岩石声发射定位技术及其实验验证

赵兴东[1,2]，刘建坡[2]，李元辉[2,3]，田 军[2]，朱万成[2]

（1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，四川 成都 610059；2. 东北大学资源与土木工程学院，辽宁 沈阳 110004；3. 中国科学院岩土力学重点实验室，湖北 武汉 430071）

摘 要：岩石是典型的非均匀脆性材料，其内部富含各种缺陷(微裂纹、空隙、节理裂隙等)，在受载破裂过程中会产生大量的声发射信号。对含不同预制裂纹及完整岩样进行单轴压缩实验，应用声发射仪器及其盖格尔（Geiger）定位算法对岩样破裂过程的裂纹扩展过程进行实验验证。实验结果表明：在单轴压缩加载条件下，含预制裂纹的岩样发生剪切破坏；完整岩样发生劈裂破坏。声发射事件的定位达到较高的精度，很好地反映了岩样内部微裂纹孕育、萌生、繁衍和扩展的三维空间演化模式，不论是含裂纹还是完整试样的声发射定位结果与实际破坏模式非常吻合，这为研究岩石破裂失稳机理提供有力的工具。

关键词：声发射；Geiger 算法；裂纹扩展；实验验证

中图分类号：TU452 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2008)10－1472－05

作者简介：赵兴东(1975－)，男，辽宁辽中人，博士，讲师，主要从事岩石失稳与控制方面的教学与研究工作。E-mail: zhaoxingdong@mail.neu.edu.cn。

Experimental verification of rock locating technique with acoustic emission

ZHAO Xing-dong[1,2]，LIU Jian-po[2]，LI Yuan-hui[2,3]，TIAN Jun[2]，ZHU Wan-cheng[2]

(1. State Key Laboratory of Geohazards Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Rock was a kind of typical inhomogeneous brittle material abundant in various deficiencies such as microcracks, gaps and joints and would generate a large quantity of acoustic emission signals during damage process under loading. Application of locating techniques with acoustic emission to monitoring rock damage was a good method to study 3D spatial evolutional pattern of microcrack initiation, propagation, expansion and breakthrough during rock failure process. The Geiger locating algorithm was used to verify the locating precision of acoustic emission generated during rock failure. It was shown that the locating precision of acoustic emission would be much better if the Geiger locating algorithm was applied. The rock acoustic emission system was accurate and could monitor the real-time microcrack propagation. The process of the acoustic emission and rock damage were consistent and the locating results could reflect the process of initial, propagation and breakthrough of microcracks accurately. The locating results of the intact specimens and the samples with pre-cracks were in acordance with the real failure pattern of rock, indicating that it was a good tool to study the rock failure mechanism.

Key words: acoustic emission; Geiger algorithm; microcrack propagation; experimental verification

0 引 言

当岩石等脆性材料受外力或内力作用，由于其本身的弹性形变、裂纹扩展，造成其材料内局部能量的快速释放而发出的瞬态弹性波的现象，称为声发射（Acoustic emission，简称AE）[1-2]，亦被称为弹性波发射。声发射是研究脆性材料失稳破裂演化过程的一个良好工具，因为它能连续、实时地监测脆性材料内部微裂纹的产生和扩展，并实现对其破坏位置的定位，这是其它实验方法都不具有的特点，已被广泛应用于研究岩石、混凝土等脆性材料的破裂失稳机理研究。目前，国内外许多岩石力学工作者，利用声发射系统研究岩石的失稳破坏，并获得了大量的研究成果

基金项目：国家自然科学基金项目（50504005）；教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目（20070145121）；国家重大技术研究发展规划（973）项目（2007CB209405）；中国科学院岩土力学重点实验室开放研究基金项目（Z110607）；国家高技术研究发展计划（863 计划）专题课题（2007AA06Z107）；教育部新世纪优秀人才支持计划（NCET-07-0163）；中国博士后基金项目（20060390973，2005038253）；沈阳市大型仪器共享项目

收稿日期：2007－12－11

[3-10]。初始裂纹的产生、扩展是诱发岩石、混凝土等脆性材料进一步破坏的根本因素，为研究岩石、混凝土等脆性材料的破裂失稳过程，必须先清楚初始裂纹的形成及扩展。因此，声发射事件定位是进行岩石破裂失稳过程研究的首要工作。

