祥鑫^{1, 2}, 张艳博¹, 梁正召², 刘善军³

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063009; 2. 大连理工大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 大连 116024;

3. 东北大学测绘遥感与数字矿山研究所, 辽宁 沈阳 110818)

摘要: 首先对声发射信号进行分频处理, 分析岩石损伤破裂演化过程中声发射信号频段分布规律。根据岩石断裂模式与声发射频率存在一定的对应关系, 证明了岩石破裂监测中声发射前兆优势频段的存在, 进一步构建前兆优势频段的计算方法, 确定声发射监测岩石破裂的最优短临预报参数。通过开展花岗岩圆形隧洞模型水平卸荷试验, 分析整个过程的声发射信号, 寻找前兆优势频段, 以此验证方法的可靠性。研究结果表明, 水平方向卸荷瞬间, 隧洞两壁发生劈裂破坏, 频段(31.25~62 kHz)的小波能量占比达73%以上。临近最终破裂, 频段(7.8125~15.625 kHz)变能系数 ζ_{CD6} 由前一刻的0.5突增到15, 具有典型的灾变响应特征, 可以确定该频段为声发射前兆优势频段。选择 ζ'_{CD6} 作为宏观破裂的短临预报参数, 再结合临近最终破裂前声发射主频在频段(90~105 kHz)和(13~20 kHz)所出现的响应突现规律, 可以为预测花岗岩圆形隧洞模型的失稳破坏提供预警参量。

关键词: 岩石力学; 声发射; 频率; 识别

中图分类号: TU454

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)06-1096-10

作者简介: 刘祥鑫(1987-), 男, 讲师, 主要从事矿山岩石力学教学与研究方面的工作。E-mail: liuxiangxin9@163.com。

Recognition of frequency information in acoustic emission monitoring of rock fracture

LIU Xiang-xin^{1, 2}, ZHANG Yan-bo¹, LIANG Zhen-zhao², LIU Shan-jun³

(1. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China; 2. State Key Laboratory

of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. Institute for Geo-informatics and Digital

Mine Research, Northeastern University, Shenyang 110818, China)

Abstract: The mathematical methods of FFT and wavelet transform are used to deal with the acoustic emission (AE) frequency information of rock fracture firstly. Combined with the spectral distribution of AE signal, the main response spectrum of this lithology in specific form of fracture is selected. The AE precursor advantage spectrum and its calculation method, the most suitable short-term and optimal impending prediction parameters should be optimized, which gives a new way to monitor the disasters of rock mass engineering. In order to prove the validity of this method, the circular tunnel model is used in horizontal unloading tests in laboratory. The results show that the model edge wall around the tunnel is fractured at the moment of horizontal unloading. The energy achieves 73% between 31.25 and 62 kHz, which reflects the properties of rock materials. When it is near the breakdown (TP=2425 s), the changing coefficient of ζ_{CD6} becomes from 0.5 to 15, and it has characteristics of typical disaster response. (7.8125 ~ 15.625 kHz) is the precursor advantage spectrum, and ζ'_{CD6} can be used as the macro rupture of short-term and impending prediction parameters combined with the sudden emergence in (90 ~ 105 kHz) and (13 ~ 20kHz) of AE main-frequency. The proposed method may provide new characteristic parameters for disasters monitoring and early warning in rock mass engineering.

Key words: rock mechanics; acoustic emission; frequency; identification

0 引言

岩石从变形发展到破裂通常是裂纹的萌生、扩展、以及裂纹间的相互贯通过程^[1]。声发射技术作为一种行之有效的岩石破裂监测手段, 目前已开展了广泛的应用研究, 其中声发射频段能给出破裂尺度、能量耗

散高低、破裂面的开合程度等断裂源特征信息, 特别是裂纹的特征模式分类与辨识, 是表达断裂源特征最

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB047100); 国家自然科学基金项目(51374088, 51574102, 51604117)

收稿日期: 2016-03-06

精确的方法之一^[2]。

20 世纪 60 年代, Mogi^[3]和 Scholz^[4]通过采集冲击条件下岩石破裂的声发射信号, 发现岩石声发射信号的振幅-频率与天然地震的震级-频率存在一定的关联。Armstrong^[5]提出岩石在初始破裂时的声发射高频成分较多, 并在某些条件下地震之前在高应变地区的高频发射较丰富。Chen^[6]详细介绍了岩石的声发射监测系统, 结合声发射监测技术的特点, 对声发射技术在地震序列、岩石的破裂机制方面展开讨论。Gowd^[7]采用 Buntsandstone 开展常规三轴试验, 得出声发射频段主要分布在 100~300 kHz。Calder 等^[8]分析声发射的高频成分, 发现在一定程度上可以提供岩爆的前兆判据。潘长良等^[9]指出声发射频率与岩石组成和结构有关, 也与受力状态存在一定的关联, 声发射主频可反映裂纹扩展特征。周瑶琪等^[10]在花岗岩单轴压裂试验过程中, 发现发生宏观断裂时, 声发射能量达到最大, 信号频率一般为[200, 700 kHz], 之后有降低的趋势。凌同华等^[11]利用小波包分析了冲击载荷下岩石声发射信号能量分布特征, 重点讨论了不同岩石对声发射信号频带能量分布的影响。Lu 等^[12]开展煤-岩混合岩样的单轴岩爆试验, 发现声发射主频向低频过渡, 且主频带变宽, 并指出低频现象的出现可以用来预测岩爆的发生。贾雪娜^[13]进行了应变型花岗岩岩爆的声发射本征频谱特征研究, 指出穿晶裂纹的大量出现与岩爆阶段特有的连续波-低频-高幅值声发射本征频谱有密切的关系。何满潮等^[14]采用花岗岩开展瞬时岩爆模拟试验, 指出频率成分复杂代表多种破裂模式的发生, 主频值降低至 106 kHz 预示着岩爆时刻岩石的高能量释放。黄晓红等^[15]利用小波分解找到不同传感器的声发射信号中同一主频的子带信号, 并对这些同一主频的子带信号进行全相位频谱分析。笔者^[16-17]、和张艳博等^[18]通过不同岩性岩石声发射试验, 得到花岗岩、变粒岩、石灰岩等岩石的信号频带及主频分布规律。并通过构建特征向量, 采用 BP 神经网络开展岩性识别研究。

