

张艳博,杨震,姚旭龙,等. 花岗岩巷道岩爆声发射信号及破裂特征实验研究[J]. 煤炭学报,2018,43(1):95-104. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0884

ZHANG Yanbo, YANG Zhen, YAO Xulong, et al. Experimental study on rockburst acoustic emission signal and fracture characteristics in granite roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 95-104. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0884

# 花岗岩巷道岩爆声发射信号及破裂特征实验研究

张艳博<sup>1,2</sup>, 杨震<sup>1,2</sup>, 姚旭龙<sup>1,2</sup>, 田宝柱<sup>1,2</sup>, 刘祥鑫<sup>1,2</sup>, 梁鹏<sup>1,2</sup>

(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:**以声发射能量、振铃计数、上升时间和主频作为特征参数,对巷道岩爆实验声发射信号进行聚类分析,得到3类声发射信号。深入分析3类声发射信号特征参数,挖掘其对应的物理意义,揭示其反映的破裂特征。基于能量释放率,确定驱动岩爆灾害形成的主要岩石破裂类型。利用该类破裂对应的声发射信号,进行巷道岩爆预测研究。研究表明:第1类信号具有高能量、高振铃计数、低上升时间和低主频的“两高两低”特征,对应高强度、大尺度裂纹稳定扩展;第2类信号具有高能量、高振铃计数、高上升时间和低主频的“三高一低”特征,对应高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展;第3类信号具有低能量、低振铃计数、低上升时间和低主频的“四低”特征,对应低强度、小尺度的裂纹非稳定扩展。其中,高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展是岩爆灾害形成的主要驱动力,该种破裂类型对应的“三高一低”特征信号,能够为岩爆提供早期预警信息,是岩爆灾害预警研究的重点关注对象。

**关键词:**巷道岩爆;声发射;破裂特征;聚类分析

**中图分类号:**TD315

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-9993(2018)01-0095-10

## Experimental study on rockburst acoustic emission signal and fracture characteristics in granite roadway

ZHANG Yanbo<sup>1,2</sup>, YANG Zhen<sup>1,2</sup>, YAO Xulong<sup>1,2</sup>, TIAN Baozhu<sup>1,2</sup>, LIU Xiangxin<sup>1,2</sup>, LIANG Peng<sup>1,2</sup>

(1. College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Mining Development and Technology Safety Key Lab of Hebei Province, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

**Abstract:** Three kinds of AE signals were obtained through clustering and analyzing the acoustic emission signals of rock burst experiments and the characteristic parameters including AE energy, ringing count, rise time and frequency. By analyzing the characteristic parameters of three kinds of AE signals deeply, excavating their corresponding physical meanings, the fracture characteristics were revealed. Based on the rate of energy release, the main types of rock failure formed by driving rock burst were determined. Use the corresponding AE signals, the rock burst was predicted. The results show that the first kind of signals has high energy, high counts, low rise time and low frequency features, and the “two highs and two low” feature corresponds to the stable expansion of crack with high strength and large scale. The second kind of signals has high energy, high counts, high rise time and low frequency features, and the “three highs and one low” feature corresponds to the unstable expansion of crack with high strength and large scale. The third kind of signals has low energy, low ringing count, low rise time and low frequency features, and the “four low” feature corre-

收稿日期:2017-06-28 修回日期:2017-10-11 责任编辑:常明然

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51374088);河北省自然科学基金资助项目(E2017209241);河北省人才工程培养经费资助项目(A201500504)

作者简介:张艳博(1973—),男,河北保定人,教授,博士。E-mail: fzd44444@163.com

通讯作者:杨震(1992—),男,山东济南人,硕士研究生。E-mail: yangzhen\_ncst@163.com

sponds to the unstable expansion of crack with low strength and small scale. Among them, the unstable expansion of crack with high strength and large scale is the main driving force of rock burst. The “three highs and one low” feature can provide early warning information for rock burst. It is the key target of early warning research of rock burst disaster.

**Key words:** roadway rockburst; acoustic emission; fracture characteristics; cluster analysis

深部高地应力环境下,巷道开挖引起应力重新分布,岩体内原有的应力平衡被打破,局部应力集中,极易引发岩爆灾害<sup>[1]</sup>。岩爆过程产生的岩石爆裂、抛掷等破裂严重威胁矿山企业和工作人员的生命财产安全<sup>[2]</sup>。因此,开展岩爆演化规律及灾害预测研究具有重要意义。

近年来,声发射监测技术逐步应用于矿山岩石力学与工程领域,通过声发射活动研究岩石内部损伤演化特征,对于深刻理解岩石破裂机制、预防因岩石破裂失稳造成的灾害事故具有重要指导意义<sup>[3]</sup>。诸多学者采用声发射监测技术对岩石破裂过程进行了研究。苗金丽等<sup>[4]</sup>根据岩爆过程的声发射频谱特性及声发射参数  $RA$  值的不同,分析了三轴应力状态下花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制;李元辉等<sup>[5]</sup>发现分形维值  $D$  和  $b$  值的较快速下降可以作为岩石失稳破坏时的前兆特征;许江等<sup>[6]</sup>对不同含水状态下砂岩剪切过程中声发射事件率变化特性进行了研究,探讨了声发射信号随时间的演化规律及其与砂岩裂纹的开裂、扩展之间的关系;杨永杰等<sup>[7]</sup>对灰岩进行三轴压缩声发射试验,利用声发射振铃计数,分析三轴压缩条件下岩石的损伤演化特征,建立基于声发射累计振铃计数的岩石三轴压缩损伤演化模型;侯鹏等<sup>[8]</sup>根据岩石破坏的本质是能量转换的特点,提出利用岩石破坏的能量演化规律和声发射能量建立一个新的脆性评价方法;张艳博等<sup>[9]</sup>分析了煤矸石破裂全过程声发射主频和熵值变化,研究了煤矸石变形破坏声发射前兆规律。以上学者根据实验目的及声发射参量表征的物理含义,选取适当的声发射信号参量,重点研究声发射参量与实验过程中岩石行为的对应关系,取得了诸多成果。但是,仅仅研究声发射信号的  $RA$  值、 $D$  值、 $b$  值、振铃计数和能量等单个参数难以涵盖复杂声发射信号蕴含的全部信息,更缺乏对声发射活动的综合评价。因此,需要引入先进的数据统计分析方法对岩爆过程中产生的声发射信号进行全面分析,才能更好地了解岩爆过程中的声发射活动规律,以进行深入的科学研究。

