

文章编号:1000-582X(2010)06-072-05

四点弯曲试验条件下页岩的声发射特性

谢强^{1,2}, 王志委¹, 余贤斌³, Carlos Dinis da Gama²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. CEGEO, IST, UTL, Lisbon 1049-001, Portugal;
3. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘要:利用PXWAE型声发射系统进行了四点弯曲试验条件下页岩的声发射试验研究,试验中记录了岩样所受的最大弯曲应力、弯曲应变、声发射事件数、声发射能量等多个参数。研究发现,垂直页岩层理施加荷载时,在四点弯曲试验条件下其凯塞效应是存在的,凯塞点可以直接通过应力与累计声发射事件数曲线得出;但受自身水平层理结构及局部破坏的影响,应变在受载过程中会发生松弛现象,不易直接由应变—声发射试验曲线判断出岩石的凯塞点,必须结合其它试验数据以及岩样的最终破坏形态综合判断。弯曲应力状态下岩石的声发射特性研究对于利用声发射技术进行矿区顶板或隔层的稳定性监测具有一定的工程指导意义。

关键词:弯曲试验;声发射;应力应变曲线;页岩

中图分类号: TU459

文献标志码: A

Acoustic emission behavior of shale under four-point bending test

XIE Qiang^{1,2}, WANG Zhi-wei¹, YU Xian-bin³, Carlos Dinis da Gama²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Centro de Geotecnia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisbon 1049-001, Portugal; 3. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China)

Abstract: PXWAE Acoustic Emission System is used to investigate the acoustic emission behavior of shale under four-point bending test. In these tests, the maximum bending stress, bending strain, acoustic emission hits, acoustic emission energy and etc., are recorded. The results show that when vertical loads impose on the shale sample which has horizontal stratification planes, Kaiser effect does exist under four-point bending tests. Kaiser point can be recognized directly from the stress vs. cumulative AE hits curve. But by the impact of shale's stratifications and local failure during the tests, strain relaxation occurs which makes it difficult to determine the Kaiser point only by the strain vs. acoustic emission curve. An accurate conclusion can be achieved by a comprehensive judgment combining with all test data, as well as the failure mode of rock sample. The research on acoustic emission behavior of rock in the stress state during bending tests to some extent can provide guidance to engineering practice for stability monitoring of mine roof or separation layer with acoustic emission monitoring technology.

Key words: bending tests; acoustic emissions; stress-strain curves; shale

收稿日期: 2010-01-29

基金项目: 重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTC, 2009BB6031); 葡萄牙国家基金课题(POCTI/ECM/55694/2004)

作者简介: 谢强(1975-), 男, 重庆大学副教授, 博士后, 主要从事岩土力学与工程研究,
(E-mail) xieqiang2000@hotmail.com.

关于弯曲状态下声发射特性研究的主要对象包括超导体^[1]、复合材料^[2-3]、混凝土^[4-6]、钢构件^[7]、陶瓷^[8]等,针对岩石试样进行的弯曲状态下的声发射试验研究则相对较少,获得的研究成果包括:赵兴东等^[9]应用声发射及其定位技术,采用实验手段研究了三点弯曲条件下不同尺寸岩石以及不同岩样的破裂失稳过程;朱维申、郭彦双等^[10-11]采用类岩石材料研究了含边裂纹试样在三点弯曲加载条件下的裂纹扩展过程,并利用声发射测试技术分析了含裂隙试样弯拉应力作用过程中预制裂纹萌生、起裂、扩展和断裂破坏全过程的声发射特征;李英锐^[12]应用加拿 ESG 公司生产的声发射系统研究了花岗岩三点弯曲状态下裂纹的扩展过程,并进行了裂纹扩展定位研究;黄志鹏^[13]等人针对重庆砂岩进行三点弯曲断裂声发射试验,获得了岩石的临界强度因子,拟合出了裂纹稳定扩展时声发射振铃总数与应力强度因子的关系式。

笔者主要研究四点弯曲状态下页岩的声发射特性,验证其凯塞效应(Kaiser Effect, KE)的存在性。岩石的凯塞效应是指岩石在经过一次或多次应力加卸载后,当再次加载到先前经受过应力水平之前声发射不发生或很少发生,而当达到或超过过去所承受的最大应力水平之后,其声发射活动突然增加的现象。由德国人凯塞(J. Kaiser, 1953)^[14]所发现。大多数岩石在压缩(包括单轴或 3 轴^[15-17])、直接拉伸^[18]、劈裂^[18-19](间接拉伸)等试验条件下,其凯塞效应都得到了验证。在四点弯曲状态下针对岩石试样的类似声发射试验研究目前未见有报道。