总体来看, 对于岩石破坏问题的声发射频域研究, 大多学者致力于寻找不同岩石破裂演化过程中声发射信号的能量分布情况, 寻找岩石大破裂前频率的演化规律。但岩石及其破裂的复杂性, 导致在声发射监测中出现有效监测频段识别与选取不明、失稳预测不准等问题。如何从声发射信号中识别有效监测频段, 提取最佳监测参数, 是提高声发射/微震监测精度的关键。

本文从岩石断裂模式与声发射频率存在一定对应关系的角度出发, 首先证明了声发射前兆优势频段的存在, 构建了声发射优势频段计算方法。研究成果可

为岩石破裂的声发射监测提供一种可能的定量解决方案, 也为岩体工程灾害的声发射/微震监测预警提供一种可行的预警参量。

1 基础理论

1.1 岩石声发射波形特征

岩石组成材料的多相性及其特有的地质形成历史, 导致其声发射信号有着特殊的波形特征。在岩石损伤破裂的前中期, 声发射信号的波形具有上升时间极短, 快速到达峰值后逐渐下降等特点, 是典型的突发型信号(如图 1(a))。在大破裂来临时, 破裂的出现具有瞬时群发特征, 声发射信号较复杂, 单个声发射信号可能包含多个断裂源特征信息, 出现连续型信号(图 1(b))的概率大大增加。

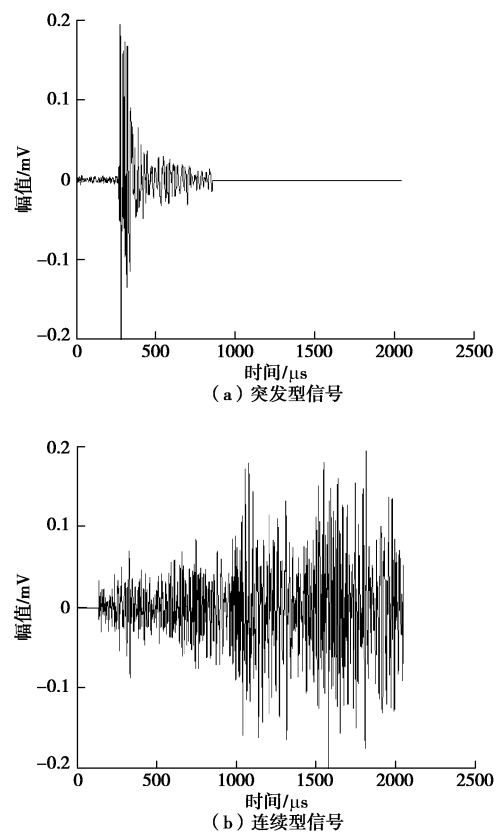


图 1 典型岩石破裂声发射信号

Fig. 1 Typical AE signal of rock failure

图 2(a) 为岩石破裂产生的典型声发射波形信号, 声发射频率分布是指对信号进行快速傅里叶变换(FFT)后, 在各频率点上的响应情况, 声发射主频是指整个信号幅值响应最高的频率点(图 2(b))。

1.2 小波分析

小波变换原理是时间频率的局部化分析, 通过伸缩平移运算对信号进行多尺度细化, 最终达到高频处时间细分, 在低频处频率细分, 且能自动适应时频信号分析的要求, 从而可聚焦到信号的任意细节^[19]。

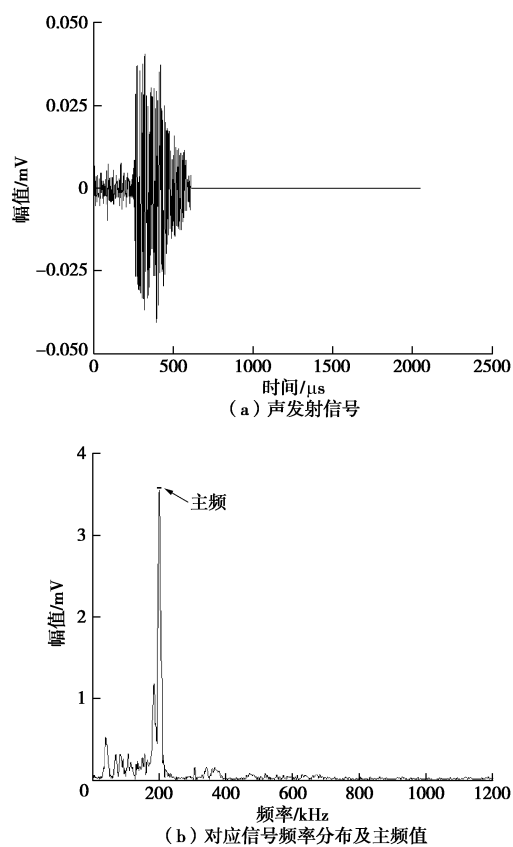


图 2 典型岩石破裂声发射信号

Fig. 2 Typical type of AE signal of rock fracture

小波分解结构树如图 3 所示，CA3 表示第 3 层小波分解的低频子信号，CD3 为第 3 层小波分解的高频子信号；CA2 为第 2 层小波分解的低频子信号，CD2 为第 2 层小波分解的高频子信号；CA1 为第 1 层小波分解的低频子信号，CD1 为第一层小波分解的高频子信号。

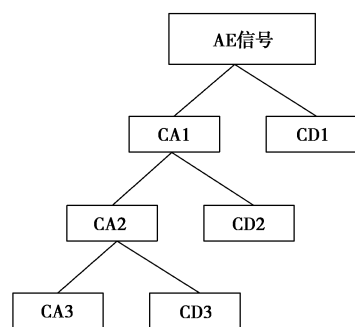


图 3 3 层小波分解结构树图

Fig. 3 Structure of a wavelet decomposition tree with 3 layers

对岩石破裂产生的某个声发射信号进行 6 层 dB6 小波分解，分解得到每层子信号（图 4（a））及对应的频率分布图（图 4（b））。

对图 4 的声发射信号每层子信号所属频段、信号的时-频域幅值等情况进行统计（表 1）。该信号时序信号在 CD5 层（15.625~31.25 kHz）的幅值最大，即能量主要集中频段在 CD5 层；在频域方面 CD6 层

