

不同加载速率下砂岩巴西劈裂声发射试验研究

陈珂¹, 赵伏军^{1,2}, 张柏¹, 朱卓慧^{1,2}, 张孟举¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 利用 RMT-150C 电液伺服刚性试验系统和 PAC 声发射信号采集系统, 对典型砂岩在巴西劈裂条件下变形破坏全过程的声发射特征以及不同加载速率对其的影响进行研究. 试验结果表明: 声发射特征与各变形阶段其内部结构损伤信息的变化是相对应的, 声发射参数可表征岩石拉伸破坏微观结构损伤和演化; 随着加载速率的增大, AE 振铃率和 AE 能量率都随之增大, 峰值处释放的 AE 能量最大值呈递增趋势, 而 AE 累积能量呈递减趋势, 这可能与加载时间有关; 砂岩的抗拉强度随加载速率的增大而增大, 同步监测 AE 能量峰值亦随加载速率的提高呈上升趋势, 不同加载速率下 AE 能量峰值的变化能够反映岩石的抗拉能力.

关键词: 砂岩; 巴西劈裂; 声发射; 加载速率

中图分类号: TU459

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2015)02-0037-06

Experimental research on acoustic emission of Brazilian split sandstone under different loading rate

CHEN Ke¹, ZHAO Fujun^{1,2}, ZHANG Bai¹, ZHU Zhuohui^{1,2}, ZHANG Mengju¹

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

2. Hunan University of science and technology, Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The characteristics of acoustic emission in the procedure of deformation and failure of sandstone and effect of different loading rates are studied experimentally under Brazilian split by using PAC acoustic emission acquisition system and RMT-150C electro-hydraulic servo rigidity test system. Results show that the change corresponds with acoustic emission characteristics of each deformation stage and internal structural damage information of sandstone. The microstructure damage evolution of the rock tensile failure under different loading rates can be studied based on acoustic emission characteristics parameters. The AE ringing rate and AE energy rate of sandstone under Brazilian split increases with the increase of loading rates, as well as the maximum AE energy of peak increases with increasing loading rates. The total acoustic emission energy decreases with the increase of loading rates, which may be related to the loading time. The tensile strength of sandstone and AE energy peak of the synchronous monitoring increases with the loading rate, and the tensile strength of rock can be reflected by the change of AE energy peak under different loading rates.

Key words: sandstone; Brazilian split; acoustic emission; loading rate

岩石材料受外力作用, 原有裂纹缺陷区发生微观变形或屈服, 内部结构裂纹扩展, 其裂纹扩展的过程同时也是应力松弛并快速释放储存在岩石内部分能量的过程, 并以弹性波的形式表现出来, 这种以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射 (Acoustic Emission, AE)^[1]. 自声发射运用到岩石力学领域以来, 国

收稿日期: 2015-02-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51474103), 湖南省自然科学基金资助项目 (2015JJ2070)

通信作者: 赵伏军 (1963-), 男, 湖南衡山人, 博士, 教授, 研究方向: 岩石力学. E-mail: zfvjxxn@263.net

内外岩石力学领域许多学者也对不同载荷作用下岩石破裂过程中的声发射活动进行了大量理论分析及实验研究,取得了丰硕的成果^[2-5]. 众所周知,岩石是一种复杂的地质材料,其形成过程、矿物成分及组成结构随历史环境的变迁而不尽相同,这就体现了岩石受力特征和破坏机理的复杂性. 因此,在进行不同岩石声发射试验时,破裂过程中声发射特点具有差异性. 目前,许多学者大多数都是在单轴、双轴以及其他条件下进行的岩石的声发射的实验和理论研究^[6-9],对其加载速率下岩石劈裂的声发射特性影响研究相对比较少^[10,11]. 岩石的抗拉强度远小于抗压强度,但其抗拉性在岩土工程中的重要性不言而喻,许多工程中尤其是矿山开采及其隧道开挖(或“开凿”)等地下工程的围岩稳定性就与拉应力密切相关. 因此,针对岩石拉应力破裂过程声发射特性的研究具有十分重要的意义.