在具有多个盘区的矿房中,顶板或上下盘区隔层受自重作用处于弯曲状态,受上部车行荷载、人行荷载、地应力的影响,顶板或隔层岩石经常处于频繁的加卸荷状态中,其声发射特性也应该有相应的变化。因此,了解顶板或隔层岩石在弯曲状态下是否具有凯塞效应对于巷道顶板的稳定性监测、预警及预报具有重要的工程意义。

1 试验装置与试验方法

1.1 测试系统

整个测试系统由 2 部分组成(见图 1)。第 1 部分为 PXWAE 型声发射系统^[20],试验主要记录累计声发射事件数。所采用的声发射传感器为 PXRw 宽频带型,灵敏度 > 53 dB,频率范围 50~800 kHz;前置放大器为 PXPA 宽带型,增益 40 dB,带宽 10 kHz ~ 2 MHz。

系统的第 2 部分主要测定应力和应变。应变片栅长×栅宽=15 mm×3 mm,灵敏度系数 2.033,双片

贴于试件底部,串联后接入惠斯顿电桥(半桥),经动态电阻应变仪滤波、放大后输入 A/D 数据采集卡,然后由计算机进行后处理;BHR-4 型荷载传感器,极限荷载 100 kN,全桥接入。

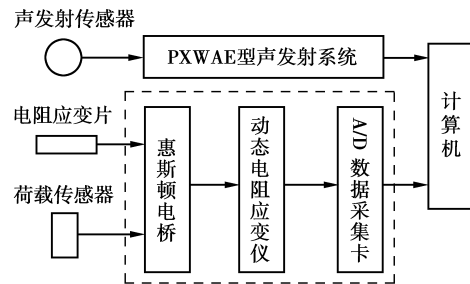


图 1 测试系统示意图

1.2 试验装置及基本原理

试验装置如图 2 所示,图中 $a=l=4$ cm,外荷载 F 施加采用 ELE DIGITAL TRITEST 试验机,最大出力为 50 kN。利用真空脂耦合剂将声发射传感器与试样表面进行耦合接触,用橡皮圈将声发射传感器固定于试样侧面中部。

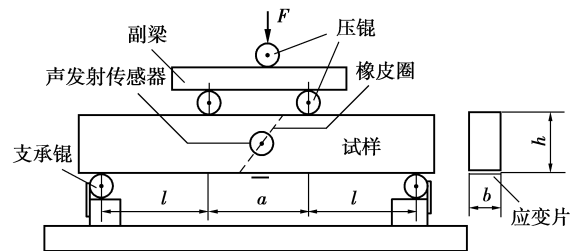


图 2 四点弯曲试验装置

于是,试样所受最大应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z}, \quad (1)$$

式中 M_{\max} 为最大弯矩

$$M_{\max} = \frac{F}{2}l, \quad (2)$$

W_z 为抗弯截面系数,对于矩形截面,

$$W_z = \frac{I_z}{y_{\max}} = \frac{\frac{bh^3}{12}}{\frac{h}{2}} = \frac{bh^2}{6}, \quad (3)$$

则试样在外荷载 F 的作用下受到的最大拉应力为(破坏时对应值即为抗弯强度):

$$\sigma_{\max} = \frac{3Fl}{bh^2}. \quad (4)$$

根据荷载传感器采集到的 F 值,结合声发射数

据,就可以得出四点弯曲试验条件下岩石的声发射特征曲线。

1.3 试样制备

试验所用页岩采自葡萄牙北部某露天矿,整体黑色,不染手,杂质少,具薄片状层理,用硬物击打易成碎片。试样加工尺寸为 $L \times b \times h = 15 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm}$ 。根据现场情况,保持试样中层理处于水平向,荷载垂直层理施加。制备好的试样如图3所示。

