

直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验下 岩石的声发射特性

余贤斌¹, 谢强², 李心一¹, 王青蓉³, 宋战平⁴

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650093; 4. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 采用自行研制的岩石直接拉伸试验装置, 对砂岩和石灰岩 2 种岩样进行直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验。试验结果表明, 2 种岩石的声发射活动情况大体相同。在单轴压缩条件下, 加载早期的声发射活动较为活跃, 随着荷载的增加, 许多试样的声发射率较加载初期有所下降, 这通常被认为与试样中的裂隙压密有关。劈裂试验条件下岩样的声发射活动规律与单轴压缩条件下基本一致, 所不同的是: 在劈裂试验条件下, 声发射活动在整个加载过程中持续不断, 直至临近破坏时, 声发射活动大量增加, 即劈裂试验条件下未观察到与单轴压缩试验类似的“裂隙压密”阶段声发射率较高的现象, 也未观察到压缩试验中试样发生微破裂时, 声发射累计事件数出现阶跃、变形曲线上出现拐点的现象。在直接拉伸条件下, 试样的声发射活动又有很大不同, 在破坏发生前的整个加载过程中, 观察到的声发射事件数和能率远少于单轴压缩和劈裂试验的结果。对于大多数试样, 声发射事件仅在试样破坏时才能观察到。

关键词: 岩石力学; 声发射; 直接拉伸; 劈裂试验; 单轴压缩; 破坏

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)01 - 0137 - 06

ACOUSTIC EMISSION OF ROCKS UNDER DIRECT TENSION, BRAZILIAN AND UNIAXIAL COMPRESSION

YU Xianbin¹, XIE Qiang², LI Xinyi¹, WANG Qingrong³, SONG Zhanping⁴

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China;
2. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. Faculty of Transportation Engineering,
Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 4. College of Civil Engineering, Xi'an
University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Direct tension, Brazilian and uniaxial compressive tests were carried out with sandstone and limestone samples collected from mines of China, with a testing apparatus of direct tension developed by the authors. The results show that the acoustic emission(AE) detected from the two rock samples is similar. During the loading process of compressive tests, the observed AE event numbers at the beginning of loading are usually quite high; and then decrease to a lower level with the raising of loading, which is believed to be produced by closing of the micro cracks in the rocks. In Brazilian tests, the behaviour of AE is similar to that in compression, i.e. AE events appeared early in the loading stage and kept approximately the same level during the total loading process until

收稿日期: 2005 - 12 - 20; **修回日期:** 2006 - 02 - 08

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目(96E033M)

作者简介: 余贤斌(1953 -), 男, 1977 年毕业于昆明工学院采矿工程专业, 现任教授, 主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。E-mail: yuxianbinxh@xinhuanet.com

sample's failure where AE events reaches its maximum value. However, the phenomenon that AE events show higher values at initial loading stage as those in compression does not observe in Brazilian tests. Moreover, in compression, a sudden large increase in AE cumulative events can usually be observed when a small crack appeared before sample's failure; while such a result is not obtained in Brazilian test. In the direct tension tests, the observed AE is completely different, and both the numbers of AE events and energy during the loading process before failure are much lower than those of the other tests. Moreover, AE under direct tension could hardly be detected until the failure of the samples. In fact, for most samples, AE events under direct tension are detected only when the peak loading stress is reached.

Key words: rock mechanics; acoustic emission(AE); direct tension; Brazilian test; uniaxial compression; failure

