

文章编号: 1000-4750(2011)09-0044-07

介质非均匀性对加卸载响应比 峰值异常特征时间影响的数值研究

*张浪平^{1,2}, 李志雄¹, 尹祥础^{1,2}, 梁乃刚²

(1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 加卸载响应比方法为非均匀脆性介质的灾变预测提供了新的思路, 该方法用加载与卸载响应的差别来定量刻画介质的损伤演化过程。已有的岩石实验研究和地震震例研究, 发现在岩石破裂或者地震发生之前, 加卸载响应比都会出现异常明显的升高及回落, 表明加卸载响应比峰值异常具有良好的灾变前兆意义。震例研究中发现, 加卸载响应比峰值异常特征时间呈现区域特性。因此, 首先用链网模型模拟了压缩载荷下非均匀脆性介质的损伤演化至破裂的过程, 同样发现加卸载响应比在试样发生宏观破裂之前出现了峰值回落的现象, 再次从数值计算的角度证明了加卸载响应比峰值的灾变前兆作用。其次重点考察了不同非均匀性程度试样的加卸载响应比演化情况, 发现峰值出现到试样破裂发生的特征时间 T_2 与介质非均匀性程度指标 Weibull 指数 m 存在如此关系: m 值越大, T_2 值越小。表明介质的均匀性程度越高, 特征时间 T_2 的值就越小, 破裂发生也就越突然。该文得出的介质非均匀性程度与峰值异常特征时间的关系将为提高加卸载响应比地震预测的时间能力提供某些线索。

关键词: 加卸载响应比; 链网模型; 灾变前兆; 非均匀脆性介质; 损伤演化

中图分类号: P315.72⁺⁸ **文献标志码:** A

NUMERICAL SIMULATION RESEARCH ON THE INFLUENCE OF MATERIAL HETEROGENEITY ON CHARACTERISTIC TIME OF LOAD/UNLOAD RESPONSE RATIO'S PEAK ABNORMITY

*ZHANG Lang-ping^{1,2}, LI Zhi-xiong¹, YIN Xiang-chu^{1,2}, LIANG Nai-gang²

(1. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;

2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The Load/Unload Response Ratio (LURR) method is proposed as a new approach to predict the failure of heterogeneous brittle materials, namely using the ratio between response rates occurred during the time periods of loading and unloading to describe the process of damage evolution quantitatively. In laboratory studies and inspection of real earthquake cases we have found that the LURR time series climb to an anomalously high peak and then decrease rapidly prior to the rupture of the rock specimens or the occurrence of earthquakes, which demonstrates that peak values of the LURR time series possess good significance of a catastrophic failure prediction. We also find the characteristic time of LURR peak abnormality appears regional features. Thusly, firstly, we simulate the process of damage evolution to failure of rock specimens under compression on the basis of a Chain-Network Model and also find the appearance of a peak value and fall of the LURR value successively before the macro-failure of specimens, which validates that LURR's peak value is a good precursor for

收稿日期: 2010-05-10; 修改日期: 2010-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41004018); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项项目(02092425)

作者简介: *张浪平(1982—), 男, 湖南涟源人, 助理研究员, 博士, 从事脆性介质破坏前兆与地震预测研究(E-mail: zhanglpLURR@gmail.com);

李志雄(1963—), 男, 湖南常德人, 研究员, 博士, 从事地震预测方法及理论等研究(E-mail: lzx6308@seis.ac.cn);

尹祥础(1935—), 男, 河南开封人, 研究员, 从事地震力学与地震预测研究(E-mail: xcyin@public.bta.net.cn);

梁乃刚(1944—), 男, 河南博爱人, 研究员, 博士, 从事计算固体力学研究(E-mail: lng@lnm.imech.ac.cn).

catastrophic failure from the viewpoint of numerical simulation again. Furthermore, LURR evolutions of heterogeneous brittle specimens with different heterogeneity are investigated emphatically, and the heterogeneity of specimens is achieved by introducing Weibull distribution as a probability distribution function. It finds that the time gaps T_2 between the peak values and the ruptures are influenced by Weibull modulus m used to describe the heterogeneous extent of the specimens. T_2 will be smaller if m value is larger, which means the time gap T_2 is smaller if the homogeneity of specimens is higher and the rupture will be also more abruptly. The research in this paper will provide some clues to improve the time accuracy in the earthquake prediction by using the LURR method.

