

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.05.010

砂岩单轴循环加卸载过程中 声发射信号特征与时空演化规律

孙爱琴¹, 胡明明¹, 华建兵¹, 高 阳², 陈家骥¹, 司大雄¹, 段园煜¹

(1. 合肥学院建筑工程系, 安徽 合肥 230601;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为深入研究循环荷载作用下岩石内部微裂纹萌生、发展及贯通的时空演化规律, 以砂岩为研究对象, 开展了砂岩在单轴循环加卸载下的声发射试验。结果表明: 借助不同方向的波速测试, 可获得声波在岩石中的传播速度, 为声发射定位提供合理的波速参数; 通过合理布置传感器的位置, 可准确定位破裂面的空间位置; 加卸载过程中声发射事件数和能量呈现台阶状上升, 表明声发射具有记忆效应; 通过声发射事件空间定位与破坏岩样的对比, 验证了两者的位置基本一致, 表明声发射可有效获得岩石内部微裂纹发展的全过程。

关键词: 声波测试; 声发射; 循环加卸载; 损伤演化; 砂岩; 空间定位; 微破裂; 岩体稳定性

中图分类号: TU45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2019)05-0462-06

Characteristics of acoustic emission signals and spatiotemporal evolution law in the process of uniaxial cyclic loading and unloading process of sandstone

SUN Aiqin¹, HU Mingming¹, HUA Jianbing¹, GAO Yang², CHEN Jiaqi¹, SI Daxiong¹, DUAN Yuanyu¹

(1. Department of Civil Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China;
2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: In order to reveal the spatiotemporal evolution regularities of the internal microcracks initiation, development and coalescence in rock under cycling loading, using sandstone as the research object, the acoustic emission tests of sandstone in uniaxial cyclic loading and unloading were carried out. The results show that: the propagation velocity of sound wave in rock can be obtained by the wave velocity test in different directions, which can provide reasonable velocity parameters for acoustic emission location; the space position of fracture plane can be accurately located by reasonably arranging the position of the sensor; the number of acoustic emission events and energy present a stepwise increase during the loading and unloading process, indicating that acoustic emission has memory effect; through the comparison between the space location of acoustic emission events and position of rupture surface in the rock sample, two positions are basically the same and the acoustic emission can effectively obtain the whole process of rock crack propagation. The results can provide important technical support for the rock mass stability analysis, which has an important value of engineering application.

Key words: acoustic wave test; acoustic emission (AE); cyclic loading and unloading; damage evolution; sandstone; spatial positioning; micro-fracture; rock mass stability

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划面上攻关项目(S201804a08020023)
作者简介: 孙爱琴(1972—),女,讲师,硕士,主要从事工程结构监测研究。E-mail:236049288@qq.com
通信作者: 胡明明,讲师。E-mail:mingcumt@163.com
引用本文: 孙爱琴, 胡明明, 华建兵, 等. 砂岩单轴循环加卸载过程中声发射信号特征与时空演化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 462-467.
SUN Aiqin, HU Mingming, HUA Jianbing, et al. Characteristics of acoustic emission signals and spatiotemporal evolution law in the process of uniaxial cyclic loading and unloading process of sandstone [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(5): 462-467.

岩土工程施工过程中,岩体会遇到循环载荷的作用,对岩体长期稳定性具有重要的影响,而声发射(acoustic emission, AE)作为一种研究岩石内部损伤的有效技术^[1-6],可以预测工程岩体的稳定状态。为更好地应用 AE 技术,学者们研究了岩样在不同条件下的声发特征^[7-13];乔兰等^[14]研究了岩石的裂隙初始应力、裂隙贯通应力和峰值应力以及与之对应的声发射特征,得到声发射参数与岩石破裂之间的关系;陈宇龙等^[15]获得了岩石轴向应力与轴向应变、横向应变、体应变之间的关系曲线,以及全应力-纵向应变过程曲线中 4 个阶段的声发射特征;艾婷等^[16]研究了三轴压缩和循环荷载作用等情况下的岩石 AE 特性;王笑然等^[17]研究了裂纹扩展关键特征点处声发射时-空-频-非线性响应及其加载速率效应;宋义敏等^[18-19]对单轴压缩条件下砂岩试件变形场演化及声发射主频特征进行了试验研究;王泽鹏等^[20]研究了粒度对砂岩在单轴压缩破坏过程的影响规律,并以此揭示了岩石破坏的微观机制;肖福坤等^[21]对粗砂岩和细砂岩进行单轴压缩、巴西劈裂和变角剪切试验,研究了裂纹扩展过程中的力学特性和声学特征。

