

循环载荷下大试件岩石破坏声发射实验 ——岩石破坏前兆的研究*

张晖辉^{1,2} 颜玉定^{1,3} 余怀忠¹ 尹祥础^{1,4}

(¹中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室 北京 100080) (²中国科学院研究生院 北京 100039)

(³中国地震局广东省地震局 广州 510070) (⁴中国地震局分析预报中心 北京 100036)

摘要 岩石等脆性材料在加载过程中,随着载荷的增加,材料内部的微裂纹产生、扩展并伴随着声发射现象的发生。声发射是研究脆性材料损伤演化的良好工具,它能连续、实时地监测脆性物体内部微裂纹的产生与扩展,这是其他任何方法都不具有的优势。在三轴应力条件下进行了大尺度岩石(片麻岩)破坏声发射实验,试件尺寸达1.05 m。为了模拟日、月潮汐力对地球的加载和卸载作用,在某一固定水平的轴向压力作用下,叠加上循环载荷。实验过程中记录到大量的声发射信息,它能够反映岩石试件内部每一个损伤(微裂纹)发生的时间、地点和强度。利用声发射记录研究了预测岩石宏观破坏的2种前兆现象:能量加速释放及加卸载响应比剧增,为地震预测提供了实验依据。同时还发现,实验中存在声发射的Felicity效应。

关键词 岩石力学,岩石破坏前兆,声发射,Kaiser效应,Felicity效应,循环载荷,加卸载响应比,能量加速释放

分类号 TU 452, P 315

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)21-3621-08

ACOUSTIC EMISSION EXPERIMENTAL RESEARCH ON LARGE-SCALED ROCK FAILURE UNDER CYCLING LOAD ——FRACTURE PRECURSOR OF ROCK

Zhang Huihui^{1,2}, Yan Yuding^{1,3}, Yu Huaizhong¹, Yin Xiangchu^{1,4}

(¹Laboratory for Non-linear Mechanics, Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

(²Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039 China)

(³Guangdong Earthquake Administration, China Earthquake Administration, Guangzhou 510070 China)

(⁴Center for Analysis and Prediction, China Earthquake Administration, Beijing 100036 China)

Abstract The microfractures in a brittle material like rock may appear or grow while loading. Microfracturing process in a material results in energy dissipation and acoustic emission(AE). Acoustic emission is a good tool to detect the damage in brittle materials. Because it can monitor the microfractures in the body continuously and in-real-time and is better than other methods. Large-scaled gneiss failure experiments under triaxial loading are conducted. The size of the specimen reaches 1.05 m. In order to simulate the effect of tide-generating force of the sun and the moon, a cycle stress is loaded superposing on a basic axial load level. Lots of acoustic emission during the entire loading are recorded. The recording is able to indicate the occurrence time, location and magnitude of every damage (micro-crack) in the specimen. Acoustic emission record is used to study the two macroscopic

2003年12月8日收到来稿,2004年3月26日收到修改稿。

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412706)、国家自然科学基金(10232050)、国家“十五”科技攻关项目(2001BA601B01-01-01-04)及中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心(INF105-SCE-2-02)资助课题。

作者 张晖辉 简介:女,28岁,1999年毕业于河北大学数学系理论与应用力学专业,现为博士研究生,主要从事固体力学方面的研究工作。E-mail: zhanghh@lnm.imech.ac.cn.

failure precursors of rock, accelerating energy release (AER) and load/unload response ratio (LURR), which can be served as the experimental foundation of earthquake prediction. At the same time the Felicity effect is identified in the experiment.

Key words rock mechanics, precursor of rock failure, acoustic emission, Kaiser effect, Felicity effect, cycling load, load/unload response ratio, accelerating energy release

1 引言

岩石的破坏前兆涉及地质灾害(地震、滑坡、岩爆等)预测,是岩石工程设计中的重要课题,前人已作过大量的研究。通过这些研究,对岩石的损伤、破坏过程已经得到了一些规律性的认识^[1~4]:在岩石试件加载初期微裂纹的发生具有弥散特性,广泛分布于试件体内,彼此间相距较远,因而,难以发生相互作用;随着载荷的增加,微裂纹的演化逐渐局部化——在试件的某一区域内,微裂纹密度增大,相互间作用加强,某些微裂纹可能聚合成更大的裂纹,而裂纹尺度的增大及密度的增大又进一步促进了微裂纹间的相互作用,宏观裂纹开始形成(成核),并且在一定的条件下扩展从而导致宏观破坏,这对应于地震、滑坡等的发生或岩石工程的失效。但是人类仅仅得到这样的认识还远远不够,还有许多更深入的问题有待解决。例如,从损伤到宏观破坏的3个决定性问题:局部化、成核及宏观破坏的条件到底如何,如何定量地进行预测。这些既是重要的理论课题,又具有巨大的实际意义。

