

[文章编号] 1004-0609(2002)04-0802-06

模拟岩石声发射及混沌性的 PCA 模型^①

谭云亮¹, 周 辉², 王泳嘉³, 马志涛¹

(1. 山东科技大学 力学与工程科学系, 泰安 271019; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 武汉 430071;

3. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004)

[摘 要] 根据岩石的细观非均质特征, 从基本的能量传递规则出发, 建立了一种新的物理元胞自动机 PCA 理论, 它能够对岩石等细观非均质材料破坏演化过程中的声发射及混沌性进行有效模拟。经对较均质的粗面岩与较不均质的花岗岩 AE 混沌性模拟结果表明, 其最大 Lyapounov 指数分别为 0.45 和 0.623, 即非均质性越强, 混沌性就越强, 对其岩石破坏力学行为的预测就越困难。模拟得到的声发射曲线与 Mogi. K 的实验结果基本吻合。PCA 模型突破了传统元胞自动机模型仅限于数学意义上的运算规则, 发展成为一种研究岩石破坏演化过程中声发射规律及非线性特征物理力学方法。

[关键词] 声发射; 混沌; 物理元胞自动机

[中图分类号] O 424

[文献标识码] A

作为一种天然的地质材料, 不同的岩石在细观结构上呈现出不同程度的非均质性。岩石在受力后, 在弱单元处将不断产生损伤破坏, 释放出能量, 产生微震脉冲, 即声发射 (Acoustic Emission, 简称为 AE)。近些年来, 在 AE 与岩石破坏之间的关系研究, 已经取得了不少成果, 如刘桂英^[1]研究了 4 类不同岩性试块的 AE 差异性; 张流^[2]等研究了岩石在高围压条件下的破坏及滑动过程 AE 特征; 茂木清夫^[3]研究了岩石将呈现主震-后震、前震-主震-后震和群震 3 种岩石破坏 AE 类型; 唐春安^[4]则研究了 AE 与岩石损伤本构之间的关系等。然而, 上述研究成果大部分是在实验室研究得到的, 如何用计算机模拟的方法来有效研究岩石破坏过程中的 AE 特征是一个新的课题。

元胞自动机 (Cellular Automata, CA) 最早由 Von Neumann^[5]提出, 是一种在随机初始条件下, 通过构造简单的数学规则, 来描述离散动力系统内部单元之间因强烈的非线性作用而导致系统自演化过程的一种数学模型。近几年来, 该方法在地震领域得到了广泛应用^[6~8]。然而, 迄今为止, 元胞自动机模型大都是基于最简单的弹簧-滑块模型而建立的, 不能对实际材料介质的不均质性而导致的材料破坏演化过程中不同的 AE 规律进行有效模拟^[9]。为此, 本文作者在前人研究的基础上, 从岩石材料的细观结构及其损伤演化出发, 初步建立了

一种能够模拟岩石破坏演化过程中 AE 规律及混沌性的物理元胞自动机模型 (Physical cellular automaton), 简称为 PCA。

1 PCA 的基本原理

根据岩石材料的细观结构 (如图 1(a) 所示), 可将研究域等效划分为 $N \times N$ 的方块 (如图 1(b) 所示), 每个方块定义一个元胞。又根据岩石细观结构自相似特征, 一定量的元胞单元可以有效模拟岩石等材料的细观结构。

研究表明, 岩石材料在外载作用下, 各细观颗粒由于弹模、强度等的不同, 其变形及储存的变形能也不同。对某一颗粒而言, 当外界供给的能量超过其允许储存的极限能量或外载超过其强度时, 该颗粒将发生破坏。根据这一情形, 在 PCA 中, 对于处在 (x_i, y_i) 位置的元胞, 若 t 时刻所储存的能量或应力等物理量用广义能量 $WE(x_i, y_i, t)$ 来表示, 该元胞在 t 时刻允许存储的极限能量或极限强度等用广义极限能量 $WE_{TH}(x_i, y_i, t)$ 表示, 当 $WE(x_i, y_i, t)$ 大于 $WE_{TH}(x_i, y_i, t)$ 时, 则认为该元胞破坏, 用 PCA 的模拟规则如下:

