

文章编号: 0253-3782(2004) S0-0122-09

地震临界点理论的实验研究^{*}

余怀忠¹⁾ 尹祥础^{1,2)} 夏蒙芬^{1,3)} 许昭永⁴⁾ 李敏¹⁾梁乃刚¹⁾ 彭克银^{1,2)} Victor Kukshenko⁵⁾Zhishen Wu⁶⁾ Qi Li⁶⁾ Surguei Elizarov⁷⁾

1) 中国北京 100080 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室

2) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

3) 中国北京 100871 北京大学

4) 中国昆明 650041 云南省地震局

5) Loffe Physical Technique Institute, Russian Academy of Sciences, Petersburg 194021, Russia

6) Ibaraki University, Hetachi 316-8511, Japan

7) Interunis Ltd, Moscow 129075, Russia

摘要 按照临界点理论,在大地震或岩石等脆性材料破坏发生之前能量会加速释放(AER),这种加速过程呈幂律变化(power-law)。本文通过大尺度岩石破裂声发射实验,对这一临界现象进行了研究。实验分别采用3种岩石试件,并且实现了不同轴压加载历史以及三轴应力状态;实验利用声发射技术记录了微裂纹产生和扩展时所释放的弹性能(声发射);实验结果证实了临界点理论,在不同的实验条件下,岩石材料在受压破坏之前弹性能会出现明显的加速释放过程。本文还对使用AER预测中期地震进行了初步研究。

关键词 临界点理论 能量加速释放 声发射 地震预测

中图分类号: P315.8 文献标识码: A

引言

地震是一种极为严重的自然灾害。为了能对地震做出有效的预测,中、外科学家对地震的活动性进行了大量研究,例如,Willis(1924)和 Tocher(1959)就曾对大震前地震活动性的改变进行过一些早期研究;我国科学家更在此领域内进行了大量的研究(陈章立等,1981;黄德瑜,冯浩,1981;刘蒲雄,1982;陆远忠,1985;陆远忠等,2001;马宗晋等,1982;梅世蓉,1960;梅世蓉等,1993;尹祥础,1987;张国民,傅征祥,1985;张国民,1987)。但是,由于震源区固体介质损伤和破坏演化的非线性特征,以及初始缺陷分布的随机性,使得地震预测工作极为困难,至今还难以对地震做出有效的预测。因此,人类一直在探索一种或多种能够较为定量地刻画出地震演化过程的参数或方法,以用于对地震的预测。

* 国家自然科学基金(10232050)和国家973项目(2002CB412706)以及中国科学院计算机网络中心(INF105-SCE-2-02)共同资助。

2003-06-26收到初稿,2003-11-20收到修改稿,2004-02-02决定采用。

早在 20 世纪 60 年代, Mogi (1969) 就发现在大震出现前, 地震的活动性会显著增强, 特别是中等地震会明显增加. 之后 Vere-Jones (1977) 首先提出了地震临界点的概念. 近年来, 随着研究工作的深入, 有越来越多的人支持这一观点. 这样, 在地震界就形成了临界点理论 (Sornette, Sornette, 1990; Sornette, Sammis, 1995; Sammis, Smith, 1999, Bowman *et al*, 1998; Knopoff *et al*, 1996; Rundle *et al*, 1999; Jaume, Sykes, 1999; 吴忠良, 2000). 按照该理论, 地壳并不一直处于临界状态. 当一次大地震发生之后, 该地区的地壳将远离临界状态, 然后, 随着构造应力的逐步增加, 该地区的地壳又逐步趋向临界点.

临界点理论自提出后, 中、外科学家使用各自不同的力学模型和计算方法对其进行了研究. Smith 和 Phoenix (1981)、Curtin (1991)、Newman 和 Phoenix (2001) 曾通过纤维束模型, 利用材料在破坏过程中弹性能的释放对临界点理论进行了研究 (每一条纤维的断裂与材料内部产生的微裂纹相对应); Turcotte 等 (2002)、Ben-Zion 和 Lyakhovsky (2002) 对临界点理论也有过类似的研究, 在他们的工作中得到了恒载荷作用下材料弹性能释放过程的解析表达式, 再一次表明在材料破坏之前, 弹性能会呈幂律加速释放. 而要更深入地研究临界点理论, 就需要进一步分析震源区固体介质破坏全过程的机理. 对于岩石材料而言, 其内部微裂纹的产生、扩展、累积和聚合会导致破坏的发生, 在材料破坏之前会表现出明显的临界行为, 这些临界行为可以看作是岩石材料灾变性破坏以及地震发生的前兆 (Sornette, 2000). 按照临界点理论, 在岩石材料破坏或大震发生之前, 存在相关长度增加和临界敏感性增强两大类前兆. 其中加卸载响应比 (LURR) 和能量加速释放 (AER) 是比较容易操作的两种前兆, 它们分别反映了临界敏感性的变化 (Xia *et al*, 2002; Yin *et al*, 2002) 和相关长度的增加. 关于 LURR 的实验研究已在另一篇文章中进行了论述 (余怀忠等, 2003). 本文是对另一前兆现象——能量加速释放 (AER) 进行的实验研究.

