

岩石三轴卸载-单轴再加载声发射特性及破坏模式

任恒¹, 朱永建^{1,2*}, 廖洪波³, 赵俊³, 吴寻云³

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

3. 四川川煤华荣能源有限责任公司 小河嘴煤矿, 四川 达州 635000)

摘要: 为了研究巷道开挖卸荷及回采扰动引起的围岩力学响应机制, 采用 RMT-150C 试验机开展白砂岩试件三轴加载-卸载-单轴再加载力学特性试验。基于损伤岩石单轴加载应力-应变曲线, 确定岩石破坏模式与卸荷点的联系。通过 AEwin 声发射系统采集岩石破坏过程中声发射幅值特征参数。结果表明: 初始损伤程度不同的岩石, 在单轴再加载过程中的破坏模式存在差异性, 表现出低损伤度下的脆性破坏、较高损伤度下的脆-延性破坏以及高损伤度下的延性破坏模式。建立不同破坏模式下声发射幅值与应变的耦合关系, 并验证了该耦合关系式的可靠性, 能合理反映砂岩巷道不同破坏阶段的变形特征。

关键词: 损伤岩石; 单轴再加载; 损伤因子; 声发射幅值; 破坏模式

中图分类号: TD322

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2022)03-0007-06

Acoustic Emission Characteristics and Failure Modes of Rock Under Triaxial Unloading Uniaxial Reloading

REN Heng¹, ZHU Yongjian^{1,2*}, LIAO Hongbo³, ZHAO Jun³, WU Xunyun³

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Xiaohезui Coal Mine, Sichuan Chuanmei Huarong Energy Co., Ltd., Dazhou 635000, China)

Abstract: In order to study the mechanical response mechanism of surrounding rock caused by roadway excavation unloading and mining disturbance, the RMT-150C testing machine is used to carry out the triaxial loading-unloading-uniaxial reloading mechanical characteristics test of white sandstone specimens. Based on the stress-strain curve of the damaged rock under uniaxial loading, the relationship between the rock failure mode and the unloading point is determined. The characteristic parameters of acoustic emission amplitude in the process of rock failure are collected by AEwin acoustic emission system. Results show that with the increase of the initial damage degree of rock, there are differences in rock failure modes during uniaxial reloading, which show brittle failure under low damage degree, brittle ductile failure under high damage degree, and ductile failure mode under high damage degree. The coupling relationship between AE amplitude and strain under different failure modes is established. After verification, the relationship is reliable, and it can reasonably reflect the deformation characteristics of sandstone roadway in different failure stages.

Keywords: damaged rock; uniaxial reloading; damage factor; acoustic emission amplitude; failure mode

收稿日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774130; 52174110); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30273); 湖南省研究生教育创新资助项目(CX20200985)

* 通信作者, E-mail: yjzhu@hnust.edu.cn

巷道开挖前岩石处于压缩状态,由于环境差异,岩石受压程度不尽相同,导致岩石受到不同程度的损伤弱化.深部高应力是引起巷道大变形的主要原因,巷道开挖后,岩石三向应力平衡结构破坏,应力重新分布,直至达到二次平衡结构.巷道开挖过程中,围岩受力状态大致可以分为三向加载-围压卸载-轴向加载阶段^[1].岩石是岩体的基本组成单元,在自然界中岩石存在微裂隙、粒间空隙等缺陷,由于内部细观结构极其复杂,在不同的应力条件下,岩石宏观破坏特征千差万别^[2-3].针对岩石力学特性及破坏特征,众多学者从不同物化状态^[4-5]、不同岩性^[6-8]、不同应力路径^[9-10]等方面进行了系统研究.例如,邱士利等^[11]通过应变围压柔量分析卸围压速率对岩石变形规律的影响,研究了扩容过程的演化规律和强度特征的差异;李地元^[12]对花岗岩进行3种不同应力路径下三轴加卸载试验,通过应力-应变曲线分析了岩石破坏特征、变形特征及强度特征.岩石加载过程中原始裂隙扩展、新生裂隙萌发、断裂都会伴随能量的释放,这种以弹性波形式释放能量的现象称为声发射,因此声发射与岩石力学响应存在着密切的内在联系.国外学者^[13-14]早在1987年—1997年就将脆性材料损伤与声发射联系到一起,并进行深入研究,提出了评估岩石损伤程度与强度的经验公式.国内学者^[15-17]也从应力-应变曲线与声发射参数的关系方面对岩石损伤破坏演化特征进行了深入研究.例如,周家文等^[18]研究了砂岩单轴重复加卸载的应力-应变曲线特征以及峰值强度和断裂力学损伤特性,提出了基于应力-应变曲线计算损伤变量的方法;张国凯等^[19]通过研究岩石加载过程中裂纹体积应变、声波及声发射特征,定量分析了岩石损伤演化过程.

