

# 含 V 形构造花岗岩块体破坏过程中的声发射特征

陈顺云 许昭永 杨润海 赵晋明

(云南省地震局,昆明 650041)

**摘要** 试样采用  $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 15\text{mm}$  云南大理产粗粒花岗岩,其上切割出雁列式断层组成的 V 形块体边界,切缝以石膏填充。按构造特征,把样品分为几个区,其中 A 区为断层交汇区, B 区为左行左列岩桥区, C 区为右行左列岩桥区。采用双轴加压。文中详细讨论了岩样受压破坏过程中的声发射特征。微破裂定位表明,声发射有区域群发性和成群的迁移性。微破裂从 A 区向 B 区迁移最后到 C 区。在迁移初期,声发射在原发生地与迁移地两处交替发生。相对较大的声发射,每个时期每个区域均有发生,但 C 区即最后发生地相对集中,该处岩桥区断裂后试样崩溃。定点应变结果也出现了 3 次突跳,与声发射 A、B、C 区的声发射移动特征相吻合。用“累计频度-能级”关系对局部  $b$  值的分析显示:主破裂前, C 区  $b$  值明显减小。从构造特征上看,三区为不同构造的相交处,为事件发生敏感地段,这就导致了不同的破裂顺序,甚至产生不同的破裂前兆现象。

**关键词** V 形构造 块体 声发射 AE 强度  $b$  值

中图分类号: P589.1 文献标识码: A 文章编号: 0253-4967(2003)02-0317-10

## 0 引言

地震短临预报和中长期预报,前兆研究必不可少。大多数地震预报的研究,主要集中于前兆观测、分析前兆的一般机理、构建物理模型解释前兆现象等方面。然而大规模的地震断裂不纯粹是岩石破裂的物理现象,还与板块的相互作用有关。Katushiko(1988)认为地震前兆应分为 2 种:物理前兆和板块(活动)前兆。在这 2 个方面前人已做了不少工作:一是从断层活动方面出发,提出断层活动、摩擦、成核等理论,并利用数值模拟和实验对理论进行完善(Nur *et al.*, 1971; Byerlee, 1978; Ohnaka *et al.*, 1982, 1987; 马瑾, 1999; 马瑾等, 2000);二是从实验角度来研究岩石破裂的各种物理特征(Brace *et al.*, 1966; Mogi, 1967; Atkinson *et al.*, 1987; Lockner, 1993; 刘力强等, 1999; 李世愚等, 2000)。对断层活动规律和对地震机理的研究,其实就是对地球活动局部化现象的研究,同时也应从更广阔的角度上来探讨问题的实质。大陆地震活动的 1 个明显特征是,不同活动构造带被分割成不同尺度的块体,这些块体的运动控制着大陆内部的地震活动,特别是强震活动的空间和时间分布明显与块体边界断层以及块体之间的变形协调有着极为密切的关系。马瑾(1999)根据地震发生的特点指出:分析中国的地震活动,应把视觉从断层活动中心论转变为块体活动中心论上。块体交汇处既可能存在摩擦滑动型,也可

〔收稿日期〕 2002-02-21 收稿, 2002-08-26 改回。

〔基金项目〕 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040704)、中国地震局双重项目(9691309020301)和国家自然科学基金(46764010)共同资助。

能发生新断裂型地震。块体的相互作用方式及规律对于地震活动的研究有着重要意义。块体交汇处主要有 X 形、V 形、Y 形等边界。许昭永 (Xu *et al.*, 2002) 和熊秉衡等 (2000) 利用实时全息干涉计量方法对含 Y 形构造块体进行了研究, 取得了一些结果。但对于其它形状块体的研究尚需深入。当前断层作用的声发射 (AE) 研究主要针对单条和 2 条裂纹, 更深入的研究应建立在复杂断层活动引起的地震 (声发射) 上。此文即讨论含 V 形雁列式构造的花岗岩块体受压破裂过程中的声发射特征。

# 1 实验方法

## 1.1 试样及加载

试样采用 200mm×200mm×15mm 云南大理产粗粒花岗岩, 其上切割出雁列式断层组成的 V 形块体边界, 中间填以石膏 (图 1a)。按构造特征, 把样品分为 5 个区, 其中 A 区为断层交汇区, B 区为左行左列岩桥区, C 区为右行左列岩桥区, D、E 两区位于试样上方的切缝端部。在防震平台上架设双轴小型压机, 垂直向和水平侧向压力最大可达 300KN。加力方式: 实验开始, 在试样侧向和垂直向 (X 和 Y 方向) 同步加力, 达一定程度后 (使  $\sigma_x = \sigma_y = 2\text{MPa}$ ) 大致保持  $\sigma_x$  不变, 增加  $\sigma_y$  (最大主应力) 直到最后断裂。从加力开始, 即用微破裂信息存储分析系统和数字化应变仪记录微破裂和应变信息。

## 1.2 破裂事件检测

### 1.2.1 破裂事件检测

与先前一样, 在岩石试样表面布设 8 个 PZT 压电晶体传感器 (其位置如图 1 中的“\*”所示), 用微破裂信息采集存储分析系统记录 (Xu *et al.*, 2002)。

