

东北大学

硕士学位论文

岩石破裂过程的临界特性研究

姓名：张后全

申请学位级别：硕士

专业：采矿工程

指导教师：唐春安

20041201

摘 要

随着我国国民经济的快速发展,岩石工程建设规模空前浩大。然而岩石工程本身极具复杂性、模糊性、非线性和不确定性,这些工程的稳定性也随之成为世人关注的焦点和难题。然而岩石工程的失稳并不是一蹴而就,而要经历一个由随机破坏到自组织逐步发展而最终达到破裂失稳的渐进过程。本文把岩石试件和加载机构看作一个小的岩石介质系统,来探索岩石工程失稳的临界特性,这无疑是一件有意义的工作,它将对维持岩石工程的稳定性有所指导作用。

本文选用能够有效地对非均匀岩石介质进行应力分析和破坏分析的分析软件(RFPA^{2D})作为研究手段对岩石破裂过程的自组织临界特性进行研究,该方法的特点就是以岩石微破裂产生的力学机制为基础,能对岩石在各级应力状态下的微裂纹产生与发展、逐步通过自组织过程达到临界状态,最终破裂失稳的全过程进行仿真模拟,这样无疑可以系统完整地研究岩石破坏性质转化的本质规律,从而加深对岩石工程破裂失稳临界特性的理解。该方法克服了沙堆模型受沙堆规模、组织结构、外界扰动方式等多种因素影响而得不到自组织临界行为的不足,解除了逾渗模型和重正化模型只单纯研究岩石破裂演化的临界行为而不涉及到微裂纹产生的力学机制,从而使得人们对逾渗模型的临界概率点、重正化模型的不动点是否跟岩石微裂纹演化的自组织临界点相一致产生怀疑的顾虑,避免了物理细胞自动机模型定义的细胞破裂阈值能量该如何跟实际工程岩体力学性质参数相结合的费解。该方法的另一大特色就是可以形象展现岩石破裂过程的应力场变化:应力积累(stress buildup)、应力转移(stress transference)和应力阴影(stress shadow),简称“3S”现象。

本文首先对自然界中几种常见的自组织现象进行介绍后,给予了自组织现象一个清晰的概念并阐述了自组织临界特征,其后通过建立岩石破裂过程的细观损伤统计本构模型从理论上证明了自组织临界点的存在,然后运用 RFPA^{2D}数值模拟方法对岩石破裂过程的自组织临界现象进行了仿真模拟,最后借助 RFPA^{2D}新近开发的功能,对每步产生的破裂集团大小及其相应数目进行统计,在此基础上采取最小二乘法、归一化极差方法、关联函数法等统计手段对岩石破裂自组织临界特征做了定量化分析,并对岩石破裂过程的相关临界特性(如

破裂集团平均大小)进行了详细讨论,得到如下主要结论:

(1)在整个岩石破裂过程中,破裂集团大小与其相应数目满足负幂律关系,不同应力阶段对应着不同幂指数值。当接近自组织临界状态时,幂指数变化范围在 1.1 到 1.5 之间。

(2)微裂纹的幂律分布并不一定代表自组织临界状态的出现,只说明微裂纹的演化过程保持分形特征,但这微裂纹(破裂集团)分布只是一种统计意义上的自相似,而不是完全自相似。

(3)达到自组织临界状态后的声发射事件满足 R/S 经验关系式 $\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim \tau^H$,

声发射序列表现出时间标度不变性。

(4)通过自相关函数对声发射序列进行自相关分析表明,声发射序列具有时间长程关联性。

(5)岩石破裂过程的自组织临界点对应着岩石的长期强度。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。

本文的创新之处就在于为自组织理论的研究引入了一种新方法 RFPA,它可从岩石破裂自组织临界行为产生的力学机制入手去研究岩石破裂过程的自组织临界特性,摒弃了前人只单纯研究破裂演化行为来获得自组织临界特性的不足。显然,通过 RFPA 方法所得到的自组织临界特性对岩石工程破裂失稳的预测、预报更具有实际应用价值。本文通过理论分析,数值模拟,统计分析三种手段分别从定性和定量角度有力地证实了自组织临界行为的存在,弥补了前人只采用单种手段去判断自组织临界行为存在的不足。研究结果表明自组织临界系统具有时空分形和长程关联特征,同时还发现微裂纹演化过程始终表现出分形特征,澄清了幂律特征就标志着自组织达到临界状态的片面观点。

关键词 SOC 标度不变性 幂律分布 分形结构 长程关联

Abstract

With the fast development of our national economy, rock project construction come into an unprecedented magnificent situation. But rock projects are of great complexity, fuzziness, nonlinearity and uncertainty, thus stabilities of these projects become a focus and difficult problem cared by many people. However, the failure process of rock projects is not extremely sharp but a gradual propagation from stochastic breakage, gradual self-organization to ultimate fracture. It is considered rock specimen and loading structure as one little rock media system to investigate critical behaviors of rock project instability in this dissertation. This is an undoubted significant work, which is very useful to support rock projects.

It is employed RFPA^{2D} that can be used to perform stress and failure analysis for heterogeneous rock materials effectively to study the self-organized criticality in rock failure process. This method is based on microcrack producing mechanical mechanism of rock materials. It can simulate rock failure process from microcrack initiation and propagation, self-organization into critical state to ultimate fracture. In this way, we can systematically and integrally study the intrinsic law of the transition of rock failure behavior. Therefore it can lead to good understanding of critical behavior of rock project failure. This method overcomes the shortcoming of sand-pile model that it can not obtain self-organized behavior influenced by these factors such as sand-pile scale, configuration structure, outside disturbing method and so on. It also clarify the suspicion whether or not the critical probability point of percolation model and invariable point of renormalization group is consistent with self-organized critical point of microcrack propagation because percolation model and renormalization group only investigate critical behavior of rock microcrack propagation but not caring about producing mechanical mechanism of microcrack. Moreover, it can avoid the inexplicability that how to relate cell broken threshold of energy and rock mechanical parameters of real rock mass with each other. Another peculiarity of RFPA^{2D} can visually exhibit stress field change in rock failure process: stress buildup, stress transfer and stress shadow, shortened by '3S' phenomena.

Several common self-organization phenomena are firstly introduced at the beginning of this dissertation. Therefore it endows self-organization with a clear conception, and self-organized critical behaviors are summarized in the subsequence.

Then based on rock microcosmic statistical damage constitutive equation, self-organized critical point is theoretically proved to exist. Then self-organization phenomenon in rock failure process is simulated by RFPA^{2D}. At last, the size and number of damage group are estimated and accounted by virtue of new latest developed function of RFPA^{2D}. Based on these data, self-organized critical characteristics are analyzed quantitatively and related critical behaviors, for example, average size of damage group, are discussed in detail. Some main results are listed as follows:

- (1) The size and corresponding number of damage group comply with power law, but different power components for different stress stage. After self-organized critical state occurs, the components vary from 1.1 to 1.5.
- (2) Power law distribution of microcrack can not represent the certain occurrence of self-organized critical state. It only indicates that microcrack propagation shows fractal characteristic. But this distribution of microcrack or damage group is statistically self-similar, not absolutely self-similar.

- (3) Acoustic event series satisfy with R/S experiential relation: $\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim \tau^H$

after self-organized critical state occurs. Therefore, acoustic event series shows spatial long range correlation.

- (4) Through the analysis of self-correlation for acoustic event series, it indicates that acoustic event series exhibits spatial long range correlation.
- (5) Self-organized critical point in rock failure process is corresponding to rock long-time strength. Self-organization behavior in rock fracture is a dynamic mechanical course, which occurs not only after self-organized critical point but near it, viz. before or after it, only mechanical behaviors are different, it is more remarkable before than after.