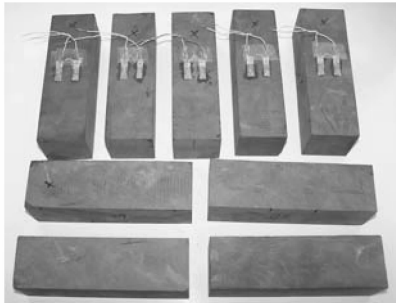


图3 制备好的页岩试样

2 试验结果与分析

2.1 应力(外荷载)与声发射的关系

图4为试件22在4点弯曲试验条件下得到的应力与声发射累计事件数的试验曲线。

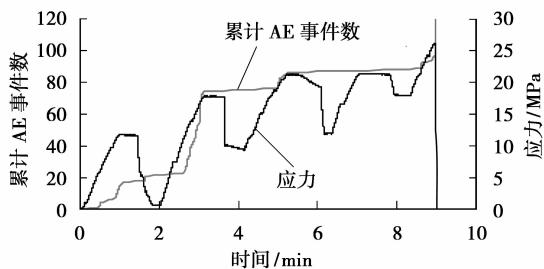


图4 应力与累计声发射事件数试验曲线(试件22)

试验共进行了4个循环,4个循环中,岩石的凯塞效应都很明显。在第1个循环中,先期最大应力11.84 MPa,在应力基本保持不变和卸载过程中,几乎没有声发射出现,当荷载再次施加到12.24 MPa时,声发射开始增加,也就是说,凯塞点(再次出现声发射的应力点)比先期最大应力高约3.4%。在第2个加卸载循环中,最高应力17.84 MPa,再次加载出现明显声发射时的应力为19.06 MPa,费利西蒂比^[3](再次出现明显声发射时的应力与先期最高应力的比值) $FR = 19.06/17.84 = 1.07$,说明凯塞效应仍很明显。在第3次加卸载循环中可以观察到同样的现象。第4次加载时最高应力为21.45 MPa,略高于第3次循环

中最高应力21.39 MPa,所以整个过程中几乎观察不到声发射现象。需要强调的是,第3、4次最高应力已经接近抗弯强度(26.11 MPa),说明凯塞效应在高应力状态下仍是存在的。

表1列出了9个试样在弯曲试验条件下的声发射试验数据,限于篇幅,文章仅列出前2个循环的试验结果,其中试件30仅作了一个循环。

表1 四点弯曲试验条件下的声发射试验数据

编号	第1次循环				第2次循环			
	P_{\max}	P_{AE}	Ratio	FR	P_{\max}	P_{AE}	Ratio	FR
22	11.84	12.24	45.35	1.03	17.84	19.06	68.33	1.07
23	6.12	6.10	38.76	1.00	12.73	12.9	48.76	1.01
24	5.65	5.99	20.78	1.06	12.04	12.32	46.11	1.02
25	5.14	5.55	41.82	1.08	10.93	10.5	41.86	0.96
26	5.34	5.34	30.15	1.00	11.34	10.98	43.43	0.97
27	5.9	6.10	27.73	1.03	12.27	12.4	46.99	1.01
28	5.12	5.00	24.29	0.98	11.59	12.5	44.39	1.08
29	5.73	6.10	23.88	1.06	11.97	11.97	45.84	1.00
30	17.47	17.9	82.29	1.02	—	—	—	—

表中: P_{\max} 为单次循环先期最高应力,MPa; P_{AE} 为加载时再次出现声发射时的起始荷载,MPa;FR为费利西蒂比, $FR = P_{\text{AE}}/P_{\max}$;Ratio为单次循环最高应力占抗弯强度 σ_f 百分比, $\%$, $\text{Ratio} = P_{\max}/\sigma_f$ 。

费利西蒂比FR通常用来表征材料中原先所受损伤或结构缺陷的严重程度,是材料缺陷严重性的重要评定判据。在一些复合材料构件中,费利西蒂比小于0.95常作为声发射超标的重要判据。对于岩石而言,由于其性质的特殊性和复杂性,其超标判据应该更低一些。从表1可以得出,FR在0.96~1.08之间,页岩在四点弯曲试验条件下,对先期最大弯曲应力是有记忆性的,即存在凯塞效应。

2.2 应变与声发射的关系

图5为试件22应力与应变的试验曲线,在几次加卸中,试验曲线基本为线性变化,因此可以认为,该试件对先期最大应变同样具有记忆性,这种对应变的记忆能力同样称之为凯塞效应。

