

刘培洵,陈顺云,郭彦双等. 2014. 声发射矩张量反演. 地球物理学报, 57(3):858-866, doi:10. 6038/cjg20140315.

Liu P X, Chen S Y, Guo Y S, et al. 2014. Moment tensor inversion of acoustic emission. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(3):858-866, doi:10. 6038/cjg20140315.

## 声发射矩张量反演

刘培洵<sup>1</sup>, 陈顺云<sup>1</sup>, 郭彦双<sup>1</sup>, 李普春<sup>1,2</sup>

1 中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

2 厦门地震勘测研究中心, 厦门 361021

**摘要** 地震矩张量反演是获取震源过程的有效方法. 岩石变形过程中的声发射与地震类似, 均是弹性应变能快速释放. 如假设条件得到满足, 矩张量反演方法同样可用于了解声发射震源过程. 声发射矩张量反演可使用 P 波位移进行计算. 当样品尺寸远大于声发射波长, 且声发射由微破裂产生, 声发射源的尺度很小时, P 波矩张量反演可采用远场近似. 本文首先针对声发射的特点, 实现根据远场 P 波反演声发射矩张量的算法, 并通过人工声发射实验对算法的正确性和可靠性进行了检验. 最后, 用声发射矩张量反演方法对花岗岩单轴压缩实验的声发射源特征进行了分析. 结果表明: 对于纯剪切破裂模式, 声发射矩张量反演可得断层面; 对于非纯剪切破裂模式, 如纵向挤压导致的横向张性劈裂, 由于存在多解性不能得到断层面, 但可通过矩张量的迹区分破裂模式.

**关键词** 声发射, 震源机制, 矩张量反演, 破裂模式

doi:10. 6038/cjg20140315

中图分类号 P315

收稿日期 2013-06-21, 2013-10-09 收修定稿

### Moment tensor inversion of acoustic emission

LIU Pei-Xun<sup>1</sup>, CHEN Shun-Yun<sup>1</sup>, GUO Yan-Shuang<sup>1</sup>, LI Pu-Chun<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 Xiamen Research Center of Seismology Survey, Xiamen 361021, China

**Abstract** Seismic moment tensor inversion is an effective method to get the process of earthquake sources. Acoustic emission (AE) during the deformation of rock is resulted from the rapid release of elastic strain energy, which is similar to earthquakes. The method can also be applied to calculate the process of AE sources if the assumptions are met. AE moment tensor inversion can be calculated by the displacement of P-wave. And the far-field approximation can be used to P-wave moment tensor inversion when the sample size is much larger than the wavelength of AE produced by the micro-fractures of enough small sizes. The algorithm of AE moment tensor inversion is developed by use of P-waves of the far field on the base of the features of AE, and its accuracy and reliability is tested through the experiments of artificial AE sources. Finally, the moment tensor inversion method is applied to analyze the properties of AE sources in granite sample under uniaxial compression. The results show that a fault plane can be well obtained by the AE moment tensor inversion for the pure shearing fracture mode, but not for non-pure shearing fracture mode because of multiple solutions, such as the transverse splitting micro-fractures caused by vertical compression, etc. However, the fracture mode can be distinguished easily according to the traces of AE moment tensors.

**基金项目** 国家自然科学基金项目(41274187, 40874096)资助.

**作者简介** 刘培洵, 男, 1963 年生, 中国地震局地质研究所副研究员, 主要从事构造物理实验研究, 侧重于岩石变形过程中热红外和声发射的研究. E-mail: liupeixun@sina.com

**Keywords** Acoustic emission, Focal mechanism, Moment tensor inversion, Fracture mode

## 1 引言

地震预测的难点,不仅在地震物理过程复杂性和地球不可入性,也因为地震事件本身少见,强烈地震研究的成果积累缓慢.与天然地震不同,实验研究可多次重复进行,可以按照实验者的意愿改变.开展实验模拟常常是了解地震过程不可或缺的工作之一.岩石受力变形过程中产生微破裂的同时会发出超声波,即声发射.声发射的产生机理同地震有一定的相似性.声发射的很多特点与地震类似,如震级频度关系、波形特征和传播方式等,是“微缩版”的地震.研究岩石变形过程的声发射对地震研究有很大帮助.常用的地震研究手段在声发射研究上都有涉及,如空间定位、 $b$  值统计、分维特性研究和频谱分析等.但对于声发射源震源机制的研究和应用还不够充分.而这方面工作又是通过实验手段探索震源力学机制所亟需的内容.

震源机制解是地震学的重要方法,常用的是断层面解.  $P$  波是纵波,其初动方向只有两种可能,一种是朝向源的方向,另一种是远离源的方向.如果地震是由剪切位错产生的,那么与双力偶等效, $P$  波初动方向在空间上呈四象限分布,由此可推测出一对相互垂直的节面,这两个节面之一就是断层面.一些学者很早就开始根据  $P$  波初动方向来计算声发射震源机制解(Kuwahara et al., 1985; Satoh et al., 1990; Lei et al., 1992; Zang et al., 1998; 宋富喜和马胜利, 2004). 但声发射观测系统传感器数量通常不多,根据少数一些点的初动方向,很难精确勾勒出节面的空间分布,并且这种方法仅适用于  $P$  波初动方向是四象限分布的情况,如纯剪切源.矩张量反演方法是当代地震学的重要成果,基于弹性波动力学发展起来,现已成为地震震源分析的常规手段.矩张量反演方法更多的利用了波形的信息,且无须等效双力偶假定,既适用于剪切破裂模式,也适用于张裂等其他破裂模式,较  $P$  波初动方向法有明显的优势.基于弹性波动学的矩张量反演方法同样可用于声发射, Ohtsu 早在 1991 年就将矩张量反演方法引入声发射研究,然而声发射震源机制的发展并不顺利.与地震研究相比声发射矩张量反演有两方面困难:其一是地震发生在地壳深部高围压下,都以剪切破裂为主,而实验室岩石破裂有多种模式,复杂得