声发射是研究脆性材料损伤演化的良好工具,因为它能连续、实时地监测脆性物体内部微裂纹的产生与扩展,这是其他任何方法都不具备的优势^[5~7],因此,可利用它来研究岩石的损伤、破坏过程。目前,声发射技术的应用越来越广泛^[8~12]。

2 实验设计、实验系统与实验结果

为了模拟地下岩石的应力状态及破坏形式,试件采用双向压缩加载方式($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$),使之得到三向应力状态(图 1)。

为了提高声发射相对定位的精确度,实验中采用了大试件,试件长度达 1.05 m。为了模拟固体潮的作用并研究加卸载响应比,在某一固定水平的轴向压力作用下,叠加上循环载荷(图 2)。

实验采用的材料为片麻岩,试件的尺寸为 105

cm×40 cm×10 cm(图 1),其相关物理参数分别为,弹性模量 $E = 27 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.26$,密度 $\rho = 2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,波速 $v = 3 \text{ 200 m/s}$ 。采用的加压设备为 5 000 kN 岩石三轴应力试验机(长江 500 万能型试验机)。采用俄罗斯 Interunis 公司的 A-Line16D 声发射测试仪(12 位精度,12 个通道)对材料内部损伤(微裂纹)发生的时间、位置和强度进行探测与记录。

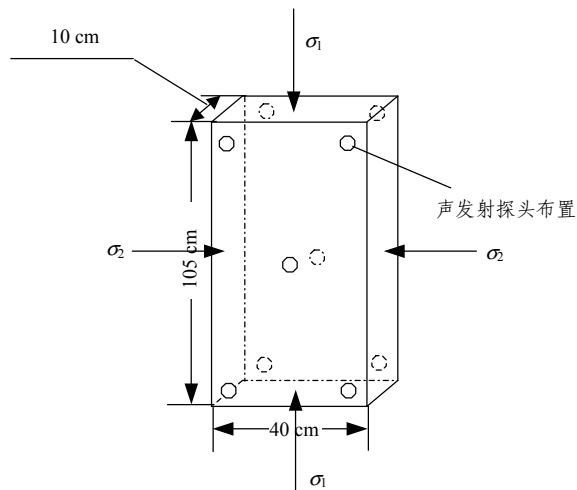


图 1 试件的尺寸、加载方式和声发射探头的布置

Fig.1 Geometry of the specimens, the loading conditions and the arrangement of AE sensors (circles)

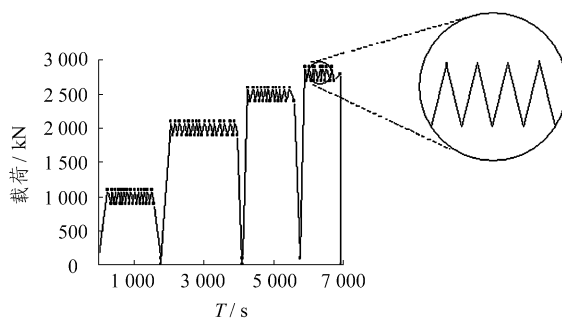


图 2 循环加载

Fig.2 Cycling stress history for specimen

10 个声发射探头分别被固定在试件的 2 个自由表面上(如图 1 所示,圆圈表示探头所在位置),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为 50~250 kHz)。岩石材料在加载之后

产生裂纹,同时释放能量,这种能量以应力波的形式传播,当传播到试件表面时被声发射探头所接收,接收到的就是声发射信号。每个声发射信号都与材料内部微裂纹的发生或扩展相对应,同时,它还包括了声发射信号所反映的各种相关特征量。这样,就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扩展等行为^[13]。

声发射信号被放大和滤波以后就被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的相关特征量,包括时间、能量、幅值、以及声发射的定位坐标等。在本实验中,被记录到的声发射信号数量达 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^[6]。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。

对试件采取轴压和侧压同时加载的方式(如图 1 所示)。侧压:在较小的侧面上通过钢板均匀加载,达到 600 kN 后保持不变直至实验结束(侧压最大能达到 1 000 kN);轴压:压头在试件端部通过钢块均匀加载,直至试件破坏(轴压最大能达到 5 000 kN)。这种加载方式使得 3 个主应力不等,实现了岩石材料的三轴应力状态。