现阶段,聚类分析、主成分分析、时间序列分析等统计分析方法已经逐步应用于声发射信号研究相关领域。其中,聚类分析是进行多要素事物分类问题的

数量方法,它能够在综合考虑声发射信号的多个指标后,根据信号间的“亲疏”关系,对声发射信号类型进行划分。王伟魁等<sup>[10]</sup>对不锈钢拉伸实验的声发射信号进行聚类分析,通过分析各类信号的持续时间、上升时间、振铃等参数特征,从中找出了裂纹信号;毕海胜等<sup>[11]</sup>通过对底板钢试样在酸性  $NaCl$  溶液发生点蚀过程声发射信号聚类分析,有效区分了3类声发射源(氢气泡、膜剥离和破裂、点蚀坑生长)。聚类分析依然适用于岩爆过程产生的声发射信号分类问题,采用聚类方法可对岩爆实验过程中声发射信号进行综合对比后,进行类型划分,以便在岩爆预警防治工作中有所侧重和寻找重点研究对象。

基于此,笔者结合声发射信号多个特征参数,对岩爆过程中产生的声发射信号进行聚类分析,深入分析每种类型声发射信号特征参数差异,挖掘每种声发射信号对应的岩石破裂类型,基于不同岩石破裂类型对岩爆过程能量释放的贡献率,寻找驱动岩爆灾害形成的主要破裂类型及对应的声发射信号,并应用于巷道岩爆预测研究。

## 1 声发射信号聚类分析算法

聚类分析是根据样本自身属性,用数学方法按照某种相似性或特征参数,定量地确定样本之间的亲疏关系,并按照这种亲疏关系程度对样本进行分类<sup>[12]</sup>。

### 1.1 声发射信号特征参数选取

声发射信号常用参数有能量、幅度、振铃计数、持续时间、上升时间、峰值频率等,每项信号参数都从一个角度反映了信号源断裂尺度、强度等信息。根据研究目标,结合信号参数表示的物理意义,选取多个参数作为信号聚类分析的特征参数。声发射信号特征参数选取后,综合对比各项特征参数的差异来确定信号样本间的亲疏关系。将声发射信号转换为空间向量的形式,对声发射信号的差异性进行对比。

$$\text{signal}_i = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_j] \quad (1)$$

$\text{signal}$  为声发射信号,  $i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$  为声发射信号序列号,  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_j$  为各项声发射信号特征参数。

### 1.2 声发射信号特征参数权重系数计算

声发射信号聚类过程中,各项特征参数必然会对

信号差异性比较产生影响,且影响程度不同。为避免人为主观意识对声发射信号聚类分析的干扰,本文采用完全客观的熵权法计算信号各项特征参数对信号聚类影响的权重。

熵权法的基本原理是通过计算同一指标的数值差反映指标的重要程度,数值差越大指标越重要,赋予的权重越大。

(1) 设  $r_{ij}$  为指标的比重:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

式中,  $a_{ij}$  为第  $i$  个对象第  $j$  个指标的数值;  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ 。

(2) 设  $e_j$  为第  $j$  个指标的熵值:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln r_{ij} \quad (3)$$

(3) 设  $w_j$  为第  $j$  个指标的权重:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (4)$$

(4) 计算得到各指标权重后,需要对其进行总和标准化处理,设  $W_j$  为第  $j$  个指标最终的权重:

$$W_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad (5)$$

最终得到声发射信号各参数的权重系数向量  $[W_1, W_2, W_3, \dots, W_j]$ 。

### 1.3 声发射信号相似程度计算

将声发射信号对应的空间向量  $\mathbf{signal}_i$  与其特征参数权重向量  $[W_1, W_2, W_3, \dots, W_j]$  相乘即可得到附加权重后的声发射信号空间向量,即

$$\mathbf{SIGNAL}_i = \mathbf{signal}_i \cdot [W_1, W_2, W_3, \dots, W_j]^{-1} \quad (6)$$

与声发射信号对应的空间向量确定后,通过比较向量间的差异程度,得到声发射信号间的亲疏关系。借鉴几何学中采用夹角余弦衡量 2 个向量之间方向差异的算法,对于 2 个  $n$  维空间向量  $\mathbf{x}[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$  和  $\mathbf{y}[y_1, y_2, y_3, \dots, y_n]$  用类似夹角余弦的概念来衡量他们之间的相似程度,其计算方式为

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}}{|\mathbf{x}| |\mathbf{y}|} \quad (7)$$

则 2 个声发射信号的量化相似性程度  $\eta$  为  $\cos \theta$ 。

### 1.4 声发射信号聚类计算

采用凝聚层次聚类算法进行声发射信号聚类计算。凝聚算法首先把每个声发射信号  $\mathbf{SIGNAL}_i$  看作

一个初始簇。然后将这些簇合并成一个更大的分区,根据簇间对象的平均夹角余弦值  $\eta$  反复合并,直到得到一个比较精细的分区。

采用凝聚层次方法,最核心的问题是簇间距离计算。平均距离具有既能处理数值数据又能处理分类数据的优点,考虑聚类方法应用于工程实际问题的普适性要求,因而采用平均距离算法来度量簇间距离。平均距离计算方法为

$$\text{dist}_{\text{avg}}(C_i, C_j) = \frac{1}{m_i \cdot m_j} \sum_{p \in C_i, p' \in C_j} \eta \quad (8)$$