（7.8125~15.625 kHz）的频域信号幅值最大，可判断出声发射信号主频应分布在该频段内。

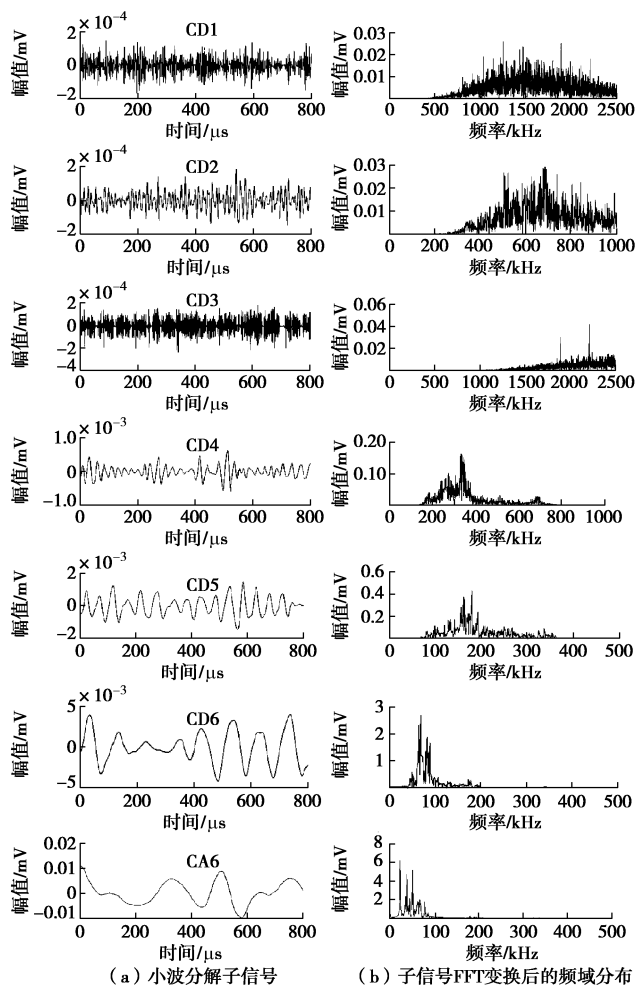


图 4 岩石破裂声发射信号 6 层小波分解

Fig. 4 Six layers of wavelet decomposition for AE of rock failure

表 1 声发射信号 dB6 小波 6 层分解情况表

Table 1 6 layers of AE signal by dB6

小波子 信号	所属频段 /kHz	对应时域信号 幅值/mV	对应频域信 号幅值/mV
CD1	250~500	$-2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$	0~0.03
CD2	125~250	$-4 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$	0~0.03
CD3	62.5~125	$4 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$	0~0.05
CD4	31.25~62.5	$-4 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$	0~2
CD5	15.625~31.25	-0.02~0.02	0~3
CD6	7.8125~15.625	-0.01~0.015	0~10
CA6	0~7.8125	-0.01~0.015	0~5

2 岩石破裂前声发射前兆优势频段

2.1 岩石失稳过程中的裂纹演化特征

作为一种含初始缺陷的多相复合结构天然材料，在边界条件作用的初始阶段，岩石内部发生的损伤破裂呈随机分布状态。在外界作用持续进行情况下，微

裂纹不断演化发展,在局部形成贯通区,最终扩展形成宏观裂纹^[20]。

岩石破裂存在一个多尺度效应,通常是一个断裂的跨尺度演化发展过程,即由大量微裂纹累积并跨尺度非线性串联发展,最终形成一种宏观尺度的灾变现象^[21]。

2.2 前兆优势频段及其定义

何满潮等^[14]研究指出,声发射频率成分复杂代表多种破裂模式同时发生,频率与破裂模式存在一定的对应关系。此外,Enomoto等^[22]和潘长良等^[9]曾指出,出现声发射不同频域分布的现象可归因于不同的断裂机制和受力状态。

据2.1节所述,岩石损伤破坏过程是一个微破裂扩展在时间和空间上从无序到有序发展的过程,声发射信号也将从频率响应的无序状态到某个频段出现集中响应的过程。

所谓前兆优势频段,是指各种断裂形态所对应的声发射频域中存在一个对破裂演化最为敏感的频段。寻找该频段可表征岩石损伤破裂演化过程的动态特征,预测岩石最终破裂。本文将采用前兆优势频段对岩石失稳破裂进行描述。

2.3 前兆优势频段的求解算法

变能系数 ζ 及其物理含义:当前破裂的能量释放相较于第一次破裂能量释放的变化情况,应用该时刻破裂所产生声发射信号与第一次破裂时声发射信号对应频段能量占比(小波能谱系数)的增减情况进行表征。

根据变能系数 ζ 的定义,以岩石损伤破裂过程所出现的第一个声发射信号作为基准信号,选取基准信号特征参数值 C , h 为 t 时刻声发射特征参数值的增量, $\Theta_i(t)$ 为岩石破裂 t 时刻声发射特征参数的观测值, $r_i(t+\Delta t)$ 为 t 时刻到 $(t+\Delta t)$ 时刻声发射特征参数的特征函数。

特征函数 $r_i(t+\Delta t)$ 求解如下:

$$r_i(t+\Delta t) = \Theta_i(t+\Delta t) - C_i \quad (1)$$

若对信号进行小波分解, $r(t)$ 展开求解如下:

$$\left. \begin{aligned} r_{CD1}(t+\Delta t) &= \Theta_{CD1}(t) - C_{CD1}, \\ r_{CD2}(t+\Delta t) &= \Theta_{CD2}(t) - C_{CD2}, \\ &\dots\dots\dots \\ r_{CDi}(t+\Delta t) &= \Theta_{CDi}(t) - C_{CDi}, \\ r_{CAi}(t+\Delta t) &= \Theta_{CAi}(t) - C_{CAi} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

变能系数 ζ 为

$$\zeta_i = \frac{r_i(0,h)}{c_i} = \frac{\Theta_i(t) - c_i}{c_i} \quad (3)$$

对 ζ 展开求解如下:

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{CD1}(t+\Delta t) &= \frac{\Theta_{CD1}(t) - C_{CD1}}{C_{CD1}}, \\ \zeta_{CD2}(t+\Delta t) &= \frac{\Theta_{CD2}(t) - C_{CD2}}{C_{CD2}}, \\ &\dots\dots\dots \\ \zeta_{CDi}(t+\Delta t) &= \frac{\Theta_{CDi}(t) - C_{CDi}}{C_{CDi}}, \\ \zeta_{CAi}(t+\Delta t) &= \frac{\Theta_{CAi}(t) - C_{CAi}}{C_{CAi}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

前兆优势频段是对岩石失稳破裂的前兆特征表现最为明显的频段,其变能系数 $\zeta_i = \zeta_{\max}$ 。为使 ζ_{\max} 的前兆响应最大、最快,需对 ζ_{\max} 进行预警参数计算,并从中优选出一个对前兆响应最明显、变化速率最快的参量。

