

文章编号:1671-251X(2019)12-0040-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019030045

自然和饱水煤样巴西劈裂过程声发射幅频特征试验

陈同庆¹, 沈荣喜^{1,2}, 李红儒¹, 侯振海¹, 张昕¹

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

扫码移动阅读



摘要:为研究水对煤样拉伸破裂过程中力学及声发射特性的影响,对自然和饱水煤样进行巴西劈裂试验,利用频谱分析法对声发射波形信息进行研究。试验结果表明:拉伸破裂过程中,饱水煤样主频集中范围小于自然煤样;破坏阶段饱水煤样释放的能量比自然煤样少,其最大主频幅值低于自然煤样;自然煤样声发射信号以低频低幅值、中频低幅值和高频低幅值信号为主,煤样破裂时低频和高频信号有向中频带转移的趋势,饱水煤样声发射信号以低频低幅值信号为主,煤样破裂时低频高幅值和中频低幅值信号增加;低频高幅值信号对应煤样破裂过程中大尺度裂纹产生;饱水煤样破裂时低频高幅值信号数量多于自然煤样,反映了饱水煤样破裂时产生的大尺度裂纹更多。

关键词:煤岩受载稳定性;含水煤岩拉伸破坏;饱水煤样;声发射;频谱分析;煤样裂纹扩展

中图分类号:TD315 文献标志码:A

Experiment of amplitude and frequency feature of acoustic emission during Brazilian splitting testing of natural and saturated coal samples

CHEN Tongqing¹, SHEN Rongxi^{1,2}, LI Hongru¹, HOU Zhenhai¹, ZHANG Xin¹

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Key Laboratory of Coal Mine Gas and Fire Prevention and Control of the Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to study influence of water on mechanical and acoustic emission (AE) characteristics of coal samples during tensile and rupture, Brazilian splitting test was carried out on natural and saturated coal samples, and the AE waveform information was studied by spectrum analysis. The test results show that during the tensile and rupture process, distribution range of the saturated coal sample dominant frequency signal is lower than that of the natural coal sample. In destruction stage, the saturated coal sample releases less energy than the natural coal sample, and its maximum amplitude of dominant frequency is lower than the natural coal sample. The natural coal sample AE signal is mainly low-frequency low-amplitude, medium-frequency low-amplitude and high-frequency low-amplitude, and the low-frequency and high-frequency tend to shift to the middle-frequency band when the coal sample ruptures. The saturated coal sample AE signals is mainly low-frequency low-amplitude, and the low-frequency high-amplitude and medium-frequency low-amplitude increase when the coal sample ruptures. The low-frequency high-amplitude signals correspond to the large scale cracks generated during the coal sample rupture. When the saturated coal sample ruptures, the number of low-frequency high-amplitude signals is more than that of natural coal samples, which reflects that the large scale cracks generated during the

收稿日期:2019-03-18;修回日期:2019-11-22;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家自然科学基金项目(51104156,51504244)。

作者简介:陈同庆(1995—),男,河南周口人,硕士研究生,主要研究方向为煤岩动力灾害监测和预警,E-mail:15036845095@163.com。

引用格式:陈同庆,沈荣喜,李红儒,等.自然和饱水煤样巴西劈裂过程声发射幅频特征试验[J].工矿自动化,2019,45(12):40-44.

CHEN Tongqing, SHEN Rongxi, LI Hongru, et al. Experiment of amplitude and frequency feature of acoustic emission during Brazilian splitting testing of natural and saturated coal samples[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(12): 40-44.

rupture of the saturated coal sample are more than other cracks.

Key words: load stability of coal and rock; water-bearing coal and rock tensile failure; saturated coal sample; acoustic emission; frequency spectrum analysis; coal sample crack propagation

0 引言

随着矿井开采深度不断增加,煤矿生产面临煤与瓦斯突出、冲击地压等安全问题。煤层注水、水力冲孔等水力措施作为预防这类灾害的技术手段被广泛应用^[1-2]。水力措施的广泛应用及原生地下水系的存在使煤岩的原始结构状态发生变化^[3]。