### 1.2.2 应变测试

如图 1a 所示, 岩石试样表面布设 10 个应变测点 (其位置如图 1 中的“□”所示), 用中国地震局地质研究所构造物理实验室研制的 LB-2 数字应变仪观测岩石破裂孕育过程中的应变变化。本实验所用压力记录放大倍数为 500, 样品应变记录放大倍数为 299。

# 2 声发射定位和强度确定方法

## 2.1 声发射定位方法

声发射定位的方法较多 (蒋海昆, 2000; Xu *et al.*, 2002)。因为本文中的试样为薄板, 用许昭永等 (Xu *et al.*, 2002) 的方法进行定位, 此处略去推导。声发射定位采用与地震定位类似的方法, 试件在受力之初视为各向同性体。令  $i$  为破裂点  $X^i(x^i, y^i)$ ,  $j$  为放置检波器的接收点  $X_j(x_j, y_j)$ , 沿直角坐标轴的速度为  $(V_1, V_2)$ , 沿  $i, j$  连线方向的速度为  $V_{ij}$ , 设  $T_{ij}^0$  为波从  $i$  点到  $j$  点的走时, 有

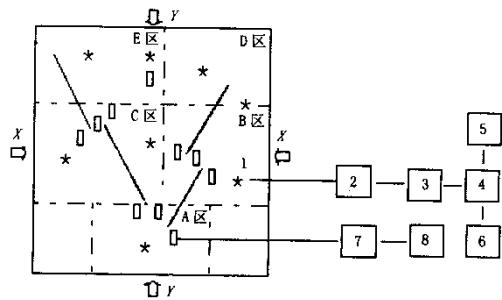


图 1 断层结构、传感器布置及试件加力方式示意图

Fig. 1 Diagram showing fault structure, arrangement of transducers and mode of loading.

试样中虚线为分区界线, 实线为宏观裂纹;

\* PZT 探头; □ 应变片

1 压电晶体传感器; 2 放大器; 3 瞬态波仪器; 4 计算机;

5 分析系统; 6 打印机; 7 应变仪; 8 计算机

$$T_j^i = T_j^i(X^i, V^i) = \left\{ \frac{(x^i - x_j)^2}{(V_1^i)^2} + \frac{(y^i - y_j)^2}{(V_2^i)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

取实际走时为  $t_j^i$ , 建立目标函数

$$Q^i = \sum \{ t_j^i - T_j^i(X^i, V^i) \}^2 \quad (2)$$

采用阻尼最小二乘法求解  $(X^i)^*$   $(V^i)^*$  :

$$Q^i[(X^i)^* (V^i)^*] = \min \{ Q(X^i, V^i) \mid X^i \in [D, X_h], V^i \in (V_1, V_2) \} \quad (3)$$

式(3)中  $(X^i)^*$   $(V^i)^*$  为声发射的位置,  $X_h$  是试件的二维大小,  $V_1, V_2$  是速度矢量的可能范围。利用这种仪器系统与定位方法, 用已知发射源核定, 定位偏差不超过  $\pm 3.0\text{mm}$ 。

## 2.2 声发射强度的定义方法

对于声发射的强度特征, 有多种定义方法(刘力强等, 1999; 王彬等, 1999; 蒋海昆, 2000)。实验采用每道 16Kbyte 存储系统, 能够记录到声发射波形较长的衰减过程。又因实验条件的相似性, 本文拟采用王彬等(1999)文献中 AE 强度的定义(即尾波定义法)。

记录声发射时, 大事件往往发生限幅或截断。根据  $A_{ki}$  提出的尾波理论, S 波尾波振幅遵从如下衰减关系:

$$A(t) = A_0 t^{-k} \quad (4)$$

式(4)中  $k$  为衰减系数,  $t$  为从发震时刻起算的时间。对所有记录读取尾波振幅  $A(t)$  和时间  $t$  的值, 可用最小二乘法拟合得到  $k$  值和  $A_0$  值。进一步用式(4)可以推断那些限幅或截断的声发射事件的尾波持续时间。

研究表明, 近震震级与尾波持续时间和震中距有经验关系(秦嘉政等, 1984), 设声发射的“震级”与尾波的持续时间  $T$  以及震中距  $\Delta$  有关系式

$$M = a_1 \lg T + a_2 \Delta + a_3 \Delta^2 \quad (5)$$

对于每一个声发射事件, 有 8 道记录, 设真正的“震级”为  $M$ , 每一道记录得到 1 个  $M_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ), 用最优化方法构造目标函数

$$Q = \sum_i (M - M_i)^2 \quad (6)$$

使目标函数  $Q$  为极小, 可得  $a_1, a_2, a_3$ , 从而可得到强度的计算公式。

## 3 实验结果及分析

考虑到加压前期的声发射事件特征研究得很多, 且对块体破裂研究无实质性的影响, 我们采用大致在 60% 破裂应力以后的事件进行分析(全文均如此)。

### 3.1 声发射的空间特征

研究声发射的空间特征, 首要的难点是声发射定位。如上述, 采用平板均匀模型定位, 无疑给结果带来了影响。经过正演反复检验, 发现如反演速度低于或高于实际速度, 会使所有定位结果向某个方向偏移, 相对位置并不造成太多影响, 即仅把定位的结果作为统计研究时, 并不影响问题的实质性。到时判断对定位结果也有着重要影响, 为了尽可能减少误差, 又考虑到声发射数据量大, 采用每个到时读 3 次, 然后求其平均值的办法。定位结果如图 2, 其中试样外边界上的事件多为边界效应, 在分析中予以忽略。图中圆圈大小表示微破裂的相对大小, 紧靠圆圈的数字表示 AE 发生的序号。AE 大小的具体确定方法参见下文的论述。