轴压采用图 2 所示的加载方式,加载时分为 4 个阶段,每个阶段分别在不同的载荷水平下进行加载(每 2 个相邻阶段之间都先卸载到 0,然后,再重新加载)。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 ± 100 kN),这种加载方式可以模拟日、月潮汐力的作用,其响应的相关量可以分别作为加载和卸载阶段的响应。试件在最后一个阶段的加载过程中达到剪切破坏。实验全过程的声发射率及声发射能量记录如图 3(ΔL 为不同载荷水平下的计算时间窗时间, Δt 为不同载荷水平下的滑动步长)。

对材料进行重复加载和卸载实验时,只有载荷达到先前所受的最大载荷时,才有明显的声发射产生,材料的这种“记忆”现象称为 Kaiser 效应。这是文[14]在进行金属拉伸实验时发现的现象。随后,文[15]在砂岩和石英岩压缩实验中也证实了 Kaiser 效应的存在。Kaiser 效应的发现为解决岩石力学

和工程中诸如测定岩体地应力状态历史、损伤估计等问题提供了新的方法^[16]。但是在过去的几十年中,人们通过大量的实验和现场测试,对 Kaiser 效应的发生机制及其相关问题进行了分析研究,结果发现, Kaiser 并不一定适用于所有的材料。文[17]采用了 8 种岩石,共计 61 个岩样进行了 Kaiser 效应验证实验。在实验中发现,对于不同类型的岩石试样,如果按照 Kaiser 效应的严格定义, Kaiser 效应只是在一定的范围(相对峰值载荷较低的应力水

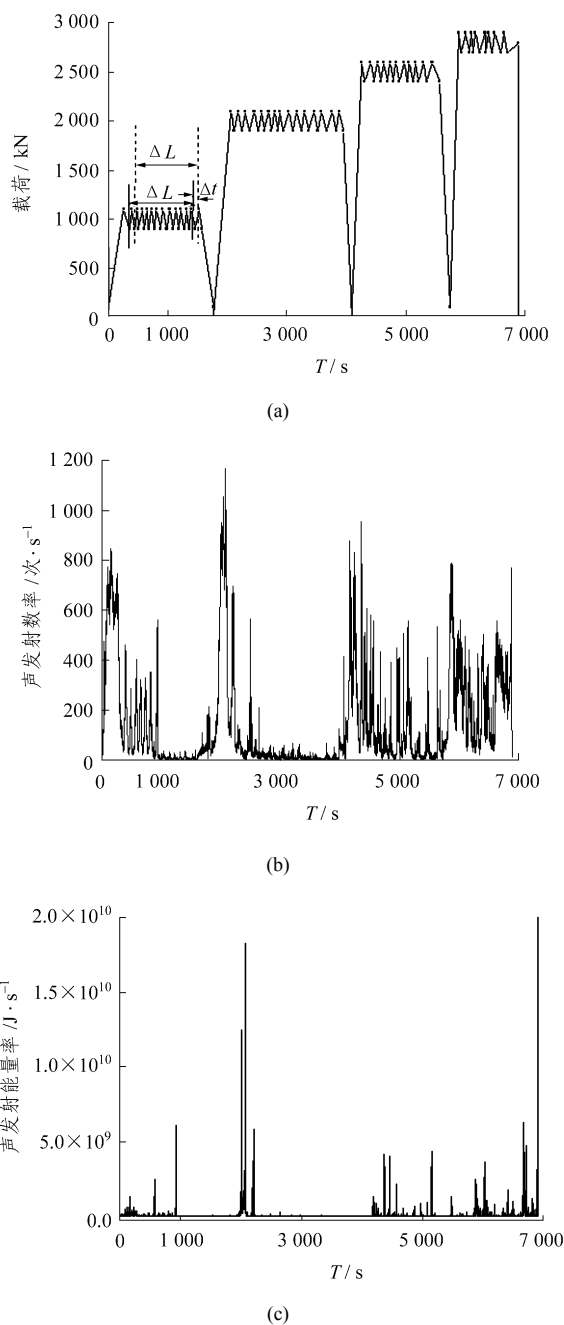


图3 轴向载荷的加载历史及声发射记录过程

Fig.3 History of axial load and acoustic emission during the whole process

平)内存在。在未达到上一循环最大主应力处发生岩石声发射, 这个现象称为 Felicity 效应^[17]。在本实验中也发现了这一现象。

3 实验结果的分析讨论

文[18]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, 就形成了地震临界点理论^[19~26]。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。人们还发现固体介质的破坏和其他许多灾变现象都是临界现象。

