

文章编号: 0253-3782(2002)04-0385-12

# 雁列式断层组合变形过程中的声发射活动特征\*

蒋海昆<sup>1)</sup> 马胜利<sup>2)</sup> 张 流<sup>2)</sup>

侯海峰<sup>1)</sup> 曹文海<sup>1)</sup>

1) 中国济南 250014 山东省地震局

2) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所, 中国地震局构造物理开放实验室

**摘要** 着重研究拉张或挤压型雁列式断层标本变形过程中声发射(简称 AE, 下同)的时空演化特征。结果表明, 预置构造对 AE 空间分布格局具有较强的控制作用, 随着差应力的增加, AE 首先在两个端点附近从集, 之后向两端点连线附近集中, 出现明显的破裂局部化现象, 较大事件还通常集中于某一端点附近反复发生。前期微破裂从集图象指示后期宏观破裂的扩展方向及扩展范围。拉张和挤压型雁列区宏观破裂方向分别与轴向应力方向垂直和平行。雁列式断层标本变形过程中, 破裂前的弱化阶段相对较长、弱化过程明显。微破裂事件累积频次指数增长可能是系统失稳前的典型征兆之一, 而雁列区宏观破裂之后, AE 数量逐渐减少、应变释放相对减弱。摩擦滑动过程中, 大的粘滑失稳前未见有 AE 活动前兆性的增强过程。雁列区的  $b$  值变化在失稳前显示“趋势性降低—快速回升”这一典型的变化过程, “ $b$  值降低”一般发生在差应力增强过程之中, 并有可能延续至弱化阶段, 而“快速回升”则一般发生在破裂失稳前的短时期内。对比研究表明, 构造差异所导致的  $b$  值差异远大于  $b$  值随差应力的增加而产生的变化量, 而对同一构造标本, 力学状态的改变会导致 AE 序列时序特征的急剧变化, 较高的加载速率对应较高的应变能释放及明显的低  $b$  值。前期破碎带由于较低的破坏强度, 其对差应力的微小变化具有特殊敏感性, 从而成为“源、兆分离”、“窗口或敏感点效应”等地震活动性前兆现象的一种可能的原因。

**关键词** 声发射 拉张型雁列式断层 挤压型雁列式断层 双轴破裂实验 差应力

**中图分类号:** P315.8      **文献标识码:** A

## 引言

通过岩石破裂实验声发射及表面应变场观测等方法, 对雁列式断层标本变形及破裂过程的研究已取得许多重要的认识(Bomblakis, 1973; 刘力强等, 1986; 杜异军等, 1989; 李建国等, 1989; 张之立, 方兴, 1989; 张之立, 李强, 1989; 马胜利等, 1995; 马文涛等, 1995; 李世愚等, 2000), 但也存在许多问题, 特别是由于预置构造标本声发射定位问题的极端复杂性, 大多数关于微破裂时空演化问题的讨论多基于一维相对定位结果来进行, 或由于定位事件数太少而无法进行一些必要的统计, 使得对动态破裂过程和破裂机制的讨

\* “十五”国家科技攻关课题子专题(2001BA601B01-04-01)和地震科学联合基金(102037)资助项目。中国地震局地质研究所构造物理开放实验室部分资助。

2001-06-04 收到初稿, 2002-04-17 收到最后修改稿并决定采用。

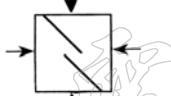
论不够深入。

针对上述问题,为进一步探讨预置断层对破裂扩展及微破裂活动特征的影响,本研究在前人工作的基础上着重研究了中等尺度拉张和挤压型雁列式断层标本在变形破坏过程中的声发射时空演化特征,并据此对雁列区动态破裂过程进行讨论。与以往的研究相比较,本研究实验条件有较大改进:轴向加载系统已实现计算机自动伺服控制;标本尺寸及厚度有较大增加,标本边缘效应对所讨论区域的影响有所减弱;特别是声发射定位方法及用于研究的基础数据(AE时、空、强定位结果)质量方面较之以往有了明显改进。

## 1 实验条件及声发射资料处理

实验在中国地震局构造物理开放实验室多功能双向加载实验系统<sup>①</sup>上完成。该设备轴向和侧向最大压力分别为100 t和50 t;轴向位移测量范围0~15 mm、位移速率范围 $5 \times 10^{-5}$ ~ $5 \times 10^{-3}$  mm/s;轴向位移自动伺服控制,横向加载由手动控制。标本尺寸、结构和具体实验条件见表1。

表1 标本结构、实验条件一览表

标本代号	预置断层类型	标本结构	标本特征	实验条件
Br9908	拉张型 雁列式断层		辉长岩;标本尺寸为300 mm×300 mm×50 mm;预置断层宽度3 mm,水石膏充填(石膏:水=1:1);雁列区尺寸40 mm	侧压5 MPa,轴向压缩速率 $5 \times 10^{-4}$ mm/s,平均应变速率约为 $1.67 \times 10^{-6}$ /s,施加应力约3 086 s后轴向压缩速率提高到 $1 \times 10^{-3}$ mm/s
Br9909	挤压型 雁列式断层		辉长岩;标本尺寸为300 mm×300 mm×50 mm;预置断层宽度3 mm,水石膏充填(石膏:水=1:1);雁列区尺寸40 mm	侧压5 MPa,轴向压缩速率 $5 \times 10^{-4}$ mm/s,平均应变速率约为 $1.67 \times 10^{-6}$ /s

首先两向同时以 $1 \times 10^{-3}$  mm/s的速率加载到预定5 MPa的应力水平,之后侧压恒定、轴压以 $5 \times 10^{-4}$  mm/s速率继续加载,标本平均应变速率约为 $1.67 \times 10^{-6}$ /s。为减小刚性压块与标本之间的摩擦,在标本与侧压压头之间加装滚轴滑块,标本与轴压压头之间涂抹二硫化钼。

