



移动扫码阅读

杜 帅,王 焘.基于声发射幅频分布的大理岩岩爆试验研究[J].煤炭科学技术,2019,47(11):44-49.doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.11.004  
 DU Shuai,WANG Yang.Experimental study on rockburst test of marble based on acoustic emission amplitude-frequency distribution [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47 ( 11 ): 44 - 49. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.11.004

## 基于声发射幅频分布的大理岩岩爆试验研究

杜 帅<sup>1</sup>,王 焘<sup>2</sup>

(1.滨州学院建筑工程学院,山东 滨州 256600;2. 中国矿业大学(北京) 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083)

**摘要:**为了对岩爆前后声发射信号在幅值、主频方面的分布规律进行对比分析研究,探究大理岩在岩爆破坏阶段产生的声发射信号本质特征以及大理岩岩爆破坏产生的内在规律,采用三向加载和单面卸载的方式模拟岩石的应力状态变化过程,将大理岩制成标准的试件并开展了2例岩爆模拟试验,采集了试验过程中的三向应力时程曲线和声发射信号,通过分析三向应力时程曲线将岩爆试验过程划分为加载初期、加卸载阶段和岩爆阶段3大阶段,并对比分析了不同试验阶段内的声发射信号在幅值和主频方面的分布规律,同时提出了声发射信号在幅值-主频平面内分布密度的概念,分析了岩爆前后声发射信号在幅值-主频平面内的分布规律,得到了不同试验阶段声发射信号在幅值-主频平面内的密度最大位置,研究了大理岩发生岩爆的内部破坏规律。研究结果表明:大理岩发生破坏的声发射本征固有频率在以90 kHz和270 kHz为中心的2个频率带中,不随加载应力的变化而发生变化;不同阶段的幅值-频率分布规律有明显区别,岩爆阶段的声发射事件密度最大处对应的主频不小于加载阶段,岩爆阶段出现声发射最高幅值,岩爆阶段的声发射平均主频在200 kHz以上,岩爆阶段的声发射最高幅值和平均主频均大于加载阶段,表明了岩爆阶段岩石发生了更加剧烈的破坏。

**关键词:**岩爆;幅频分析;声发射;分布密度

中图分类号:TD313 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2019)11-0044-06

## Experimental study on rockburst test of marble based on acoustic emission amplitude-frequency distribution

DU Shuai<sup>1</sup>,WANG Yang<sup>2</sup>

(1. School of Architectural Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, China; 2. State Key Laboratory for

Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to carry out comparative analysis on the distribution of amplitude and main frequency of acoustic emission signals before and after rockburst, and to explore the essential characteristics of acoustic emission signals generated by marble in the rock burst stage and the inherent law of rock burst, this paper employed the three-way loading and one-way unloading methods to simulate the stress state change process of rock. Two marble rock burst simulation experiments were carried out on standard specimens. Three-dimensional stress time curve and acoustic emission signal were collected during the experiment. The rockburst experiment process was divided into three stages: initial loading stage, loading and unloading stage and rockburst stage by analyzing the three-way stress time-history curve, and the amplitude and frequency of the acoustic emission signal in different experimental stages were compared and analyzed. In terms of the distribution law, the concept of density distribution of acoustic emission signals in the amplitude-frequency plane was proposed. The distribution law of acoustic emission signals in the amplitude-main frequency plane before and after rock burst was analyzed. The internal destruction law of rockburst occurred in marble was studied when the density of the transmitted signal was the highest in the amplitude-main frequency plane. The results show that the intrinsic natural frequencies of acoustic emission of marble failure do not change with the change of

收稿日期:2018-06-11;责任编辑:曾康生

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808041)

作者简介:杜 帅(1989—),男,山东滨州人,硕士。E-mail:bzdushuai@163.com

loading stress in the two frequency bands centered at 90 kHz and 270 kHz, and the distribution law of amplitude-frequency in different stages has obvious difference. The highest frequency of acoustic emission events in the rockburst stage is not less than that in the loading stages, and the highest amplitude of acoustic emission occurs in the rockburst stage. The average main frequency of AE in rockburst stage is more than 200 kHz, and the maximum amplitude and average main frequency of AE in rockburst stage are larger than those in loading stage, which indicates that the rock in the rockburst stage has undergone more severe damage.