1 引言

岩石声发射特性的研究对岩石破坏过程的探讨以及现场岩体破坏的预报等方面都具有重要意义, 迄今为止已经有大量成果^[1, 2]发表, 如单轴试验^[3, 4]、应力-应变全过程^[5, 6]、疲劳试验^[7]、真三轴试验^[8, 9]、大尺寸试样三轴试验^[10]等条件下的试验结果。但绝大多数研究是在压缩条件下进行的, 在其他应力状态下, 特别是在直接拉伸条件下的研究少见报道。众所周知, 在地下巷道周边和露天边坡表面附近, 拉应力经常存在, 由于岩石抗拉强度远低于其抗压强度, 拉伸也是岩石破坏的一种最常见的类型。事实上, 在地下工程中, 顶板岩石冒落是施工安全事故中最重要的原因之一, 而冒顶破坏的发生又往往与拉应力有密切关系。岩石拉伸试验通常采用间接拉伸(劈裂试验)法进行, 很少进行直接拉伸试验。然而劈裂试验下岩石试样的应力状态与直接拉伸下岩石试样的简单拉伸应力状态有很大区别。因此, 研究岩石在直接拉伸、劈裂试验下的声发射特性, 对了解岩石的破坏机制, 以及对现场岩体稳定性的声发射监测, 都是十分有益的。

由于直接拉伸试验较为复杂, 目前在岩石工程中所使用的岩石变形参数, 如弹性模量和泊松比, 都来自于压缩试验; 拉伸变形参数被认为与压缩参数相等。然而, 许多研究者^[11~14]的试验结果都已表明, 很多岩石的拉伸弹性模量 E_t 都远小于压缩弹性模量 E_c , 某些岩石的 E_c/E_t 比可以达到 10 以上。P. N. Sundaram 和 J. M. Corrales^[15]的结果还表明: 当岩石的 $E_c/E_t = 5$ 时, 即使在普通的劈裂法(巴西法)试验中, 利用传统公式也会给岩石拉伸应力的计算结果带来 28% 的误差; 当 $E_c/E_t = 10$ 时, 误差将高达 40%。

为了解直接拉伸、劈裂试验下的岩石声发射特性及其与单轴压缩下所得结果的差别, 本文采用自

行研制的岩石直接拉伸试验装置, 对广西大厂高峰锡矿珊瑚礁灰岩和云南大姚铜矿砂岩试样, 进行了直接拉伸、劈裂及单轴压缩试验, 分析探讨了在几种应力状态下岩石试样的声发射特性与差别。

2 试验方法

岩石试样均为现场钻探所取得的直径为 50~60 mm 的岩芯。直接拉伸和单轴压缩试验的试样高径比为 2.0~2.5; 劈裂法试验的试样厚径比为 0.5~1.0。采用普通材料试验机对试样进行加载。

声发射试验采用沈阳市电子研究所生产的 SFS-4B 型声发射仪进行。该仪器生产日期较早, 不具有将结果直接输入计算机的功能。为此, 试验时将该仪器的“事件”输出端与一多通道高速 A/D 变换器相连接, 采用荷载传感器测量对试样所施加的外荷载, 用黏贴在试样表面的电阻应变计测量其变形。荷载和试样变形的测量结果均输出至一动态应变仪进行放大, 再经多通道 A/D 变换器变换为数字信号, 最后与声发射(AE)信号一道由计算机记录存储。由于对声发射信号采样需要较高的采样频率, 在数据采集时, 首先采集 1 组试样的变形、荷载数据, 用最高速度单独采集声发射事件信号(采样次数为 1 024), 完成 1 个循环; 然后再依次采集试样的变形、荷载以及声发射数据, 完成下一循环。这一测试系统对荷载和试样变形信号的采集速度远高于采用电阻应变仪时的手工读数速度, 通常在对每一试样的试验中均可进行数百次采样循环, 获得数百组数据, 可对岩石的变形和破坏过程进行较详细的监测。

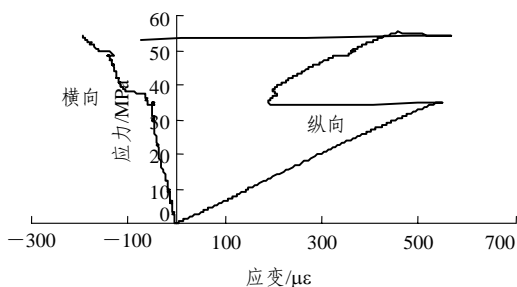
在本文的测量和分析中, 采用了声发射事件数和能率 2 个参数, 并定义能率为信号幅度的平方。由于信号幅度与仪器的增益有关, 能率实际上是一个相对量, 但在增益不变的情况下, 可用作不同岩