多.其二是受观测设备所限.高频数据采集噪声较大,且由于数据带宽的限制高频采集很难在保证精确时钟同步的前提下实现较多的通道.通道少、噪声大,声发射矩张量反演可靠性常无法保证,甚至都不能准确定位.可喜的是随着电子技术的进步,观测设备有了较大的改善.声发射矩张量反演方法的应用研究也逐渐成为热点(Ohtsu, 1991, 1995; Yuyama et al., 1999; Dahm et al., 1999; Manthei et al., 2001; Shigeishi and Ohtsu, 2001; Carvalho and Labuz, 2002; Chang and Lee, 2004; Yu et al., 2005; Grosse and Finck, 2006; Grosse and Ohtsu, 2008; Kawasaki et al., 2010; Graham et al., 2010; Kao et al., 2011). 尽管如此,声发射震源机制解的可靠性仍是值得注意的问题.

声发射矩张量反演同地震矩张量反演方法基本相同,但也有其特殊性和难点.本文首先论述声发射矩张量反演实现方案,然后利用声发射人工激发实验对算法的正确性和可靠性进行检验,最后介绍声发射矩张量反演在花岗岩单轴压缩实验中的应用.

## 2 声发射矩张量反演的实现

矩张量反演的理论基础是弹性波动力学.与地震波一样,声发射也属于弹性波范畴.厘清二者边界条件的差异后,地震学中发展较为成熟的矩张量理论,也可用于声发射的研究.本文中主要考虑均匀介质下的点源矩张量反演.

### 2.1 点源远场 $P$ 波的矩张量反演理论

矩张量反演针对的是一个“内源”,即振动源位于样品内部一个有限的体积内.对于“内源”总动量及总角动量必须守恒,也就是说源的等效体力的合力为零,并且合力矩为零(Aki and Richards, 1980).当震源的尺度远小于观测距离和地震波波长时,源可视为点源.此时,源的非弹性变形特性可用矩张量来描述.  $t$  时刻在场点  $x$  处  $i$  方向的位移可表示为:

$$u_i(x, t) = \int_0^t dt_0 G_{ip,q}(x, t; \xi, t_0) M_{pq}(t_0),$$

其中,  $G_{ip,q}(x, t; \xi, t_0)$  是格林函数,是  $t_0$  时  $\xi$  处 ( $p, q$ ) 方向等效力矩在  $t$  时刻  $x$  处  $i$  方向的位移响应.格林函数描述的是传播介质对等效力矩的响应.  $M_{pq}(t_0)$  称为矩张量,是源的力学描述,是由源非弹性变形导出的一系列等效力偶来表达.点源矩张量是二阶张

量. 对于力的三个分量和三个可能的力臂方向, 有 9 个广义力偶, 矩张量是 9 个力偶的线性组合. 矩张量是二阶对称张量, 有 6 个独立分量. 张裂源、剪切源和爆炸源是三种典型的震源, 在主轴坐标系中, 矩张量可表示为:

$$\text{张裂源} \begin{bmatrix} \lambda DA & 0 & 0 \\ 0 & \lambda DA & 0 \\ 0 & 0 & (\lambda + 2\mu) DA \end{bmatrix},$$

$\lambda, \mu$  是拉梅常数,  $D$  是错距,  $A$  是面积.

$$\text{剪切源} \begin{bmatrix} \mu DA & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\mu DA \end{bmatrix}.$$

$$\text{爆炸源} \begin{bmatrix} \Delta P & 0 & 0 \\ 0 & \Delta P & 0 \\ 0 & 0 & \Delta P \end{bmatrix},$$

其中  $\Delta P = \left(\lambda + \frac{2}{3}\mu\right)\theta^T V$ ,  $\theta^T$  是非弹性体应变,  $V$  是体积.

地震矩张量反演有多种选择, 可使用体波或是面波. 而实验室中与地震相比一个很大的不同是实验样品都比较小, 除直达波外, 后续震相很可能会受到样品界面反射的影响, 十分复杂, 很难使用. 为此矩张量反演仅使用直达的体波, 且仅使用不会受反射波影响的很短的一段波形. 声发射传感器通常是单分向压电陶瓷传感器, 尽管也有利用不同振动模式的压电陶瓷制作的三分向传感器, 但其需要占用 3 个采样通道, 在采样通道较少的情况下这往往得不偿失, 并且压电陶瓷振动模式的不同, 必然导致各采集通道间的一致性变差, 故很少采用. 使用单分向传感器不能得到 S 波的偏振方向, 较为可行的办法是仅使用 P 波进行反演.