Key words: Load/Unload Response Ratio (LURR); Chain-Network Model; catastrophic failure precursor; heterogeneous brittle media; damage evolution

地震的孕育过程是极其复杂的。从力学角度看,其物理实质是震源区介质的变形、损伤,最后导致破裂或失稳的过程。尹祥础^[1]在地震力学、损伤力学、非线性科学等学科的基础上提出了加卸载响应比(LURR)理论,其思路是把加载响应与卸载响应的比值定义为加卸载响应比(LURR),以用来定量刻画介质的损伤程度。并将其定义为^[1-2]:

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (1)$$

式中: X_+ 表示加载响应率; X_- 表示卸载响应率。取不同的物理量作响应, X 的表达方式不同。在地震预测实践中通常取地震能量作为响应,加卸载响应比 Y 可定义为:

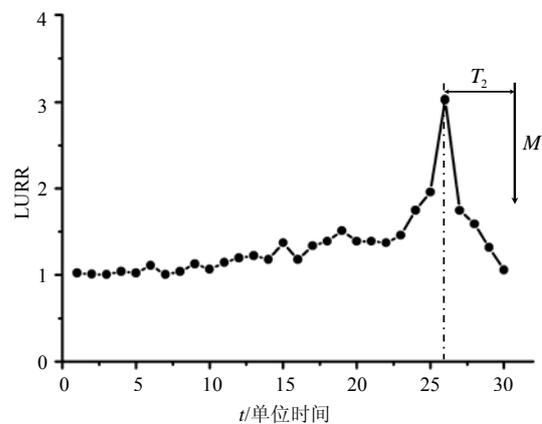
$$Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} E_i^\gamma \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N_-} E_i^\gamma \right)_-} \quad (2)$$

式中: E 为地震能量; “+” 代表加载; “-” 代表卸载; γ 可以取为 0、1/3、1/2、2/3 或 1, 本文取 $\gamma = 1/2$, 即取 Benioff 应变作为响应量。

尹祥础等^[3-5]进行了中强地震前 LURR 演化规律的大量震例回溯性检验,震例研究表明,在地震平静期, LURR 值在 1.0 附近波动,而在大地震前夕, LURR 明显升高至大于 1.0 的峰值,峰值过后出现急剧回落,然后强震随之发生。应用 LURR 峰值作为地震前兆判定指标,对上百例地震资料进行检验,80%以上的检验效果良好^[3-7]。LURR 峰值回落的现象同样出现在岩石实验宏观破裂发生之前^[8-14]。张晖辉等^[9-11]利用岩石破裂实验过程中声发射能量率与声发射数率的数据,根据式(2)以 Benioff 应变为响应量对花岗岩、砂岩、大理岩等试

件的实验过程进行了 LURR 分析,发现在岩石破裂发生之前, LURR 经历了从稳定到出现异常、升高至峰值、急剧回落的过程;张浪平等^[14]利用轴向应变作为响应量对实验过程进行分析,得出了相同的 LURR 时序演化特征。数值研究方面,澳大利亚学者采用固体点阵模型模拟了脆性介质压缩过程中 LURR 演化规律^[15-16]。模拟结果表明 LURR 会随着载荷的增加而升高,然后升高到峰值,在主破裂发生之前, LURR 值急剧下降,并且经统计研究证实 LURR 峰值作为灾变前兆具有很好的鲁棒性^[17]。

以往研究从震例回溯性检验、岩石声发射破裂实验以及数值模拟等方面揭示了在地震或岩石破裂发生之前, LURR 都会经历: 平稳→出现异常→升高到峰值→急剧回落→地震发生(或是岩石破裂或失稳)的过程(图 1 给出了这个过程示意图),研究结果均表明 LURR 峰值异常具有良好的灾变前兆意义。在进行震例回溯性检验的过程中发现, LURR 峰值异常的特征时间(LURR 峰值出现到地震发生的时间间隔 T_2 , 见图 1)尺度与地震震级存在着某种



(T_2 为 LURR 峰值到地震发生的时间长度, M 为地震震级)

图 1 LURR 时序演化示意图

Fig.1 Sketch of LURR evolution

联系, 而且其峰值异常的特征时间在地震预测的时间方面有着非常重要的意义, 因此开展 LURR 峰值异常特征时间的研究显得十分必要。

张晖辉等^[18]利用中国大陆的 30 多个 5 级以上震例的 LURR 时序演化对 LURR 峰值特征时间进行了统计研究, 研究表明 LURR 峰值特征时间(T_2)跟地震震级(M)具有如下关系:

$$T_2 = 60(1 - 2.3 \times 10^{-0.08M}) \quad (3)$$

在目前的地震预测实践中, 主要利用式(3)来参考未来地震的可能发震时间。

然而地震孕育的过程是十分复杂的, 预测实践证明 T_2 不仅与地震震级有关, 而且很大程度取决于孕震区的地质情况^[19]。针对 LURR 峰值异常特征时间与孕震区地质背景存在的某种关系提炼出的力学问题是 LURR 峰值异常特征时间与介质非均匀性程度之间存在怎样的关系。就目前研究现状来说, LURR 峰值异常特征时间 T_2 与介质的非均匀性程度之间的关系尚未研究, 而明确两者之间的关系对提高 LURR 地震预测的时间能力有着很大的科学意义, 因此本文的目的就是用链网模型来模拟孕震条件下非均匀脆性介质的破坏过程及相应的 LURR 时序演化, 并研究 LURR 峰值异常特征时间 T_2 与介质非均匀性程度之间的关系。