本文在前人实验研究的基础上,进行典型砂岩巴西劈裂的声发射试验,研究不同加载速率下劈裂砂岩声发射演化过程中声发射振铃计数、声发射振铃计数率、声发射能量及能率的变化规律,以期在加载速率影响岩石劈裂声发射特征研究方面做一些有益的尝试.

1 试验条件及方法

1.1 试验设备

利用中国科学院武汉岩土力学研究所研制的 RMT-150C 电液伺服刚性试验机进行巴西圆盘劈裂试验,对试验全过程跟踪记录荷载、应力和应变. 声发射检测仪器采用美国物理声学公司(PAC)生产的 AEwin-USB 型声发射检测系统. 该仪器可自动记录声发射事件数、能量、方便储存声发射的波形,最大通道数为 10,频率范围为 1~5 000 kHz,A/D 采样率最大可达每秒采集 10 M 采样点,模拟滤波器为内置模块,与计算机接口为通用的 USB 接口,使用方便. 试验系统如图 1.



(a) RMT-150C 试验系统



(b) AEwin-USB 声发射检测系统

图 1 砂岩巴西劈裂声发射试验系统

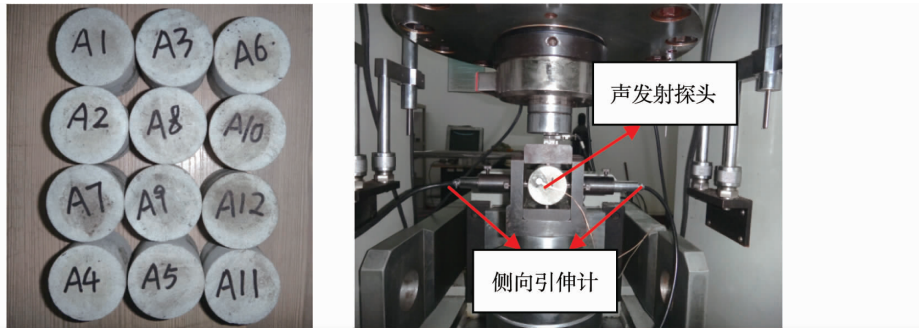
1.2 试验准备及方法

试验试样选用完整性和均质性较好的砂岩作为研究对象. 按照《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266-99)的要求,对试样进行加工、切割、打磨,其平行度和垂直度均在标准要求范围之内. 试件尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,如图 2(a)所示.

为研究砂岩受不同加载速率影响下破裂过程中声发射信号变化规律,将砂岩分为 3 组,每组 3 个岩样,分别在 RMT-150C 岩石力学试验系统上进行不同速率下的巴西劈裂试验. 考虑到试验机的性质、规范要求和砂岩本身的力学性能,采用小力压头,压力传感器的测量范围为 0~100 kN,巴西劈裂试验加载方式采用力的控制方式,加载速率分别设定为 0.01,0.02,0.05 kN/s,巴西劈裂加载装置如图 2(b)所示. 第一组:加载速率 0.01 kN/s,试样编号 A1,A3,A6;第二组:加载速率 0.02 kN/s,试样编号 A4,A5,A11;第三组:加载速率 0.05 kN/s,试样编号 A2,A8,A10. 补充说明其余一组试样作为备用,防止在加工过程中对试样内部结构的损伤,导致试验结果出现较大的离散性.

试样声发射信号采用双通道进行采集,声发射探头耦合在试样表面,探测试样受载过程中产生的声发射信号,其感应频率为 10~10⁶ kHz. 为保证试样受载过程中 AE 信号传输的准确性,对试样轴心方向的两端与探头贴合的地方用细砂纸打磨,在声发射探头上涂抹适量耦合剂,用橡胶带将探头固定在试样上,使其紧密贴合,然后在试样与传感器贴合附近进行断铅实验,检查是否耦合良好. 将安装好的试样放置于试验机压力台,首先进行预加载,启动声发射采集系统,调整声发射信号接收的阈值,最大限度的降低外界

噪音和 RMT - 150C 试验机本身的震动造成的干扰. 声发射信号经放大后被送至声发射仪进行记录,同时对储存的声发射波形进行分析、变换之后,得到岩石在受载过程中 AE 能量、AE 振铃计数及其变化率随时间 - 应力的变化曲线.