采用16通道声发射记录仪记录AE波形,采样频率5 MHz,采样长度1 024点,记录精度8 bit。实验之前对AE记录系统进行幅度和相位的一致性标定,以消除由此导致的强度计算方面的差异(蒋海昆,2000)。

依据AE事件的P波初至到时,通过改进的慢度离差方法进行AE三维定位,同时确定其发生时间并反演该时刻的标本平均P波速度(蒋海昆等,1999)。该定位方法的最大特点是可以不预先知道标本的速度信息或对标本速度结构进行均匀性假定,因而尤其适合于速度结构复杂且随时间(变形进程)改变的AE定位问题。针对实际实验条件所进行的数值试验结果表明,97%的AE定位结果与破裂源之间的误差小于物理不可分辨精度(探头直径)。所有

<sup>①</sup> 马胜利,刘天昌,刘力强,等.1996.100吨伺服控制加载机的改善及50吨横向加载装置的配置.国家地震局85重点课题报告(85-11-03).

P波初至到时均由人工在计算机上逐个判读,最大限度地保证了震相辨识的正确性。除部分研究工作的特殊需求外,对S波等其它震相及相关参数不再进行具体识别。

AE强度的定义及计算方法如蒋海昆等(2000)文章所列,并对强度的最终计算结果进行了探头之间的强度差异校正及对AE强度随距离的衰减校正(蒋海昆,2000)。

## 2 AE空间分布图象的时间演化与宏观破裂扩展

根据差应力曲线的形态及AE的时间群集特征,将变形破坏的全过程划分为3个阶段(图3a, 4a),峰前差应力曲线的线性增长阶段为弹性变形阶段;峰值强度之后、雁列区破裂失稳之前,差应力曲线明显转折下弯、差应力增速明显减缓,这一时期判断为变形弱化阶段;雁列区破裂贯通之后划分为断层两盘的摩擦滑动阶段。

在拉张型雁列式标本雁列区破裂后摩擦滑动阶段的后期,将加载速率从 $5 \times 10^{-4}$  mm/s增加到 $1 \times 10^{-3}$  mm/s,以对比研究加载速率的改变对AE特征的影响。

### 2.1 拉张型雁列式断层标本

拉张型雁列式断层标本变形过程中,AE总体上在雁列区两条预置断层端点A, B间呈水平展布(图1a),与最终宏观破裂图象(图1f)相吻合。在弹性变形阶段(约526 s之前),AE集中分布于雁列区内部靠近两条预置断层A, B端点附近(图1b),两个区域AE频次及强度分布大体相当,对称地形成两个相对弱化区,进一步形成张性破裂①和②的雏形(图1f)。表明已有构造及裂纹尖端在加载初期对应变集中具有强烈的控制作用,同时显示雁列区内预置断层A, B端点附近在弹性阶段基本类似的变形状况。

随着差应力的增加,在时间上进入雁列区的总体弱化阶段(约526~884 s),AE由两个集中区域逐渐向AB连线集中,显示弱化区内微破裂向未来主破裂面集结的局部化过程(图1c)。在差应力的持续作用下,介质不均匀性的影响逐渐显著,AE空间分布向右扩展至预置断层外侧,较大的AE亦发生于A端点附近,这一趋势一直持续到实验结束。雁列区两条预置断层A, B端点间在884.06 s时破裂连通,产生0.672 MPa的应力降,形成宏观裂纹③(图1f)。由于8位测量精度的限制以及频率响应不匹配的原因(AE波为超声频段,而宏观张性破裂的扩展速度一般小于S波速度,所产生的弹性振动为声波频段),AE记录系统没有、也不可能记录到与雁列区破裂失稳相对应的巨大事件。对照图1c与图1f可见,AE分布与破裂带AB重合,表明AB断层可能是垂直于标本两个自由面破裂贯通的。

破裂后的摩擦滑动阶段(约884~3 086 s)。1 207 s之前主要为张性雁列区破裂后的初期调整阶段,以AB断层的摩擦滑动为主,AE主要局限于AB断层分布,较大的AE仍集中于A端点附近(图1d);之后直至3 086 s之前,AE总体上继续沿AB断层分布并向左右两端有所扩展。该时段标本右下部沿与预置断层BB'相垂直的方向上发生一组AE事件,其空间展布与表面宏观裂纹相吻合(图1e, f)。

### 2.2 挤压型雁列式断层标本

挤压型雁列式断层标本变形破坏全过程的AE事件主要在两条预置断层端点A, B间呈垂直向展布,并向上扩展至标本边缘(图2a),与表面宏观破裂图象(图2i)相吻合。在弹性变形阶段(约738 s之前),AE基本集中于雁列区内部(图2b),显示雁列区应变的集中增强过程。而较大事件则基本沿过A端点、与BB'断层大体垂直的方向展布,并穿过BB'断层向