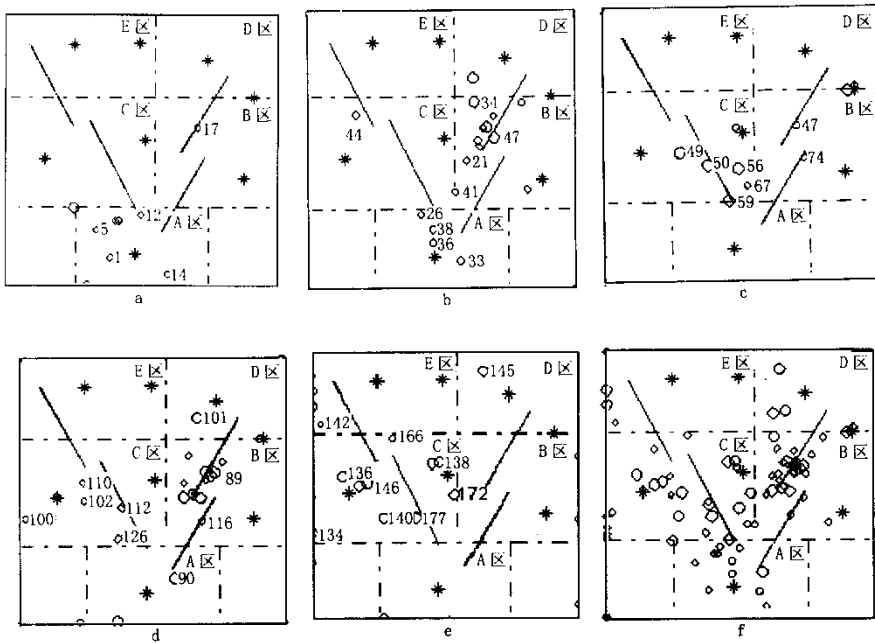


图 2 定位结果

Fig. 2 Diagram showing the location of AE events.

a AE(1—18); b AE(19—46); c AE(47—81); d AE(82—130); e AE(131—last); f AE(1—last)

圆圈表示 AE 事件, 圆圈越大事件越大; \* 表示 PZT 探头; 圆圈边的数字表示此 AE 发生的序号

为了更好地反映出问题的本质,对声发射事件按其序号进行分解,分别研究 AE 事件发生的时空特征。具体有: 1) 声发射有区域群发性,在一定时间段内,绝大多数声发射总在某一特定位置发生。从加压过程看,主要分为 A 区(正下方)、B 区(右中部)与 C 区(左中部)等 3 个区域。这从上面的声发射定位图中可以明显看出(图 2a—e)。2) 声发射具有成群的迁移性,即在 1 个地方发生了 1 群之后向其它地方迁移,在迁移初期,声发射在原发生地与迁移地两处交替发生。从图 2a 可以看出 AE 始发于 A 区,到了第 18 个事件以后,向 B 区迁移,此时 A 区尚有零星的 AE 事件发生;从图 2b 中 A 区事件的序号可以看出 A 区的事件已不是成群发生,主发射场已明显转移到 B 区。随后向 C 区迁移(图 2c),在 C 区发生了一系列事件以后回到 B 区(图 2d),主发射场仍明显的在 B 区,就像 A 区与 B 区之间 AE 交替发生一样,此时 B 区与 C 区之间 AE 也交替发生(如图 2d),正下方(A 区)此后都很少再有事件发生。到了加压后期,事件迁移至 C 区, A 区和 B 区 2 个原来事件发生的主要场所则很少再有事件发生。3) 相对较大的声发射,虽然每个时期每个区域都有,但却在 C 区即最后的发生地相对集中(图 2e),并在 C 区即主大断裂区外围空,该处岩桥区断裂后试样崩溃(最终破裂结果见图 5d)。

### 3.2 声发射的强度特征

在式(6)中,充分考虑背景噪音后取一合理值作为尾波截断时的峰值,本文把截断峰值取为 0.067V(满刻为 1.0V)。选加压过程中某一事件作为参考,本文取第 1 个事件作为标准事件