石的对比。

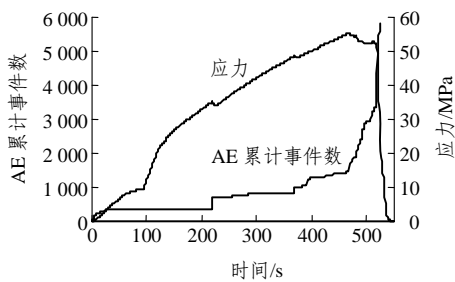
迄今为止, 在国内外相关文献中很少见到采用直接拉伸法进行岩石试验的报道, 其原因在于直接拉伸试验较为复杂, 难于避免偏心拉伸等因素对试验结果的影响。本文有关的直接拉伸试验采用作者自行研制的试验装置进行, 这种试验装置与国内外以往所报道的装置有所不同, 其结构原理图及其试验验证可参见相关研究^[14, 16]。

3 主要结果

大姚铜矿砂岩岩样中存在少量裂隙, 试验所用的 1 组岩样, 单轴抗压强度为 43.0~123.0 MPa, 平均值为 62.6 MPa。高峰矿珊瑚礁灰岩则含有较多的裂隙, 其抗压强度为 22.0~61.0 MPa, 平均值为 40.5 MPa。这 2 种岩石典型试样在单轴压缩、劈裂和直接拉伸下的应力 - 应变曲线、时间 - AE 事件数 - 应力关系曲线见图 1~4。试验结果表明, 2 种岩石的声发射活动情况大体相同。



(a) 单轴压缩试验下的应力 - 应变关系曲线



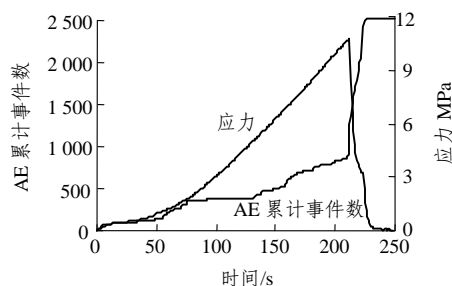
(b) 单轴压缩试验下时间 - AE 累计事件数 - 应力关系曲线

图 1 大姚铜矿砂岩单轴压缩试验下的应力 - 应变曲线和时间 - AE 累计事件数 - 应力关系曲线

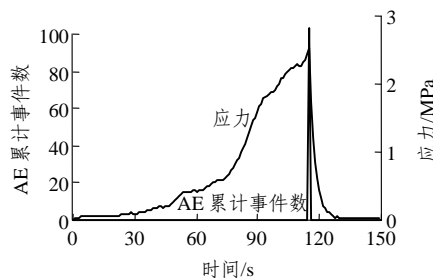
Fig.1 Relation curves of stress-strain, time-AE cumulative events-stress of Dayao copper ore sandstone under uniaxial compression

