

岩石微破裂进程的自组织临界特征探讨

张后全^{1,2}, 唐春安^{1,2}, 贺永年¹, 韩立军¹, 朱万成²

(1. 中国矿业大学建工学院岩石力学与土力学研究所, 江苏 徐州 221008;

2. 东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 辽宁 沈阳 110004)

摘要:运用 RFPA^{2D} 作为研究手段对岩石在单轴压缩条件下破裂过程的自组织行为作了数值模拟, 再现了岩石破裂过程中的应力积累 (stress buildup)、应力转移 (stress transference) 和应力阴影 (stress shadow) 等“3S”现象, 探讨了自组织临界特征, 澄清了临界自组织现象等概念。研究结果表明, 岩石破裂过程中的自组织行为是一个动态力学过程, 并不一定只是在自组织临界状态点之后才发生, 而是在临界状态点附近前后都能发生, 只不过显现程度各有差异, 临界状态点之后现象更为显著。

关键词: 非线性; 自组织; “3S”现象; 数值模拟

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2006)01-0001-05

Discussion on Self-organized Criticality in Rock Failure Progress

ZHANG Hou-quan^{1,2}, TANG Chun-an^{1,2}, HE Yong-nian¹, HAN Li-jun¹, ZHU Wan-cheng²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, School of Architecture and Civil Engineering, Chinese University of Mining and Technology, Jiangsu Xuzhou 221008, China; 2. Center for Rock Instability and Seismicity Research, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In this paper, self-organization behavior in rock failure progress is simulated by RFPA^{2D} code under uniaxial compression test. The results visually present ‘3S’ phenomena (stress buildup, stress transference and stress shadow) in the whole failure progress. Some beneficial discussion on self-organized critical characteristics is made in the subsequent text, which has clarified some concepts such as self-organized criticality phenomena and so on. Through this study, it indicates that self-organization behaviour in rock fracture is one dynamic mechanical process, which occurs not only after self-organized critical point but near it, viz. before or after it, only mechanical behavior is different, it is more remarkable after than before.

Key words: Nonlinearity; Self-organization; “3S” phenomena; Numerical simulation

0 引言

当今“非线性”和“复杂性”已成为世界科学前沿领域的一大亮点, 非线性科学得到了前所未有的发展, 出现了耗散结构论、自组织理论、协同学、分形几何学、混沌学等, 这些理论对岩石破裂过程的非线性特征研究有着重要的指导作用^[1-5]。在长期的地质作用下, 岩石材料内部存在着小到岩石显微结构中的缺陷与损伤, 大到整个地壳岩层的断层、节理与裂隙。这些非均匀性对岩石介质的宏观力学性能有

着极大的影响, 使得岩石介质在变形破坏过程中表现出极强的非线性特征。岩石力学与工程界人士对岩石破裂过程的非线性行为提出了许多的非线性理论研究方法。

自1995年以来, 东北大学岩石破裂与失稳研究中心运用现代计算力学原理和计算机可视化技术, 开发出一套岩石破裂过程分析系统 (Rock Failure Process Analysis, RFPA^{2D}), 可对非均匀岩石材料的非线性变形破坏过程进行仿真模拟^[6]。该系统通

收稿日期: 2005-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50490273, 50474017, 50504005)

作者简介: 张后全 (1979-), 男 (汉族), 四川邻水人, 主要从事在岩石失稳工程细观破裂力学机制方面的研究。

过将岩石介质模型离散化成细观单元,采取 Monte-Carlo 随机赋值方法,按照 Weibull 分布密度函数对其基元进行材料力学性质初始化赋值,从而使得数值分析模型满足了岩石介质的非均匀性假设要求;利用有限元应力分析求解器对各基元进行应力、应变计算,实现了基元在加载过程中的应力分析;采用修正后的库仑准则(包含拉伸截断 Tension cut-off^[7])作为单元破坏的强度判据,对单元进行破裂相变分析,对相变单元采取刚度特性弱化(处理分离)或刚度重建(处理接触)的办法进行处理,从而实现了岩石渐进破坏过程的模拟;假定基元为线弹性损伤体,相变前的应力积累以弹性应变能形式储存于单元,通过统计损伤单元数目来表征声发射次数,用单元损伤释放的应变能来表征声发射的能量释放,从而实现了运用损伤力学原理与统计强度理论相结合的办法来对岩石渐进破坏过程的声发射规律进行研究。