(a) 试样 (b) 试样加载及声发射采集装置图

图 2 试样与试验加载状态

2 试验结果分析

2.1 砂岩间接拉伸应力 - 应变曲线过程中声发射特点

岩石的抗拉强度远小于抗压强度. 在压缩或拉伸状态下, 岩石破裂全过程的应力 - 应变曲线均可分为 4 个阶段: 裂隙压密阶段(OA)、弹性变形阶段(AB)、裂纹扩展阶段(BC)及非稳定破裂阶段(CD). 砂岩(A5)巴西劈裂荷载作用下的应力 - 应变曲线如图 3. 岩石破裂过程的每个阶段所表现出来的特征都是岩石内部信息各个阶段的反馈, 因而每个阶段所体现的声发射信号特征也各有特点. 如图 4 所示, 试验过程中, 同步监测 AE 振铃计数、AE 振铃率、AE 累积能量及其能量率.

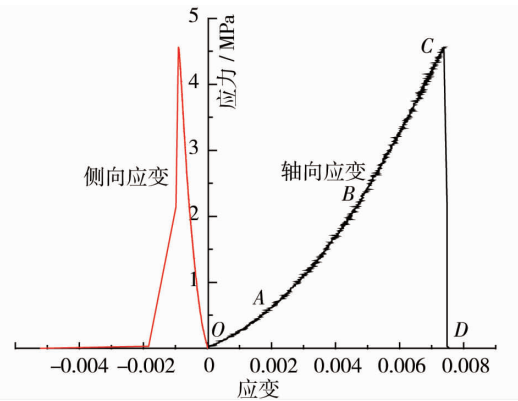


图 3 砂岩(A5)应力 - 应变曲线

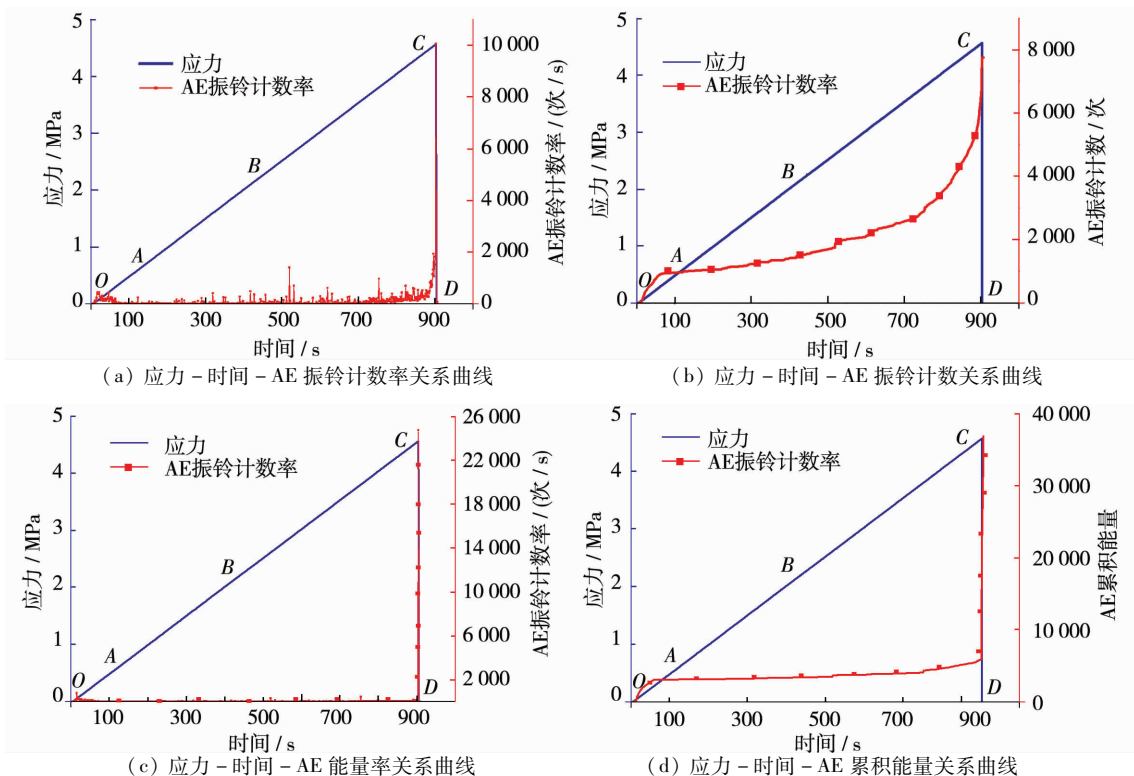


图 4 砂岩(A5)拉伸应力 - 声发射特征曲线

1) 裂隙压密阶段(OA),即声发射初始应力水平阶段.试样初始声发射信号应力水平约为抗拉强度的15%,试样开始受加载钢丝垫条的影响,接触部位易产生应力集中,使该区域首先产生软弱面或破坏,导致加载开始即在应力集中区域出现较多声发射活动,此时随着应力的增加,试样内部微小裂隙或节理面压密闭合,有较小的声发射信号产生,又由于岩石各向异性及本身复杂结构的原因,此阶段声发射计数和能量有一个较小的增幅,应力持续增加,声发射信号趋于平稳.

2) 弹性阶段(AB),即声发射稳定阶段.试样原有微裂隙已被压密,处于弹性压缩变形,无新裂纹产生,此时声发射特点是振铃计数很少,能量极低甚至没有.

3) 裂纹扩展阶段(BC),即声发射增加阶段.声发射信号应力水平约超过抗拉强度50%时,试样内部裂纹产生新的扩展,声发射信号突增,AE振铃计数和AE能量出现小阶段性的增长,并随应力逐渐增加呈持续增长的趋势,此阶段产生声发射信号比较频繁、幅度比较高.