The innovation of this dissertation is to introduce RFPA^{2D} into the study of self-organization. It can investigate self-organized criticality from producing mechanical mechanism of self-organization in rock fracture, which avoids the shortcoming of only studying rock evolution behavior but not concerning about producing mechanical mechanism by predecessors. Therefore, it is obvious that the self-organized criticality obtained by RFPA^{2D} is of more practical application value in the forecast and prediction for rock project failure. Self-organized critical point is qualitatively and quantitatively proved to exist by these methods of theoretical

analysis, numerical simulation and statistical analysis, which fetch up the shortage of judging self-organization critical behavior by single method. The results indicate that self-organized critical system exhibits spatial and temporal fractal configuration and long range correlation. It is also found that rock failure process always shows fractal configuration, which clarify the unilateral viewpoint that power law represents the occurrence of self-organized critical state.

Keywords: SOC, scale-invariant property, power law distribution, fractal configuration, long range correlation.

独创性声明

本人声明所提交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：张后文

日期：2004.12.31

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

（如作者和导师同意网上交流，请在下方签名；否则视为不同意。）

学位论文作者签名：张后文

导师签名：

签字日期：2004.12.31

签字日期：

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出、研究目的及意义

岩石圈是人类赖以生存的主要载体，人类的大部分活动都是在岩石圈上进行的。由于地质构造作用的影响，以岩体为基体的岩石圈内部存在着大量的断层、褶皱等地质构造（见图 1.1，图 1.2）；岩体因所赋存的环境不同而受到的风化、岩溶等地质演化作用也有所不同，从而使得岩体内部含有大量的节理、层理、片理等结构弱面（见图 1.3）。这些地质结构面（损伤）的存在，破坏了岩体的整体性，极大地影响着岩体的变形特征和强度特征。一般来讲，大部分新生岩石质地坚硬致密，孔隙小而少，抗水性强，透水性弱，力学强度高。然而天然岩石本身就是地质作用的产物，岩石材料内部都不可避免地存在着或多或少、大小不一、形状各异的缺陷与损伤，如矿物解理、微裂隙、粒间空隙、晶格缺陷、晶格边界等内部微缺陷（见图 1.4），统称微结构面^[1]。因此，自然界中的地层（岩石圈，岩石）在一定层次上是一种极具复杂性的巨系统，非平衡性，非线性，多尺度性，灾变性，自组织性，自相似性，有序性和随机性是地学系统的最根本属性^[2]。就岩石本身来说，它是一种受到不同程度损伤的非均值材料，极具多缺陷性、非均匀性^[3]。

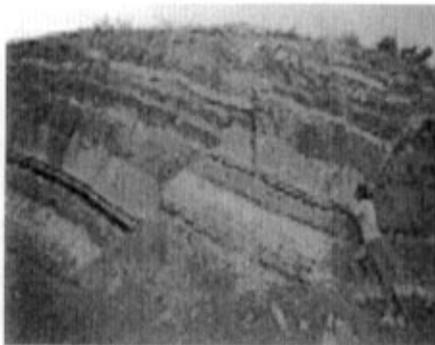


图 1.1 断层构造
 Fig. 1.1 Fault configuration



图 1.2 褶皱构造
 Fig. 1.2 Drape configuration



图 1.3 层理
Fig. 1.3 Lamina

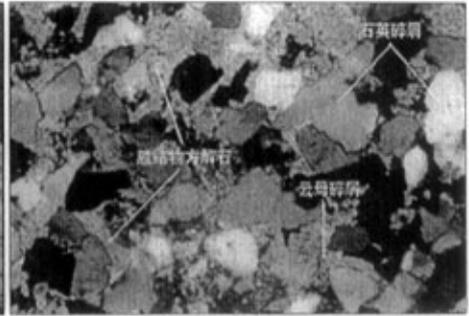


图 1.4 矿物微结构
Fig. 1.4 Mineral micro-structure

岩石工程涉及到采矿、土木建筑、水利水电、铁道、公路、地质、地震、石油、地下工程、海洋等诸多工程领域。因此，以岩石工程为主要研究对象的岩石力学系统是一个复杂的巨系统。岩石力学主要包括强度、刚度及稳定性三类工程力学问题，而在这三类工程力学问题中无论是强度问题还是刚度问题，都是为岩石工程的稳定性服务，最终的都会落脚到岩石工程的稳定性这一关键问题上来，这也是岩石力学与工程界人士所最为关心、投入了大量精力去研究的重大问题，因为岩石工程的失稳常常与重大的地质灾害联系在一起，岩石工程的稳定性不足所造成的损失将是巨大的甚至是灾难性的，如岩（煤）爆、矿震、库区地震、瞬时滑坡、采矿中顶板突然来压、突水、煤（岩）瓦斯突出等都是最常见的岩石失稳现象。如何保障岩石工程的安全、可靠，或者说对岩石工程中的灾害进行有效的预测与防治，已经成为岩石工程研究中的一个重要方向^[1,4]。随着我国国民经济的快速发展，岩石工程建设规模空前浩大，如三峡工程建设（见图 1.5）、南水北调工程、西气东输工程等，这些工程都将为国民经济的快速发展起到举足轻重的作用，这些工程的稳定性也随之成为世人瞩目的焦点。虽然近年来岩石力学这门新兴学科取得了前所未有的发展，在岩土工程技术方面取得了不少阶段性成果，对维持岩石工程的稳定性起到了极其重要的作用，但是岩石工程本身所具有的复杂性，模糊性，不确定性都给岩石力学问题的深入研究布下了重重陷阱，而且随着岩石工程规模（深度、广度）的不断扩大，新的岩石工程环境必将遇到新的问题，而且这些工程所涉及到的岩石力学问题越来越复杂，近年来新兴的深部岩石力学问题就是一个焦点，引起了广大岩石力学工作者的极大关注。

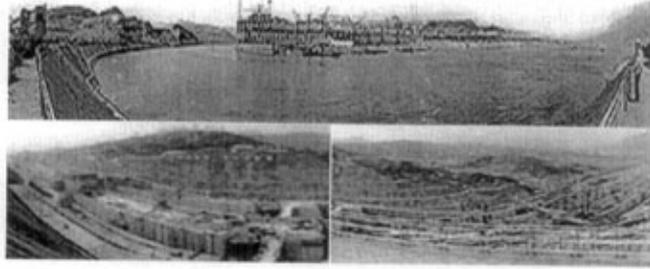


图 1.5 三峡工程建设概貌

Fig. 1.5 Sanxia project outline

虽然岩石介质巨系统极具复杂性，非线性，随机性，模糊性，不确定性，但可把岩石试件和加载机构看作一个小的岩石介质系统，由此得出的结论可窥一斑。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，常具有一种自发演化到临界态的自组织临界特性，这个临界点恰对应着岩石系统失稳的临界点。因此对岩石试件破裂过程的自组织临界特性作细致研究，无疑是件有意义的工作，它将对维持岩石工程的稳定性有所指导作用。