式中,  $m_i, m_j$  分别为簇  $C_i, C_j$  中对象的数量;  $\eta$  为两个对象  $p$  和  $p'$  之间的距离,则  $\text{dist}_{\text{avg}}$  为簇  $C_i, C_j$  中对象的平均距离。

根据簇间平均距离度量簇间相似性程度,簇间相似性程度越高,则优先合并,直到将所有声发射信号合并为实验所需要的几种信号类型。

### 1.5 聚类中心计算

经过聚类分析,在声发射信号特征参数确定的  $n$  维空间中形成多个声发射信号集(图 1)。

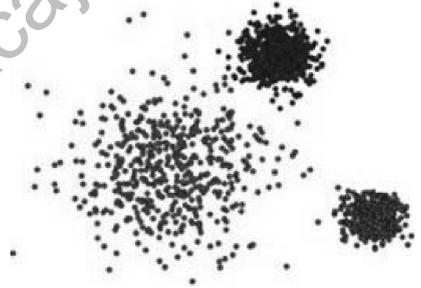


图 1 不同种类声发射信号集

Fig. 1 AE signal sets of different kinds

从图 1 可以看到,同种声发射信号空间位置相近,在空间中形成了该种声发射信号的“云”。但是,声发射信号“云”中也有大量信号偏离“云”中心,而在某个空间维度上接近其他类型信号“云”的现象。将这些偏离“云”中心的声发射信号称之为其所在信号类型的非标准声发射信号。

为消除非标准声发射信号对不同种类声发射信号特征对比分析的干扰,采用数学方法,寻找每种类型声发射信号“云”中心,作为每种类型声发射信号的标准型。其计算方法为

(1) 提取某种类型声发射信号。

(2) 对类内全部声发射信号各项特征参数求平均值,得到理想的云信号中心。

$$(\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3, \dots, \bar{A}_n) =$$

$$\left( \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{1i}, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{2i}, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{3i}, \dots, \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{ni} \right) \quad (9)$$

$a_{li}$  为第  $i$  个信号中第 1 个特征参数的数值,  $m$  为该类信号的数量, 则  $(\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3, \dots, \bar{A}_n)$  为该类信号理想的“云”中心坐标。

(3) 理想的信号“云”中心极有可能无法对应实际的声发射信号, 以至于无法对实际声发射信号的各项特征进行全面分析和深入挖掘, 因此, 本文寻找了空间中距离理想“云”中心最近的点(与理想云中心最相似的声发射信号)作为该类声发射信号的标准

信号。

根据式(7)~(8)计算该种声发射信号中与信号“云”中心向量最相似的信号, 并将其作为该种声发射信号的标准声发射信号。

综上所述, 实现声发射信号的聚类分析需要经历声发射信号特征参数选取、特征参数权重计算、信号相似程度计算、聚类计算和“信号云”中心计算等步骤, 其具体实现过程如图 2 所示。

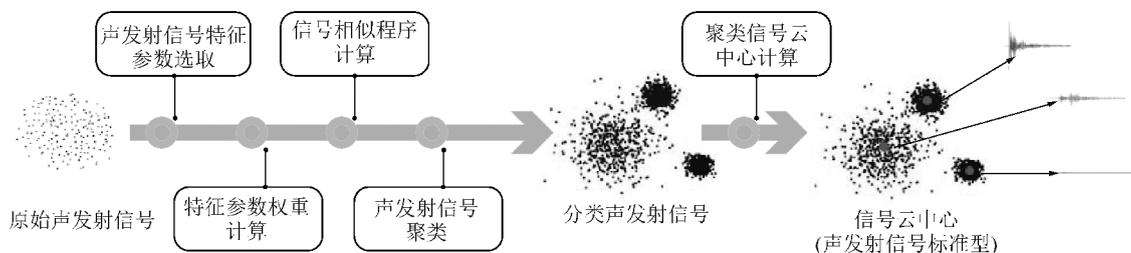


图 2 声发射信号聚类分析技术路线

Fig. 2 Technical roadmap for clustering analysis of acoustic emission signals

## 2 巷道岩爆声发射实验

### 2.1 试样制备

实验所用花岗岩取自山东莱州, 其岩爆倾向值为  $74.63 \sim 94.03 \text{ kJ/m}^3$ , 具有中等岩爆倾向性。将花岗岩加工成  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  的立方体试件, 试件中心钻直径为  $45 \text{ mm}$  的圆形通孔以模拟圆形巷道, 加工精度满足常规岩石力学实验要求。将制备好的充填料填入圆形通孔内养护  $144 \text{ h}$ , 试件模型如图 3 所示。

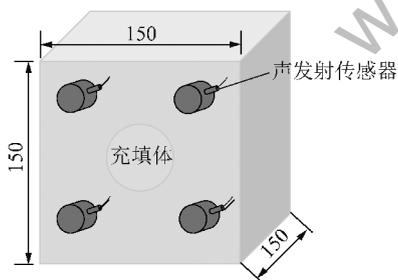


图 3 试件模型

Fig. 3 Specimen model

### 2.2 实验设备

实验加载设备采用 RLW-3000 型双轴伺服试验机, 最大轴向压力为  $3000 \text{ kN}$ , 最大侧向压力  $1000 \text{ kN}$ , 所施加压力的精度为  $\pm 1\%$ 。声发射系统采用美国物理声学公司(PAC)生产的 PCI-2 型声发射仪, 声发射传感器为 R6 $\alpha$  型, 谐振频率  $55 \text{ kHz}$ , 声发射传感器布置于圆形通孔周围, 前后各 4 只, 共计 8 只, 传感器布置位置在图 3 中已有标注, 实验系统布置如图 4 所示。



图 4 实验系统布置

Fig. 4 Experimental system layout

### 2.3 实验过程

(1) 实验前, 为减小静电和噪声对声发射实验的影响, 可将声发射系统和双轴伺服试验机接地, 并把声发射仪前置放大器阈值(增益)设为  $40 \text{ dB}$ , 声发射采样阈值设为  $45 \text{ dB}$ 。