4) 非稳定破裂阶段(CD),即声发射突增阶段.对应应力水平达到抗拉强度的90%~95%时,试样内储存的能量超过了维持裂纹稳定扩展所需的能量,随着裂纹的持续扩展,岩石内部软弱面越来越多,致使储存的能量瞬间释放,更加剧了裂纹扩展速度,试样瞬间破断,应力水平近乎垂直下降为零,声发射信号出现急剧增长.

上述结果表明,岩石巴西劈裂作用下声发射特征与各个阶段其内部结构损伤信息的变化是相对应的.因此,可结合声发射试验研究岩石拉伸破坏的应力状态.

2.2 加载速率对砂岩劈裂声发射的影响

加载速率是影响岩石力学性质的重要因素之一^[12].不同的加载速率下,岩石声发射活动的特征也是分析岩石内部结构损伤演化的重要指标.通过3种不同加载速率对砂岩试样巴西劈裂试验,所获各速率下砂岩抗拉强度及声发射特征参数汇总如表1和图5(0.01 kN/s),图6(0.02 kN/s),图7(0.05 kN/s)所示.

1) 分析图5~图7中不同加载速率砂岩的声发射信号演化规律,整体受载阶段声发射产生趋势基本一致,都体现了砂岩巴西劈裂条件下应力-应变曲线4个阶段的声发射特点.由图5和图7可以看出,加载速率由0.01 kN/s增加到0.05 kN/s时,初始应力阶段声发射信号产生的时间相对提前约28 s,整个试验过程振铃计数率和能量率都相对比较活跃.

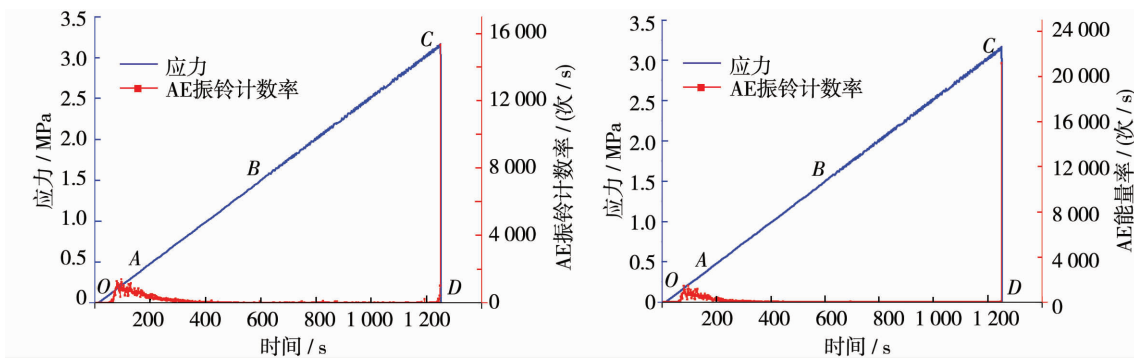
2) 对比分析图5~图7并结合表1试验结果,AE振铃率和AE能量率都随加载速率的增加而增加.产生该结果的原因是加载速率的差异,使试样微裂纹扩展的速度发生了变化,加载速率愈高,施载过程中试样内部结构吸收能量愈快,高倍能量释放提高了裂纹扩展的速度,相应的声发射率也越大,监测到AE平均能量峰值也趋于增大,同时说明了试样的损伤演化是伴随能量释放的过程.