1.2 国内外研究状况

1.2.1 自组织理论研究成果概述

自然界和人类社会中存在着一类兼具时间和空间自由度的系统，即广延耗散动力系统。这类系统广泛存在于物理学、化学、地震学、地质学、生物学、气象学、经济学等领域。所谓自组织，就是指不需要对系统的外部控制参量进行任何调整的情况下，在外界作用下系统能够自发演化到这个宏观统计动力学性质的临界状态。在此状态下任何微小的扰动将触发连锁反应并导致灾变，系统在外界输入作用下发生的动力学事件对事件规模的分布是一种负幂率关系，但在较长时间尺度内，系统的总的势能的平均值将保持不变^[5]。向临界态的演化无须对系统的初始状态作特殊规定(即临界态是动力学吸引子)，同时临界态对扰动是稳健的，即当系统偏离临界态后将自动回归临界态。呈临界态的系统常在空间上呈现具有分形特征的空间结构(自相似性)，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)。虽然上述空间延展系统及其重要特征十分常见并为人们熟知，但是这种复杂系统的时空演化及其特征的形成尚缺乏理论上的说明。首先由 Bak, Tang 和 Wiesenfel 提出了“自组织临界性”(简称“SOC”)的假设来解释时空耗散动力系统的上述动力学行为^[6]。

1987年由美国布鲁克海文国家实验室的 Per Bak、圣巴巴拉理论物理研究所的 Chao Tang (汤超)及佐治亚工学院的 Wiesenfeld 合作首次提出自组织临界性(Self-Organized Criticality, 简称 SOC)概念,是为解释具有无序、非线性行为特征的复杂系统动力学行为提出的新概念。自组织临界性,也称自组织临界状态,是控制大量广延耗散动力系统(spatially extended dynamical systems)的普遍组织原则^[7~9]。

一个系统发生“自组织”(self organization)是指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。Bushev (1994)^[10]将“自组织”定义为“一种过程,通过这种过程,总体的外部影响触发了系统的内部机制,从而在系统内产生特定的结构,其对称性取决于 Curie 原理”。Curie 原理指出,若干不同性质的现象叠加于同一系统则其不对称性(dissymmetry)增大(即“对称破缺”(symmetry breaking)),而共同对称性(common symmetry)相应地下降。这一原理指出了“因”(外力)、“果”(外力结果)对称性之间的关系。

(1) 系统发生自组织并出现特定有序结构(时间结构,空间结构,功能结构)的条件是系统必须开放,而且必须维持远离平衡状态。

(2) 自组织是自发产生的。自组织不同于“组织”(organization),后者是由外部影响直接引起而并非由内部相互作用所产生的。然而自组织则并非由外部影响直接引起,有序结构是由于系统内部过程自发地产生的。

(3) 系统发生自组织时,外部影响具有总体性。外部条件对系统只施加总体影响,而并不包含系统向某一特定方向转变的任何指示。

(4) 总体外部影响向系统内部的自组织和有序结构的“转化”是通过系统内部的连结和相互作用而实现的,“外因通过内因起作用”。

(5) 结构与对称性及不变性(invariance)有关。因此自组织的定义应建立在对称性的概念之上。对称性是“变换不变性”(transformation invariance)关系的普遍表述。

1.2.2 自组织临界特性研究模型概述

(1) 实验研究模型——沙堆模型

自组织临界特性最简单的实验模型就是“沙堆模型”(sand-pile model)。散粒体沙堆可以看作是一个带有局部相互作用和广延空间自由度的耗散动力系统。Glenn. A. Held等^[1]首先开创了最初的散粒体沙堆模型实验,实验选用粒径1mm~1.25mm的均匀沙粒,在直径4cm的圆形底盘上以逐粒加沙方式建造沙堆。最初沙粒停留在坠落位置附近,但不久沙粒就停息在彼此的顶上,形成了一个缓坡的沙堆。然后在沙堆的斜坡变陡之处,沙粒就下滑而产生小小的崩塌(avalanches)。随着更多沙粒的坠落和沙堆的斜坡更陡而达到临界的安定角时崩塌的平均规模也随之增大。原则上,当一粒沙坠落到呈临界态的沙堆上时就将触发任意大小的崩塌,直至灾变事件。但是即使灾变性的崩塌也不会使沙堆的坡度明显地偏离其安定角。无论初始的沙堆是处于次临界态(沙堆坡角小于安定角)或是超临界态(沙堆坡角大于安定角),连锁反应将使沙粒积聚和离散取得平衡,令沙堆保持定常的高度和坡角,换言之,次临界沙堆和超临界沙堆都将趋向临界态。这种临界态就是所谓的“自组织临界态”。其所以被称之为“自组织”是因为无论初始条件如何,系统都将自发地趋向临界态。因此自组织临界态对扰动是稳健的,是一种动力学的吸引子。当沙堆的坡角达到临界角附近时,加入的沙堆数量与落出圆盘边缘之外的沙粒数量在总体上达到平衡,沙堆停止增长。此时对新添加的沙粒(可视为一种干扰)的响应是无法预测的,沙堆可能固定在沙堆坡面上,也可能引起小范围沙粒的滑动,还可能导致更大规模的崩塌,但崩塌规模与发生频率符合统计的负幂率分布(power-law distribution)。

李仕雄^[12]等人针对影响沙堆自组织临界特性的内因与外因展开了讨论。研究表明:影响沙堆自组织临界性的内因是沙堆的规模和沙堆的组织结构,影响沙堆自组织临界性的外因是外界的扰动。沙堆的规模和沙堆的组织结构决定了沙堆是否能够出现自组织临界性。外界扰动的方式不同,自组织临界性出现的临界点不同;扰动强弱不同,会出现自组织临界性与非自组织临界性的分叉;扰动的方式和扰动的强弱只有通过沙堆的规模和沙堆的颗粒级配才能起作用。内外因相互作用,维持沙堆在临界状态的宏观稳定的时候,出现自组织临界性。

由此可见,沙堆模型是一种研究自组织临界特性的一种最基本模型,但是由于受到沙堆规模、组织结构、外界扰动方式等内外因作用的影响,并不是在每种情况下都会出现自组织临界行为,从而无法对复杂条件下的自组织临界行

为进行研究。

(2) 理论研究模型之一：逾渗模型

逾渗概念是由 S. K. Broadbent 和 J. M. Hammersley^[13]于 1957 年首先引入，最初是用来处理流体在随机多孔介质中的流动问题。他们通过大量研究发现，在流体通过多孔介质时，当多孔介质的孔隙被随机堵塞的比例逐渐增大而达到某一值时，流体就突然被完全堵塞而不能流过介质。这里，随着孔隙被随机堵塞程度的变化而存在一个突然的转折点，在转折点的两侧，流体的流通性质发生根本的变化（通→不通或不通→通），出现或消失长程联结性。后来人们在研究许多其他问题时，发现也存在同样的类似现象。在所有这些不同领域的问题中，存在一个共同的特点，即随着某种密度、占据数、浓度、比例逐渐变化（增加或减小）到某一定值时，会发生物体宏观性质的某种转变，出现或消失长程联结性。人们把这种长程联结性的突然转变称为逾渗转变，而产生逾渗转变的密度、占据数、浓度、比例等的值称为临界概率 p_c （或逾渗阈值）^[14]。

岩石破裂时所发生的微裂隙产生、扩展、从集、贯通的过程，实质上也是一个长程联结性突然产生的过程，这启示人们可以尝试用逾渗现象的方法来研究岩石破裂问题。彭志正等人^[15]用计算机模拟方法研究了岩石破裂的逾渗模型，给出了在微裂隙随机分布情况下破裂集团的分布图像、破裂集团的大小分布规律、总破裂集团数、集团平均大小、逾渗分维及临界情形。所得结果与其他模型和实验基本一致，表明逾渗模型是描述岩石破裂扩展演化过程的一种较为合适的模型。但所作计算机模拟仅从唯像的角度建立起了一种岩石破裂及演化的逾渗模型，没涉及到岩石微裂隙产生的力学机制及其随着微裂隙自组织行为发生的同时岩石系统内部应力场变化，这无疑是一大遗憾。