1 链网模型的简介

链网模型的提出是基于对原位增强陶瓷材料和晶须增强陶瓷材料细观结构的研究^[20]。在原位增强陶瓷中, 将长颗粒与基体分别抽象为链杆单元与节点, 从而构成链网模型, 见图 2(a)。在外界载荷作用下, 其载荷位移曲线可模拟实际材料的宏观力学行为, 而链杆的弹性变形与断裂则可以反映材料的细观损伤演化。已有研究表明链网模型与其他方法相比具有以下几方面的优点^[21-22]:

1) 模型按照细观力学研究问题的方法, 提出了一个宏观小、微观大的链杆单元的概念, 将链杆单元作为连接微观和宏观两个尺度的桥梁, 能够体现微观集团的平均化思想和宏观尺度上各单元存在的差异。

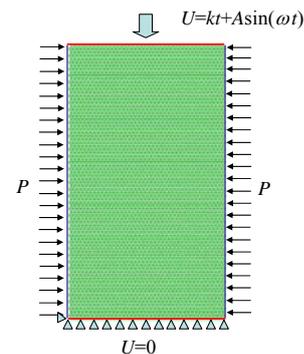
2) 链网模型有实在的物理背景。模型本来就是从原位增强陶瓷材料的细观结构抽象出来的, 并且能体现一般非均匀性材料的细观结构。

3) 链网模型具有较好的可操作性, 有利于研究复杂问题, 比如考虑微裂纹、夹杂、颗粒和纤维等

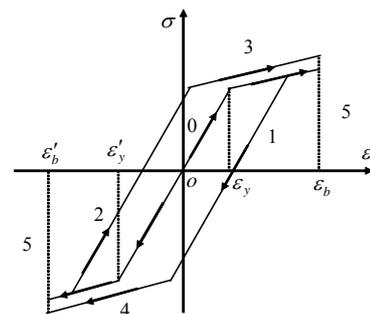
问题, 有利于采用多重尺度的方法, 开展大规模计算。

4) 基于所建立的一维材料失效准则, 易于实现单元断裂后载荷转移导致的应力重分配, 因此链网模型与边界元、有限元方法相比更适用于模拟大量裂纹空间相互作用下介质的损伤演化过程。

基于链网模型具有的以上优点, 将采用链网模型来模拟岩石试样在压缩载荷下的损伤演化过程。在试样两侧施加侧压, 轴向施加轴压, 试样模型网格、载荷条件及约束设置见图 2(a); 模型中链杆单元采用线性强化的应力-应变关系, 见图 2(b)。链杆单元的力学性质主要由弹性模量、硬化模量、弹性极限和断裂极限控制。模型中链杆单元长度为 1 个单位长度, 弹性阶段链杆刚度为 $1 \times 10^6 \text{N/单位长度}$, 屈服阶段的链杆刚度为 $0.25 \times 10^6 \text{N/单位长度}$ 。模型网格铺设横向取 80 个节点, 纵向取 163 个节点, 单元数量为 19178。



(a) 链网模型网格、约束、侧压及轴向位移加载示意图



(b) 链杆单元的应力-应变关系和不同状态分布示意图

图 2 链网模型示意图及链杆单元应力-应变关系

Fig.2 Sketch of Chain-Network Model and the relationship between the stress and strain of elements

非均匀脆性介质的强度具有统计特性, 在数值模拟过程中一般用概率的非确定性方法来处理这种统计性^[23]。本文将采用 Weibull 分布^[24]随机对各链杆单元的弹性极限 ϵ_y 和断裂极限 ϵ_b 进行赋值。链杆单元的弹性极限和断裂极限均服从 Weibull 分

布, 其概率密度函数都可以写成如下形式:

$$p(\varepsilon_i) = c_i m_i \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i0}} \right)^{m_i - 1} \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i0}} \right)^{m_i} \right], \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

其中: c_i 为材料的归一化常数; m_i 为 Weibull 指数, m_i 的不同取值可以实现介质不同的非均匀性程度。当 $i = 1$ 时, 式(4)描述的是链杆单元弹性极限的概率密度; 而当 $i = 2$ 时, 式(4)描述的就是链杆单元断裂极限的概率密度了。模拟过程中弹性极限选用的 $\varepsilon_{10} = 2.0 \times 10^{-3}$, 断裂极限选用 $\varepsilon_{20} = 4.0 \times 10^{-3}$ 。另外, 考虑到脆性介质的抗压强度远大于抗拉强度, 在模型中选用的压拉强度比值为 20。

由程序自动生成一组介于(0, 1)随机数 r_i , 根据 Weibull 分布的积分函数:

$$r(\varepsilon_i) = 1.0 - c_i \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i0}} \right)^{m_i} \right], \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

就可以得到链杆单元的弹性极限与断裂极限。由此方法生成的材料参数既具有随机性, 又服从 Weibull 统计分布规律, 以实现介质的非均匀性。

文献[21]针对链网模型与有限元方法开展了一系列算例研究对比, 证实链网模型与有限元方法具有完全一致的结果, 链网模型更具有节省计算资源等优势。而且有限元方法在处理单元破裂载荷转移导致的应力重分配方面存在着很大的困难, 因此本文将采用链网模型来模拟非均匀脆性介质的损伤演化-破裂过程。