3) 从图5~图7可以看出,释放最多AE能量均是在应力峰值破坏处,如表1所示.随着加载速率的增加,峰值处释放的AE能量最大值呈递增趋势,而AE累积能量则呈递减趋势.这是由于较快的加载速率,使岩石受载过程吸收能量的速度比能量释放的速度要快,在达到应力峰值前岩石储存的能量已经远远大于相同时间内释放的能量值,从而在应力极限破断时有较高的能量释放出来,反之亦然.由于加载速率不同,砂岩每级速率达到破坏的时间相互之间相差500 s左右,也是AE累积能量递减的原因之一,具体情况还有待进一步研究.

4) 分析表1试验结果,当砂岩试样的加载速率从0.01 kN/s增加到0.02 kN/s时,其抗拉能力提高15.6%,AE能量峰值平均值增加57.2%.在第三组试样采用0.05 kN/s的加载速率时,相比第二组试样砂岩抗拉能力提高32.6%,AE能量峰值平均值增加29.1%.试验结果表明,砂岩的抗拉强度随加载速率的增大而增大,同步监测AE能量峰值亦随加载速率的提高呈上升趋势,不同加载速率下AE能量峰值的变化能够反映岩石的抗拉能力.

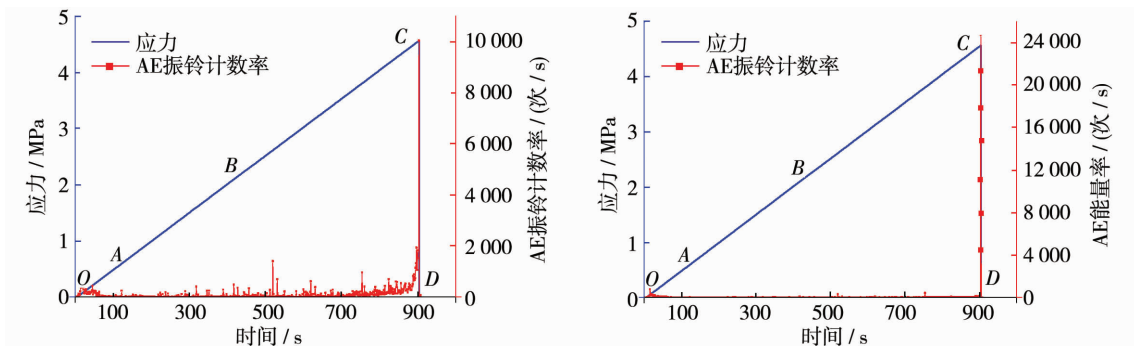
表 1 不同加载速率砂岩拉应力及声发射参数试验结果

试样	加载速率 /(kN/s)	抗拉强度 /MPa	拉应力平均值 /MPa	AE 能量/(次/s)		AE 累积能量		
				峰值/平均值	峰值/平均值	峰值/平均值	峰值/平均值	
第一组	A1	3.12		13 932		108 175		
	A3	0.01	3.16	3.44	21 175	17 269	111 959	105 582
	A6		4.05		16 701		96 614	
第二组	A4	3.55		30 452		64 462		
	A5	0.02	4.56	3.98	24 904	27 163	66 868	62 887
	A11		3.82		26 134		57 331	
第三组	A2	5.43		32 446		62 438		
	A8	0.05	5.71	5.28	37 987	35 070	49 299	52 307
	A10		4.69		34 778		45 184	