(3) 理论研究模型之二：重正化模型

重正化群(renormalization group)方法是 K. G. Willson 于 1971 年提出的一种方法，是一种改变物体的粗视化程度时观测物理量变化的规律。威耳逊一直研究量子场论问题，他在处理相变问题的时候认识到了重正化群理论与临界点现象的相似性，于是他对重正化群理论作了发展，然后用来处理临界点现象，从而建立了重正化群理论。由于他成功地把重正化群理论应用于临界点现象，1982 年的诺贝尔物理奖授予了他，以表彰他对重正化理论的贡献^[16-17]。

如果参数空间中的一个点在尺度变换下不变，则称这一点为这一变换下的不动点。如果一个体系原来不处于临界点，其关联长度是有限的，经过一次重

正化变换, 关联长度变小, 体系则远离临界点; 如果体系原来处于临界点, 关联长度无限大, 重正化变换后, 体系仍处于临界点。这样, 威耳逊很自然地将临界点和不动点对应起来, 通过求不动点就可以求得临界点, 进而可以计算全部临界指数。其基本思想是: 在临界点关联长度趋于无穷大, 体系应具有尺度变换下的不变性, 因此只需寻找尺度变换下的不变性, 从而确定临界点并计算临界指数^[18]。

利用重正化技术研究岩石力学一些临界行为已取得了一些成果。Madden^[19]利用重正化技术把岩石宏观导电率和微裂纹群联系起来研究。Allegre 等^[20]则研究了岩石裂纹的合并问题, Smalley 等^[21]对断层的临界滑动进行了重正化研究。但是跟逾渗模型一样, 重正化技术只是根据标度不变性原理, 从唯象的角度阐述了岩石破裂演化的临界行为, 没跟岩石微破裂产生的力学机制及自组织产生的力学行为相结合, 从而使得人们在心中对重正化变换的不动点和岩石破裂演化的自组织临界点是否完全一致存在疑虑^[22]。假设我们能够证明在外力作用下岩石破裂过程的自组织临界点跟用重正化变换不动点是相一致的话, 重正化技术无疑是描述岩石破裂演化行为的一种有力数学工具。

(4) 数值模拟模型——元胞自动机模型

为了表述自组织临界性概念, Per Bak 等人采用沙堆作为模型。自组织临界性的研究, 直接是从沙堆开始的。尽管选择了简单的情况, 系统仍然相当复杂, 一般具有许多亚稳态。数值模拟不失为一种好办法, 特别是元胞自动机模型, 已经提供了现成的工具。元胞自动机 (Cellular Automata 简称 CA) 模型最早是由 Von Neumann 提出, 是一种在随机初始条件下, 通过构造简单的数学模型, 当定义在空间点阵上的一个整数变量超过某一阈值时, 从一个局域元胞发出到它的临近元胞, 这个元胞接受信号, 而使其整型变量发生改变, 如此往复。这个办法的潜在普遍性来自于非常简单的非线性扩散动力学, 不仅在定性特征而且在定量性质 (如标度指数) 上可望得到较好的结果, 特别是临界点普适性方面往往发挥作用。还有一种新的元胞自动机, 即依赖于标量场梯度的阈值弛豫条件的“矢量自动机”, 研究在任意有限坐标位集合上具有预先规定的局域临界值的推广的元胞自动机模型。坐位与坐位之间的跌落规则可能不相同, 但仍旧可以导致自组织临界状态^[23]。

近几年来, 该方法在可压缩流体模拟及地震活动性模拟等方面得到广泛应用。然而, 迄今为止, 细胞自动模型模拟固体介质方面大都是基于简单的滑块

模型而建立的，未通达到对实际材料介质的不均匀性和不同加载方式所导致材料破坏演化规律进行有效模拟。为此人们开始初步建立了一种能够模拟细观非均质材料破坏演化规律进行有效数值模拟的物理元胞自动机^[4,24]。然而物理细胞自动机模型中，如何把细胞破裂阈值能量与实际工程岩体的力学性质参数联系起来，让人有些费解。

通过数值模拟，可揭示出某个广延耗散动力系统自发地演化到没有特征时间和特征长度的临界状态。自组织临界状态的时间指纹是 $1/f$ 噪声即闪烁噪声，它的空间标志是出现无标度结构（分形）^[6]。尽管数值模拟尽管做得有声有色，引人入胜，但是所得的结论是否与实际情况相符合却是至关重要的^[23]。

1.3 本文研究目标、内容、思路及特色

1.3.1 研究目标

运用 RFPA^{2D} 作为研究手段对岩石破裂过程的临界特性进行详细研究，以期对岩石工程的破裂失稳作出有指导性的预测预报。

1.3.2 主要研究内容

首先通过建立岩石破裂过程的细观统计损伤统计本构模型对自组织临界点的存在进行了理论分析，其后运用 RFPA^{2D} 数值模拟方法对岩石破裂过程的自组织临界现象进行了仿真模拟，最后借助 RFPA^{2D} 新近开发的功能，对岩石每步产生的破裂集团大小及数目进行统计，在此基础上采取最小二乘法，归一化极差方法，关联函数法等手段对岩石破裂自组织临界特性的两个特征（时空幂律分布和长程关联现象）做了定量化分析，并对岩石破裂过程的相关临界特性（如破裂集团平均大小）进行了详细讨论，从而本文运用理论分析，数值模拟，统计分析三种手段从定性和定量角度分别对自组织临界特征的存在进行了论证，澄清了幂律特征就标志着自组织达到临界状态的片面观点，加深了对岩石工程失稳临界特性的理解，对岩石工程失稳的预测、预报具有一定的指导作用。

1.3.3 研究思路

本文首先对自然界中几种常见的自组织现象进行介绍后，给予了自组织现象一个清晰的概念并阐述了自组织临界特征，接着运用理论分析，数值模拟，统计分析三种手段对岩石破裂过程的临界特性展开全方面的研究。

模型而建立的,未通达到对实际材料介质的不均匀性和不同加载方式所导致材料破坏演化规律进行有效模拟。为此人们开始初步建立了一种能够模拟细观非均质材料破坏演化规律进行有效数值模拟的物理元胞自动机^[4,24]。然而物理细胞自动机模型中,如何把细胞破裂阈值能量与实际工程岩体的力学性质参数联系起来,让人有些费解。

通过数值模拟,可揭示出某个广延耗散动力系统自发地演化到没有特征时间和特征长度的临界状态。自组织临界状态的时间指纹是 $1/f$ 噪声即闪烁噪声,它的空间标志是出现无标度结构(分形)^[6]。尽管数值模拟尽管做得有声有色,引人入胜,但是所得的结论是否与实际情况相符合却是至关重要的^[23]。

1.3 本文研究目标、内容、思路及特色

1.3.1 研究目标

运用 RFPFA^{2D} 作为研究手段对岩石破裂过程的临界特性进行详细研究,以期对岩石工程的破裂失稳作出有指导性的预测预报。

1.3.2 主要研究内容

首先通过建立岩石破裂过程的细观统计损伤统计本构模型对自组织临界点的存在进行了理论分析,其后运用 RFPFA^{2D} 数值模拟方法对岩石破裂过程的自组织临界现象进行了仿真模拟,最后借助 RFPFA^{2D} 新近开发的功能,对岩石每步产生的破裂集团大小及数目进行统计,在此基础上采取最小二乘法,归一化极差方法,关联函数法等手段对岩石破裂自组织临界特性的两个特征(时空幂律分布和长程关联现象)做了定量化分析,并对岩石破裂过程的相关临界特性(如破裂集团平均大小)进行了详细讨论,从而本文运用理论分析,数值模拟,统计分析三种手段从定性和定量角度分别对自组织临界特征的存在进行了论证,澄清了幂律特征就标志着自组织达到临界状态的片面观点,加深了对岩石工程失稳临界特性的理解,对岩石工程失稳的预测、预报具有一定的指导作用。

