

文章编号: 0253-3782(2005)06-0682-09

# 地震非均匀度物理意义的实验研究\*

李志雄<sup>1)</sup> 马胜利<sup>2)</sup> 李圣强<sup>1)</sup> 李闽峰<sup>1)</sup>  
路 鹏<sup>3)</sup> 陈华静<sup>4)</sup> 王 松<sup>4)</sup> 吴 婷<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

2) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室

3) 中国河北三河燕郊 065201 防灾技术高等专科学校

4) 中国北京 100036 中国地震台网中心

**摘要** 资料表明,某些强地震前中小地震的地震非均匀度(GL 值)参数在强地震孕育进入中期或短期阶段出现明显异常变化,显示出区域中小地震活动状态发生变化.本文通过对含有障碍体的平直断层、挤压型雁列式断层及Ⅲ型剪切裂纹等 3 种类型的岩石标本变形破坏过程声发射事件时间序列的分析,讨论了 GL 值变化的物理意义.计算结果表明,这 3 种标本变形破坏过程中,在应力应变处于非弹性阶段前夕或在岩石整体破裂失稳前破裂成核期间,GL 值出现持续大于 1 的异常变化.表明 GL 值能较好地刻画受压岩石破坏前的应变的非弹性变化,具有一定的标本破裂指示意义.

**关键词** 地震非均匀度 岩石实验 声发射 非弹性变化 地震预测

**中图分类号**: P315.61 **文献标识码**: A

## 引言

岩石声发射研究是地震学主要研究方向之一.许多学者借助室内岩石实验系统,对多组含有不同类型断层的岩石标本进行破裂加压实验,通过对记录到的声发射事件序列的分析和计算,试图从实验的角度,佐证某些地震参数(如  $b$  值等)的变化或某些现象与岩样破裂失稳前的应力变化有关,具有明显的物理意义(马胜利等, 2004a, b; Lockner, 1993; 蒋海昆, 张流, 1998).

为更好地利用区域中小地震事件探索强地震前可能存在的前兆信息,李志雄和高旭(1994)提出地震活动非均匀度(GL 值)参数,以刻画与强地震孕育有关的强震前中小地震活动由随机变化状态向具有有序特征(如地震活动增强、中等地震平静、地震空区、地震活动密集、地震条带等)的非均匀状态的变化.据对中国大陆 1920 年以来 43 次  $M_s \geq 7.0$  大震震前 GL 值时间扫描(李志雄, 高旭, 1994)发现,除少数边界附近的大震外(可能与缺乏境外地震资料有关),绝大部分 7 级大震震前 1~3 a 在震中一定范围内,5 级以上地震活动在时间和空间分布上呈现出明显的均匀-非均匀状态(GL 值  $> 1$ )变化,且 GL 值高值区与未来大地震震中密切相关.图 1 为部分地震前 GL 值随时间变化的曲线(李志雄, 高旭,

\* 国家“十五”科技攻关项目(2004BA601B01)资助.  
2005-02-24 收到初稿, 2005-07-18 收到修改稿并决定采用.

1994). 刘桂萍(1999)也指出, 华北地区部分中强地震前也出现过明显的 GL 值异常. 陈学忠等(2000)研究了中强地震前地震前兆观测手段异常变化的时空分布不均匀性, 发现多次中强地震前, 前兆观测手段异常时空分布也存在着显著的均匀—非均匀的状态转化. 根据多次 GL 值震例, 笔者推测, GL 值在震前的显著异常变化可能与强地震孕育进入中期或短期, 震源岩石破裂成核过程有关, 与这个时期震源区岩石变形应力应变呈非线性变化有关. 为检验上述推测, 笔者利用已有的室内岩石标本变形破坏实验结果, 计算并分析岩石标本声发射序列的 GL 值及其变化特征, 以探讨强地震前 GL 值异常变化的物理机制.