4 单轴压缩和劈裂试验下的声发射特性

在单轴压缩试验下, 本文所得结果与大多数其



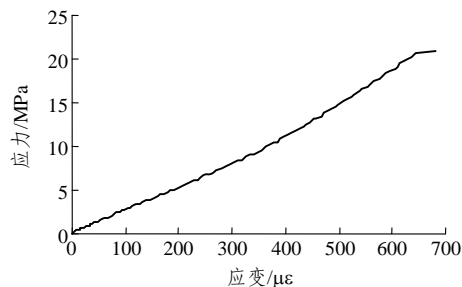
(a) 劈裂试验下时间 - AE 累计事件数 - 应力关系曲线



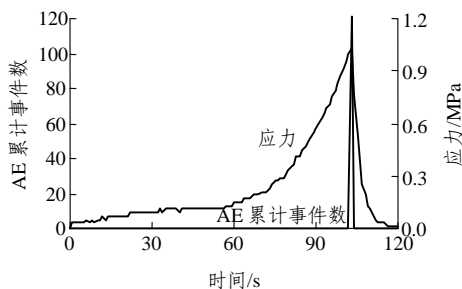
(b) 直接拉伸试验下时间 - AE 累计事件数 - 应力关系曲线

图 2 大姚铜矿砂岩劈裂试验和直接拉伸试验条件下时间 - AE 累计事件数 - 应力关系曲线

Fig.2 Relation curves of time-AE cumulative events-stress of Dayao copper ore sandstone under Brazilian and direct tension test



(a) 单轴压缩下的应力 - 应变曲线

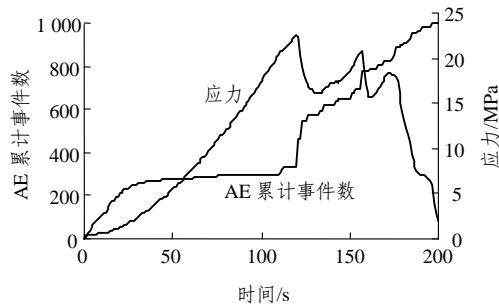


(b) 单轴压缩试验下时间 - AE 累计事件数 - 应力关系曲线

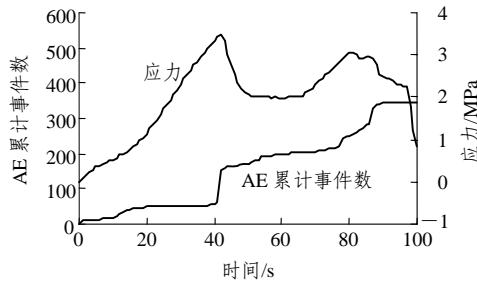
图 3 高峰矿珊瑚礁灰岩在单轴压缩试验下的应力 - 应变曲线和时间 - AE 累计事件数 - 应力关系曲线

Fig.3 Relation curves of stress-strain, time-AE cumulative events-stress of Gaofeng limestone under uniaxial compression

他研究者的结果一致, 即加载初期就有 AE 活动,



(a) 劈裂试验下时间 - AE 累计事件数 - 应力关系曲线



(b) 直接拉伸试验下时间 - AE 累计事件数 - 应力关系曲线

图 4 高峰矿珊瑚礁灰岩在劈裂试验和直接拉伸试验下时间 - AE 事件数 - 应力关系曲线

Fig.4 Relation curves of time-AE cumulative events-stress of Gao Feng limestone under Brazilian and direct tension tests

反映了试样中裂隙闭合的影响；随着荷载的增加，大多数试样的声发射率较加载初期有所下降；临近破坏时，AE 活动大量增加，AE 事件和能量计数都在破坏时达到最大值。试样破坏前，常可观察到微破裂的发生，伴随着 AE 累计事件数的阶跃，此时应力 - 应变曲线上也常可发现不规则的拐点(见图 1)。

在单轴压缩试验下，高峰矿珊瑚礁灰岩的部分试样在达到极限应力后，没有发生瞬间崩裂而是逐渐破坏，因而仍然检测到了峰值应力后的 AE 活动(见图 1(b))，而且峰值应力后声发射率和能率计数通常都高于达到峰值应力前的数值。这一结果与一些研究者^[3~7, 9, 10]的结论是一致的。

在劈裂试验下，AE 活动与在单轴压缩试验下的情况相似，即 AE 活动在加载早期就出现；试样破坏时，AE 计数最高，能率最大(见图 2(a)和 4(a))。

同时也发现，与压缩试验下所获得的结果有显著不同的是，在劈裂试验中，对于 2 种岩石的大多数试样，并未发现单轴压缩试验中普遍出现的加载初期声发射事件数较高，而后又有所下降的所谓“裂隙闭合”阶段的现象；也未发现单轴压缩试验中 AE 累计计数的阶跃和变形曲线上的拐点，即劈裂试验中，在试样破坏以前的整个加载过程中，AE 事件数大体保持了相同的水平。