在关于 AER 的实验研究方面, 前人曾进行过一些工作. Hirata 等 (1987) 利用声发射技术对脆性材料的破坏过程进行了研究. 在他们的研究中发现: 在材料开始受载之后, 起初其内部微裂纹的分布是随机的、离散的; 随着载荷的增加, 当临近破坏时, 微裂纹的分布会呈幂律增加. Garcimartin 等 (1997) 通过对纤维增强玻璃复合材料实验也证实了这一点. Johansen 和 Sornette (1998) 对球形容器内部受压时所记录的声发射 (acoustic emission) 进行了研究, 结果也发现在临近破坏时, 弹性能出现了明显呈幂律的加速释放过程. 然而, 这些工作多是对工程结构的材料在受拉破坏时的情形进行的分析, 而没有考虑材料在受压破坏时的情况, 特别是对三轴应力条件下岩石材料受压破坏时的实验研究.

鉴于此, 我们进行的大尺度岩石破裂声发射实验, 就是为了能够进一步研究岩石材料在受压破坏时的弹性能释放过程. 实验采用了长度达 105 cm 的大尺度岩石试件, 并且实现了岩石试件的三轴应力状态. 本次实验以国际合作的方式进行, 参加方有中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室 (LNM)、中国地震局分析预报中心、俄罗斯科学院 Loffe 物理技术研究所、日本 Ibaraki 大学、北京大学、云南地震工程研究院等. 在我们的实验中采用了俄罗斯科学院 Loffe 物理技术研究所先进的声发射测试仪, 详细记录了实验过程中的声发射, 从而反映出岩石材料内部损伤的时、空、强演化过程 (这与地震发生的三要素直接相对应). 本次实验所采用的声发射测量系统以数字方式输出声发射信号的相关特征量. 用这种记录方式所记录到的声发射信号量远远大于传统的、以波形方式记录的声发射信号量. 而在实验中使用大尺度试件, 则能够明显提高声发射信号定位的相对精度.

我们还针对实验,按照 Lyakhovsky 等 (1997 a, b) 提出的损伤力学模型,运用数值计算的方法,对非均匀脆性材料在宏观破坏前,弹性能会出现呈幂律增长的加速释过程这一重要的临界现象进行了研究.有关这方面结果,将在另文中加以讨论.

1 实验系统

采用 3 种不同成分的岩石试件各两块,分别为:砂岩 (sandstone), 尺寸为 105 cm ×40 cm ×15 cm; 片麻岩 (gneiss), 尺寸为 105 cm ×40 cm ×10 cm; 以及大理岩 (marble), 尺寸为 105 cm ×40 cm ×10 cm; 共 6 个试件. 3 种岩石材料的基本物理参数如表 1 所示.

表 1 岩石试件的基本物理参数

| 类型 | 弹性模量 $E_0 / 10^4 \text{ MPa}$ | Lamé常数 $\mu_0 / 10^4 \text{ MPa}$ | Lamé常数 $\nu_0 / 10^4 \text{ MPa}$ | 泊松比 ν_0 | 密度 $/ 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 波速 $c / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|-----|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------|---|--|
| 砂岩 | 11 | 4.36 | 4.73 | 0.26 | 2.2 | 2150 |
| 片麻岩 | 5 | 1.92 | 2.88 | 0.3 | 2.6 | 3200 |
| 大理岩 | 4.5 | 1.35 | 1.86 | 0.21 | 2.1 | 3500 |

加压设备为 500 t 岩石三轴应力试验机 (长江 500 万能型试验机). 对试件采取轴压 σ_1 和侧压 σ_2 同时加载的方式 (图 1). 侧压 σ_2 : 在较小的侧面上通过钢板均匀地加载, 达到 60 t 后保持至实验结束 (侧压最大能达到 100 t); 另一个侧压 $\sigma_3 = 0$. 轴压 σ_1 : 通过压头及钢块在试件端部均匀加载, 直至试件破坏 (轴压最大能达到 500 t) 这种加载方式使得 3 个主应力不等 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$), 实现了岩石材料的三轴应力状态.