自从临界点理论提出以后, 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过研究, 文[27~29]曾通过纤维束模型, 利用材料在破坏过程中的弹性能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); 文[30, 31]对临界点理论也有过类似的研究, 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。而要更深入的研究临界点理论, 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^[32]。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 2 大前兆, 其中能量加速释放(AER)和加卸载响应比(LURR)剧增分别反映了相关长度的增加与临界敏感性的增强^[33, 34], 是比较容易操作的 2 种方法, 在实际地震预报中发挥着重要的作用。

利用本次实验的结果对能量加速释放和加卸载响应比进行了分析研究, 取得了与理论模型相一致的结果。

3.1 能量加速释放

实验中记录的声发射事件的能量反映了试件内部微裂纹产生或扩展时所释放的弹性能, 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为

$$E(t_k) = \sum_{t < t_k} e(t) \quad (k = 1, 2, \dots, n, t_k \leq t_c) \quad (1)$$

式中: t_c 为临界时刻, $e(t)$ 为声发射事件的能量。

物理学中认为, 材料在接近临界点时会表现出一定的临界现象, 如能量呈幂律形式的加速释放等。而岩石作为一种典型的脆性材料, 其破坏通常也被看作是一种临界现象, 根据临界现象的标定律, 能量(或 Benioff 应变)按照幂函数演化的形式为

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

为了能够进一步提高拟合的精度, 更好地反映弹性能的释放过程, 文[20, 35]提出了 log-periodicity 能量加速释放拟合方法, 采用的演化方程为

$$W_{lp}(t) = A + B(t_c - t)^z \left\{ 1 + C \cos \left[2\pi \frac{\lg(t_c - t)}{\lg \lambda} + \psi \right] \right\} \quad (3)$$

用此方法替代 power-law 对弹性能(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弹性能释放过程。

按照最小二乘法, 可计算出最合适的 A, B 和 z 的值^[36]。 C, λ, ψ 均为拟合参数, 通常 C 远小于 1。指数 z 直接反映了能量的加速释放程度, z 是一个小于 1 的数, 一般情况下, z 的值为 1/3。而且, z 越小说明能量加速释放的程度就越明显, 因此, 指数 z 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, 可对能量释放过程再作线性拟合, 并把拟合的结果与 log-periodicity 拟合的结果作比较。令

$$r = \frac{D_p}{D_l} \quad (4)$$

其中,

$$D_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E(t_i) - W_{lp}(t_i))^2}{n}} \quad (5)$$

式中: D_p 为 log-periodicity 拟合结果与能量释放过程的方差; D_l 为线性拟合结果与能量释放过程的方差, D_l 可以类似式(5)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, 则表明能量释放更接近于幂律加速过程。

以本实验结果为例, 事件的声发射能量释放过程 ($A = 5.2 \times 10^{-9}, B = -1.3 \times 10^{-10}, z = 0.38$) 及其 log-periodicity 拟合结果如图 4, 得到指数 $z = 0.38, r = 0.391$ 。由上面的讨论可见, 片麻岩在加载过程