1.3.3 研究思路

本文首先对自然界中几种常见的自组织现象进行介绍后,给予了自组织现象一个清晰的概念并阐述了自组织临界特征,接着运用理论分析,数值模拟,统计分析三种手段对岩石破裂过程的临界特性展开全方面的研究。统计分析三种手段对岩石破裂过程的临界特性展开全方面的研究。

1.3.4 本文研究特色

本文研究的最大特色就在于把 RFPA^{2D} 引入到岩石破裂过程的自组织临界特性研究中, 不仅可以形象展现岩石破裂过程的应力场变化, 而且还可以通过大量统计数据对岩石破裂过程的自组织临界特性进行详细研究, 同时还弥补了用于研究自组织临界特性的沙堆模型受沙堆规模、组织结构、外界扰动方式等多种因素影响而得不到自组织临界行为的不足, 解除了逾渗模型和重正化模型只单纯研究岩石破裂演化的临界行为而不涉及到微裂纹产生的力学机制, 从而使得人们对逾渗模型的临界概率点、重正化模型的不动点是否跟岩石破裂演化的自组织临界点相一致产生怀疑的顾虑, 避免了物理细胞自动机模型定义的细胞破裂阈值能量如何跟实际工程岩体力学性质参数相联系的费解。本文的另一大特色就在于其次在于通过理论分析, 数值模拟, 统计分析三个方面从定性和定量化角度有力地证明了对自组织临界状态的存在, 澄清了幂律特征就标志着自组织达到临界状态的片面观点。

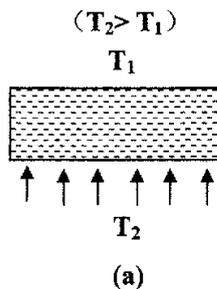
第 2 章 分析软件系统自组织临界现象模拟原理及其功能介绍

2.1 自组织临界特征及内容

2.1.1 自组织现象

所谓自组织现象就是某一系统或过程中自发形成时空有序结构或状态的现象。在外界强迫下形成的有序行为称为有组织，相反，在无外界强迫下系统内部自发形成的有序行为称为自组织。例如工人们在工头的指挥下，合理分工生产产品，这就是有组织。如果没有工头，工人们也能默契配合地生产产品，那就是自组织。

在人类生活的自然界里到处充满了各种自组织现象。很早以来，人们就发现了许多令人费解的自然现象或实验观察，贝纳（Bénard）流—流体力学中的对流有序现象，就是其中一个最为著名的例子^[25-26]。1900年，法国学者 Bénard 在如图 2.1 所示的水平容器中，注入一薄层液体，然后从下面均匀缓慢地加热，同时维持上面的温度不变。当上下液体的温度梯度较小时，流体中的热交换主要是靠热传导的方式进行的，此时没有宏观的运动发生，流体保持静止；当温度梯度达到某个临界值时，原来静止的流体会突然产生上下运动。图 2.1(a) 是实验装置图，在水平放置的扁形容器中从，充入液体， T_1 和 T_2 分别代表上、下液面的温度， $T_2 > T_1$ 。图 2.1(b) 是一个稳定的对流有序图形。该图形的基本组成单元是以相反方向旋转的两个流体“卷”，流体“卷”与矩形的短边平行。



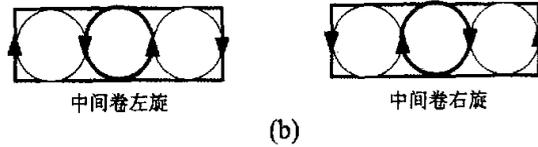


图 2.1 Bénard 流实验示意图
Fig.2.1 Bénard experiment sketch map

化学反应中的别洛索夫-扎鲍庭斯基 (Belousov-Zhabotinsky, 简称 B-Z) 反应, 则是相当有趣的又一个例子。在一般情况下, 当把几种物质放在一起进行化学反应时, 它们会达到一个均匀的状态, 但是他们发现, 在金属铈离子作催化剂的情况下, 一些有机酸 (如丙二酸, 柠檬酸) 的溴酸氧化反应, 会呈现出组分浓度和反应介质随时间周期变化的现象。如把 $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 KBrO_3 、 $\text{CH}_2(\text{COOH})_2$ 、 H_2SO_4 及几滴试亚特灵 (氧化还原指示剂) 混和在一起并搅拌, 再把得到的均匀混和物倒入试管, 试管里立刻会发生快速的振荡: 溶液周期地由红 (表示 Ce^{3+} 过量) 到蓝 (表示 Ce^{4+} 过量) 地改变颜色, 一会儿红色, 一会儿蓝色, 像钟摆一样发生规则的时间振荡。因此这类现象常称之为化学振荡和化学钟^[27-29], 当然在通常的化学反应中, 是没有振荡发生的。后来 Zhabotinsky 等人在实验中又发现, 在某些条件下, 体系中的组分的浓度分布并不是均匀的, 而是可以形成规则的空间分布, 形成许多漂亮的花纹; 并且在某些条件下, 花纹会成同心圆或螺旋状向外扩散, 像波一样在介质中传递。这就是所谓的浓度花纹或化学波现象^[30]。其实, 早在 1921 年 Bray 就报道了化学振荡现象, 但一直未能引起人们的足够重视, 因为化学振荡现象是和热力学第二定律及 Boltzmann 定律 (即 $S=k\ln P$) 相违背的, 它的出现很难为化学家们所接受。在化学振荡过程中, 反应分子在宏观的空间距离上和宏观的时间间隔上呈现出一种长程关联一致性, 体系中的分子好像是接受了某个统一的命令似的, 自己组织起来形成宏观的空间和时间上的一致行动。

在半导体器件中也可以发现类似的现象。以砷化镓二极管为例, 当其两端所加电压不高时, 二极管中通过的电流与外加电压成线性关系, 服从欧姆定律; 当所加电压达到一定值时, 电流变成周期性的脉冲, 这就是大家所熟悉的耿氏 (Gunn) 效应。

在高频感应加热实验中, 将一石英管用机械泵抽成真空, 使之维持在低真空状态, 然后通过高频感应炉的感应线圈对石英管施加一个高频交变电场, 这

时在石英管中就可以看到明暗相间的光环——一种空间有序结构。

在 60 年代出现的激光，也是一种时间有序现象。德国学者 Haken 对此进行了全面的研究。当光泵向激光器中输入能量的功率低于某个临界值，激光器中的每个原子独立无规则地发射光子，此时激光就相当于一个普通灯泡，整个光场系统处于无序状态。当输入功率超过某个临界值时，激光器就会发出单色的激光，不同原子发出的光的频率和位相都变得十分有序。

在生物的种群动力学方面，也有许多这方面的例子。如亚得里亚海附近的渔民发现，鱼的种类也有周期性的变化。在生态学种，Tinbergen 在 1960 年提出一个反应捕食关系的最基本、最简化的公式：

$$N=RDt \quad (2.1)$$

式中 N 是时间 t 内捕捉到的被捕食者数， D 是捕食者的密度， t 是捕捉的时间， R 是风险指数。由于捕食者和被捕食者的相互作用，使二者的种群密度长期维持在一定范围内，又称之为守恒振荡，这种状态被认为实现了种群相互平衡。

