

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0931

岩石破裂声发射关键特征信号优选方法

姚旭龙^{1,2}, 张艳博^{1,2}, 刘祥鑫^{1,2}, 梁 鹏^{1,2}, 孙 林^{1,2}

(1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 华北理工大学 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山 063210)

摘 要: 岩石破裂过程的声发射中大量的低能常规信号易将少量的高能关键信号特征规律淹没, 不利于前兆特征分析和灾变预警。从岩石破裂失稳预警角度出发, 以提取影响岩石结构稳定的关键破裂事件声发射信号为目标, 提出了岩石破裂失稳关键特征信号的识别准则及其定义。构建了基于信号能量贡献率的岩石破裂关键事件声发射信号的优选方法, 并针对花岗岩、大理岩、煤岩和粉砂岩进行了岩石破坏失稳的声发射监测试验验证。试验结果表明, 新方法能有效提取岩石破裂过程中影响岩石整体稳定的关键声发射信号, 具有一定的普适性。着重从声发射事件率突降、相对平静期和累计能量急升跃阶等前兆特征对优选后岩石破裂关键特征信号进行了一致性检验。检验结果表明, 优选后的关键特征信号与上述前兆特征高度一致, 并能够有效地提高后期声发射特征参数计算效率, 方法有效可行。

关 键 词: 岩石破裂失稳; 声发射; 前兆特征; 信号优选方法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 01-0375-10

Optimization method for key characteristic signal of acoustic emission in rock fracture

YAO Xu-long^{1,2}, ZHANG Yan-bo^{1,2}, LIU Xiang-xin^{1,2}, LIANG Peng^{1,2}, SUN Lin^{1,2}

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China; 2. Hebei Provincial Laboratory of Mining Industry Development with Safe Technology Priority, North China University of Science and Technology Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: In the process of rock failure, a large number of low energy weak acoustic emission signals are easy to conceal the characteristics of a few high energy key signals, which is not conducive to the analysis of precursory characteristics and disaster warning. From the rock crack and destabilization warning point of view, this paper is aimed at optimum seeking of precursory key characteristic signals of acoustic emission in rock crack and destabilization, and puts forward the identification criterion and definition of key acoustic emission precursory signals of rock fracture. A new optimum seeking method for the key feature signal is proposed based on signal energy contribution rate, and the method is verified by experiments with granite, marble, coal and siltite. Experimental results show that the proposed method can effectively extract key acoustic emission signals which affect the overall stability of rock in the process of rock fracture, and this method can be applied in a wide range of applications. We also focus on the consistency test of the characteristic signals of the selected critical events from the precursory characteristics of the acoustic emission event rate, the relative quiet period, and the cumulative energy jump. The consistency test results show that the key feature signals after optimization are highly consistent with the precursory characteristics, and can effectively improve the calculation efficiency of acoustic emission characteristic parameters in late stage, and the method is feasible and effective.

Keywords: rock crack and destabilization; acoustic emission; precursory characteristic; optimum seeking for signals

1 引 言

声发射可实时地监测岩石破坏过程中损伤动态演化情况, 受到国内外相关领域学者的重视。目前, 国内外学者最新研究成果主要集中在岩石破裂过

程、力学特性、加载路径等与声发射之间的关系研究方面。Moradian 等^[1]在前人研究基础上将岩石破裂过程的声发射信号划分为 8 类, 分别对应岩石破裂的 8 个阶段。众多学者^[2-9]研究了不同受力方式下岩石破裂声发射基本特征参数特征规律。

收稿日期: 2017-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51574102, No.51604117); 河北省高校百名优秀创新人才支持计划(No. SLRC2017050)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51574102, 51604117) and Hebei Province Colleges Hundred Outstanding Innovative Talent Support Program (SLRC2017050).

第一作者简介: 姚旭龙, 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩石破裂失稳、数字矿山研究方面的工作。E-mail: yaoxulonglg@126.com

针对岩石内部结构与声发射间的关系,邓朝福^[10]、孙清佩^[11]和陈国庆^[12]等分别进行了不同粒径花岗岩断裂力学行为及声发射特征、层理倾向对岩石力学与声发射特征的影响和不同应力路径下岩桥试验的声发射特征规律等研究工作。

在岩石破裂声发射前兆特征及预警方法方面,众多学者^[13-21]提出了声发射事件发生频度分析、能量分析、事件定位和声源参数分析等预警方法。在声发射频度分析方面研究发现声发射信号急速增加可作为岩石临近破裂失稳前的征兆^[13-14]。在声发射能量分析方面,研究者普遍认为能量指标更能反映岩石结构的稳定状态,高能量的微震或声发射事件是发生冲击地压和破裂失稳的必要条件,声发射总事件、大事件的急剧增加可作为有效的灾变前兆^[18]。部分学者从声源参数、分形、 b 值等角度研究发现临近破裂失稳前的声发射主要由宏观破裂面的裂纹扩展产生, b 值和分形维数降低,在破坏前达到最低^[19-21]。

纪洪广^[22]、曾鹏^[23]和张艳博^[24]等从声发射频域角度开展了常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息、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、花岗岩破裂过程声发射主频多元前兆信息识别等相关研究。

综合上述研究者的相关成果可知,无论是研究岩石破裂过程与声发射关系,还是研究岩石破裂失稳前兆特征及预警方法,都需要着重研究岩石破裂失稳前较大尺度破裂事件对应的高能信号。但是,声发射包含了岩石破裂过程的微观破裂、细观破裂、宏观破裂和承压摩擦等声源信息,甚至包含了部分噪声信息,进而造成关键信号的特征规律被其他信息所淹没,同时也增加了数据处理成本,不利于岩石破裂失稳前声发射前兆特征分析和实时预警的实现。就目前国内外研究情况看,除纪洪广提出主破裂前兆信息研究外,其他学者研究成果均未明确提出相关信息。对应的岩石破裂声发射关键信息提取方法也未见报道。