5 直接拉伸试验下的声发射特性

直接拉伸试验下的 AE 活动与单轴压缩和劈裂试验下的情况有很大的不同。

首先，直接拉伸试验下的 AE 累计事件数和累计能率计数都较单轴压缩和劈裂试验要少得多。所试验的 2 种岩石有一个共同特点，即在单轴压缩试验下所观察到的 AE 累计事件数最多，劈裂试验下的次之，直接拉伸试验下的最少。为了进一步分析，将这 2 种岩石在上述 3 种试验下所获得的 AE 累计事件数和累计能率的平均值作了统计，其结果列入表 1。

由表 1 可知，单轴压缩试验下的 AE 累计事件数较直接拉伸试验下结果的通常要高 1 个数量级，劈裂试验下所获得的 AE 累计事件数也要比直接拉伸试验下的结果高几倍。在压缩试验下，2 种岩石自开始加载到试样破坏的 AE 累计事件数均为数千，最高达 11 108。直接拉伸试验下的 AE 累计事件数仅为数百，最高值为 352。

高峰矿珊瑚礁灰岩在直接拉伸试验下，自开始加载到试样破坏时的 AE 累计事件数的平均值，仅

表 1 试验结果统计

Table 1 Statistics of the test results

岩性	试验类型	强度值 /MPa	变异系数 %	破坏荷载前 80% AE 累计事件数	变异系数 %	破坏荷载前 80% AE 累计能率计数	变异系数 %	达到破坏荷载时 AE 累计事件数	变异系数 %	达到破坏荷载时 AE 累计能率计数	变异系数 %
大姚铜矿砂岩	单轴压缩	62.6	56.1	1 628.0	67	332.00	67	3 487	87	783.8	67
	劈裂	8.63	18.0	526.0	53	61.80	74	1 025	34	166.0	18
	直接拉伸	5.73	78.6	5.2	143	0.36	178	229	47	85.4	56
高峰矿珊瑚礁灰岩	单轴压缩	36.48	14.0	616.0	51	58.70	90	1 741	81	197.3	50
	劈裂	3.47	40.0	299.0	74	30.10	99	573	74	72.9	63
	直接拉伸	1.50	69.0	1.5	283	0.08	283	157	55	39.4	39

分别为单轴压缩和劈裂试验下的 AE 累计事件数平均值的 9.0% 和 27.4%；大姚铜矿砂岩试样直接拉伸试验下的 AE 累计事件数平均值则分别为单轴压缩和劈裂试验下的 AE 累计事件数平均值的 6.6% 和 22.3%。能率计数的结果也与此接近，高峰矿灰岩直接拉伸试验下的 AE 累计能率计数的平均值分别为单轴压缩和劈裂试验下的能率累计计数平均值的 20.0% 和 54.0%；大姚铜矿砂岩直接拉伸试验下的 AE 累计能率计数平均值则分别为单轴压缩和劈裂试验下能率累计计数平均值的 10.9% 和 51.4%。

其次，直接拉伸试验下，在达到峰值应力前，AE 活动很少出现。在高峰灰岩进行直接拉伸的 8 个试样中，仅有 1 个试样在破坏荷载约 70% 处检测到 AE 事件；大姚砂岩的 5 个直接拉伸试样中，也仅有 2 个试样在试样破坏前检测到 AE 事件。其余试样，达到峰值应力以前完全检测不到 AE 事件。换言之，这 2 种岩石在直接拉伸试验下的声发射活动，基本上只发生在试样破裂时。