在人们的日常生活中，同样可以观察到自发形成的各种有序结构，如松花蛋中常常出现的漂亮的“松花”，就是一种司空见惯的三维空间有序结构。

2.1.2 自组织临界性

自组织临界性 (SOC, Self-organized Criticality)，是广延耗散动力学系统所普遍具有的行为特征^[30-36]。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” (self organization) 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。这个自组织临界状态在动力学上是稳定的，并且具有鲁棒性 (Robust)^[3,7] (即系统对外界干扰及系统内部的涨落是稳定的，对初始条件的变化也是不敏感的)。系统在这个临界状态下，外界的微小输入都可能导导致系统的整体失稳，引起连锁反应式的崩塌 (avalanche) 行为。

针对本文研究的岩石试件系统 (岩石试件与加载结构) 说，在一定外界应力作用下，岩石试件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^[32-36]。在加载过程中，试件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。

2.1.3 自组织临界性存在的表征

1987年, Per Bak、Chao Tang 和 Kurt Wiesenfeld^[7]在 Physical Review Letters 上首次提出了自组织临界状态概念后, 他们利用细胞自动机模拟手段, 对一维、二维沙堆模型进行了大量数值模拟, 研究表明, 具有自组织临界特性的系统, 表现出如下特征: 某事件的规模与产生频率满足负幂律关系, 在时间域上呈现闪烁噪声(“flicker noise”或 “1/f 噪声”, 时间上的标度不变性和长程时间关联), 在空间域上呈分形结构^[6]。

(1) 规模与频率负幂律分布

在临界状态时某事件发生的规模与产生频率之间呈负幂律分布, 即满足如下关系式:

$$D(V)=KV^{-\alpha} \quad (2.2)$$

其中 $D(V)$ 为某事件的分布函数, V 为该事件的规模。在实际应用中, $D(V)$ 一般定义为规模大于 V 的事件出现的频率, 规模 V 取尺寸量纲, 如长度、体积等。

(2) 空间域的分形结构

分形是一种具备自相似结构的几何形体。自然界中具有这种自相似结构的分形体随处可见, 比如海岸线, 山脉, 云彩、地震、湍流、气候激烈变化、股票的变动等等。分形的另一个突出特点就是无特征尺度。所谓特征尺度就是描述对象的代表量。自然界的图形可分为具有特征尺度和不具有特征尺度。没有特征尺度, 就必须同时考虑大大小小的许许多多尺度。没有特征尺度的重要性质就是自相似性。自相似性是指把要考虑图形的一部分放大, 其形状与全体(或大部分)相同。如果经过放大, 其形状与总体完全一样, 称之为完全自相似, 如果经过放大, 其形状总体与(或大部分)相同, 称之为统计意义上的自相似^[38-41]。一般情况下, 自相似性有比较复杂的表现形式, 而不是局域放大到一定倍数以后简单地和整体完全重合。但是, 表征自相似系统或结构的定量性质如分形维数 D , 并不会因为放大或缩小等操作而变化。自相似性可表示为, 当把尺度 r 变换为 λr 时其自相似结构不变, 只不过是原来的放大或缩小, λ 称为标度因子, 这种尺度变换的不变性称为标度不变性, 所改变的只是外部的表现形式^[41]。

(3) 时间域的标度不变性和长程相关性

所谓时间域上的标度不变性就是指虽然时间尺度的大小改变而时间序列的特征不变, 可用 R/S 方法来研究时间域上的标度不变性 (自相似性)。R/S 方法是由自仿射分形衍生出的分析随机时间序列的统计方法, 它是通过改变时间尺度的大小来研究时间序列统计规律的变化特征。在分析由各种自然现象抽象出的时间序列时, 通常都忽略事件之间的长程相关性, 认为事件只在短程范围内具有“记忆性”。R/S 经验关系式的存在却说明事件的发生具有长程相关性, 后面事件的发生将受到前面事件的影响。R/S 经验关系式反映了时间序列统计特征量的标度不变性, 通过对时间尺度的变化, 我们可以将小时间尺度范围的规律应用到大时间尺度范围, 或者将从大的尺度得到的规律用于小时间尺度, 为获知不同尺度下事件可能出现的涨落情况提供了思路。

通常我们所说的长程相关性, 是指对系统而言, 过去发生的事件对以后发生的事件还有影响, 并且这种影响在相当大的时滞之后仍然存在。这种长程关联可以用两点间的关联函数来检测^[42], 对于物理量 $x(t)$, 定义关联函数 $c_x(\tau)=[x(t), x(t+\tau)]$, 若 $c_x(\tau)$ 随 τ 的衰减比指数函数慢, 或者说在很长的时间范围内两点关联仍不衰减为零, 我们则认为这个系统中存在长程关联。

综上所述, 幂律反映自相似性 (self-similarity), 它是标度不变性 (scale invariance) 和分形 (fractal) 之源, 场量的时-空幂律分布是自组织临界性的证明。因此, 我们可以用上述表征来作为证明系统自组织临界性的有力证据。

2.1.4 自组织临界性的涌现机制

远离平衡的延展耗散系统自发向临界态演化的自组织过程具有如下动力学机制^[6]:

- (1) 多组成及作用过程的非线性相互作用之间的多重耦合与叠加。
- (2) 自组织临界性的形成具有“元胞自动机”(cellular automata)非线性动力学机制。
- (3) 时空分形和长程时空关联与连通性。空间上的负幂律分布反映为空

间分形结构，而时间序列上的幂律功率谱则反映为时间分形结构。空间分形结构和闪烁噪声(1/f噪声)分别是自组织临界性的空间和时间指纹(finger prints)。在临界点附近，不同空间点上的微小涨落突然扩大而导致空间上的关联，其平均长度称为“关联长度”(correlation length)。同样，在临界点附近，不同时间点上的微小涨落也突然扩大而导致时间上的“关联时间”(correlation time)。逼近临界点时，时间上和空间上的关联时间和关联长度突然发生一定程度的发散从而出现“长程时空关联”(long range spatio-temporal correlation)。有时亦称“长程连通性”(long range connectivity)。正是临界点附近这种关联长度和关联时间的发散使复杂系统发生“自组织”而呈现有序的时空结构。

2.1.5 自组织临界性的应用

自组织临界性是自然界许多系统都存在的一个特征。自组织临界性理论对原来无法解释其机理的一些现象给出了合理的，为众多学者所接受的解释，而且大大改变我们对一些自然界中常见现象的传统认识，提出了全新的解释。以前为一些典型的自然灾害的负幂律分布特征与自组织临界性。

地震：由于构造板块的缓慢运动，压力在时间尺度上累积了成千上万年；而在地震发生期间，累积的压力就会在几秒钟内释放出来。在一个区域里的地震的普遍特征就是负幂律关系，并且有机会相同的 α 值。对于地震而言， α 值约等于2。

森林火灾：可燃物质生长了很长时间，但是由于森林大火会在极短时间内毁灭。森林火灾的畴域近似的满足负幂律分布， α 值位于1.3~1.5之间。

滑坡：由于斜坡失稳而生成，当滑坡生成时，在很短的时间量度中释放。滑坡频率域的分布符合负幂律分布， α 值介于2.3和3.3之间。

2.2 分析软件系统自组织临界现象模拟原理

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，常具有一种自发演化到临界态的自组织临界特性，这个自组织临界点恰对应着岩石工程整体稳定性丧失的临界点，因此对其研究无疑是件有意义的工作，它将为维持岩石工程的稳定性发挥重要的作用。为了能对极具复杂性，非线性，随机性，模糊性，不确定性的岩石介质巨系统的自组织临界行为进行有效模拟，我们可把岩石试件和加载机构看作一个小的岩石介质系统，针对岩石试件微裂纹的演