笔者认为岩石破裂失稳声发射监测预警技术研究首先应着重研究岩石破裂关键事件对应声发射信息的“指纹”特征;其次,利用信息识别技术和大数据处理技术实现特征信号的实时识别及对应特征规律分析;最终,构建综合的评价预测方法实现岩石破裂失稳的实时监测预警。上述研究工作的基础就是构建岩石破裂关键声发射信号优选方法。因此,构建提取此类信号的优选方法对岩石破裂失稳灾变的预警研究具有重要的现实意义和研究价值。

基于此,笔者从岩石破裂失稳预测预警角度出发,以优选影响岩石结构稳定的破裂声发射关键信号为目标,构建了基于信号能量贡献率的岩石破裂声发射关键特征信号优选方法。

本文重点阐述了基于信号能量贡献率的岩石破裂声发射关键特征信号优选方法的构建准则、原理和数学模型,通过花岗岩、大理岩、煤岩和粉砂岩单轴加载试验进行了方法验证,再从声发射事件率突降、相对平静期和累计能量急升跃阶等前兆特征对优选后的岩石破裂关键特征信号进行了一致性检验。检验结果表明,优选后的关键特征信号与上述前兆特征高度一致,并能够有效提高后期声发射特征参数计算效率,方法有效可行。

2 声发射关键信号优选准则

2.1 岩石破裂过程的声发射信号分布特征分析

从信号数量、能量占比和阶段分布等角度,对单轴加载下的花岗岩、大理岩、煤岩和粉砂岩声发射监测数据进行统计分析,发现如下特征规律:

(1) 岩石破裂过程中低能微弱信号数量远大于高能信号。低能微弱信号数量占比 90% 以上,高能信号数量占比不足 10%。

如图 1(a) 所示,随着信号能量的增加对应的信号数量降低,特别是在能量较低区域降低速度极快。以花岗岩为例,能量在 0~20 aJ 间的信号数量累计占比约在 91.03%,能量从 0~20 aJ 对应的信号数量占比由 43.62% 急降到 0.34%。大理岩、煤岩和粉砂岩同样显现类似的统计规律(图 1(b)、1(c)、1(d))。

(2) 低能微弱信号近乎无差别的分布在岩石破裂的各个阶段,会干扰甚至淹没高能关键信号特征规律。

图 2 为各类岩石能量在 0~20 aJ 间的较低能量微弱信号阶段分布情况。可以看出此类信号大量的近乎无差异的分布于破裂过程的各个阶段,尤其是煤岩和粉砂岩各阶段的差异性更小。此种现象主要是因为低能微弱信号多是每个阶段内随机微观破裂、岩石内部摩擦滑移事件导致的。

大量低能微弱信号近乎无差异的分布在岩石破裂的各个阶段,在一定程度上会干扰或掩盖高能关键信号的特征规律,甚至会产生错误的分析结论。

以图 3 煤岩的声发射主频分布特征为例。在煤岩破裂过程中,载荷发生了两次较大的调整。从所有信号主频分布来看,在载荷调整区域有 180 kHz 左右和 250 kHz 左右的高频信号产生,而从提取的高能声发射信号主频分布可知,载荷调整区域的高

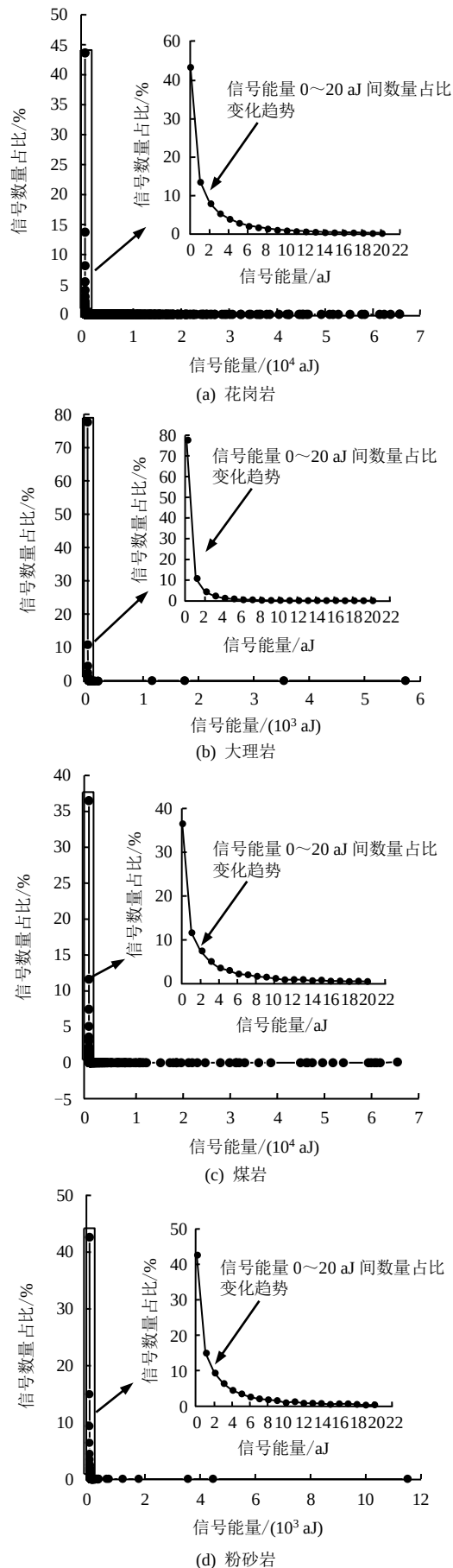
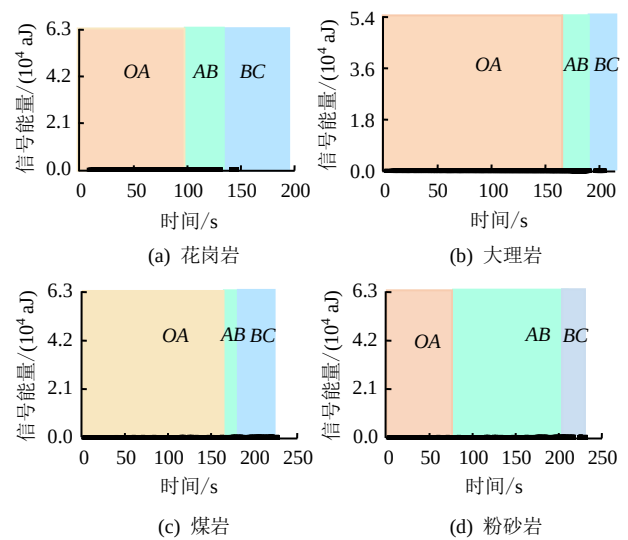