1) 首先, 按一定的概率分布设置初始状态元胞的广义极限能量 $WE_{TH}(x_i, y_i, 0)$ 以体现岩石细观材料的非均质性。用局部能量吸引域, 来代表岩

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (59804005); 山东省自然科学基金资助项目 (Y2000F06); 教育部骨干教师专项基金联合资助
[收稿日期] 2001-09-26; [修订日期] 2001-11-26 [作者简介] 谭云亮 (1964-), 男, 教授, 博士。

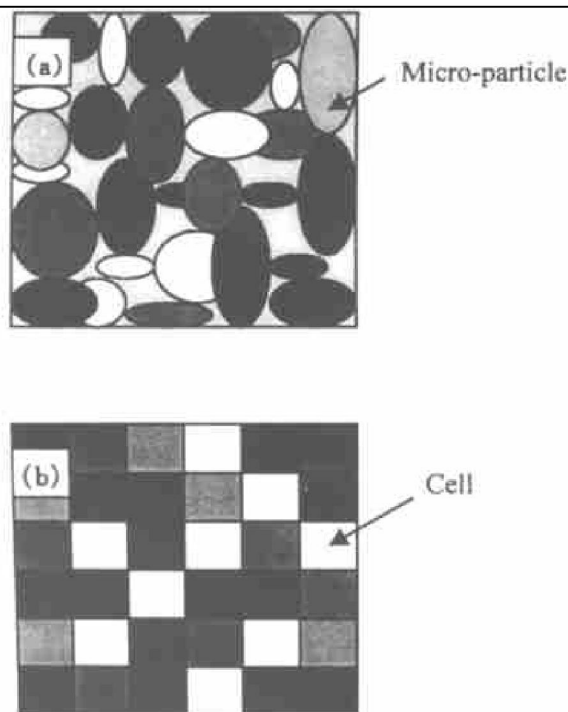


图 1 元胞网格等效划分

Fig. 1 Equivalent cellular mesh

(a) —Micro-heterogeneous particles of rock;

(b) —Cellular mesh

石内部弱化区域; 按一定方式每时步向系统输入广义能量代表系统的加载, 用 $C(t)$ 来表示; 细观材料单元破坏后, 以声波、热能和新生裂纹等消耗的那部分能量用能量耗散系数 $NH(t)$ 来表征。因而, PCA 可以用来模拟耗散的开放系统。

2) 在每个时步内随机选择元胞 (x_i, y_i) , 按一定规则将能量输入给该元胞。

3) 检查系统内, 若某个元胞的能量 $WE(x_i, y_i, t)$ 满足条件

$$WE(x_i, y_i, t) \geq WE_{TH}(x_i, y_i, t) \quad (1)$$

则认为该元胞达到了破坏极限; 同时, 按照相应的传递规则将其能量传递给相邻的元胞。此时, 把破裂元胞 (x_i, y_i) 的能量置为 0, 即 $WE(x_i, y_i, t) = 0$ 。当研究域内所有元胞的能量均小于广义极限能量值时, 即认为系统完成了一步破坏演化。

4) 按上述规则, 即可得到一个随时步变化的元胞破裂能量序列。由于材料的破裂过程与声发射有着对应关系^[1], 是系统释放能量的体现, 因而可以将元胞破裂的能量序列当量于材料破裂过程的声发射序列。

2 岩石材料性质的 PCA 表达

2.1 非均质性

如前所述, 岩石内部各细观单元体的强度、弹

模等是不同的, 呈现出非均质性, 这一性质被一些学者认为是岩石等材料受力破坏的根本原因^[4]。对于非均质性, 在物理元胞自动机中, 通过在初始时刻, 给每个元胞赋予不同的广义极限能量(可在 1, 2, 3, 4 中按概率取值), 非均质的程度可由广义极限能量为 $i(i=1\sim 4)$ 的元胞数占总数的比例 $P(i)$ 来表达, 其中 $P(i)$ 满足 $\sum_{i=1}^4 P(i) = 1$ 。