(2) 双轴试验机与声发射系统同步开始。双轴试验机以  $1000 \text{ N/s}$  的速率分别对试件轴向和侧向施加荷载, 当侧压达到  $200 \text{ kN}$  后停止加压, 轴向继续以同等速率施加荷载至  $800 \text{ kN}$ 。花岗岩试件保持这种应力状态  $5 \text{ min}$  以进行应力调整, 然后, 从试件的一侧用锤子敲击充填体, 使充填体快速从花岗岩试件内脱出, 形成临空面, 以对围岩产生卸荷效应, 充填体开挖方式如图 5 所示。

(3) 充填体凿出后, 继续保持当前应力状态  $5 \text{ min}$  调整应力。最后, 以  $0.3 \text{ mm/min}$  的速率对岩石轴向加载, 直至圆形通孔壁面出现完整的岩爆过程, 加载路径如图 6 所示。

### 2.4 岩爆模拟实验结果

通过室内实验对花岗岩巷道岩爆过程进行模拟,

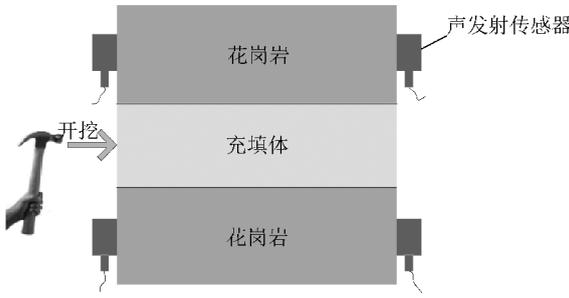


图 5 充填体开挖方式

Fig. 5 Way to excavate filling body

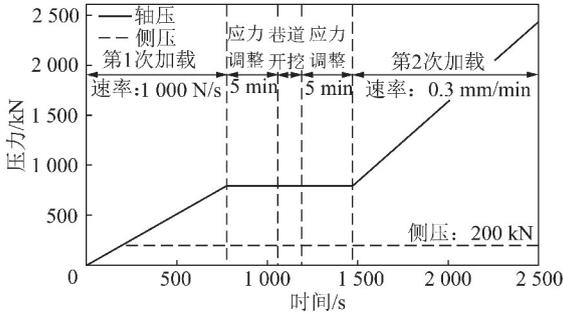


图 6 加载路径

Fig. 6 Loading path diagram

实验过程中出现的岩爆孕育阶段(图 7(a))、颗粒弹射期(图 7(b))、片状剥离伴随颗粒混合弹射期(图 7(c))、全面岩爆时期(图 7(d))均与前人模拟结果一致<sup>[4,13-14]</sup>。

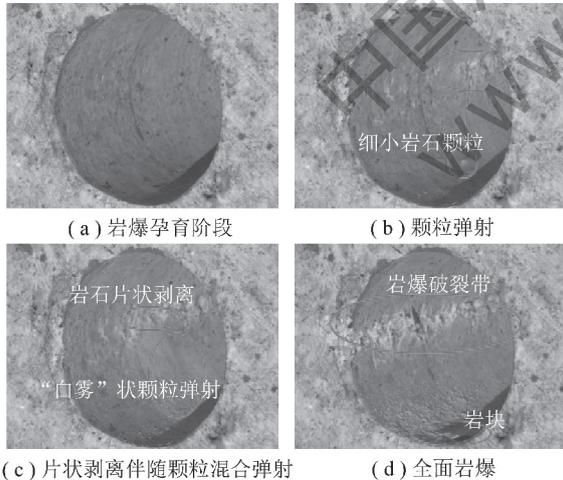


图 7 岩爆模拟结果

Fig. 7 Simulation results of rock burst

### 3 岩爆过程声发射信号聚类计算

#### 3.1 岩爆声发射信号特征参数选取

岩石的破裂归根到底是能量驱动下的一种状态失稳现象<sup>[15]</sup>,通过监测声发射能量参数变化能够了解岩石破裂失稳过程中能量释放特征和规律,单个声发射信号的能量参数则能够反映岩石破裂事件的能

量和强度;振铃计数被广泛应用于声发射事件的活性评价,并可通过声发射信号振铃计建立岩石损伤本构模型<sup>[16]</sup>,揭示岩石在受压状态下的损伤演化过程<sup>[7]</sup>;裂纹的萌生、稳定扩展和失稳扩展分别与连续型和突发型的声发射信号存在对应关系<sup>[17]</sup>,而声发射信号上升时间常被应用于以上两种类型信号的区分;与时域参数相比,频域特征往往具有本征性、唯一性<sup>[18]</sup>,通过监测岩石破裂过程中的主频变化,能够揭示在此过程中的裂纹演化规律<sup>[9]</sup>。因此,本文选取声发射信号能量、振铃计数、上升时间和主频作为信号聚类分析的特征参数。将其转换为空间向量:

$$signal_i = [e_i, s_i, t_i, f_i] \quad (10)$$

其中,  $signal$  为声发射信号,  $e, s, t, f$  分别为声发射信号特征参数(能量、振铃计数、上升时间和主频),  $i(i=1, 2, 3, \dots, n)$  为声发射信号序列号。

#### 3.2 岩爆声发射信号相似性及聚类计算

采用熵权法计算各项特征参数对声发射信号聚类计算的权重,计算结果见表 1。

表 1 声发射信号特征参数权重

Table 1 Acoustic emission signal characteristic parameter weight

参数	能量 $e$	振铃计数 $s$	上升时间 $t$	主频 $f$
权重系数	0.654	0.203	0.083	0.060

将每个声发射信号与权重系数向量相乘,即可得到附加权重后的声发射信号向量:

$$SIGNAL_i = signal_i \cdot W \quad (11)$$

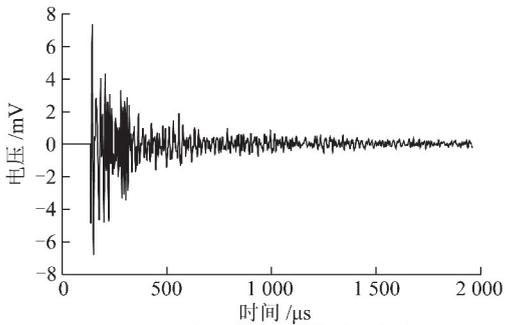
计算得到附加权重后的声发射向量后,采用式(7)计算 2 个声发射信号间的距离(亲疏关系)。计算得到声发射信号两两之间距离后,通过式(8)计算声发射信号簇间距离,并进行类型合并。采用 1.5 节介绍的方法寻找每种类型声发射信号“云”中心,得到每种类型声发射信号的标准型信号。