中有明显的能量加速释放现象, 符合 power-law 拟合方式, 即能量的释放表现出呈幂律的加速过程。

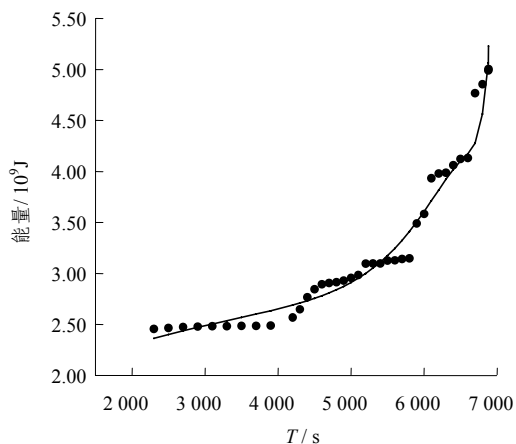


图4 片麻岩试件能量加速释放过程及 log-periodicity 拟合结果

Fig.4 Accelerating energy release of gneiss and log-periodicity fitting result

3.2 加卸载响应比理论

加卸载响应比理论的主要思路是, 系统在稳定状态时的加载响应与卸载响应的比值与非稳定状态时的加载响应与卸载响应的比值是完全不同的。

加卸载响应比 Y 是一个能够定量地反映非线性系统趋近失稳程度的参数^[37~39], 可以将其定义为

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (6)$$

式中: 正号表示加载阶段, 负号表示卸载阶段。

响应率 X 可定义为

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (7)$$

式中: ΔR 和 ΔP 分别为载荷为 P 时, 响应 R 和载荷 P 所对应的增量。

如果把应力作为载荷 P , 应变作为响应 R , 可以得到

$$Y = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{E_-}{E_+} \quad (8)$$

式中: E_- 为卸载阶段的模量。 E_+ 为加载阶段的模量。

令: 加载阶段 $\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)_+ = f$, 卸载阶段 $\left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon}\right)_- = g$, f 和 g 依赖于材料的损伤程度。则由式(8)可以得到加卸载响应比为

$$Y = \frac{g}{f} \quad (9)$$

在出现损伤之后, f 和 g 的值都在减小; 加载过程出现的损伤显然多于卸载时出现的损伤, 因此, f 的减小程度明显大于 g 的减小程度。所以随着载荷的增加、损伤程度的增大, 加卸载响应比 Y 的值也在增大。

图5所示为典型的岩石本构曲线, 很明显在弹性阶段, $X_+ = X_-$, 所以 $Y = 1$; 在出现损伤之后, $X_+ > X_-$, 所以 $Y > 1$ 。可以看出, 随着载荷的增大, 材料损伤程度加剧, Y 的值将会增大至显著地大于 1。因此, 加卸载响应比可以用来作为材料即将达到破坏的判据, 同样, 也可以用来作为预测地震发生所需的前兆。

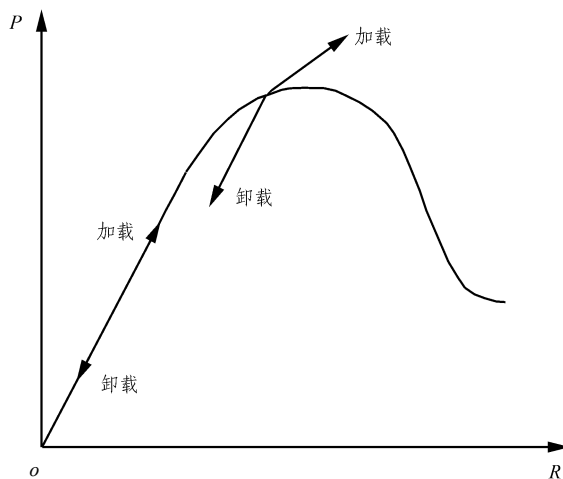


图5 岩石本构曲线

Fig.5 Constitutive law of rock

在地震学中, 可以将日、月潮汐力在岩石圈中所引起的应变及其相关量作为加载和卸载阶段的响应率。日、月潮汐力相对于地壳板块应力而言具有相对高频变化的特征, 因此, 在它的作用下岩石圈中会产生加载和卸载的过程, 这样, 就可以采用这些加载和卸载过程中的某些响应量来定义加卸载响应比, 从而使加卸载响应比理论的实际应用成为可能。

理论上, 任何能够反映系统失稳过程的地球物理量, 均可以取为响应量。在地震学中, 常使用地震的能量 E 及其相关量作为响应量, 其原因在于它们能直接携带震源区的孕震信息, 资料易于获取, 在实践中比较容易操作。

利用地震的能量作为响应量, 可将 Y 定义为

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^{N^+} E_i^m}{\sum_{i=1}^{N^-} E_i^m} \quad (10)$$

式中： E 为地震的能量，“+”代表加载，“-”代表卸载。 m 可以取为 0, 1/3, 1/2, 2/3 或 1。当 $m=1$ 时， E^m 表示能量；当 $m=1/3$ 或 $m=2/3$ 时， E^m 表示孕震区域的线性尺度和面尺度；当 $m=1/2$ 时， E^m 表示 Benioff 应变；当 $m=0$ 时， Y 值相当于 N^+ / N^- ，而 N^+ 和 N^- 分别代表加载和卸载过程中出现的地震数量。