2.2 岩石内弱化区的模拟

试验和理论研究均已表明, 岩石等材料损伤首先始于弱化区, 因此, 弱化区的表达尤为重要。PCA 模型采用如图 2 所示的处理方法, 黑色元胞为裂纹或弱化区穿过处, 设置该区域所贯通元胞的广义极限能量为 $WE_{TH}(x_i, y_i, 0) = 0$; 同时, 在弱化区的两侧一定范围内设置能量吸引域(如图 2 中“×”所示)。将吸引域内的元胞广义极限能量 $WE_{TH}(x_i, y_i, 0)((x_i, y_j) \in \text{能量吸引域})$ 设置为 0 或 1, 域内元胞能量小于或等于吸引范围周围的元胞广义极限能量, 即体现弱化区域内及其附近处岩石单元易先破坏的特点。

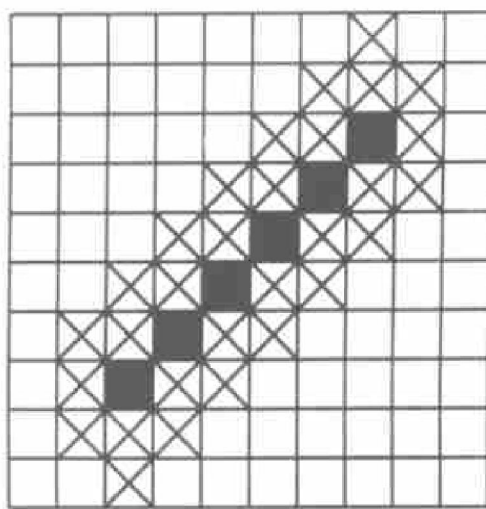


图 2 裂纹吸引域示意图

Fig. 2 Crack attracting zone

2.3 细观损伤的 PCA 表达

由于岩石材料的损伤破坏演化是一个渐进的动态过程, 为此, 将每个元胞(Cell)进一步划分为 4 个子元胞(Subcell)。每个元胞内各子元胞的渐进破坏体现着该元胞渐进损伤破坏过程, 如图 3 所示。

在损伤力学中, 损伤变量 D 定义为

$$D = \frac{S_0 - S^*}{S_0} \quad (2)$$

式中 S_0 为未损伤的总面积, S^* 为损伤后有效承载面积。

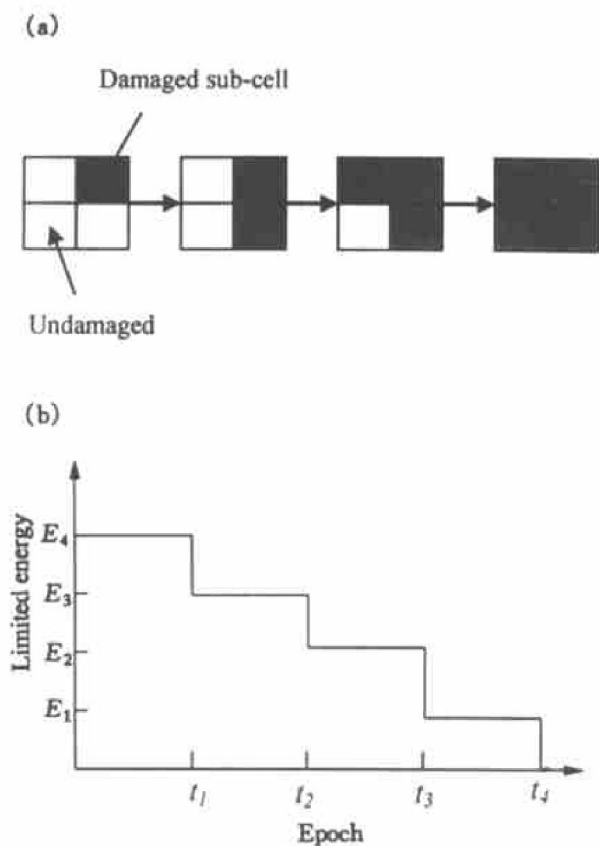


图3 元胞损伤演化过程

Fig. 3 Damage evolvement process of cell

(a) —Failure process of subcell; (b) —Energy variation of cell

据此, 可在 PCA 中定义 t 时刻系统损伤变量 $D(t)$ 为破坏子元胞 (Subcell) 的面积与所有元胞面积之比:

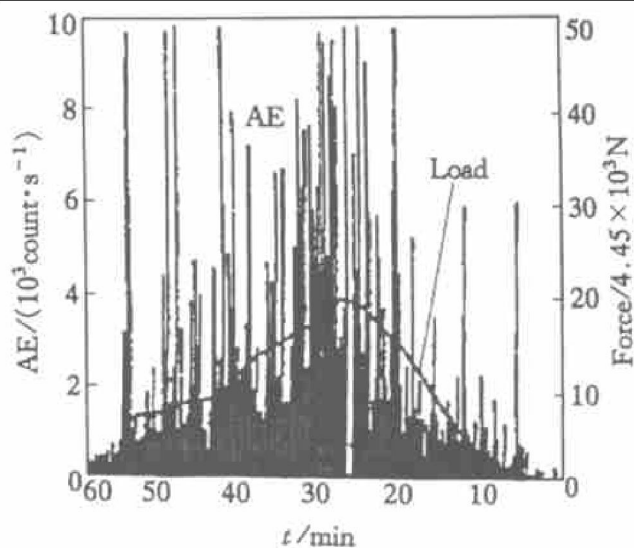
$$D(t) = 1 - \frac{\sum_{(x_i, y_i) \in \text{元胞矩阵}} S_j(x_i, y_i, t) - n(t) S^*}{\sum S} \quad (3)$$

式中 $S_j(x_i, y_i, t)$ 为第 j 个子元胞初始状态有效面积, $n(t)$ 为 t 时刻破坏子元胞的个数, S^* 为破坏子元胞的面积, $\sum S$ 为所有元胞面积之和。

3 典型岩石材料破坏过程中 AE 特征 PCA 模拟分析

3.1 煤岩力—变形—AE 关系曲线

根据文献[4]中煤块声发射试验条件(如图4所示), 用 PCA 对全应力—应变条件下煤的声发射特征进行了模拟。考虑到煤属于不均质介质, 将模型均质度设置为: $P(1) = 0.1$, $P(2) = 0.2$, $P(3) = 0.3$, $P(4) = 0.4$ 。根据图4所示的应力变化曲线, 对模拟过程中的加载方式, 即随时间向煤块系统输入能量或施加载荷的方式设置为:

图4 煤块典型力学 AE 试验结果^[5]Fig. 4 AE test for coal in laboratory^[4]

1) 0~200 时步 $C(t) = 1 + 0.02t$ (t 为时步);

2) 201~400 时步 $C(t) = 6 - 0.01t$;

3) 401~440 时步 $C(t) = 1$ 。

元胞矩阵的规模为 150×150 , 模拟得到煤块的声发射率序列如图5所示。从图4, 图5可以看出 PCA 模拟得到的煤块声发射率曲线的演化规律与文献[4]试验结果非常吻合, 所不同的只是声发射率的量值大小有所差异。