根据均匀、各向同性、无限介质中弹性动力学 Green 函数的解, 声源辐射的 P 波位移场表示为近场项、中场项及远场项之和. 近场项衰减很快, 位移与传播距离的 4 次方成反比, 中场项位移与传播距离的 2 次方成反比, 远场项位移与传播距离成反比. 声源辐射的位移场在距声源较远时, 近场项和中场项因衰减消失, 仅剩远场项. 只用远场 P 波反演矩张量, 计算十分简洁. 以声发射源为原点的球坐标系下, 远场 P 波位移可表示为:

$$u_r^p = \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3 r} \dot{M}_r \left(t - \frac{r}{\alpha}\right),$$

其中,  $u_r^p$  是距源  $r$  处的 P 波位移,  $\rho$  为传播介质密度,  $\alpha$  为 P 波波速,  $\dot{M}_r$  是球坐标系下矩张量径向分

量对时间的导数 (Aki and Richards, 1980). 矩张量有 6 个独立分量, 根据上述公式, 如已知 6 个以上测点的 P 波位移就可反演矩张量.

使用远场 P 波反演矩张量易于实现. 但问题是实验样品通常不大, 传感器离声源的距离是否能满足远场条件? 由弹性动力学导出的远场条件为: “到源的距离大于几个波长的所有位置” (Aki and Richards, 1980). 因此, 是否满足远场条件取决于声发射的波速、频率和传感器同震源的距离. 以一次花岗岩单轴压缩实验为例, 岩石微破裂产生的声发射主频约 400 kHz, P 波速度 5.6 km/s. 由此可得声发射波长约 14 mm. 对于直径 50 mm、长 135 mm 的圆柱形样品, 大多数传感器可近似满足远场条件. 当声发射频率较低且样品很小时, 远场假定无法满足, 反演误差将增大.

## 2.2 利用点源远场 P 波反演声发射矩张量的一些考虑和限制

声发射矩张量反演同地震矩张量反演相比有一些不同, 如频率高、样品小、常使用单分向传感器等. 声发射矩张量反演需考虑以下问题:

### (1) 点源远场 P 波反演声发射矩张量的限制

利用点源远场 P 波反演声发射矩张量未知数较少, 易于实现. 但必须满足一些假设条件. 点源假定要求源的尺度远小于观测距离和声波波长. 因此在实验室小尺度实验中, 这一方法仅适用于微破裂产生的声发射, 不适用研究一些大尺度的位错. 另外实验样品尺寸要远大于声发射波的波长, 这样传感器与源的距离才可能满足远场假定.

### (2) P 波位移的获取和相对矩张量

对于微破裂, 位错时间极短, 可近似认为矩张量的时间函数是阶跃函数,

$$\text{即} \begin{cases} M(t) = MH(t), \\ \dot{M}(t) = M\delta(t), \end{cases}$$

其中  $H(t)$  是阶跃函数,  $\delta(t)$  是脉冲函数. 由于远场 P 波位移取决于矩张量随时间的变化率, 因此远场 P 波位移是脉冲信号. 此时可使用 P 波初动位移峰值进行矩张量反演. 在声发射研究中仅使用初动位移峰值进行矩张量反演比较普遍 (Ohtsu, 1991, 1995; Yuyama et al., 1999; Manthei et al., 2001; Shigeishi and Ohtsu, 2001; Carvalho and Labuz, 2002; Chang and Lee, 2004; Grosse and Ohtsu, 2008; Kao et al., 2011), 其优点是可避免复杂的样品表面反射波的影响以及 S 波等后续震相的影响, 并且计算简单.

声发射系统采集到的信号是电压信号,需要转换为位移.一些传感器的生产厂家提供了传感器的频响曲线,可作为转换的依据.在进行了适当的变换后可近似认为声发射信号的采样值同传感器敏感方向的位移成正比.此次实验我们使用的是厚度伸缩式压电陶瓷传感器,仅对压电片法向方向的振动敏感.

影响声发射信号强弱的因素很多,传感器、放大器及粘结剂都对观测结果有很大影响.但高频的声发射系统难于标定,很难得到观测点准确的真实位移,我们采用相对矩张量反演的方法,首先尽量保证各采集通道一致,必要时可进行相对标定.然后使用相对位移来反演相对矩张量,忽略其绝对大小,侧重张量场的形状、方位及相对大小.

### (3) 传感器布局

矩张量表示的是三维球面不同方位的等效力偶,在布设传感器时要尽可能均匀覆盖整个球面,避免方程组病态使误差放大.

### (4) 显著性检验

一次实验通常可记录到成千上万个声发射波形,这意味几乎不可能使用人工肉眼识别的方法来识别到时和初动峰值,通常要依赖于计算机程序自动处理,这增大了反演结果的不确定性.必须对定位和矩张量反演结果都进行较严格的显著性检验,仅保留通过检验的结果,减小不确定性.