2.4 预警参数的选定

变能系数一阶导数及其物理含义:变能系数 ζ 变化速率反映了声发射信号某频段能量占比(小波能谱系数)增减情况的变化速率。

变能系数二阶导数及其物理含义:变能系数 ζ 变化的加速度反映了声发射信号某频段能量占比(小波能谱系数)增减变化速率的快慢。

在临近最终失稳破裂时, ζ_{CDi} 或 ζ_{CAi} 临近最后破裂均出现数值明显突变现象。选取其中一个突增最明显的 ζ_{\max} 进行一阶、二阶差分求导运算。

对曲线 $\zeta_{\max} - t$ 进行一阶差分求导,得到 $\zeta'_{\max} - t$,即变能系数随时间的变化率,反映了 ζ_{\max} 随时间变化程度。采用中心差分法进行求解:

$$\zeta'_{\max}(t) = \frac{\zeta_{\max}(t+1) - \zeta_{\max}(t-1)}{2\Delta t} \quad (5)$$

二阶差分求导得到 $\zeta''_{\max} - t$,即变能系数随时间变化的加速度,反映了 ζ_{\max} 随时间变化程度的快慢。由式(6)进行求解:

$$\zeta''_{\max}(t) = \frac{\zeta_{\max}(t+1) - \zeta_{\max}(t-1)}{2\Delta t} \quad (6)$$

最后,对比 ζ_{\max} , ζ'_{\max} , ζ''_{\max} 变化规律,以响应先后及响应增幅情况作为判别依据,优选最佳预警参数,将该参数作为宏观破裂的短临预警参数。

3 卸荷诱发隧洞模型破坏试验

3.1 试验简述

(1) 岩石试样及设备

选用山东莱洲某地下矿山的花岗岩,将岩石制作成圆形隧洞模型,尺寸为150 mm×150 mm×150 mm的立方体,中间钻直径为45 mm的通孔,对试样进行仔细研磨,使其平整度符合试验要求。

试验加载系统选用RLW-3000微机控制双轴压力

伺服试验机, 如图 5 (a)。声发射仪选择美国声学物理公司 PAC(Physical Acoustic Corporation)生产的 PCI-2 型 8 通道全数字化、计算机控制采集的声发射监测系统, 如图 5 (b)。声发射传感器选择 R6 α 型谐振式高灵敏度传感器, 该传感器在 0~350 kHz 范围内均为有效增益。

声发射监测系统的前置放大器增益值为 40 dB, 声发射采样信号阈值值为 45 dB, 波形采样率为 1MSPS, 采样长度为 2 K。采用具有一定弹性的塑料胶套将传感器固定好, 在传感器和试样之间涂沫凡士林, 以增强二者耦合性。

为保证论文试验数据的典型性, 本试验一共重复 7 次, 每次试验均布置了 8 个声发射探头, 保证至少 5 块试件的试验数据有效。

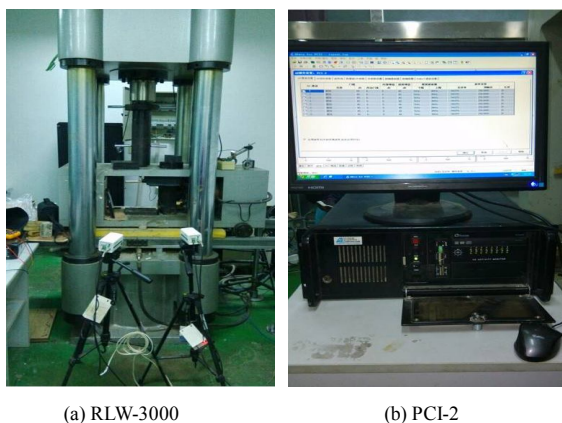


图 5 试验系统
Fig. 5 Testing system

(2) 试验过程

针对工程现场中成型巷道附近岩体或矿体的开挖工序对巷道稳定性的影响问题, 本试验采用轴向保载、水平卸荷操作模拟此过程, 开展围岩开挖对已成型巷道的稳定性影响研究。

加载路径设计如下: 竖向和水平方向均采用力加载方式, 其中竖向速率设置为 1000 N/s, 水平方向为 800 N/s。试验过程分为两步: ①竖向和水平方向同时加载, 水平方向加载到 300 kN (13.33 MPa), 竖向加载到花岗岩单轴抗压强度的 90% (107.2 MPa); ②保持应力环境 5 min, 以 40 mm/min 的速度卸掉水平方向载荷, 将竖向控制方式换成位移。

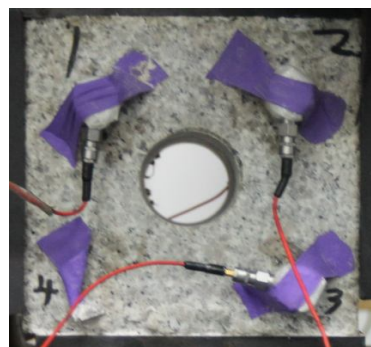
3.2 变形破裂过程及力学分析

(1) 隧洞模型破坏过程

隧洞模型的破坏模式与最大主应力方向和卸荷方向密切相关^[23]。通过对试件整体和中间隧洞模型内部进行高速摄像, 如图 6 所示。

初级阶段 I: 隧洞模型并没有产生明显破裂, 此

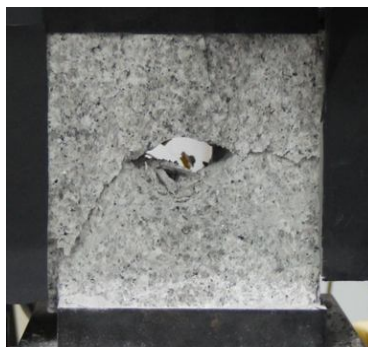
时声发射现象由岩石本身微小孔隙、裂隙等被压密所致 (图 6 (a))。



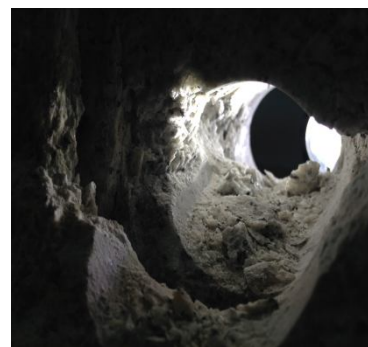
(a) 初级阶段 I



(b) 应力环境保持阶段 II - 孔洞内壁



(c) 水平卸荷阶段 III - 整体



(d) 水平卸荷阶段 III - 孔洞内壁

图 6 岩石破裂过程可见光图片

Fig. 6 Visible light images of rupture process

应力环境保持阶段 II: 水平应力、竖向应力保持不变, 但在孔洞左右边壁的应力集中区已经出现不连续的微小破裂 (图 6 (b) 线条包围区域)。在现场隧

洞工程中, 隧洞表面围岩一般都会喷射混凝土, 此破裂现象在现场很难观测到。

水平卸荷阶段Ⅲ: 水平卸荷操作导致水平应力快速下降, 当水平应力降至最低值时竖向应力发生阶跃式下降。试件整体发生严重破坏(图 6 (c)), 孔洞内壁出现不同程度的破坏(图 6 (d))。