2 LURR 演化规律的模拟研究

本节介绍采用链网模型来模拟非均匀脆性介质压缩过程中 LURR 的演化规律。在模拟脆性介质的压缩破坏过程中, 侧向采用的是力加载, 力的大小保持恒定。本文侧压的施加方式是在试件两侧的每个节点上施加一个集中力, 在计算过程中保持恒值为 30000N。轴向采用的是位移加载, 且为线性增加叠加正弦扰动(见图 2(a))。侧压的施加是为了模拟孕震条件下的周边块体的挤压作用, 轴向载荷的线性部分是为了模拟构造应力, 扰动部分是为了模拟潮汐应力。轴向位移加载的扰动部分正好提供了加载和卸载的过程。在模拟过程中载荷的施加分两步实现: 第一步是施加侧压, 采用力加载。在此过程中为了保证链杆单元不会被侧压破坏, 在侧压施加的同时轴向也施加一个压力并保证与侧压大小相同; 第二步是轴向位移加载, 采用位移加载模

式。在模拟过程中, 取链杆单元发生破裂所释放的能量作为响应, 定义加卸载响应比为:

$$Y_\gamma = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} \Theta_i^\gamma \right)}{\left(\sum_{i=1}^{N_-} \Theta_i^\gamma \right)} \quad (6)$$

类似式(2), 其中: Θ 为链杆单元破裂引起的能量释放; “+”和“-”分别代表加载和卸载; γ 是一个常数。 $\gamma = 1$ 时, Θ_i^γ 为损伤造成的能量释放; $\gamma = 1/2$ 时, Θ_i^γ 为 Benioff 应变; $\gamma = 0$ 时, Θ_i^γ 即为发生破裂的链杆数量, 本文取 $\gamma = 1/2$ 。

模拟过程中采用非准静态加载的加载方式^[25]。取一定的时间窗长, 求解该窗长内加载段损伤导致的能量释放与卸载段损伤导致的能量释放, 再利用式(6)就可以得到 LURR 的演化情况了。文中正弦扰动的周期为 40, LURR 的计算时间窗长取 3000, 滑移步长为 1000。

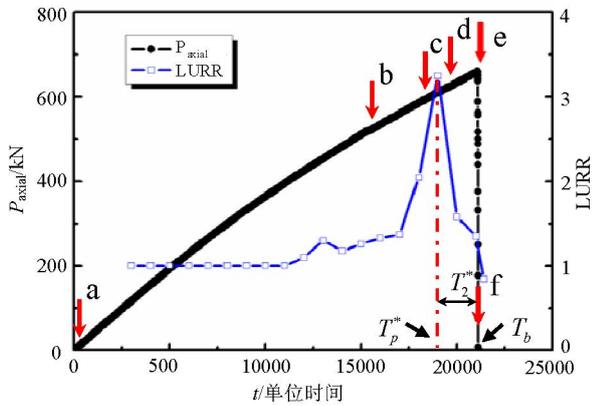
每个加载步对应的位移增量为:

$$\Delta U = k(t_{i+1} - t_i) + A \sin(\omega(t_{i+1} - t_i)) \quad (7)$$

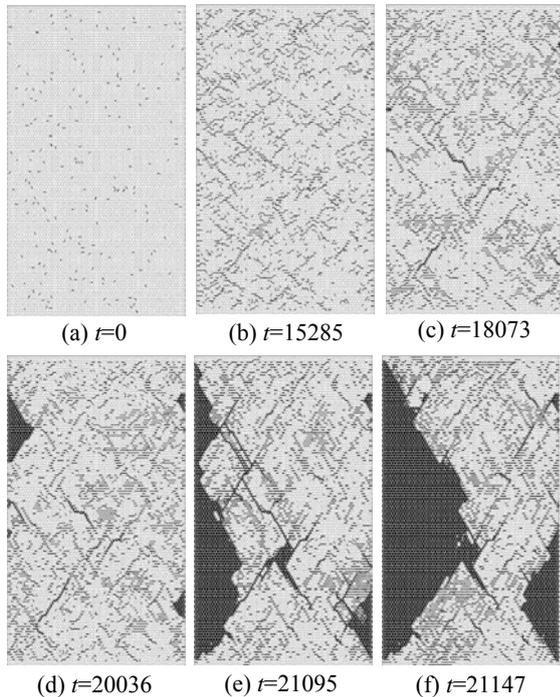
其中: ΔU 为位移增量; k (单位长度/单位时间)为位移线性部分的斜率, 取值为 1.0×10^{-4} ; A (单位长度)、 ω (单位时间⁻¹)分别为位移扰动部分的振幅和圆频率, 分别取值为 2.0×10^{-3} 、 $2\pi/40$ 。根据式(7)给出的位移加载模式, 可以知道各加载点对应的斜率, 判断该加载步是处于加载还是卸载, 从而判断该加载步产生的链杆破裂所释放的能量是对应加载还是卸载状态。考察试样在压缩条件下 LURR 的演化情况, 取 Weibull 指数 $m = 2.0$, 模拟结果和 LURR 演化曲线见图 3。