## 2.3 声发射矩张量的图形显示

在地震学中通常使用黑白震源球表示震源机制解,即使用吴尔夫网或施密特网绘制出 P 波初动的压缩区和膨胀区来表达震源机制解,压缩区(离源)使用黑色,膨胀区(向源)使用白色,黑白交界处即是节面.这种方法可很好地表达纯剪切震源.实验室的声发射并不总是发生在高围压下,声发射源完全有

可能有张裂或体积变化.为表达张裂和体积变化,我们参照地震学的方法稍作修改,使用彩色震源球表示矩张量的方向和大小.首先对矩张量进行归一化,归一化后的矩张量侧重表示矩张量的形状和方位,忽略了绝对大小的差异.用施密特网采用下半球投影方式,绘制不同方向矩张量的大小,淡绿色表示矩张量为零,红色表示矩张量达到最大值(离源),蓝色表示矩张量达到最小值(向源).淡绿色和红色之间的颜色及淡绿色和蓝色之间的颜色表示过渡区.为了使矩张量的大小和方向表示的更为显著,我们表示较小的张量时使用较淡的颜色,而表示较大的张量时使用较浓的颜色.图 1 是纯剪切源黑白和彩色两种表示方法对比,黑白图中的黑色与彩色图中的红色相对应,代表初动是离源的,即震源的 T 轴方向.黑白图中的白色与彩色图中的蓝色相对应,代表初动是向源的,即震源的 P 轴方向.图 2 是几种非剪切震源的彩色震源球表示,对于张裂、裂隙塌缩和爆炸源彩色震源球都可较好的表示,图中给出了三种不同主轴方向的震源球.

## 2.4 声发射矩张量分解

在主轴坐标系下张量表达十分简洁,可表示为:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix}.$$

矩张量可分解为若干矩张量的线性组合,分解后,可清楚地了解震源的运动方式.但矩张量的分解不是唯一的,采用何种分解方式,则要看选择何种物理假定.

在地震学中一般认为断层在高围压下没有离面位移,且通常情况下地震矩张量迹为 0,是纯偏矩张量,即  $M_1 + M_2 + M_3 = 0$ . 纯偏矩张量有多种分解方案,如可分解为双力偶和补偿性线性偶极:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} = \frac{M_1 - M_3}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} - \frac{M_1 + M_3}{2} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

或分解为大双力偶和小双力偶:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} + M_2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

室内实验与地震有所不同,裂纹扩展有多种模式,可以有离面位移且张量的迹可不为 0. 为此我们增添了另一种可能的分解方案.

$$\text{若矩张量 } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix}, \quad (M_1 \geq M_2 \geq M_3)$$

绕中间轴旋转坐标系, 可将张量变换为:

$$\begin{bmatrix} M_1 - M_2 + M_3 & 0 & \sqrt{(M_2 - M_3)(M_1 - M_2)} \\ 0 & M_2 & 0 \\ \sqrt{(M_2 - M_3)(M_1 - M_2)} & 0 & M_2 \end{bmatrix},$$

此张量可分解为两部分之和:

$$\begin{bmatrix} M_1 - M_2 + M_3 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sqrt{(M_2 - M_3)(M_1 - M_2)} \\ 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{(M_2 - M_3)(M_1 - M_2)} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

其中第一项可解释为一个垂直于断层面的位错加体积变形. 第二项可解释为一个沿断层面的剪切位错, 即等效双力偶. 图 3 是矩张量分解的示例, 用彩色震源球表示, 彩色球的物理含义见图 1 和图 2. 由于对称性, 使用本方法分解矩张量可得到两个方案, 每个方案对应一个可能的断层面解. 图 3 中上下两组彩色震源球代表两个分解方案. 与张裂方向垂直的面就是可能的断层面, 或叫节面. 每个分解方案只有一个节面. 两个方案得到了两个节面, 这两个节面的夹角可能不是  $90^\circ$ , 当垂直断层面分量很小, 剪切分量很大时, 两节面夹角接近  $90^\circ$ ; 当剪切分量很小, 垂直断层面的分量很大时, 节面夹角接近  $0^\circ$ ; 其他情况节面夹角在  $0^\circ \sim 90^\circ$  之间. 两节面的角平分线, 正好是矩张量未分解之前的  $T$  轴和  $P$  轴方向. 此分解方案的合矩张量以及两个分矩张量的主轴方向各不相同. 矩张量分解可得到两个候选断层面, 哪一个才是真正的错动面仅靠声发射无法确定, 需要参考宏观裂纹的位置.

### 3 声发射反演算法检验

为验证反演结果的正确性和可靠性我们进行了人工声发射实验. 人工激发实验的震源机制是已知的, 便于将反演结果同真实情况进行对比. 实验样品采用花岗闪长岩, 样品尺寸  $200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ , 使用 16 个传感器, 布设于样品的周边和底部(图 4), 在样品的顶面进行声发射的人工激发. 使用北京软岛科技有限公司的 16 通道声发射连续记录仪, 采样频率 3 MHz. 声发射激发分别使用落球和电脉冲激发压电片振动的方式.

#### (1) 落球实验

落球实验常用于声发射设备的检测. 落球实验是在样品的表面垂直落下一钢珠, 钢珠和样品撞击产生声发射. 落球辐射的 P 波, 其辐射花瓣在半球上近似于样品内部的张裂. 因此理论上将落球产生的声发射进行点源远场 P 波矩张量反演所得结果应与张裂类似, 沿球下落方向初动为拉张(离源). 落球实验的矩张量反演结果与理论相符(图 5).