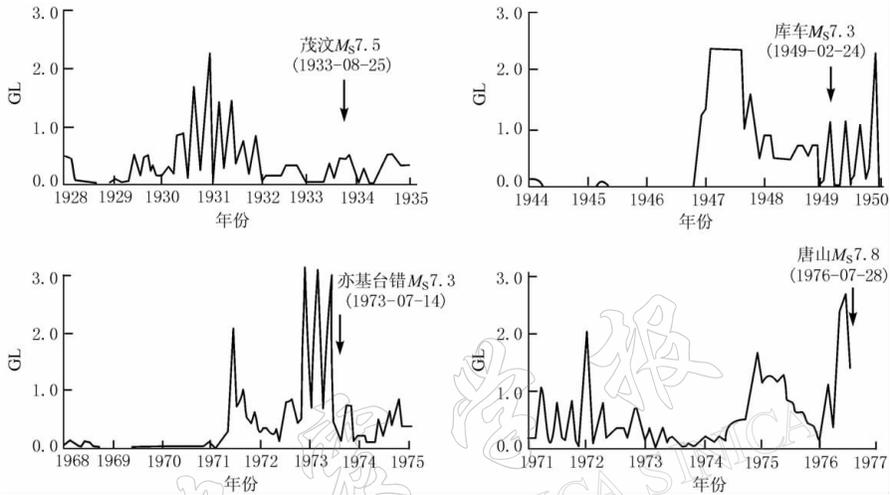


图1 部分地震前 GL 值随时间变化曲线(李志雄, 高旭, 1994)

## 1 地震非均匀度(GL 值)定义

把历史时期一定范围某一时段( $t$ )内的地震活动看成是一个时间序列过程. 若组成时间序列的地震事件满足下列条件, 则统计学上称之为泊松过程, 即母体服从均匀分布(傅征祥, 1991):

1) 独立性. 事件可以在时间序列过程中任意一个时间段落内发生, 不受相邻段落中其它事件的影响.

2) 平稳性. 在一个时间段落内事件发生的概率与段落时间  $\Delta t$  大小成正比, 而与它在整个过程中的位置无关.

3) 不重复性. 多个事件同时在一个时间段落内发生的概率很小.

统计上, 泊松过程中时间区间  $\Delta t$  内发生  $k$  次事件的概率为

$$P(\zeta = k) = \frac{(\lambda \Delta t)^k}{k!} e^{-\lambda \Delta t} \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  为时间序列事件发生的平均速率. 据傅征祥(1991)文章, 为检验过程是否服从泊松分布, 引入统计量  $\chi^2$ :

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^k \frac{[O_i(\zeta) - E_i(\zeta)]^2}{E_i(\zeta)} \sim \chi^2(f) \quad (2)$$

式中,  $f$  为自由度. 对比在一定置信水平( $\alpha = 0.05$ )的临界值  $\chi_{0.05}^2$ , 若  $\chi^2 < \chi_{0.05}^2(f)$ , 则实

际观测量  $O(\zeta)$  (观测到  $\zeta = k$  次事件的实际段落数) 与理论段落数  $E(\zeta) = M \cdot P(\zeta)$  一致性显著 ( $M$  为整个过程  $t$  中含有所取时间区间的段落数), 即实际事件的发生过程为稳定随机的泊松过程, 反之则不是.

定义地震非均匀度 GL 值为

$$GL = \frac{\chi^2}{\chi_a^2(f)} \quad (3)$$

显然, 当  $GL \leq 1$  时, 该时段的地震活动具有统计均匀特性, 是一个稳定的随机过程; 当  $GL > 1$  时, 该时段的地震事件与均匀活动过程有显著差异, 是一个非稳定过程. 表明该时段因某种因素的制约, 该地区的地震活动具有非均匀特点.

## 2 岩石变形破坏实验概述及声发射序列 GL 值异常机理探讨

### 2.1 实验概述

马胜利等(2004)及蒋海昆等(2002a, b)在室内开展了中尺度岩石标本变形破坏的声发射实验. 这些实验在双轴压缩、等位移速率加载条件下进行. 实验标本类型包括模拟含障碍体的断层、挤压型雁列式断层和Ⅲ型剪切裂纹 3 类. 标本变形破坏过程及声发射序列变化特征详见马胜利等(2004a, b)及蒋海昆等(2002a, b)的研究成果. 本文仅引述其中部分实验结果和有关结论.