**Key words:** rock burst; amplitude-frequency analysis; acoustic emission; distribution deusity

## 0 引言

岩爆是在深部岩体工程中常见的突发性灾害现象,也是一种非线性力学现象<sup>[1]</sup>。随着矿山、水利水电、交通隧道等工程向深部发展,岩爆灾害也越来越频繁<sup>[2]</sup>,然而岩爆是一种复杂的破坏行为,对岩爆机制方面的认识,不同的研究者持有不同的观点<sup>[3]</sup>。陈明祥等<sup>[4]</sup>认为岩爆需要考虑岩石内部的损伤机制对变形和破坏的影响作用。欧阳孝忠<sup>[5]</sup>认为岩爆与原始地应力与地应力的重分布都有关。谭以安<sup>[6]</sup>认为岩爆是具有大量弹性应变能储备的硬质脆性岩体在围岩应力作用下产生张剪脆性破坏。钱七虎<sup>[7]</sup>提出岩爆是对掘进全过程及其后果的复合响应。

声发射是一种研究材料破坏的检测手段,常被用来研究岩石内部微观破坏的发育情况<sup>[8]</sup>。常见的声发射研究主要涉及声发射频谱<sup>[9]</sup>、*b*值<sup>[10]</sup>、能量参数<sup>[11]</sup>、振幅<sup>[12]</sup>、撞击数<sup>[13]</sup>等方面。目前,采用声发射技术对岩石破坏过程进行的研究,已经取得了很多成果<sup>[14]</sup>。苗金丽等<sup>[15]</sup>对真三轴应力状态下的突然卸载应变岩爆试验监测到的声发射原始波形数据进行频谱分析和时频分析,发现岩爆过程中同时产生大量的高频低幅特征的波和低频高幅特征的波,显示高能量释放及低 RA 值特征;何满潮等<sup>[16]</sup>对北山花岗岩开展了不同速率卸载的岩爆试验,发现声发射主频随着卸载速率降低而逐渐上移,声发射信号量随着卸载速率的降低而减少;张艳博等<sup>[17]</sup>开展巷道岩爆室内模拟声发射监测试验,对岩爆过程中的声发射信号进行聚类分析,得到 3 种类型声发射信号,建立了基于巷道岩爆模拟试验声发射数据的岩爆实时预警方法;赵菲等<sup>[18]</sup>对具有不同高度的花岗岩进行室内岩爆模拟试验,观察岩石试件破坏特征,分析花岗岩试件岩爆过程中声发射信号的参数特征、波形频谱特征,发现随着岩石试件高度的降低,岩爆临界破坏强度有升高的趋势。

现在基于声发射的岩爆室内模拟试验研究有很多,但还缺少针对大理岩岩爆前后声发射信号在幅值-主频平面内分布规律对比分析而进行的研究。笔者将开展对室内应变岩爆模拟试验中产生的声发射数据的深入研究,在应变岩爆模拟试验系统的帮

助下,开展大理岩室内岩爆模拟试验,采集整个试验过程中的应力路径和声发射信号,分析岩爆试验不同阶段声发射幅值和主频分布情况的变化规律,对比分析加载阶段和岩爆阶段试验结果的区别,探究大理岩岩爆破坏阶段的本质特征,以及岩爆破坏产生的内在规律。

## 1 岩石试样选取和试验方法设计

### 1.1 岩石试样

试验采用取自锦屏水电站的 2 件大理岩岩样,平均质量为 517.39 g,平均高度为 100.56 mm,平均单轴强度为 92.52 MPa,平均弹性模量为 30.12 GPa,平均泊松比为 0.189。2 件大理岩样品的力学参数差别较小,且内部结构较为均匀。对要进行大理岩岩爆试验的 2 件大理岩试件加工成尺寸为 150 mm×60 mm×30 mm 的标准件,分别编号为 M1 和 M2。

