

地震条件下损伤 - 愈合模型的初步研究

张浪平^{1, 2}, 尹祥础^{1, 3}, 梁乃刚¹

(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 100190; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

3. 中国地震局 地震预测研究所, 北京 100036)

摘要: 脆性介质的损伤与破坏是力学中极为复杂、极具挑战性的难题之一, 而地震是一类典型脆性介质的突发破裂或失稳。在地震等灾变发生前都会出现一定的前兆现象, 地震之后地壳介质又会缓慢愈合, 地壳介质的损伤愈合过程对地震预测具有重要的研究意义。首先介绍 V. Lyakhovsky 等提出的损伤流变模型, 且结合岩石破坏声发射实验数据分析该模型的特点; 进一步基于损伤力学, 从 Helmholtz 自由能出发, 并考虑地质材料的可愈合效应, 建立一维损伤 - 愈合模型, 采用数值计算的方法得到地质材料的损伤 - 愈合模式。用常数加载率的线性载荷叠加一个正弦扰动来模拟固体潮引力, 模拟计算该加载条件下材料的损伤 - 愈合过程; 同时也考察了整个损伤愈合演化过程中加卸载响应比值的变化情况, 发现在灾变发生之前加卸载响应比值会出现明显异常、回落的现象。再次验证了加卸载响应比作为一种重要的前兆现象, 能够定量地刻画介质的损伤演化过程, 这也为加卸载响应比方法提供了更为坚实的物理基础。

关键词: 岩土力学; 损伤 - 愈合模型; 加卸载响应比; Helmholtz 自由能; 愈合效应; 声发射实验; 地震预测

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2008)增 2 - 3956 - 07

PRELIMINARY STUDY ON DAMAGE-HEALING MODEL UNDER EARTHQUAKE

ZHANG Langping^{1, 2}, YIN Xiangchu^{1, 3}, LIANG Naigang¹

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Institute of Earthquake Science,

China Earthquake Administration, Beijing 100036, China)

Abstract: The damage and failure of brittle media are challenging and complicated issues in mechanics field. Earthquake is a kind of typical failure or instability of brittle medium. Taking earthquakes for example, some precursory phenomena can be observed before the occurrence of catastrophic failure, and the healing phenomenon will take place gradually after earthquakes in a long time. So the study on the damage-healing process of the earth crust media is very significant to earthquake prediction. The model of damage rheology proposed by V. Lyakhovsky is introduced at first, and the shortcomings of the model are analyzed using the data obtained by acoustic emission experiment of rock failure. Secondly, based on damage mechanics, Helmholtz free energy, considering the healing phenomenon of the earth crust media, a new damage-healing model is set up in one dimension, and the damage-healing pattern is calculated with numerical method. The damage-healing process of the media is simulated under load which consists of two parts, the constant loading rate and a sinusoidal perturbation, to simulate solid tidal stress; and the evolution of load/unload response ratio(LURR) during the damage-healing process is also investigated at the same time. The result shows that the LURR value successively experiences, i.e. abnormality appearing, rising to the peak value then decreasing sharply before the occurrence of the catastrophic failure. This result validates that LURR can describe the damage degree of materials

收稿日期: 2008 - 06 - 15; **修回日期:** 2008 - 08 - 16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418406); 国家自然科学基金资助项目(10721202, 10572140)

作者简介: 张浪平(1982 -), 男, 2004 年毕业于太原理工大学工程力学专业, 现为博士研究生, 主要从事地震力学和地震预测方面的研究工作。E-mail: zhanglp@lnm.imech.ac.cn

quantitatively and is a good forecast of catastrophic failure, which also can provide solid basis for LURR method in physics.

Key words: rock and soil mechanics; damage-healing model; load/unload response ratio(LURR); Helmholtz free energy; healing phenomenon; acoustic emission(AE) experiment; earthquake prediction

1 引言

地震是一类很恶劣的自然灾害。从力学角度看,地震孕育过程的物理实质就是一个震源区介质的变形、损伤、最后破裂或失稳的过程^[1]。地震大都发生在地壳,而地壳又是岩石圈的主要组成部分,所以地震是一类典型的脆性介质的突发破裂或失稳。在整个孕震过程中,震源区介质在较长时间尺度上经历变形、损伤、愈合,如此反复,直至损伤达到一定程度,导致积累在孕震区的能量部分释放,从而引发地震。在地震过后,震源区介质又会缓慢愈合,然后再次经历变形、损伤,直至下一次地震发生。倘若没有愈合,地壳就会由于一个个地震留下的一道道裂缝变的四分五裂,那样的话,地球早就不复存在。因此,针对地质材料的这种可愈合的特点,有必要建立一个损伤 - 愈合的模型,来探索其中的机制,以便于对地震发生→愈合→地震再次发生的过程进行探索。