图1 岩石破坏过程中声发射信号数量与能量分布统计
Fig.1 Statistical analyses of acoustic emission signal quantity and energy distribution in rock failure process



OA-裂纹裂隙压密萌生阶段;
AB-裂纹稳定发展阶段; BC-裂纹贯通断裂不稳定阶段

图2 能量在0~20 aJ间的声发射信号阶段分布
Fig.2 Stage distributions for acoustic emission signals in energy range of 0-20 aJ

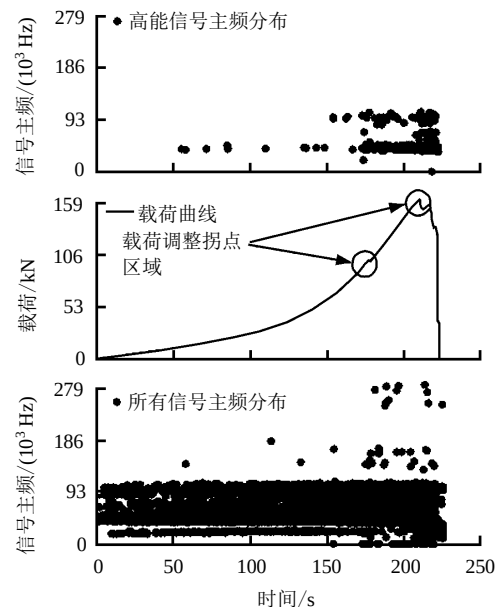


图3 低能微弱信号对声发射高能信号主频特征干扰示意
Fig.3 Disturbance of low-energy weak signals to characteristics of high-energy key signals

能信号的主频集中在 50~100 kHz, 并非高频, 在一定程度上形成干扰。除此之外, 声发射参数 AF 、 RF 及信号幅值等参数都存在此类情况, 由于篇幅所限不再赘述。

综合上述分析可知, 低能微弱信号通常对应微裂隙压密、微裂纹萌生、岩石内部摩擦滑移等事件, 普遍无差异存在于岩石破裂过程各个阶段, 且总体数量占比极大, 此类信号的大量存在易淹没关键破裂事件对应的高能信号特征规律。而已有学者研究

表明,大尺度的裂纹出现将直接影响岩石结构的稳定性,大尺度的裂纹产生的声发射高能信号可以作为岩石破裂失稳的有效的前兆信息^[6-13]。

笔者认为岩石破裂失稳声发射监测预警技术研究首先应着重研究岩石破裂关键事件对应声发射信息的“指纹”特征。构建岩石破裂关键事件的声发射信号优选方法有效提取相应的声发射信息,可为关键事件的声发射信号“指纹”特征分析提供准确的信号源。

2.2 破裂事件的声发射关键信号优选准则及定义

基于 2.1 节分析,从岩石破裂灾变预警的研究角度来看,失稳破坏灾变的关键特征信号应具备如下特性:

(1) 关键特征信号应能代表岩石破坏灾变前破坏过程中关键的破坏事件,能够与岩石破裂过程中的关键力学特征明确对应。

(2) 优选后的关键特征信号应能与声发射时频前兆特征形成鲜明的对应关系。

(3) 关键特征信号的出现应超前于最终的岩石失稳破坏,且特征信号在临近失稳阶段应表现出连续加剧的趋势,而不是间断的偶发事件。

具备上述 3 个基本特性,并能极好地反映岩石破坏过程的声发射信号统称为“关键特征信号”,其构成的总体集合称之为“特征信号集”,用 S_F 表示。

3 声发射关键信号优选方法

3.1 优选算法模型构建

为了优选上述分析的特征信号集 S_F ,将试验过程的所有声发射信号看作一个整体,构建声发射信号集合 S ,令 $S = [s_1, s_2, s_3 \cdots s_{n-1}, s_n]$,其中 s_n 为接收到的每个声发射信号; e_n 表示 s_n 信号携带的能量。故有如图 4 所示的对应关系。