(2) 力学分析

如图 7 (a), 在 I 阶段, 岩石竖向处于加载阶段, II 为应力环境保持阶段, III 为水平卸荷阶段。 $t=t_1$ 时, 岩石试件进入应力环境保持阶段; $t=t_2$ 时, 水平应力卸荷, 孔洞围岩左右边壁出现拉应力集中, 发生连续的劈裂破坏; $t=t_3$ 时, 水平卸荷至最低点时, 岩石试件发生整体破裂。

对 II、III 阶段局部放大, 如图 7 (b) 所示, 在水平应力卸荷初期 $T_{初}=2350$ s 之前, 竖向应力曲线并没有出现应力降, 水平方向开始卸荷, 水平应力开始下降, 但巷道模型仍能维持稳定, 模型竖向承载能力不受影响; 当 $T_{前}=2425$ s 时, 水平应力已降至最低, 竖向应力仅出现极小的应力降, 隧洞模型仍保持较强的承载能力; $T_{发}=2430$ s, 竖向应力开始出现阶跃式下降, 隧洞模型失稳破坏。

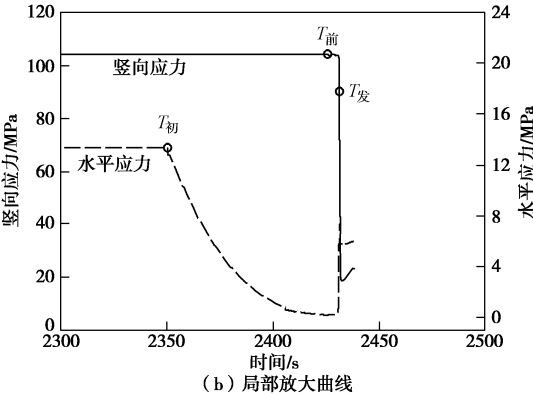
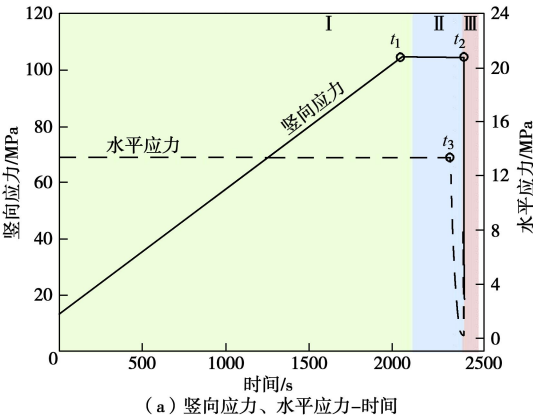


图 7 时间 - 应力关系曲线图

Fig. 7 Graph of mechanical relationship

由以上分析知, 若能捕捉到 $T_{前}=2425$ s 时刻的声

发射特征信息, 可作为破裂失稳短临预警指标, 无疑可为前兆预测提供依据。

3.3 声发射时频分析

(1) 声发射信号能量集中频段

采用 Matlab 编程计算出破裂全过程的声发射信号主频值, 得到主频随加载时间的变化趋势, 如图 8 所示。此块试样的声发射主频呈条带状分布, 集中区域在 A_1 (31~62 kHz) 之间。

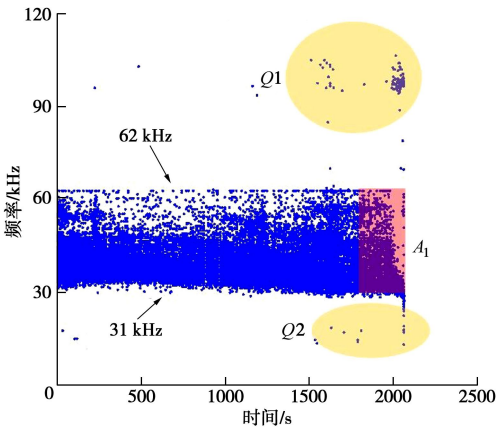


图 8 声发射主频分布散点图

Fig. 8 Scattering of AE frequency distribution

如表 2 所示, CD3 (62.5~125 kHz) 和 CD4 (31.25~62.5 kHz) 在岩石破裂整个演化过程的能谱系数(能量占比)平均值分为为 39.61% 和 34.33%, 两者占总能量的 73.94%。

表 2 声发射信号小波子信号能谱系数

Table 2 Spectral coefficients of AE signal

小波子信号	信号频段/kHz	能谱系数平均值/%
CD1	(250 ~ 500)	3.05
CD2	(125 ~ 250)	13.64
CD3	(62.5 ~ 125)	39.61
CD4	(31.25 ~ 62.5)	34.33
CD5	(15.625 ~ 31.25)	3.39
CD6	(7.8125 ~ 15.625)	0.31
CA6	(0 ~ 7.8125)	5.69

结合声发射信号主频以及声发射信号小波能谱系数分布情况, 得到花岗岩圆形隧洞模型水平卸荷破坏声发射信号集中响应频段: $F = (F_{A1}) \cap (F_{CD3} \cup F_{CD4}) = (31 \sim 62) \cap ((62.5 \sim 125) \cup (31.25 \sim 62.5)) = 31.25 \sim 62$ kHz。

(2) 岩石破裂监测声发射监测频段

a) 声发射前兆优势频段

表 3 为岩石破裂过程中声发射信号进行小波分解后部分小波子信号的能谱系数值。

根据 2.2 节中前兆优势频段的定义, 小波子信号

(CA6, CD6~CD1) 的基准信号 C 值分别为每层小波子信号的能谱系数值 $C_{CD1}=0.83418$, $C_{CD2}=2.8798$ 、 $C_{CD3}=16.222$, $C_{CD4}=49.804$, $C_{CD5}=24.386$, $C_{CD6}=4.5181$, $C_{CA6}=1.3557$ 。 θ_i 为岩石破裂过程中每个声发射信号的小波能谱系数值。