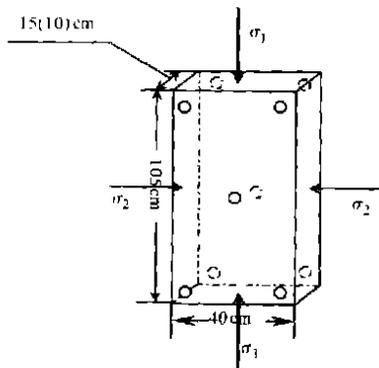


图 1 试件的尺寸、加载方式和声发射探头的布置. 图中 \odot 表示探头所在位置

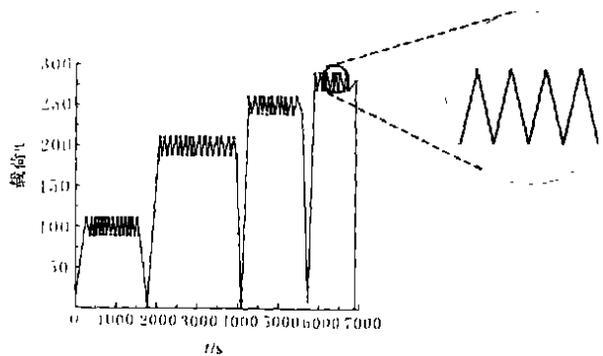


图 2 岩石试件的循环加载

轴压的加载采用单调加载 ($= \times t$) 和循环加载等不同的加载方式, 以便在不同加载条件下, 对能量的加速释放这一临界现象进行研究. 图 2 为循环加载的情形, 加载过程分为几个不同的阶段. 在每个载荷水平下, 采用三角形扰动的方式进行循环加载 (其扰动大小为 $\pm 10 \text{ t}$), 试件在最后一个阶段加载过程中达到剪切破坏.

实验使用俄罗斯 A-Line16D 声发射测试仪 (12 位精度, 共 16 个通道) 对材料内部损伤发生的时间、位置和强度进行探测. 10 个声发射探头分别被固定在试件两个平行的自由表面上 (图 1), 用来接收试件内部产生的高频声发射信号 (滤波后选定频率范围 50 ~ 250 kHz).

每个声发射事件与材料内部微裂纹的发生或扩展相对应,因此可以通过对声发射信号的收集和分析来确定裂纹的产生和发展等行为(Lockner *et al*, 1991; Lockner, 1993; Tomilin *et al*, 1994).

声发射信号被放大和滤波以后传送到核心处理器进行分析和处理,然后用数字信号输出声发射信号的相关特征量,包括:时间、能量、幅值,以及声发射源的定位坐标等,这样能够明显提高声发射信号的记录信息量.在我们的实验中,每次实验所记录到的声发射信号数量可达 10^5 个之多.被接收到的声发射信号的相关参数,可以用来为声发射事件提供三维的定位(Lockner *et al*, 1991; Lockner, 1993).实验中,声发射事件定位的绝对误差小于 10 mm,而使用大尺度试件,能够明显提高声发射事件定位的相对精度.如前所述,声发射事件的定位结果反映了岩石的破坏情况,同时,也是对声发射信号记录情况的直接反映.

2 实验数据处理

实验中所记录到的声发射能量反映了试件所释放的弹性能,因此通过对声发射能量的分析,可以研究脆性材料弹性能释放的演化规律.

设 t_k 时刻内所记录到的声发射事件能量积累为

$$E(t_k) = \sum_{t < t_k} E(t) \quad (1)$$

其中, $k = 1, 2, 3, \dots, n$; $t_k > t_c$, t_c 为临界时刻; $E(t)$ 则表示 t 时刻声发射事件的能量.

通常按照下式(power-law)对能量释放过程 $E(t)$ 进行拟合(Bowman *et al*, 1998; Sammis, Smith, 1999)

$$w_p(t) = A + B(t_c - t)^z \quad (2)$$

式中, A , B , z 为拟合参数; t_c 为临界时刻.按照方差最小的方法,可计算出最合适的 A , B 和 z 的值(Press *et al*, 1986).

在材料破坏过程中,由于其内部的不均匀性,使得材料局部损伤的发展在时间尺度上具有多样性.虽然对于整个系统而言,其破坏过程总体上是按照某一个周期进行,但其局部损伤过程在时间尺度上的多样性,对这一周期也会产生一定的影响.这就使得能量加速释放过程并不是按照某个单一周期进行的,而是在其中常常会出现一些小的扰动(图 5b),而使用式(2)拟合就难以对这些小的扰动加以考虑.为了更好地反映整个系统的能量释放过程, Sornette 和 Sammis (1995)以及 Huang 等(2000)提出可以将指数 z 看成复数的形式($z = \alpha + i\omega$),这样就可以在 power-law 拟合中引入对数形式的周期扰动,得到如式(3)的对数周期(log-periodicity)的拟合方法.用此方法替代 power-law 对能量(声发射事件的能量)的释放过程进行拟合,在实际数据处理中能够更准确地反映材料的能量释放过程.