目前，按照声发射定位原理分[11-15]：区域定位法和点定位法（时差定位法）；按照声发射传感器布设位置分线性定位、平面定位、三维立方体定位。常用的几种定位方法主要有：最小二乘法（Fedorow，1974）[16]、Bayesian定位方法（Tarantola和 Valette，1982）[17]、慢度离差法[18]、相对定位法（ATD）[19]、Geiger（1912）定位方法[13]和单纯形定位方法[20]。其中，Geiger定位方法是高斯－牛顿最小拟合函数的一个应用，适用于小区域地震事件。Scholz在1968年用一组声发射探头组成探头阵，确定每个声发射事件的三维空间位置。许昭永、梅世蓉等[21]研究了在真三轴压缩条件下几种岩样的微裂纹初步定位，通过声发射事件定位能够勾勒出岩石损伤区域。Jansen D P等[22]应用声发射技术研究了岩石破裂过程中，随着时间变化，勾勒出三维微裂纹分布，描述岩石损伤累积、裂纹成核以及宏观裂纹扩展。

本文在以上研究成果基础上，应用声发射及其定位技术，对声发射的定位机理进行了分析，在此基础上实验验证了单轴压缩条件下岩样内部裂纹扩展三维空间演化过程，为研究岩石破裂失稳机理奠定了基础。

1　声发射定位算法

声发射定位算法主要有单纯形算法和Geiger算法，此二种算法均基于不同位置传感器接收到的声发射信号的时间差（本文以P波时差）来计算[23]。本文岩石声发射定位实验验证过程中采用的算法为Geiger算法。Geiger定位方法通过从一个给定的初始点（试验点）通过迭代而接近最终结果。每一次迭代，都基于最小二乘法计算一个修正向量 $\Delta\theta(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t)$，把向量 $\Delta\theta$ 加到上次迭代的结果（试验点）上，得到一个新的试验点，然后判断这个新试验点是否满足要求，如果满足要求此点坐标，即为所求震源位置；如果不满足则继续迭代。每次迭代的结果都由下面的时间距离方程式（1）产生（注意：式（1）中的 $\theta(x, y, z, t)$ 是由人为设定或迭代产生的已知数）。

$$\left[\left(x_i-x\right)^2+\left(y_i-y\right)^2+\left(z_i-z\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}=v_{\mathrm{p}}\left(t_i-t\right) \quad 。 \tag{1}$$

式中　x，y，z 为试验点坐标（初始值人为设定）；t 为事件发生时间（初始值人为设定）；x_i，y_i，z_i 为第 i 个传感器的位置；t_i 为 P 波到达第 i 个传感器的时间；v_{p} 为 P 波波速。

对于 P 波到达每个传感器的时间 t_{oi}，可以用试验点坐标计算出的到达时间的一阶泰勒展开式表示：

$$t_{oi}=t_{ci}+\frac{\partial t_i}{\partial x}\Delta x+\frac{\partial t_i}{\partial y}\Delta y+\frac{\partial t_i}{\partial z}\Delta z+\frac{\partial t_i}{\partial t}\Delta t \quad 。 \tag{2}$$

式中　t_{oi} 为第 i 个传感器检测的 P 波的到达时间；t_{ci} 为由实验点坐标计算出的P波到达第 i 个传感器时间。在式（2）中：

$$\frac{\partial t_i}{\partial x}=\frac{\left(x_i-x\right)}{vR}, \quad \frac{\partial t_i}{\partial y}=\frac{\left(y_i-y\right)}{vR},$$

$$\frac{\partial t_i}{\partial z}=\frac{\left(z_i-z\right)}{vR}, \quad \frac{\partial t_i}{\partial t}=1,$$

$$R=\left[\left(x_i-x\right)^2+\left(y_i-y\right)^2+\left(z_i-z\right)^2\right]^{\frac{1}{2}},$$