特征函数 $r(t)$ 如下:

$$\left. \begin{aligned} r_{CD1}(t+\Delta t) &= \Theta_{CD1}(t) - C_{CD1}, \\ r_{CD2}(t+\Delta t) &= \Theta_{CD2}(t) - C_{CD2}, \\ r_{CD3}(t+\Delta t) &= \Theta_{CD3}(t) - C_{CD3}, \\ r_{CD4}(t+\Delta t) &= \Theta_{CD4}(t) - C_{CD4}, \\ r_{CA5}(t+\Delta t) &= \Theta_{CA5}(t) - C_{CA5}, \\ r_{CD6}(t+\Delta t) &= \Theta_{CD6}(t) - C_{CD6}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

变能系数 ζ 为

$$\left. \begin{aligned} \zeta_{CD1} &= \frac{r(0,h)}{C} = \frac{\Theta_{CD1}(t) - C_{CD1}}{C_{CD1}}, \\ \zeta_{CD2} &= \frac{r(0,h)}{C} = \frac{\Theta_{CD2}(t) - C_{CD2}}{C_{CD2}}, \\ \zeta_{CD3} &= \frac{r(0,h)}{C} = \frac{\Theta_{CD3}(t) - C_{CD3}}{C_{CD3}}, \\ \zeta_{CD4} &= \frac{r(0,h)}{C} = \frac{\Theta_{CD4}(t) - C_{CD4}}{C_{CD4}}, \\ \zeta_{CD5} &= \frac{r(0,h)}{C} = \frac{\Theta_{CD5}(t) - C_{CD5}}{C_{CD5}}, \\ \zeta_{CA6} &= \frac{r(0,h)}{C} = \frac{\Theta_{CD6}(t) - C_{CD6}}{C_{CD6}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

如图 9 所示, 不同频段的变通系数 ζ_i 响应幅度存在较为明显的差异, 对于破裂的前兆响应而言, CD5 和 CD6 更为明显。但 CD1、CA6 整体响应较强, 数

值区间为[0, 100], CD2 也达[0, 40]。若不进行信号分频处理, CD5 和 CD6 所携带的断裂信息会被其他频段所掩盖, 这样很容易导致监测结果的失真或误判。

在临近最终失稳破裂时, ζ_{CD5} , ζ_{CD6} , ζ_{CA6} 均出现明显递增情况。再结合最终失稳破裂时所产生破裂具有能量耗散大、声发射信号频率低等特点, 对此阶段的声发射信号进行小波变换, CD5 (15.625~31.25 kHz)、CD6 (7.8125~15.625 kHz) 的变能系数 ζ 增大较明显, 其中 ζ_{CD5} 分布于[-2, 4], 而 ζ_{CD6} 则分布于[-1, 20]。

当 $T_{前}=2425$ s 时, CD5 的 $\zeta_{AE-CD5}=3.5$, CD6 的 $\zeta_{AE-CD6}=15$, 虽然 CD5 和 CD6 的前兆时间相同, 但 CD6 的前兆响应幅度要大于 CD5, 因此将 CD6 层 (7.8125~15.625 kHz) 定义为前兆优势频段, 即 $\zeta_{CD6}=\zeta_{max}$ 。

b) 前兆预警参量的优选

对 $\zeta_{CD6}-t$ 进行差分一阶、差分二阶求导处理, 求得一阶导数及二阶导数 (图 10 (a))。在 2400~2450 s 之间, ζ_{max} , ζ'_{max} 和 ζ''_{max} 响应出现全幅递增情况。对区域 2420~2430 s 中进行局部放大处理, 如图 10 (b) 所示, 三者的响应时间及增幅顺序依次为 $\zeta''_{max} > \zeta'_{max} > \zeta_{max}$, 即 ζ''_{max} 变化提前于 ζ_{max} 和 ζ'_{max} 。

因此, 针对本次花岗岩圆形隧洞模型水平卸荷破坏试验, 应对频段 CD6(7.8125~15.625 kHz)进行重点监测, 选择 ζ''_{max} 为预警指标, 将 ζ''_{max} 作为失稳破裂的短临预报参数。

表 3 岩石破裂演化过程中声发射信号不同小波子信号能谱系数值及主频值

Table 3 Spectral values of different wavelets and main frequencies in evolution process of rock burst							
序号	CD1 (250~500 kHz)	CD2 (125~250 kHz)	CD3 (62.5~125 kHz)	CD4 (31.25~62.5 kHz)	CD5 (15.625~31.25 kHz)	CD6 (7.8125~15.625 kHz)	CA6 (0~7.8125 kHz)
1	0.83418	2.8798	16.222	49.8040	24.386	4.5181	1.3557
3	0.23281	1.164	11.528	28.6310	9.4166	5.0419	43.986
4	1.1938	11.517	33.154	30.3930	4.6578	0.63954	18.445
5	1.9975	19.432	67.885	9.5863	0.52575	0.13115	0.44207
9	3.0314	15.515	56.7	22.7440	1.0381	0.21825	0.75336
10	1.3802	9.6719	41.44	24.9070	0.75906	0.459	21.383
11	1.6563	10.254	49.787	23.9150	3.0426	0.45999	10.886
12	3.3436	14.206	54.338	23.7600	1.1101	0.12699	3.1156
13	0.39826	7.595	67.997	22.8740	0.97504	0.1188	0.042017
14	0.43093	8.0183	56.346	33.5000	1.4158	0.048129	0.24087
15	0.60345	19.069	71.085	8.9745	0.1479	0.015955	0.1047
16	0.82596	23.796	40.189	31.8560	2.3858	0.89027	0.056013
17	1.8892	18.595	37.303	32.1780	0.8118	0.31834	8.9046
18	1.6372	22.158	52.717	17.9270	3.5346	0.72733	1.2984
...							
68117	0.20819	0.28403	0.7845	46.4600	48.782	0.41718	3.064
68118	0.22089	2.925	15.398	3.8997	76.091	0.40218	1.0633
68119	0.059677	2.8951	18.766	53.289	24.873	0.097061	0.020401
68120	0.22448	6.6673	70.924	15.7000	6.4471	0.018483	0.019206