$$w_{ip}(t) = A + B(t_c - t) \left\{ 1 + C \cos \left[2 \frac{\lg(t_c - t)}{\lg} + \right] \right\} \quad (3)$$

式中, A , B , z 与式(2)相同; C 为扰动的幅度.通常 C 的值远小于 1(如果 $C = 0$, 则蜕化为式(2)),比率 C 的对数决定了扰动的几何尺度,相位角 ω 则可对拟合曲线的时间单元做进一步调整.在这些参数之中,指数 z 直接反映了能量的加速释放程度,指数 z 是一个小于 1 的数, z 越小说明能量加速释放的程度就越明显,因此,指数 z 值的变化范围是研究临界点理论的关键之一.

为了对拟合效果进行检验，可把能量释放过程再作线性拟合，并把拟合的结果与 lg-periodicity 拟合的结果作比较。引入参数 r

$$r = \frac{D_p}{D_l} \tag{4}$$

式中， D_p 表示 lg-periodicity 拟合结果与能量释放过程的方差， D_l 表示线性拟合结果与能量释放过程的方差

$$D_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [E(t_i) - w_{lp}(t_i)]^2}{n}} \tag{5}$$

D_l 类似得到。

若比值 r 越接近 1，则表明能量释放越接近线性过程，即能量释放没有出现明显的加速；如果比值 r 小于 1 的程度较大，则表明能量释放过程更接近 lg-periodicity 拟合

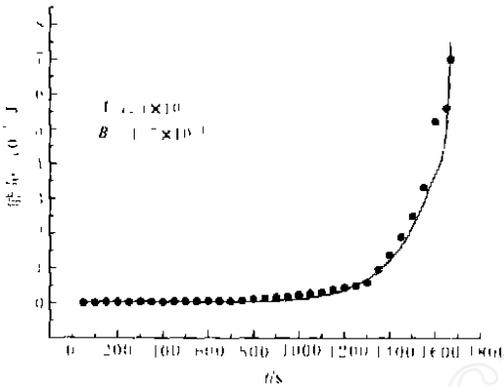


图 3 试件 1 能量释放及 lg-periodicity 拟合 (砂岩, 轴向采用单调加载. 指数 $z=0.21, r=0.32$)

方式，即能量释放表现出呈幂律的加速过程。

实验中，不同试件的声发射能量释放过程 ($E(t_k), k=1, 2, 3, \dots, n$)，及其 lg-periodicity 拟合结果如图 3、图 4a~d。

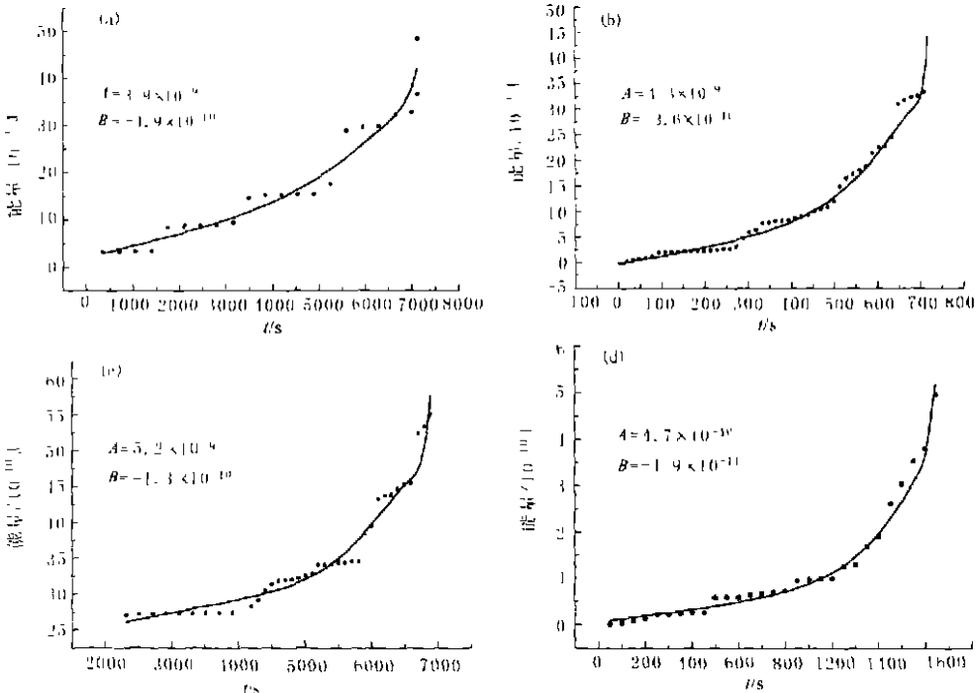


图 4 试件 2~5 能量释放过程及 lg-periodicity 拟合

- (a) 试件 2: 砂岩, 轴向采用循环加载. 指数 $z=0.49, r=0.58$;
- (b) 试件 3: 片麻岩, 轴向采用单调加载. 指数 $z=0.38, r=0.40$;
- (c) 试件 4: 片麻岩, 轴向采用循环加载. 指数 $z=0.38, r=0.39$;
- (d) 试件 5: 大理岩, 轴向为单调加载. 指数 $z=0.32, r=0.28$