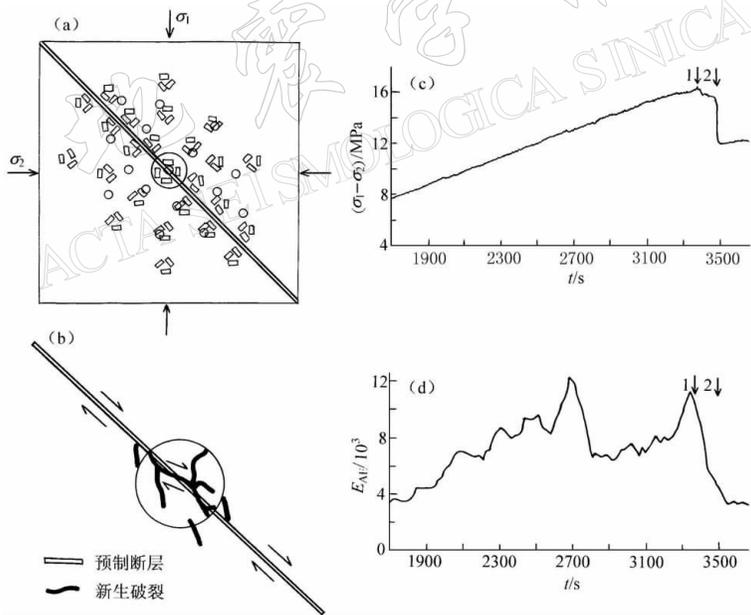


图 2 含障碍体断层的实验结果(据马胜利等, 2004)

(a) 标本结构、传感器分布及加载方式示意图, 对角线方向的粗直线表示预制断裂带, 断层中部的圆柱体为障碍体, 小圆圈和方框分别表示声发射传感器和应变片; (b) 标本变形过程中障碍体的宏观破裂素描; (c) 标本的差应力-时间曲线, 箭头 1, 2 分别指示障碍体破坏和断层失稳的时间; (d) 标本应变释放曲线

#### 2.1.1 含障碍体的断层

标本尺寸为  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的花岗岩. 其间含有一条预制断层, 断层中央

含有一个直径 40 mm 的辉长岩圆柱体, 构成一个障碍体. 断层带宽 1 mm, 用石膏填充. 标本表面布设了声发射探头和应变片, 用以观测标本变形过程中的微破裂和变形(图 2a).

在图 2a 所示的应力作用下, 标本变形过程中障碍体上产生了一系列宏观破裂(图 2b). 根据声发射定位结果和应变分析结果, 这些破裂在差应力达到峰值应力 60% 左右开始发育, 障碍体完全破裂引起宏观应力从峰值应力处开始下降(图 2c 中箭头 1), 标本失稳则发生在此后约 150 s(图 2c 中箭头 2), 由断层的整体滑动引起(马胜利等, 2004b).

### 2.1.2 挤压型雁列式断层

标本尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm 的辉长岩, 其间预制有两条断层, 其距离和重叠尺寸均为 20 mm, 断层带用石膏充填, 宽度为 3 mm. 标本结构如图 3a 所示.

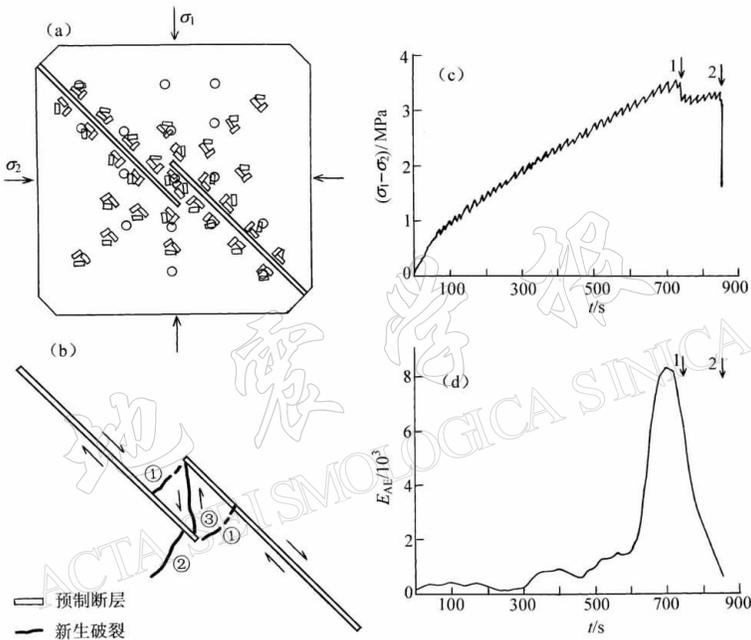


图 3 挤压型雁列式断层实验结果(据马胜利等, 2004b)