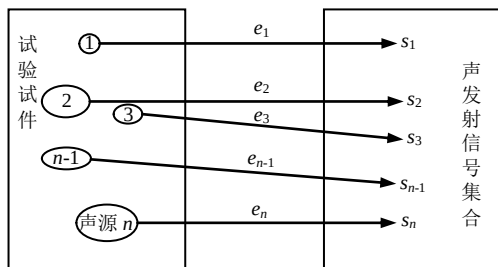


图 4 声发射信号集构建示意图

Fig.4 Schematic diagram of acoustic emission signal set

将图 4 中声发射信号集合看作一个能量存储器,其中 s_n 为不同声源贡献的能量 e_n 形成的声发射信号。声源事件大小不同贡献的能量大小不同,故

而造成声发射信号的能量不同。借鉴统计学中主成分分析方法基本原理,将 s_n 视为声发射信号集合 S 系统的一个组成部分, e_n 为对应的变量指标。

令 $E = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ \cdots \ e_{n-1} \ e_n]^T$ 为声发射信号能量的向量, $F = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ \cdots \ f_{n-1} \ f_n]^T$ 为对应的声发射信号频数向量, α_i 为不同能量值对应的能量贡献率:

$$\alpha_i = \frac{e_i}{\sum_{k=1}^n e_k f_k} \quad (i=1,2,3,\cdots,n) \quad (1)$$

依据本文提出的声发射特征信号判别准则,优先考虑在岩石破裂演化过程中能量贡献率 α_i 较大的声发射信号,故对不同能量值按 α_i 进行降序排列,再依据能量和频数计算能量累积贡献率 β_i :

$$\beta_i = \frac{\sum_{k=1}^i e_k f_k}{\sum_{k=1}^n e_k f_k} \quad (i=1,2,3,\cdots,n) \quad (2)$$

根据统计学中统计概率达到 85% 以上就可以接受某种现象规律^[25-26],考虑不同岩性的岩石破裂机制的差异会造成破裂产生的声发射能量存在较大差异,本文按 85%~95% 间的信号能量的平均值作为初步的优选阈值^[27],用 Q 表示,最终的优选阈值用 Q_s 表示,计算公式分别为

$$Q = \left\{ \sum_{i=1}^n e_i / n : e_i \in E, 0.85 \leq \beta_i \leq 0.95 \right\} \quad (3)$$

$$Q_s = \max E \cdot R^2 + Q \quad (4)$$

式中: $\max E$ 为声发射信号中最大能量值; R 为能量大于初步优选阈值的信号数量占比。

优选后的声发射前兆关键特征信号集可以表示为

$$S_F = \{s_i | E(i) \geq Q_s, i=1,2,\cdots,n\} \quad (5)$$

3.2 计算流程

图 5 为该方法的计算流程。

计算过程及算法描述如下:

- (1) 计算不同能量取值对应的频数;
- (2) 依据式 (1) 分别计算每个能量取值对应的贡献率;
- (3) 按照能量贡献率将能量进行降序排列,依据公式 (2) 计算累积贡献率;
- (4) 提取累积贡献率在 85%~95% 的信号,计算这些信号对应能量的平均值 Q (式 (3));
- (5) 依据式 (4) 计算最终优选阈值 Q_s 为能量阈值,优选信号能量大于等于 Q_s 的信号作为特征信号,进而构建岩石破裂失稳的特征信号集 S_F ;
- (6) 基于特征信号集 S_F ,进行岩石破裂演化过程的反演推导。

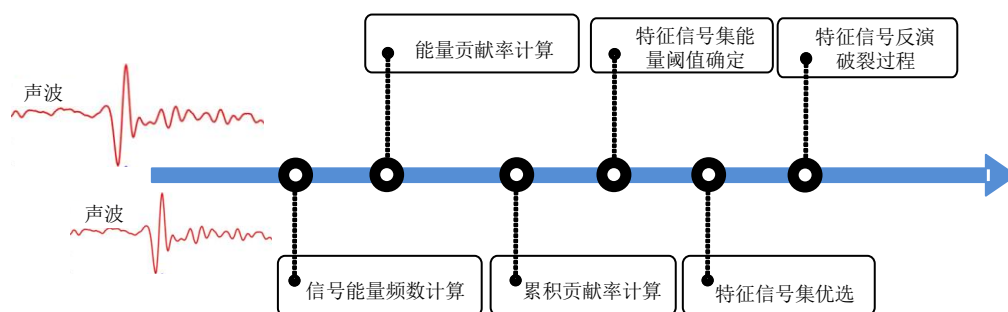


图 5 计算流程示意图

Fig.5 Schematic diagram of signal calculation flow

4 试验验证

4.1 试验岩石试件

选取较为常见的自然状态下花岗岩、大理岩、煤岩和砂岩，严格按照国际岩石力学试验规范加工，试件两端面不平行度控制在 0.02 mm 以内。尺寸为 50 mm×50 mm×100 mm 的长方体试件。每种岩性进行 7 组单轴压缩试验，加载速率控制为 0.3 mm/min。

4.2 试验设备

试验系统如图 6 所示，主要由加载系统和声发射系统两部分组成。



图 6 试验设备

Fig.6 Test apparatus

(1) 加载系统：RLW3000 伺服岩石力学试验系统，最大轴向试验力为 3 000 kN，最大横向试验力为 1 000 kN，测量精度为 $\pm 1\%$ 。

(2) 声发射系统：美国物理声学公司的 PCI-2 型多通道声发射监测系统。采集卡的频带宽度可达 3~300 kHz。声发射传感器选用 R6a 型谐振式高灵敏度传感器，其谐振频率为 90 kHz，工作频率范围为 35~100 kHz。