雁列区外侧扩展, 这一时期的 AE 事件可能与宏观裂纹①的形成过程有关。

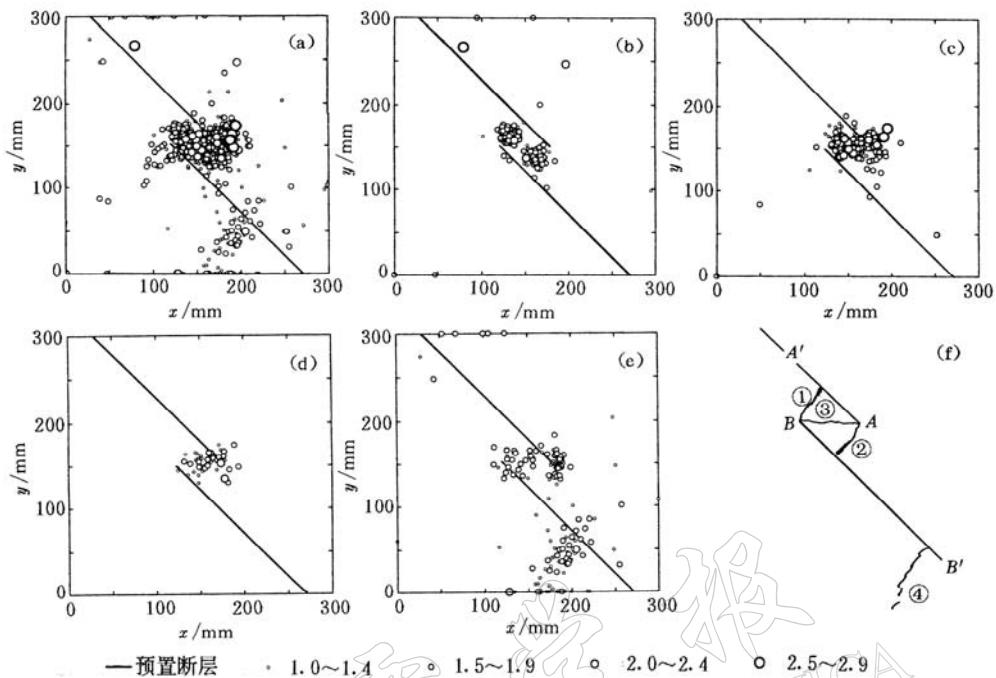


图 1 拉张型雁列式断层标本变形过程中 AE 空间分布图象的时间演化特征

(a) 实验全过程; (b) 弹性变形阶段( $0.00\sim526.00$  s); (c) 扩容弱化阶段( $526.01\sim884.06$  s); (d) 破裂后粘化阶段( $884.07\sim1207.24$  s); (e) 破裂后粘化阶段( $1207.25\sim1208.35$  s); (f) 雁列区附近表面裂纹素描

在失稳前的变形弱化阶段(约  $738\sim844$  s), 较大 AE 的主体分布方向明显改变为近垂直向(图 2c), 与即将发生的雁列区最为显著的破裂贯通走向相一致。除雁列区外, 较大的 AE 分布还穿过  $BB'$  断层向下延伸, 位置与失稳后出现的表面宏观破裂②的位置大体吻合(图 2i), 可能表征了宏观裂纹②弱化带的形成过程。但由于紧随其后的雁列区的突然破裂, 导致应变释放主体区域的转移, 因而暂时中止或推迟了裂纹②的进一步发展。

雁列区预置断层两端点  $A$ ,  $B$  间约在  $843.76$  s 破裂贯通, 产生  $3.641$  MPa 的大应力降(图 4), 同时在雁列区  $A$ ,  $B$  间产生相对宽阔的张性裂纹③(图 2i)。虽然较大的 AE 近似垂直向展布, 与表面宏观破裂  $AB$  平行, 但二者并不重合, AE 分布总体偏左(图 2c), 表明  $AB$  断层可能并不直立, 而是具有一定的倾角。

雁列区破裂失稳后的摩擦滑动阶段, 尽管 AE 群体向上迁移、微破裂向上扩展, 但较大的 AE 仍集中于雁列区附近活动, 进一步证实了先存构造对较大事件发生地点的控制作用。大约  $1\ 090$  s 之前, 由于雁列区破裂后的松弛及等应变速率加载伺服控制等原因, 断层之间接触并不紧密, 雁列区极少 AE 产生。当差应力逐渐增大至  $1.5$  MPa 时,  $AB$  断层上粘滑现象明显, 差应力曲线出现一系列小幅度的粘滑抖动。与之相对应, 在雁列区发生一系列小的 AE 事件(图 4, 图 2d), 强度分别为  $2.4$ ,  $2.3$  及  $2.7$  的 3 次较大的 AE 事件分别在  $1\ 535$ ,  $1\ 646$  及  $1\ 683$  s 发生, 其空间分布较为集中。这一组较大 AE 事件发生之前, 未见有 AE 频次或强度方面明显的异常显示。 $1\ 683\sim2\ 186$  s, 雁列区  $AB$  破裂面在持续增长的差应力

作用下重新处于闭锁状态, 进入应变能的再次积累阶段, AE 频次较少, 雁列区内部明显平静, 仅有的几次小 AE 事件还大多数分布于  $BB'$  断层外侧。此时,  $AB$  断层下端及其外侧是应变释放相对集中的场所, 而其上端则处于明显的平静状态(图 2e)。2 186~2 411 s, 雁