地震及其他灾变发生之前都会出现一定的前兆现象,中外科学家运用多种理论和方法对这些前兆现象进行了研究。从 20 世纪初开始,国外就有人对大震前的地震活动性的改变进行了一些早期研究^[2, 3];我国学者^[4~11]也在这个领域进行了大量的研究。D. Vere-Jones^[12]在 1977 年提出的临界点概念,以及随后形成的临界点理论^[13, 14],反映了震源区固体介质损伤演化的物理实质,定量地刻画了地震的演化进程以及灾害迫近程度。基于临界点理论,可以将地震看成一种临界现象,而临界现象发生之前都会出现前兆现象。加卸载响应比(LURR)是一种易于操作且重要的前兆现象,加卸载响应比值 Y 可以用来定量刻画介质的损伤程度, Y 值升高反映的是系统接近临界点时临界敏感性的增加^[15~17]。

损伤力学是固体力学的一个分支学科。20 世纪中叶,L. M. Kachanov^[18]最初提出了用连续性变量描述材料受损的连续性能变化。之后,J. Lemaitre^[19]用连续介质力学与热力学的观点研究了损伤对金属材料的弹性、塑性的影响。V. Lyakhovsky 等^[20, 21]通过能量和熵的基本平衡方程,针对孕震成核过程中的地质材料建立了损伤流变模型,并根据岩石声

发射实验数据标定了在一定应变率条件下的模型参数。余怀忠等^[22]在此损伤流变模型的基础上结合实验数据,从损伤力学的角度对加卸载响应比和能量加速释放(AMR)这两种重要前兆现象做了一些研究。

本文首先介绍 V. Lyakhovsky 等^[20, 21]提出的损伤流变模型,并结合笔者所在课题组 2003 年完成的岩石破坏声发射实验数据,分析了模型的特点。考虑到该模型存在的一些缺点,进而从 Helmholtz 自由能出发,推导了以应变为基本变量的一维损伤 - 愈合模型,通过讨论模型中特征函数的演化模式,提出了损伤 - 愈合的概念,同时用此模型对岩石破坏声发射实验结果进行了分析。最后取常数率线性载荷模拟构造应力,再叠加一个正弦扰动用来模拟潮汐应力,在这样的应力条件下考察介质的损伤演化过程以及该过程中加卸载响应比的演化情况。在破裂发生之前响应比出现明显异常、随即下降的现象。这些结果表明加卸载响应比作为地震的前兆现象,具有很好的预测能力。本文的这些计算结果从损伤力学角度给加卸载响应比理论提供了坚实的物理基础。另外,此模型能在一定程度上模拟材料的损伤 - 愈合过程。

2 V. Lyakhovsky 等提出的损伤流变模型

V. Lyakhovsky 等^[20]在 1997 年利用自有能与熵的基本平衡方程推导了损伤演化方程:

$$\frac{d\alpha}{dt} = -C \frac{\partial F}{\partial \alpha} \quad (1)$$

式中: α 为损伤变量; F 为自由能; C 为一个正常数,用来描述损伤过程的时间效应。

与 J 积分类似,式(1)中 $\partial F / \partial \alpha$ 可以看作是由于损伤增加而导致的能量释放。固体中的弹性势能可以定义为

$$U = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\lambda}{2} I_1^2 + \mu I_2 - \gamma I_1 \sqrt{I_2} \right) \quad (2)$$

式中: λ 和 μ 均为拉梅常数; I_1 , I_2 为应变张量 ε_{ij}

的两个独立不变量, $I_1 = \epsilon_{kk}$, $I_2 = \epsilon_{ij}\epsilon_{ij}$; γ 为模型中引入的一个参数, 用来考察损伤材料中微裂纹的开裂和闭合。以式(1), (2)为基础, 经过推导得到了如下的损伤 - 愈合模式:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} C_d I_2 (\xi - \xi_0) & (\xi \geq \xi_0) \\ C_1 \exp\left(\frac{\alpha}{C_2}\right) I_2 (\xi - \xi_0) & (\xi < \xi_0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_d , C_1 , C_2 均为与材料、变形条件有关的常数, 可以通过实验进行标定。这里引入了一个新的参数 $\xi = I_1 / \sqrt{I_2}$, ξ_0 表示材料介于损伤与愈合的中间状态, 可以通过下式确定:

$$\xi_0 = \frac{-\sqrt{3}}{\sqrt{2q^2(\lambda_e/\mu_e + 2/3)^2 + 1}} \quad (4)$$

式中: λ_e , μ_e 为弹性材料的拉梅常数; $q = \frac{\sin \varphi}{1 - \sin \varphi/3}$, φ 为内摩擦角, 花岗岩的内摩擦角一般取 $\varphi = 30^\circ$ ^[23]。根据固体力学中的关系^[24]:

$$\frac{\mu}{\lambda + \mu} = 1 - 2\nu \quad (5)$$

可以得到

$$\frac{\lambda_e}{\mu_e} = \frac{2\nu}{1 - 2\nu} \quad (6)$$

式中: ν 为材料的泊松比。当泊松比取 0.20, 0.25, 0.30 时 ξ_0 随内摩擦角 φ 取值变化见图 1。

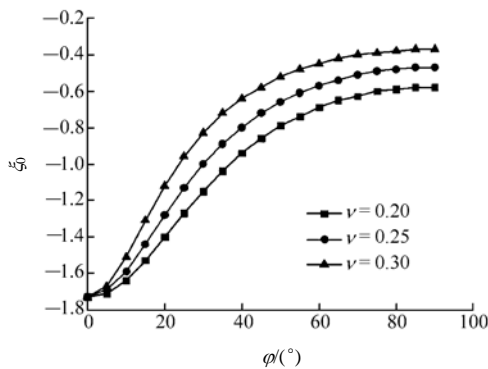


图 1 ξ_0 随内摩擦角 φ 取值变化
Fig.1 Variation of ξ_0 with internal friction angle φ

3 三维岩石实验

2003 年, 笔者所在课题组通过国际合作的方式进行了中尺度岩石破裂声发射实验^[25~28]。实验选用的花岗岩试样尺寸为 360 mm × 300 mm × 25 mm (长 ×

宽 × 高)。采用的加压设备为中国地震局地球物理研究所震源物理实验室的 MTS - 100 伺服实验机, 采用双向加载, 以实现三向应力状态。实验中采用俄罗斯科学院 Ioffe 物理技术研究所的 A - Line16D 声发射系统进行记录。实验中轴向压力有两部分, 用一个常加载率的线性载荷来模拟构造应力, 再叠加一个微小的正弦扰动应力来模拟固体潮应力。试样的尺寸、加载方式和声发射探头的分布见图 2。图中 P_2 为侧压 ($P_2 = 100$ kN), 在整个加载过程中保持不变; P_1 为轴压 ($P_1 = kt + A \sin(2\pi t/T)$), 其中扰动载荷的周期为 50 s, 振幅为 2 kN, 见图 3。

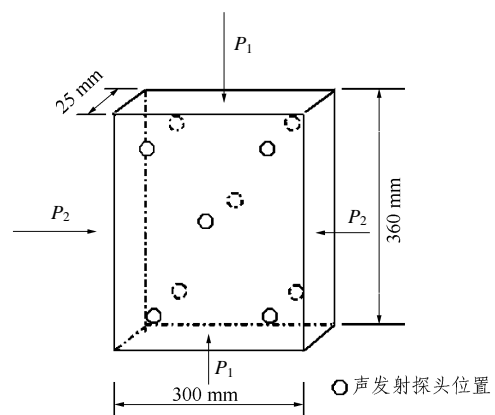


图 2 岩石试样的几何尺寸、声发射探头的分布以及载荷情况

Fig.2 Geometrical sizes of specimens, arrangement of AE sensors(circles) and loading conditions

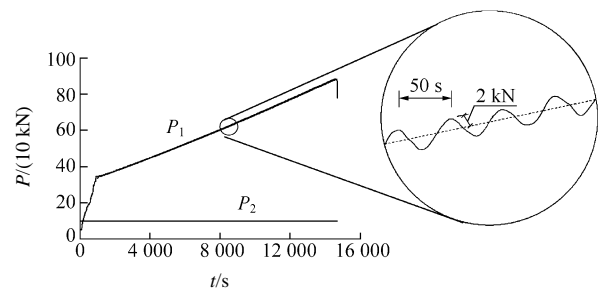


图 3 载荷 - 时间曲线
Fig.3 Curves of load versus time

在实验过程中, 试样处于三向应力状态, 且 $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$, 根据应力状态就可以得到应变水平。进一步就可以得到关于应变张量 ϵ_{ij} 的两个独立不变量 I_1 和 I_2 , 从而整个实验过程中 ξ 随时间的变化情况见图 4。该花岗岩试样的泊松比 $\nu = 0.30$, 内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$, 联合式(4), (6)可以得到 $\xi_0 = 0.724$, 见图 4。从图中可以看出有如下关系:

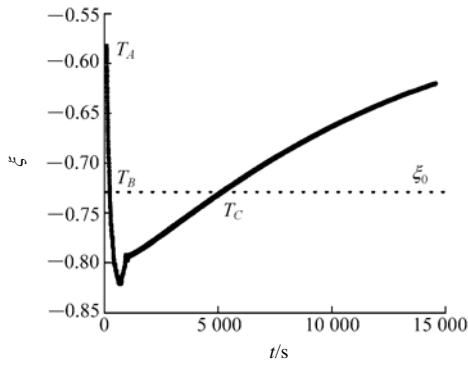


图 4 实验过程中 ξ 随时间的变化

Fig.4 Variation of ξ with time during experimental process

$$\left. \begin{aligned} \xi \geq \xi_0 & \quad (T_A \leq T < T_B) \\ \xi \leq \xi_0 & \quad (T_B \leq T < T_C) \\ \xi \geq \xi_0 & \quad (T_C \leq T) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

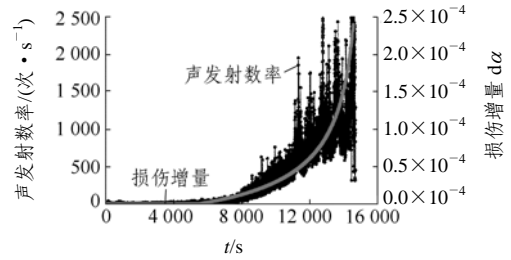
由此根据前面提到的损伤 - 愈合模式式(3), 在 $T_A \leq T < T_B$ 过程中损伤会增加; 在 $T_B \leq T < T_C$ 过程中损伤会减少, 也就是会出现愈合现象。但是在实验中, $T_A \leq T < T_C$ 过程并没有记录到声发射信号, 也就是在这个过程中试样的损伤既没有增加, 也没有减少。所以针对岩石实验, 不考虑愈合效应, 只考虑损伤的增加, 在 $T_A \leq T < T_C$ 过程中取 $\xi = \xi_0$, 即在此过程中损伤值不会发生改变, 只有当 $T > T_C$, 也即 $\xi \geq \xi_0$ 时损伤才会增加。

根据 V. Lyakhovsky 等提出的损伤愈合模式式(3), 考虑到实验过程的应变率数量级为 $10^{-7} \sim 10^{-6}$, 取 $C_d = 40 \text{ s}^{-1}$, 采用数值计算的方法得到了损伤增量($d\alpha$)与损伤变量(α)的演化曲线, 如图 5 所示。另外, 在图 5 中还给出了实验过程中声发射数率的时间序列。

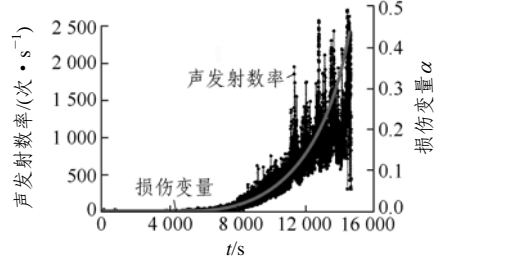
另外, 在前期工作中根据实验数据, 用声发射率的数密度定义了实验过程中试样的损伤程度^[29], 定义式如下:

$$\frac{\alpha(t)}{\alpha_F} = \frac{\int_0^t [E(t)]^m dt}{\int_0^T [E(t)]^m dt} \quad (8)$$

式中: $\alpha(t)$ 为 t 时刻岩石试样的损伤程度, α_F 为试样破坏时的损伤程度。当 $m=0$ 时, $[E(t)]^0$ 表示 t 时刻的声发射数率; 当 $m=1/2$ 时, $[E(t)]^{1/2}$ 表示 t 时刻的 Benioff 应变率; 当 $m=1$ 时, $[E(t)]^1$ 表示 t 时刻的声发射能量率。将由此定义的损伤演化曲线与模型中得到的结果进行比较, 见图 6。由图 6 可以看出, 模型中的损伤演化曲线与 $m=0, 1/2$ 时的损伤



(a) 声发射数率曲线和损伤增量演化曲线



(b) 声发射数率曲线和损伤变量演化曲线(V. Lyakhovsky 等^[20]模型)

图 5 声发射数率曲线与损伤增量和损伤变量的演化曲线

Fig.5 Curves of AE event rate vs. time and those of damage increment and damage variable