#### 3.3 声发射信号聚类计算结果

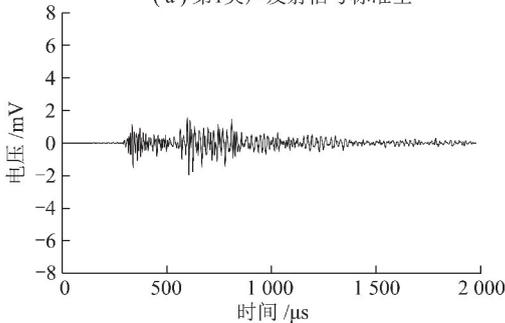
基于声发射信号的多参数特征,选取声发射能量、振铃计数、上升时间和主频作为信号特征参数,通过聚类算法对岩爆实验过程声发射信号进行聚类分析,将其划分为为差异性较大的 3 种类型,并找到每种类型声发射信号的标准型信号,3 种声发射信号标准型如图 8 所示。

### 4 岩爆过程 3 种信号声发射信号特征参数分析

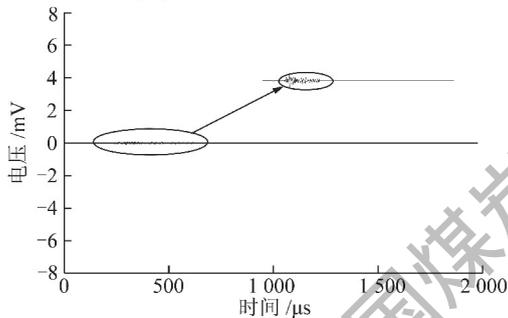
通过聚类分析,将岩爆过程中产生的声发射信号划分为 3 种类型。深入分析 3 类声发射信号参数特



(a) 第1类声发射信号标准型



(b) 第2类声发射信号标准型



(c) 第3类声发射信号标准型

图8 3种类型声发射信号标准型

Fig. 8 Standard type of 3 types of acoustic emission signals

征,挖掘其对应的物理意义,揭示其反映的岩石破裂特征。

#### 4.1 声发射信号能量特征

声发射信号能量参数是衡量岩石破裂事件强度的指标,声发射信号能量参数值越大,表明其对应的岩石破裂事件强度越高。图9为3种类型声发射信号标准型能量参数值。从图中可以看到,3种声发射信号能量参数值分别为  $4.55 \times 10^6$ 、 $3.54 \times 10^6$  和  $1.013 \times 10^4$  aJ。其中,第1,2类声发射信号能量值均高出第3类声发射信号2个数量级,以上2种信号携带能量相对较高,代表了高强度的岩石破裂类型,第3类声发射信号则代表了低强度的岩石破裂类型。

#### 4.2 声发射信号振铃计数特征

声发射振铃计数反映了岩石破裂的尺度,声发射信号振铃计数越大说明其对应的岩石破裂事件尺度越大<sup>[19]</sup>。图10为3种声发射信号标准型振铃计数数值。从图10中可以看出,3种声发射信号的标准型振铃计数分别为307,362和9次。说明第1,2类

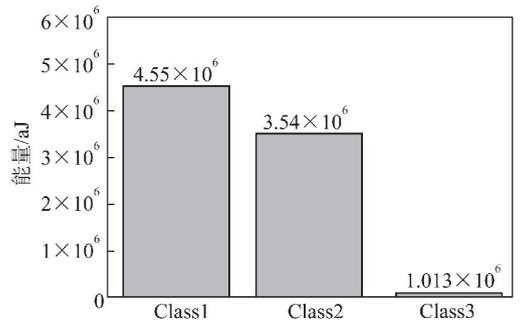


图9 3类声发射标准型信号能量值

Fig. 9 Standard type of 3 types of acoustic emission signals energy



图10 3类声发射标准型信号振铃计数值

Fig. 10 Standard type of 3 types of acoustic emission signals ringing counts

声发射信号代表了较大尺度的岩石破裂类型。而第3类声发射信号代表的岩石破裂类型尺度较小。

#### 4.3 声发射信号上升时间特征

上升时间是信号第1次越过门槛至最大振幅所经历的时间间隔,声发射上升时间越长,信号越倾向于连续型;上升时间越短,信号越倾向于突发型。连续型声发射信号往往来源于裂纹的起裂和非稳定扩展;突发型声发射信号则来自于新生裂纹的形成、原生裂纹的压密及裂纹的稳定扩展<sup>[20]</sup>。

图11为3种声发射信号标准型上升时间数值。从图11可以看到,第2类声发射信号的上升时间长达1929 μs,说明该类声发射信号以连续型为主(图8(b)),该类声发射信号代表的岩石破裂类型为裂纹非稳定扩展。