在压缩试验下，破坏荷载 80% 以前的 AE 累计事件数 $N_{80\%}$ 为达到极限应力时 AE 累计事件数的约 50%；劈裂试验下的结果与此有一定差别，约为达到破坏时 AE 累计事件数的 40%~60%。拉伸试验下则明显不同，对于大姚铜矿砂岩，达到拉伸破坏强度 80% 时的 AE 累计事件数，仅为达到拉伸破坏荷载时 AE 累计事件数的 3.1%；对于高峰矿珊瑚礁灰岩，在拉伸破坏强度 80% 以前，完全检测不到 AE 活动，AE 累计能率计数的结果与事件率的结果大体一致。

应该说明的是，本次试验中声发射仪放大部分的增益仅为 40 dB。因此，“直接拉伸试验下，除主破裂附近外，很少能记录到 AE 事件”的结论，是与单轴压缩和劈裂试验相比较而言的，不能排除，在增大声发射仪放大器增益后，所记录到的事件数有大大增加的可能。然而，在增大放大器增益的情况下，单轴压缩与劈裂试验中所检测到的 AE 事件数也同样会大大增加。因此，放大器增益并不能改变“直接拉伸下 AE 活动远少于单轴压缩和劈裂试验下的结果”这一结论。

声发射能率的结果与事件数大体一致。对大姚铜矿砂岩，单轴压缩下声发射累计能率平均值 U_{ac} 与直接拉伸下累计能率 U_{at} 平均值之比为 9.2。对于高峰矿珊瑚礁灰岩， U_{ac} 与 U_{at} 之比为 5.0。

岩石抗压强度较抗拉强度高得多，因此，单轴压缩试验下岩石的声发射累计事件数较高，这一点

是易于理解的。然而，劈裂试验强度与直接拉伸试验强度相差不大，但劈裂试验下岩石的 AE 累计事件数也较直接拉伸试验下的结果要高得多。事实上，对大姚铜矿砂岩，劈裂试验下的 AE 累计事件数的平均值 N_{ab} 与直接拉伸试验下的 AE 累计事件数 N_{at} 的平均值之比达 4.5，远高于劈裂拉伸强度与直接拉伸强度之比；对于高峰矿珊瑚礁灰岩， N_{ab} 与 N_{at} 之比也达 3.6。

众所周知，岩石是一种摩擦介质，颗粒间的摩擦对其强度有很大影响，这是造成岩石抗压强度远高于抗拉强度的主要原因。根据本文的试验结果，可以认为，岩石的声发射也与其颗粒间的摩擦密切相关。但在直接拉伸试验下，试样内弱面和颗粒间的摩擦与岩石的 AE 活动和破坏基本无关，因此，在这种应力状态下岩石就很少出现 AE 事件。在劈裂试验中，岩石试样虽然也发生拉伸破坏，但还承受了压应力，在受载点存在压应力集中现象，这也会对加载过程中试样内的 AE 活动产生很大影响。在试样破坏时，劈裂试验下所产生的 AE 事件总数以及能率都较直接拉伸试验的大得多，这说明，2 种试验中试样的破坏机制有很大不同。作者认为，这可以部分地解释直接拉伸试验强度低于劈裂试验强度这一现象。

6 结 论

对 2 种岩石进行了直接拉伸、劈裂和单轴压缩试验。试验结果表明：

(1) 2 种岩石的声发射活动规律大体相同。

(2) 在单轴压缩试验下，加载早期就有声发射活动，反映了裂隙闭合的影响；随着荷载的增加，许多试样的声发射率较加载初期有所下降；临近破坏时，声发射活动大量增加。

(3) 在劈裂试验下，声发射活动在整个加载过程中持续不断，声发射累计事件数以及累计能率都较直接拉伸试验下的大得多，说明岩样虽然也发生拉伸破坏，但在受载点也存在压缩应力集中现象；然而，试验过程未观察到与单轴压缩试验类似的“裂隙压密”阶段声发射率较高的现象，也未观察到压缩试验中试样发生微破裂时声发射累计事件数出现阶跃、变形曲线上出现拐折点的现象。