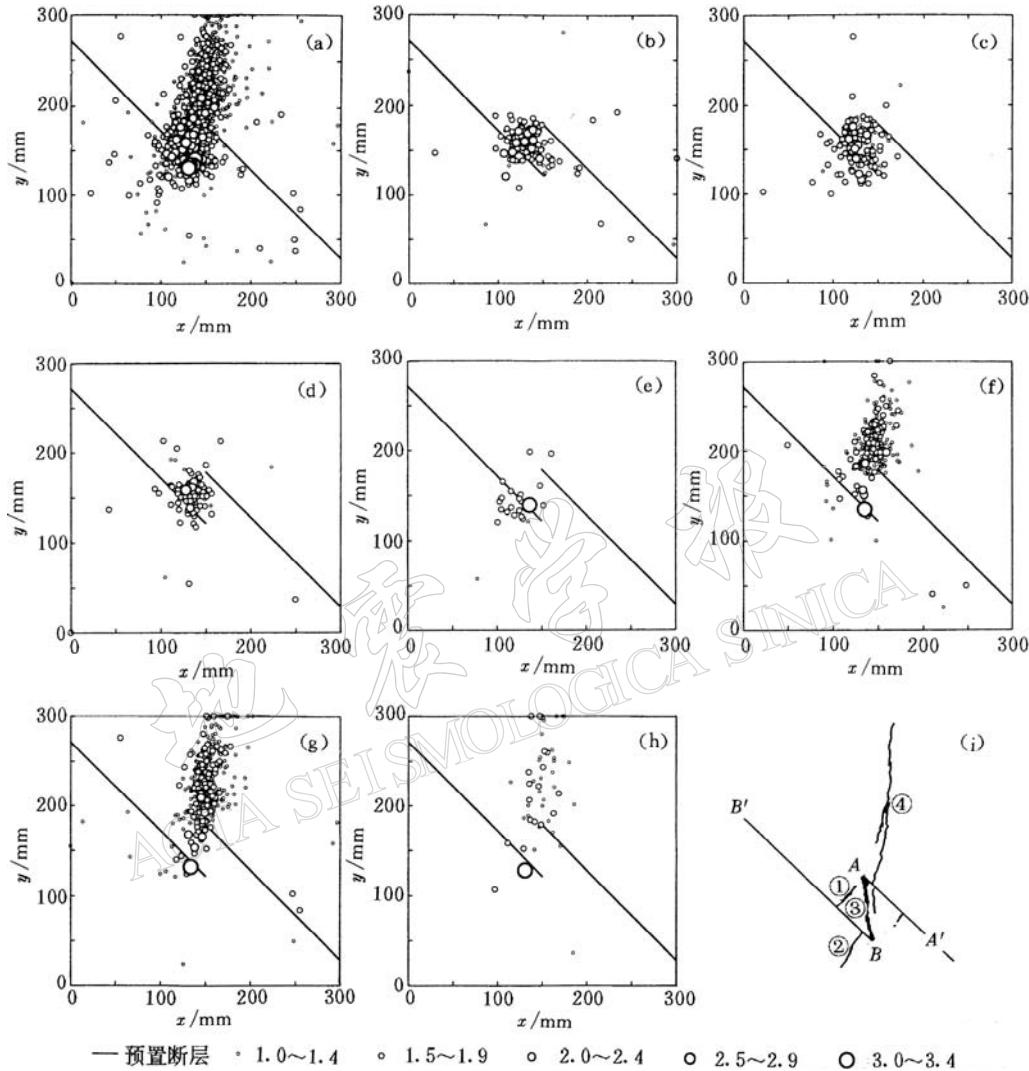


图 2 挤压型雁列式断层标本变形过程中 AE 空间分布图象的时间演化特征

- (a) 实验全过程;
- (b) 弹性变形阶段 (0.00~737.35 s);
- (c) 扩容弱化阶段 (737.76~843.76 s);
- (d) 破裂后粘化阶段 (843.77~1 682.80 s);
- (e) 破裂后粘化阶段 (1 682.80~2 186.30 s);
- (f) 破裂后粘化阶段 (2 186.30~2 411.11);
- (g) 破裂后粘化阶段 (2 411.11~2 700.68 s);
- (h) 破裂后粘化阶段 (2 700.68~2 769.83 s);
- (i) 雁列区附近表面宏观裂纹素描

列区内部继续显示平静态势, 而应变释放的主体地区已明显转移至  $AB$  断层上部外侧区域, 由  $A$  端点开始, AE 总体逐渐向上扩展, 显示一条相对宽阔的弱化带(图 2f)。2 411~2 701 s,  $AB$  断层上部的微破裂继续向上连通扩展, 并在较大规模弱化带形成后期出现明显的局部化现象, AE 向破裂带中心地带收缩。这一时期宏观裂纹系④最终形成。该时段内, 已有的  $AB$

断层又重新开始活动,有一系列中等大小的AE发生(图2g).

这一时期另一个较显著的现象是,从2 186 s开始,4次强度大于3.0的大AE事件在AB断层下端依次发生,破裂源位置从雁列区内部靠近BB'断层的地方,向左下方逐渐迁移,最后一次3.0以上较大事件的位置已明显位于雁列区BB'断层外侧(图2e,f).

上述图象显示,雁列区破裂之后形成的张性破裂AB,在差应力的持续作用下,分别从A,B两端点开始向上、下两个方向扩展,但两个方向所显示的破裂扩展图象及连通方式明显不同,上部先由大量小事件在极其短暂的时间内相继发生,形成一条宽阔的弱化带;之后在其中部出现破裂局部化,最终形成宏观裂纹④.其形成机理是由于强大的轴压作用在其平行的方向上产生了大量的张性微破裂;而下部宏观裂纹②的形成,则是在弹性阶段弱化带已经形成的基础上,由4次大事件依次发生、定向扩展、彼此连通而成所致.

### 3 雁列式断层变形过程中的声发射时间序列特征

由于AE主要分布于雁列区附近,因而选取包含雁列区的矩形范围作为统计区域(表2).采用物理意义清晰、相对独立的频次、强度(应变能)及表征大小事件比例关系的b值等3个参数对AE时序特征进行统计描述.