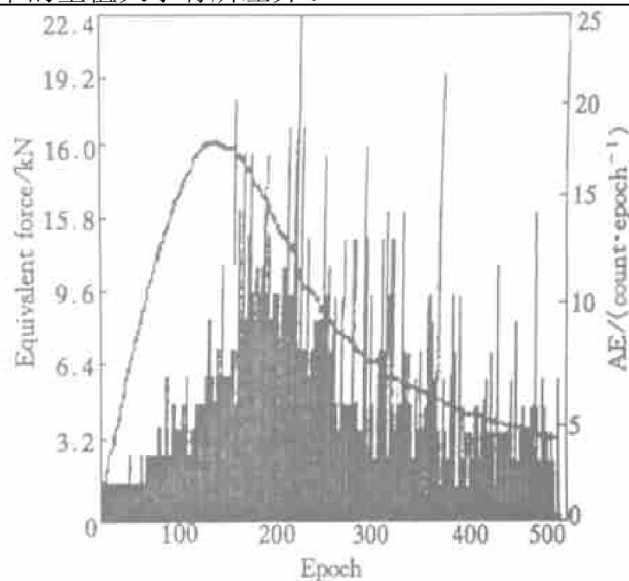


图5 煤块破坏 AE 特征 PCA 模拟结果

Fig. 5 AE simulation of coal by PCA

3.2 非均质性与岩石的 AE 特征

由于 PCA 是用各元胞初始广义极限能量的差异来等效体现材料的细观层次的非均质性的。若设置 1, 2, 3, 4 为 4 种元胞广义极限能量值, 很显然, 含有 4 种广义极限能量值的元胞系统的非均质性,

将大于系统仅含有 3 种、2 种或 1 种广义极限能量值的元胞系统的非均质性。在含有广义极限能量值数目既定的元胞系统中, 含各广义极限能量值的元胞数比例差别越小, 则越不均匀。例如, 含有 4 种广义极限能量值的元胞系统中 $P(1) = P(2) = P(3) = P(4) = 25\%$ 的非均质性, 将大于 $P(1) = P(2) = 10\%$, $P(3) = P(4) = 40\%$ 的非均质性。按照文献[3]的实验条件和图 6 所示的 3 种不同均质程度的岩石材料, 经分析, PCA 所模拟的非均质性比例为:

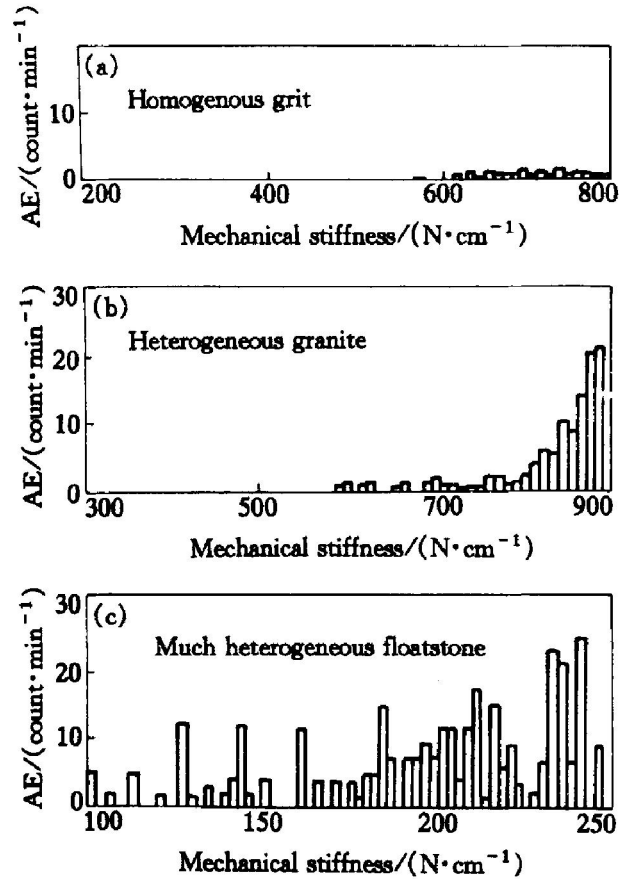


图 6 不同均质度岩石 AE 实验结果^[3]

Fig. 6 Test AE results of different homogenous rock^[3]

- 1) 较均匀型 各元胞的能量 1, 2, 3, 4 的比例为 0, 0, 80%, 20%;
- 2) 较不均匀型 各元胞的能量 1, 2, 3, 4 的比例为 0, 15%, 65%, 20%;
- 3) 极不均匀型 各元胞的能量 1, 2, 3, 4 的比例为 20%, 30%, 30%, 20%。

根据上述 PCA 模拟准则, 得到的元胞系统破裂声发射率序列, 如图 7 所示。从图 7 可以看出, 岩石材料越不均匀, 在岩石破坏过程中 AE 就越明显, 而且无论在变化趋势上, 还是在量值大小上, 都与文献[3]的试验结果(图 6)相似, 这说明用 PCA 模型可对岩石等非均质材料的受力破坏演化