为保证采集数据的一致性，试验中参数设置保持一致。其中声发射仪器的门槛值设为 40 dB、采

样点数 $N=2\ 048$ 、采样频率为 1 MHz；加载方式选择位移加载，以确保采集到较为完整应力-应变曲线和丰富的声发射信号。

4.3 试验结果计算与分析

由于篇幅所限，本文从花岗岩、大理岩、煤岩和砂岩 4 类岩石试件中分别选取 1 组试件展示论述。

(1) 声发射关键信号的优选计算

按照本文构建的优选方法及计算步骤计算对应声发射特征信号能量阈值 Q_s （见表 1）。以 Q_s 作为各试验试件的声发射特征信号能量阈值，优选对应试件的声发射信号，作为关键特征信号集 S_F 。

表 1 声发射特征信号优选结果
Table 1 Optimization results of AE signal

试件编号	Q_s /aJ	原有信号数量 /个	关键信号数量 /个	数量占比 /%
GHG-01	2 587.1	40 595	554	1.4
GDL-01	79.3	27 634	12	0.4
GMV-01	705.7	14 416	324	2.3
GFS-01	423.7	9 272	7	0.8

(2) 有效地剔除微裂隙压密、微裂纹萌生、岩石内部摩擦滑移等事件对应的低能微弱信号。

对比图 7 优选前后的声发射信号分布情况。优选后的声发射特征信号有效地剔除了低能微弱信号，尤其是大理岩和粉砂岩最为明显。特征信号数量不足原有信号数量的 5%。

(3) 优选后的关键特征信号极好地保留了岩石破坏失稳前影响结构稳定性的关键破裂事件的声发射信号。

声发射 b 值是相对震级分布的函数，岩石破裂产生的声发射 b 值也可作为裂纹扩展尺度的函数^[19-20]。Lei 等^[21]研究结果表明，岩石破裂过程中大尺度破裂事件增多导致 b 值下降，临近破裂失稳

b 值迅速降低。基于此, 可根据 b 值变化趋势并结合声发射信号能量判定岩石破裂过程中较大尺度的关键破裂事件。具体的 b 值计算过程较为成熟, 尹贤刚^[20]和李元辉^[18]等分别给出了详细的计算方式, 本文不再赘述。

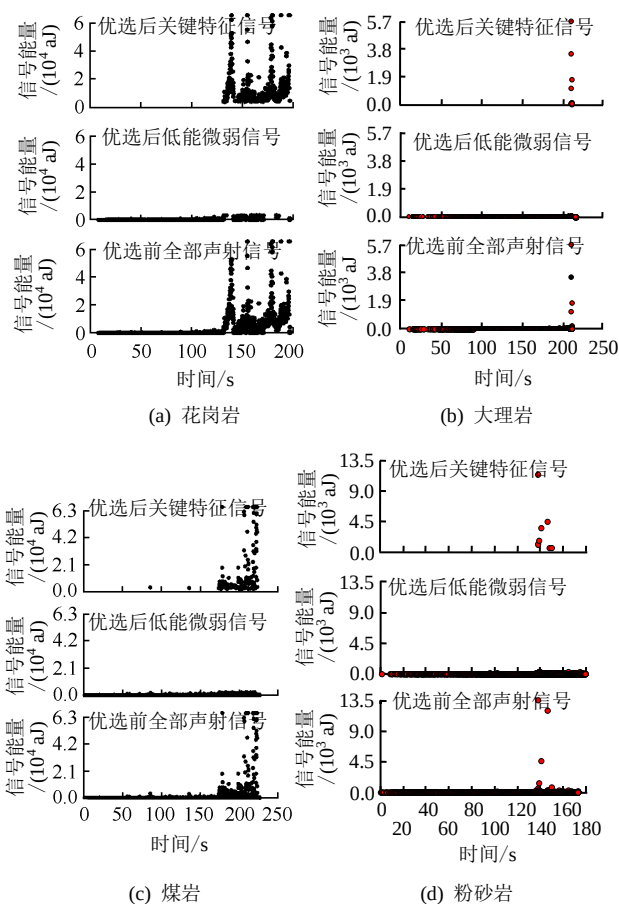


图7 声发射信号优选前后对比分析

Fig.7 Comparison and analysis of acoustic emission signals before and after optimization

图8为优选后关键特征信号、载荷曲线和声发射 b 值的对比分析图。可以明显看出优选后的声发射关键特征信号与载荷曲线调整拐点、 b 值低值区域一一对应。证明本文构建的优选方法能够有效地提取岩石破裂过程中岩石破坏失稳前影响结构稳定性的关键破裂事件的声发射信号。

5 讨论与分析

综合国内外研究现状, 当前提出的声发射事件发生频度分析和能量分析等方面的预警方法得到众多学者的一致肯定。基于此, 本文特从事件率分析和能量分析两个方面进行优选后的特征信号与预警前兆一致性检验, 并从优选前后信号处理效率进行对比分析。