对于 N 个传感器，就可以得到 N 个方程，写成矩阵的形式：

$$A\Delta\theta=B \quad , \tag{3}$$

式中，
$$A=\begin{bmatrix}\frac{\partial t_1}{\partial x} & \frac{\partial t_1}{\partial y} & \frac{\partial t_1}{\partial z} & 1\\ \frac{\partial t_2}{\partial x} & \frac{\partial t_2}{\partial y} & \frac{\partial t_2}{\partial z} & 1\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ \frac{\partial t_n}{\partial x} & \frac{\partial t_n}{\partial y} & \frac{\partial t_n}{\partial z} & 1\end{bmatrix},$$

$$\theta=\begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\\ \Delta z\\ \Delta t\end{bmatrix}, \quad B=\begin{bmatrix}t_{o1}-t_{c1}\\ t_{o2}-t_{c2}\\ \vdots\\ t_{on}-t_{cn}\end{bmatrix} \quad 。$$

用高斯消元法求解式（3）就得到修正向量：

$$A^{\mathrm{T}}A\Delta\theta=A^{\mathrm{T}}B \quad , \tag{4}$$

$$\Delta\theta=\left(A^{\mathrm{T}}A\right)^{-1}A^{\mathrm{T}}B \quad 。 \tag{5}$$

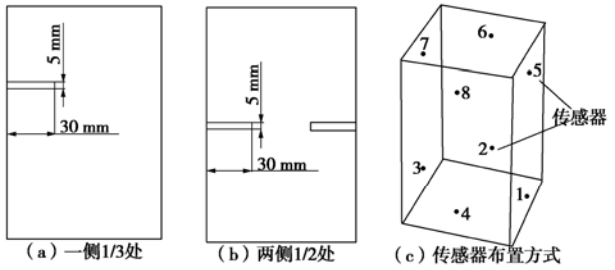
由方程（5）求出修正向量后，以（$\theta+\Delta\theta$）为新的试验点时继续迭代，直到满足误差要求。

2　岩样制作、加载条件及声发射系统

本文实验验证所采用的岩样为带预制裂纹试样和完整试样两种。带预制裂纹岩石试样尺寸为 70 mm×70 mm×150 mm（长×宽×高），所有预制裂纹的宽度为 5 mm 的一条水平裂纹，预制裂纹的位置和尺寸见图 1。花岗岩的物理力学性质见表 1。完整岩石试样为黑云母片麻岩，其尺寸为 70 mm×70 mm×150 mm（长×宽×高）。以上岩石试样均严格按照国际岩石力学会建议方法，在实验室内加工完成。

压力系统采用液压式压力实验机（NYL-500 型，最大荷载 500 t）进行加载。采用应力传感器和动态应变仪对岩石所加荷载和纵向变形进行量测；为消除压

力机压头对声发射事件的影响，在压头与试件接触部分采用橡胶材料进行隔离。



（a）一侧1/3处 （b）两侧1/2处 （c）传感器布置方式

图 1 预制侧裂纹位置、大小及传感器布置方式

Fig. 1 Size and distribution of crack and arrangement of AE sensors

表 1 花岗岩的物理力学性质

Table 1 The physical and mechanical characters of granite

岩类	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	P波波速/(m·s^{-1})	S波波速/(m·s^{-1})
花岗岩	50～86	3960	0.22	3815	2800

实验采用的声发射仪器具有八个数据采集通道，采样频率设为 2 MHz，其门槛值设定为 100 mv。所采用的声发射探头为 Nano30 型，其频域为 125 Hz～750 kHz；前置放大器型号为 1220A－AST，其增益为 40 dB；后置放大器的频率范围为 0～20 dB。此声发射系统简介见文献[24]，传感器的布置方式见图 1（c）。