第1,3类声发射信号上升时间分别为43和33 μs,说明该种声发射信号以突发型为主(图8(a),(c)),该类声发射信号代表的岩石破裂类型为裂纹的稳定扩展。

#### 4.4 声发射信号主频特征

图12为岩爆模拟实验过程中产生的3种声发射信号标准型主频值分布。图12显示,3种声发射信号标准型主频值相差不大,均属于低频信号,低频高

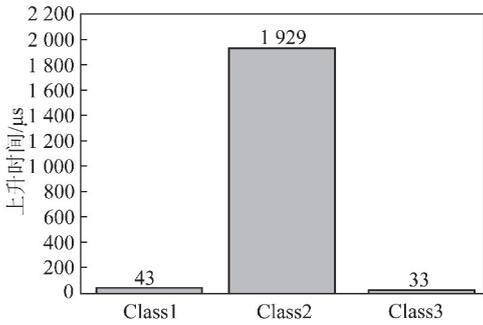


图 11 3 类声发射信号标准型上升时间值

Fig. 11 Standard type of 3 types of acoustic emission signals rise time

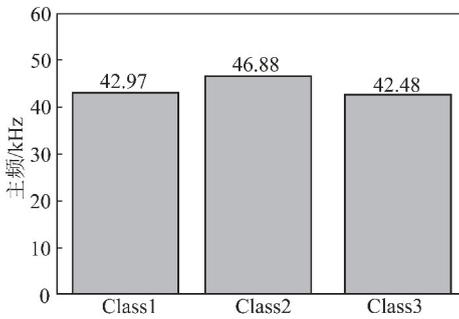


图 12 3 类声发射信号标准型主频值

Fig. 12 Standard type of 3 types of acoustic emission signals frequency

能量的声发射信号对应大尺度破裂;低频低能量的声发射信号对应小尺度破裂<sup>[21]</sup>。结合 3 种声发射信号能量特征,第 1,2 类声发射信号具有低频高能量的特征,其岩石破裂模式对应大尺度破裂;第 3 类声发射信号具有低频低能量的特征,其岩石破裂模式对应小尺度破裂。

综上所述,第 1 类声发射信号具有高能量、高振铃计数、低上升时间、低主频的“两高两低”特征,该类声发射信号代表了高强度、大尺度的裂纹稳定扩展;第 2 类声发射信号具有高能量、高振铃计数、高上升时间和低主频的“三高一低”特征,该类声发射信号代表了高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展;第 3 类声发射信号具有低能量、低振铃计数、低上升时间、低主频的“四低”特征,该类信号代表了低强度、小尺度的裂纹稳定扩展。

### 5 岩爆过程 3 种声发射信号能量释放特征

通过对岩爆过程产生的 3 类信号的能量、振铃计数、上升时间和主频等参数特征进行分析,得到 3 种声发射信号对应的物理含义。

能量释放是引发岩石整体突然破坏的内在原因。因此,不同破裂类型释放的能量可作为衡量该种破裂

表 2 不同类型声发射信号特征参数特征及对应破裂类型

Table 2 Characteristic parameters of different types of AE signals and their corresponding fracture types

声发射信号类型	声发射信号参数特征					破裂类型及特征
	能量	振铃计数	上升时间	主频	参数特征	
第 1 类	高	高	低	低	“两高两低”	高强度、大尺度的裂纹稳定扩展
第 2 类	高	高	高	低	“三高一低”	高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展
第 3 类	低	低	低	低	“四低”	低强度、小尺度的裂纹稳定扩展

对巷道岩爆产生、发展贡献率的重要依据。声发射能量参数反映了破裂事件释放能量大小,通过研究不同破裂类型对应的声发射信号能量特征,可间接获取该种岩石破裂类型对于岩爆灾害形成的贡献率。本文统计了岩爆各个阶段中 3 种声发射信号能量释放量,得到 3 种岩石破裂类型在岩爆各个阶段中的能量贡献率。

图 13 为岩爆孕育阶段,3 种岩石破裂类型能量释放贡献率。从图 13 可以看到,3 种岩石破裂类型在岩爆孕育阶段对能量释放的贡献率分别为 34.56%, 5.46%, 59.98%,说明该阶段中以第 1,3 类声发射信号代表的裂纹稳定扩展为主要能量来源(共计 94.54%)。

图 14 为细小颗粒弹射阶段中 3 种岩石破裂类型

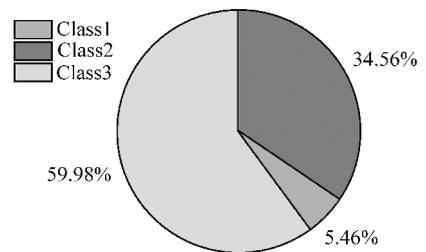


图 13 岩爆孕育阶段 3 种破裂类型贡献率

Fig. 13 Contribution rate of 3 fracture types during rock burst incubation stage

能量释放贡献率。图 14 显示,细小颗粒弹射阶段,巷道围岩大部分能量释放仍然来自于第 1,3 类声发射信号代表的裂纹稳定扩展(共计 76.30%)。相比岩爆孕育阶段,第 2 类声发射信号代表的高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展能量释放贡献率出现了 4 倍以

上的上升。与此同时,花岗岩巷道围岩出现了细小颗粒弹射现象。

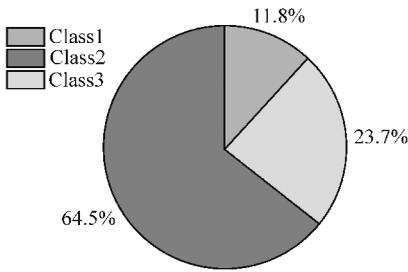


图 14 细小颗粒弹射阶段 3 种破裂类型贡献率

Fig. 14 Contribution rate of 3 fracture types in small particle ejection stage

图 15 为片状剥离伴随颗粒混合阶段中 3 种岩石破裂类型能量释放贡献率。从图 15 可以看出,第 2 类声发射信号代表的高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展为该阶段中巷道围岩能量释放的重要来源 (97.80%)。说明该阶段中,巷道围岩出现的片状剥离伴随颗粒混合弹射主要是在高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展驱使下出现的。

