

# 基于矩张量分析的花岗岩破裂声发射特征试验

徐世达, 李元辉, 刘建坡, 黄文柏

(东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点试验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 基于声发射定位技术和矩张量分析方法, 对在单轴加载条件下岩石破裂过程中的裂纹破裂机制及时空分布特征进行试验研究. 借助 CAD 软件展示不同破裂机制的声发射事件, 直观反映裂纹破裂类型. 研究表明: 单轴压缩加载试验中, 花岗岩试样破裂以剪破坏为主, 但岩石微裂纹的破裂类型所占比例并不固定, 岩石内部微裂纹破裂类型与岩石材料的力学环境有关; 花岗岩作为一种脆性岩石, 破裂不符合格里菲斯强度准则认为的脆性材料都是拉伸破坏的基本观点, 证明格里菲斯强度准则对于均质度不高的脆性岩石的适用性有一定的局限; 花岗岩单轴压缩试验中, 试样的破坏类型与其应力水平没有关系, 3 种类型的声发射事件随应力增大的变化趋势相似.

**关 键 词:** 岩石; 声发射; 矩张量; 裂纹; 破裂类型

**中图分类号:** TU 45      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2014)03-0433-05

## Experiment of Characteristics of Acoustic Emission During Granite Fracture Based on Moment Tensor Analysis

XU Shi-da, LI Yuan-hui, LIU Jian-po, HUANG Wen-bai

(Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Shi-da, E-mail: syxushida@163.com)

**Abstract:** Based on the acoustic emission (AE) location technology and moment tensor analysis method, the experiment study of fracture mechanism and time and space distribution characteristics of the cracks during fracture process of rock specimens under uniaxial compression was conducted. The acoustic emission events with different fracture mechanisms can be used to identify the forms of the cracks directly with the help of CAD software. The results show that shear failure was more than other failure types in granite sample under uniaxial loading. However, the form of microcrack that may have no fixed proportion is determined by its mechanics environment. It is a phenomenon that, the brittle fracture of granite does not agree with the Griffith strength criterion where the fracture is considered to be caused by tensile in brittle materials, thus clarifying the limitations of the Griffith strength criterion. AE generated by different sample types fracture, which is independent of the stress level, has similar trend in the increasing stress during uniaxial loading of granite.

**Key words:** rock; acoustic emission(AE); moment tensor; crack; fracture type

岩石是一种复杂的自然地质体, 内部必然含有各种各样的缺陷(如微裂纹、微损伤). 在室内对岩石试样加载时, 内部微裂纹的产生、扩展、累积和贯通会导致破坏的发生, 岩石这种内部微破裂诱发的弹性波, 即为岩石的声发射. 如果把岩石微破裂产生的声发射看成是改变尺度的微小地

震, 那么整个岩石岩样的破裂过程就可以看作是一个独立完整的强震系列<sup>[1]</sup>. 如果将地震学中破裂机制反演方法引入声发射研究, 就可获得微破裂机制, 对分析力学过程及裂纹扩展很有帮助.

矩张量是岩石破裂震源等效力的概念, 就如同应力张量一样. 岩石在应力作用下, 依据破坏准

则,可以获得岩石破裂的破裂类型和破裂面. 因此,对矩张量结果进行一定的处理也可以获得相应的岩石破裂类型和破裂面方位信息. Feignier 等将矩张量分解为各向同性部分和偏矩部分,根据各向同性部分矩张量的比重来量化震源破裂类型<sup>[2]</sup>. Aki 等提出剪切破裂和张拉破裂的矩张量本征值表达式,考虑岩石破裂过程中主矩方向和大小一定的条件,认为剪切破裂和张拉破裂的矩张量形式具有相同的主轴方向<sup>[3]</sup>. Ohstu 在使用声发射理论研究岩石破裂,进行岩石破裂类型判别标准计算的时候考虑了剪切破裂部分  $M^{DC}$ 、张拉破裂部分  $M^{CLVD}$  和  $M^{ISO}$ ,介绍了矩张量三个特征值矢量、运动方向矢量和破裂面法向矢量的定性关系<sup>[4]</sup>. Ohno 通过四点弯曲试验和水压致裂试验,用声发射参数定义破坏类型的方法验证了借助格林函数定义破坏类型方法的可行性<sup>[5]</sup>. 曹安业根据基于相同最大主轴方向的矩张量分解方法的结果,通过人工合成的 2 种采动煤岩破裂模型,理论模拟并探讨了矩张量在矿山采动煤岩破裂类型分析中的可靠性和适用性<sup>[6]</sup>.