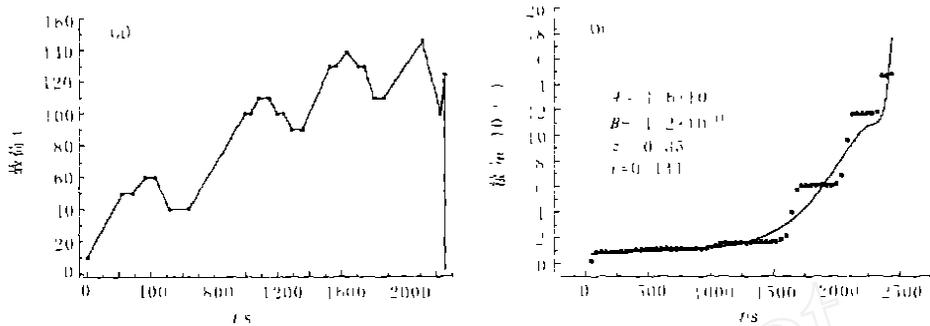


图5 (a) 试件6的轴压加载历史; (b) 试件6能量释放过程及lg-periodicity拟合

试件6采用更复杂的加载情况,如图5a所示,材料为大理岩.其弹性能释放过程及拟合结果如图5b所示,指数 $z=0.35$, $r=0.43$.

3 讨论

按照临界点理论,非均匀脆性材料在破坏之前弹性能会加速释放,根据这一观点前人曾做了不少工作. Turcotte 等 (2002) 利用纤维束模型,对材料的能量释放过程进行了研究,在常载荷条件下得到指数 $z=1/3$; Ben-Zion 和 Lyakhovsky (2002) 利用地震数据对 z 值的变化范围进行了总结,得到 z 的变化范围为 $0.1\sim 0.55$; Rundle 等 (2000)、Bowman 等 (1998)、Sornette (2000) 等人对指数 z 的研究也得到了类似的结论. 在我们的实验中,采用了不同的岩石、不同的加载历史,各个试件的指数 z 值分别为: 0.21, 0.49, 0.38, 0.38, 0.32, 0.35 (平均值为 0.35, 稍大于 $1/3$), 基本在 $1/3$ 上下跳动,这与前人的研究结果相一致. 余怀忠等 (2004) 对中国大陆 $M7.0$ 以上地震的 z 值进行过分析,也得到了类似的结论. 在我们的实验中, z 的最小值为 0.21, 最大值为 0.49, 其变化范围较大,这与实际地震的情况相类似.

另外, Bowman 等 (1998) 处理了多个震例,发现 r 值一般在 $0.4\sim 0.6$ 之间,这与我们实验中所得到的 r 值基本一致. 我们实验中所得到的比值 r 分别为: 0.32, 0.58, 0.40, 0.39, 0.28 和 0.43, 都较大程度的小于 1. 这表明各个试件的能量释放都更接近于lg-periodicity拟合结果. 而相对应的lg-periodicity拟合所得的指数 z 都较大程度小于 1, 这表明拟合结果都比较明显地表现出了加速过程.

总体而言,从 z 值的变化范围可以看到:在材料破坏或地震发生之前,能量将会出现一定的加速释放过程;根据材料成分不同或地质结构不同,将会有不同的 z 值,一般在 $1/3$ 上下跳动,而本实验所得到的结果对实际地震的 z 值变化范围有一定借鉴意义.

4 AER用于地震预测研究的尝试

当 z 值确定以后,可利用式(2)对材料破坏的时间,以及地震发生的震级、时间等进行预测研究. 本文对一些地区的地震情况进行了初步研究尝试.

首先对已经发生于 2001 年 11 月 14 日中国昆仑山口西的 8.1 级地震(震中位置: 北纬 35.93° 、东经 90.53°)进行震例验算. 对离震中位置 $\pm 8^\circ$ 、 $M > 5.0$ 的地震事件的 Benioff 应变释放过程进行统计,根据该地区发生该地震前的资料,得到 z 值等于 0.48. 之后,按此 z

值再利用式(2)对1989~2000年该地区即将到来的地震进行“预测”(图6a, b). 结果是, 可以“预测”2000年8月~2003年5月, 该地区将会发生8.0~8.7级的地震. 而实际地震时间为2001年11月14日, 震级为 $M_{8.1}$, 均在“预测”的范围. 此外, 余怀忠(2004)还对中国大陆部分地区及日本仙台地区的地震进行了研究.