- (a) 标本结构、传感器分布及加载方式示意图, 其中沿 45° 方向的两条条带为预制断层带, 小圆圈和方框分别表示声发射传感器和应变片; (b) 标本变形过程中雁列区形成的宏观破裂素描; (c) 标本的差应力-时间曲线, 箭头 1、2 分别指示雁列区破坏和断层失稳的时间; (d) 标本应变释放曲线

在压力作用下, 断层雁列区表现为挤压性质. 在标本发生整体失稳前, 雁列区附近产生了一系列宏观破裂(图 3b), 裂纹①, ②, ③在标本变形过程中一次产生, 其中连接断层两端点的裂纹③的产生标志着雁列区的完全破裂, 在应力-时间曲线上对应一次应力降(图 3c 中箭头 1); 标本的整体失稳发生在雁列区完全破裂后约 150 s, 由断层的整体滑动引起, 对应着一次很强的应力降过程(图 3c 中箭头 2)(马胜利等, 2004b).

### 2.1.3 III型剪切裂纹断层

该断层标本为花岗闪长岩, 尺寸为 500 mm×300 mm×100 mm, 含有一条与主压应力夹角 30°、未切穿整个标本厚度(切割深度为 80 mm)的断层. 断层用石膏填充, 宽度 3 mm. 图 4 为 III 型剪切断层的实验结果.

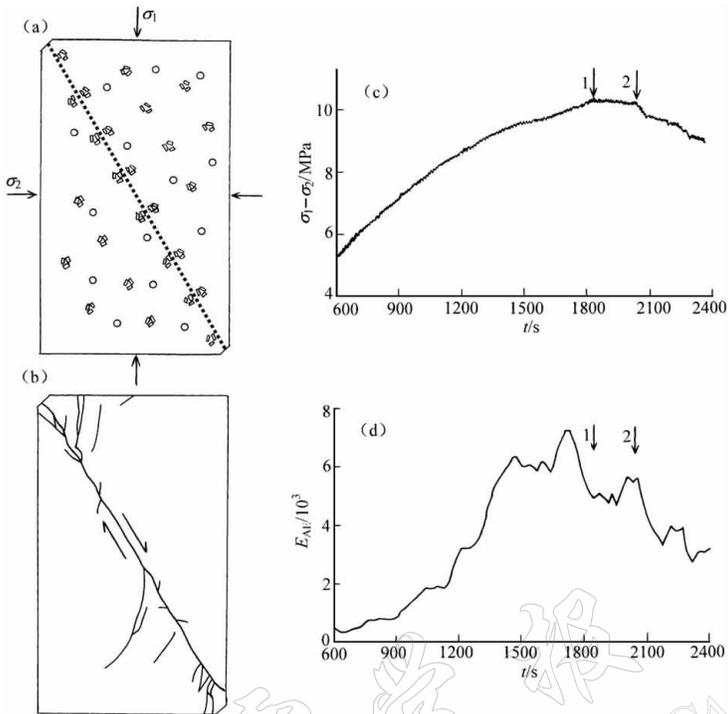


图 4 III型剪切断层撕裂扩展的实验结果(据马胜利等, 2004b)

(a) 标本结构、传感器分布及加载方式示意图, 对角线方向的虚线表示预制断裂带, 小圆圈和方框分别表示声发射传感器和应变片; (b) 标本变形过程中产生的宏观破裂素描; (c) 标本的差应力-时间曲线, 箭头 1, 2 分别指示峰值应力和断层失稳的时间; (d) 标本应变释放曲线

标本在变形过程中, 预制断层被切部位被撕裂形成了一条新的破裂带(图 4b), 将标本切割成两半. 声发射定位结果和应变分析表明, 在应力达到峰值应力的 80% 时宏观破裂开始形成, 至峰值应力时(图 4c 中箭头 1)破裂已基本形成, 而失稳发生在其后 200 s(图 4c 中箭头 2), 与断层的整体错动(II型剪切滑动)相对应(马胜利等, 2004b).

## 2.2 GL 值计算结果及其异常机理探讨

### 2.2.1 标本失稳前声发射序列 GL 值变化特征

根据上述 3 种类型断层实验声发射时间序列结果, 由式(3)分别计算了各自序列的 GL 值(计算窗长 100 s, 滑动步长 10 s; 起算能级: 障碍体断层和挤压型雁列式断层为 1.0, III型剪切裂纹断层为 4.0). 图 5 分别为 3 种断层岩石标本变形破坏实验声发射事件序列 GL 值的时间变化曲线.