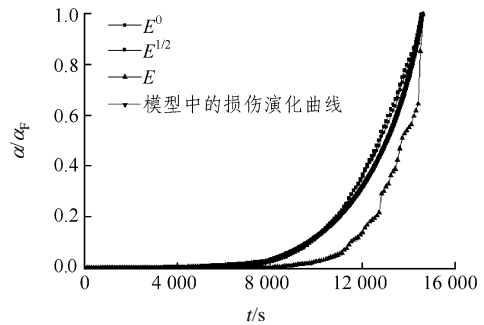


图 6 实验中的损伤演化曲线与模型中的损伤演化曲线的比较

Fig.6 Comparison between curves of damage evolution in experiment and those of model

演化曲线是非常一致的。

4 一维损伤 - 愈合模型

V. Lyakhovsky 等^[20]提出的损伤愈合模型以应变张量的两个独立不变量作为基本变量(见式(3)), 当材料处于单向应力状态的时候, $\xi \equiv 1$ (拉伸)或者 $\xi \equiv -1$ (压缩), 这就导致了材料处于单向拉伸时不论载荷多小, 损伤增量始终为正, 也即损伤都会增加; 而处于单向压缩时不论载荷多大, 损伤增量始终为负, 也即损伤都会减少, 也就是永远处在愈合状态。这样的结论显然是与实际情况不符合的, 由此有必要提出一个新的一维模型来弥补 Lyakhovsky 模型

的不足。

L. M. Kachanov^[18]定义弹性体的 Helmholtz 自由能只是应变和损伤变量的函数:

$$U = U(\varepsilon, \alpha) \quad (9)$$

对式(9)取全微分有

$$dU(\varepsilon, \alpha) = \frac{\partial U}{\partial \varepsilon} d\varepsilon + \frac{\partial U}{\partial \alpha} d\alpha \quad (10)$$

引入损伤本构有

$$\frac{\partial U}{\partial \varepsilon} = \sigma = E_0(1-\alpha)\varepsilon \quad (11)$$

对式(11)进行积分得

$$U(\varepsilon, \alpha) = \frac{1}{2} E_0(1-\alpha)\varepsilon^2 + G(\alpha) \quad (12)$$

由式(12)可得

$$\frac{\partial U}{\partial \alpha} = g(\alpha) - \frac{1}{2} E_0 \varepsilon^2 \quad (13)$$

式(13)中, $g(\alpha)$ 就是 $G(\alpha)$ 对 α 的导数。将式(13)代入式(1)得

$$\frac{d\alpha}{dt} = -C \left[g(\alpha) - \frac{1}{2} E_0 \varepsilon^2 \right] \quad (14)$$

即

$$d\alpha = -C \left[g(\alpha) - \frac{1}{2} E_0 \varepsilon^2 \right] dt \quad (15)$$

由式(15)可知, 如果确定了函数 $g(\alpha)$ 的形式, 根据加载方式就可以计算出损伤和应变的演化模式了。不妨把上面的 $g(\alpha)$ 函数称作此模型的特征函数, 下面来讨论这个函数对模型的影响。首先将 $g(\alpha)$ 在 $\alpha = 0$ 附近泰勒展开:

$$g(\alpha) = c_0 + c_1\alpha + c_2\alpha^2 + \dots \quad (16)$$

特征函数只取第一项 $g(\alpha) = c_0$, 如果取 $c_0 < 0$, 根据式(14)就恒有 $\frac{d\alpha}{dt} > 0$, 这就意味着, 不管载荷

情况如何损伤总是增加, 既不符合实际情况也不能考虑地质材料的可愈合效应。如果取 $c_0 = 0$, 就有

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{2} C E_0 \varepsilon^2 \geq 0, \text{ 也就只有当应变为 } 0 \text{ 的时候损伤}$$

才不会增加, 否则损伤就会一直增加。如果取 $c_0 > 0$,

$$\text{令 } c_0 = \frac{1}{2} E_0 \varepsilon_{cr}^2, \text{ 就有 } \frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{2} C E_0 (\varepsilon^2 - \varepsilon_{cr}^2), \varepsilon_{cr} \text{ 为}$$

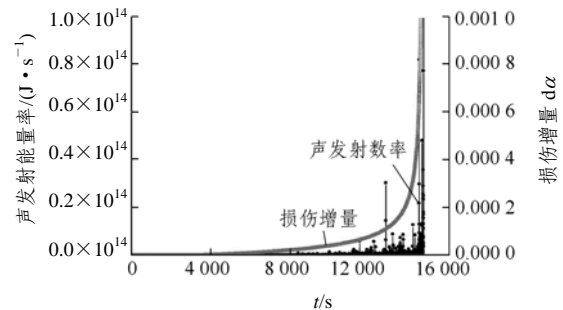
临界应变。当应变小于临界应变时, 损伤就会减少, 这意味着材料将愈合; 当应变大于临界应变时, 损伤就会增加。当 $c_0 > 0$ 时, 模型存在一个愈合区间,