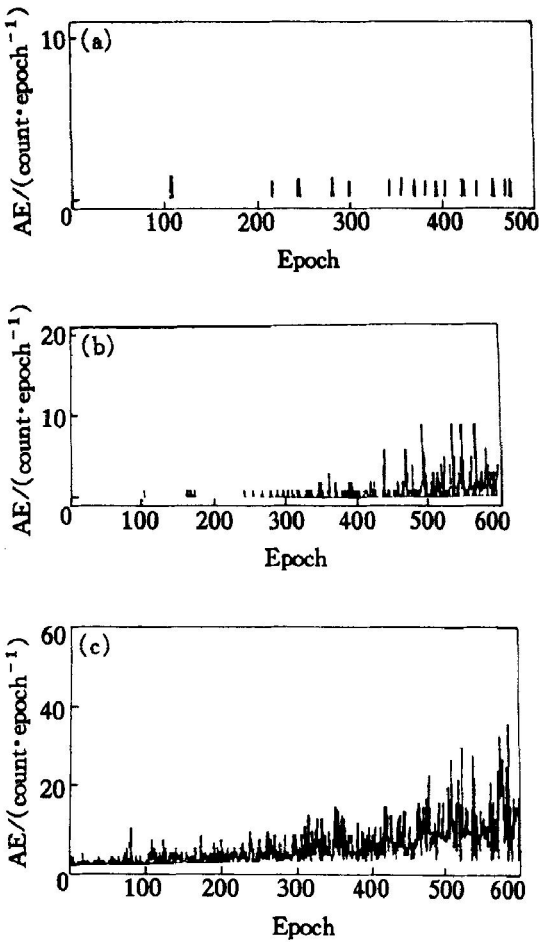


图 7 PCA 对不同均质度岩石 AE 的模拟结果

Fig. 7 AE simulations for different homogenous rock by PCA

- (a) —Homogeneous rock; (b) —Heterogeneous rock;
- (c) —Much heterogeneous rock

过程中的 AE 特征进行有效的模拟。

4 岩石破坏过程中 AE 混沌性

4.1 岩石均质性与混沌性关系

为了考察不同均质性对岩石破坏过程中 AE 混沌性的影响, 构造两种不同的岩石材料:

Model A (均质) $P_A(1) = 0, P_A(2) = 0, P_A(3) = 1, P_A(4) = 0;$

Model B(不均质) $P_B(1) = 0.15, P_B(2) = 0.25, P_B(3) = 0.4, P_B(4) = 0.1。$

两个模型均划分为 50×50 元胞, 加载方式为按 $C(t) = 2 + 0.01t$ 式向系统输入能量, 分别运行 300 时步, 用 PCA 模拟得到的声发射序列如图 8 所示, 可以看出岩石越不均匀, 破坏过程中声发射 AE 混沌性越强, 其中, 计算 Lyapunov 指数最大值分别为 $LE_1(A) = 0.45, LE_1(B) = 0.623$ 。因此, 不均质岩石比均质岩石破坏演化过程预测的难度更