#### 3.1 声发射时间序列特征

轴向以 $5 \times 10^{-4}$  mm/s的速率加载,当加载约110 s时,拉张型雁列区开始有微破裂产生,320 s之前AE间歇发生,320 s之后、790 s之前AE活动较为密集,但时间分布相对均匀,声发射率(简称 $R_{AE}$ ,下同)约为35.8次/100秒(图3);790 s之后 $R_{AE}$ 急剧增加,直

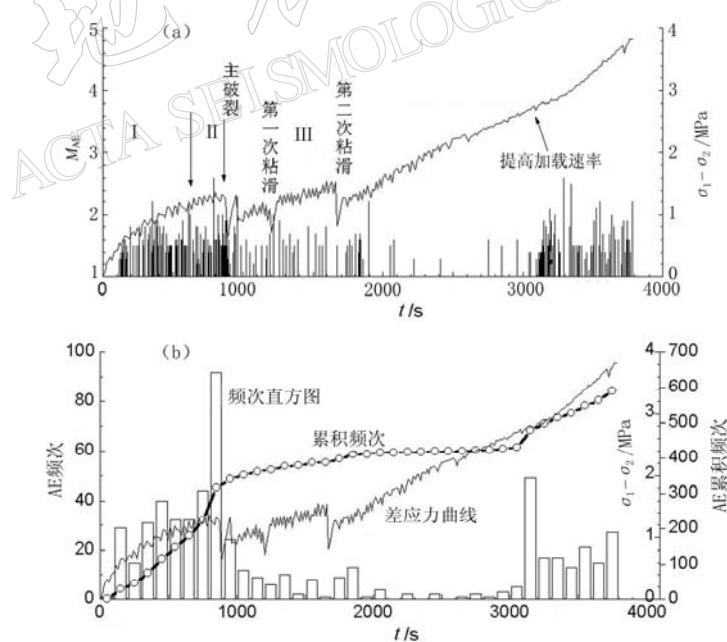


图3 拉张型雁列式断层标本变形过程中AE时序特征及差应力曲线  
(a) 实验全过程 $M_{AE}-t$ 图; (b) AE频次直方图及频次累积曲线

至 883.34 s 雁列区破裂贯通、发生大应力降。从 AE 累积频次来看, 破裂前指数增长现象十分明显(图 3b)。在破裂后的粘滑阶段, 雁列区 AE 数目较破裂前明显减少(图 3b)。约在 1 207 s 和 1 671 s 时发生两次较大的粘滑应力降, 而此前基本上未见有 AE 群体的前兆性增强过程, 即大粘滑事件的前兆特征不明显, 更没有破裂前临近失稳阶段累积频次指数增长的特殊时间图象(图 3b)。3 100 s 之后 AE 活动的显著增加, 是由于加载应变速率从  $5 \times 10^{-4}$  mm/s 提高到  $1 \times 10^{-3}$  mm/s 的缘故。

对于挤压型雁列式断层标本(图 4), 当差应力加载约 100 s 时, 雁列区开始有 AE 活动; 大约 350~700 s, AE 活动总体上趋于逐渐密集。该时段内  $R_{AE}$  平均为 13.6 次/100 秒, 明显偏低与拉张型雁列区的情形。在达到峰值差应力(大约 740 s)之前的较短时间内, AE 急

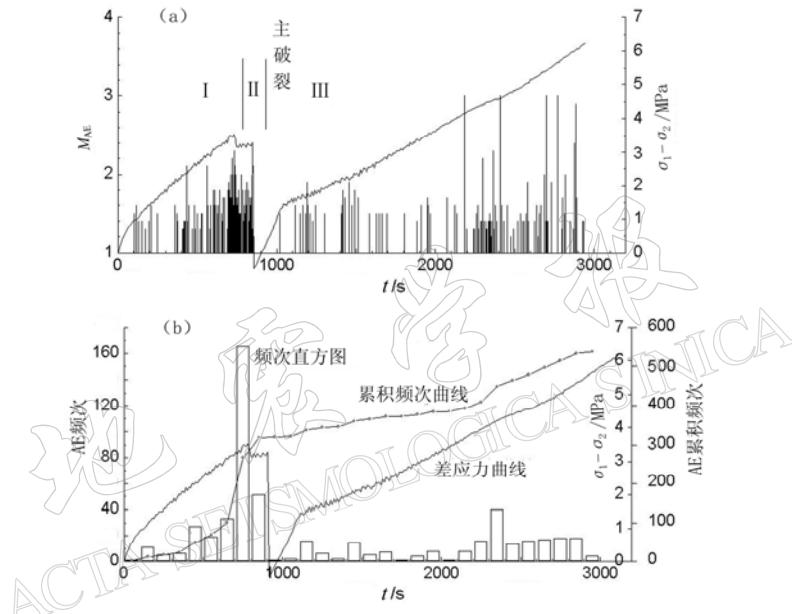


图 4 挤压型雁列式断层标本变形过程中的 AE 时序特征及差应力曲线

(a)  $M_{AE}-t$  图; (b) 频次及累积频次

剧增加, 峰值应力对应最大的  $R_{AE}$ , 为 165 次/100 秒。由前述定位结果可见, 此时 AE 的急剧增加在空间上表现为雁列区强烈的局部化丛集(图 2c)。峰值应力之后, 雁列区在 848.75 s 破裂贯通之前的较短时间内, 由于破裂前总体的弱化过程, 差应力曲线从最高值开始有所下降,  $R_{AE}$  明显降低, 显示失稳前的短时期的相对平静现象。破裂后粘滑阶段, AE 较破裂前明显减少, 间歇成丛活动。雁列区失稳前 AE 累积频次指数增长同样显著, 而破裂后粘滑阶段则基本上匀速增长。大约 2 186 s 之后, 雁列区 AE 数目及累积频次增长速率均有所增加, 这在空间上对应于微破裂在标本上盘向上的扩展过程(图 2f, g)。这意味着, 先期破碎带(此处为雁列区)对区域应力场的变化具有明显的敏感特性, 这实际上是由于破碎带整体具有相对较低的破裂或滑动强度, 因而当差应力略有增加时, 该部位将先于其它强度较高的区域发生变形或破裂所致, 这是地震研究中“窗口”或“敏感点”效应(张国民, 孙士宏, 1985; 王泽皋, 1986; 姜秀娥等, 1989)的一种可能的物理实验解释。相同的认识在下述 b