#### (2) 电脉冲激发压电片振动实验

压电片由压电陶瓷制成, 即可作为声发射传感器, 也可作为高频振动发生器. 用电脉冲激发压电陶瓷就可产生声发射. 压电片可按振动模式的不同分为不同种类, 此次我们使用了两种振动模式的压电片, 一种是厚度伸缩振动模式, 可模拟沿厚度方向膨胀或收缩的震源, 等同于张裂或裂隙的闭合塌缩. 另一种是厚度切变振动模式, 可模拟剪切位错震源. 我们对三种模拟震源进行了声发射矩张量反演和分解(图 6).

对厚度伸缩型压电片施加正向电压, 使压电片突然增厚, 来模拟张裂源. 矩张量反演结果表现出沿压电片垂向的拉张(离源), 剪切分量非常微弱, 接近理论上的张裂源(图 6a). 对厚度伸缩型压电片施加反向电压, 使压电片突然减薄, 来模拟裂隙塌缩源. 矩张量反演结果表现为垂向的挤压(向源), 剪切分量同样非常微弱(图 6b). 对厚度切变型压电片施加电压可模拟剪切源, 矩张量反演结果显示剪切分量很强且与压电片切变的方向一致, 但矩张量分解后显示出明显的体积变化分量, 这与标准的双力偶模型有所区别(图 6c). 原因可能是厚度切变型压电片的特性所致. 压电材料中的“电畴”在电场作用下产生定向转动是产生切变的原因. 矩张量反演揭示“电畴”旋转过程除产生剪切错动外还有体积的改变.

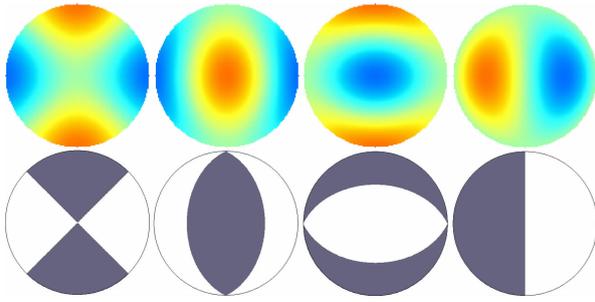


图 1 纯剪切型源的两种图形表示方式

Fig. 1 Two kinds of graphical representations of pure-shear sources

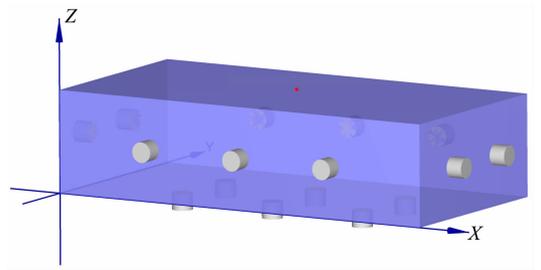


图 4 人工声发射实验传感器分布

蓝色:岩石样品,灰色:传感器,红色:声发射激发点.

Fig. 4 The sensors distribution in artificial AE experiments  
Blue: Specimen, Gray: Sensors, Red: AE shot point.

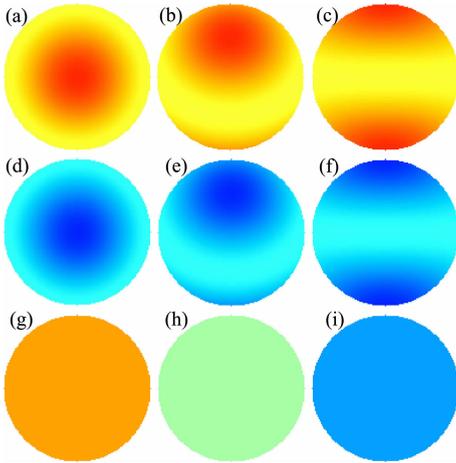


图 2 非剪切源的图形表示方式

(a, b, c)为张裂源,(d, e, f)为裂隙闭合源,(g)为爆炸源,  
(h)为零张量,(i)为内向爆炸源.

Fig. 2 The graphical representations of non-shear sources  
(a, b, c) Tensile crack, (d, e, f) Crack closure, (g) Explosion source, (h) None, (i) Implosion source.