(4) 在直接拉伸试验下，所观察到的累计声发

射事件数要远少于单轴压缩和劈裂试验下的结果。对于直接拉伸试验下的大多数试样, 声发射事件仅在试样破坏时才能观察到; 试样破坏前, 完全不能观察到声发射事件。

参考文献(References):

- [1] REGINALD HARDY H Jr. Acoustic emission/microseismic activity: principles, techniques and geotechnical applications[M]. 1st ed. [S. l.]: A. A. Balkema, 2003.
- [2] 孙成栋. 岩石声学测试[M]. 北京: 地质出版社, 1981.(SUN Chengdong. Acoustic measurements of rocks[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981.(in Chinese))
- [3] 付小敏. 典型岩石单轴压缩变形及声发射特性试验研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1): 17 - 21.(FU Xiaomin. Experimental study on uniaxial compression deformation and acoustic emission property of typical rocks[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Science and Technology), 2005, 32(1): 17 - 21.(in Chinese))
- [4] LEI X L, NISHIZAWA O, KUSUNOSE K, et al. Compressive failure of mudstone samples containing quartz veins using rapid AE monitoring: the role of asperities[J]. Tectonophysics, 2000, 328(3/4): 329 - 340.
- [5] 李庶林, 尹贤刚, 王泳嘉, 等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(LI Shulin, YIN Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 499 - 2 503.(in Chinese))
- [6] RUDAJEV V, VILHELM J, LOKAJICEK T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2000, 37(4): 699 - 704.
- [7] 蒋 宇, 葛修润, 任建喜. 岩石疲劳破坏过程中的变形规律及声发射特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1 810 - 1 814.(JIANG Yu, GE Xiurun, REN Jianxi. Deformation rules and acoustic emission characteristics of rocks in process of fatigue failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1 810 - 1 814.(in Chinese))
- [8] 许昭永, 梅世蓉, 庄灿涛, 等. 真三轴压机刚度对岩石破裂声发射的影响及与地震活动性的联系[J]. 地震学报, 1991, 13(2): 223 - 232.(XU Zhaoyong, MEI Shirong, ZHUANG Cantao, et al. The influence of stiffness of the true triaxial testing machine on the rupturing and acoustic emission of rocks and its correlation with seismic activities[J]. Acta Seismologica Sinica, 1991, 13(2): 223 - 232.(in Chinese))
- [9] 吴 刚, 赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(2): 82 - 85.(WU Gang, ZHAO Zhenyang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(2): 82 - 85.(in Chinese))
- [10] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠, 等. 循环荷载下大试件岩石破坏声发射试验——岩石破坏前兆的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(ZHANG Huihui, YAN Yuding, YU Huaizhong, et al. Acoustic emission experimental research on large-scaled rock failure under cycle loading—fracture precursor of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3 621 - 3 628.(in Chinese))
- [11] PERKINS T K, KRECH W W. The energy balance concept of hydraulic fracturing[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1968, 8(1): 1 - 12.
- [12] HAWKES I, MELLOR M, GARIEPY S. Deformation of rocks under uniaxial tension[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1973, 10(6): 493 - 507.
- [13] STIMPSON B, Chen R. Measurement of rock elastic moduli in tension and in compression and its practical significance[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(2): 338 - 347.
- [14] YU X, DA GAMA C D, NA Y, et al. Deformation behaviour of rocks under compression and direct tension[J]. Journal of the South Africa Institute of Mining and Metallurgy, 2005, 105(1): 55 - 62.
- [15] SUNDARAM P N, CORRALES J M. Brazilian tensile strength of rocks with different elastic properties in tension and compression[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1980, 17(2): 131 - 133.
- [16] 余贤斌, 谢 强, 李心一, 等. 岩石直接拉伸与压缩变形的循环加载试验与双模量本构模型[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 988 - 993.(YU Xianbin, XIE Qiang, LI Xinyi, et al. Cycle loading tests of rock samples under direct tension and compression and bi-modular constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(9): 988 - 993.(in Chinese))