以上研究在声发射信号的波速选取时一般采用断铅试验,没有考虑不同方向的波速传播特性,且很少涉及循环加卸载作用下的砂岩声发射信号特征及演化规律,本文采用不同方向的波速测试,采用平均波速作为声发射信号的波速值,提高了岩样破裂面空间定位的精度,为研究施工过程中岩体的损伤机制提供了依据。

1 基本原理

声发射检测技术是当外界应力状态改变造成材料内部结构相互作用产生声发射信号时,通过声发射检测仪器获得声发射信号来检测材料内部缺陷。由于所获得的声发射信号包含了丰富的缺陷演化信息,借此可分析受载过程中岩石损伤演化特征。声发射检测原理如图 1 所示,在外部荷载作用下,AE 源以弹性波的形式快速释放应变能,安装在材料表面的传感器通过耦合介质接收信号,然后通过前置放大器和信号采集处理系统对信号进行采集、处理。

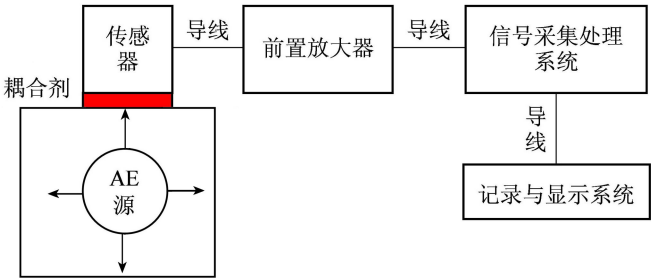


图 1 声发射检测原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of AE testing

2 试验过程

2.1 试验设备

试验设备主要由应力加载系统和声发射采集系统组成。应力加载系统为中国科学院武汉岩土力学研究所的 RMT 岩石力学试验系统,声发射采集系统采用美国物理声学公司(PAC)研制的 96 通道声发射系统。基于岩石声发射信号幅度范围、频率分布范围、噪声信号等因素的考虑,试验采用 PICO 型传感器,其特征曲线如图 2 所示,传感器尺寸为 $\varnothing 5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$,工作频率范围 200 ~ 700 kHz,共振频率 550 kHz。

2.2 岩样制备及试验方案

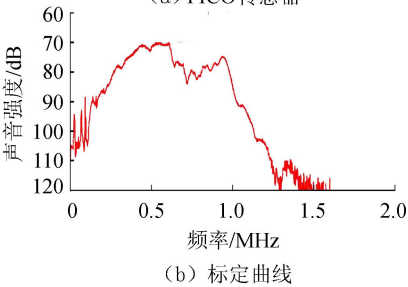
试验所选用岩样为砂岩,切割成 50 mm $\times$ 50 mm $\times$ 100 mm 的长方体标准试件,并进行打磨,精度控制:(a) 试件两端不平整度误差 $\leq 0.05\text{ mm}$;(b) 沿试件的高度,试件直径的误差不大于 0.3 mm;(c) 保证试件端面垂直于试件的轴线,最大偏差控制在 0.25° 以内;(d) 保证试件的平整度和完好性,试件边缘无缺角和掉块。

试验在 RMT 岩石力学试验系统下进行,采用力控制,分级加卸载,受力区间为 0 ~ 25 kN、5 ~ 50 kN、5 ~ 75 kN,每个受力区间循环 3 次,加卸载速率为 0.05 kN/s。声发射采用 PAC 研制的 AEwin 声发射采集系统,采集参数设置:门槛值为 40 dB,前放增益值为 40 dB,模拟滤波器下限为 1 kHz,模拟滤波器上限为 1 MHz,采样率为 1 MSPS,采样长度为 3 k。

试验步骤如下:(a) 准备工作。为减小声发射信号在接收过程中的能量损失,在声发射探头和试样之间涂一层凡士林作为耦合剂,然



(a) PICO 传感器



(b) 标定曲线

图 2 PICO 传感器及其标定曲线

Fig.2 PICO Sensor and its calibration curve

后将探头用胶带固定在试样上,最后将试件置于试验加载平台上,依次连接前置放大器、声发射采集系统。进行AST测试,检测各个声发射探头是否能正常工作,启动应力加载系统,检查加载系统能否正常工作。(b)试验与记录。加载试验与声发射采集试验同步进行,当试样破坏后同时停止采集。在试验过程中,观察仪器工作状态,记录试验过程中的现象。(c)试验结束后,保存试验数据,同时清理、规整试验仪器。