从图 5 结果看出, 3 类实验标本在受压变形过程中, 相应的声发射 GL 值均会在特定时段发生持续一段时间的异常变化(GL 值 > 1). 表明相应时段内的声发射事件在事件时序分布上发生了不同于随机分布的变化. 现将这 3 类断层声发射 GL 值曲线变化特点分述如下:

1) 含障碍体标本声发射 GL 值(图 5a)在加压后, GL 值在标本破裂前出现 3 次大于 1 的异常时段, 在其它大部分时间里 GL 值在 0~1 间呈小幅度起伏变化. 表明此间的声发射事件的时间分布是均匀的, 声发射事件的发生具有随机特性. GL 值在标本加压初期 430~

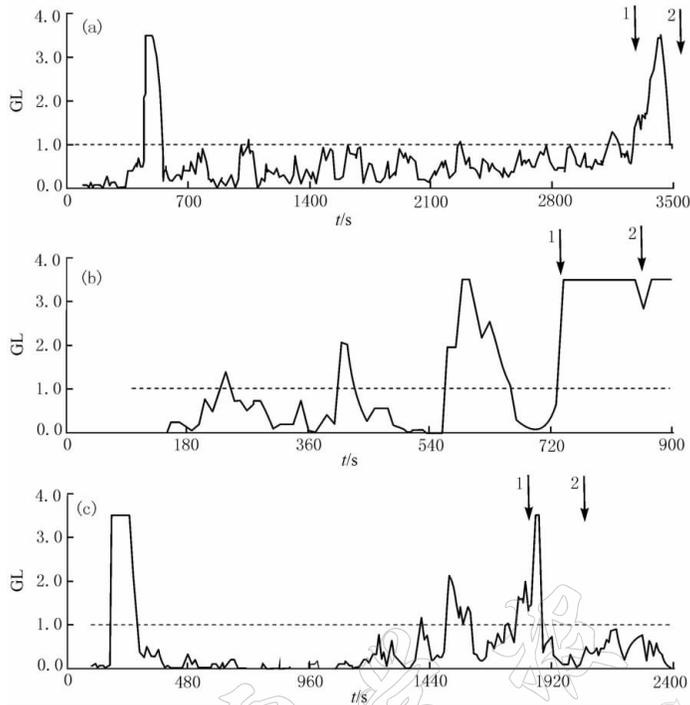


图 5 3 种断层岩石标本变形破坏实验声发射序列 GL 值时间变化曲线

(a) 含障碍体断层; (b) 挤压型雁列式断层; (c) III 型剪切裂纹断层

图中箭头 1、2 标识含义与相应实验结果图中所标箭头 1、2 的指示含义一致

520 s 时段的高值 ( $>1.0$ ) 变化与预制断层填充石膏破裂密切相关。由于石膏材质硬度相对较低, 受压后发生破裂, 由其引发的声发射事件在时序上表现出较明显的非均匀特性, 从而导致 GL 值出现异常变化。这种变化显然与岩石标本非线性变形无关, 仅仅是对岩石受压初期阶段的一种反应。在岩石破坏形成(箭头 1)前, GL 值出现持续约 40 s 的异常变化。破坏形成后, 在 3 280 s 处 GL 值又出现大于 1 的异常, 至 3 440 s 处达到最大值, 异常在 3 490 s 处结束, 标本失稳则发生在异常结束的时间(箭头 2)。由此看出, GL 值大于 1 的持续异常变化可以作为含障碍体标本岩体破坏形成和最终失稳的显著标志。

2) 挤压型雁列式断层标本的 GL 值曲线(图 5b)变化相对复杂, GL 值在标本失稳前经历了 4 次大于 1 的变化过程。第一次出现在 230~240 s 期间, 由于变化幅度小(略大于 1), 且持续时间短(10 s), 相当于一个突跳点, 可不作异常对待。随后出现在 410~430 s 幅度最大为 2.0 的第二次异常变化, 有可能与加压过程中断层填充石膏的破裂相关, 之后 GL 值又转入持续 140 s 的低值。第三次高值在 570~660 s 处出现, 它的出现表明, 标本破裂(箭头 1)即将开始。在标本破裂起始处(740 s), GL 值出现第四次上升, 标本失稳则是在 GL 值持续高值期间约 860 s 处发生。从挤压型雁列式断层标本的 GL 值曲线变化过程看, 标本破坏形成和最终失稳前确实存在 GL 值持续高值异常。