水对岩石的物理力学性质有显著影响^[4-5]。郭佳奇等^[6]研究表明,水对岩溶灰岩的单轴抗压强度、抗拉强度和弹性模量有明显影响,饱水岩样峰值应变和泊松比大于自然岩样。朱朝辉等^[7]研究表明,砂岩在饱和-干燥循环条件下比长期浸泡条件下抗拉强度降低更显著。P. Baud^[8]对饱水砂岩进行三轴压缩试验,并用微观力学模型解释了水的弱化与破坏模式之间的关系。

水对岩石的地球物理性质也有明显改变,如对声发射的影响。声发射是指岩石在破裂过程中释放出弹性波的现象。声发射信号包含岩石破裂过程中内部结构变化和受力状态等信息,通过分析声发射信号变化规律可得出岩石破坏前兆特征^[9-10]。前人针对含水煤岩受载破坏过程中声发射变化特征进行了大量研究^[11]。王笑然等^[12]对比自然和饱水煤样受载破坏时声发射信号的差异,总结了煤样破坏前声发射信号的变化特征。张艳博等^[13]研究了自然和饱水煤矸石压缩破坏时声发射信号主频和熵值特征,并认为可利用饱水煤矸石声发射信号主频和熵值的突变特征对矿山动力灾害进行预警。

现有文献对含水煤岩受载破坏的研究多集中于水对煤岩物理力学特性的影响和煤岩破坏过程中声发射信号时域特征分析,而对煤岩拉伸破坏过程中声发射信号频域特征分析较少,特别是考虑水对煤岩拉伸破坏过程中声发射信号频谱特征影响的分析更少。煤矿井下煤岩多为拉伸破坏并且受水影响,故研究水-岩作用后煤岩拉伸破坏过程中声发射信号频谱特征,对煤岩受载稳定性监测及保障矿井安全生产有重要借鉴意义。本文对自然和饱水煤样进行巴西劈裂试验并监测声发射信号,采用频谱分析方法研究自然和饱水煤样破坏过程中声发射信号主频和主频幅值变化差异,揭示声发射信号主频和主频幅值变化特征与煤样裂纹扩展的关系。

1 煤样制备及试验方法

1.1 煤样制备

煤样取自黑龙江龙煤集团鹤岗矿业公司峻德煤矿三水平北17层三四区一段一分层工作面。按照岩石力学学会标准,将表面无裂缝的大煤块加工成 $\varnothing 50\text{ mm}\times 25\text{ mm}$ 的圆盘试样,选取符合标准的10块试样并分为2组,每组5块试样。A组试样标号为A₁—A₅,放置于自然状态下。B组试样标号为B₁—B₅,放置于容器中,加水使试样全部淹没,定时称重,72 h左右达到饱水状态。自然煤样平均含水率约为1.6%,饱水煤样平均含水率约为5.3%。

1.2 声发射试验系统

声发射试验系统主要包括单轴加载子系统和声发射数据采集子系统,如图1所示。单轴加载子系统采用新SANS微机控制电液伺服压力试验机自动采集载荷、位移和时间等数据。声发射数据采集子系统主要由CTA-1型声电动态数据采集器、声发射传感器、前置放大器等组成,能同时高速采集8个通道的声发射信号。

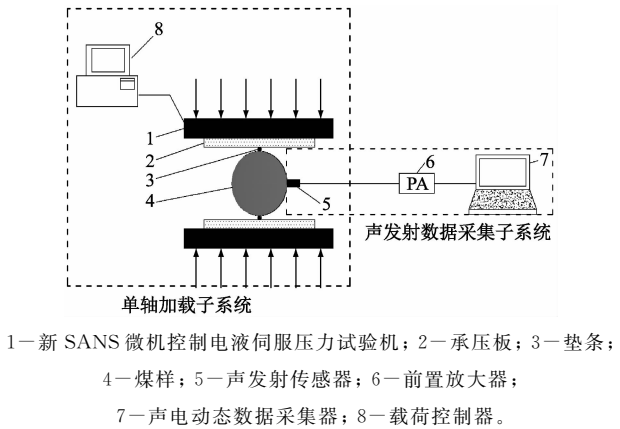


图1 声发射试验系统

Fig. 1 Acoustic emission experimental system

1.3 试验过程

试验前采用断铅法进行声发射信号测试,确定声发射试验系统一切正常后进行试验。试验时将圆盘状试件横置于承压板间,并在试件的上下承压板之间各放置一根硬质钢丝作为垫条,将声发射传感器固定在煤样表面上,并用凡士林耦合剂耦合,以确保煤样变形破裂产生的声发射信号被传感器接收。设声发射门槛值为40 dB·m,采样频率为1 MSPS,前置放大倍数为40 dB。压力试验机采用载荷控制,加载速率为50 N/s。开启压力试验机的