2.3 传感器布置及安装

传感器的布置对声发射源的空间定位有一定的影响,设传感器的位置坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,声发射源位置坐标为 (x_s, y_s, z_s) ,根据笛卡尔公式可得第 i 个传感器到发射源的距离为

$$d_i = vt_i = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2}$$
 (1)

式中: d_i ——声发射源距第 i 个传感器的距离; v ——波速; t_i ——信号传播到第 i 个传感器的时间。

由于事件所引起的绝对传播时间很难确定,因此所有的时间采用该事件传播到第 i 个传感器与第一个传感器的时间差表示。则式(1)变为

$$d_i = v(t_1 + \Delta t_i) = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2}$$
 (2)

式中: t_1 ——第1个传感器收到信号的时间; Δt_i ——第 i 个传感器与第1个传感器收到信号的时间差。

由式(2)可知,求解声发射源的位置坐标至少需要4个方程方可解出,故声发射空间定位至少需要4个传感器布置成一个不共面的空间,根据4个不共面的传感器获得的相对时间差,可以确定声发射源的坐标位置,即实现声发射的空间定位。

2.4 波速的确定

通过式(2)可知,传感器的位置坐标在空间布置时已经确定, Δt_i 可以通过声发射监测仪获得,因此波速 v 的合理取值对于声发射源的定位十分重要,而声发射源定位的精度直接影响围岩损伤位置及程度的判断。故在声发射试验前需确定岩样的波速,选取4块试样进行3个不同方向的声波测试,结果见表1。综合不同方向的波速测试结果取均值,得平均波速为2167 m/s。

表1 波速测试结果

Table 1 Results of wave velocity test

岩样编号	前后长度/mm	左右长度/mm	上下长度/mm	前后速度/(km·s ⁻¹)	左右速度/(km·s ⁻¹)	上下速度/(km·s ⁻¹)
A1	50.88	50.60	100.30	2.120	2.108	2.134
A2	50.52	50.90	100.22	2.197	2.213	2.279
A3	50.96	50.50	100.42	2.123	2.104	2.137
A4	50.52	50.90	100.22	2.197	2.213	2.179

3 结果分析

3.1 声发射事件率和能率

循环加卸载过程中的应力应变曲线如图3所示,结合声发射事件率和能率在加卸载过程中的变化规律(图4和图5),总体上表现为高应力水平下声发射事件率和能率明显高于低应力水平,声发射活动与应力水平呈正相关关系。在0~25 kN和5~50 kN受力区间内,声发射事件率和能率较低,且在较低的应力水平时,基本没有声发射事件产生;随着轴力的增加,在5~75 kN受力区间内,声发射事件率和能率显著增加,声发射活动较为活跃,表明此阶段微裂纹开始扩展;最后一级加载到破坏阶段,声发射事件率和能率达到最大,微裂纹最终贯通,形成宏观裂纹。

3.2 声发射总事件和总能量

从图6和图7可以看出,声发射总事件和总能量在加载过程中的变化规律基本一致,声发射事件数总体上呈台阶状上升,在0~25 kN和5~50 kN受力区间内,声发射事件和能量缓慢增加但事件数较少;随着轴力的增加,在5~75 kN受力区间内,曲线开始出现首个明显台阶

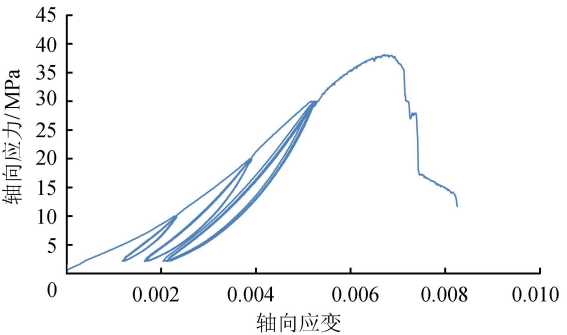


图3 应力应变曲线

Fig.3 Curve of stress and strain

状上升,上升明显阶段表明声发射活动较为活跃,主要集中在加载和卸载的相对高应力水平内,卸载和加载的相对低应力水平段呈现水平台阶,表明此阶段声发射活动处于相对平静阶段;最后一级加载,曲线斜率最大且增幅也最大,表明此阶段声发射活动最为活跃,裂纹的扩展与贯通主要在此阶段发生。