本文基于声发射监测定位技术,动态监测裂纹的扩展过程,运用 SIGMA (simplified Greens functions for moment tensor analysis) 矩张量分析方法,对微破裂产生的声发射事件进行计算,分析裂纹扩展受力类型,结合 AutoCAD 系统,对微裂纹破裂机制进行直观展示.

1 矩张量分析方法

根据声发射理论,监测到的声发射信号是岩石内部裂纹动态扩展产生的. SIGMA 分析方法包含声发射定位和矩张量分析两方面,需要提取初动时间和初动振幅两个参数. SIGMA 分析方法应用基于赤池信息准则的智能方法提取初动时间,应用单纯形算法反演声发射源位置,进而实现声发射定位<sup>[7]</sup>. Ohstu 等引入脉冲格林函数进行矩张量分析,认为式(1)左侧可用初动振幅替代<sup>[8]</sup>:

$$A(\mathbf{x}) = C_s \frac{Ref(\mathbf{t}, \mathbf{r})}{R} r_p r_q M_{pq}. \tag{1}$$

式中: $A(\mathbf{x})$ 为声发射信号初动振幅; $C_s$ 为声发射传感器灵敏度和材料常数的校准系数;反应系数  $Ref(\mathbf{t}, \mathbf{r})$  是  $\mathbf{t}$  为传感器灵敏度方向时获得的; $M_{pq}$ 是矩张量; $\mathbf{r}$ 是由声发射源至传感器位置距离  $R$  的方向矢量. 矩张量是一种二维张量数学形式,具有 9 个分量,由于等效力、角动量守恒导致了矩张量的对称性,因此,9 个分量元素中只有

6 个独立分量. 这就要求至少 6 个传感器接收到同一破裂的声发射信号,才能计算该声发射源的矩张量. 矩张量分析引入反应剪破坏和拉破坏的特征值(见式(2)~式(4))划分裂纹类型:

$$\lambda_{max}/\lambda_{max} = 1 = X + Y + Z; \tag{2}$$

$$\lambda_{int}/\lambda_{max} = 0 - 0.5Y + Z; \tag{3}$$

$$\lambda_{min}/\lambda_{max} = -X - 0.5Y + Z. \tag{4}$$

式中: $X$ 代表剪切成分; $Y$ 代表拉应力成分; $Z$ 代表流体静力学中的拉应力成分. SIGMA 分析方法认为  $X > 60\%$  时,声发射源是剪切破坏,剪应力集中产生剪裂纹; $40\% < X < 60\%$ ,声发射源是混合破坏,产生混合裂纹; $X < 40\%$ ,声发射源是拉破坏,拉应力集中产生拉裂纹. 裂纹运动矢量  $\mathbf{l}$  和裂纹表面方向向量  $\mathbf{n}$  是由 3 个特征向量  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$  (见式(5)~式(7))确定的, SIGMA 分析方法流程见图 1,表现形式见图 2.