但是在随后的试验中发现并不是所有的试件的加卸载应力应变曲线均为保持单一直线,有些甚至十分紊乱,如图6所示(以试件26为例)。

由于应力与应变没有直接的对应关系,此时不能直接下结论认为在弯曲试验条件下页岩对应变没有记忆性。图7所示为应变与累计声发射事件数的试验曲线,第2次和第3次加载到一定荷载时,应变都

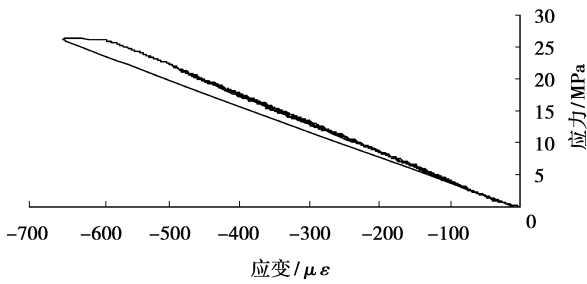


图 5 应力-应变试验曲线(试件 22)

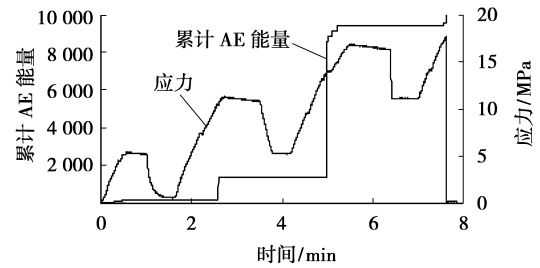


图 8 应力与累计声发射事件数试验曲线(试件 26)

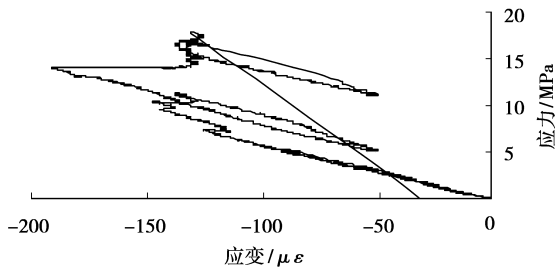


图 6 应力-应变试验曲线(试件 26)

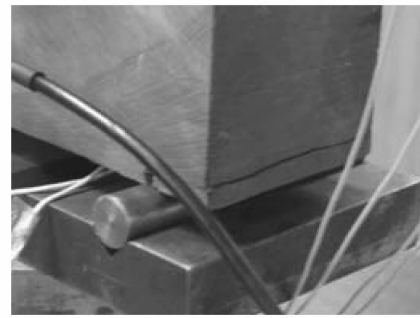


图 9 试验过程中试件的局部破坏(试件 26)

出现一定程度的松弛现象,但累计声发射事件数却没有因此减少或停止。由于荷载是连续施加,这种现象在应力与累计声发射事件数的试验曲线上是观察不到的。

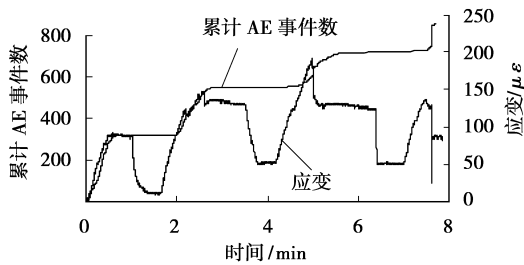


图 7 应变与累计声发射事件数试验曲线(试件 26)

试验过程中应变的这种松弛现象可以从应力与累计声发射能量曲线中观察到,如图 8 所示。在第 2 次和第 3 次加载期间出现了两次大声发射活动,这两次大声发射活动所对应的正是应变发生松弛的时刻。突发的较大的声发射源于因岩石本身的脆性而产生的内部的或局部的破坏。

在试验过程中,这种突发的声发射事件通常可以由人耳听到或肉眼观察到,如图 9 所示。

但是需要注意的是,图 9 所示局部破坏属隅角压裂破坏,并不是由弯曲引起的,因此而产生的声发射应该归于“噪音”,相应产生的应变松弛在考虑岩石是否具有凯塞效应时也应该一并剔除。

综合上述分析认为,在四点弯曲试验条件下页岩对应变同样具有记忆性,存在凯塞效应。

3 讨论

采场顶板或隔层在受外荷载作用时,其应力和应变相应发生变化,这种变化与声发射是存在一定关系的。当外荷载增加超过先期荷载时,累计声发射事件数随之增加,其增速与增量可以用来判定顶板或隔层的稳定性。