化过程进行跟踪模拟，从中可以发现岩石破裂过程的自组织临界行为，进而对其临界特性进行详细研究。

2.2.1 岩石试件的非均匀性

岩体是经过漫长地质演化过程而形成的复杂结构体，由于地质构造运动的影响，使其内部存在大量的断层、节理、层理等地质弱面。这些弱面（损伤）的存在，严重破坏了岩体的整体性，极大地影响着岩体的变形特征和强度特征。岩石介质内部也因地质成因作用的不同存在着许许多多、大小不一、形状各异的缺陷与损伤，如矿物解理、微裂隙、粒间空隙、晶格缺陷、晶格边界等内部微缺陷。从天然成因作用来说，岩石从微观到宏观上都是一种非均匀介质，岩石介质的最基本特征之一就是非均匀性。同时也必须注意到，岩石的非均匀性也不是一个绝对的静态变量，而是随时间或随外部载荷作用历史而发展的动态变量。在岩石内部原有非均匀性和内部缺陷的基础上，由于外部载荷的作用而发生破裂或内部缺陷发生扩展也将进一步增加岩石介质自身的非均匀程度。即使是相对均匀的岩石介质，由于破裂的出现，岩石介质的物理力学性质也将从均匀向非均匀演化^[43,44]。

岩石介质的非均匀性在材料物理力学性质上表现为空间上的非连续性，对此特性进行数学描述是非常困难的，但是如果将岩石介质进行离散，则可以利用统计的方法进行近似的描述。如图 2.2 所示，我们取一岩石试样的截面，将其划分成若干基元 V 。与宏观尺度比，基元体 V 的尺度要足够小，小到可以认为它的性质对整体宏观介质而言，其力学性质的影响可以被忽略。但是，与微观尺度比，基元体的尺度又要足够大，大到能够包含足够多的矿物晶体、胶结物晶体和微缺陷，使基元体 V 相对这些矿物晶体、胶结物晶体和微缺陷而言可以被看成是均匀的。这样，基元体的物理力学性质可以看作是构成组分物理力学性质的平均，基元体的物理力学性质是可以通过某种试验方法直接或间接测定的，并且其变形和应力可用基于均匀介质的连续介质理论来描述。由于基元内所包含矿物、胶结物和微缺陷的物理力学性质的差别，基元体的物理力学性质（弹性模量、强度、泊松比和容重等）

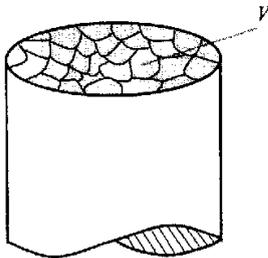


图 2.2 基元体示意图
Fig. 2.2 Element sketch map

的连续介质理论来描述。由于基元内所包含矿物、胶结物和微缺陷的物理力学性质的差别，基元体的物理力学性质（弹性模量、强度、泊松比和容重等）

不能保持一致，有强有弱。也就是说，各基元体的性质在空间分布上是不连续的，这样我们就可以采用统计方法对其非均匀性进行数学描述了。

1939年，Weibull 率先提出了用统计学描述材料非均匀性的方法。他认为精确测量破坏时的强度是不可能的，但是在给定应力水平下发生破坏的概率是可以定义的。基于这样的思想，并通过大量的试验，Weibull 建议使用具有门槛值的幂函数来描述强度极值分布规律，后来这种分布在统计学中被称为 Weibull 分布，它对尺度效应，强度理论的研究起到了重要作用。此后，有许多学者在这方面做了进一步的工作(Hudson, Fairhurst, 1969; 唐春安, 1993) [3,45]，但基本上都是在 Weibull 等人的理论框架之内。

在 **RFPA** 系统中，我们不仅假设这些离散的基元体物理力学性质的分布具有统计性，而且引入 Weibull 统计分布函数来进行描述，即

$$\varphi(\alpha) = \frac{m}{\alpha_0} \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^{m-1} \cdot e^{-\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)^m} \quad (2.3)$$

在这里 α 代表岩石介质基元体物理力学性质（强度、弹性模量、泊松比和容重等）， α_0 代表微元体力学性质平均值， m 定义了分布函数的形状，其物理意义反映了岩石介质的均质性，定义了岩石介质的均匀性系数， $\varphi(\alpha)$ 是岩石基元体力学性质 α 的统计分布密度。式 (2.3) 反映了岩石细观力学非均匀性的分布情况。随着均值性系数 m 的增加，基元体的力学性质将集中于一个狭窄的范围之内，表明岩石介质的性质比较均匀；而当均匀性系数 m 值减小时，则基元体力学性质分布范围变宽，表明岩石介质的性质趋向非均匀。图 2.3 给出了不同均质度系数岩石介质的强度或弹性模量的分布图（ α 代表强度或弹性模量等力学性质参数）。

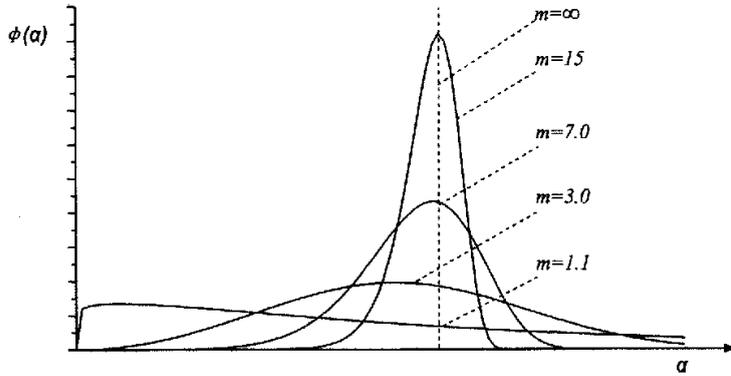


图 2.3 具有不同均质度系数材料基元体力学性质分布形式

Fig. 2.3 The distribution shape of element mechanical property with different heterogeneity index

为了满足岩石介质的非均匀性要求，RFPa 系统采取 Monte-Carlo 方法和统计描述相结合对离散的基元进行初始化赋值^[4,6]。设网格中所有基元的弹性模量最大阈值为 E_0 ， $\Phi(E)$ 代表了具有某弹性模量 E 基元的分布值，基于式 (2.3) 弹性模量 Weibull 分布函数的积分为式 (2.4)：

$$\Phi(E) = \int_0^E \phi(E) dE = 1 - e^{-\left(\frac{E}{E_0}\right)^m} \quad (2.4)$$

其中， $\Phi(E)$ 为具有弹性模量 E 的基元的统计数量。式 (2.4) 统计分布构成的基元组成一个样本空间，阈值 E_0 不变情况下，由于 m 值的差别，积分空间分布却不完全一样。这些基元构成的岩石类材料在宏观上性质可能大体一致 (E_0 相同)，但是由于细观结构的无序性，使得基元的空间排列方式有显著的不同。这种细观上的无序性正好体现了岩石类材料独特的离散性特征。图 2.4 (a) 是 Weibull 分布密度函数，(b) 是 Weibull 分布积分函数。一般物理空间随机分布的无序性可以通过 Monte-Carlo 方法来实现，其产生方法是，基于式 (2.4) 产生一组在 (0, 1) 区间上均匀分布的随机数序列 $\{\gamma_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 。对于任何 γ_i ，则对应于图 2.4 (b) 横坐标 E_i ，于是存在一个与 $\{\gamma_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 相对应的随机数序列 $\{E_i | i=1, 2, \dots, n\}$ ；由此对应图 2.4 (a) 横坐标也存在一个随机数序列 $\{E_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 。那么由随机数序列 $\{\gamma_i\}$ 映射一组弹性模量参数序列 $\{E_i\}$ 。这一组基元弹性模量参数随机序列逐一赋予网络中的每一个基元，其它力学参数 (强度、泊松比、容重) 同样用此种方法赋值。这种既具有统计