极具复杂性、模糊性、非线性和不确定性的岩石介质受载后的宏观破裂失稳与其在变形时内部微裂隙分布以及微裂纹产生、扩展和聚集密切相关。要弄清岩石介质的宏观断裂机制,必须从岩石在各级应力状态下的微裂纹发生、发展的全过程入手,系统地研究断裂破坏性质转化的内在本质规律。本文试图运用 RFPA^{2D}作为研究手段,以岩石单轴压缩数值试验为例,采用非线性科学中的自组织理论对岩石破裂过程中的自组织临界特征做一些探索性的研究,以期能够较好的诠释岩石破裂过程的非线性行为,从而达到探索岩石破裂过程中发生累进性破坏的本质。这对于探索地震及边坡失稳的产生孕育机制以及相关的预测、预报工作都具有十分重要的意义。

1 自组织临界特征及“3S”现象

自组织临界性(self-organized criticality, SOC),是广延耗散动力学系统所普遍具有的行为特征^[3-5,8,9]。岩石介质系统作为自然界中一种最为常见的广延耗散动力学系统,常处于一种自发演化到临界态的自组织(self-organization)过程中。一个系统发生“自组织”就是在该系统内自发产生某种空间上、时间上或功能上的有序结构。向自组织临界态演化无须对系统的初始状态作特殊规定,对处于临界态的系统进行微小扰动必将引起连锁反应式的崩塌或阶流等瞬变的弛豫过程和它们之间“点断平衡”(punctuated equilibrium)的相对静止与间歇而

复归临界态。呈临界态的系统常在空间上呈现分形结构(自相似性, self-similarity),而在时间上则呈现闪烁噪声(“flicker noise”或“1/f 噪声”,时间上的标度不变性和长程时间关联)。

具体地说,在一定外界应力作用下,岩石材料的变形破坏过程会表现出扩展的裂纹及其破裂过程中产生的声发射总是由随机、分散分布向最终破裂面丛集,从无序向有序演化的自组织特征^[5,8,9]。在加载过程中,岩石承受的载荷逐渐加大,当载荷超过某一临界值(长期强度)时,岩石微破裂表现出连锁反应式的发展,即使所加载荷保持恒定,破裂仍会不断地以不可遏制的方式累进性地进行,直至试件完全破裂。伴随着岩石破裂渐进过程的进行,还可以看到其他丰富的非线性现象,如应力积累(stress build-up)、应力转移(stress transference)、应力阴影(stress shadow),简称“3S”现象^[10-12];在高应力集中区产生的声发射较多,在应力阴影区产生的声发射则较少。

2 岩石破裂过程临界自组织现象理论分析

20世纪70年代末期, Lemaitre 等^[13]从损伤力学的角度,考虑到材料损伤过程,提出了连续介质力学的概念,并建立了一维损伤模型:

$$\sigma = (1 - D)\sigma_e = E(1 - D)\epsilon$$

或
$$\sigma_e = \sigma / (1 - D) \quad (1)$$

其中 σ 为柯西应力或视压平均应力; σ_e 为有效应力; E 为无损岩石介质的弹性模量; D 为损伤参量,在单轴应力状态下,表示材料体积单元中存在的微裂纹(微孔隙、微缺陷)的比率。

由式(1)可知,随着加载过程中实际应力(σ)的不断增大,岩石试样中破坏单元个数增加(即 D 不断增大),使得式(1)中分子不断增大,分母不断减小,必然导致岩石中未破裂单元所承受的荷载(σ_e)呈非线性增长趋势。由于岩石中各微元强度分布的不均匀性,当某一时刻某些单元的强度低于该时刻的 σ_e 时首先发生破裂。RFPA^{2D}系统将通过计算单元应力状态,使其达到应力平衡来实现单元之间的应力转移,进而通过比较单元应力状态与单元强度之间的大小关系,运用损伤阈值准则对单元进行相变分析,判断单元是否有破坏。如果有则继续进行当前步的应力分析和相变分析,如果没有则整个岩石系统进入一个新的应力平衡状态,RFPA^{2D}系统将进行下一步加载的应力迭代计算和相变分析。因