这样就有可能模拟地质材料的愈合效应。

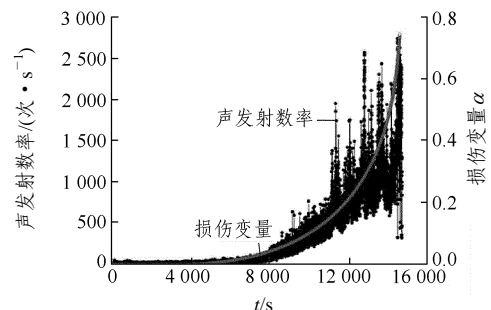
考虑到愈合与损伤程度存在着一定的关系, 而且愈合的速度要比损伤的速度慢很多, 且仿照 V. Lyakhovsky 等^[20, 21]提出的损伤 - 愈合模型, 得出了如下的损伤 - 愈合模式:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} C_3 E_0 (\varepsilon^2 - \varepsilon_{cr}^2) & (\varepsilon^2 \geq \varepsilon_{cr}^2) \\ C_4 \exp\left(\frac{\alpha}{C_5}\right) E_0 (\varepsilon^2 - \varepsilon_{cr}^2) & (\varepsilon^2 < \varepsilon_{cr}^2) \end{cases} \quad (17)$$

根据建立的模型, 结合上面的岩石实验, 同样暂不考虑愈合效应, 取 $C_3 = 1.55 \times 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, $\varepsilon_{cr} = 2.1 \times 10^{-3}$, 采用数值计算的方法得到了损伤增量 ($d\alpha$) 与损伤变量 (α) 的演化曲线, 见图 7, 图 7 还给出了实验中声发射数率与能量率的时间序列。



(a) 声发射能量率与损伤增量的演化曲线



(b) 声发射数率与损伤变量的演化曲线(本文模型)

图 7 声发射能量率和损伤增量的演化曲线和声发射数率与损伤变量的演化曲线

Fig.7 Curves of AE energy rate and damage increment and those of AE event rate and damage variable

5 愈合的初步探索

V. Lyakhovsky 等^[20, 21]提出的愈合模型不适用于简单加载情况, 对于复杂加载的情况实现起来又很困难。本文最后将用新提出的模型对愈合现象进行一些初步的探索。根据式(17), 取不同的载荷方式进行数值计算。采用真实应力加载, 线性增加且叠加一个微小正弦扰动: $\sigma(t_i) = kt_i + A \sin(\omega t_i)$, 其

中 k 为线性部分的加载速率, A 为扰动部分载荷的振幅, ω 为扰动频率, 线性部分用来模拟构造应力, 扰动部分用来模拟固体潮应力。如图 8 所示, 加载过程分两段, 两段的 k 值不同。假设在地震发生后产生一个应力降, 并开始第二段加载。

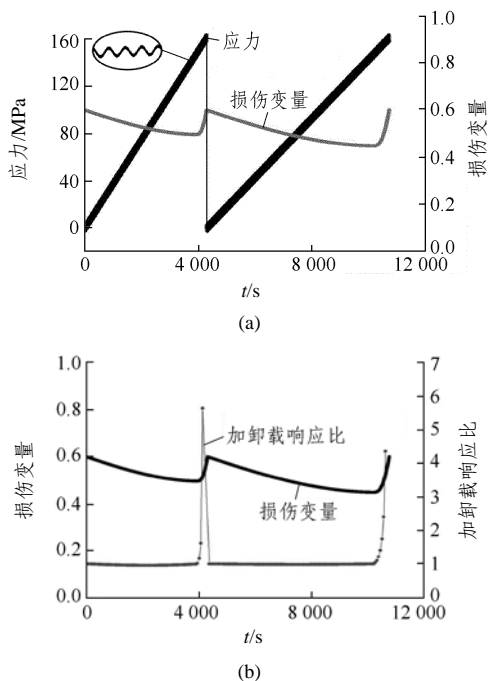


图 8 加载曲线、损伤演化曲线和加卸载响应比演化曲线
Fig.8 Loading curve and evolutionary curves of damage and LURR