3) III 型剪切裂纹断层标本加压后, 声发射 GL 值(图 5c)在加压初期(180~250 s)也经历了因预制断层填充石膏破裂造成的超过阈值线的异常变化, 此后转入持续约 1 300 s 的低值。在破裂形成(箭头 1)前, GL 值出现约 110 s 的异常变化。在 1 780 s 处 GL 值又显著

上升, 出现大于 1 的异常变化, 并在 1 870 s 处达到峰值. 随后 GL 值急剧下降至 1 以下. 标本失稳则发生在约 2 050 s 处(箭头 2 处). 实验表明, III 型剪切裂纹断层标本声发射事件在岩石破坏形成和失稳前在时序分布上存在非随机变化特性, 表现为 GL 值出现大于 1 的异常变化.

上述 3 类不同断层标本声发射实验 GL 值计算结果表明, 不考虑预制断层填充石膏变形的影响, 在岩石标本弹性变形大部分时段, GL 值一般不随应力的增加而增加, 基本保持在 1 以下变化. 只有在标本破坏形成前和失稳前 GL 值才会出现持续一段时间的高值(> 1)异常变化. 显示相应时段声发射事件与其它时段的声发射事件在时间分布上具有明显不同的统计特点, 具有非随机特性.

### 2.2.2 GL 值异常变化的力学机制讨论

通过对比 3 类断层标本声发射 GL 值变化与各自标本相应加压过程中差应力与应变释放之间的关系, 不难发现 GL 值的异常变化与标本受压到一定阶段的破裂变形过程密切相关.

1) 含障碍体的断层、挤压型雁列式断层和 III 型剪切裂纹断层 3 类标本声发射 GL 值变化的一个共同特点是: GL 值异常均在标本破坏和失稳前不太长的时间里出现, 显示出 GL 值出现异常与标本完全破裂和失稳密切相关(图 2c, 3c, 4c 及图 5 中的箭头 1, 2).

2) 3 类断层标本的声发射 GL 值异常均出现在标本完全破坏之前的应变(较)大释放前后一个不太长的时间内. 表明标本断层的声发射 GL 值异常变化与应变释放有着较密切的联系.

3) 障碍体断层声发射 GL 值异常起始时间与应变较大释放事件基本同步(图 2d, 图 5a), 且异常持续时间与标本破坏开始至失稳的时间大体相当(图 2c 和 5a 箭头 1, 2). 由于标本破坏至失稳是应力软化阶段, 期间标本应变变形显著, 因而该类型的断层声发射 GL 值的异常变化显然与标本受力达到岩石破裂极限, 并与断层蠕滑—均阻化过程有着密切的力学联系. 表明标本障碍体部位在受力末期的软化(即破裂成核阶段)导致的局部应力调整是影响标本声发射 GL 值出现异常变化的主要原因.

4) 挤压型雁列式断层标本失稳前的声发射 GL 值异常起点与标本应变加速时间基本一致, 表明该类型断层的应变释放状态的显著变化将显著影响声发射事件在时间轴上分布的均匀程度, 并且这种类型的断层标本受力达到应力软化阶段时(图 3c 箭头 1), GL 值也会同步出现异常变化(图 5b 箭头 1).

5) III 型剪切裂纹断层标本声发射 GL 值异常与应变大释放有关. 同时, 应力软化也会造成声发射事件在时序分布上出现非均匀现象.

上述分析结果表明, 含障碍体的平直断层、挤压型雁列式断层和 III 型剪切裂纹 3 类断层声发射 GL 值的异常变化具有明显的物理意义, 一定程度上反映了岩石标本受力是否接近或达到岩石破裂强度, 对识别岩石标本是否处于“蠕滑—均阻化(马胜利等, 2004b)”阶段或其前夕具有一定的指示意义.