此,岩石在整个加载过程中必然存在一个临界状态,一旦外界对其进行微小的扰动(位移加载),破裂单元将把应力转移给相邻单元,造成裂纹尖端单元因应力集中而发生破坏,这样不断地累进性进行,必然引起岩石破裂的连锁反应式发展,直至宏观断裂面的形成。由此看来,此阶段的单元破坏不再是随机独立地进行,相邻单元、甚至是在整个系统的微元之间,都存在着协同的相互作用,这样就导致了岩石破裂过程中裂纹由随机、分散分布向最终破裂面丛集,从无序向有序演化的自组织行为。由此我们不难理解岩石力学试验中岩石由稳定破裂阶段向不稳定破裂阶段演化时必然存在某一临界应力水平(岩石的长期强度)和岩石发生累进性破坏的本质。岩石破裂进程中的声发射同样具有自组织临界特征。

3 岩石破裂过程临界自组织现象数值模拟

本文采用平面应力模型来模拟岩石在单轴压缩条件下的破裂过程,模型尺寸为 $150\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,共划分为 $150 \times 100 = 1.5 \times 10^4$ 个细观单元。整个加载过程采用位移控制的分布压缩加载方式,每步加载位移量 $\Delta s = 0.002\text{ mm}$ 。试件材料力学性质参数见表1。

表1 材料力学性质参数

参数	符号	数值	单位
均值度系数	m	2	
杨氏弹性模量	E_0	60	GPa
泊松比	ν	0.25	
内摩擦角	φ	30°	
抗压强度	f_c	200	MPa
抗拉强度	f_t	20	MPa
残余抗压强度	f_{cr}	20	MPa
残余抗拉强度	f_{tr}	2	MPa

图1为在单轴压缩载荷作用下岩石破裂渐进过程剪应力场(上排,明暗程度代表剪应力大小)和声发射分布情况(下排)。声发射事件与加载关系曲线如图2所示。由图2可知,岩石在整个加载过程中可分为四个阶段^[14]:(1)弹性变形阶段至微裂隙稳定发展阶段(OA段):试样加载初期岩石处于应力积累阶段,以弹性应变能形式储存试件体内;随着荷载增加,有少量缺陷单元发生破坏,微破裂处于稳定发展阶段。(2)屈服变形阶段(AB段):A点是岩石从弹性变为塑性的转折点(屈服点),在加载到第54步取得。刚进入屈服段时声发射仍呈随机、分散分布,如图1第60-2步所示;而在接近峰值强度

(step 63-4)时,岩石破裂表现出微弱自组织现象,如图1下排第61-11步声发射图中中间区域所示,同时也说明第63-4步剪应力图中的微裂纹在达到峰值强度之前已经形成。在RFPA^{2D}系统中,每一个加载增量步可能进行多个计算循环,直至当前加载步不再出现单元破坏循环才进入下一步增量加载。因此同一加载增量中的循环计算所得到的破坏是由单元破坏产生应力转移所引起,从而RFPA^{2D}极为直观地显示了岩石的累进性破坏现象,在一个加载步中循环计算的次数越多,累进性破坏越强。显然第61-11步产生了累进性破坏现象,这一点也可从图2的声发射次数得到印证。(3)破裂失稳阶段(BC段):在B点取得整个加载过程的峰值载荷,但此时岩石仍处于稳定状态,在外界继续给予一定扰动(位移荷载)的情况下,试件很快发生累进性破坏,最终在C点发生破裂而失稳。从图1第64、66步可以明显的看到自组织临界特征:声发射在最终宏观破裂面丛集,原有分支裂纹逐渐弱化,在裂纹尖端形成高应力区,在非破裂区形成应力阴影区。当荷载加到第66步时,岩石彻底失稳,其承载能力急剧下降,仅为峰值强度的62%,对应于应力曲线的C点,也就是岩石破裂灾变理论所描述的灾变点^[15]。(4)失稳后的残余变形阶段(C点以后段):破裂后的岩石块体沿宏观断裂面发生块体滑移,但仍具有一定承载能力,主要用于克服块体滑移产生的摩擦力。

4 讨论

通过上面单轴压缩数值试验,较好地再现了岩石的微破裂进程,与通常物理实验结果较为一致,在此作如下讨论:

(1)岩石在屈服点之后,并不是每进行一步位移加载都会发生累进性破坏现象。

(2)试件的宏观破坏并不是发生在达到峰值应力的瞬间,而是发生在峰值应力后的某个应力降之后。本文对应于加载步第66步,而不是第64步,因为第64步岩石还处于一个破裂的咬合状态,岩石还具有很强的承载能力,所以整体失稳点应定义在第66步。