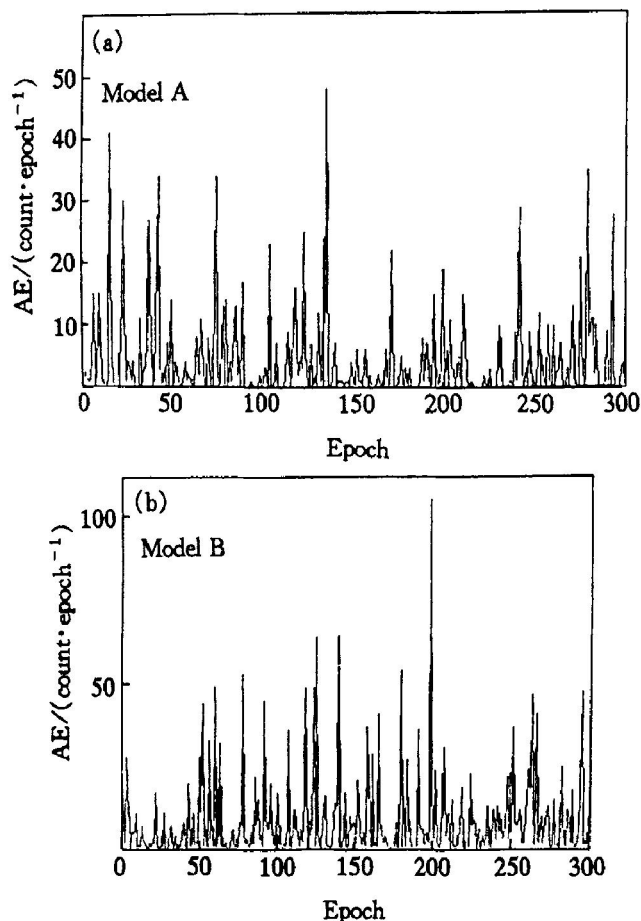


图 8 两种不同均质度岩石的 AE 模拟结果

Fig. 8 AE simulations for two different homogenous rock

大。

4.2 含有主裂纹岩石破坏的混沌性

对不均质岩石 Model B 中, 设置一条裂纹如图 9 (a) 所示, 加载方式和模拟时步同上。当模拟达到 300 时步时, 在裂纹尖端损伤演化区呈现出泡状或鹅卵石形, 如图 9(b) 所示, 与文献[10]的理论研究结果基本吻合。

在裂纹尖端破裂演化过程中, AE 能量序列如图 10 所示, 最大 Lyapunov 指数为 0.0194。从图中可以看出, 由于主裂纹的存在, 岩石破坏主要集中在裂纹尖端处, 裂纹起到了吸引域的作用, 这样使得岩石的破坏演化有序性增强, 无序性减弱, 混沌程度降低, 可预测性增强, 这也正是含有明显结构面岩体失稳更易预报的原因。同时, 这对岩石力学工程混沌控制具有重要意义。

5 结论

根据岩石等材料细观非均质特性, 从基本的能量传递定律出发, 初步建立了物理元胞自动机 PCA

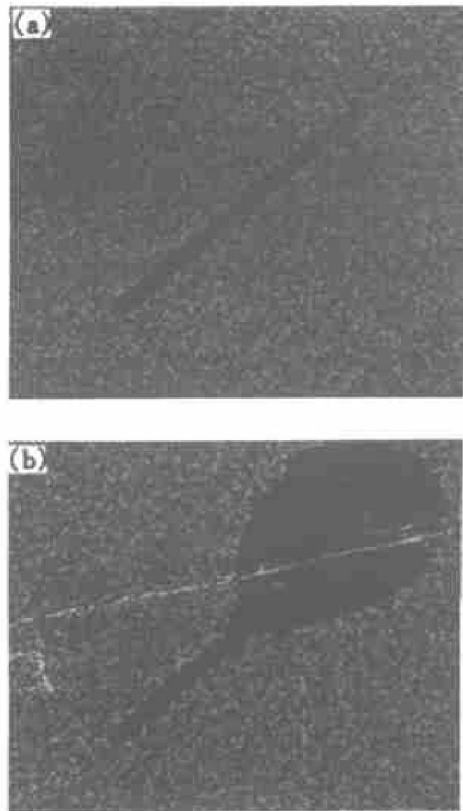


图 9 裂纹尖端损伤区模拟结果

Fig. 9 Simulation of damaged zone of crack tip
(a) —Initial state; (b) —Evolved state