图 3 给出了压缩过程轴向的载荷-位移曲线, 箭头 f 为试样的破裂点。图 4 为对应加载过程的损伤演化斑图, 试样中白色表示状态完好的单元(处于图 2(b)中状态 0 或状态 1 或状态 2), 灰色单元表示进入强化阶段的单元(图 2(b)中状态 3 或状态 4), 黑色表示破裂单元(图 2(b)中状态 5)。图 4 中给出了不同加载阶段试样的损伤分布情况, 在加载初期 a~b, 破裂杆件随机分布在试件内, 处于一种弥散分布的状态; 随着载荷的不断增大, 损伤逐步的集中并出现局部化 c; 在载荷的继续作用下, 裂纹开始出现串级, 并形成较大的裂纹 d~e; 最终, 破裂单元不断增多, 贯穿整个试件, 致使试件失去承载能力 f。同时, 从图 3 的 LURR 曲线可以看出, 当载荷水平

较低、损伤较少时，LURR 值比较低，也比较稳定；当载荷水平较高，在试样承载能力达到峰值之前，LURR 值就会急剧升高，在宏观破裂发生之前 LURR 值会出现明显的回落，紧接着就是试样的破裂。此过程再一次从数值模拟的角度证明了 LURR 峰值具有良好的灾变前兆意义。



(箭头 f 表示破裂时刻，垂向虚线表示峰值出现时间 T_p^* ；破裂时间为 T_b ；峰值与破裂之间的时间长度为 T_2^*)
图3 模拟过程中的载荷-时间(位移)曲线和 LURR 演化曲线
Fig.3 Axial load-time (displacement) curve and LURR curve during the simulation



(图(a)~图(f)对应为图3中箭头 a~箭头 f 所指时刻的损伤演化斑图)

图4 模拟过程中损伤演化情况

Fig.4 Damage evolution during the simulating process

3 非均匀性程度的影响

上述采用链网模型模拟非均匀脆性介质压缩

实验过程中，链杆单元的弹性极限和断裂极限在微观上服从一定的随机分布，介质的非均匀性程度对试样的破裂方式和承载能力都有一定的影响，本文旨在考察介质的非均匀性程度对 LURR 演化规律的影响。在模型中，Weibull 指数 m 反映了介质的非均匀程度， m 值越高，均匀性程度越高。故分别取 Weibull 指数为 1.5、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0 分别计算其相应的 LURR 演化情况，图 3 给出的是 Weibull 指数取 2.0 时的模拟结果。限于文章篇幅而且演化规律类似，不再给出其他 Weibull 指数的 LURR 演化曲线图像。

为了研究 LURR 峰值特征时间与介质均匀性程度的关系，对试件压缩模拟过程的时间进行归一化处理。记试件发生宏观破裂的时间为 T_b ，LURR 峰值出现的时间为 T_p^* (见图 3)，峰值时间 T_p^* 与破裂时间 T_b 之间的时间长度记 T_2^* 。归一化处理后记 $T_p = T_p^*/T_b$ ，那么 LURR 峰值特征时间为 $T_2 = T_2^*/T_b$ 。取不同 Weibull 指数 m ，同时考虑到样本个性，针对每个 Weibull 指数 m ，取 10 个随机样本进行模拟计算，各样本的 LURR 峰值特征时间 T_2 的平均值记为 \bar{T}_2 ，特征时间的涨落记 η ，具体结果见表 1。特征时间 T_2 与 Weibull 指数 m 的关系曲线见图 5，样本 T_2 的涨落在图 5 中用误差棒表示。

表 1 对应不同 Weibull 指数 m 的非均匀介质的 LURR 峰值特征时间统计平均值及样本涨落

Table 1 The statistic average value of LURR peak characteristic time and their fluctuation of specimens of heterogeneous brittle media corresponding with different Weibull modulus m

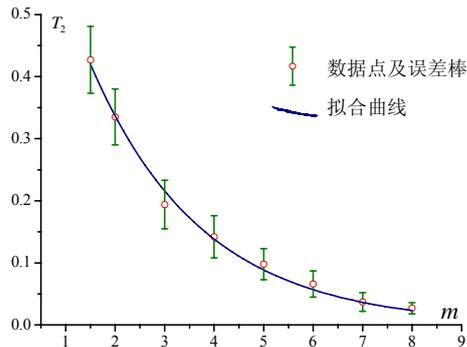
Weibull 指数 m	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
T_p	0.573	0.665	0.806	0.858	0.902	0.958	0.963	0.973
\bar{T}_2	0.427	0.335	0.194	0.142	0.098	0.066	0.037	0.027
η	0.054	0.045	0.039	0.034	0.025	0.021	0.015	0.009