以上研究对我们认识损伤岩石的力学特性及破坏特征具有重要意义,但主要集中在不同卸围压速率、单轴重复加卸载、不同应力路径等方面,对岩石损伤后再加载过程的力学特性演化规律研究比较少.巷道开挖后,浅表围岩侧向约束随时间推移不断释放直至可以忽略,围岩主要受顶板自重以及底板支撑作用,呈现出单向应力状态,损伤后的岩体继续受力直至破坏失稳,这是导致巷道大变形的主要力学机制.因此,研究损伤后的岩石单轴再加载强度弱化与结构破坏是非常有意义的,可为巷道支护设计提供参考和理论指导.

1 试验步骤及方法

1) 岩石试件峰值强度测试

本试验加载仪器为湖南科技大学 RMT-150C 岩石力学伺服系统,如图 1a 所示.任取 3 个标准试件进行三轴加载,选取力(大)-行程加载方式,围压终点为 15 MPa,围压与轴压都以 0.02 kN/s 的速率同时加载,直至试件破坏.将 3 个岩石试件强度峰值的平均值作为峰值强度.

2) 制备损伤岩石

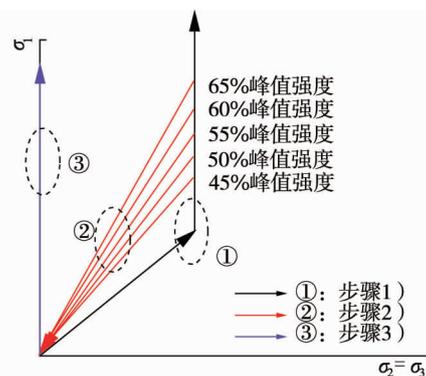
围压终点设置为 15 MPa,轴压终点设置为 45%, 50%, 55%, 60%, 65% 的峰值强度,加载方式同步步骤 1).待轴向压力加载至预设值,卸载轴压和围压,由此得到的试件被定义为损伤岩石试件.

3) 损伤岩石单轴再加载声发射测试

对步骤 2) 中每一个损伤试件进行单轴加载试验,轴压加载速率均为 0.02 kN/s,采用 AEwin 声发射系统采集岩石破坏过程中声发射数据.操作步骤如图 1b 所示.



(a) 试验设备



(b) 试验步骤

图 1 试验设备及试验步骤

4) 对比试验.

取3个标准试件进行直接单轴加载试验,加载速率为0.02 kN/s,并采集加载过程声发射参数.

2 不同破坏模式状态下岩石声发射幅值特征

2.1 破坏模式分类

早在1960年就有学者对单轴压缩下的岩石破坏模式进行分类^[17],根据应力-应变曲线及应变大小,将岩石破坏模式分为脆性破坏模式、脆-延性破坏模式、延性破坏模式.岩石在单轴加载状态下,应变小于1%且达到峰值强度后应力-应变曲线瞬间跌落叫作脆性破坏;应变处于1%~2%且达到峰值强度后应力-应变曲线出现波动,随后瞬间跌落叫作脆-延性破坏;应变处于1%~5%且具有完整的应力-应变曲线叫作延性破坏.

基于上述分类定义,结合本次试验的岩石应力-应变曲线(如图2所示),可以看出:白砂岩试件未受到三轴加载损伤时,单轴加载状态下破坏模式为脆-延性破坏;在不同程度的三轴加载过程后,白砂岩试件单轴再加载破坏模式发生转变.白砂岩试件在50%的峰值强度三轴加载后,单轴再加载状态下应变小于1%,并且在达到峰值强度后应力-应变曲线瞬间跌落,由脆-延性破坏模式转化为脆性破坏模式;在45%,55%,60%的峰值强度三轴加载后,白砂岩试件为脆-延性破坏模式;在65%的峰值强度三轴加载后,白砂岩试件为延性破坏模式.这说明岩石破坏模式与加载历史有关.