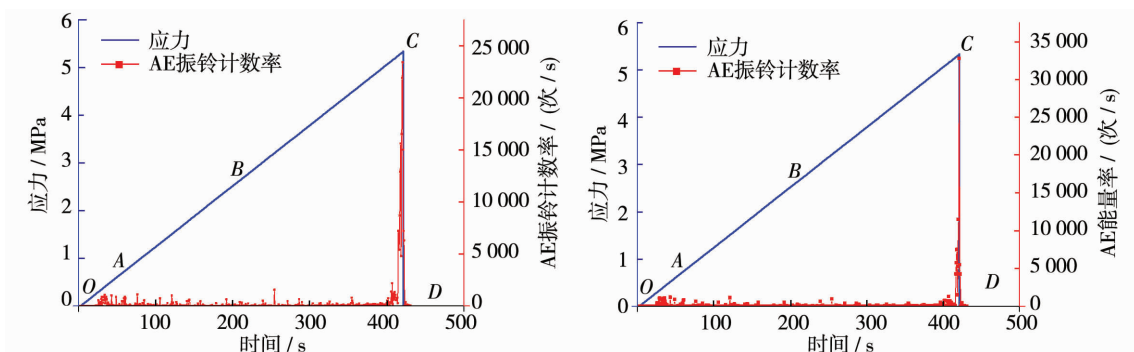
(a) 应力 - 时间 - AE 振铃计数率 (b) 应力 - 时间 - AE 能量率

图 5 试样 A3 应力 - 时间 - 声发射曲线(加载速率 0.01 kN/s)



(a) 应力 - 时间 - AE 振铃计数率 (b) 应力 - 时间 - AE 能量率

图 6 试样 A5 应力 - 时间 - 声发射曲线(加载速率 0.02 kN/s)



(a) 应力 - 时间 - AE 振铃计数率 (b) 应力 - 时间 - AE 能量率

图 7 试样 A2 应力 - 时间 - 声发射曲线(加载速率 0.05 kN/s)

3 结论

1) 岩石破裂过程的每个阶段所表现出来的特征都是岩石内部结构损伤信息的反馈, 岩石巴西劈裂作用下声发射特征与各变形阶段其内部结构损伤信息的变化是相对应的, 声发射试验在研究岩石拉伸破坏微观结构损伤和演化方面具有很好指导意义。

2) 加载速率对岩石劈裂声发射特征的影响比较明显. 随着加载速率的增大, 砂岩声发射信号相对比较强烈, AE 振铃率和 AE 能量率都随之增大, 峰值处释放的 AE 能量最大值呈递增趋势, 但 AE 累积能量则呈递减趋势, 这可能与加载时间有关。

3) 砂岩的抗拉强度随加载速率的增大而增大, 同步监测 AE 能量峰值亦随加载速率的提高呈上升趋势. 加载速率从 0.01 kN/s 增加到 0.02 kN/s 时, 砂岩抗拉能力提高 15.6%, AE 能量峰值平均值增加 57.2%; 加载速率为 0.05 kN/s 时, 砂岩抗拉能力提高 32.6%, AE 能量峰值平均值增加 29.1%. 不同加载速率下 AE 能量峰值的变化能够反映岩石的抗拉能力。

参考文献:

- [1] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [2] Tham L G, Liu H, Tang C A, et al. On Tension Failure of 2 - D Rock Specimens and Associated Acoustic Emission[J]. Rock Mech Rock Engn, 2005, 38(1): 1 - 19.
- [3] 席道瑛. 加载速率对岩石力学性质及声发射率的影响[C]//第四届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1994.
- [4] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石裂纹动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 944 - 950.
- [5] 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.
- [6] 孙强, 张卫强, 薛雷, 等. 砂岩损伤破坏的声发射准平静期特征分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(2): 237 - 242.
- [7] 徐世达, 姜坤序, 蔺甲. 基于声发射监测的双轴加载岩石破裂研究[J]. 金属矿山, 2013(6): 5 - 12.
- [8] 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.
- [9] 王学滨. 不同强度岩石的破坏过程及声发射数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(8): 837 - 843.
- [10] 李天一, 刘建锋, 陈亮, 等. 拉伸应力状态下花岗岩声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(s2): 3215 - 3221.
- [11] 余贤斌, 谢强, 李心一, 等. 直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下岩石的声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 137 - 142.
- [12] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.