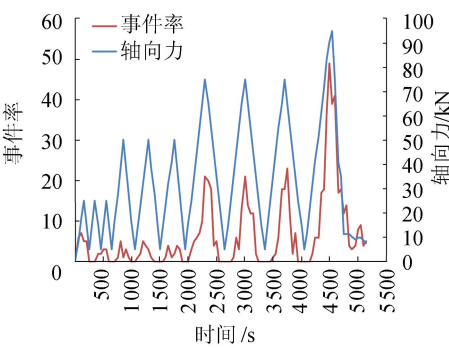


图 4 轴力和事件率随时间的变化规律

Fig. 4 Change law of axial force and event rate with time

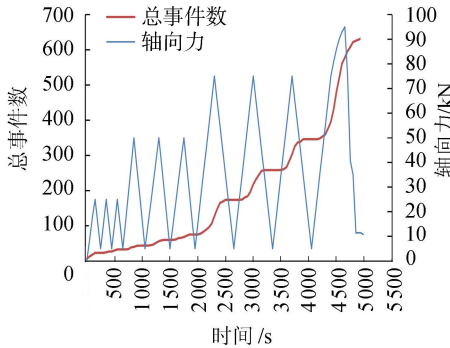


图 5 轴力和总事件数随时间的变化规律

Fig. 5 Change law of axial force and total event number with time

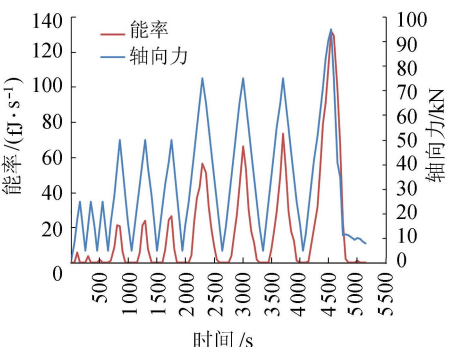


图 6 轴力和能率随时间的变化规律

Fig. 6 Change law of axial force and energy rate with time

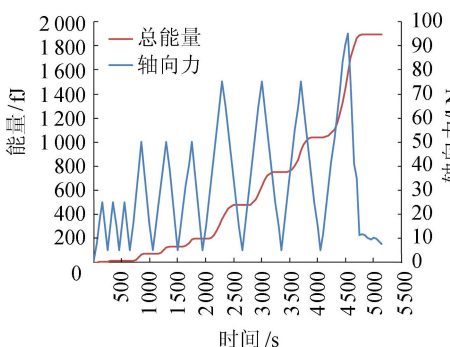


图 7 轴力和总能量随时间的变化规律

Fig. 7 Change law of axial force and total energy with time

3.3 声发射事件空间定位

图 8 是各级加卸载区间的声发射事件空间分布及破坏的岩样的对比。在 0 ~ 25 kN 受力区间内,产生的

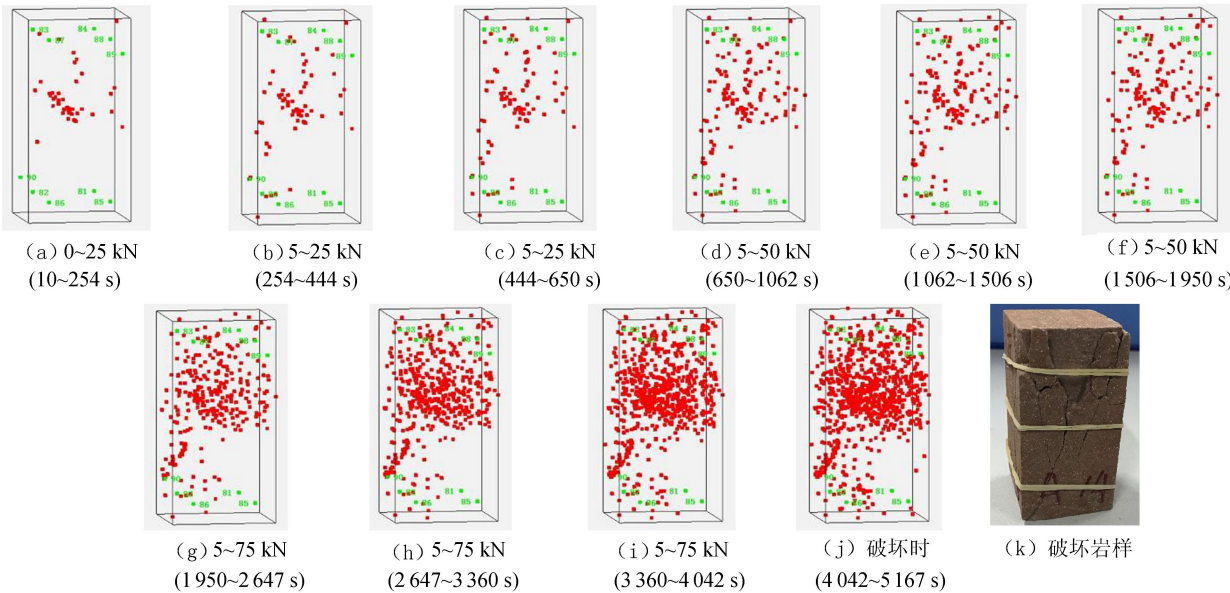


图 8 微破裂空间位置分布与岩样破坏的比照

Fig. 8 Spatial location distribution of microfracture compared with destructive rock samples

声发射事件较少且主要集中在试样的上半部分,随着轴力的增加,在5~50 kN 受力区间,产生的声发射事件开始增加且开始向试样下部扩展;在5~75 kN 受力区间,试样上部声发射事件急剧增多,且下部主要集中在试样的左侧;最后加载至试样破坏时,声发射事件主要集中在试样上部和左下角。从试样最后的破坏形态看,试样上部形成较严重的破碎区,左下角有一条倾斜的宏观裂纹,与声发射空间分布位置吻合度较高。因此,声发射的空间位置分布能较好地反映岩石受载过程中微裂纹的形成、扩展与贯通的时空演化规律。

4 结 论

- a. 借助不同方向波速试验,获得了不同方向的声波传播速度,为声发射空间定位提供了合理的波速参数。
- b. 分析讨论了传感器的选取与布置,提出了声发射源空间定位的方法,结果表明该方法可以定位破裂面的空间位置,提高了试验结果的可靠性。
- c. 声发射事件率与应力水平呈正相关关系,总体上表现为高应力水平下声发射事件率明显高于低应力水平。整个循环加卸载过程中,声发射事件数和能量呈现台阶状上升,表明声发射具有记忆效应,即高于特定应力时才发生声发射现象。
- d. 通过不同轴力区间的加卸载试验,验证了岩石破裂面的空间位置与声发射源空间分布位置基本一致,表明声发射空间定位能较好地反映岩石受载过程中微裂纹萌生、扩展与贯通的时空演化规律。

参考文献:

- [1] 李术才, 许新骥, 刘征宇, 等. 单轴压缩条件下砂岩破坏全过程电阻率与声发射响应特征及损伤演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 14-23. (LI Shucai, XU Xinji, LIU Zhengyu, et al. Electrical resistivity and acoustic emission response characteristics and damage evolution of sandstone during whole process of uniaxial compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 14-23. (in Chinese))
- [2] RODRÍGUEZ P, ARAB P B, CELESTINO T B. Characterization of rock cracking patterns in diametral compression tests by acoustic emission and petrographic analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 83: 73-85.
- [3] LIU Jianpo, LI Yuanhui, XU Shida, et al. Cracking mechanisms in granite rocks subjected to uniaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015, 75: 151-159.