在演化过程中计算加卸载响应比值, 加卸载响应比 Y 的定义^[11, 30]为

$$Y = \frac{X_+}{X_-} = \frac{\Delta \varepsilon_+ / \Delta \sigma_+}{\Delta \varepsilon_- / \Delta \sigma_-} = \frac{E_-}{E_+} \quad (18)$$

式中: E_- 为卸载阶段的切线模量, E_+ 为加载阶段的切线模量。另外用损伤与应变作为基本变量, 加卸载响应比可以按下式^[29]计算:

$$Y = \frac{1}{1 - \frac{\varepsilon}{1 - D} \left(\frac{dD}{d\varepsilon} \right)_+} \quad (19)$$

加载曲线、损伤演化曲线、加卸载响应比的演化曲线见图 8。可以看出在整个加载过程中加卸载响应比开始出现异常, 然后升到最大值、回落, 在这个过程中展示了加卸载响应比作为灾变前兆的可靠性。

在图 8 中还可以看出, 在加载的初期由于载荷比较小, 损伤出现一个负增长、也即愈合的过程。而且从图中可以看出愈合的时间尺度比损伤的时间尺度大至少一个量级, 这与地震孕育的时间尺度是吻合的。所以此模型能在一定程度上模拟地壳介质的

损伤 - 愈合过程。

6 讨论与结论

地质材料的损伤愈合是一个很复杂的自然现象。虽然众多科学家已经对固体介质破坏现象的机制和规律进行了长期的研究, 但是一些基本的问题仍然没有解决。对于愈合, 科学家们对其进行的研究还很少。本文就是介绍以对损伤 - 愈合进行初步探索为目的展开的工作。

首先介绍了 V. Lyakhovsky 等^[20, 21]建立的损伤愈合模型, 然后结合笔者所在课题组 2003 年完成的岩石破坏声发射实验数据对模型的特点进行了分析。在分析过程中发现该模型对处理一维问题具有较大的缺陷, 由此在已有的损伤演化方程的基础上, 从弹性体的 Helmholtz 自由能出发, 建立了脆性损伤模型, 并用岩石破坏声发射实验数据对新模型的参数进行了标定, 此模型能定量地模拟实验过程的损伤演化情况。另外为了对愈合进行一些探索, 选定特征函数以后, 在特定的加载条件下, 计算得到了损伤愈合的演化曲线, 并计算了演化过程中加卸载响应比值的变化, 结果表明, 在材料发生破坏之前, 加卸载响应比都会出现明显的异常、再回落的现象。这再次验证了加卸载响应比作为一种重要的前兆现象, 能够定量地刻画震源区介质的损伤演化过程, 这也为加卸载响应比方法提供了更为坚实的物理基础。

本文还只是建立一个初步的模型, 在以后的工作中, 要进一步探索特征函数的意义和选取, 对特征函数泰勒展开的高阶项进行讨论。另外, 将建立的一维损伤愈合模式赋值给链网模型中“链”的性质, 通过链网数模软件来模拟二维、三维地质材料的损伤 - 愈合过程。

参考文献(References):

- [1] 尹祥础. 地震预报的新途径——加卸载响应比理论[J]. 力学与实践, 2004, 26(6): 1 - 7.(YIN Xiangchu. A new approach to earthquake prediction—load/unload response ratio(LURR) theory[J]. Mechanics and Engineering, 2004, 26(6): 1 - 7.(in Chinese))
- [2] WILLIS B. Earthquake risk in California 8 earthquake districts[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1924, 14: 9 - 25.
- [3] TOCHER D. Seismic history of the San Francisco bay region[J]. Calif. Div. Mines Spec. Rep., 1959, 57: 39 - 48.
- [4] 黄德瑜, 冯浩. 强震前大范围地震活动性参数的时空扫描[J]. 地震学报, 1981, 3(3): 283 - 291.(HUANG Deyu, FENG Hao. Large