### 1.2 试验方法

为能够在室内试验模拟现场岩爆的破坏过程,利用深部岩爆试验过程模拟系统实现三向六面的独立加载以及单面突然卸载的功能,从而模拟岩爆应力状态的转化过程<sup>[19]</sup>。岩体在开挖前处于三向不等应力状态,在开挖过程中出现单面快速卸荷,试验过程中采用三向加载和单面卸载的方式模拟岩石的应力状态变化过程,最大主应力  $\sigma_1$ 、中间主应力  $\sigma_2$ 、最小主应力  $\sigma_3$  在加载过程中的变化形式如图 1 所示<sup>[1]</sup>。试验过程中实时采集岩石的声发射信号以及三向应力信息,研究不同应力状态下的声发射现象,分析岩爆声发射释能特征,反映岩石内部损伤。试验布置如图 2 所示。

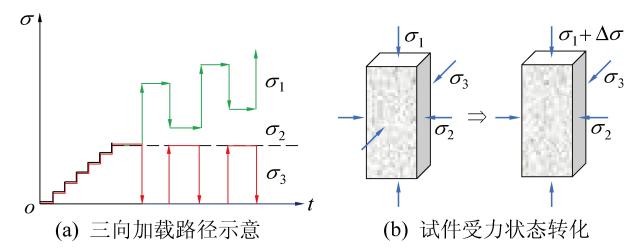


图 1 瞬时真三轴试验方法应力路径  
Fig.1 Stress path of instantaneous real three axis test

岩爆试验初始加载阶段,三向同时加载,每

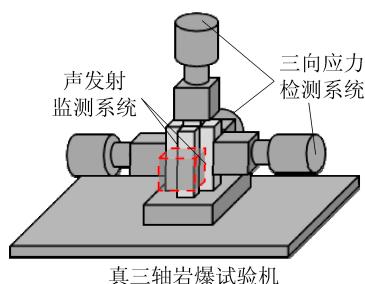


图2 岩爆试验布置示意

Fig. 2 Schematic diagram of rockburst experiment

5 min增加5 MPa,直到三向应力均达到围岩应力设计值30 MPa。保持三向应力状态15 min后单面卸载 $\sigma_3$ ,同时保持 $\sigma_2$ 不变,并增加最大主应力 $\sigma_1$ ,保持单向暴露15 min,等待发生岩爆破坏。若未发生破坏,则将卸载面的应力恢复至卸载前的状态, $\sigma_1$ 增加10 MPa,保持三向应力加载状态15 min后,重复上述单面卸载步骤,直到发生岩爆破坏为止。加载应力路径如图1a所示。

## 2 岩爆试验的阶段划分

通过记录试验过程中三向应力路径,得到M1和M2试件的应力加载曲线如图3所示。根据加载方式和岩石破坏程度的不同,将试验过程大体分为加载初期、加卸载阶段和岩爆阶段,其中前2个阶段统称为加载阶段,3个阶段在图中以不同的背景颜色区分。