由以上分析可以看出，LURR 峰值特征时间 T_2 与介质的均匀性程度有着很大的关系，均匀性程度越高， T_2 的值越小，这就表明均匀性程度越高的介质，破裂发生的也越剧烈、越突然，主破裂释放的能量也越大。这也不难理解，若介质是完全均匀的，试件内单元会同时破裂，这样 LURR 峰值势必会与破裂的时间重合。也就是说 m 取值趋向于无穷大时， T_2 的值也会无限接近于 0。Mogi^[26]曾经说过，如果地壳确是由像玻璃那样的均匀脆性材料构成的，破裂(地震)的预报肯定是极其困难的，在均匀介质中破裂的产生是突然的。对于完全均匀的脆性介质，比如玻璃，要预测其破坏时间是一件不可能

的事情。基于这点认识,可以对图5中各点进行指数关系拟合,得到关系式如下:

$$T_2 = 0.82e^{-0.44m} \quad (8)$$

从图4可以看出式(8)能够较好的描述LURR峰值异常特征时间 T_2 与介质非均匀性程度指标 m 之间的关系。对完全均匀的介质,Weibull指数 m 趋于无穷大,此时LURR峰值异常特征时间为0,这与Mogi^[26]的观点一致。



(误差棒表示样本涨落; 曲线表示的拟合结果)

图5 LURR峰值异常特征时间统计平均值与Weibull指数 m 的关系曲线

Fig.5 The relation curve between the statistic average value of LURR peak characteristic time and Weibull Modulus m

4 结论与讨论

在利用LURR方法进行地震和岩石破裂等灾变预测的实践中,都会在岩石破裂或者地震发生之前出现LURR异常、升高至峰值、急剧回落的过程。LURR峰值越来越多地被用来作为灾变发生的前兆,不仅仅局限在地震预测,还逐渐应用到边坡稳定性^[27-28]和滑坡^[29-30]等研究中。在地震预测实践中,为了更好地发挥其预测作用,经过研究得出了LURR峰值特征时间与地震震级之间的关系(式(3)),然而在运用LURR方法进行地震预测实践的过程中发现不同地区地震的LURR时序演化曲线与式(3)的吻合程度不同。这表明LURR峰值异常特征时间与地震孕育的构造背景存在很大的联系。针对这个问题,从力学角度上提取为LURR峰值异常的特征时间与介质非均匀性程度之间存在着某种关系。因此,本文带着此问题,开展了用链网模型模拟非均匀脆性介质在压缩条件下的损伤演化-破裂过程的工作,重点考察LURR峰值异常特征时间与介质非均匀性程度的关系。

本文结果再一次从数值模拟的角度证明LURR峰值具有良好的灾变前兆意义。重点考察的LURR

峰值异常特征时间 T_2 与介质非均匀性指标Weibull指数 m 的关系表明: m 值越大, T_2 的值越小。换言之就是介质的均匀性程度越高, T_2 的值越小,也就表明均匀性程度越高的介质,破裂发生的也越剧烈、越突然。这与Mogi^[26]的观点一致。

回顾以往关于LURR峰值前兆意义的一系列岩石实验研究,分别选取了不同材质的岩石试件进行实验分析,有花岗岩、大理石、砂岩等,其LURR峰值异常特征时间见表2。

表2 实验过程不同岩石试件的峰值特征时间统计
Table 2 Statistic of LURR peak characteristic time of different rock specimens in the experiments

岩石试样	花岗岩		砂岩		大理石		
	G2 ^[31]	G3 ^[31]	G2yu ^[13]	S1 ^[31]	S6 ^[31]	S2yu ^[13]	M6 ^[31]
T_2	0.11	0.10	0.20	0.05	0.07	0.08	0.38

注:表中G为花岗岩,S为砂岩,M为大理石,后面的数字表示试件编号,后面有yu表示数据来自文献[13],否则来自文献[31]。

表2中数据表明,砂岩试件的特征时间 T_2 最小,花岗岩试件的特征时间次之,大理石试件的最大。由于可供参考的实验数据较少,仅仅从已有的结果还不能得出LURR峰值异常特征时间与岩石种类之间存在怎样的关系,但已经说明不同岩石对应着不同的LURR峰值异常特征时间。因此,在应用LURR方法进行地震等灾变预测时,应充分考虑介质的非均匀性程度。从地震的孕育过程来说,不同孕震区域的断层分布不同,岩石性质不一样,就应该存在着不同尺度的LURR峰值异常特征时间,正如地震预测实践中发现不同地区地震事件的 T_2 与式(3)存在一定的偏离。如此就应该针对特定地区的地震震例建立不同的LURR峰值异常特征时间与地震震级之间的关系,并基于建立的关系来指导地震预测实践。因此,本文的结论可为提高LURR方法对地震发生时间的预测能力提供某些线索。

参考文献:

- [1] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 1987, 3(1): 1-7.
Yin Xiangchu. A new approach to earthquake prediction [J]. Earthquake Research in China, 1987, 3(1): 1-7. (in Chinese)
- [2] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预报[J]. 中国科学(B辑), 1991, 21(5): 512-518.
Yin Xiangchu, Yin Can. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction [J]. Science in China (Series B), 1991, 21(5): 512-518. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] Yin X C, Chen X Z, Song Z P. A new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1995, 145(3): 701—715.
- [5] Yin X C, Wang Y C, Peng K Y. Development of a new approach to earthquake prediction: Load/Unload Response Ratio (LURR) theory [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(11/12): 2365—2383.
- [6] Yin X C, Zhang L P, Zhang H H. LURR's twenty years and its perspective [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11/12): 2317—2341.
- [7] Yin X C, Zhang L P, Zhang Y X. The newest developments of Load-Unload Response Ratio (LURR) [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2008, 165(3/4): 711—722.
- [8] Yin X C, Yu H Z, Kukshenko V. Load-Unload Response Ratio (LURR), Accelerating Moment/Energy Release (AM/ER) and state vector saltation as precursors to failure of rock specimens [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2004, 161(11): 2405—2416.
- [9] Zhang H H, Yin X C, Liang N G. Acoustic emission experiments of rock failure under load simulating the hypocenter condition [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11): 2389—2406.
- [10] 张晖辉, 颜玉定, 余怀忠. 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[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3621—3628.
Zhang Huihui, Yan Yuding, Yu Huaizhong. Acoustic emission experiment research of large-scaled rock failure under cycling load—fracture precursor of rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3621—3628. (in Chinese)
- [11] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚. 模拟引潮力作用下岩石破坏前兆的实验研究——加卸载响应比(LURR)理论和能量加速释放(AER)[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17): 3172—3179.
Zhang Huihui, Yin Xiangchu, Liang Naigang. Experimental study of rock precursor using simulated tide stress—Load/Unload Response Ratio (LURR) and Accelerating Energy Release (AER) [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3172—3179. (in Chinese)
- [12] 王裕仓, 尹祥础, 王海涛. 地震预测的加卸载响应比岩石实验模拟[J]. *中国地震*, 1998, 14(2): 126—130.
Wang Yucang, Yin Xiangchu, Wang Haitao. The simulation of rock experiment on load/unload response ratio on earthquake prediction [J]. *Earthquake Research in China*, 1998, 14(2): 126—130. (in Chinese)
- [13] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬. 加卸载响应比(LURR)理论的实验研究[J]. *中国地震*, 2003, 19(1): 58—66.
Yu Huaizhong, Yin Xiangchu, Xia Mengfen. Experimental research on the theory of Load/Unload Response Ration (LURR) [J]. *Earthquake Research in China*, 2003, 19(1): 58—66. (in Chinese)
- [14] 张浪平, 余怀忠, 尹祥础. 加卸载响应比方法在结构灾变预测中的应用[J]. *工程力学*, 2010, 27(3): 228—235.
Zhang Langping, Yu Huaizhong, Yin Xiangchu. Application of the Load/Unload Response Ratio method in catastrophic failure prediction of structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(3): 228—335. (in Chinese)
- [15] Wang Y C, Yin X C, Ke F J. Simulation of rock failure and earthquake process on mesoscopic scale [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157: 1905—1928.
- [16] Mora P, Wang Y C, Yin C. Simulation of the Load-Unload Response Ratio and critical sensitivity in the lattice solid model [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159(10): 2525—2536.
- [17] Wang Y C, Mora P, Yin C. Statistical tests of Load-Unload Response Ratio signals by lattice solid model: Implication to tidal triggering and earthquake prediction [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2004, 161(9): 1829—1839.
- [18] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚. 中国大陆地区中强地震前加卸载响应比异常时间尺度的统计研究[J]. *中国地震*, 2005, 21(4): 486—495.
Zhang Huihui, Yin Xiangchu, Liang Naigang. Statistic study of LURR anomaly temporal scale before moderately strong earthquakes on the Chinese mainland [J]. *Earthquake Research in China*, 2005, 21(4): 486—495. (in Chinese)
- [19] 尹祥础, 袁帅, 张浪平. 强震前加卸载响应比的演化规律及中国大陆 2010-2012 年的地震趋势预测[C]. 中国大陆强震趋势预测研究(2010 年度), 《地震》编辑部, 2009: 163—170.
Yin Xiangchu, Yuan Shuai, Zhang Langping. The evolution of LURR before strong earthquakes and the prediction of the seismic tendency of Chinese mainland in 2010-2012 [C]. *Researches on the Strong Earthquake in Chinese Mainland (2010)*, edited by Editorial Board of *Earthquake Journal*, 2009: 163—170. (in Chinese)
- [20] 梁乃刚, 刘庆杰, 李静. 链网模型与 Si_3N_4 陶瓷材料宏观力学行为模拟[J]. *力学学报*, 1997, 29(2): 182—188.
Liang Naigang, Liu Qingjie, Li Jing. A chain-network model simulating macro mechanical behavior and micro damage evolution of Si_3N_4 ceramics [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1997, 29(2): 182—188. (in Chinese)
- [21] 徐和钦. 非均匀材料损伤破坏的数值模拟软件开发及强韧化机理研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1999.
Xu Heqin. Software development for damage evolution of heterogeneous materials and investigation for reinforcing mechanisms [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 1999. (in Chinese)
- [22] 刘晓宇. 三维链网模型及短纤维增强复合材料行为预测[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2001.
Liu Xiaoyu. 3-D network model and prediction of mechanical behavior of short-fiber reinforced composites [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001. (in Chinese)