同时开始采集声发射信号数据,直至试样破坏。试验结束后,处理并分析采集的数据。

2 煤样力学特性

试验结果表明:自然煤样抗拉强度为 1.432~1.782 MPa,均值为 1.442 MPa;饱水煤样抗拉强度为 0.718~1.314 MPa,均值为 0.938 MPa;饱水煤样抗拉强度比自然煤样低 34.95%,软化系数为 0.65。由于篇幅有限,本文选取自然煤样 A₃、饱水煤样 B₄ 进行对比分析。煤样破坏过程中载荷-位移曲线如图 2 所示。

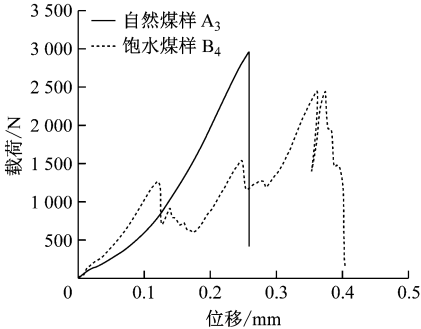


图 2 煤样破坏过程中载荷-位移曲线

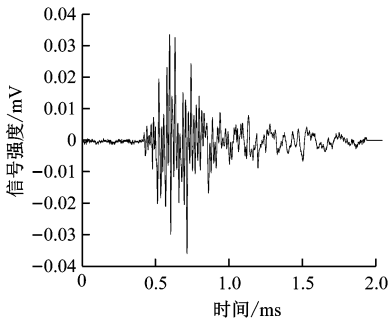
Fig. 2 Load-displacement curve during coal sample failure process

从图 2 可看出,自然和饱水煤样拉伸劈裂破坏过程可分为 4 个阶段:压密阶段(阶段 I)、弹性变形阶段(阶段 II)、塑性变形阶段(阶段 III)和破坏阶段(阶段 IV)。自然煤样载荷达到抗拉强度峰值后,瞬间跌落到零,煤样表现出明显的脆性破坏特征。饱水煤样在劈裂过程中出现分次破裂特征,塑性变形阶段时间明显变长,并且当载荷达到峰值后没有迅速跌落,煤样表现出一定的塑性破坏特征。上述现象表明,煤样被水浸泡后,水使煤样产生物理及化学劣化,颗粒内部分子间作用力减小,脆性减弱,塑性增强,煤样表现出明显的塑性软化特征。

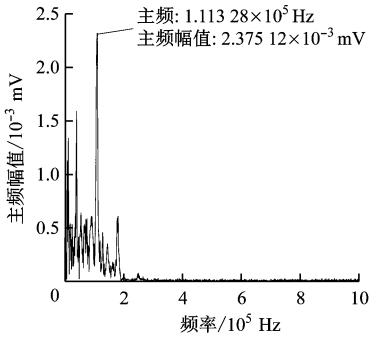
3 声发射信号频谱特征分析

3.1 声发射信号主频和主频幅值提取

声发射信号的主频和主频幅值等频谱特征与岩石破裂活动密切相关,包含岩石破裂类型、尺寸等信息^[14]。通过快速傅里叶变换(FFT)可将声发射信号时域特征变换为频域特征,绘制出声发射频谱图并获取幅频信息。将频谱图中最大幅值定义为声发射主频幅值,主频幅值所对应的频率定义为主频。以 A₃ 试样试验过程中第 1739 号声发射信号波形转换为例,说明声发射信号主频和主频幅值的提取过程,如图 3 所示。