3 实验结果分析

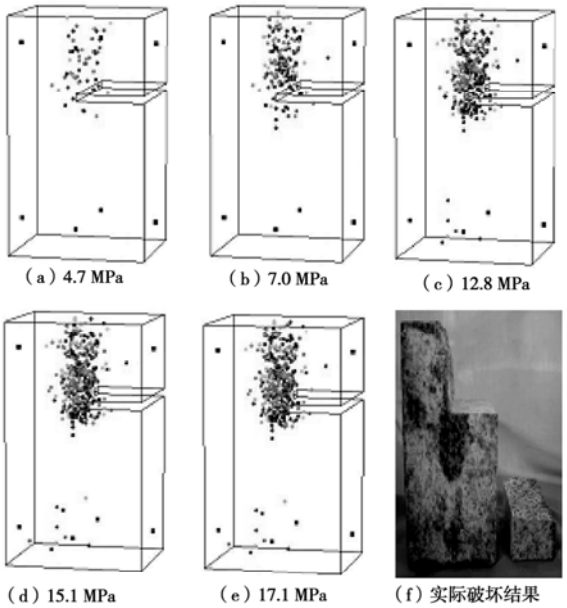
3.1 单裂纹岩样声发射定位实验验证

为了验证 Geiger 定位算法对于岩石破裂产生声发射事件的定位精度，首先实验研究了 1/3 处含有预制裂纹岩样裂纹初始、扩展情况，对其在单轴加载条件下裂纹扩展过程进行验证。

从声发射定位结果（图 2（a）～（e））可以直观看出，首先在加载方向产生初始裂纹，随着荷载的逐渐增加，裂纹也逐步开始扩展，加载至 19.2 MPa 时岩样破坏。通过应用盖格尔定位算法对产生的声发射事件进行定位，声发射事件定位直观反映了裂纹初始、扩展过程，与实际岩石破坏模式（图 2（f））是一致的，说明盖格尔定位算法对于岩石破坏声发射事件的定位已经达到较高的精度。

3.2 双裂纹岩样声发射定位实验验证

对于双侧 1/2 处带裂纹的岩石试样，在初始压密阶段岩样的定位声发射事件的数目非常少（图 3（a）），而且零乱分布于岩样内的不同位置，此阶段的应力一般在峰值应力的 15%～20%之间，这些事件的产生主要是试样中原有缺陷、微裂隙等被压密的阶段。当岩石所受应力增加到 10.7 MPa 时（峰值应力的 20%～30%）声发射事件定位开始在一个小的区域范围内集中，试样中声发射定位事件在预制裂纹下方的垂直面附近集中，说明岩样中有新的微裂纹产生，试样处于裂纹初始阶段（图 3（b））；随着载荷的增加，试样中声发射定位事件布满了预制裂纹端部下方的垂直面附近区域，说明裂纹已经由初始位置分别向水平和垂直方向扩展。随着载荷的继续增加，当岩石所受应力增加到 18 MPa 时，试样中的声发射定位事件则继续在预制裂纹端部下方垂直面附近集中，在岩石时间上产生肉眼可见的破坏裂纹（图 4）；随着荷载的增加，20.2 MPa 时（峰值应力的 50%左右），在岩样的上部也出现定位声发射事件的集中，说明此处亦有裂纹的初始与扩展（图 3（c））；在随后的加载过程中，声发射定位事件继续在裂纹的上、下积累，最终岩石内部裂纹贯通导致岩石发射失稳破坏（图 3（d）～（e）），加载至 43.1 MPa 时岩样破坏。



（a）4.7 MPa （b）7.0 MPa （c）12.8 MPa

（d）15.1 MPa （e）17.1 MPa （f）实际破坏结果

图 2 声发射定位结果及裂纹扩展过程

Fig. 2 AE locating results and crack propagation process

通过对试样定位结果和实际破坏形式的比较发现，岩石声发射系统对试样的定位过程能够很好地反映试样的实际破坏过程，而且比较准确地对试样裂纹的初始、扩展进行定位（图 3（f））。但岩石声发射系统对裂纹集中区的定位比较模糊（例如：对双侧中间含裂纹试样上部裂纹集中区的定位）。试样的破坏形式依然是以劈裂为主，但裂纹的初始在试样薄弱部位（预制裂纹的尖端）。