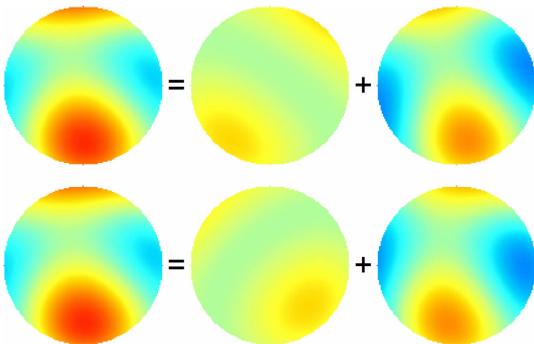


图 3 矩张量分解示例

Fig. 3 An example of moment tensor decomposition

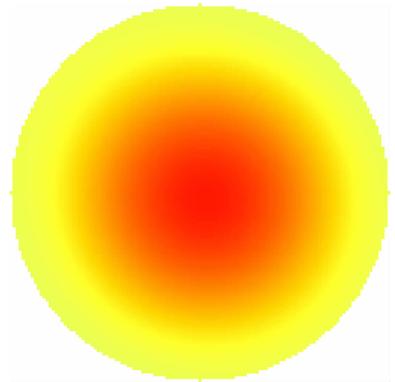


图 5 落球实验矩张量

Fig. 5 The moment tensor of a falling ball test

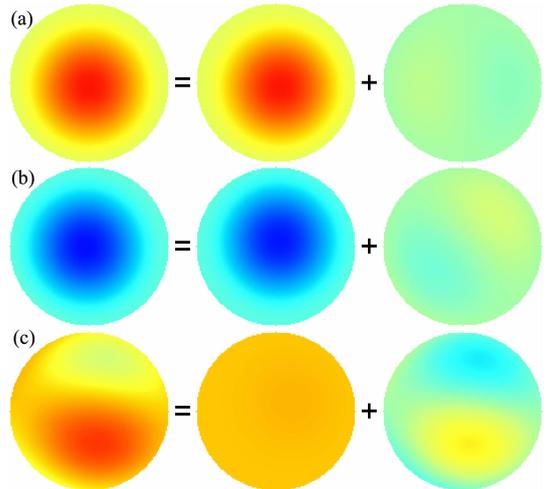


图 6 压电片激发声发射的矩张量和分解  
(a)张裂源,(b)裂隙闭合源,(c)剪切滑动源.

Fig. 6 The moment tensors of the AE driven by PZT and their decompositions  
(a) Tensile crack, (b) Crack closure, (c) Slip crack.

人工声发射实验表明,矩张量反演的结果合理.重复实验证实反演结果重复性较好,可靠性较为满意.

#### 4 声发射矩张量反演在岩石单轴压缩实验中的应用

样品为一圆柱形花岗岩,岩柱高 135 mm,直径 50 mm. P 波波速 5.6 km/s. 花岗岩岩柱上可见一平直的裂隙与岩柱斜交,且裂隙已被方解石充填胶结,形成平直的方解石脉. 显然这一胶结的裂隙是一个薄弱面.

我们使用自行研制的声发射仪,有 12 个采样通道,采样频率 40 MHz. 布设了 12 个由厚度伸缩型压电片制成的声发射传感器,传感器仅对垂直于表面的振动敏感. 加载方式为单轴压缩,加载方向为  $X$  方向. 声发射定位算法采用了基于稳健统计的算法(刘培洵等,2009),从定位结果看,大量声发射发生在先前的方解石脉上,在实验后期平行于主压方向出现一个与方解石脉斜交的声发射条带,应是出现了张性劈裂(图 7).

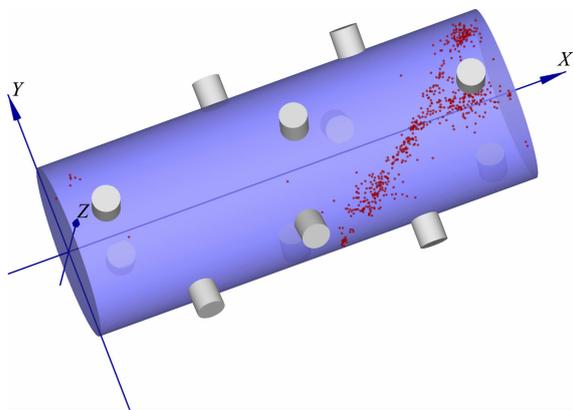


图 7 传感器分布和声发射定位结果

蓝色表示岩石样品,灰色表示传感器,红色为声发射位置.

Fig. 7 Sensors distribution and AE locations

Blue; Specimen, Gray; Sensors, Red; AE location.

图 8 是矩张量反演得到的声发射震源机制. 震源机制我们沿用地震学中惯用的黑白震源球表示,黑白震源球使用的是施密特网下半球投影,黑色区域代表拉张区(离源),白色区域代表压缩区(向源),黑白交界处为节面. 作图时假定矩张量分解得到的双力偶主轴与分解前合矩张量主轴的方向一致. 这相当于忽略了球张量,然后将纯偏矩张量分解为双力偶和补偿性线性偶极. 图 8 是震源机制反演结果,分为三个时间段绘制,其中图 8a 时间段为实验开始