(a) 声发射原始波形



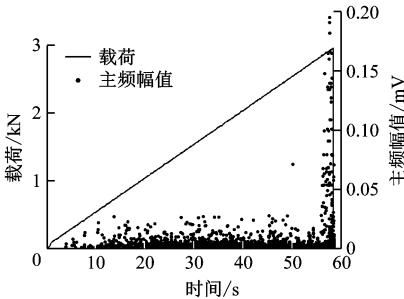
(b) 频谱

图 3 主频和主频幅值提取过程

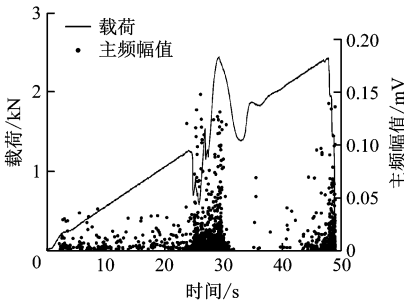
Fig. 3 Extraction process of dominant frequency and its amplitude

3.2 声发射信号主频幅值特征

自然和饱水煤样破坏过程中主频幅值变化如图 4 所示。自然煤样从压密阶段到塑性变形阶段主频幅值变化较为稳定,主频幅值集中于 0.025 mV 以下;进入破坏阶段后,自然煤样内部的裂纹贯穿,



(a) 自然煤样 A₃



(b) 饱水煤样 B₄

图 4 煤样破坏过程中主频幅值变化

Fig. 4 Amplitude change of dominant frequency during coal sample failure process

极短时间内发生宏观破坏,释放大量能量,出现较大主频幅值。饱水煤样从压密阶段到弹性变形阶段释放的能量少,主频幅值集中在 0.025 mV 以下;每次出现破裂时,饱水煤样都释放大量能量,对应出现高主频幅值信号,同时低主频幅值信号也大量增加。

3.3 主频和归一化主频幅值耦合特征

将主频分为低频带(0~75 kHz)、中频带(75~150 kHz)和高频带(150~230 kHz),对主频幅值进行归一化处理并分为低幅值(归一化值 ≤ 0.12)和高幅值(归一化值 > 0.12)。对试验过程中全部声发射信号进行处理及统计,得出煤样破坏过程中声发射信号主频和主频幅值之间的耦合特征,如图 5 所示。

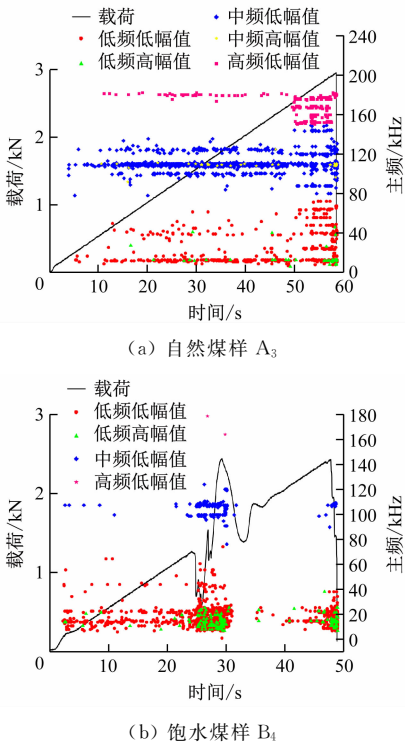


图 5 煤样破坏过程中主频与归一化主频幅值耦合特征
Fig. 5 Coupling characteristics of dominant frequency and normalized dominant frequency amplitude during coal sample failure process

从图 5 可看出,压密阶段和弹性变形阶段,自然煤样内部原生微裂隙、微孔隙等缺陷的压密和微裂纹的萌生等活动产生的声发射信号较复杂,以低频低幅值、中频低幅值和高频低幅值 3 种信号为主,低频高幅值和中频高幅值信号出现较少。进入塑性阶段,自然煤样内部不断有微裂纹产生及贯通,低频低幅值、中频低幅值和高频低幅值信号数量增加,并且低频低幅值和高频低幅值 2 种信号有向中频带转移的趋势。在破坏阶段,随着载荷的突降,出现少量低频高幅值和中频高幅值信号。

饱水煤样由于受水的影响,在压密阶段和弹性变形阶段内部活动较弱,产生的声发射信号少且主

频信号简单,声发射信号以低频低幅值为主。塑性阶段载荷出现跌落、煤样产生破裂时,低频低幅值、低频高幅值和中频低幅值信号点大量出现。随后载荷继续上升,声发射信号再次减弱,主频信号数量减少。煤样即将破坏时,低频低幅值和低频高幅值信号数量有增加趋势。