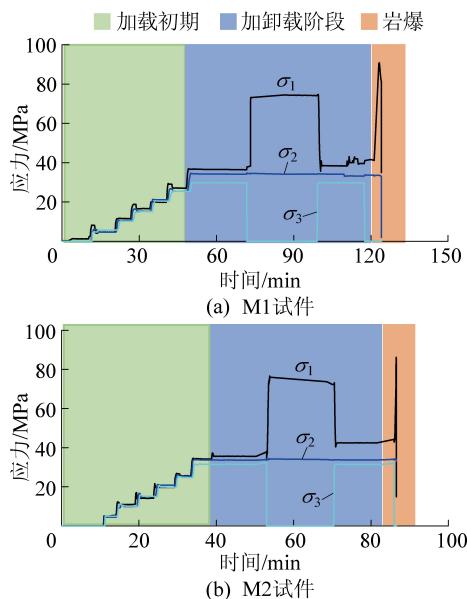


图3 应力加载曲线

Fig.3 Stress path curves

## 3 关键点幅值、主频分析

### 3.1 幅值分析

岩爆试验过程中产生了大量的声发射事件,通

过PAC声发射检测系统可以收集到声发射的撞击数、发生时间、绝对能量、电压幅值、主频等多个参数,绘制每个试验的时间-幅值关系如图4所示。

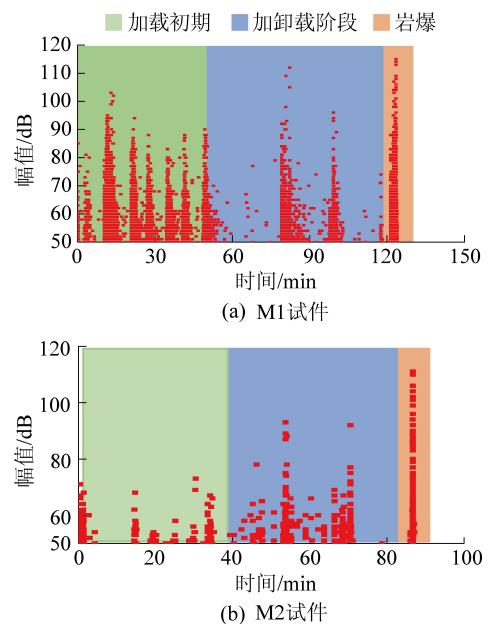


图4 大理岩声发射幅值

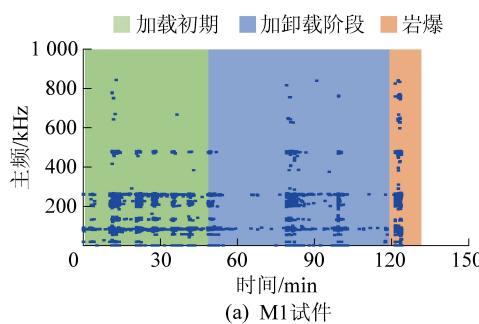
Fig.4 AE amplitude of marble

M1和M2试件声发射幅值在时间上的分布情况与2个试件的应力加载曲线有一定的对应关系。M1加载初期最高幅值为104 dB,第1次单面卸载时最高幅值为113 dB左右,进入岩爆阶段后,出现最高幅值达到了115 dB,为整个试验最高幅值。M2加载初期声发射幅值最高约为70 dB,第1次单面卸载时最高的幅值约为95 dB,岩爆阶段幅值增大到了110 dB,由此可见,声发射幅值随着加载的应力水平增加而相应增大,在应力突然增加时声发射幅值出现局部极大值,两例试验的声发射幅值最大值均在岩爆阶段出现。

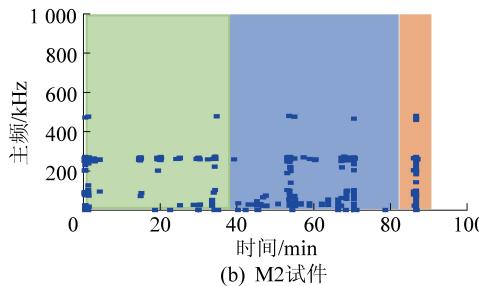
### 3.2 主频分析

绘制每个试验的时间-主频图如图5所示。

M1加载初期主频主要分布在90 kHz左右、200~270 kHz、480 kHz左右,少量超过600 kHz;第1次单向卸载时主频分布与上述范围差别不大;进入岩爆阶段后,主频主要分布在90、260和480 kHz三个频率带内,其中260 kHz左右的声发射主频点分布较多,为主频的主要分布带;M2试件加载初期主频则主要分布在90、270和480 kHz左右;第1次单向卸载时主频在0~100、200~300和480 kHz左右都有分布;岩爆阶段3个关键点的主频同样分布在3个频率带中,但在270 kHz附近较为集中。由此可见,2组试验的声发射信号主频都主要集中