人们有时也用应变变化来测定顶板的变形程度,但需要注意的是应变并不总是增加的,局部破坏会引起应变松弛,尽管此时较难通过应变与声发射之间的关系曲线识别出凯塞点,但正是这种“应变松弛”现象表示局部破坏发生了。

应力与声发射累计事件数曲线、应力与声发射累计能量曲线、应变与声发射累计事件数曲线、应变与声发射累计能量曲线均可用于岩石凯塞效应的判定,但是要注意剔除非试验状态(文中为弯曲状态)下的突发声发射事件。在大多数时候因为无法真正确定这些声发射源,要作到这一点很难,因此需要结合所有的试验曲线和试样破坏形态作综合判断^[20]。

4 结束语

1)荷载垂直层理施加时,页岩在四点弯曲试验

条件下的凯塞效应是明显的, 费利西蒂比 FR 在 0.96~1.08 之间, 在高应力状态下岩石对弯曲应力的记忆性仍很强;

2) 页岩作为一种脆性岩石, 在受水平层理的影响下, 受载过程中会发生一些局部破坏, 使得应变出现相应的松弛现象, 通过应变-声发射试验曲线不易判断出岩石的凯塞点;

3) 试验过程中需要密切关注岩石破坏发展过程和最终破坏形态, 剔除非试验状态下的声发射事件, 消除“噪音”对凯塞点判断带来的影响。

针对岩石在弯曲应力状态下的声发射试验研究对于利用声发射技术进行矿区顶板或隔层的稳定性监测具有重要意义。

参考文献:

- [1] YONEDAA K, YEA J, TOMITAB M. Acoustic emission behavior under bending deformation of YBCO bulk superconductor [C] // Proceedings of the 17th International Symposium on Superconductivity (ISS 2004) - Advances in Superconductivity XVII Oct. 1, 2005, Santa Fe, NM, USA. [S. 1]: IEEE, 2005: 705-708.
- [2] NI Q Q, JINEN E. Fracture behavior and acoustic emission in bending tests on single-fiber composites [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1997, 56(6): 779-796.
- [3] HAMSTAD M A. Discussion of the basic understanding of the Felicity effect in fiber composites [J]. Journal of Acoustic Emission, 1986, 5(2): 95-102.
- [4] MIKULI Ć D, MILOCANOVI Ć B, GABRIJEL I. Testing of compressive and bending strength of concrete and monitoring acoustic emission parameters [C] // NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, June 30th-July 3rd, 2009, France. Nantes, France:[s. n.]. 2009: 255-261.
- [5] ŠAJNA A, KOVA Ć J, BAJT Ž. Acoustic emission monitoring of cracking in reinforced concrete specimens [C] // 2nd International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Sept. 11-13, 2006, Quebec City, Canada. Quebec City, Canada:[s. n.]. 2006: 313-320.
- [6] ŠAJNA A, BREMEC T. Use of the acoustic technique on reinforced concrete bending loaded specimens [C] // Proceedings of the First International RILEM Symposium SACoMaTiS, Sept. 1-2, 2008, Varenna, Italy. [S. 1]: Rilem Publications S. A. R. L., 2008: 211-221.
- [7] WU Z W, SHEN G T, WANG S M. The acoustic emission monitoring during the bending test of Q235 steel box beam [C] // 17th World Conference on Nondestructive Testing, Oct. 25-28, 2008, Shanghai, China:[s. n.]. 2008: 1-6.
- [8] 罗健豪, 罗健文. 陶瓷材料三点及四点弯曲断裂强度关系之讨论 [J]. 力学与实践, 2003, 25(6): 29-30.
- LO JIAN-HAO, LO JIAN-WEN. On the relationship between 3-point and 4-point bending tests of ceramics [J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(6): 29-30.
- [9] 赵兴东, 李元辉, 刘建坡, 等. 基于声发射及其定位技术的岩石破裂过程研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 990-995.
- ZHAO XING-DONG, LI YUAN-HUI, LIU JIAN-PO, et al. Study on rock failure process based on acoustic emission and its location technique [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 990-995.
- [10] 朱维申, 郭彦双, 李术才, 等. 含边裂纹试样弯曲断裂声发射特征研究 [J]. 功能材料, 2007, 38(增刊): 3745-3748.
- ZHU WEI-SHEN, GUO YAN-SHUANG, LI SHU-CAI, et al. Study on acoustic emission properties of bending fracture of specimen with edge flaw [J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38 (Supp.): 3745-3748.
- [11] 郭彦双, 朱维申, 李术才, 等. 不同荷载作用下拉破裂的声发射特征研究 [J]. 岩土力学, 2006, 10(增刊), 1055-1058.
- GUO YAN-SHUANG, ZHU WEI-SHEN, LI SHU-CAI, et al. Acoustic emission properties of tensile fracture under different load patterns [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 10(Supp.): 1055-1058.
- [12] 李英锐. 花岗岩三点弯曲条件下声发射定位技术研究 [J]. 辽宁建材, 2008(9): 39-40.
- LI YING-RUI. Study on acoustic emission location technique in 3-point bending test on granite [J]. Liaoning Building Material, 2008(9): 39-40.
- [13] 黄志鹏, 朱可善, 郭映忠. 重庆砂岩三点弯曲断裂及声发射试验研究 [J]. 重庆建筑大学学报, 1998, 18(1): 23-26.
- HUANG ZHI-PENG, ZHU KE-SHAN, GUO YING-ZHONG. Experiments on three point bending rupture and acoustic emission of Chongqing sandstones [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1998, 18(1): 23-26.