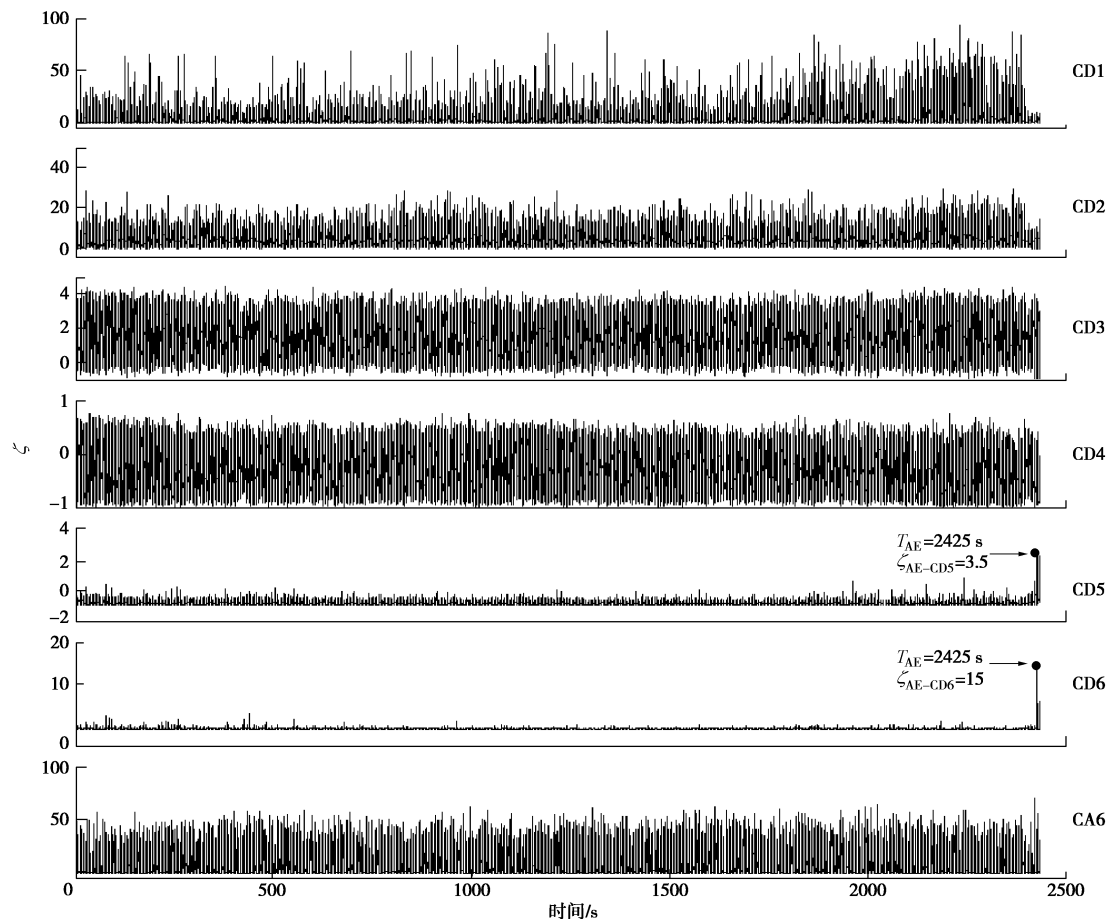


图 9 变能系数 ζ -时间 t 散点图

Fig. 9 Scattering of ζ

c) 声发射主频

如图 8 所示, 研究发现临近最终失稳破裂前, 主频信息出现异化情况。在 Q1 (90~105 kHz) 和 Q2 (13~20 kHz) 区域突现、A1 (31~62 kHz) 区域出现响应减少等异化情况。

根据大尺度破裂对应低频声发射信号, 小尺度破裂将产生高频声发射信号^[24]。由此得出, 最终失稳时所出现的破裂尺度不一, 捕捉此类异化现象, 可辅助优势频段进行最终破裂前兆判别。

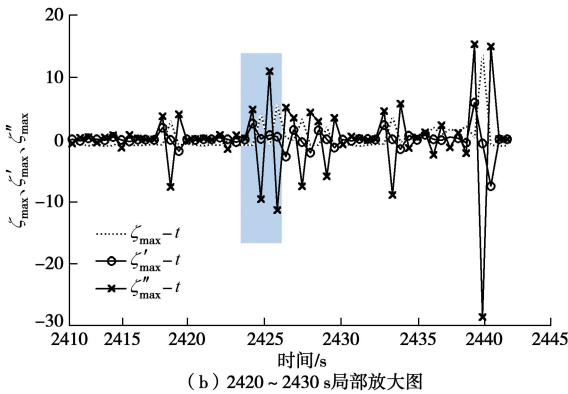


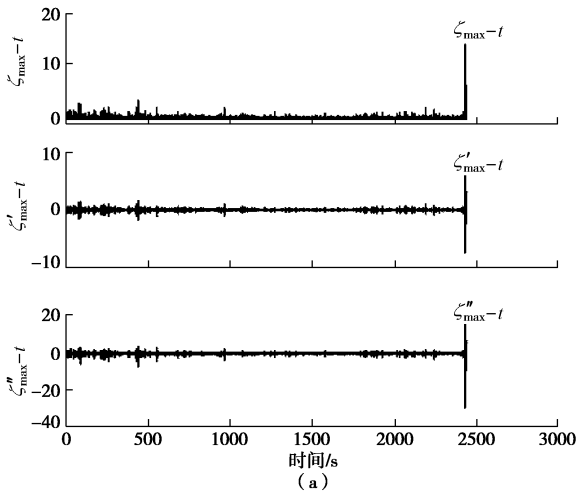
图 10 CD6 层变能系数 ζ_{CD6} 分布图

Fig. 10 Distribution of $\zeta_{CD6}-t$

3 结 论

(1) 采用傅里叶变换与小波分析, 分析岩石损伤破裂过程中声发射信号频段分布规律, 识别岩石在破坏中声发射主要响应频段。在此基础上, 提出声发射前兆优势频段及其计算方法, 确定声发射监测岩石破裂的最优短临预报参数。

(2) 开展花岗岩圆形隧洞模型水平卸荷物理试



验,分析整个过程的声发射信号,对比力学试验结果,验证了方法的可靠性。在此隧洞模型中,频段[7.8125, 15.625 kHz]在 $T_{前}=2425$ s,变能系数由前一刻的0.5突增到15,具有典型的灾变响应特征,该频段可定义为前兆响应频段。

(3)在隧洞模型临界破坏前,在主频分析中,Q1(90~105 kHz)和Q2(13~20 kHz)区域出现响应突现规律。通过捕捉Q1和Q2这类突然出现的响应信息,可为预测岩石破裂提供帮助。