(a) M1试件



(b) M2试件

图 5 大理岩声发射主频

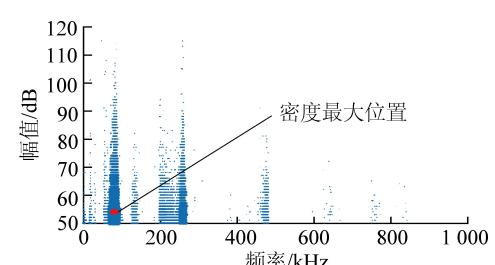
Fig.5 AE peak frequency of marble

以 90 kHz 和 270 kHz 为中心的 2 个频率带中, 此为大理岩破坏时声发射的本征固有频率, 不随加载应力的变化而发生变化。

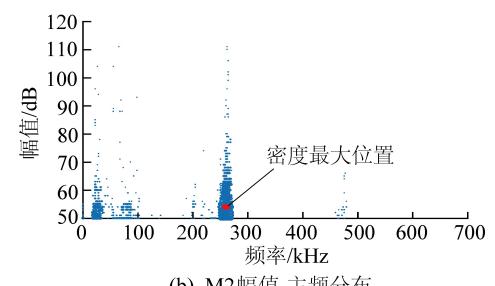
### 3.3 幅值-主频分布分析

单一声发射信号的取样时间极短, 采样频率较高, 不同声发射信号的变化很大, 所以统计所有声发射试件的幅值和主频信息, 比单一声发射频谱信息更能反应试验过程中大理岩的破坏规律<sup>[20]</sup>。为更好地体现锦屏大理岩的主频分布特点, 可绘制 2 次岩爆试验过程中声发射事件的幅值-主频平面内的分布图, 如图 6 所示。

通过统计幅值-主频平面内不同区域声发射事



(a) M1幅值-主频分布



(b) M2幅值-主频分布

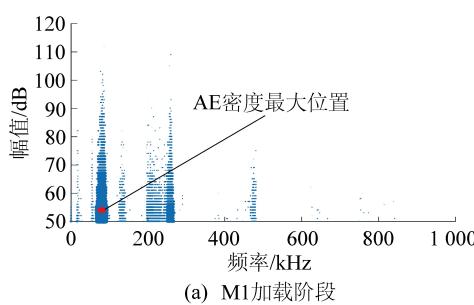
图 6 大理岩声发射幅值-主频分布

Fig.6 Amplitude-frequency chart of marble AE signal

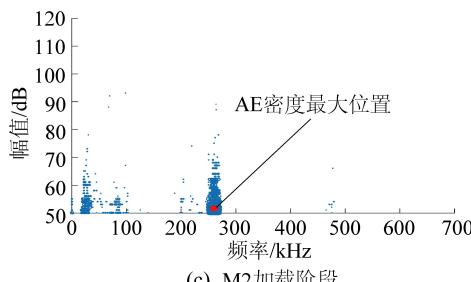
件的数量, 计算声发射事件密度, 并以数据点的大小在图 6 中表示, 其中密度最大处以红色实心圆点标出。

M1 在主频约为 90、270 kHz 的幅值最高, 达到 115 dB 左右, 在主频 20、130 和 480 kHz 均出现较窄的数据带, 最大幅值分别在 100、83 和 90 dB, 主频超过 600 kHz 的数据点较少且较离散。M2 在 25、270 kHz 的幅值较高, 超过了 110 dB, 在 100 kHz 的幅值达到 93 dB, 480 kHz 左右出现的声发射数据点较少, 幅值只有 70 dB。

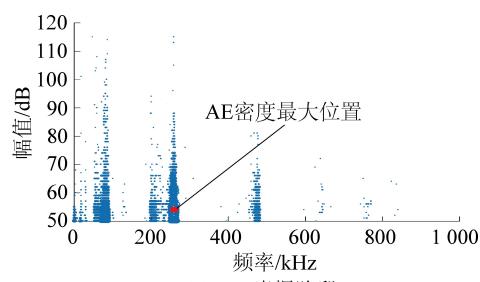
为研究幅值-主频分布在岩爆阶段与岩爆之前的加载阶段有何区别, 现绘制 2 例试验加载阶段和岩爆阶段的幅值-主频分布如图 7 所示。