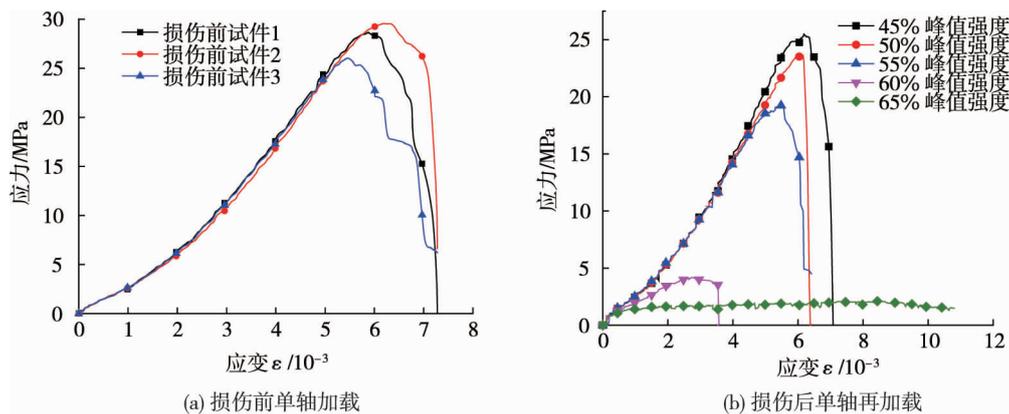


图2 岩石损伤前后应力-应变曲线

2.2 岩石声发射幅值特征

岩石的破坏过程常常伴随着声发射现象的发生,声发射幅值作为重要的特征参数之一,其演化规律与岩石破坏存在紧密的内在联系.因此,绘制幅值 E 、应力 σ 与应变 ε 的关系曲线,如图3所示.从图3中可以看出不同破坏模式下的岩石在加载过程中声发射幅值演化规律.

1) 脆性破坏模式下的岩石,如50%的峰值强度三轴加载后的白砂岩,其声发射幅值变化可以分为4个阶段:①显著增加阶段.加载初期,岩石空隙裂纹被压密,声发射现象比较明显.②缓慢增长阶段.在这一阶段,岩石处于弹性变形至微弹性裂隙稳定发展阶段,声发射活动稳定缓慢增长.③快速增长阶段.岩石加载至屈服应力时,微裂隙发展达到极限,裂纹不断扩展、贯通,出现明显裂纹,声发射现象极为剧烈.④平静期阶段.岩石破坏后,应力瞬间跌落,声发射现象进入平静期,声发射现象消失.

2) 脆-延性破坏模式下的岩石,如45%,55%,60%的峰值强度三轴加载后的白砂岩,其声发射幅值变化可以分为2个阶段:①缓慢增长阶段.在应力达到屈服应力前,声发射幅值缓慢增长,缓慢增长时间有差异,与加载历史有关,但是没有明显的规律性.②快速增长阶段.应力超过屈服点,声发射活动极为明显,岩石塑性特征明显.

3) 延性破坏模式下的岩石,如65%的峰值强度三轴加载后的白砂岩,其声发射幅值变化可以分为3个阶段:①第一平静期.类似于脆性破坏模式下的第一阶段,声发射活动不明显,增长极缓慢.②快速增长

阶段.在此阶段,岩石内部裂隙扩展、贯通,微裂隙转化为宏观裂纹,加上岩块间摩擦作用,声发射活动活跃,幅值快速增长.③第二平静期.加载应力达到岩石峰值强度时,岩石出现塑性流变性质,声发射现象进入第二次平静期.