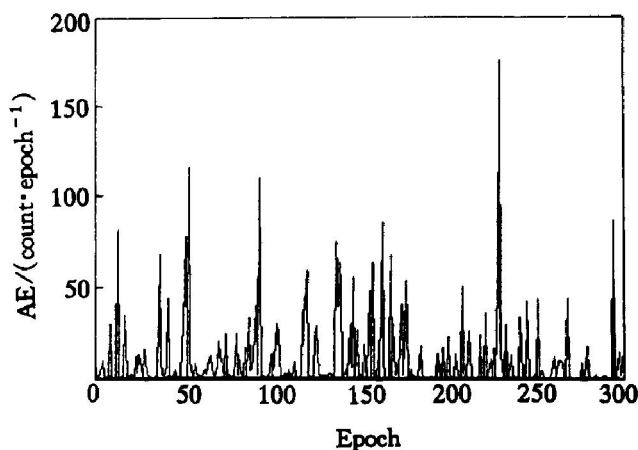


图 10 含裂纹岩石破坏 AE 曲线

Fig. 10 AE simulations of rock containing a crack

理论, 对岩石破坏过程中的 AE 特征、裂纹弱面等损伤破坏演化等进行有效数值模拟, 与实验结果吻合较好。用 PCA 模拟结果表明, 岩石越不均匀, 呈现的混沌性就越强; 较大尺度弱面的存在, 将有利于降低系统的混沌性, 向着有序化转化, 这对岩石力学系统混沌性的控制具有重要意义。

[REFERENCES]

- [1] 刘桂英. 岩石破坏的声发射研究 [J]. 岩石力学, 1983, 5(6): 25- 31.

- LIU Gu-ying. Acoustic emission study for rock failure [J]. Chin J Rock Mech, 1983, 5(6): 25–31.
- [2] 张 流, 薛丽霞, 施良旗. 高围岩下岩石破坏下的摩擦滑动过程中的声发射活动性 [J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9(1): 38–47.
- ZHANG Liu, XUE Li-xia, SHI Liang-qi. Acoustic emission response of rock during fracture and friction at high confining pressure [J]. Chin J Rock Mech Eng, 1990, 9(1): 38–47.
- [3] Mogi K. Earthquake Prediction [M]. Tokyo: Academic Press, 1985. 134–137.
- [4] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1988. 19–20.
- TANG Chun-an. Catastrophe in Rock Unstable Failure [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1988. 19–20.
- [5] Von Neumann J. Theory of Self-Reproducing Automata [M]. Illinois: University of Illinois Press, 1996. 157.
- [6] Stephen Wolfram. Statistical mechanics of cellular automata [J]. Journal of Statistical Physics, 1986, 33(4): 27–29.
- [7] Ben-Zen Y, Rice. Earthquake failure sequences along a cellular fault zone in a three-dimensional elastic solid containing asperity and non-asperity regions [J]. J Geophys Res, 1993, 98(10): 14109.
- [8] 谭云亮, 周 辉, 王泳嘉. 模拟细观非均质材料破坏演化的物理元胞自动机理论 [J]. 物理学报, 2001, 50(4): 704–710.
- TAN Yun-liang, ZHOU Hui, WANG Yong-jia. Physical cellular automaton theory for simulating the failure process of micro-heterogeneous material [J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(4): 704–710.
- [9] Bui H D. The steady state propagation at the crack tip in a brittle damaged material [J]. Eng Fract Mech, 1996, 53(1): 169–175.

PCA model for simulating AE and chaos in rock failure process

TAN Yun-liang¹, ZHOU Hui², WANG Yong-jia³, MA Zhi-tao¹

(1. Engineering Mechanics Department, Shandong University of Science and Technology,
Taian 271019, China;

2. Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China;

3. College of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

[Abstract] Based on the physical and mechanical characters of micro-heterogeneous material as rock, a new theory of physical cellular automaton (PCA) which can simulate acoustic emission and chaos in the failure evolving process of micro-heterogeneous rock is set up, according to the energy transfer law. With simulating for homogeneous grit and heterogeneous granite by PCA, the Lyapunov exponents are 0.45 and 0.623. Therefore, the larger heterogeneity of rock, the stronger chaotic of mechanical behavior, this leads to much more difficult to predict the rock failure evolving process. The AE simulating results by PCA accord with the Mogi's laboratory results perfectly. PCA breaks through the mode of classical cellular automaton only is used as a mathematical operation and is developed to an effectively physical and mechanical method.

[Key words] acoustic emission; chaos; physical cellular automaton

(编辑 朱忠国)