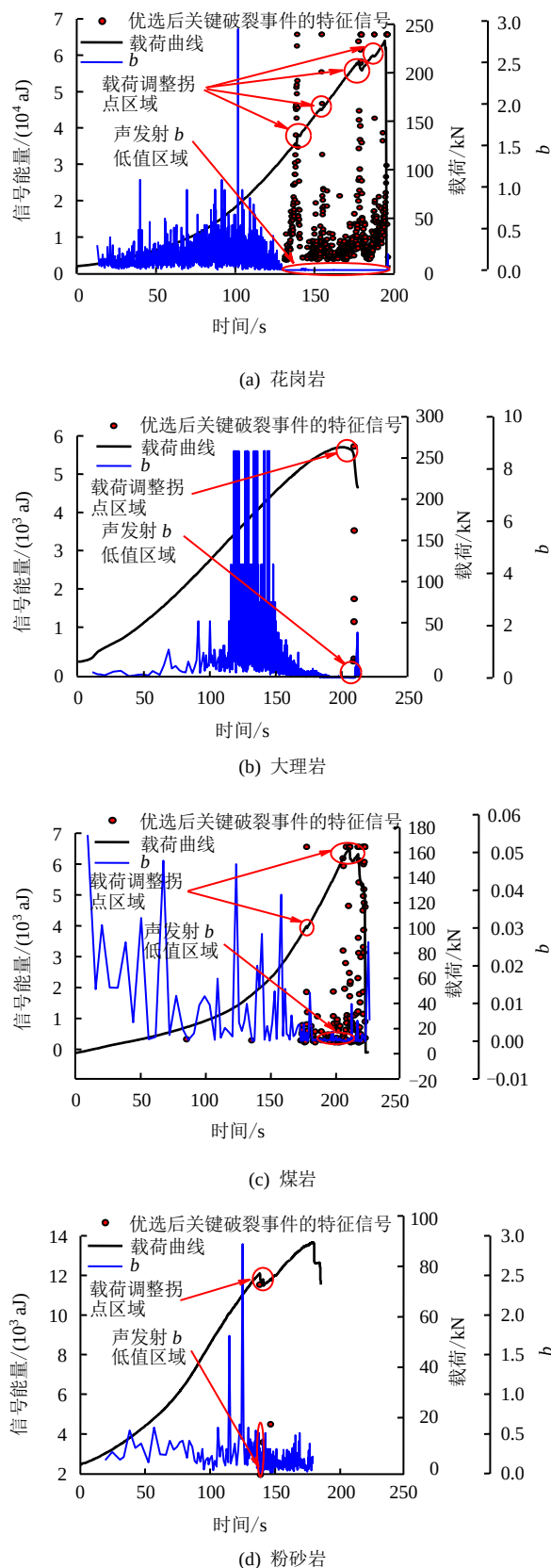


图8 关键特征信号与关键性破裂事件

Fig.8 AE signals and critical rupture events

5.1 关键信号与声发射事件率前兆特征的一致性检验

目前, 在声发射发生频度角度的预警方法主要

是通过岩石临近破坏前的声发射事件率出现相对平静期实现岩石破坏预警^[13-14]。在岩体稳定性声发射监测中, 声发射活动急剧增加后突然下降或出现相对平静期, 预示着岩体的破坏。

图9为优选后关键特征信号、载荷曲线和声发射事件率的对比分析图。从图中可以明显看出优选

后的声发射关键特征信号与载荷曲线调整拐点、声发射事件率突降或相对平静期区域一一对应。证明通过本文构建的优选方法能够有效地捕捉岩石破裂失稳声发射前兆对应的关键破裂事件特征信号, 与声发射事件率突降或相对平静期前兆特征具有良好的一致性。