- [4] ISHIDA T, KANAGAWA T, UCHITA Y. Acoustic emission induced by progressive excavation of an underground powerhouse[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 71: 362-368.
- [5] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 花岗岩破裂过程中声波与声发射变化特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(10): 1915-1923. (LI Haoran, YANG Chunhe, LIU Yugang, et al. Experimental research on ultrasonic velocity and acoustic emission properties of granite under failure process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 36(10): 1915-1923. (in Chinese))
- [6] 王岩, 王瑶, 路桂娟, 等. 变幅循环荷载下混凝土轴拉声发射特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 45-49. (WANG Yan, WANG Yao, LU Guijuan, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of concrete under variable amplitude cyclic tension loading[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014, 42(1): 45-49. (in Chinese))
- [7] 俞缙, 李宏, 陈旭, 等. 砂岩卸围压变形过程中渗透特性与声发射试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 69-79. (YU Jin, LI Hong, CHEN Xu, et al. Experimental study of permeability and acoustic emission characteristics of sandstone during processes of unloading confining pressure and deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 69-79. (in Chinese))
- [8] 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): 1-8. (JI Hongguang, LU Xiang. Experimental study on characteristics of acoustic emission and rock fracture precursors under conventional triaxial compression of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 1-8. (in Chinese))
- [9] 苏承东, 翟新献, 李宝富, 等. 砂岩单三轴压缩过程中声发射特征的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 225-230. (SU Chengdong, ZHAI Xinxian, LI Baofu, et al. Experimental study of the characteristics of acoustic emission for sandstone specimens under uniaxial and triaxial compression tests[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(2): 225-230. (in Chinese))