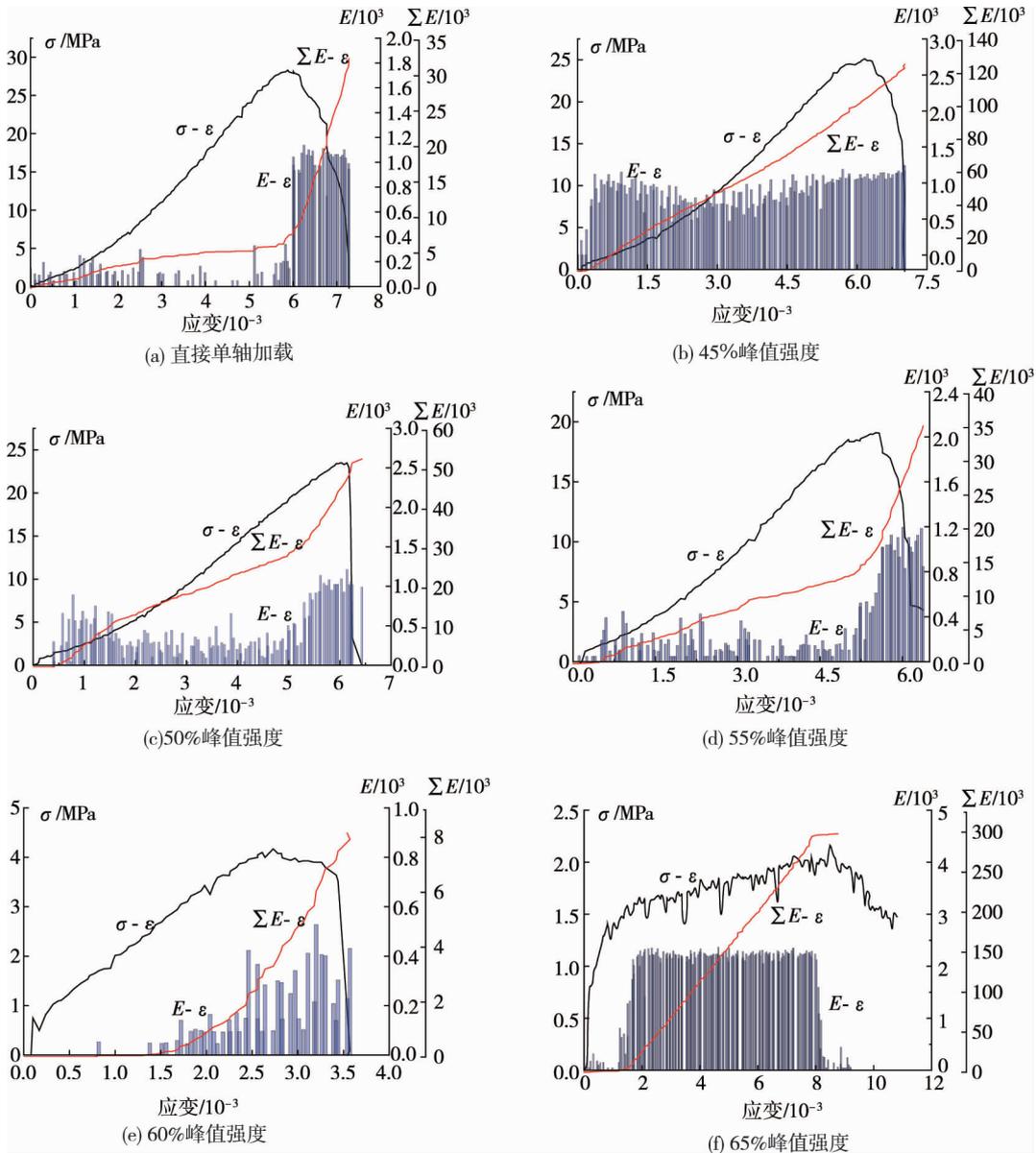


图3 不同破坏模式下岩石声发射幅值、应力与应变的关系

2.3 不同破坏模式岩石声发射幅值与应变的耦合关系

此次岩石试件在 RMT-150C 试验机上进行压缩试验,在压缩过程中采用位移加载控制,因此位移与时间存在线性关系,应变 ε 与时间 t 的关系可用一次函数表示为

$$\varepsilon = kt + \varepsilon_0. \tag{1}$$

式中: k 为比例系数,是一个常数; ε_0 为初始应变,从试验数据中可以得到.

通过拟合声发射幅值与时间 t 的关系曲线,发现不同破坏模式下岩石声发射幅值与时间的函数关系存在差异,选取脆性破坏模式、脆-延性破坏模式、延性破坏模式的岩石试件进行分析,如图 4 所示.

对于不同损伤程度的岩石试件,单轴再加载过程中声发射幅值 y 与时间 t 的函数关系可分为 3 类.