(参考值),可以计算出相应的  $a_1, a_2, a_3$  值,从而得到相应的震级(强度)计算公式

$$M = 0.023 4 \lg T + 0.023 8 \Delta - 0.000 2 \Delta^2 \quad (7)$$

式(7)中,  $\Delta$  为从微破裂点到接收点的距离,单位为 mm;  $T$  为波列(尾波)持续时间,单位为  $\mu\text{s}$ 。 $T$  的求取在未限幅时由记录图直接读取,限幅时由式(4)求取。以后每道记录的“震级”均以此式进行计算,取平均值作为该事件“震级”,即 AE 强度。以此得出的强度为相对强度,在本实验中进行 AE 强度的比较并不失一般性,但无法与其它研究结果进行对比,这也是 AE 强度特征定义的难点所在。所有事件的相对强度见图 3。反复对比实验资料发现这些事件相距的时间已经很短,故此图没有按严格的加压时间进行而是按声发射事件的前后顺序排列,这样处理并不失其时间特征。

从图 3 可以看出,大多数事件均集中在某一个范围里,震级总体偏高,可能与实验中所用的触发电平门槛值较高有关。每一系列小事件之后总是出现一系列相对较大的事件,可以根据这一事实把总的事件分成几个部分,即 AE 第 1~20 号事件、第 20~50 号事件、第 50~130 号事件、第 130 至最后事件,共 4 个大的部分。有的部分依然可以再细分,如第 90~120 号事件和第 130~170 号事件等。这正好与上述声发射的区域性相对应(图 2)。每个部分大致对应着不同的声发射区域:1~20 号对应着 A 区;20~50 号对应着 A 区及 B 区,事件相互交差发生;

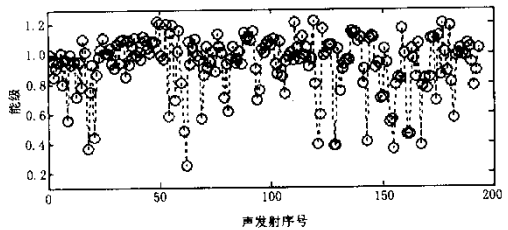


图 3 AE 强度随序号(时间)的变化

Fig. 3 Variations of AE intensity with sequence (time).

50~120 号对应着 B 及 C 区,事件也是相互交替发生;130 号至最后事件对应着 C 区。进一步结合定位结果,并充分考虑边界效应后可分区研究其  $b$  值。有趣的是最后一小阶段中,大事件发生前频频出现小事件,到了后期则又表现为小事件平静,大事件集中发生。对比声发射定位结果研究发现,小事件频频发生的地方并非是后面大事件集中发生的地方。

### 3.3 声发射的 $b$ 值特征

对于天然地震,有著名的 Gutenberg-Richter 经验关系,即 G-R 公式

$$\lg(N) = a - bM \quad (8)$$

其中,  $M$  为震级,  $N$  为地震发生频度或累计频度,  $a, b$  为常数,  $b$  的值即为通常所说的  $b$  值。经过很多人的研究表明,此关系对于声发射事件也同样适合(Lockner, 1993)。在岩石声发射研究中,此关系的满足,主要问题是如何确定“震级”。如前所述,AE 强度的定义有多种方法,各种方法各有优劣。目前尚无统一定义,致使不同实验室的结果无法进行比较。本文中强度定义方法也仅在此实验中进行比较。用尾波定义的能级来研究  $b$  值,以前尚无人做过。

上述分析表明,由于本实验试样中含有多条宏观裂缝,构造特征复杂,因此,声发射带有明显的区域性,如果用整个试样的声发射事件来研究  $b$  值不一定能给出很好的结果。

前人的研究表明,岩样在主破裂前  $b$  值下降(scholz, 1968)。本实验仅重点比较在 60% 破裂应力后整个试样  $b$  值与单个区域  $b$  值的关系。

图 4 展示了试件不同区域声发射频度与震级的关系。它清晰地显示出,单个区域 A、B、C 的  $b$  值都比整个试样的  $b$  值偏低(图 4),其中 C 区更为明显(图 4d)。结合前面的微破裂定位及强度分析,可知主大破裂区发生最后崩溃前, $b$  值会有明显的减小。出现整体  $b$  值较子区  $b$  值偏高的原因主要是,子区具有不同的构造特征,因而产生时间先后不同、范围大小也可能不同的前兆。把这些区的效应综合叠加,使它们相互影响、相互抵消,最终使整体  $b$  值较子区  $b$  值偏高,因而不易识别其前兆变化。

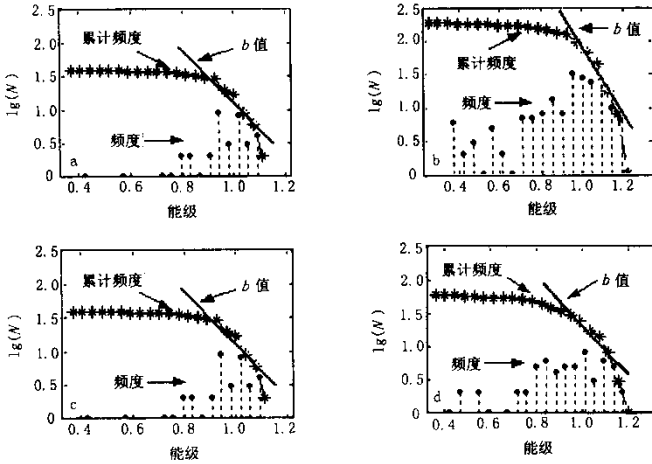


图 4 声发射频度 - 能级与  $b$  值关系

Fig. 4 Relation between frequency-energy and  $b$  value of AE events.  
a 整个试件; b 试件 A 区; c 试件 B 区; d 试件 C 区