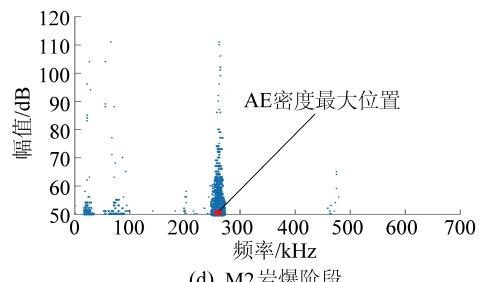
(a) M1加载阶段



(c) M2加载阶段



(c) M1岩爆阶段



(d) M2岩爆阶段

图 7 不同阶段幅值-主频分布

Fig.7 Amplitude-frequency distribution in different stages

由此可见,2例试验在不同阶段的幅值-频率分布规律有明显区别,M1试件声发射密度最大处所对应主频从加载阶段的70 kHz左右变化到岩爆阶段的260 kHz左右。M2试件的声发射密度最大位置在加载阶段和岩爆阶段都在260 kHz左右。岩爆阶段声发射试件在幅值-主频平面内密度最大处对应的主频大于等于加载阶段,统计2例试验不同阶段幅频分布信息见表1。

表1 不同阶段幅频分布信息

Table 1 Information of amplitude-frequency distribution in different stages

阶段	最高幅	平均主	最高峰	平均主
	值/dB	频/kHz	值/dB	频/kHz
M1	M2	M1	M2	
加载阶段	112	93	128.26	195.36
岩爆阶段	115	111	205.88	216.90

岩爆阶段的最高幅值和平均主频均大于加载阶段,岩爆阶段的平均主频在200 kHz以上。说明岩爆阶段岩石发生了更加剧烈的破坏,产生了更多的高频率、高幅值声发射信号。

## 4 结 论

通过对2例大理岩进行岩爆试验,采集试验过程中的应力和声发射参数,以应力曲线划分不同的试验阶段,并针对岩爆阶段和加载阶段的声发射幅值、主频以及幅值-主频分布规律进行了分析,所得3条结论如下。

1)大理岩岩爆试验声发射信号主频都主要集中在50~90 kHz和255~270 kHz两个频率带中,此为大理岩破坏时声发射的本征固有频率,不随加载应力的变化而发生变化。

2)不同阶段的幅值-频率分布规律有明显区别,岩爆阶段声发射试件在幅值-主频平面内密度最大处对应的主频不小于加载阶段。

3)岩爆阶段出现声发射最高幅值,岩爆阶段的平均主频在200 kHz以上,明显高于加载阶段。说明岩爆阶段岩石发生了更加剧烈的破坏,产生了更多的高频率、高幅值声发射信号。

## 参考文献(References):

- [1] 何满潮,苗金丽,李德建,等.深部花岗岩试样岩爆过程试验研究[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 and Engineering, 2007, 26(5):

865-876.

- [2] 窦林名,李振雷,张敏.煤矿冲击地压灾害监测预警技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(7):41-46.  
DOU Linming, LI Zhenlei, ZHANG Min. Study on monitoring and early warning technology of mine pressure bump disaster[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7):41-46.
- [3] 刘长江,卢海军.深部巷道岩爆的发生机理及防治对策[J].煤炭科学技术,2005,33(11):30-32;67.  
LIU Changjiang, LU Haijun. Occurred mechanism and prevention counter measures for rock outburst in deep mine roadway[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(11):30-32;67.
- [4] 陈明祥,侯发亮.岩石损伤模型与岩爆机理解释[J].武汉水利电力大学学报,1993,26(2):154-159.  
CHEN Mingxiang, HOU Faliang. Damage model for rock and explanation of rockburst mechanism[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1993, 26(2):154-159.
- [5] 欧阳孝忠.深埋隧洞岩爆特征及规律成因浅析[J].贵州水力发电,1996(4):16-21,59.  
OUYANG Xiaozhong. Preliminary analysis on cause of regular pattern formation of rock burst in tunnels buried deeply[J]. Guizhou Water Power, 1996(4): 16-21,59.
- [6] 谭以安.岩爆形成机理研究[J].水文地质工程地质,1989(1):34-38,54.  
TAN Yian. The mechanism research of rockburst [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1989(1): 34-38,54.
- [7] 钱七虎.岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J].岩土力学,2014,35(1):1-6.  
QIAN Qihu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1):1-6.
- [8] 丁鑫,肖晓春,吕祥锋,等.煤体破裂分形特征与声发射规律研究[J].煤炭学报,2018,43(11):3080-3087.  
DING Xin, XIAO Xiaochun, LYU Xiangfeng, et al. Investigate on the fractal characteristics and acoustic emission of coal fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11):3080-3087.
- [9] 贾雪娜,姜全果,何满潮,等.传感器放置位置对花岗岩岩爆声发射频谱特征的影响[J].岩石力学与工程学报,2018,37(S2):3968-3978.  
JIA Xuena, JIANG Quanguo, HE Manchao, et al. The influence of position of sensor placement on the spectral characteristics of the acoustic emission during the process of rock burst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (S2): 3968-3978.
- [10] 蒋军军,邓志刚,欧阳振华,等.不同尺寸冲击倾向性煤样声发射b值特征研究[J].煤炭科学技术,2019,47(3):120-124.  
JIANG Junjun, DENG Zhiqiang, OUYANG Zhenhua, et al. Study on acoustic emission b-value characteristics of bump-prone coal sample with different sizes[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3):120-124.
- [11] 肖晓春,金晨,丁鑫,等.基于声发射时频特征的不同含水煤样冲击倾向试验研究[J].煤炭学报,2018,43(4):931-938.  
XIAO Xiaochun, JIN Chen, DING Xin, et al. Experimental