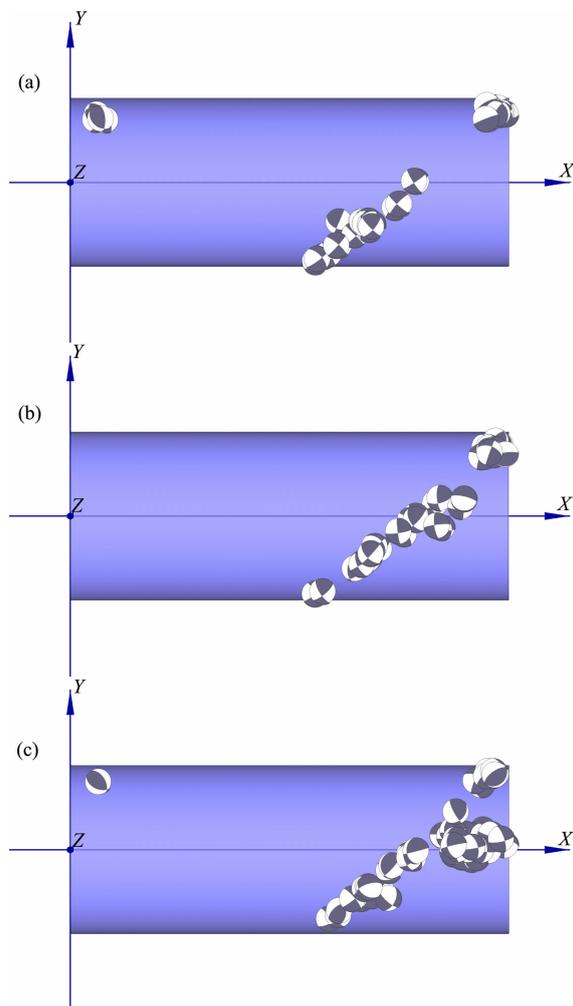


图 8 花岗岩单轴压缩声发射震源机制

(a) 2009~2382 s 时段, (b) 2382~2414 s 时段,  
(c) 2414~2446 s 时段.

Fig. 8 AE focal mechanisms in the granite under uniaxial compression

(a) During 2009~2382 s, (b) During 2382~2414 s,  
(c) During 2414~2446 s.

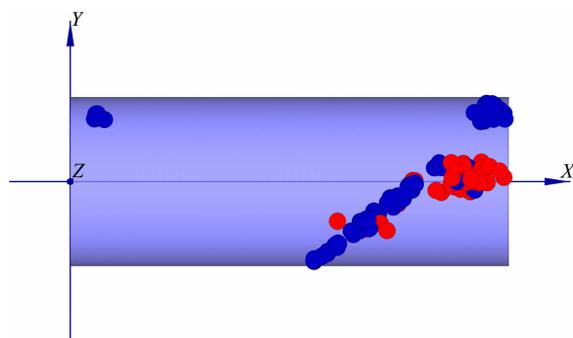


图 9 花岗岩单轴压缩实验收缩源和膨胀源分布  
红色为膨胀源,蓝色为收缩源.

Fig. 9 The distribution of explosion sources and implosion sources in the granite under uniaxial compressions  
Red: Explosion sources, Blue: Implosion sources.

后 2009 s 至 2382 s, 此时是方解石脉破裂初期, 为左旋剪切破裂方式, 震源机制一致性较好。图 8b 时间段为 2382 s 至 2414 s, 破裂方式总体上与图 8a 相当, 但有若干例外。图 8c 时间段为 2414 s 至 2446 s, 此时方解石脉已非常破碎, 平行于主压方向的劈裂出现。剪切带上的声发射的断层节面变得比较杂乱, 应是由于碎裂造成的不均匀性导致, 劈裂上的断层节面也比较杂乱。

在震害学中, 进行地震矩张量反演时张量的迹通常接近于 0, 即震源无体积变化。这是因为在地球深部高围压下几乎都是纯剪切位错。而在实验室单轴或双轴压缩实验中, 出现裂纹张开和闭合都是常见的, 张量的迹常出现不为零的情况。根据矩张量的迹可将声发射源分为体积膨胀的和收缩的。图 9 是实验中收缩源和膨胀源的分布。图中可见发生在剪切带上的声发射大多为收缩源, 这可能与破裂过程中方解石脉的坍塌有关。而在后期出现的劈裂上主要为膨胀源, 这一现象可用来区分裂纹的破裂机理。

## 5 结论和讨论

(1) 人工激发实验的声发射矩张量反演结果与震源振动方式相符, 表明矩张量反演算法正确, 且在信噪比较高、假设条件得到满足的人工激发实验中反演结果可靠。

(2) 花岗岩单轴压缩在理论上会沿已胶结的预存裂隙发生剪切破裂。在破裂初期, 声发射矩张量反演结果与理论预期一致且重复性很好, 表明花岗岩单轴压缩实验的声发射矩张量反演也是可靠的。

(3) 声发射矩张量与破裂模式之间的关系, 值得认真探讨。矩张量反演可得到 6 个独立分量的二阶矩张量, 地震学常通过矩张量分解得到双力偶解的节面, 而节面之一是断层面。与地震震源不同, 声发射源不全是由剪切滑动引起的, 有多种破裂模式, 为此本文增加了一种包括离面位移和剪切位错的矩张量分解方式, 希望能适用各种破裂模式。但实验表明此种分解方式对于张性劈裂效果并不理想。这是因为矩张量的本质是(等效)力偶, 但相同的力偶并不一定意味着破裂模式一定相同, 如滑动位错可等效于双力偶, 但双力偶并不一定是滑动位错。如纵向挤压引起的横向张性劈裂在理想情况下会产生透镜状裂隙, 裂隙在纵向缩短, 在横向增厚, 矩张量分解可得到较强的双力偶分量, 而此时双力偶并非由剪切滑动引起, 断裂面也并非位于最大剪切方向。纵向挤

压引起的横向张性劈裂在单轴和双轴压缩实验中极为常见, 理想的张性劈裂断层面垂直于主张应力方向, 但实际情况可能并非是理想情况, 可能伴有一定程度的剪切滑动分量, 此时很难通过简单的矩张量分解求出明确的断层节面。对于挤压引起的张性劈裂, 虽然不能得到断层节面, 但仍可通过矩张量反演对破裂模式做出判断。前述花岗岩单轴压缩实验后期产生了张性劈裂, 与前期的剪切破裂相比矩张量的迹明显不同(图 9), 张裂体现出明显的体积膨胀的特点。