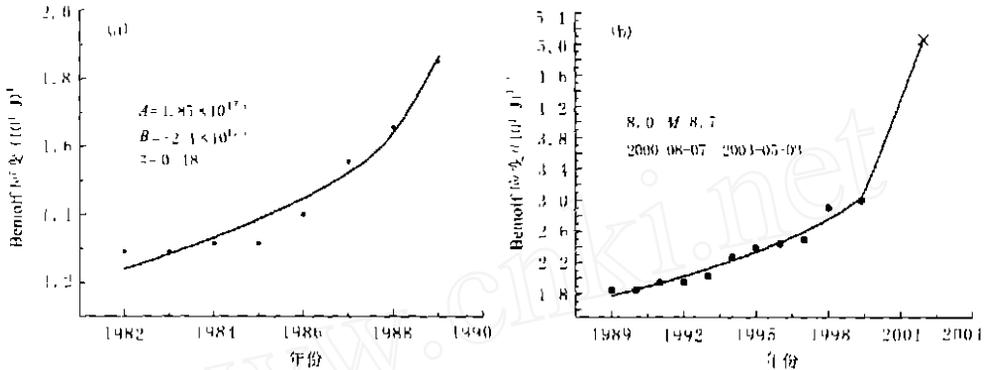


图6 (a) 用昆仑山口西以往震例的拟合结果; (b) 昆仑山口8.1级地震震前分析结果

上述尝试研究结果表明, 作为一种新的地震预测方法, AER 虽然能对某一区域内可能发生的地震做出较为定量的预测, 但其有效性还有待于更多的实际检验. 如果将 AER 与其它地震预测方法, 如加卸载响应比等(尹祥础, 尹灿, 1991; Yin *et al.*, 1995, 2002, 2004)相结合, 则可能提高地震预测的可靠性, 对地震做出更为准确的预测.

5 小结

本文通过实验的方法研究了临界点理论. 虽然岩石材料的类型, 相应的物理参数, 以及加载历史不同, 但在发生宏观破坏之前, 弹性能均会表现出明显的、呈幂律的加速释放过程. 这一特征可被用作为材料破坏以及地震发生的前兆, 并在一定程度上能够对材料的破坏以及地震的发生进行预测.

参 考 文 献

- 陈章立, 刘蒲雄, 黄德瑜, 等. 1981. 大震前的区域地震活动性特征[A]. 见: 中国地震局预报司编. 国际地震预报讨论会论文选[C]. 北京: 地震出版社, 121~131
- 黄德瑜, 冯浩. 1981. 强震前大范围地震活动性参数的时空扫描[J]. 地震学报, 3(3): 344~353
- 刘蒲雄. 1982. 大震前地震活动性的增强特征[J]. 地震, (2): 255~262
- 陆远忠. 1985. 地震预报的地震学方法[M]. 北京: 地震出版社, 1~256
- 陆远忠. 2001. 地震中短期预报的动态图像方法[M]. 北京: 地震出版社, 1~302
- 马宗晋, 傅征祥, 张郅珍, 等. 1982. 中国九大地震[M]. 北京: 地震出版社, 1~157
- 梅世蓉. 1960. 中国的地震活动性[J]. 地球物理学报, 9(1): 1~18
- 梅世蓉, 冯德益, 张国民, 等. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 44~236
- 吴忠良. 2000. 地震震源物理中的临界现象[M]. 北京: 地震出版社, 1~284
- 尹祥础. 1987. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 3(1): 1~7
- 尹祥础, 尹灿. 1991. 非线性系统的失稳前兆与地震预报[J]. 中国科学, (5): 512~518
- 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬, 等. 2003. 加卸载响应比(LURR)理论的实验研究[J]. 中国地震, 19(1): 58~66
- 余怀忠, 尹祥础, 梁乃刚. 2004. 利用损伤力学模型对地震前兆现象的研究[J]. 地球物理学进展, 19(2): 404~413
- 余怀忠. 2004. 非均匀脆性介层破坏前兆与地震预测理论的实验研究[D]: [学位论文]. 中国科学院研究生院, 83~88