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{l} + \mathbf{n}, \tag{5}$$

$$\mathbf{e}_2 = \mathbf{l} \times \mathbf{n}, \tag{6}$$

$$\mathbf{e}_3 = \mathbf{l} - \mathbf{n}. \tag{7}$$

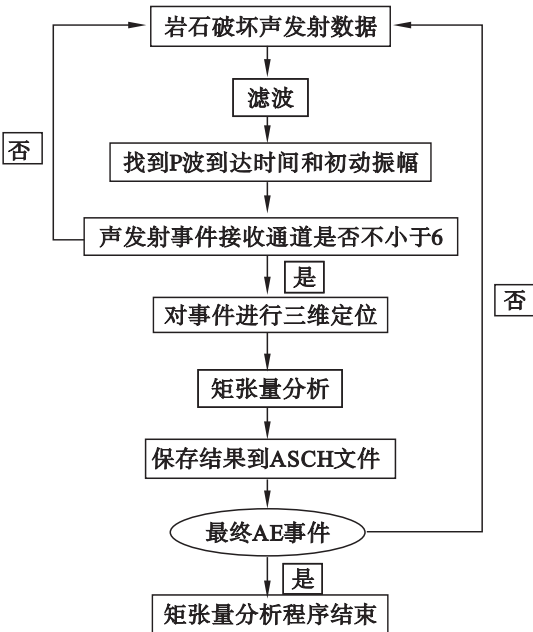


图 1 矩张量分析流程

Fig. 1 Moment tensor analysis procedure



图 2 三种典型破裂类型图

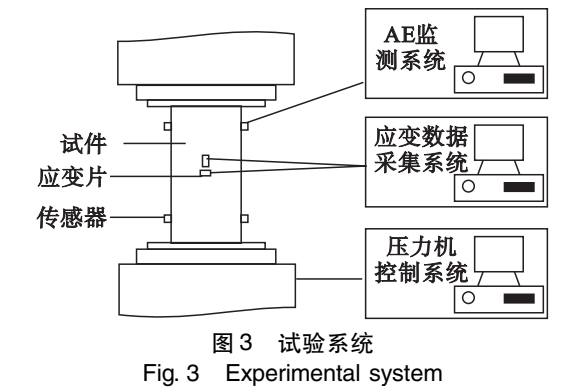
Fig. 2 Three typical fracture type

2 岩样制作及试验系统

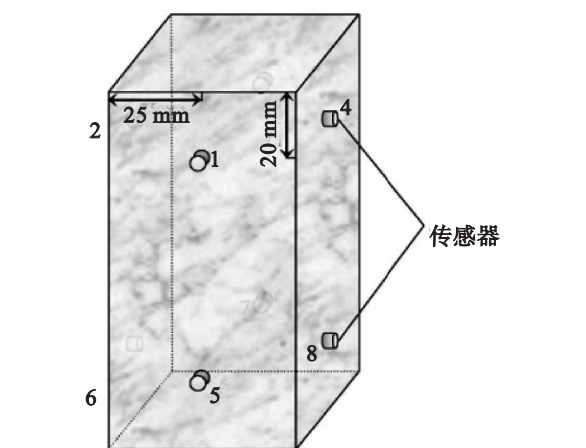
本文以沈阳地区新鲜花岗岩为研究对象,该

花岗岩主要矿物为石英、斜长石,次要矿物为黑云母和角闪石,中粗粒结构,呈灰白色,岩体致密坚硬.在试验室内加工5块岩样,岩样尺寸为50 mm×50 mm×100 mm(长×宽×高),试件表面抛光,其平行度、平整度和垂直度都符合试验规程.

试验采用加载系统为YAG-3000 伺服控制岩石刚度试验机,单轴加载,加载速率为40 kN/min.声发射监测系统为美国物理声学公司(Physical Acoustic Corporation, PAC)生产的Sensor highway-II(SH-II)型声发射系统,该系统采用18位A/D转换技术,能够实时采集声发射瞬态波形、同步提取声发射信号特征,可用于声发射试验研究.设定声发射测试分析系统的主放为40 dB,门槛值为50 mV,采样频率为2.5 MHz,采样长度8 k,以期获得高精度声发射到达时间,试验系统如图3所示.



本试验采用8个Nano30型传感器进行声发射信号的采集,该传感器的频率响应范围为125~750 kHz;每个传感器均配置1220A-AST型前置放大器.为提高声发射信号的接收质量,采用橡胶带固定传感器,并在传感器与试件的接触部位涂抹黄油进行耦合<sup>[9]</sup>.传感器布置在岩石上、下部的四周(见图4).



### 3 试验结果与分析

在压力机上对花岗岩试样进行单轴压缩加载,应用单纯形算法实现声发射事件的空间定位;借助Matlab软件,提取声发射信号初动时间和初动振幅,进行矩张量分析;通过CAD将声发射事件破裂类型显示,试验研究了裂纹的破裂类型并进行分析.