(3)岩石并不只是在自组织临界状态点之后才发生自组织现象,而是临近(或接近)自组织临界状态就会发生自组织现象,因此自组织是个力学过程,是一个时间和空间的函数。

(4)自组织临界特征包含两方面意义,一是定义

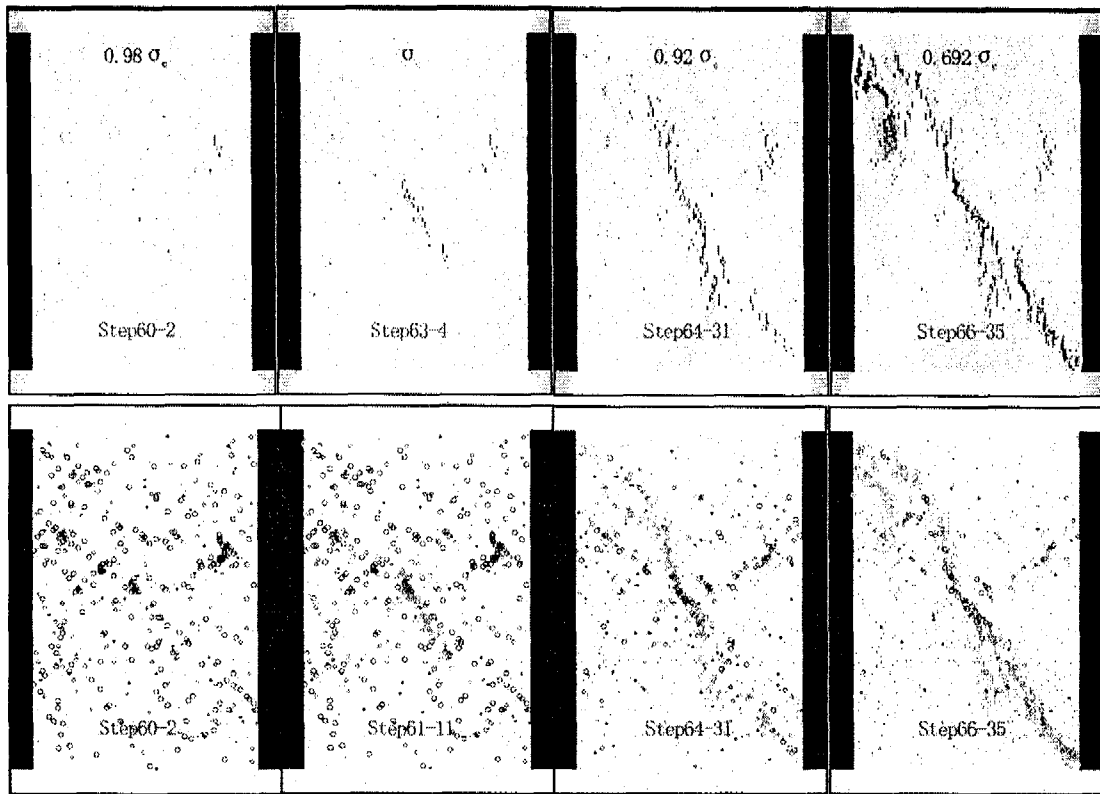


图1 岩石压缩破裂渐进过程

Fig. 1 Rock failure progressive process under uniaxial compression.

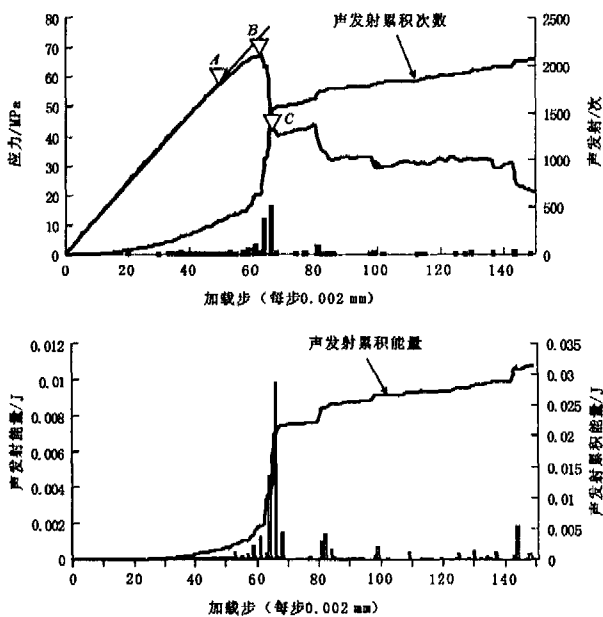


图2 声发射事件与加载关系曲线

Fig. 2 Acoustic emission event releasing with loading step.