- 张国民, 傅征祥. 1985. 华北强震的时间分布及物理解释[J]. 地球物理学报, **28**(6): 569 ~ 578
- 张国民. 1987. 我国大陆强震活动的韵律性特征[J]. 地震地质, **9**(2): 189 ~ 195
- Berr-Zion Y, Lyakhovsky V. 2002. Accelerated seismic release and related aspects of seismicity patterns of earthquake faults[J]. *Pure Appl Geophys*, **159**: 2 385 ~ 2 412
- Bowman D D, Ouillon G, Sammis C G, et al. 1998. An observation test of the critical earthquake concept[J]. *J Geophys Res*, **103**(24): 359 ~ 372
- Curtin W A. 1991. Theory of mechanical properties of ceramic-matrix composites[J]. *J Amer Ceramsoc*, **74**: 2 837 ~ 2 845
- Garcimartin A, Guarino A, Bellon L, et al. 1997. Statistical properties of fracture precursors[J]. *Phys Rev Lett*, **79**: 3 202 ~ 3 205
- Hirata T, Satoh T, Ito K. 1987. Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock[J]. *Geophys J Roy astr Soc*, **90**: 369 ~ 374
- Huang A, Johansen M W, Lee H, et al. 2000. Artifactual log-periodicity in finite-size data, relevance for earthquake aftershocks[J]. *J Geophys Res*, **105**: 25 451 ~ 25 471
- Jaume S C, Sykes L R. 1999. Evolution toward a critical point: A review of accelerating seismic moment/energy release prior to large great earthquakes[J]. *Pure Appl Geophys*, **155**: 279 ~ 306
- Johansen A, Sornette D. 1998. Evidence of discrete scale invariance by canonical averaging[J]. *Int J Mod Phys C* **9**: 433 ~ 447
- Knopoff L, Levshina T, Keilis-Borok VI, et al. 1996. Increased long-range intermediate-magnitude earthquake activity prior to strong earthquakes in California[J]. *J Geophys Res*, **101**: 5 779 ~ 5 796
- Lockner D A, Byerlee J D, Kukusenko V, et al. 1991. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. *Nature*, **350**(7): 39 ~ 42
- Lockner D A. 1993. The role of emission in the study of rock failure[J]. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Asstr*, **30**(7): 883 ~ 899
- Lyakhovsky V, Berr-Zion Y, Agnon A. 1997a. Distributed damage, faulting, and friction[J]. *J Geophys Res*, **102**: 27 635 ~ 27 649
- Lyakhovsky V, Reches Z, Weinberger R. et al. 1997b. Nonlinear elastic behavior of damaged rocks[J]. *Geophys J Int*, **130**: 157 ~ 166
- Mogi K. 1969. Some features of recent seismic activity in and near Japan (2), activity before and after earthquakes[J]. *Bull Earthquake Res Inst Univ Tokyo*, **47**: 395 ~ 417
- Newman W L, Phoenix S L. 2001. Time dependent fiber-bundles with local load sharing[J]. *Phys Rev E* **63**: 021507
- Press W H, Flannery B P, Vetterling W T, et al. 1986. *Numerical Recipes* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1 ~ 818
- Rundle J B, Klein W, Goss S. 1999. A physical basis for statistical patterns in complex earthquake populations: Models, predictions and tests[J]. *Pure Appl Geophys*, **155**: 575 ~ 607
- Rundle J B, Klein W, Turcotte D L, et al. 2000. Precursory seismic activity and critical point phenomena[J]. *Pure Appl Geophys*, **157**: 2 165 ~ 2 182
- Sammis C G, Smith S W. 1999. Seismic cycles and the evolution of stress correlation in cellular automation models of finite fault networks [J]. *Pure Appl Geophys*, **155**: 307 ~ 334
- Smith R L, Phoenix S L. 1981. Asymptotic distributions for the failure fibrous materials under series-parallel structure and equal load-sharing[J]. *J Appl Mech*, **48**: 75 ~ 82
- Sornette A, Sornette D. 1990. Earthquake rupture as a critical point: Consequences for telluric precursors[J]. *Tectonophysics*, **179**: 327 ~ 334
- Sornette D, Sammis C G. 1995. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: Implications for earthquake predictions[J]. *J Phys I France*, **5**: 607 ~ 619
- Sornette D. 2000. *Critical Phenomena in Natural Science (Chaos, Fractals, Selforganization and Disorder, Concept and Tools)* [M]. Herdelberg: Springer Series in Synergetics, 1 ~ 281
- Turcotte D L, Newman W I, Shcherbakov R. 2002. Micro- and macroscopic models of rock fracture[J]. *Geophys J Int*, **152**: 718 ~ 728
- Tocher D. 1959. Seismic history of San Francisco Bay region[J]. *Calif Div Mines Spec Rep*, **57**: 39 ~ 48
- Tomilin N G, Damaskinskaya E E, Kukusenko V S. 1994. Formation of a fracture focus during the deformation of heterogeneous materials (granite) [J]. *Fiz Tverd Tela (St Petersburg)*, **36**: 3 101 ~ 3 112
- Vere-Jones D. 1977. Statistical theory of crack propagation[J]. *Math Geol*, **9**: 455 ~ 481
- Willis B. 1924. Earthquake risk in California 8 Earthquake districts[J]. *Bull Seismol Soc Amer*, **14**: 9 ~ 25
- Xia M F, Wei Y J, Ke F J, et al. 2002. Critical sensitivity and trans-scale fluctuations in catastrophic rupture[J]. *Pure Appl Geophys*,