第 1 类:脆性破坏模式.根据试验数据散点图(图 4a),可以将声发射幅值与时间的关系用一阶指数函数表示,即

$$y = A\exp[B/(t + C)]. \tag{2}$$

式中: A, B, C 由试验数据拟合确定.

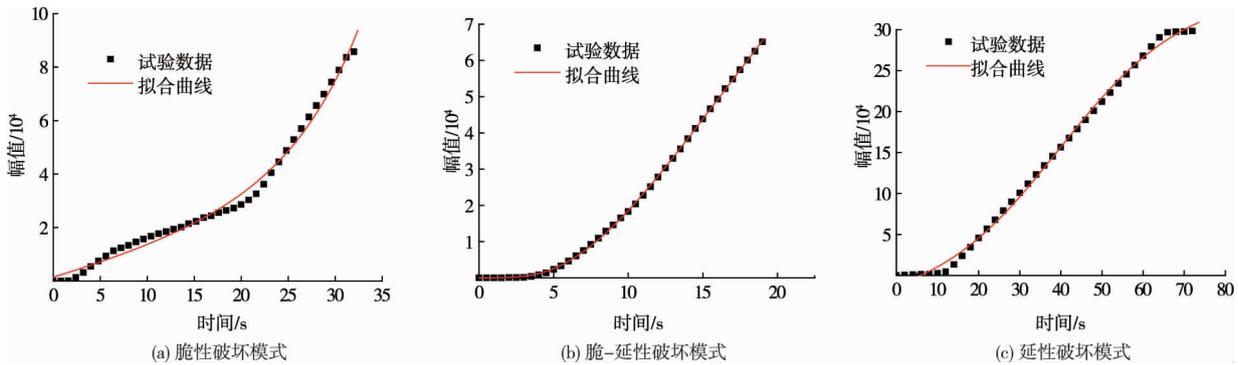


图 4 不同破坏模式下声发射幅值与时间的关系

联立式(1)与式(2),建立脆性破坏模式声发射幅值与应变的耦合关系为

$$y = A \exp[Bk/(\varepsilon - \varepsilon_0 + kC)]. \tag{3}$$

第 2 类:脆-延性破坏模式.根据试验数据散点图(图 4b),可以将声发射幅值与时间的关系用三阶指数函数表示,即

$$y = A_1 \exp(-t/B_1) + A_2 \exp(-t/B_2) + A_3 \exp(-t/B_3) + y_0. \tag{4}$$

式中: $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, y_0$ 由试验数据拟合确定.

联立式(1)与式(4),建立脆-延性破坏模式声发射幅值与应变的耦合关系为

$$y = A_1 \exp[-(\varepsilon - \varepsilon_0)/kB_1] + A_2 \exp[-(\varepsilon - \varepsilon_0)/kB_2] + A_3 \exp[-(\varepsilon - \varepsilon_0)/kB_3] + y_0 \tag{5}$$

第 3 类:延性破坏模式.根据试验数据散点图(图 4c),可以将声发射幅值与时间的关系用 S 型函数表示,即

$$y = A_5 + (A_4 - A_5) / (1 + \exp \frac{t - B_2}{C_1}). \tag{6}$$

式中: A_4, A_5, B_2, C_1 由试验数据拟合确定.

联立式(1)与式(6),建立延性破坏模式声发射幅值与应变的耦合关系为

$$y = A_5 + (A_4 - A_5) / \left(1 + \exp \frac{\varepsilon - \varepsilon_0 - kB_2}{kC_1} \right). \tag{7}$$

为了验证所建立的不同破坏模式下声发射幅值与应变的耦合关系的可靠性,对比试验数据与拟合数据,绘制图 5.由图 5 可以看出拟合数据与试验数据比较接近,说明不同破坏模式下声发射幅值与应变的耦合关系式具有一定的参考意义.