- study on rock burst tendency of coal with different moisture content based on acoustic emission time frequency signals [ J ]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4) : 931–938.
- [ 12 ] 李庶林,周梦婧,高真平,等.增量循环加载下岩石峰值强度前声发射特性试验研究 [ J ].岩石力学与工程学报,2019,38(4) : 724–735.
- LI Shulin, ZHOU Mengjing, GAO Zhenping, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics before the peak strength of rocks under incrementally cyclic loading – unloading methods [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4) : 724–735.
- [ 13 ] 刘 刚,肖福坤,秦 涛.小尺寸效应下岩石力学特性及声发射规律 [ J ].岩石力学与工程学报,2018,37(S2) : 3905–3917.
- LIU Gang, XIAO Fukun, QIN Tao. Rock mechanics characteristics and acoustic emission rule under small – size effect [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2) : 3905–3917.
- [ 14 ] 潘孝康,陈 结,姜德义,等.三轴卸围压条件下砂岩声发射统计特征 [ J ].煤炭学报,2018,43(10) : 2750–2757.
- PAN Xiaokang, CHEN Jie, JIANG Deyi, et al. Statistical characteristics of sandstone acoustic emission under triaxial unloading confining pressure [ J ]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10) : 2750–2757.
- [ 15 ] 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 microfracture mechanism [ J ]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8) : 1593–1603.
- [ 16 ] 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) : 2737–2747,2793.
- HE Manchao, ZHAO Fei, DU Shuai, et al. Rockburst characteristics based on experimental tests under different unloading rates [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 ( 10 ) : 2737 – 2747,2793.
- [ 17 ] 张艳博,杨 震,姚旭龙,等.基于声发射信号聚类分析和神经网络识别的岩爆预警方法试验研究 [ J ].岩土力学,2017,38(S2) : 89–98.
- ZHANG Yanbo, YANG Zhen, YAO Xulong, et al. Experimental study of rockburst early warning method based on acoustic emission cluster analysis and neural network identification [ J ]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2) : 89–98.
- [ 18 ] 赵 菲,何满潮,王洪建,等.不同高度花岗岩岩爆试验的声发射特征研究 [ J ].岩土力学, 2019, 30(1) : 1–13.
- ZHAO Fei, HE Manchao, WANG Hongjian, et al. Acoustic emission characteristics of granite with different heights under rockburst tests [ J ]. Rock and Soil Mechanics. 2019, 30 ( 1 ) : 1–13
- [ 19 ] 赵 菲,何满潮,李德建,等.真三轴卸载煤爆试验破坏特征演化分析 [ J ].地下空间与工程学报,2019,15(1) : 142–150.
- ZHAO Fei, HE Manchao, LI Dejian, et al. Damage evolution in the fracture process of coal burst during true triaxial unloading test [ J ]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1) : 142–150.