了自组织临界状态这个关键点,二是自组织临界状态前后的临近区间都会发生自组织行为,所以应称之为临界自组织现象,是一个动态的力学过程。

(5) 微破裂稳定发展与累进性破坏相对应,即指微破裂的发展情况;岩石稳定破裂与失稳破裂相对应,即指破裂时岩石的平衡状况。

(6) 岩石在整个加载过程中有三个关键点(屈服点、峰值载荷点、失稳点),把岩石整个破裂渐进过程分成了四个阶段。在失稳点即自组织临界点前,试件主要处于应力积累阶段,在失稳点则是应力释放形成应力阴影区和应力转移阶段。因此“3S”现象很好地反映了岩石的破裂渐进过程。

(7) 岩石破裂过程中的峰值载荷点与自组织临界状态点既有联系,又有区别。峰值载荷点在岩石整个加载过程中承受最大载荷时取得,对应着岩石的峰值(极限)强度,而自组织临界点在岩石发生累进性破坏直至形成宏观断裂面时取得,对应着岩石破裂发展过程的稳定性状态。当岩样的细观强度分布比较均匀,岩石破裂的自组织临界点才接近峰值强度;当岩样强度分布不太均匀、屈服过程较长时,岩石破裂的自组织临界点在峰值强度后取得^[16]。自组织临界点前岩石破裂主要表现为分岔、混沌特征,自组织临界点后岩石破裂则表现出自组织临界特征。

本文运用 RFPA^{2D} 作为研究手段,对岩石在单轴压缩条件下破裂过程的自组织行为作了数值模拟,形象再现了岩石破裂过程的“3S”现象,并建立起了岩石破裂过程的细观统计损伤统计本构模型,从理论分析和数值模拟两个方面证实了自组织临界状态

点的存在,并对自组织临界特征作了有益的探讨,在讨论中澄清了临界自组织现象等概念。研究表明,岩石破裂过程中的自组织行为是一个动态力学过程,并不一定只是在自组织临界状态点之后才发生,而是在靠近临界状态点前后都能发生,只不过显现程度各有差异,临界状态点之后现象更为显著。同时也为本文的下步工作提出了要求:研究自组织过程的速率及其响应问题与哪些因素有关。

[参考文献]

- [1] 谢和平. 非线性理论与实践[M]. 北京:中国矿业大学出版社,1997.
- [2] 刘式达. 非线性动力学和复杂现象[M]. 北京:气象出版社,1989.
- [3] 徐玖平,罗久里. 拓展非平衡系统自组织理论的研究进展[J]. 科学前沿与学术评论,2000,21(4): 52-56.
- [4] 於崇文. 固体地球系统的复杂性与自组织临界性[J]. 地学前缘,1998,5(3): 159-174.
- [5] 尹光志,代高飞,万玲,等. 岩石微裂纹演化的分岔混沌与自组织特征[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(5): 635-639.
- [6] 唐春安,王述红,傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [7] Brady B H G, Brown E T. Rock Mechanics for Underground Mining[M]. London: Chapman & Hall Press, 1993.
- [8] Jean - Robert Grasso, Didier Sornette. Testing self-organized criticality by induced Seismicity[J]. Journal of Geophysical Research. 1998,103(B2): 29965-29988.
- [9] Caldarelli G, Tolla F D Di, Petri A. Self-organization and annealed disorder in a fracturing Process[J]. Physical Review Letters. 1996, 77(12): 2503-2506.
- [10] Bollinger L, Avouac J P, Cattin R, et al. . Stress buildup in the Himalaya [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(B11): 7685-7696.
- [11] Dmowska R, Rice J R, Lovison L C, et al. . Stress transfer and seismic phenomena in coupled subduction zones during the earthquake cycle[J]. Journal of Geophysical Research, 1988, 93(B7): 7869-7884.
- [12] Harris R A, Simpson R W. Suppression of large earthquakes by stress shadows: a comparison of Coulomb and rate - and - state failure [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B10): 24439-24451
- [13] Lemaitre J. A course on damage mechanics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [14] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [15] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京:煤炭工业出版社,1993.
- [16] 尤明庆. 岩石试样的强度及变形破坏过程[M]. 北京:地质出版社,2000.