破坏过程中,饱水煤样声发射信号主频集中在 4~32 kHz,自然煤样声发射信号主频集中在 5~185 kHz,自然煤样主频信号分布范围更广。由于水的作用改变了煤样内部结构及其地球物理性质,饱水煤样主频范围小于自然煤样。

自然和饱水煤样在载荷跌落、产生宏观破裂时,都有低频高幅值信号出现,表明该信号与宏观破裂有较好的对应关系,故可把低频高幅值信号出现作为煤岩破坏的前兆特征。

4 讨论与分析

声发射信号主频和主频幅值与岩石裂纹尺度有关^[15-16]。自然和饱水煤样出现载荷突降时,低频高幅值信号数量增加,表明该类信号对应着大尺度裂纹的产生。饱水煤样破坏阶段,低频高幅值信号数量占信号总数的 8.92%,而自然煤样低频高幅值信号占比为 2.34%。饱水煤样低频高幅值信号明显多于自然煤样,主要原因是水的软化作用使煤样产生了软化和蠕变特性,饱水煤样更容易破裂,产生的大尺度裂纹更多,对应饱水煤样破坏阶段声发射低频高幅值信号多于自然煤样。

由于浸泡过水,饱水煤样破坏更充分,裂纹更多。自然和饱水煤样拉伸破裂后的裂纹形态如图 6 所示。

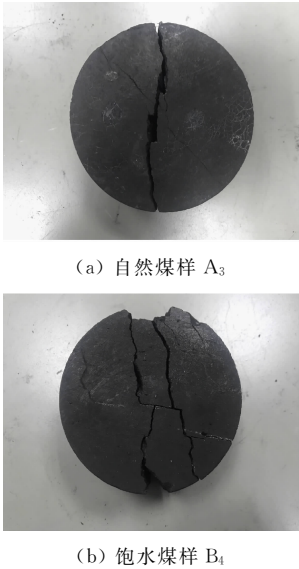


图 6 自然和饱水煤样破坏形态
Fig. 6 Natural and saturated coal sample failure patterns

由图 6 可看出,自然煤样的破坏形式为张拉破坏,饱水煤样为“张拉+剪切”破坏。自然煤样有一条主裂纹贯穿且伴有极少的次生裂纹,而饱水煤样劈裂破坏过程中出现二次破裂,破坏后除主裂纹外还伴有次生裂纹。出现这种现象主要有 2 个方面原因:① 由于水岩相互作用,饱水煤样颗粒内部的分子间作用力减小,黏聚力减小,内摩擦因数降低,试样更容易发生破坏。② 水进入煤样内部后填充在孔隙、裂隙内,在加载过程中饱水煤样内部孔隙体积减小,引起孔隙水压增加,使裂纹尖端附近产生较高附加应力,加上剪应力的作用,孔隙、裂隙发展贯通形成宏观裂纹,导致饱水煤样劈裂破坏过程中除产生轴向主裂纹外,还产生少量次生裂纹。

5 结论

(1) 自然煤样抗拉强度均值为 1.442 MPa,饱水煤样抗拉强度均值为 0.938 MPa,软化系数为 0.65。饱水煤样塑性阶段持续时间比自然煤样长。自然煤样达到抗拉强度后瞬间破坏,表现出脆性破坏特征,饱水煤样出现分次破裂,达到抗拉强度后呈现出塑性破坏特征。自然煤样的破坏形式为张拉破坏,而饱水煤样为“张拉+剪切”破坏。

(2) 由于水-岩相互作用,饱水煤样破坏时释放的能量少于自然煤样,对应饱水煤样最大主频幅值低于自然煤样。自然煤样破坏过程中以低频低幅值、中频低幅值和高频低幅值信号为主,临近破坏时低频带和高频带信号数量增加,并有向中频带扩散的趋势。饱水煤样声发射信号以低频低幅值信号为主,煤样破坏时低频低幅值、低频高幅值和中频低幅值信号点大量出现。

(3) 低频高幅值信号与宏观破裂有很好的对应关系,低频高幅值信号的出现可以作为煤岩破坏前兆特征。饱水煤样破坏时低频高幅值信号占比高于自然煤样,表明饱水煤样破坏阶段产生的裂纹尺度大于自然煤样,破坏更充分,除主裂纹外还伴有次生裂纹。

参考文献 (References):

[1] 王兆丰,范迎春,李世生.水力冲孔技术在松软低透突出煤层中的应用[J].煤炭科学技术,2012,40(2):52-55.
WANG Zhaofeng, FAN Yingchun, LI Shisheng. Application of borehole hydraulic flushing technology to soft and outburst seam with low permeability[J]. Coal Science and Technology, 2012,40(2):52-55.