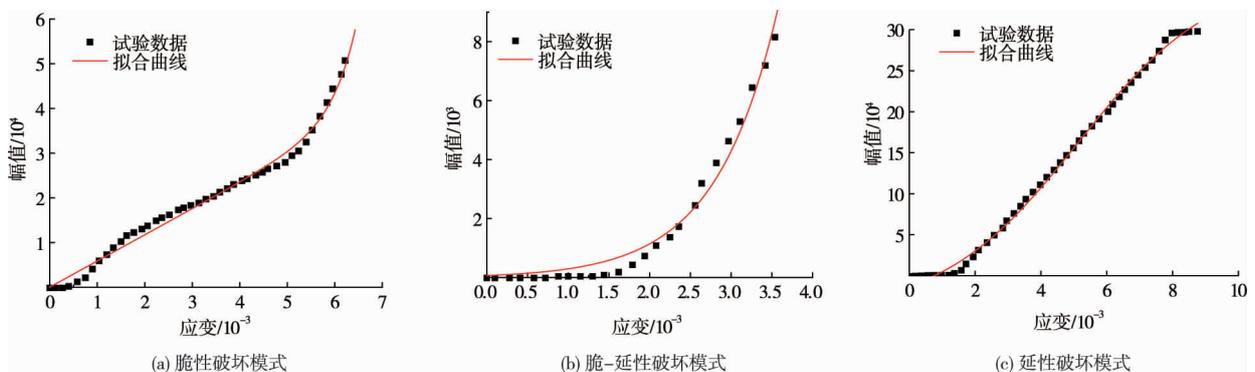


图 5 不同破坏模式下声发射幅值与应变的拟合关系

3 结论

1) 损伤后的砂岩试件单轴再加载破坏模式发生转变,存在脆性破坏、脆-延性破坏及延性破坏3种破坏模式,岩石破坏模式与加载历史有关.

2) 不同破坏模式下岩石加载过程中声发射幅值演化规律存在分段式发展,损伤程度越高,声发射幅值进入活跃阶段更为快速.

3) 不同破坏模式下声发射幅值与应变的耦合关系模型,量化了应变与声发射幅值的对应关系,可反映砂岩巷道不同破坏阶段的变形特征.

参考文献:

- [1] 朱永建,任恒,王平,等.损伤石灰岩单轴再加载力学特性及破坏机理[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(11):119-126.
- [2] REN H, ZHU Y J, WANG P, et al. Experimental study on mechanical characteristics of unloaded damaged white sandstone before peak[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(17): 395-406.
- [3] 侯公羽,梁金平,周蒙辉,等.卸荷速度对围岩变形影响的试验研究[J].煤炭学报,2019,44(4):1011-1019.
- [4] 夏冬,杨天鸿,王培涛,等.干燥及饱和岩石循环加卸载过程中声发射特征试验研究[J].煤炭学报,2014,39(7):1243-1247.
- [5] 张艳博,梁鹏,孙林,等.单轴压缩下饱水花岗岩破裂过程声发射频谱特征实验研究[J].岩土力学,2019,40(7):2497-2506.
- [6] 杨小彬,韩心星,刘恩来,等.循环加卸载下花岗岩非均匀变形演化的声发射特征试验研究[J].岩土力学,2018,39(8):2732-2739.
- [7] 杨小彬,韩心星,刘恩来,等.单轴循环加卸载岩石非均匀变形演化特征[J].煤炭学报,2018,43(2):449-456.
- [8] 包春燕,姜谔男,唐春安,等.单轴加卸载扰动下石灰岩声发射特性研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(s2):3871-3877.
- [9] 李庶林,周梦婧,高真平,等.增量循环加卸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.
- [10] 任恒,朱永建,王平,等.白砂岩试件初始损伤后再加载力学特性试验分析[J].矿业工程研究,2019,34(1):23-29.
- [11] 邱士利,冯夏庭,张传庆,等.不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1807-1817.
- [12] 李地元,孙志,李夕兵,等.不同应力路径下花岗岩三轴加卸载力学响应及其破坏特征[J].岩石力学与工程学报,2016,35(s2):3449-3457.
- [13] OHTSU M. Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic applications[J]. Journal of Acoustic Emission, 1987, 6(2): 99-108.
- [14] DAI S T, LABUZ J F. Damage and Failure Analysis of Brittle Materials by Acoustic Emission[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 9(4): 200-205.
- [15] 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.
- [16] 邓绪彪,刘远征,邢矿,等.基于声发射时空演化的岩石全应力-应变曲线阶段特征分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(s2):4086-4099.
- [17] 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.
- [18] 周家文,杨兴国,符文熹,等.脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(6):1172-1183.
- [19] 张国凯,李海波,王明洋,等.岩石单轴压缩下损伤表征及演化规律对比研究[J].岩土工程学报,2019,41(6):1074-1082.