值变化中亦有体现。

### 3.2 AE时间序列的强度和能量特征

表2给出了雁列式断层标本变形过程中AE分级频次统计。可见，拉张和挤压型雁列式断层标本 $M_{AE} \geq 1.5$ 事件数约占总事件数的66%和69%，这一比例对共线不连通断层和含圆柱形障碍体的平直断层标本而言，仅分别为21%及42%（蒋海昆，2000），可见，雁列式断层标本变形过程中大事件相对较多。挤压型雁列区附近的AE强度相对较高，强度大于3.0的AE事件有4次，而拉张型雁列区最大AE强度仅为2.7。由于等应变速率加载，因而从标本破裂失稳时间的长短，可以间接看出破裂失稳前标本变形量的大小，拉张和挤压型雁列

区破裂失稳前的变形量大体相等。但从破裂强度来看，拉张型雁列式断层标本的破裂强度较低，仅为0.64 MPa，而挤压型雁列式断层标本则明显较高，为3.64 MPa。这表明，构造挤压部位能够积累更多的应变能，一旦破裂也将产生更大的应力降。

参照地震学中通过震级计算地震应变能的方式计算AE应变能。拉张型雁列区破裂前应变能释放起伏波动，雁列区贯通破裂之前的瞬间，应变能释放处于最高值状态。失稳前应变能释放总体高于破裂后粘滑阶段，粘滑阶段应变能释放平稳且有持续走低的趋势。3 400 s之后的高释放缘于加载速率的改变（图5a）。

挤压型雁列区破裂前同样可见应变能释放的持续增加，峰值应力对应应变释放的最高值。与拉张型雁

图5 实验全过程的应变能释放及差应力曲线  
(以50次累加、10次滑动的方式计算)  
(a) 拉张型雁列式断层；(b) 挤压型雁列式断层

列不同的是，挤压型雁列区贯通破裂之前的瞬间，应变能释放已处于低值状态，显示挤压型构造破裂失稳前的相对平静态势，而破裂后粘滑阶段应变能释放随差应力的增加，则有起伏地持续增强（图5b）。

表2 雁列式断层标本变形过程中AE分级频次统计

断层类型	空间范围		分级频次统计						最大AE强度	破裂失稳时间/s	峰值强度/MPa	主破裂应力降/MPa
	x/mm	y/mm	1.0~1.4	1.5~1.9	2.0~2.4	2.5~2.9	3.0~3.4	0.0~3.4				
拉张型雁列 (Br9908)	100≤x≤200	110≤y≤190	192	345	28	6	0	571	2.7	858.5	1.25	0.672
挤压型雁列 (Br9909)	100≤x≤170	110≤y≤190	162	325	35	2	4	528	3.1	863.0	3.45	3.641

### 3.3 AE 时间序列 $b$ 值的动态变化特征

$b$  值变化的一个共同特点是,  $b$  值在失稳前都有“趋势性降低—快速回升”这样一个变化过程。“ $b$  值降低”开始于差应力的增强过程之中, 并有可能延续至弱化阶段; 而“快速回升”则发生在动力学失稳前的短时期内。拉张型雁列区破裂前  $b$  值在峰值差应力之前短时期内急剧下降, 从约 90.6% 的峰值差应力处开始,  $b$  值从 2.183 降至 1.071, 破裂前的瞬间又快速回升至 1.98(图 6a); 而挤压型雁列区内  $b$  值从约 76.3% 的峰值差应力开始持续降低, 在峰值差应力前的瞬间达最低值 1.015, 在其后的弱化阶段,  $b$  值从最低点略有回升, 直至雁列区破裂失稳、产生大应力降(图 6c)。

破裂后的粘滑阶段, 尽管差应力在持续增加, 但  $b$  值的变化却相对平稳。从图 6d 挤压型雁列区来看, 虽然力学环境(以加载应变速率表征)无大的改变, 但大约 2 300 s 之后雁列区  $b$  值却更为显著地降低, 这在时间上与标本上盘微破裂群体向上的扩展过程相对应。可见, 挤压型雁列区破裂贯通之后, 雁列区  $b$  值的明显降低在时间上与邻区的破裂连通过程相对应, 显示空间上的“源、兆分离”现象。拉张型雁列 3 200 s 之后  $b$  值的急剧降低, 缘于加载应变速率的改变(图 6b)。

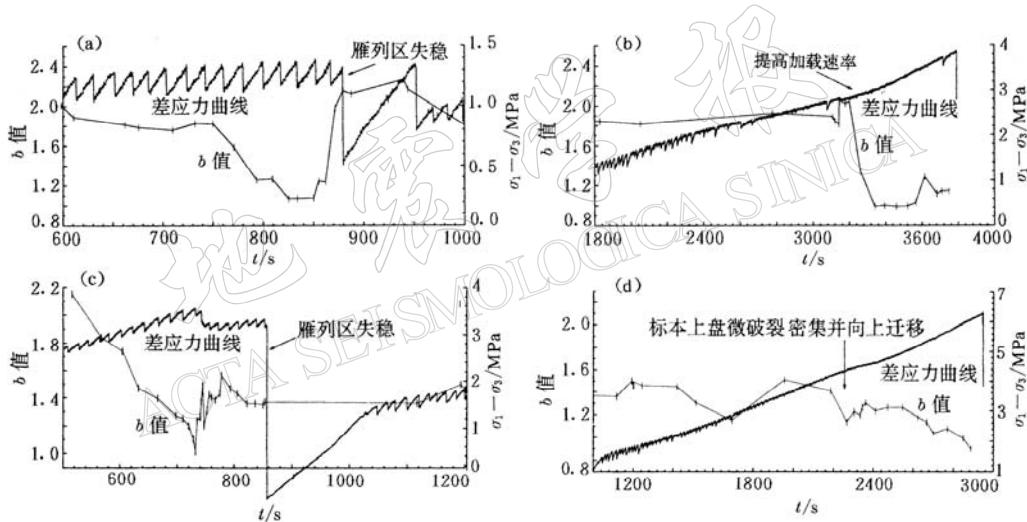


图 6 变形破坏全过程的  $b$  值变化及差应力曲线(50 次累加、10 次滑动计算, 最小二乘法)