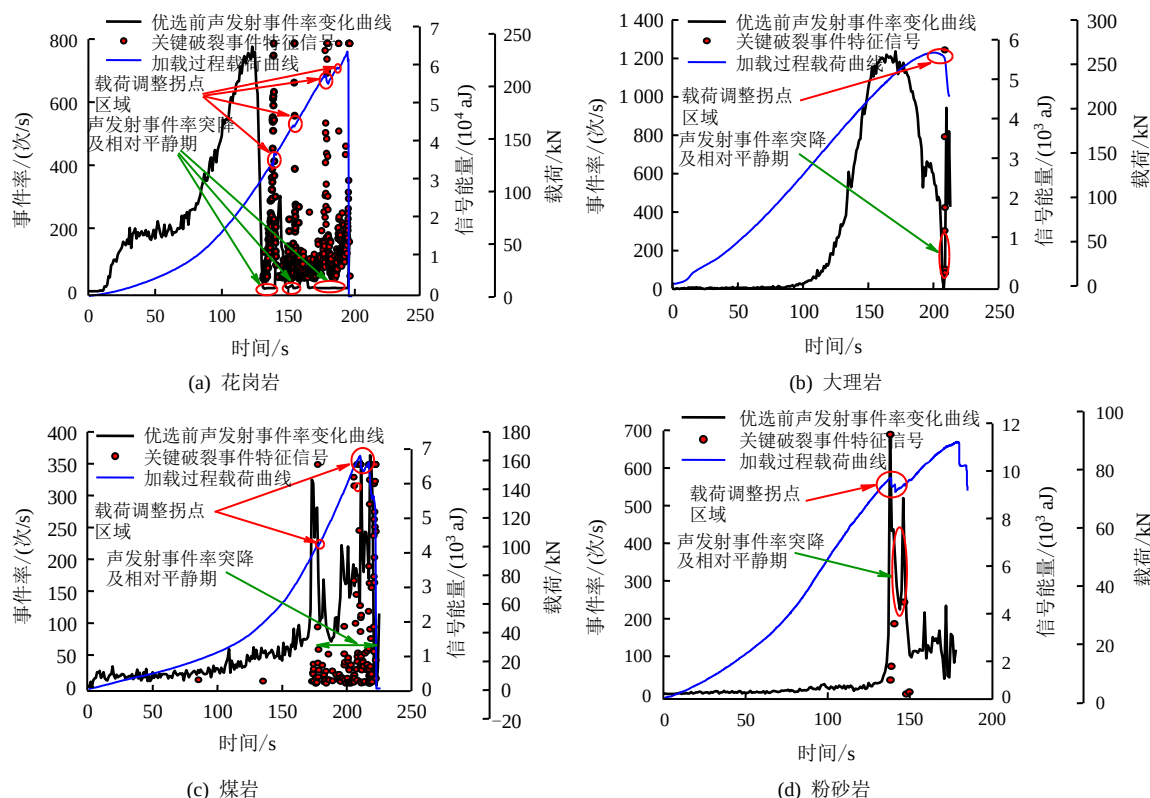


图9 声发射事件率前兆特征对比分析

Fig.9 Comparative analyses of precursory acoustic emission events

5.2 关键信号与声发射累计能量前兆特征的一致性检验

已有研究证明, 岩石破裂过程能量释放指标能反映岩石结构的稳定性。高能的声发射事件信号集中出现意味着应力集中程度升高, 预示着灾变即将发生^[18]。部分学者研究, 发现岩石破裂过程中高能的声发射事件信号集中出现会导致声发射累计能量急速上升, 使得累计能量曲线呈现若干阶梯状, 如图10(a)、10(c)、10(d)中累计能量曲线所示。其中累计能量急升区域的出现可作为岩石破裂失稳的重要前兆信息。

图10为优选后关键特征信号、载荷曲线和声发射累计能量的对比分析图。从图中可以明显看出, 优选后的声发射关键特征信号与载荷曲线调整拐点、声发射累计能量急升跃阶区域一一对应。证明通过本文构建的优选方法能够有效地捕捉岩石破裂

失稳声发射前兆对应的关键破裂事件特征信号, 与声发射事件累计能量急升跃阶的阶梯状前兆特征具有良好的一致性。

5.3 优选前后声发射信号特征参数处理效率对比分析

对岩石破裂过程中产生的声发射信号进行关键信号的优选, 可大大地降低声发射特征规律分析的数据处理量, 提高数据处理效率。

为验证优选后的关键破裂事件声发射信号后期数据处理量的效果, 本文从事件率、累计能量和FFT变换等几项常用参数的计算用时进行对比分析。优选前后计算效率对比如表2所示。

从表2对比结果可知, 优选后的关键信号进行参数计算用时极大地降低了时间开销, 优选后比优选前的计算效率最低提高数倍, 最高提高数千倍。特征参数计算越复杂提高的效率越大, 如累计能量

的计算, 计算效率最高提高 4 000 多倍。

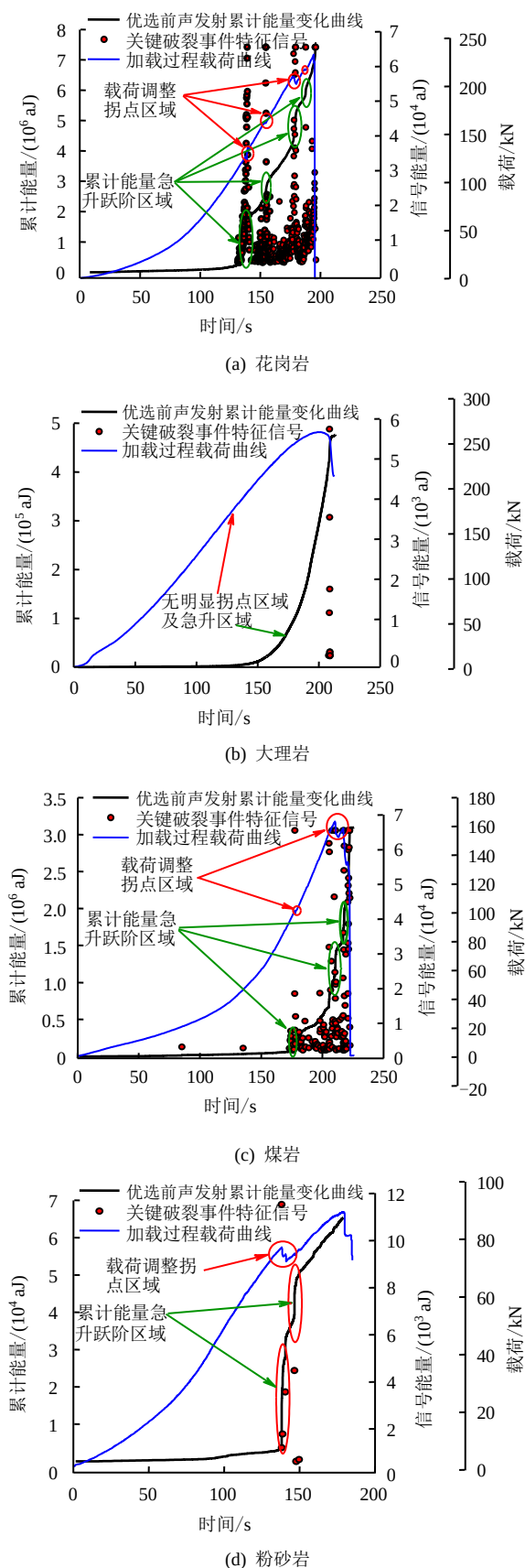


图 10 声发射能量前兆特征对比分析

Fig.10 Comparative analyses of precursory characteristics of AE energy

表 2 声发射信号优选前后特征参数处理效率对比分析

Table 2 Comparative analyses of AE characteristic parameter efficiency before and after optimization

试件	对比项目	优选前用时/s	优选后用时/s	效率提高倍数
GHG-01	事件率	8.42	1.20	7.01
	累计能量	65.52	0.95	69.13
	FFT 变换	10.39	0.32	32.00
GDL-01	事件率	16.66	1.15	14.47
	累计能量	169.02	0.04	4 112.72
	FFT 变换	55.68	0.09	594.91
GMY-01	事件率	8.28	1.27	6.50
	累计能量	37.70	0.52	72.40
	FFT 变换	3.30	0.23	14.10
GFS-01	事件率	4.61	0.80	5.78
	累计能量	20.00	0.02	1 224.25
	FFT 变换	2.13	0.02	100.88