3.3 完整岩样声发射事件定位

本文在带预制裂纹岩样声发射定位验证结果的基础上，应用盖格尔定位算法对完整岩石失稳破坏过程也进行了实验研究。

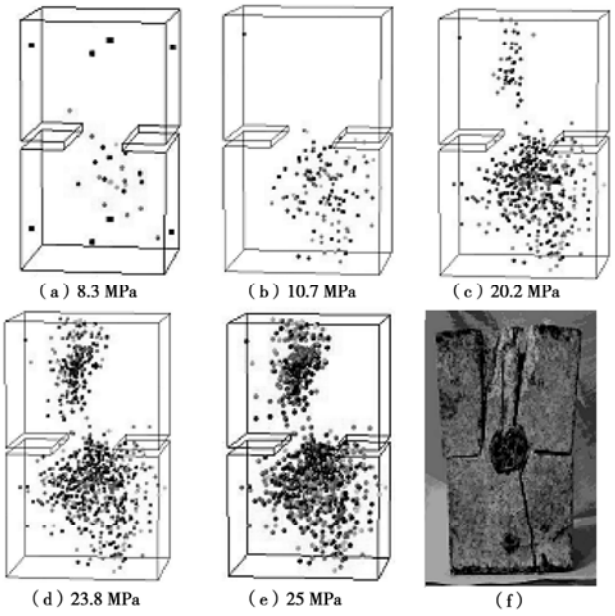


图 3 岩样声发射定位结果对比

Fig. 3 Comparison of results of AE location events in rock samples by two algorithms

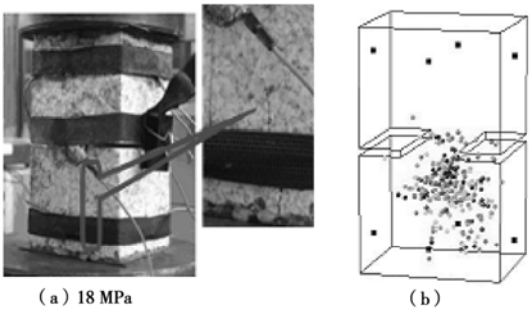


图 4 应力为 18 MPa 时试样定位结果与实际破坏结果对比

Fig. 4 Comparison of AE locating results with experimental results under stress of 18 MPa

岩样加载至 65.3 MPa 时破坏，由试样的声发射定位结果和实际结果对比图（图 5）可看出，声发射事件的定位结果和实际破坏模式吻合的非常好，同时也验证了声发射仪器对岩石的定位精度在合理的范围之内。

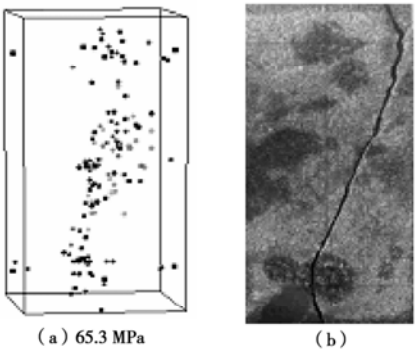


图 5 裂纹扩展过程声发射实验定位结果

Fig. 5 Test results of AE locating during process of crack propagation

4 结　　论

本文通过带侧裂纹和完整岩石受压破坏声发射实验表明：

（1）不论是含裂纹还是完整试样的声发射定位结果于实际破坏模式非常吻合，对试样的定位过程很好地反映了试样的实际破裂过程，而且准确地对试样裂纹的初始、扩展和贯通过程进行了定位。

（2）加载初期，岩样的定位声发射事件的数目非常少，而且零星分布于岩样内的不同位置，当岩石被加载到峰值应力的 20%～30%时，声发射事件定位开始在一个小的区域范围内集中，反映了岩石在此应力范围出现裂纹初始。

声发射定位算法对于岩石破裂声发射事件的定位已经达到较高的精度，直观反映了裂纹初始、扩展过程，与实际岩石破坏模式是一致的，这为研究岩石破裂失稳机理提供有力的工具。

参考文献：

[1] LOCKNER D A. The role of acoustic emission in the study of rock failure[J]. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr, 1993, **30**(7): 883－899.

[2] LOCKNER D A, BYERLEE J D, KUKSENKO V, et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. Nature, 1991, **350**(7): 39－42.

[3] 耿荣生. 声发射技术发展现状—学会成立 20 年回顾[J]. 无损检测, 1998, **20**(6): 151－154. (GENG Rong-sheng. Recent development of acoustic emission: twenty-year review of Chinese Society for NDT[J]. NDT, 1998, **20**(6): 151－154. (in Chinese))

[4] MOGI K. Study of elastic shocks caused by the fracture of betterogeneous material and its relation to earthquake phenomena[J]. Bull of the Earthquake Res Inst, 1962, **40**: 168－180.