(a) 拉张型雁列区失稳前后; (b) 拉张型雁列区破裂后阶段(速率改变的影响); (c) 挤压型雁列区失稳前后; (d) 挤压型雁列区破裂后阶段(外围区破裂的影响)

从加载全过程雁列区 AE 序列的 G-R 关系来看, 挤压和拉张型雁列区  $b$  值分别为  $1.74 \pm 0.08 (r=0.99)$  及  $1.90 \pm 0.08 (r=0.99)$ , 而共线不连通断层或含障碍体平直断层标本的  $b$  值则分别为  $3.01 \pm 0.13 (r=0.99)$  及  $2.93 \pm 0.10 (r=0.99)$ (蒋海昆, 2000)。可见, 共线和平直断层的  $b$  值远大于雁列式断层的  $b$  值, 而共线与平直断层之间、以及雁列式断层之间  $b$  值的差异则要小的多, 这表明, 构造差异所导致的  $b$  值差异远大于  $b$  值随差应力增加所产生的变化量。即相对于力学条件而言, 构造对  $b$  值的大小具有更为重要的控制作用, 尽管相似的力学作用过程, 使得不同构造区域的  $b$  值在破裂前可能会在一定程度上表现出类似的趋势性变化特征, 但其区域性的本底差异应该是明显的, 不同构造区域之间  $b$

值的横向对比可能并不适宜.

### 3.4 加载速率改变对 AE 时序特征的影响

理论研究中通常近似地认为, 板块边界的刚性匀速推挤是板内地震最为重要的动力来源. 板块边界的匀速推挤导致板内介质的变形, 应变量随距推挤边界的距离而衰减. 在岩石破裂实验中, 等应变速率伺服控制加载是一种最常用的加载方式, 也是上述力学作用过程的理想化近似. 为研究应变速率改变对AE时序特征的影响, 在拉张型雁列式断层标本变形实验的破裂后粘滑阶段, 于 3086.36 s 时将应变速率从  $1 \times 10^{-4}$  mm/s 提高到  $5 \times 10^{-3}$  mm/s. 由图 1 可见, 加载应变速率提高前后, AE 空间分布图象未发生明显改变, 表明即使是在摩擦滑动阶段, 构造对群体微破裂(或粘滑)事件空间分布格局仍起控制作用. 但加载应变速率的提高对雁列区 AE 时间序列特征的影响十分明显, 加载速率提高之后, AE 事件较提高之前明显活跃, 在频次及强度两方面均明显增多(图3), 较高的加载速率对应较高的应变能释放及明显的低 b 值, 并且加载速率发生改变的瞬间, 频次、释放的应变能及 b 值等均发生急剧的变化(图3, 图 5a, 图 6b). 这首先表明力学状态的改变会导致 AE 序列时序特征的急剧变化, 其次意味着 b 值与力学状态密切相关, 较高的应力状态导致相对较低的 b 值, 而应力状态的急速增高会导致 b 值的急剧降低.

## 4 讨论和结论

拉张型或挤压型雁列式断层标本变形过程中, AE 时空演化既有其共性的一面, 又在某些方面具有较大差异. 这些异同体现了断层组合及其与力学过程之间相互作用的影响:

1) 预置构造对 AE 空间分布格局具有较强的控制作用. AE 主要分布于雁列区预置断层两个端点之间的连线附近, 较大事件还通常集中于某一端点附近反复发生. 从其时间演化来看, 随着应力的增加, AE 首先在两个端点附近从集, 之后向两端点连线附近集中, 出现明显的破裂局部化现象, 前期微破裂从集图象指示后期宏观破裂的扩展方向及扩展范围. 类似的现象在孔洞破裂实验中也有报道. Chow 等(1995)发现, 后期孔壁的剥落部位已由前期的 AE 从集所标示. 从宏观破裂来看, 拉张型雁列区主破裂方向与轴向应力方向垂直, 而挤压型雁列区主破裂扩展方向却与轴向应力方向平行.

2) 雁列式断层标本变形过程中较大事件所占比例相对较高, 弱化阶段相对较长、弱化过程明显. 在其变形过程中, 破裂前 AE 累积频次指数增长, 而雁列区宏观破裂之后, AE 数量逐渐减少、应变释放相对减弱. 其后的摩擦滑动过程中, 大的粘滑失稳前未见有 AE 活动前兆性的增强过程.

3) 雁列区 b 值的变化在失稳前均有“趋势性降低—快速回升”这样一个典型的变化过程.“b 值降低”一般发生在差应力增强过程之中, 这一降低趋势在时间上有可能延续至弱化阶段; 而“快速回升”则一般发生在破裂失稳前的短时期内. 破裂后粘滑阶段的 b 值变化相对平稳. 对比研究表明, 雁列式断层标本的 b 值明显小于共线或平直断层标本的 b 值, 但张性与压性雁列之间, 以及共线不连通断层与含障碍体平直断层之间, b 值的差异要小得多. 这意味着构造差异所导致的 b 值差异, 可能远大于 b 值随差应力的增加而产生的变化量. 但对同一构造标本, b 值又与力学状态密切相关, 较高的应力状态导致相对较低的 b 值, 而应力状态的急速增高会导致 b 值的急剧降低.