由于弹性波的衰减,观测系统的触发电平门槛在样品空间上并不均匀,远离触发传感器的声发射信号必须达到较高的能级才能被记录到,小事件必然丢失,这必然导致声发射记录低级段上的频度 - 能级关系不符合负相关模式。实验中考虑到环境噪音和大事件限幅,整个实验过程中所用触发电平较高,上述的频度 - 能级关系只有在较高能级时才表现出负相关性(图 4)。此外,图 4 表明的  $b$  值的区域特征,要求更进一步把区域细分。然而,在小的区域里,声发射事件会明显地减少,给统计的有效性带来考验。“频度 - 能级”关系会显示出“失真”现象,而累计频度要好得多,用“累计频度 - 能级”关系可得到更可靠的结果(图 4)。

### 3.4 定点应变

试样构造特征复杂,图 5 显示了定点应变随压力增加的变化。定点应变出现 3 次突跳,与声发射 3 个区的先后破裂相呼应。图 5a 为加压初期(60% 破裂应力之前),各测点应变随压力而增加。在此时间段各点的应变都随压力的增加而增大,只是变化的多少不同,并无突跳、波动等特殊变化。图形上的抖动为手控加载不稳所致。声发射事件除试样边角较多外其余成零散分布(图从略)。图 5b 为加压中期(95% 破裂应力之前),此时间段有些点应变随压力增加而增大得较多,其中一些点甚至出现突升或突降的较剧烈的变化。经查看,这些点分布在 A 区。此

时间段内声发射也主要集中于 A 区(图 2a)稍后向 B 区移动(图 2c)。图 5c 为加压后期(95% 破裂应力之后)大多数测点的应变都出现了显著下降,试样临近最后崩溃。应变出现了 2 次剧烈变化,与 B 区和 C 区的破裂相对应。两区的破裂相隔时间较短,B 区较 C 区先出现大幅度的应变突降,随即 C 区破裂、试样崩溃。C 区的应变下降量最大,表明能量的释放剧烈,声发射能级总体上偏大(图 2e),即 C 区声发射累计频度能级较高部分下降减缓(图 4d)。从图 4d 可看出 C 区  $b$  值明显减少。此时间段,开始时声发射主要发生在 B 区,然后向 C 区移动,最后主发射场完全移到 C 区。总体而言,定点应变与声发射定位及  $b$  值有着良好的对应,表明每个区都有可能观测到前兆变化。

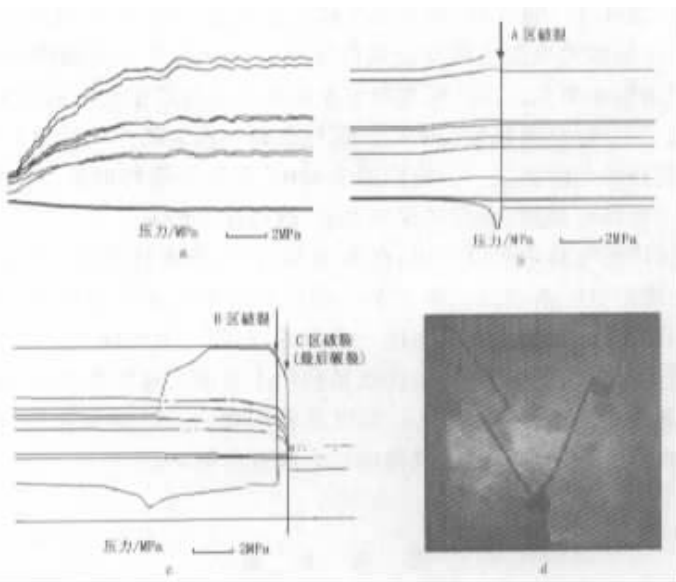


图 5 定点应变随压力增加的变化及试样的最终结果

Fig. 5 Variation of fixed-point strain with compressive loading and the final result of the sample.

a 加压初期; b 加压中期; c 试样主破裂前; d 试样最终破裂结果(图 1 试样反面的结果)

图 5d 为试样最终破裂结果,为图 1 试样的反面。A、B、C 区破裂时,试样的宏观破裂并没有产生,图 5d 中的宏观裂纹在 C 区破裂后极短的时间内形成,从应变结果上很难区分 C 区破裂与最后破裂。

#### 4 关于实验结果的几点认识

(1) 本文所采用的声发射定位方法,依据的基本假设是速度均匀且不随加压进程而改变,而实际情况并非如此,这无疑给定位结果带来了误差。如前所述,经过已知发射源和正演反复检验,保证定位结果对于我们所做的研究来说是可靠的。从声发射的定位结果,按不同时间段(序号)进行分解后可以得出,块体构造运动所引起的地震活动具有成群的迁移特征,从一个块体的交汇带向另一个块体交汇带迁移,其破裂区域有一定的先后顺序。定点应变结果也出现了 3 次