图5为花岗岩试样受载过程中的载荷、声发射变化曲线.加载初期试件的上部有少量量的声发射事件,主要是由试件内部的微裂纹压密闭合或滑移产生的;随加载的进行,试样应力水平处于试样峰值应力的20%~39%时,声发射率达到最小值,此阶段属于弹性变形阶段;当试样承受应力达到峰值应力的66%时,其声发射撞击率急剧增加,试样内部产生大量的微裂纹,裂纹相互融合、贯通,声发射事件率达到峰值并且以一定的速率降低,直至试样破坏.

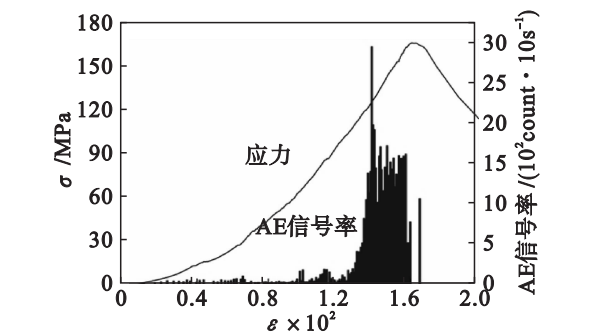


表1是试样经矩张量分析确定的不同破坏类型所占比例.在单轴压缩加载试验中,103试样的声发射事件是由剪破裂产生的,21.2%的声发射事件是由拉破裂产生的,10.3%的声发射事件是由混合破裂产生的.剪切破裂产生的声发射事件数远大于拉破裂和混合破坏产生的声发射事件数,这说明声发射事件主要产生于试样内

| 表1 声发射事件破裂类型比例                               |       |       |        |
|--|-------|-------|--------|
| Table 1 Ratio of fracture types of AE events |       |       |        |
| 名称   | 剪破坏/% | 拉破坏/% | 混合破坏/% |
| 101  | 68.5  | 21.2  | 10.3   |
| 102  | 71.9  | 18.8  | 9.3    |
| 103  | 69.4  | 20.8  | 9.8    |
| 104  | 70.3  | 19.9  | 9.8    |
| 105  | 69.5  | 20.5  | 10.0   |
| 平均   | 69.9  | 20.2  | 9.9    |

部的剪切破坏,只有较少部分的声发射事件是由拉破裂或者混合破裂产生的.这与格里菲斯强度准则认为对于脆性材料而言,不论何种应力状态,材料都是因裂纹尖端附近达到极限应力而断裂开始扩展的基本观点不一致. Kentaro 等应用 SIGMA 方法测得水压致裂试验中剪裂纹占裂纹总数的 62.78%,拉裂纹占 16.6%,混合裂纹占 20.62%<sup>[5]</sup>. Masayasu 等巴西盘劈裂试验中 50% 以上的声发射事件被定义为拉裂纹产生的<sup>[10]</sup>. 由此可以看出,试样加载至破坏的过程中,产生声发射的裂纹破裂类型并没有固定的比例,各破裂类型所占的比例与试样的加载条件即岩石的力学环境有关,格里菲斯强度理论对于均质度不高的脆性岩石的适用性存在一定的局限.

从试验结果(见图 6)可以看出,加载初期,声发射事件零散分布在事件上部,不同破裂类型的

声发射事件数目相差不大;当试样应力水平为峰值应力的 30% ~ 70% 时,3 种破裂类型的声发射事件数目相差仍然不大,并且保持在较低水平;试样承受应力达到峰值强度的 80% 时,剪切破坏声发射事件大幅增长,试样内部的微裂纹相互贯通,声发射事件形成了明显的聚集区域,与照片中的破碎带一致(见图 6f),而另外 1 条裂纹及 2 条裂纹交汇处的顶端区域,是应力达到峰值强度以后瞬间产生的,较短时间内产生了明显的宏观裂纹,声发射仪器未能有效捕捉、识别该破坏带.矩张量分析的声发射事件主要是由剪切破坏产生的,虽然其他破坏类型的声发射事件数目较少,但在加载过程中,变化趋势与剪切声发射事件变化趋势相似(见图 7),说明花岗岩单轴压缩试验中,试样的破坏类型与其应力水平没有关系,3 种类型的声发射事件变化趋势相似.