(下转第 90 页)

- cylindrical particulate flows[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, 36(2): 93-99.
- [12] 邵雪明,张征宇. 方形粒子沉降运动特性的研究[J]. *浙江大学学报:工学版*, 2005, 39(3): 453-460.
SHAO XUE-MING, ZHANG ZHENG-YU. Research on sedimentation of rectangular particle [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2005, 39(3): 453-460.
- [13] HU H H, PATANKAR N A, ZHU M Y. Direct numerical simulation of fluid-Solid systems using the arbitrary lagrangian-euerian technique [J]. *Journal of Computational Physics*, 2001, 169(2): 127-462.
- [14] GLOWINKSI R, PAN T W, HESLA T I, et al. A fictitious domain approach to the direct numerical simulation of incompressible viscous flow past moving rigid bodied: application to particulate flow [J]. *Journal of Computational Physics*, 2001, 169(2): 363-426.
- [15] WANG Z L, FAN J R, LUO K. Combined muti-direct forcing and immersed boundary method for simulating flows with moving particles [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2008, 34(3): 283-302.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 76 页)

- [14] KAISER J. Erkenntnisse und folgerungen aus der messung von geräuschen bei zugbeanspruchung von metallischen werkstoffen [J]. *Archiv fur das Eisenhüttenwesen*, 1953, 24(1/2): 43-45.
- [15] 武晋文, 万志军, 赵阳升, 等. 高温三轴应力下花岗岩声发射中的噪声分析[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(8): 2 119-2 122.  
WU JIN-WEN, WAN ZHI-JUN, ZHAO YANG-SHENG, et al. Noise analysis of granite acoustic emission at high temperature triaxial stress[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008, 8(8): 2 119-2 122.
- [16] LAVROV A, VERVOORT A, WEVERS M, et al. Theoretical investigation of the kaiser effect manifestation in rocks after true triaxial pre-loading[J]. *Archives of Mining Sciences*, 2001, 46(1): 47-65.
- [17] STUART C E, MEREDITH P G, MURRELL SAF, et al. Anisotropic crack damage and stress-memory effects in rocks under triaxial loading[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 1993, 30(1): 937-941.
- [18] 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.  
YU XIAN-BIN, XIE QIANG, LI XIN-YI, et al. Acoustic emission of rock under direct tension, brazilian and uniaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1): 137-142.
- [19] LAVROV A, VERVOORT A, WEVERS M, NAPIER J A L. Experimental and numerical study of the kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39(3): 287-302.
- [20] 谢强, Carlos Dinis da Gama, 余贤斌. 细晶花岗岩的声发射特征试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(5): 745-749.  
XIE QIANG, CARLOS DINIS DA GAMA, YU XIAN-BIN. Acoustic emission behaviors of aplite granite[J]. *Chinese Journal of Geoenineering*, 2008, 30(5): 745-749.

(编辑 陈移峰)