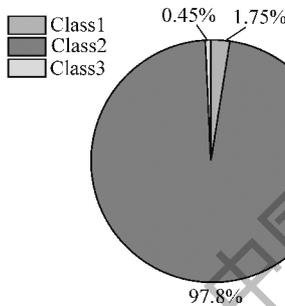


图 15 片状剥离阶段 3 种破裂类型贡献率

Fig. 15 Contribution rate of 3 fracture type in lamellar stripping stage

图 16 显示,花岗岩巷道全面岩爆阶段中 3 种岩石破裂类型能量释放贡献率与片状剥离阶段相似。该阶段中绝大部分能量释放仍然来自于第 2 类声发射信号代表的高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展,说明全面岩爆阶段中花岗岩巷道围岩破坏主要是在高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展作用下进行的。

综上所述,花岗岩巷道出现片状剥离伴随颗粒混合弹射和全面岩爆时,其释放的能量大部分来自于高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展,可认为巷道围岩出现片状剥离伴随颗粒混合弹射和全面岩爆主要是在高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展作用下进行的,高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展是岩爆灾害最终形成的主要驱动力。因此,在进行岩爆灾害防治和预警研究中,可将高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展及其对应的具有“三高—低”特征的声发射信号作为重点关注对象。

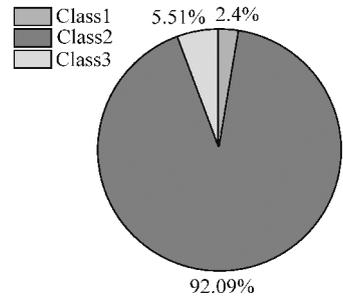


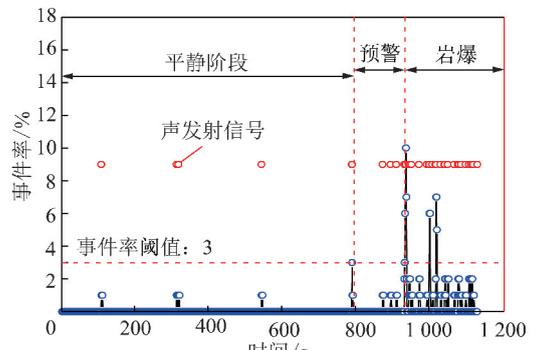
图 16 全面岩爆阶段 3 种破裂类型贡献率

Fig. 16 Contribution rate of 3 fracture types in full rock burst stage

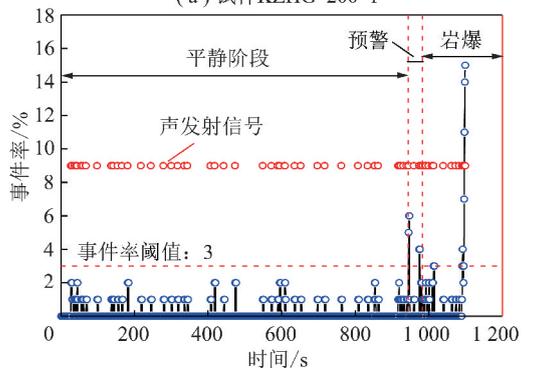
### 6 巷道岩爆声发射前兆信息研究

分析 3 种破裂模式对于巷道围岩破坏的贡献率,发现第 2 类声发射信号代表的高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展是岩爆形成和发展的重要原因,在岩爆灾害预警防治研究工作中应重点关注具有“三高—低”特征的第 2 类声发射信号。

声发射事件率是信号在单位时间内出现的次数,用来衡量声发射信号出现的频率。计算了第 2 类声发射信号在岩爆过程中的事件率,并绘制声发射事件率时间曲线,以试件 KZHG2001, KZHG2002 为例,如图 17 所示。



(a) 试件KZHG-200-1



(b) 试件KZHG-200-2

图 17 岩爆过程第 2 类声发射信号时间率变化  
Fig. 17 Time rate change of second types of AE signals during rock burst

从图17可以看到,第2类声发射信号事件率曲线在岩爆孕育、发展和形成过程中表现出了阶段性的演化特征:

(1)岩爆平静阶段。该类声发射信号零星出现,其事件率值出现在了 $[0,3]$ 内的“平静期”。

(2)岩爆预警阶段。该类声发射信号,出现频率开始增大,其事件率开始超出 $[0,3]$ ,此事巷道内壁上出现了颗粒弹射现象。

(3)颗粒弹射至岩爆发生。自巷道围岩出现颗粒弹射开始,该类信号开始密集出现,声发射事件率开始走高,开始出现大于3的值。

岩爆发生前,第2类声发射信号出现了事件率仅在 $[0,3]$ 内变化的“平静期”,“平静期”后,第2类声发射信号事件率重新走高,其事件率开始出现大于3的值,巷道围岩出现颗粒弹射现象,预示岩爆灾害即将发生,可将第2类声发射信号“平静期”后,事件率第1次大于3作为岩爆灾害即将发生的前兆信息。

## 7 结 论

(1)以声发射能量、振铃计数、上升时间和主频作为特征参数,对巷道岩爆模拟实验声发射信号进行聚类分析,区分得到3种典型声发射信号,通过分析3种声发射信号参数特征,得到了3种声发射信号对应的岩石破裂类型:

①第1类信号具有高能量、高振铃计数、低上升时间和低主频的“两高两低”特征,对应高强度、大尺度裂纹稳定扩展;

②第2类信号具有高能量、高振铃计数、高上升时间和低主频的“三高一低”特征,对应高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展;

③第3类信号具有低能量、低振铃计数、低上升时间和低主频的“四低”特征,对应低强度、小尺度的裂纹非稳定扩展。

(2)高强度、大尺度的裂纹非稳定扩展是岩爆灾害形成的主要驱动力,该种破裂类型及其对应的具有“三高一低”特征的声发射信号可作为岩爆灾害防治和预警调控研究中的重点关注对象。

(3)岩爆发生前,第2类声发射出现了事件率仅在 $[0,3]$ 变化的“平静期”,“平静期”后,第2类信号事件率开始出现大于3的值,巷道围岩出现颗粒弹射现象,预示岩爆灾害即将发生,可将第2类声发射信号“平静期”后,事件率第1次大于3作为岩爆灾害即将发生的前兆信息。

## 参考文献 (references):

[1] 张艳博,李健,刘祥鑫,等. 巷道岩爆红外辐射前兆特征实验研

究[J]. 采矿与安全工程学报,2015,32(5):786-792.