## 3 结论

通过对含障碍体的断层、挤压型雁列式断层和 III 型剪切裂纹 3 类标本所开展的室内破裂实验及上述对其声发射事件 GL 值异常的物理含义的探讨, 初步得到以下认识:

1) 利用 GL 值方法能够较好地识别出上述 3 类岩石实验标本的声发射序列在标本失稳前存在的均匀—非均匀的状态变化。

2) 岩石标本受力变形接近非弹性变化前, 声发射序列在时间分布上是均匀的, 其间 GL 值小于 1。

3) GL 值大于 1 的异常的出现, 与标本受压达到一定阶段后岩石完全破坏事件的发生密切相关。

4) 岩石标本受压后在变形显著的应力软化阶段, GL 值均有持续地异常出现。

实验结果表明, 地震非均匀度(GL 值)能较好地刻画岩石标本在压力作用下, 变形进入非弹性阶段的岩石介质性质所发生的显著变化。GL 值的持续异常变化可能与地震孕育进入非弹性阶段有关, 一定程度上证实了笔者根据实际震例做出的推测。本实验结果对地震预测探索具有较好的指导作用。

本文对地震非均匀度(GL 值)异常物理意义所开展的实验研究仅属开端, 有关 GL 值实际震例的深入研究, 岩石实验声发射 GL 值异常的空间分布特征及其与震源的关系, 以及室内岩石实验中温度及水对声发射序列非均匀性的影响等问题, 尚需进一步开展工作。

#### 参 考 文 献

- 陈学忠, 王晓青, 李志雄, 等. 2000. 强震前短临地震前兆时空分布非均匀性变化特征[J]. 地震学报, **22**(1): 27~34
- 傅征祥. 1991. 中国大陆东部强震活动时间过程的不均匀性[J]. 中国地震, **7**(2): 1~11
- 蒋海昆, 张流. 1998. 岩石微破裂时空分布特征及其动态演化过程的声发射研究进展[J]. 世界地震译丛, (5): 1~10
- 蒋海昆, 马胜利, 张流, 等. 2002a. 雁列式断层组合变形过程中的声发射活动特征[J]. 地震学报, **24**(4): 385~396
- 蒋海昆, 马胜利, 张流, 等. 2002b. 含障碍体平直断层变形过程中的声发射特征[J]. 地球物理学报, **46**(2): 209~216
- 李志雄, 高旭. 1994. 地震非均匀度的研究及在强震中期预报中的应用[J]. 地震, **14**(6): 11~18
- 刘桂萍. 1999. 地震非均匀度方法在华北地区中强震中期预报中的应用[J]. 地震, **19**(1): 54~58
- 马胜利, 雷兴林, 刘力强. 2004a. 标本非均匀性对岩石变形声发射时空分布的影响及其地震学意义[J]. 地球物理学报, **47**(1): 127~131
- 马胜利, 蒋海昆, 扈小燕, 等. 2004b. 基于声发射实验结果讨论大震前地震活动平静现象的机制[J]. 地震地质, **26**(3): 426~435
- Lockner D. 1993. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, **30**: 883~900

## STUDY ON THE PHYSICAL MEANING OF SEISMIC INHOMOGENEOUS DEGREE BY ROCK FRACTURE EXPERIMENTS

Li Zhixiong<sup>1)</sup> Ma Shengli<sup>2)</sup> Li Shengqiang<sup>1)</sup> Li Minfeng<sup>1)</sup>  
Lu Peng<sup>3)</sup> Chen Huajing<sup>4)</sup> Wang Song<sup>4)</sup> Wu Ting<sup>1)</sup>

1) *Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

2) *State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake  
Administration, Beijing 100029, China*

3) *College of Disaster Prevention Techniques, Yanjiao, Sanhe 065201, China*

4) *China Seismic Network Center, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*

**Abstract:** It is observed that the parameter of seismic inhomogeneous degree (GL value) calculated from the earthquake catalog shows obvious abnormal changes prior to the strong earthquakes, indicating the state change of local earthquake activity. This paper focuses on the physical meaning for the abnormal changes of the GL values based on the temporal sequences of acoustic emission events for three types of rock samples containing macro-asperity, compressional en-echelon fracture and model-III shearing fracture. The results indicate that for the three types of rock samples, there are continuous abnormal changes of GL value ( $>1$ ) just before the non-elastic deformation occurs or during the process of nucleation prior to the instability. Therefore it can be concluded that GL value can well portray the non-elastic deformation before rock fractures and it can be used as an index of rock sample's fracture.

**Key words:** seismic inhomogeneous degree; rock fracture experiment; acoustic emission; non-elastic change; earthquake prediction