突升或突降,与声发射 A、B、C 区的声发射移动特征相吻合。C 区的应变下降最多,相应的  $b$  值也最小。从构造特征上看,A 区为 2 组雁行裂纹之交汇点,B 区为张性雁行裂纹相交点,C 区为压性雁行裂纹相交点,三点为不同构造相交处与事件发生敏感地段。加压导致了不同块体之间发生轻微相对变形,块体相交地区为受力集中区,事件群正好发生于此。由于块体的多样性,交汇点也表现出不同的性质,导致了不同的破裂顺序和不同的前兆特征。从断裂力学的观点看,A 区处于 2 条裂纹端部的受力扩展同向运动(即加强)区,B 区处于 2 条裂纹端部的受力扩展相向运动区,C 区处于 2 条裂纹端部的受力扩展相背运动区。在相同条件下,A 区先破裂,C 区最后破裂并不难理解。但是块体的强度与宏观裂纹之间的距离以及位置都有着密切的关系,用断裂力学的观点来解决此问题还有很多情况必需考虑。

(2) 最后一个区域(C 区)的破裂,是在多个较大事件后发生的,且几乎没有小事件发生(图 2)。这说明在同一区域内大地震也同样会成群发生,与 1997 年在新疆伽师地区连续发生了 7 个 6 级以上的强烈地震相类似。伽师强震群发生在帕米尔高原东北侧的塔里木盆地西北缘,位于几个构造单元的交汇部位(郭飙等,2001)。该地区是中国大陆板块动力作用最强烈的地区之一,也是未来发生强震的危险区之一。我们的实验中,发生大事件的地方也正好处于不同构造的交汇地,条件和结果均很类似,必有其深刻意义,值得深入研究。

(3) 从声发射强度的分析中可以得出,在 A 区与 B 区,小事件先发生然后大事件才发生,这可为利用小震报大震提供一条思路。但在某一些区又表现出相反的结果:例如 C 区最后发生大事件的地方,与其前面的小事件并不在同一个地方,时间上也出现差异(如图 2c—e)。此类现象便给利用小震报大震带来了困难,这也许就是利用小震报大震很难都成功的原因所在。如前所述,A、B、C 三区的构造特征各异,前兆异常也就各不相同。这提醒我们,地震预报是一个系统问题,不可能单靠某一方面的资料就能得出让人满意的结果。

## 参 考 文 献

- Atkinson B K. 1987. 岩石断裂力学[M]. 尹祥础,修济刚译. 北京:地震出版社. 1—26.
- Atkinson B K. 1987. Fracture Mechanics of Rock [M]. Translated into Chinese by YIN Xiang-chu, XIU Ji-gang. Seismological Press, Beijing. 1—26 (in Chinese).
- 郭飙,刘启元,陈九辉,等. 2001. 伽师地震构造分析[A]. 见:中国地球物理学会 2001 年年刊. 昆明:云南科技出版社. 392.
- GUO Biao, LIU Qi-yan, CHEN Jiu-hui, et al. 2001. Seismic structure of Jiashi, Xinjiang earthquake sequences [A]. In: Annual of the Chinese Geophysical Society. Science and Technology Press of Yunnan Province, Kunming. 392 (in Chinese).
- 蒋海昆. 2000. 典型断层组合及不同温压条件下岩石变形过程中的声发射活动特征[D]:[学位论文]. 北京:中国地震局地质研究所. 1—20.
- JIANG Hai-kuan. 2000. Characteristics of acoustic emission during the deformation of rock samples with typical fault patterns and samples at high pressure and temperature [D]. Ph D Thesis. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing. 1—20 (in Chinese).
- 李世恩,滕春凯,卢振业,等. 2000. 典型构造微破裂集结的实验研究[J]. 地震学报, 22(3): 278—287.
- LI Shi-yu, TENG Chun-kai, LU Zheng-ye, et al. 2000. The experimental investigation of microcracks nucleation in