ZHANG Yanbo, LI Jian, LIU Xiangxin, et al. Infrared radiation portentous characteristics of rock burst in roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(5):786-792.

[2] 张艳博,李健,刘祥鑫,等. 水对花岗岩巷道岩爆红外辐射特征的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(4):453-458.

ZHANG Yanbo, LI Jian, LIU Xiangxin, et al. Influence of water on infrared radiation characteristic of granite roadway rock burst[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2015, 34(4):453-458.

[3] 左建平,裴建良,刘建锋,等. 煤岩体破裂过程中声发射行为及时空演化机制[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(8):1564-1570.

ZUO Jianping, PEI Jianliang, LIU Jianfeng, et al. Investigation on acoustic emission behavior and its time-space evolution mechanism in failure process of coal-rock combined body[J]. Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2011, 30(8):1564-1570.

[4] 苗金丽,何满潮,李德建,等. 花岗岩应变岩爆声发射特征及微观断裂机制[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1593-1603.

MIAO Jinli, HE Manchao, LI Dejian, et al. Acoustic emission characteristics of granite under strain rockburst test and its micro-fracture mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2009, 28(8):1593-1603.

[5] 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 Yuanhui, LIU Jianpo, ZHAO Xingdong, et al. Study on  $b$ -value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process[J]. Rock & Soil Mechanics, 2009, 30(9):2559-2539.

[6] 许江,吴慧,陆丽丰,等. 不同含水状态下砂岩剪切过程中声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(5):914-920.

XU Jiang, WU Hui, LU Lifeng, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics during shearing process of sandstone under different water contents[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2012, 31(5):914-920.

[7] 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 Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2014, 33(1):98-104.

[8] 侯鹏,高峰,张志镇,等. 基于声发射和能量演化规律评价岩石脆性的方法[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(4):702-708.

HOU Peng, GAO Feng, ZHANG Zhizhen, et al. Evaluation method of rock brittleness based on acoustic emission and energy evolution[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(4):702-708.

[9] 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(S1):2959-2967.

ZHANG Yanbo, LIANG Peng, LIU Xiangxin, et al. Experimental study on precursor of rock burst based on acoustic emission sig-

- nal dominant-frequency and entropy[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2015(S1):2959-2967.
- [10] 王伟魁,曾周末,杜刚,等. 304 控氮不锈钢应力腐蚀过程中声发射信号聚类分析[J]. 化工学报, 2011, 64(4):1027-1033.  
WANG Weikui, ZENG Zhoumo, DU Gang, et al. Cluster analysis of acoustic emission signals during 304ng stainless steel stress corrosion process[J]. CIESC Journal, 2011, 62(4):1027-1033.
- [11] 毕海胜,李自力,胡德栋,等. 储罐底板钢点蚀过程中声发射信号的聚类分析[J]. 中国石油大学学报自然科学版, 2015, 39(6):145-152.  
BI Haisheng, LI Zili, HU Dedong, et al. Cluster analysis of acoustic emission signals during tank bottom steel pitting corrosion process[J]. Journal of China University of Petroleum, 2015, 39(6):145-152.
- [12] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [13] 何满潮,苗金丽,李德建,等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5):865-876.  
HE Manchao, MIAO Jinli, LI Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2007, 26(5):865-876.
- [14] 张艳博,刘祥鑫,梁正召,等. 基于多物理场参数变化的花岗岩巷道岩爆前兆模拟实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7):1347-1357.  
ZHANG Yanbo, LIU Xiangxin, LIANG Zhengzhao, et al. Experimental study of rockburst precursor of granite tunnel based on multi-physical field parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2014, 33(7):1347-1357.
- [15] 谢和平,鞠杨,黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17):3003-3010.  
XIE Heping, JU Yang, LI Liyun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2005, 24(17):3003-3010.
- [16] 吴贤振,刘建伟,刘祥鑫,等. 岩石声发射振铃累计计数与损伤本构模型的耦合关系探究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1):28-34.  
WU Xianzhen, LIU Jianwei, LIU Xiangxin, et al. Study on the coupled relationship between AE accumulative ring-down count and damage constitutive model of rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(1):28-34.
- [17] 张志强,李国禄,王海斗,等. 涂层接触疲劳损伤过程中的声发射小波分析[J]. 材料工程, 2012, 2(9):48-53.  
ZHANG Zhiqiang, LI Guolu, WANG Haidou, et al. Acoustic emission wavelet analysis of coating during contact fatigue damage process[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, 2(9):48-53(6).
- [18] 何满潮,赵菲,杜帅,等. 不同卸载速率下岩爆破坏特征试验分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(10):2737-2747  
HE Manchao, ZHAO Fei, DU Shuai, et al. Rockburst characteristics based on experimental tests under different unloading rates[J]. Rock & Soil Mechanics, 2014, 35(10):2737-2747.
- [19] 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 Hongguang, SUN Lihui, et al. Experimental study of characteristics of irreversibility and fracture precursors of acoustic emission in rock under different confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2016, 35(7):1333-1340.
- [20] 段东,赵阳升,冯小静,等. 泥岩实时细观破坏过程及其声发射事件产生机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(1):29-35.  
DUAN Dong, ZHAO Yangsheng, FENG Xiaojing, et al. Mudstone mesoscopic failure process and generation mechanism of acoustic emission events based on real-time loading CT scan[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1):29-35.
- [21] 张艳博,梁鹏,田宝柱,等. 花岗岩灾变声发射信号多参量耦合分析及主破裂前兆特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11):2248-2258.  
ZHANG Yanbo, LIANG Peng, TIAN Baozhu, et al. Multi parameter coupling analysis of acoustic emission signals of granite disaster and the precursor characteristics of the main rupture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2016, 35(11):2248-2258.