159: 2 491 ~ 2 510

- Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping, *et al.* 1995. A new approach to earthquake prediction —— The load/unload response ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl Geophys*, **145**(3/4): 701 ~ 715
- Yin X C, Mora P, Peng K, *et al.* 2002. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction[J]. *Pure Appl Geophys*, **159**: 2 511 ~ 2 523
- Yin Xiangchu, Yu Huaizhong, Kukshenko Victor, *et al.* 2004. Load-unload response ratio (LURR), accelerating energy release (AER) and state vector evolution as precursors to failure of rock specimens[J]. *Pure Appl Geophys*, **161**(11/12): 2405 ~ 2416

EXPERIMENTAL RESEARCH ON CRITICAL POINT HYPOTHESIS

Yu Huaizhong¹⁾ Yin Xiangchu^{1, 2)} Xia Mengfen^{1, 3)} Xu Zhaoyong⁴⁾
 Li Min¹⁾ Liang Naigang¹⁾ Peng Keyin^{1, 2)} Victor Kukshenko⁵⁾
 Zhishen Wu⁶⁾ Qi Li⁶⁾ Surguei Elizarov⁷⁾

1) *State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

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

3) *Peking University, Beijing 100871, China*

4) *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041, China*

5) *Ioffe Physical Technique Institute, Russian Academy of Sciences, Petersburg 194021, Russia*

6) *Ibaraki University, Hitachi 316-8511, Japan*

7) *Interunis Ltd, Moscow 129075, Russia*

Abstract: According to the critical point hypothesis (CPH), energy release would accelerate in power law before occurrence of large earthquakes or failure of brittle materials. In the paper, CPH was studied by acoustic emission experiments of large-scale rock samples. Three kinds of rock samples were used in the experiments. The tri-axial loading condition was applied under different loading histories. The released elastic energy (Acoustic emission) was recorded with acoustic emission technique as microcracks emerged and developed inside the rock samples. The experimental results gave a further verification on the CPH. The elastic energy release of rock samples would accelerate before the failure even under different experimental conditions. Primary studies were also made on medium-term earthquake prediction by using accelerating energy release (AER) in the paper.

Key words: critical point hypothesis; accelerating energy release; acoustic emission; earthquake prediction

作者简介



蒋靖祥 新疆维吾尔自治区地震局副局长。1982年长春地质学院地震地质专业毕业，获工学学士学位。从事地壳应力、应变研究及地震分析预报等工作。中国地球物理学会会员，新疆地震学会会员。



王喜珍 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2001年中国地震局地震研究所固体地球物理专业研究生毕业，获硕士学位；2004年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业研究生毕业，获博士学位。主要从事小波分析、数据压缩和数字信号处理等方面的研究工作。



会员。

祝意青 中国地震局第二监测中心高级工程师。1983年武汉测绘学院大地测量专业毕业。主要从事流动重力测量与研究、地震分析预报及地球动力学方面的研究。中国地震学会和中国地球物理学会



余怀忠 中国地震局地质研究所博士后。1998年合肥工业大学精密仪器系毕业；2004年中国科学院力学研究所研究生毕业，获博士学位。主要从事非均匀脆性介质破坏前兆及声发射实验方面的研究。



研究工作。

张燕 中国地震局地震研究所助理研究员，中国地震局地球物理研究所在职博士研究生。1998年武汉测绘科技大学测量工程专业毕业；2003年中国地震局地震研究所固体地球物理专业研究生毕业，获



等方面的研究。中国地震学会会员。

刘爱文 中国地震局地球物理研究所副研究员。1997年中国地震局工程力学研究所地震工程与防护工程专业研究生毕业，获硕士学位；2002年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业研究生毕业，



分析中的应用等研究工作。

谢周敏 中国地震局地壳应力研究所工程师。中国科学院研究生院在读硕士研究生。1999年北京大学地球物理系固体地球物理专业毕业。曾从事数据采集、分析软件的开发、网络数据库、地震勘探数据处理等研究。现从事小波、分形方法在地球科学数据分析中的应用等研究工作。



特征和基于数字观测资料的强地面运动随机模拟。

姜慧 新疆地震局副研究员，中国地震局地球物理研究所在读博士研究生。2000年北京大学地质系构造地质专业研究生毕业，获硕士学位。现从事地震工程和防灾工程工作，研究方向为近场强地面运动