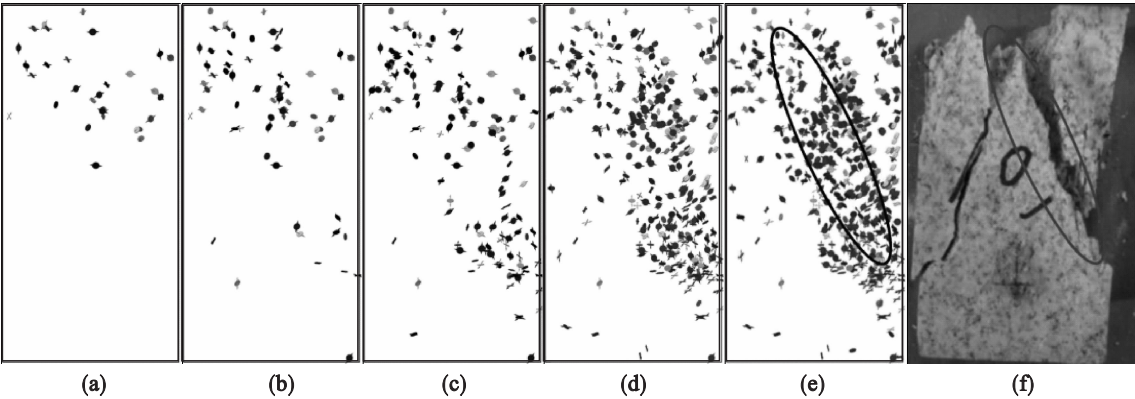


图 6 不同应力水平 103 试样声发射事件矩张量分析结果  
Fig. 6 Moment tensor analysis results of sample 103 under different stress levels  
(a)—10%; (b)—40%; (c)—70%; (d)—80%; (e)—100%; (f)—实物图.

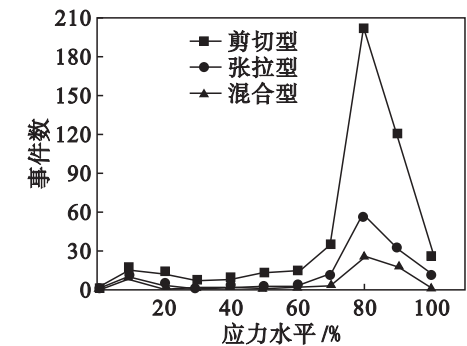


图 7 不同应力水平声发射事件破裂类型  
Fig. 7 AE event fracture types at different stress levels

4 结 论

1) 单轴压缩加载试验中,花岗岩试样破裂以剪破坏为主,但是岩石微裂纹的破裂类型并无固

定的比例,岩石内部微裂纹破裂类型与岩石材料的力学环境有关.

2) 花岗岩作为一种脆性岩石,破裂不符合格里菲斯强度准则中认为的脆性材料都是拉伸破坏的基本观点,证明格里菲斯强度准则对于均质度不高的脆性岩石适用性存在一定的局限.

3) 花岗岩单轴压缩试验中,试样的破坏类型与其应力水平没有关系,3 种类型的声发射事件随应力增大的变化趋势相似.

参考文献:

[ 1 ] 梁正召,唐春安,朱万成,等. 岩石非均匀性对震级 - 频度关系的影响的数值模拟 [ J ]. 地震研究, 2003, 26 ( 2 ) : 151 - 155.  
(Liang Zheng-zhao, Tang Chun-an, Zhu Wan-cheng, et al. Numerical simulation for the influence of rock heterogeneity to the relation between magnitude and frequency [ J ]. Journal

[ 10 ] Masayasu O, Yuma K. AE-SIGMA analysis in Brazilian test and accelerated corrosion test of concrete [ R ]. Vienna: European Working Group on Acoustic Emission, 2010.



[10] Blankertz B, Muller K R, Krusienski D J, *et al.* The BCI competition III: validating alternative approaches to actual BCI problems[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2006, 14 (2) : 153 – 159.