- typical tectonics [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 22(3): 278—287 (in Chinese).
- 刘力强, 马胜利, 马瑾 等. 1999. 岩石构造对声发射统计特征的影响[J]. *地震地质*, 21(4): 377—386.
- LIU Li-qiang, MA Sheng-li, MA Jin, *et al.* 1999. Effect of rock structure on the statistic characteristics of acoustic emission [J]. *Seismology and Geology*, 21(4): 377—386 (in Chinese).
- 马瑾. 1999. 从断层中心论到块体中心论的转变[J]. *地学前缘*, 4(4): 363—370.
- MA Jin. 1999. Changing viewpoint from fault to block—a discussion about the role of active block in seismicity [J]. *Earth Science Frontiers*, 4(4): 363—370 (in Chinese).
- 马瑾, 马胜利, 刘力强 等. 2000. 交叉断层的交替活动与块体运动的实验研究[J]. *地震地质*, 22(1): 65—73.
- MA Jin, MA Sheng-li, LIU Li-qiang, *et al.* 2000. Experimental study on alternate slip of intersecting faults and block movement [J]. *Seismology and Geology*, 22(1): 65—73 (in Chinese).
- 秦嘉政, 陈陪善. 1984. 地震波的持续时间测定川滇地区的近震震级[J]. *地震学报*, 6(1): 58—65.
- QIN Jia-zhang, CHEN Pei-shan. 1984. Determination of magnitude of near earthquakes by means of persisting time of seismic waves in the Sichuan-Yunnan region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 6(1): 58—65 (in Chinese).
- 王彬, 许昭永, 赵晋明 等. 1999. 含固体试样破裂孕育过程中声发射的强度特征及其地震学意义[J]. *地震地质*, 21(4): 411—416.
- WANG Bin, XU Zhao-yong, ZHAO Jin-ming, *et al.* 1999. The intensity characteristics of acoustic emission in rupture preparation process of the sample including hard inclusion [J]. *Seismology and Geology*, 21(4): 411—416 (in Chinese).
- 熊秉衡, 王正荣, 吕晓旭 等. 2000. 地震成核过程的实验模拟研究[J]. *地球科学*, 25(3): 319—323.
- XIONG Bing-heng, WANG Zheng-rong, LÜ Xiao-xu, *et al.* 2000. Experimental simulation study of micro-fracture nucleation process [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 25(3): 319—323 (in Chinese).
- Brace W F, Byerlee J D. 1966. Stick-slip as a mechanism for earthquakes [J]. *Science*, 153: 990—992.
- Byerlee J D. 1978. Friction of rocks [J]. *Pure Appl Geophys*, 116: 615.
- Katashiko I. 1988. Two categories of earthquake precursors, physical and tectonic, and the roles in intermediate-term earthquake prediction [J]. *Pure Appl Geophys*, 126(2—4): 687—700.
- Lockner D A. 1993. The role of acoustic emission in the study of rock fracture [J]. *Int Jour Rock Mech Min Sci & Geomech. Abstr*, 30: 883—899.
- Mogi K. 1967. Earthquakes and fractures [J]. *Tectonophysics*, 5: 35—55.
- Nur A, Byerlee J D. 1971. An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids [J]. *Jour Geophys Res*, 76: 6444—6449.
- Ohnaka M, Mogi K. 1982. Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure [J]. *Jour Geophys Res*, 87: 3873—3894.
- Ohnaka M, Kuwahara Y, Yamamoto K. 1987. Constitutive relations between dynamic physical parameters near a tip of the propagation slip zone during stick-slip shear failure [J]. *Tectonophysics*, 144: 109—125.
- Scholz C. 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes [J]. *Bull Seimol Soc Am*, 58: 399—415.
- Xu Zhaoyong, Yang Runhai, Xiong Bingheng, *et al.* 2002. Experimental study of the process zone, nucleation zone and plastic area of earthquakes by the shadow optical method of caustics [J]. *Pure Appl Geophys*, 155(2002): 1951—1966.

# FEATURES OF ACOUSTIC EMISSION DURING FRACTURING PROCESS OF GRANITE BLOCK WITH V-SHAPED STRUCTURE UNDER BIAXIAL COMPRESSION

CHEN Shun-yun XU Zhao-yong YANG Run-hai ZHAO Jin-ming  
( *Seismological Bureau of Yunnan Province , Kunming 650041 , China* )

## Abstract

Using the coarse-grained granite from Dali , Yunnan , as the test material , a sample of 200mm  $\times$  200mm  $\times$  15mm in size was prepared. On the sample , V-shaped block boundaries consisting of en echelon faults ( slots or prefabricated cracks ) were cut , and the slots were filled with gypsum. According to the structural characteristics , the sample was divided into a few zones : zone A where faults converge , zone B where faults form left-lateral and left-stepping rock bridges , and zone C where faults form right-lateral and left-stepping rock bridges. Observational study was made by means of biaxial loading. The result of microcrack location shows that acoustic emission ( AE ) has the features of grouped occurrence in a region and grouped migration. Microcracks migrated from zone A to zone B and finally to zone C. In the initial stage of migration , AE events appeared alternately in the place of original occurrence and the place where they migrate. In each stage , relatively large AE events occurred in each zone , but they concentrated relatively in zone C where they finally occur , and the sample ruptured finally when rock bridges in zone C broke down. The result of fixed strain showed 3 times sudden change , sudden rise or sudden fall , in accordance with the movement characteristics of AE of the zones A , B , and C. Analysis of the local b-value by the " accumulated frequency-energy level " relation showed that the b-value of the zone C reduced obviously before the main fracture. When examining from the structural characteristics , it can be seen that the three zones are the places where different structures meet each other and therefore are sensitive sections for events to occur. This has led to different orders of fracture or different precursor phenomena.