以上研究表明, 本文所得到的特征信号与其他学者研究得到的前兆预警信息一致, 在一定程度上证明了方法是有效可行的。此外, 根据数据分析过程也说明, 该法还可有效提高声发射时频特征的计算效率。

6 结 论

(1) 基于能量贡献率的声发射前兆关键特征信号优选方法, 可有效地提取岩石破裂过程中影响整体结构稳定性的关键破裂事件的声发射信号, 通过分析花岗岩、大理岩、煤岩和粉砂岩破裂试验证明了该法的普适性。

(2) 本文所得到的研究成果可为岩石破裂演化过程中的关键特征信号拾取、前兆信号的定量捕捉, 实现岩石失稳破坏的监测预警奠定理论基础。此外, 还需要进一步说明的是, 本论文目前仅验证了单一加载方式下的不同岩性岩石破裂情况, 针对于不同加载方式下、不同岩石尺度、不同含水状态等复杂情况是否适用, 还需要开展深入研究。

参 考 文 献

- [1] MORADIAN Z, EINSTEIN H H, BALLIVY G. Detection of cracking levels in brittle rocks by parametric analysis of the acoustic emission signals[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(3):785—800.
- [2] 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, 80(1): 27—34.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 邓朝福, 刘建锋, 陈亮, 等. 不同粒径花岗岩断裂力学行为及声发射特征研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2313—2320.
DENG Chao-fu, LIU Jian-feng, CHEN Liang, et al. Fracture mechanical behaviors and acoustic emission characteristics of Beishan granites with different particle sizes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2313—2320.
- [11] 孙清佩, 张志镇, 杜雷鸣, 等. 层理倾角对岩石力学与声发射特征的影响研究[J]. 金属矿山, 2017, (2): 7—12.
SUN Qing-pei, ZHANG Zhi-zhen, DU Lei-ming, et al. Effect of bedding angle on mechanical and acoustic emission characteristics of layered rock[J]. **Metal Mine**, 2017, (2): 7—12.
- [12] 陈国庆, 赵聪, 刘辉, 等. 不同应力路径下岩桥试验的声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1792—1804.
CHEN Guo-qing, ZHAO Cong, LIU Hui, et al. Acoustic emission characteristics of rock bridge test under different stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(9): 1792—1804.
- [13] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2499—2503.
LI Shu-lin, YIN Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Study on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(15): 2499—2503.
- [14] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 岩石破坏声发射平静期及其分形特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊): 3383—3390.
YIN Xian-gang, LI Shu-lin, TANG Hai-yan, et al. Study on quiet period and its fractal characteristics of rock failure acoustic emission[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.): 3383—3390.

- [15] 谭云亮, 李芳成, 周辉, 等. 冲击地压声发射前兆模式初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 425—428.
- TAN Yun-liang, LI Fang-cheng, ZHOU Hui, et al. Analysis on acoustic emission pattern for rock burst[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 425—428.
- [16] 吕进国, 潘立. 微震预警冲击地压的时间序列方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2002—2005.
- LÜ Jin-guo, PAN Li. Microseismic predicting coal bump by time series method[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(12): 2002—2005.
- [17] 夏永学, 蓝航, 魏向志. 基于微震和地音监测的冲击危险性综合评价技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, (增刊 2): 358—364.
- XIA Yong-xue, LAN Hang, WEI Xiang-zhi. Study of comprehensive evaluation technology for rock burst hazard based on microseismic and underground sound monitoring[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, (Supp. 2): 358—364.
- [18] 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.
- [19] 蒋海昆, 张流, 周永胜. 不同围压条件下花岗岩变形破坏过程中的声发射时序特征[J]. 地球物理学报, 2000, 43(6): 812—826.
- JIANG Hai-kun, ZHANG Liu, ZHOU Yong-sheng. Behavior of acoustic emission time sequence of granite in deformation and failure process under different confining pressures[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2000, 43(6): 812—826.
- [20] 尹贤刚, 李庶林, 唐海燕, 等. 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.
- YI 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.
- [21] LEI X L, KUSUNOSE K, NISHIZAWA O, et al. Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring[J]. **Journal of Geophysical Research**, 2000, 105: 6127—6139.
- [22] 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.
- [23] 曾鹏, 刘阳军, 纪洪广, 等. 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[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 509—516.
- ZENG Peng, LIU Yang-jun, JI Hong-guang, et al. Coupling criteria and precursor identification characteristics of multi-band acoustic emission of gritstone fracture under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 39(3): 509—516.
- [24] 张艳博, 于光远, 田宝柱, 等. 花岗岩破裂过程声发射主频多元前兆信息识别[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2): 355—362.
- ZHANG Yan-bo, YU Guang-yuan, TIAN Bao-zhu, et al. Identification of multiple precursor information of acoustic emission dominant frequency in the process of granite failure[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2017, 34(2): 355—362.
- [25] 何晓群. 现代统计分析方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012.
- HE Xiao-qun. Modern statistical analysis methods and Applications[M]. Beijing: People's University Publication House, 2012.
- [26] 吴翊, 李永乐, 胡庆军. 应用数理统计[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 2012.
- WU Yi, LI Yong-le, HU Qing-jun. Applied mathematical statistics[M]. Beijing: National University of Defense Technology Press, 2012.
- [27] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- XU Jianhua. Mathematical methods in modern geography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.