本文提出的声发射前兆优势频段能较为准确地反映岩石损伤破裂信息,为捕捉岩石失稳前兆规律提供了一种可行的方法。需要指出,在实际工程中,往往采用微震监测技术来获取岩体破坏信息,针对现场微震的前兆优势频段有待进一步研究。

此外,声发射或微震信号的优势频段受岩性、自然环境、边界条件、断裂尺度、断裂模式等因素的影响,本文提出的研究方法还需要进一步验证。

参考文献:

- [1] 赵兴东,李元辉,刘建坡,等.基于声发射及其定位技术的岩石破裂过程研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(5): 990-995. (ZHAO Xing-dong, LI Yuan-hui, LIU Jian-po, et al. Study on rock failure process based on acoustic emission and its location technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 990-995. (in Chinese))
- [2] 耿荣生,沈功田,刘时风.声发射信号处理和分析技术[J].无损检测,2002,24(1): 23-28. (GENG Rong-sheng, SHEN Gong-tian, LIU Shi-feng. An overview on the development of acoustic emission signal processing and analysis technique[J]. NDT, 2002, 24(1): 23-28. (in Chinese))
- [3] MOGI K. Study of elastic shocks caused by the fracture of brittle homogeneous material and its relation to earthquake phenomena[M]. Tokyo: Bulletin of the Earthquake Research Institute, 1962: 40.
- [4] SCHOLZ C H. The frequency-magnitude relation of micro-fracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58: 399-415.
- [5] ARMSTRONG B H. Acoustic Emission prior to rockbursts and earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1969, 59(3): 1259-1279.
- [6] CHEN Y. Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research[J]. Acta Geophysica Sinica, 1977, 20(4): 312-322.
- [7] GOWD T N. Factors affecting the acoustic emission response of triaxially compressed rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1980, 17(4): 219-223.
- [8] CALDER P N, MADSEN D. High frequency precursor analysis prior to a rockburst[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1989, 26: 3-4.
- [9] 潘长良,祝方才,曹平,等.单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征[J].中南工业大学学报,2001,32(4): 336-339. (PAN Chang-liang, ZHU Fang-cai, CAO Ping, et al. Characteristics of acoustic emission of bursting-intended rocks under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University of Technology, 2001, 32(4): 336-339. (in Chinese))
- [10] 周瑶琪,王爱国,陈勇,等.岩石压裂过程中的声发射信号研究[J].中国矿业,2008,17(2): 94-97. (ZHOU Yao-qi, WANG Ai-guo, CHEN Yong, et al. Research on acoustic emission of rock fracture[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(2): 94-97. (in Chinese))
- [11] 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, 255. (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, 255. (in Chinese))
- [12] LU Cai-ping, DOU Lin-ming, LIU Hui, et al. Case study on microseismic effect of coal and gas outburst process[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 53: 101-110.
- [13] 贾雪娜.应变岩爆试验的声发射本征频谱特征[D].北京:中国矿业大学,2013. (JIA Xue-na. Experimental study on acoustic emission Eigen-frequency spectrum of strainbursts[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2013. (in Chinese))
- [14] 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): 1-8, 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): 1-8, 33. (in Chinese))

- [15] 黄晓红, 张艳博, 田宝柱, 等. 基于相位差时延估计法的岩石声发射源定位研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(2): 381 - 386. (HUANG Xiao-hong, ZHANG Yan-bo, TIAN Bao-zhu, et al. Time delay estimation and acoustic emission source location of rock based on phase different[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(2): 381 - 386. (in Chinese))
- [16] 刘祥鑫. 不同岩石声发射时频特性及其信号识别技术研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2011. (LIU Xiang-xin. Study on time-frequency characteristics of acoustic emission from different rocks and its signal recognition technology[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2011. (in Chinese))
- [17] LIU X Z, LIANG Z Z, ZHANG Y B, et al. Acoustic emission signal recognition of different rocks using wavelet transform and artificial neural network[J]. Shock and Vibration, Volume 2015, Article ID 846308, 14 pages.
- [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] MORLET J, ARENS G, EFOURGEAU, et al. Wave propagation and sampling theory part: sampling theory and complex waves[J]. Geophysics, 1982, **2**: 222 - 236.
- [20] 赵忠虎, 鲁 睿, 张国庆. 岩石失稳破裂的能量原理分析[J]. 金属矿山, 2006, **364**(10): 17 - 20, 37. (ZHAO Zhong-hu, LU Rui, ZHANG Guo-qing. Analysis of energy principles in rock destabilization and fracture[J]. Metal Mine, 2006, **364**(10): 17 - 20, 37. (in Chinese))
- [21] LI G, TANG C A. A statistical meso-damage mechanical method for modeling trans-scale progressive failure process of rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2015, **74**: 133 - 150.
- [22] ENOMOTO Y, HASHIMOTO H. Emission of charged particles from indentation fracture of rocks[J]. Nature, 1990, **346**(16): 641 - 643.
- [23] 王兰生, 李文纲, 孙云志. 岩体卸荷与水电工程[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(2): 145 - 154. (WANG Lan-sheng, LI Wen-gang, SUN Yun-zhi. Rock mass unloading in hydro electric project[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(2): 145 - 154. (in Chinese))
- [24] CAI M, KAISER P K, MORIOKA H, et al. FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007, **44**(4): 550 - 564.

第三届地基处理和地基控制技术国际会议预告

会议背景: 地基处理和地基控制技术是目前岩土工程学科的重要研究领域, 我国长三角广泛分布的软基工程以及滨海地区大规模的围海造地工程为地基处理和控制的理论和技术研究提供了广阔的舞台, 同时也促进着我国在相关研究和应用领域赶超世界领先水平。本次会议旨在为了进一步加强各国在该领域的学术交流与合作, 促进地基处理和控制技术的理论研究和工程应用, 有效提升我国在地基处理领域中的学术地位及国际影响力。

主办单位: 浙江工业大学。

时间、会场: 2017 年 10 月 27—10 月 29 日; 地点: 杭州之江饭店。

参会代表: 会议主席 Cai Yuanqiang, Zhejiang University of Technology, China; 国际评委委员会主席 Buddhima Indraratna, University of Wollongong, Australia; 本地组织委员会主席 Gong Xiaonan, Zhejiang University, China。

本次会议境外参会代表多、来自全球各个地区, 扩大了我校的国际影响力。会议详细信息参见: www.icgi2017.org。

(会议组委会 供稿)