**Key words** V-shaped structure , block , acoustic emission , AE intensity , b value

〔作者简介〕 陈顺云 男 ,1976 年生 ,1999 年毕业于云南大学地球物理专业 ,中国地震局地质所在读硕士生 ,主要从事实验地球物理研究。电话 0871 - 3354943 E-mail :csyunwu@263.net。

# 含V形构造花岗岩块体破坏过程中的声发射特征

作者: 陈顺云, 许昭永, 杨润海, 赵晋明  
作者单位: 云南省地震局, 昆明, 650041  
刊名: 地震地质 **ISTIC PKU**  
英文刊名: SEISMOLOGY AND GEOLOGY  
年, 卷(期): 2003, 25(2)  
引用次数: 3次

## 参考文献(30条)

1. ATKINSON B K. 尹祥础, 修济刚 岩石断裂力学 1987
2. ATKINSON B K. YIN Xiang-chu. XIU Ji-gang Fracture Mechanics of Rock 1987
3. 郭颀. 刘启元. 陈九辉 伽师地震构造分析 2001
4. GUO Biao. LIU Qi-yan. CHEN Jiu hui Seismic structure of Jiashi, Xinjiang earthquake sequences 2001
5. 蒋海昆 典型断层组合及不同温压条件下岩石变形过程中的声发射活动特征[学位论文] 2000
6. JIANG Hai-kuan Characteristics of acoustic emission during the deformation of rock samples with typical fault patterns and samples at high pressure and temperature Ph D Thesis 2000
7. 李世愚. 滕春凯. 卢振业 典型构造微破裂集结的实验研究[期刊论文]-地震学报 2000(03)
8. LI Shi-yu. TENG Chun-kai. LU Zheng ye The experimental investigation of microcracks nucleation in typical tectonics 2000(03)
9. 刘力强. 马胜利. 马瑾 岩石构造对声发射统计特征的影响[期刊论文]-地震地质 1999(04)
10. LIU Li-qiang. MA Sheng-li. MA Jin Effect of rock structure on the statistic characteristics of acoustic emission 1999(04)
11. 马瑾 从断层中心论向块体中心论转变——论活动块体在地震活动中的作用[期刊论文]-地学前缘 1999(04)
12. MA Jin Changing viewpoint from fault to block-A discussion about the role of active block in seismicity[期刊论文]-地学前缘 1999(04)
13. 马瑾. 马胜利. 刘力强 交叉断层的交替活动与块体运动的实验研究[期刊论文]-地震地质 2000(01)
14. MA Jin. MA Sheng-li. LIU Li qiang Experimental study on alternate slip of intersecting faults and block movement 2000(01)
15. 秦嘉政. 陈陪善 地震波的持续时间测定川滇地区的近震震级 1984(01)
16. QIN Jia-zhang. CHEN Pei-shan Determination of magnitude of near earthquakes by means of persisting time of seismic waves in the Sichuan-Yunnan region 1984(01)
17. 王彬. 许昭永. 赵晋明 含V形构造花岗岩块体破坏过程中声发射的强度特征及其地震学意义[期刊论文]-地震地质 1999(04)
18. WANG Bin. XU Zhao-yong. ZHAO Jin ming The intensity characteristics of acoustic emission

[in rupture preparation process of the sample including hard inclusion](#) 1999(04)

19. [熊秉衡, 王正荣, 吕晓旭](#) [地震成核过程的实验模拟研究](#)[期刊论文]-[地球科学-中国地质大学学报](#) 2000(03)

20. [XIONG Bing-heng, WANG Zheng-rong, L Xiao xu](#) [Experimental simulation study of micro-fracture nucleation process](#) 2000(03)

21. [Brace W F, Byerlee J D](#) [Stick-slip as a mechanism for earthquakes](#) 1966

22. [Byerlee J D](#) [Friction of rocks](#) 1978

23. [Katushiko I](#) [Two categories of earthquake precursors, physical and tectonic, and the roles in intermediate-term earthquake prediction](#) 1988(2-4)

24. [Lockner D A](#) [The role of acoustic emission in the study of rock fracture](#) 1993

25. [Mogi K](#) [Earthquakes and fractures](#) 1967

26. [Nur A, Byerlee J D](#) [An exact effective stress law for elastic deformation of rock with fluids](#) 1971

27. [Ohnaka M, Mogi K](#) [Frequency characteristics of acoustic emission in rocks under uniaxial compression and its relation to the fracturing process to failure](#) 1982

28. [Ohnaka M, Kuwahara Y, Yamamoto K](#) [Constitutive relations between dynamic physical parameters near a tip of the propagation slip zone during stick-slip shear failure](#) 1987

29. [Scholz C](#) [The frequency-magnitude relation of micrfracturing in rock and its relation to earthquakes](#) 1968

30. [Xu Zhaoyong, Yang Runhai, Xiong Bingheng](#) [Experimental study of the process zone, nucleation zone and plastic area of earthquakes by the shadow optical method of caustics](#) 2002

#### 相似文献(0条)

#### 引证文献(3条)

1. [何建平, 王宁](#) [用AE时序参数特征预测岩体失稳的研究](#)[期刊论文]-[矿业安全与环保](#) 2007(1)

2. [祖焯, 郭文武](#) [岩石声发射信号AR模型谱分析](#)[期刊论文]-[人民长江](#) 2006(11)

3. [逢焕东, 姜福兴, 张兴民](#) [剪应力在缺陷体声发射过程中的作用](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2004(6)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_dzdz200302017.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dzdz200302017.aspx)

下载时间: 2010年5月27日