(4) 矩张量反演的可靠性仍是值得关注的问题。人工激发实验和花岗岩单轴压缩实验表明, 在观测精度较高, 且假设条件得到较好满足的情况下矩张量反演是可靠的。但要想实现可靠的矩张量反演并不容易。首先要保证声发射到时识别和定位的准确性, 这是进行矩张量反演的基础。其次要确保各通道的频响和增益的一致性。这包括传感器的一致性、传感器与样品的机械耦合的一致性、以及传感器与采样系统的电器特性的一致性。矩张量反演得到各测点初动振幅, 通道间的不一致对振幅的影响远大于对到时的影响。实验中要想做到各测点一致是困难的, 需要反复检测甚至重新进行传感器粘接, 进行相对标定也是必要的。系统检测和相对标定可使用厚度伸缩型压电片做激发源, 此种激发源振动方式明确且重复性好。

**致谢** 感谢刘力强研究员对声发射观测技术方面的大力支持, 感谢马瑾院士对本项工作的指导。

## References

- Aki K, Richards P G. 1980. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. Vol. 1. W. H. Freeman and Company.
- Carvalho F C S, Labuz J F. 2002. Moment tensors of acoustic emissions in shear faulting under plane-strain compression. *Tectonophysics*, 356(1-2): 199-211.
- Chang S H, Lee C I. 2004. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(7): 1069-1086.
- Dahm T, Manthei G, Eisenblätter J. 1999. Automated moment tensor inversion to estimate source mechanisms of hydraulically induced micro-seismicity in salt rock. *Tectonophysics*, 306(1): 1-17.
- Graham C C, Stanchits S, Main I G, et al. 2010. Comparison of polarity and moment tensor inversion methods for source analysis of acoustic emission data. *International Journal of*

- Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47(1): 161-169.
- Grosse C U, Finck F. 2006. Quantitative evaluation of fracture processes in concrete using signal-based acoustic emission techniques. *Cement and Concrete Composites*, 28(4): 330-336.
- Grosse C U, Ohtsu M. 2008. Acoustic Emission Testing. Berlin Heidelberg: Springer.
- Kao C S, Carvalho F C S, Labuz J F. 2011. Micromechanisms of fracture from acoustic emission. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(4): 666-673.
- Kawasaki Y, Tomoda Y, Ohtsu M. 2010. AE monitoring of corrosion process in cyclic wet-dry test. *Construction and Building Materials*, 24(12): 2353-2357.
- Kuwahara Y, Yamamoto K, Kosuga M, et al. 1985. Focal mechanisms of acoustic emissions in Abukuma-granite under uniaxial and biaxial compressions. *Tohoku Geophysical Journal*, 30(1): 1-14.
- Lei X L, Nishizawa O, Kusunose K, et al. 1992. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes. *Journal of Physics of the Earth*, 40(6): 617-634.
- Liu P X, Liu L Q, Huang Y M, et al. 2009. Robust arithmetic for acoustic emission location. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 28(S1): 2760-2764.
- Manthei G, Eisenblätter J, Dahm T. 2001. Moment tensor evaluation of acoustic emission sources in salt rock. *Construction and Building Materials*, 15(5-6): 297-309.
- Ohtsu M. 1991. Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source; Application to in situ hydrofracturing test. *Journal of Geophysical Research*, 96(B4): 6211-6221.
- Ohtsu M. 1995. Acoustic emission theory for moment tensor analysis. *Research in Nondestructive Evaluation*, 6(3): 169-184.
- Satoh T, Nishizawa O, Kusunose K. 1990. Fault development in Oshima granite under triaxial compression inferred from hypocenter distribution and focal mechanism of acoustic emission. *Tohoku Geophysical Journal*, 33(3-4): 241-250.
- Shigeishi M, Ohtsu M. 2001. Acoustic emission moment tensor analysis: development for crack identification in concrete materials. *Construction and Building Materials*, 15(5-6): 311-319.
- Song F X, Ma S L. 2004. Study on deformation and rupture features of model III shear faults using focal mechanism solution of acoustic emission. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 23(23): 4084-4089.
- Yu H Z, Zhu Q Y, Yin X C, et al. 2005. Moment tensor analysis of the acoustic emission source in the rock damage process. *Progress in Natural Science*, 15(7): 609-613.
- Yuyama S, Li Z W, Ito Y, et al. 1999. Quantitative analysis of fracture process in RC column foundation by moment tensor analysis of acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 13(1-2): 87-97.
- Zang A, Christian Wagner F, Stanchits S, et al. 1998. Source analysis of acoustic emissions in Aue granite cores under symmetric and asymmetric compressive loads. *Geophysical Journal International*, 135(3): 1113-1130.

#### 附中文参考文献

- 安艺敏一(美), 理查兹著. 李钦祖等译. 1986. 定量地震学——理论和方法(第一卷). 北京: 地震出版社.
- 刘培洵, 刘力强, 黄元敏等. 2009. 声发射定位的稳健算法. 岩石力学与工程学报, 28(S1): 2760-2764.
- 宋富喜, 马胜利. 2004. 利用声发射震源机制解研究 III 型剪切断层变形破坏特征. 岩石力学与工程学报, 23(23): 4084-4089.

(本文编辑 何燕)