大量地震震例的研究表明，在地震平静期，加卸载响应比在 1 附近波动，而在大地震前夕，加卸载响应比明显升高至远大于 1，在最高值开始回落时，大地震随之发生。

大震前加卸载响应比升高的现象可能用于地震的中期预报。国内外很多学者运用加卸载响应比理论，在地震预测工作中进行了不少尝试。文[40]曾运用该理论对一系列地震进行了研究；文[41]运用加卸载响应比的时空演变特征对滇西地区的地震趋势进行了分析；文[42]研究了新疆伽师强震群中加卸载响应比的变化，说明加卸载响应比理论在某些情况下可以应用到地震的中、短期预报工作中；文[43]曾利用加卸载响应比的变化对日本千叶地区的地震进行了预测，并取得了成功。在这些工作中都发现在强震发生以前 Y 有明显异常的高值出现。

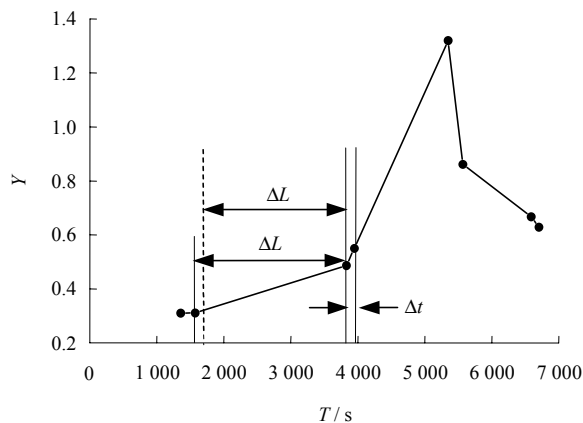
为了验证加卸载响应比理论，文[44]曾利用测量波速的方法进行了实验研究；文[45]利用测量材料模量的变化也对加卸载响应比理论进行过实验研究，他们实验的结论与使用加卸载响应比理论预测的结果相一致。而本次大尺度岩石试件破坏声发射实验，其主要目的之一就是，在更为接近地震的条件下，进一步研究和验证加卸载响应比理论。

本实验模拟了地下岩石的复杂受力过程，特别是引入循环载荷以模拟日、月潮汐力的作用，并且实现了岩石试件的三轴应力状态。

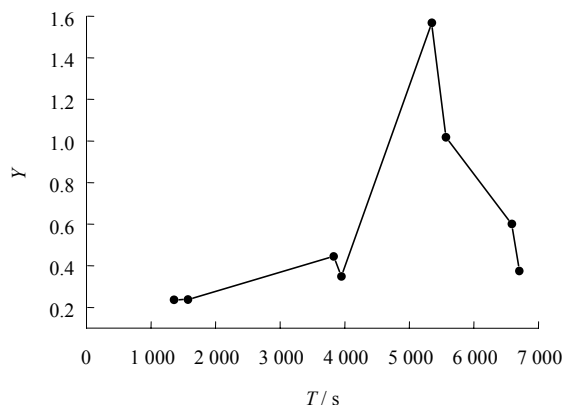
在实验中，加载和卸载过程都记录到大量的声发射事件。分别取 $m=0, 1, 1/2$ ，即用事件数、能量和 Benioff 应变作为响应，得到加卸载响应比 Y 值随时间的变化情况，如图 6 所示。它们反映的规律基本相同，即当载荷水平较低、材料的损伤程度较小时，加卸载响应比 Y 的值较小，也比较稳定；当载荷水平较高，接近破坏的临界载荷时，材料的

损伤程度较大，加卸载响应比 Y 的值就会急剧增加；而当达到或超过临界载荷，并且又在材料发生根本性破坏之前，加卸载响应比 Y 的值则出现了比较明显的回落。

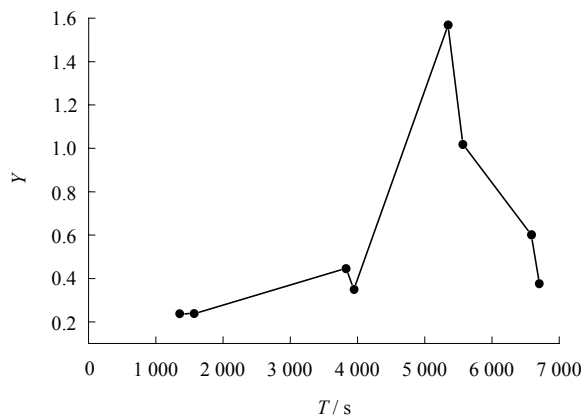
上述的实验结果符合统计细观损伤力学中对于材料的破坏、地震发生和临界敏感性之间关系的论述^[1~4]。同时，这些结果也表明，加卸载响应比 Y 可用作反映非均匀脆性介质破坏以及地震发生的重