(参考文献[23]—[31]转第 58 页)

- Wang Yan, Peng Fuming, Zhao Guiming. Experimental study of semi-rigid joint of steel frame beam-column under cycle load [J]. Industrial Construction, 2001, 31(12): 55—57. (in Chinese)
- [3] Guo Bing, Gu Qiang, Liu Feng. Experimental behavior of stiffened and unstiffened end-plate connections under cyclic loading [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2006, 132(9): 1352—1357.
- [4] Cavidan Yorgun, Güliz Bayramoğlu. Cyclic tests for welded-plate sections with end-plate connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57: 1309—1320.
- [5] Broderick B M, Thomson A W. The response of flush end-plate joints under earthquake loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58: 1161—1175.
- [6] Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing, Bradford M A. Numerical simulation of steel pretensioned bolted end-plate connections of different types and details [J]. Engineering Structures, 2008, 30: 2677—2686.
- [7] Shi Gang, Shi Yongjiu, Wang Yuanqing. Behaviour of end-plate moment connections under earthquake loading [J]. Engineering Structures, 2007, 29: 703—716.
- [8] GJ82-91, 钢结构高强度螺栓连接的设计施工及验收规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- JGJ82-91, Code for design, construction and acceptance of high strength bolt in steel construction [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [9] Nishimura A, Nagasaka T, Inoue N, et al. Low cycle fatigue properties of a low activation ferritic steel (JLF-1) at room temperature [J]. Journal of Nuclear Materials, 2000, 283(1): 677—680.
- [10] 沈祖炎, 沈苏. 高层钢结构考虑损伤累积及裂纹效应的抗震分析[J]. 同济大学学报, 2002, 30(4): 393—398.
- Shen Zuyan, Shen Su. Seismic analysis of tall steel structures with damage cumulation and fracture effects [J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(4): 393—398. (in Chinese)
- [11] 刘永明, 陈以一, 陈扬骥. 考虑钢框架节点局部断裂的滞回模型[J]. 同济大学学报, 2003, 31(5): 525—529.
- Liu Yongming, Chen Yiyi, Chen Yangji. Hysterical model of steel frame connection considering partial fracture [J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(5): 525—529. (in Chinese)
- [12] Mettupalayam V S, Andrei M R. Hysteretic models for deteriorating inelastic structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 633—640.

(上接第 50 页)

- [23] 宋力, 解英艳, 张后全. 岩石试样弹塑性破裂过程的数值分析[J]. 计算力学学报, 2004, 21(5): 614—619.
- Song Li, Xie Yingyan, Zhang Houquan. Numerical simulation on elastic-plastic failure process of rock specimen [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, 21(5): 614—619. (in Chinese)
- [24] Weibull B. A statistical distribution function of wide applicability [J]. Journal Applied Mechanics, 1951, 18: 293—297.
- [25] 荣峰. 非均匀脆性介质损伤演化的多尺度数值模拟[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2006.
- Rong Feng. Multiscale simulation of damage evolution in heterogeneous brittle media [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [26] Mogi K. Fundamental studies on earthquake prediction [C]. A Collection of Papers of International Symposium on ISCSEP, Seismological Press, 1984.
- [27] 姜彤, 马瑾, 许兵. 基于加卸载响应比理论的边坡动力稳定分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 626—631.
- Jiang Tong, Ma Jin, Xu Bing. Dynamic analysis method of slope stability based on LURR theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 626—631. (in Chinese)
- [28] 姜彤, 马莎, 许兵. 边坡在地震作用下的加卸载响应规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3803—3807.
- Jiang Tong, Ma Sha, Xu Bing. Study on laws of load-unload response of slope under seismic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3803—3807. (in Chinese)
- [29] 贺可强, 周敦云, 王思敬. 降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2665—2670.
- He Keqiang, Zhou Dunyun, Wang Sijing. Features of Load-Unload Response Ratio and its significance in prediction of colluvial landslide by rainfall [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2665—2670. (in Chinese)
- [30] Zhang W J, Chen Y M, Zhan L T. Loading/Unloading Response Ratio (LURR) theory applied in predicting deep-seated landslides triggering [J]. Engineering Geology, 2006, 82: 234—240.
- [31] 张晖辉. 非均匀脆性介质的灾变预测——加卸载响应比理论的研究与实践[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- Zhang Huihui. Prediction of catastrophic failure in heterogeneous brittle media—study and practice of Load/Unload Response Ratio (LURR) [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)