- [10] 徐子杰, 齐庆新, 李宏艳, 等. 不同应力水平下大理石蠕变损伤声发射特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊1): 70-74. (XU Zijie, QI Qingxin, LI Hongyan, et al. Marble creep damage and acoustic emission characteristics under different stress levels[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(Sup1): 70-74. (in Chinese))
- [11] 张黎明, 王在泉, 石磊, 等. 不同应力路径下大理岩破坏过程的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1230-1236. (ZHANG Liming, WANG Zaiquan, SHI Lei, et al. Acoustic emission characteristics of marble during failure process under different stress paths[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1230-1236. (in Chinese))
- [12] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 147-152. (LI Shulin, TANG Haiyan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 147-152. (in Chinese))
- [13] 李浩然, 杨春和, 刘玉刚, 等. 单轴荷载作用下盐岩声波与声发射特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 2107-2116. (LI Haoran, YANG Chunhe, LIU Yugang, et al. Experimental study of ultrasonic velocity and acoustic emission properties of salt rock under uniaxial compression load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10): 2107-2116. (in Chinese))
- [14] 乔兰, 王旭, 李远. 深部花岗闪长岩破坏过程声发射及特征应力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 2773-2778. (QIAO Lan, WANG Xu, LI Yuan. Study of acoustic emission and characteristic stress in deep granodiorite failure process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Sup1): 2773-2778. (in Chinese))
- [15] 陈宇龙, 魏作安, 许江, 等. 单轴压缩条件下岩石声发射特性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增刊2): 237-240. (CHEN Yulong, WEI Zuoan, XU Jiang, et al. Experimental research on the acoustic emission characteristics of rock under uniaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(Sup2): 237-240. (in Chinese))
- [16] 艾婷, 张茹, 刘建锋, 等. 三轴压缩煤岩破裂过程中声发射时空演化规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 2048-2057. (AI Ting, ZHANG Ru, LIU Jianfeng, et al. Space-time evolution rules of acoustic emission locations under triaxial compression [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12): 2048-2057. (in Chinese))
- [17] 王笑然, 王恩元, 刘晓斐, 等. 裂隙砂岩裂纹扩展声发射响应及速率效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1446-1458. (WANG Xiaoran, WANG Enyuan, LIU Xiaofei, et al. Macro-crack propagation process and corresponding AE behaviors of fractured sandstone under different loading rates [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1446-1458. (in Chinese))
- [18] 宋义敏, 邢同振, 赵泽鑫, 等. 红砂岩变形演化及声发射主频特征实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(增刊2): 362-368. (SONG Yimin, XING Tongzhen, ZHAO Zexin, et al. Experimental study on deformation evolution and acoustic emission dominant-frequency characteristics of red sandstone [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(Sup2): 362-368. (in Chinese))
- [19] 宋义敏, 邢同振, 赵同彬, 等. 岩石单轴压缩变形场演化的声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 534-542. (SONG Yimin, XING Tongzhen, ZHAO Tongbin, et al. Acoustic emission characteristics of deformation field development of rock under uniaxial loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 534-542. (in Chinese))
- [20] 王泽鹏, 顾义磊, 房局, 等. 粒度对砂岩力学及声发射特性的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊2): 705-714. (WANG Zepeng, GU Yilei, FANG Ju, et al. Research on damage mechanism and acoustic emission characteristics of sandstone with different granularity under loading [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(Sup2): 705-714. (in Chinese))
- [21] 肖福坤, 刘刚, 秦涛, 等. 拉-压-剪应力下细砂岩和粗砂岩破裂过程声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 3458-3472. (XIAO Fukun, LIU Gang, QIN Tao, et al. Acoustic emission(AE) characteristics of fine sandstone and coarse sandstone fracture process under tension-compression-shear stress [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup2): 3458-3472. (in Chinese))

(收稿日期:2018-11-28 编辑:刘晓艳)