(a) 以事件数作为响应， $m=0$



(b) 以能量作为响应， $m=1$



(c) 以 Benioff 应变作为响应， $m=1/2$

图 6 加卸载响应比 Y 随时间的变化曲线

Fig.6 Value Y of LURR versus time

要前兆。

4 结 语

本实验证实了脆性材料(岩石)宏观破坏及地震破坏的2种主要前兆——能量加速释放及加卸载响应比剧增,进而对地震临界点理论给予了实验支持。

致谢 参加本项工作的还有中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室、中国地震局分析预报中心、俄罗斯科学院 Ioffe 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单位的夏蒙芬,李敏,许昭永,彭克银,Victor Kukshenko, Wu Zhishen, Qi Li 和 Surguei Elizarov 等,在这里一并表示感谢。

参 考 文 献

- Bai Y L, Xia M F, Ke F J, et al. Analysis and simulation of evolution induced catastrophe[J]. Chinese Phys. Lett., 1993, 10(3): 155~158
- Bai Y L, Lu C S, Ke F J, et al. Evolution induced catastrophe[J]. Phys. Lett., 1994, 185(2): 196~200
- 夏蒙芬, 韩闻生, 柯孚久等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(I)[J]. 力学进展, 1995, 25(1): 1~40
- 夏蒙芬, 韩闻生, 柯孚久等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变(II)[J]. 力学进展, 1995, 25(2): 145~171
- 腾山邦久. 声发射(AE)技术的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997
- Lockner D A, Byerlee J D, Kuksenko V, et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. Nature, 1991, 350(7): 39~42
- Lockner D A. The role of emission in the study of rock failure[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1993, 30(7): 883~899
- 秦跃平, 孙文标, 王磊. 岩石损伤力学模型分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 702~705
- 蔡美峰, 来兴平. 复合坚硬岩石巷道塌陷阶段监控的研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 391~394
- 赵向东, 陈波, 姜福兴. 微地震工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增2): 2609~2612
- 许迎年, 徐文胜, 王元汉等. 岩爆模拟试验及岩爆机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1462~1466
- 周小平, 张永兴. 大厂铜坑矿细脉带岩石结构面直剪实验中声发射特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 724~727
- Tomilin N G, Damaskinskaya E E, Vkuksenko S. Formation of a fracture focus during the deformation of heterogeneous materials (granite)[J]. Fiz. Tverd. Tela(St. Petersburg), 1994, 36(10): 1649~1653
- Kaiser J. An investigation into the occurrence of noises in tensile tests or a study of acoustic phenomena in tensile tests[Ph D Thesis][D]. Munich: Tech. Hosch. Munchen, 1950
- Goodman R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. Geol. Soc. Amer. Bull., 1963, 74(3): 487~490
- 张守良, 邓金根, 徐显广等. 油田地应力测量技术及中国西部地应力分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增): 2134~2138
- Li C, Norlund E. Experimental verification of Kaiser effect in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(4): 333~351
- Vere-Jones D. Statistical theory of crack propagation[J]. Math. Geol., 1977, 9(4): 455~481
- Sornette A, Sornette D. Earthquake rupture as a critical point: consequences for telluric precursors[J]. Tectonophysics, 1990, 179(3/4): 327~334
- Sornette D, Sammis C G. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: implications for earthquake predictions[J]. J. Phys. I, 1995, 5(5): 607~619
- Sammis C G, Smith S W. Seismic cycles and the evolution of stress correlation in cellular automation models of finite fault networks[J]. Pure Appl. Geophys., 1999, 155(2/4): 307~334
- Bowman D D, Ouillon G, Sammis C G, et al. An observation test of the critical earthquake concept[J]. J. Geophys. Res., 1998, 103(24): 359~372
- Knopoff L, Levshina T, Keilis-Borok V I, et al. Increased long-range intermediate-magnitude earthquake activity prior to strong earthquakes in California[J]. J. Geophys. Res., 1996, 101(S3): 5779~5796
- Rundle J B, Klein W, Gross S. A physical basis for static patterns in complex earthquake populations: models, predictions and tests[J]. Pure Appl. Geophys., 1999, 155(3/4): 575~607
- Jaume S C, Sykes L R. Evolution toward a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large great earthquakes[J]. Pure Appl. Geophys., 1999, 155(3/4): 279~306
- 吴忠良. 地震震源物理中的临界现象[M]. 北京: 地震出版社, 2000
- Smith R L, Phoenix S L. Asymptotic distributions for the failure fibrous materials under series-parallel structure and equal load-sharing[J]. J. App. Mech., 1981, 48(103): 75~82
- Curtin W A. Theory of mechanical properties of ceramic-matrix composites[J]. J. Am. Ceramsoc., 1991, 74(11): 2837~2845
- Newman W L, Phoenix S L. Time dependent fiber-bundles with local load sharing[J]. Phys. Rev., 2001, 63(2): 507~507
- Turcotte D L, Newman W I, Shcherbakov R. Micro-and macro-scopic