4) 由于较低的破坏强度, 先期破碎带对差应力的微小变化具有特殊敏感性, 从而成为“源、兆分离”、“窗口”或“敏感点”效应等地震活动性前兆现象的一种可能的物理解释。另一方面, 力学状态的改变会导致 AE 序列时序特征的急剧变化, 随着加载速率的提高, AE 事件较之前明显活跃, 较高的加载速率对应较高的应变能释放及明显的低  $b$  值。

参加实验的还有吴秀泉、刘天昌、扈小燕、宋福喜、刘力强、王凯英等; 工作中得到马瑾院士和王绳祖研究员的热情指导, 谨致谢意!

## 参 考 文 献

- 杜异军, 马瑾, 李建国. 1989. 雁列式裂纹的相互作用及其稳定性[J]. 地球物理学报, 32(专辑 I): 218~231  
 姜秀娥, 张国民, 单锦秀, 等. 1989. “地震窗”在地震预报中的应用[A]. 见: 许绍燮编. 地震预报方法实用化研究文集——地震学专辑[C]. 北京: 学术书刊出版社, 296~311  
 蒋海昆, 张流, 王琦. 1999. 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, 19(3): 245~252  
 蒋海昆, 张流, 周永胜. 2000. 室温及不同围压条件下声发射序列特征及其地震学意义[J]. 地球物理学报, 43(6): 812~826  
 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特征[D]: [学位论文]. 北京: 中国地震局地质研究所  
 李建国, 石桂梅, 马瑾. 1989. 雁列裂纹交接区破坏特征与失稳形式研究[A]. 见: 中国地震局地质研究所编. 现代地壳运动研究(4)[C]. 北京: 地震出版社, 149~155  
 李世愚, 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  
 刘力强, 马瑾, 吴秀芳. 1986. 雁列式断层变形与失稳过程的实验研究[J]. 地震学报, 8(4): 393~403  
 马胜利, 邓志辉, 马文涛, 等. 1995. 雁列式断层变形过程中物理场演化的实验研究(一、二)[J]. 地震地质, 17(4): 327~341  
 马文涛, 马瑾, 刘力强, 等. 1995. 雁列断层变形过程中的声发射特征[J]. 地震地质, 17(4): 342~348  
 王泽皋. 1986. 关于“震情窗口”问题的时间与展望[J]. 地震学报, 8(3): 245~262  
 张国民, 孙士宏. 1985. 华北几次大震余震应变释放特征及“应力窗口”的机制讨论[J]. 地震, (1): 1~7  
 张之立, 方兴. 1989. 含非均匀体岩板中混合裂纹扩展过程的实验研究[J]. 地球物理学报, 32(专辑 I): 183~193  
 张之立, 李强. 1989. 断裂系扩展过程与地球物理场变化过程的实验研究[J]. 地球物理学进展, 8(4): 225~231  
 Bomblakis G G. 1973. Study of the brittle fracture process under uniaxial compression[J]. Tectonophysics, 18: 231~248  
 Chow T M, Meglis I L, Young R P. 1995. Progressive microcrack development in tests on Lac du Bonnet Granite-II. ultrasonic tomographic imaging[J]. Int Rock Mech Min Sci & Geomech. Abstr, 32(1): 85~91

## SPATIO-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC EMISSION DURING THE DEFORMATION OF ROCK SAMPLES WITH COMPRESSIVE AND EXTENSIVE EN-ECHELON FAULT PATTERN

Jiang Haikun<sup>1)</sup> Ma Shengli<sup>2)</sup> Zhang Liu<sup>2)</sup>

Hou Haifeng<sup>1)</sup> Cao Wenhai<sup>1)</sup>

1) Seismological Bureau of Shandong Province, Ji'nan 250014, China

2) Institute of Geology & Laboratory of Tectonophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China

**Abstract:** The spatio-temporal characteristics of acoustic emission (AE) during the deformation of rock samples with compressional and extensional en-echelon faults have been studied. The results show that the pre-existing structure can significantly influence the patterns of AE spatial distribution. With increasing of differential stress, AE events firstly cluster around the two ends

of pre-existing faults inside the jog and then along the line joining the two ends. The biggish AE events often occur around one end repeatedly. The image of AE clusters indicates the direction and the area of the fracture propagation. The direction of the macroscopic fracture in extensional and compressional jogs is perpendicular and parallel to the direction of axial stress, respectively. The weakening process before the fracturing of jog area is remarkable, and one of the typical precursors for the instability is that the cumulative frequency of AE events increases exponentially. After the fracturing of the jog the frequency and releasing strain energy of AE events decrease gradually. During the friction period, there is no precursory increasing of AE activity before the big stick-slip events. The change of  $b$  value in jog shows a typical change of "decreasing tendentially→returning quickly" before the instability. The decrease of  $b$  value occurs in the process of stress increasing and sometime goes down to the weakening stage, and the quick increase  $b$  values appears in a short time just before the instability. The comparative analysis shows that the difference in  $b$  value due to the different structures is larger than  $b$  value variation caused by increase of the differential stress. For the same sample, the temporal sequence of AE is strongly affected by the mechanical state, and the high loading velocity corresponds to the high release rate of strain energy and low  $b$  value. Due to its lower failure strength, the broken area is sensitive to small changes in differential stress. Therefore, it offers a potential explanation for the phenomena of "precursory window or sensitive point" and "separation of seismic source and precursors".

**Key words:** acoustic emission; compressional en-echelon fault; extensional en-echelon fault; biaxial experiment; differential stress