- area seismicity tracing prior to great earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1981, 3(3): 283 - 291.(in Chinese))
- [5] 张国民, 傅征祥. 华北强震的时间分布及物理解释[J]. *地球物理学报*, 1985, 28(6): 569 - 578.(ZHANG Guomin, FU Zhenxiang. Time distribution of North Chinese earthquakes and its physical explain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1985, 28(6): 569 - 578.(in Chinese))
- [6] 张国民. 我国大陆强震活动的韵律性特征[J]. *地震地质*, 1987, 9(2): 189 - 195.(ZHANG Guomin. Rhythmic characteristics of high seismic activity in China mainland[J]. *Seismology and Geology*, 1987, 9(2): 189 - 195.(in Chinese))
- [7] 李世愚, 尹祥础, 李红, 等. 闭合裂纹面相互作用过程中的多点破裂现象及其分析[J]. *地球物理学报*, 1989, 32(增1): 174 - 182.(LI Shiyu, YIN Xiangchu, LI Hong, et al. Multiple fracture in the interaction between the flanks of closed crack[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1989, 32(Supp.1): 174 - 182.(in Chinese))
- [8] 梅世蓉. 中国的地震活动性[J]. *地球物理学报*, 1960, 9(1): 1 - 18.(MEI Shirong. The seismicity of China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1960, 9(1): 1 - 18.(in Chinese))
- [9] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(6): 767 - 775.(YIN Xiangchu, CHEN Xuezhong, SONG Zhiping, et al. The load-unload response ratio theory: a new approach to earthquake prediction[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1994, 37(6): 767 - 775.(in Chinese))
- [10] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统失稳的前兆与地震预报——响应比理论及其应用[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))
- [11] 宋治平, 尹祥础, 王裕谷, 等. 美国加州地区地震前加卸载响应比的时空演化特征及预测意义[J]. *地震学报*, 2000, 22(6): 588 - 595.(SONG Zhiping, YIN Xiangchu, WANG Yucang, et al. The tempo-spatial evolution characteristics of the load/unload response ratio before strong earthquakes in California of America and its predicting implications[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, 22(6): 588 - 595.(in Chinese))
- [12] VERE-JONES D. Statistical theory of crack propagation[J]. *Math. Geol.*, 1977, 9: 455 - 481.
- [13] SORNETTE A, SORNETTE D. Earthquake rupture as a critical point: consequences for telluric precursor[J]. *Tectonophysics*, 1990, 179: 327 - 334.
- [14] BOWMAN D D, OUILLOIN G, SAMMIS C G, et al. An observation test of the critical earthquake concept[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B24): 359 - 372.
- [15] YIN X C, MORA P, PENG K Y, et al. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159(10): 2 511 - 2 523.
- [16] 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]. *Pure and Applied Geophysics*, 1995, 145(3/4): 701 - 715.
- [17] YIN X C, WANG Y C, PENG K Y, et al. Development of a new approach to earthquake prediction: load/unload response ratio(LURR) theory[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2000, 157(11/12): 2 365 - 2 383.
- [18] KACHANOV L M. Introduction to continuum damage mechanics[M]. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 1986.
- [19] LEMAITRE J. A course on damage mechanics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [20] LYAKHOVSKY V, BEN-ZION Y, AGNON A. Distributed damage, faulting, and friction[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B12): 27 635 - 27 649.
- [21] LYAKHOVSKY V, RECHES Z, WEINBERGER R, et al. Nonlinear elastic behavior of damaged rocks[J]. *Geophysical Journal International*, 1997, 130(1): 157 - 166.
- [22] 余怀忠, 尹祥础, 梁乃刚. 利用损伤力学模型研究地震前兆现象[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(2): 404 - 413.(YU Huaizhong, YIN Xiangchu, LIANG Naigang. Using damage rheology model to research the precursor of earthquakes[J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(2): 404 - 413.(in Chinese))
- [23] BYERLEE J D. Frictional characteristics of granite under high confining pressure[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1967, 72(B14): 3 639 - 3 648.
- [24] 尹祥础. 固体力学[M]. 北京: 地震出版社, 1985.(YIN Xiangchu. Solid mechanics[M]. Beijing: Earthquake Press, 1985.(in Chinese))
- [25] ZHANG H H, YIN X C, LIANG N G, et al. Acoustic emission experiments of rock failure under load simulating the hypocenter condition[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11/12): 2 389 - 2 406.
- [26] YIN X C, ZHANG L P, ZHANG H H, et al. LURR's twenty years and its perspective[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11/12): 2 317 - 2 341.
- [27] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚, 等. 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): 3 172 - 3 179.(ZHANG Huihui, YIN Xiangchu, LIANG Naigang, et al. Experimental study on 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): 3 172 - 3 179.(in Chinese))
- [28] 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[博士学位论文][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)[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 2006.(in Chinese))
- [29] 张浪平, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比与损伤变量关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(9): 1 874 - 1 881.(ZHANG Langping, YIN Xiangchu, LIANG Naigang. Study on relation between load/unload response ratio and damage variable[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(9): 1 874 - 1 881.(in Chinese))
- [30] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. *中国地震*, 1987, 3(1): 3 - 10.(YIN Xiangchu. The new approach of earthquake prediction[J]. *Earthquake Research in China*, 1987, 3(1): 3 - 10.(in Chinese))