- models of rock fracture[J]. *Geophys. J. Int.*, 2002, 152(3): 718~728
- 31 Ben-Zion Y, Lyakhovskiy V. Accelerated seismic release and related aspects of seismicity patterns of earthquakes faults[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2002, 158(12): 2 385~2 412
- 32 Sornette D. *Critical Phenomena in Natural Science(Chaos, Fractals, Selforganizaion and Disorder, Concept and Tools)[M]*. Herdelberg: Springer Series in Synergetics, 2000
- 33 Xia M F, Wei Y J, Ke F J, et al. Critical sensitivity and trans-scale fluctuations in catastrophic rupture[J]. *Pageoph.*, 2002, 159(9): 2 491~2 509
- 34 Yin X C, Mora P, Peng K, et al. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction[J]. *Pageoph.*, 2002, 159(9): 2 511~2 523
- 35 Huang A, Johansen M W, Lee H, et al. Artifactual log-periodicity in finite-size data, relevance for earthquake aftershocks[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, in press
- 36 Press W H, Flannery B P, Vetterling W T, et al. *Numerical Recipes[M]*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986
- 37 Yin X C, Yin C. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction[J]. *Science in China*, 1991, 34(8): 977~986
- 38 Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. A new approach to earthquake prediction — the load/unload response ratio(LURR) theory[J]. *Pageoph.*, 1995, 145(3/4): 701~715
- 39 Yin X C, Chen X Z, Wang Y C, et al. Development of a new approach to earthquake prediction: load/unload response ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2000, 156(11/12): 2 365~2 383
- 40 Yin X C, Chen X Z, Song Z P. The load/unload response ratio(LURR)theory and its application to earthquake prediction[J]. *Journal of Earthquake Prediction Research*, 1994, 3(3): 325~333
- 41 宋治平, 尹祥础, 陈学忠. 加卸载响应比的时空演化特征及其对地震三要素的预测意义[J]. *地震学报*, 1996, 18(2): 179~186
- 42 王海涛, 彭克银, 张永仙等. 新疆伽师强震群过程中加卸载响应比变化特征[J]. *科学通报*, 1998, 43(10): 1 109~1 111
- 43 尹祥础, 陈学忠, 宋治平等. 关东等地区加卸载响应比的时间变化及其预测意义[J]. *中国地震*, 1996, 12(3): 331~334
- 44 施行觉, 许和明, 万永中等. 模拟引潮力作用下的岩石破裂特征——加卸载响应比理论的实验研究之一[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(5): 633~638
- 45 Wang Y C. *Mechanical simulation of seismogenesis on macro-and meso-scope scale[Ph D Thesis][D]*. Beijing: Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, 1998

本刊再次入选全国中文核心期刊

据 2004 年 7 月由北京大学出版社公开出版的《中文核心期刊要目总览 2004 年版(第四版)》上公布的信息表明,《岩石力学与工程学报》再次入选为全国中文核心期刊。

此次评选是通过国内外较优的 52 种文献检索工具, 对全国约 12 000 种刊物论文的被引量、被摘量、被引量、他引率、影响因子、文摘率、获奖或被重要检索工具收录等 7 项指标进行统计, 再用模糊数学方法和文献计量规律对统计数据加以处理, 并征求了全国各学科的 1 871 位专家的审定意见后, 筛选而得, 具有较高的科学性和可信度。

此次全国共有 74 个学科的 1 798 种刊物入选。它们均为发表本学科的论文数量较多, 文摘率、引文率、读者利用率相对较高, 并在本学科中学术水平较高和影响力较大的期刊。本刊属于“建筑科学”和“水利工程”两类学科, 在“建筑科学”类学科入选的 28 种核心期刊之中, 本刊名列第 4 位, 在“水利工程”类学科入选的 14 种核心期刊之中, 本刊名列第 9 位。

(范文田供稿)