[2] 袁亮,林柏泉,杨威.我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J].煤炭科学技术,2015,43(1):

45-49.

YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43 (1): 45-49.

- [3] ERGULER Z A, ULUSAY R. Water-induced variations in mechanical properties of clay-bearing rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009,46(2):355-370.
- [4] 刘新荣,傅晏,郑颖人,等.水岩相互作用对岩石劣化的影响研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):77-82.
LIU Xinrong, FU Yan, ZHENG Yingren, et al. A review on deterioration of rock caused by water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1):77-82.
- [5] 熊德国,赵忠明,苏承东,等.饱水对煤系地层岩石力学性质影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(5):998-1006.
XIONG Deguo, ZHAO Zhongming, SU Chengdong, et al. Experimental study of effect of water-saturated state on mechanical properties of rock in coal measure strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011,30(5):998-1006.
- [6] 郭佳奇,徐子龙,李宏飞.饱水对岩溶灰岩力学性质与纵波波速的影响[J].土木建筑与环境工程,2015,37(2):60-66.
GUO Jiaqi, XU Zilong, LI Hongfei. Influence of water-saturated state on mechanical properties and longitudinal wave velocity of karst limestone [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015,37(2):60-66.
- [7] 朱朝辉,吴平,姚华彦,等.饱水-干燥循环和长期饱水砂岩劈裂试验[J].水电能源科学,2012,30(12):58-60.
ZHU Zhaohui, WU Ping, YAO Huayan, et al. Split test of sandstone under conditions of cyclic saturation-drying and long-term saturation[J]. Water Resources and Power, 2012,30(12):58-60.
- [8] BAUD P, ZHU W, WONG T F. Failure mode and weakening effect of water on sandstone[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2000, 105 (7): 16371-16389.
- [9] 逢焕东,张兴民,姜福兴.岩石类材料声发射事件的波谱分析[J].煤炭学报,2004,29(5):540-544.
PANG Huandong, ZHANG Xingmin, JIANG Fuxing. The spectrum analysis of acoustic emission signal in rock materials [J]. Journal of China Coal Society, 2004,29(5):540-544.
- [10] 纪洪广,王宏伟,曹善忠,等.花岗岩单轴受压条件下

声发射信号频率特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增刊 1):2900-2905.

JI Hongguang, WANG Hongwei, CAO Shanzhong, et al. Experimental research on frequency characteristics of acoustic emission signals under uniaxial compression of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(S1):2900-2905.

[11] 陈春谏,赵耀江,郭胜亮,等. 不同含水率煤岩声发射特性试验研究[J]. 煤矿安全,2018,49(5):40-42.

CHEN Chunjian,ZHAO Yaojiang,GUO Shengliang, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of coal with different moisture content [J]. Safety in Coal Mines,2018,49(5):40-42.

[12] 王笑然,刘晓斐,沈荣喜,等. 自然和饱水煤样受载破坏声发射特征实验研究[J]. 煤矿安全,2016,47(1):28-32.

WANG Xiaoran, LIU Xiaofei, SHEN Rongxi, et al. Experimental study on AE characteristics of natural and water-saturated coal in process of deformation and fracture[J]. Safety in Coal Mines,2016,47(1):28-32.

[13] 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 Yanbo, LIANG Peng, LIU Xiangxin, 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.

[14] 贾雪娜. 应变岩爆实验的声发射本征频谱特征[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.

JIA Xuena. Experimental study on acoustic emission eigen-frequency spectrum of strainbursts [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013.

[15] 刘希灵,王金鹏,李夕兵,等. 压缩与劈裂条件下矿岩声发射信号的频率特性[J]. 实验力学,2018,33(2):201-208.

LIU Xiling, WANG Jinpeng, LI Xibing, et al. On the frequency characteristics of ore's acoustic emission signal in uniaxial compression and brazilian splitting test[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(2):201-208.

[16] BENSON P M, VINCIGUERRA S, MEREDITH P G, et al. Laboratory simulation of volcano seismicity[J]. Science,2008,322(5899):249-252.