[5] 刘新平. 单轴压缩下岩石样的声发射谱分析[J]. 声学学报, 1982, **8**: 24－32. (LIU Xin-ping. AE spectrum analyzing of rock sample under uniaxial compression condition[J]. Acoustic Journal, 1982, **8**: 24－32. (in Chinese))

[6] HOLCOMB D J. Using acoustic emissions to determine in-situ stress: problems and promise[J]. Geomechanics, ASME, AMD, 1983, **57**: 11－21.

[7] HOLCOMB D J, COSTIN L S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions[J]. Transactions of the ASME, 1986, **53**: 536－544.

[8] MU Yu-hai, YANG Qing, YAO Ying-xue, et al. Monitoring of

grinding process with acoustic emission signals[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1994, E-1(2): 48 – 51.

[9] CHANG S H, LEE C I. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, **41**: 1069 – 1086.

[10] MANSUROV V A. Acoustic emission from failing rock behavior[J]. Rock Engineering, 1994, **27**(3): 173 – 182.

[11] 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 Zhen-yang. Acoustic emission character of rock materials failure during various stress states[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, **20**(2): 82 – 85. (in Chinese))

[12] 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): 2499 – 2503. (LI Shu-lin, YIN Xian-gang, WANG Yong-jia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(15): 2499 – 2503. (in Chinese))

[13] GEIGER L. Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only[J]. Bull St Louis Unic, 1912(8): 60 – 71.

[14] JERZY Slawonir, KIJKO Andrzej. 矿山地震学引论[M]. 修济刚, 徐 平, 杨心平, 译. 北京: 地震出版社, 1998. (JERZY Slawonir, KIJKO Andrzej, An introduction to mining seismology[M]. XIU Ji-gang, XU Ping, YANG Xin-ping, translators. Beijing: Seismic Publishing House, 1998. (in Chinese))

[15] 雷兴林, 马 瑾. 岩石声发射三维定位及波速场联合反演[C]// 全国第二届构造物理学术讨论会文集[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 186 – 195. (LEI Xing-lin, MA Jin. 3-location of rock acoustic emission and combined inversion of wave-velocity filed[C]// Third Tectonic Physic Academic Seminar[M]. Beijing: Seismic Publishing House, 1989: 186 – 195. (in Chinese))

[16] FEDOROW V V. Regression problems with controllable variables subject to error[J]. Biometrika, 1974(61): 49 – 55.

[17] TARANTOLA A, VALETTE B. Inverse problem=quest for information [J]. J Geophys, 1982, **50**: 159 – 170.

[18] 蒋海昆, 张 流, 王 琦. 实验室声发射三维定位及标本波速场各向异性研究[J]. 地震, 1999, **19**(3): 245 – 252. (JIANG Hai-kun, ZHANG Liu, WANG Qi. 3-D location of acoustic emission and study on the anisotropic velocity structure in the sample[J]. Earthquake, 1999, **19**(3): 245 – 252. (in Chinese))

[19] 胡新亮, 马胜利, 高景春, 等. 相对定位方法在非完整岩体声发射定位中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 277 – 283. (HU Xin-liang, MA Sheng-li, GAO Jing-chun, et al. Location of acoustic emission in non-integral rock using relative locating method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(2): 277 – 283. (in Chinese))

[20] NELDER J, MEAD R. A simple method for function minimization[J]. Computer J, 1965, **7**: 308 – 312.

[21] XU Zhao-rong, MEI Shi-rong, ZHUANG Can-tao, et al. Preliminary location of microcracks in several rock specimens under true triaxial compression[J]. Acta Seiamologica Sinica, 1994, **7**(S): 702 – 709.

[22] JANSEN D P, CARLSON S R, YOUNG R P, et al. Ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of thermally induced microcracks in Lac du Bonnet granite[J]. J Geophys Res, 1993, **98**(B12): 22231 – 22243.

[23] SPENCE W. Relative epicenter determination using P-wave arrival time differences[J]. Bull Seism Soc Am, 1980(70): 171 – 183.

[24] 赵兴东, 李元辉, 袁瑞甫, 等. 基于声发射定位的岩石破裂动态演化过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(5): 944 – 950. (ZHAO Xing-dong, LI Yuan-hui, YUAN Rui-fu, et al. Study on crack dynamic propagation process of rock samples based on acoustic emission location[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(5): 944 – 950. (in Chinese))