性，又具有随机性（无序性）的基元力学参数赋值方法满足了网格中基元力学参数非均匀性和随机性的要求。

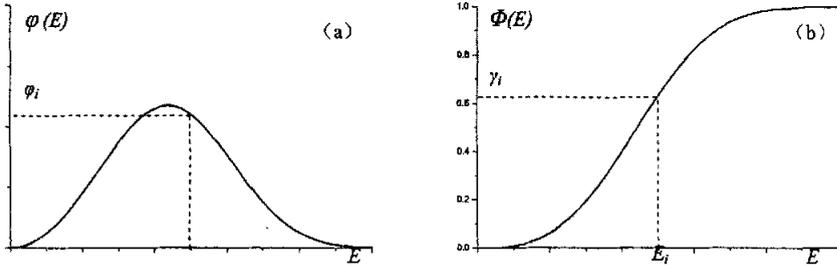


图 2.4 (a) 基元弹性模量 Weibull 分布密度函数, (b) 积分函数
 Fig. 2.4 (a) Weibull distribution function of element elastic (b) Integral function

图 2.5 是两种不同均质度材料依据上述方法完成的 RFPA^{2D} 的随机赋值的弹性模量分布形式。图中基元的亮度代表了弹性模量值的大小，颜色越亮，弹性模量值越高，反之，则越低。由于均质度系数低，(a) 中基元弹性模量值相差很大，表现出很强的离散性；(b) 中基元之间弹性模量值差别小，整体上亮度趋于一致。

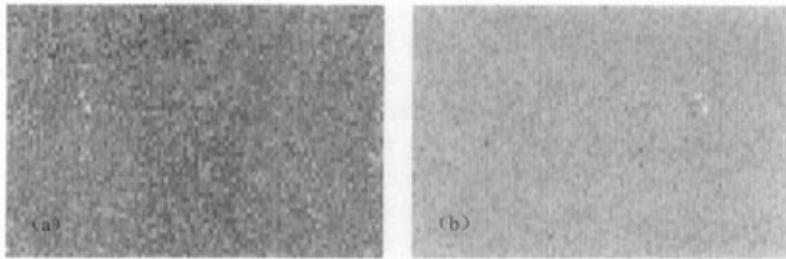


图 2.5 材料的弹性模量空间分布形式 (a) $m=1.5$; (b) $m=8.0$ (RFPA^{2D} 模拟结果)
 Fig. 2.5 Spatial distribution of material elastic (a) $m=1.5$; (b) $m=8.0$ (simulated by RFPA^{2D})

2.2.2 岩石试件仿真加载系统

这套被称之为“数值材料试验机”的岩石破裂过程分析系统=构造实体模型+应力分析求解器+渐进破坏模型+后处理器。在这个“设备”中构造实体模型相当于制备试样。首先是虚拟制造各种材料，然后加工其几何形状。应力分析求解器相当于加载机，完成各种类型的加载（位移、应力、拉伸、压缩、剪切

等)。渐进破坏模型相当于材料试样对外载荷或环境因素作用而作出的力学响应。后处理器则是一个灵敏的测试和数据显示系统。

如图 2.6 所示,通过采取 Monte-Carlo 随机赋值方法按照 Weibull 分布密度函数对离散的基元进行初始化赋值后的岩石试件在一定程度上可以满足岩石介质系统的非均匀性要求。在非均匀岩石试件的上下两端是刚性加载机构的加载端部,其上可以施加载任意外部荷载作用于岩石试件。因此,整个系统可以看作是一个简单的岩石介质系统,处于一个开放的环境状态下。这套仿真系统可以克服普通材料试验机刚度不够的缺点,而且可以任意调整材料力学性质参数,实现对各种岩石试件的加载。

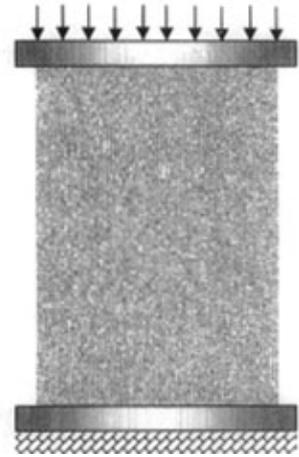


图 2.6 岩石试件仿真加载系统
Fig. 2.6 Simulated loading system of rock specimen

2.2.3 分析软件系统自组织临界现象模拟原理

在 RFPA^{2D} 系统中利用有限元作为应力分析求解器,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} 系统将进行下一个加载步的应力迭代计算和相变分析。因此,在 RFPA^{2D} 系统中,每一个加载增量步可能进行多个计算循环,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,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。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,表示岩石试件在此应力状态下累进性破坏越强。这样,岩石试件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。

2.3 岩石破裂过程分析 RFPA 系统功能概述

2.3.1 RFPA 基本原理

RFPA 系统是一个基于弹性损伤理论,以弹性力学为应力分析工具以及修正后的库仑 Coulomb 破坏准则为介质变形和破坏分析模块的数值分析软件系统,其基本原理是^[46]:

(1) 通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;

(2) 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;

(3) 采用修正后的库仑 (Coulomb) 准则 (包含拉伸截断 Tension cut-off^[47]) 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;

(4) 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。

2.3.1.1 网格剖分

RFPA 系统选取等面积四节点的四边形有限元单元剖分计算对象。为了使问题的解答足够精确,RFPA 系统要求模型中的离散的单元必须足够小 (相对宏观介质),以能足够精确地反映介质的非均匀性性质。但它又要足够大 (包含一定数量的矿物和胶结物颗粒,以及微裂隙、孔洞等细小缺陷),这一要求主要是为了保证剖分后的单元性质尽量接近基元性质。因此,作为子系统的单元实际上是一种介于宏观与微观之间的细观尺度。

2.3.1.2 基元赋值 (参加 2.2.1 节所述)

2.3.1.3 应力计算

在 RFPA^{2D} 系统中,整个分析模型被离散成具有若干不同物理力学性质的

基元。为了求解各个基元的应力、应变状态，各基元之间需要满足力的平衡、变形协调和一定应力、应变关系（物理方程）。在众多的有关应力、应变的数值计算方法中，有限元无疑是一种比较理想的数值计算方法。它首先将一个连续的介质离散化成由诸多个有限大小的离散基元组成的结构体，然后通过力的平衡方程、几何方程和物理方程求解各个离散单元体的力学状态。

2.3.1.4 相变分析

在 RFPFA^{2D} 系统中，完成基元的应力、变形计算后，程序便转入相变分析。相变分析是根据相变准则来检查材料中是否有基元相变，并依据相变的类型对相变基元采用刚度特性退化（处理分离）或刚度重建（处理接触）的办法进行处理。最后形成新的、用于下一步计算的整体刚度矩阵的材料物理力学参数。

(1) 相变法则

到目前为止，对于如何选择破裂准则，还没有一个统一的认识^[46]。考虑到岩石类脆性材料的构成基元是均匀、连续的，而且抗拉强度远小于抗压强度，本文采用了修正后的库仑（Coulomb）准则（包含拉伸截断 Tension cut-off^[47]）作为基元相变判据，应力关系见图 2.7。其中 C_0 代表基元的 I 类相变阈值， T_0 代表基元 II 类相变阈值。其数学表达式（2.5）如下：

$$\begin{cases} \sigma_1 - \frac{(1 + \sin\varphi)}{(1 - \sin\varphi)} \sigma_3 \geq \sigma_c, \sigma_1 \geq \sigma_c \left(1 - \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot \frac{1}{\lambda} \right) \\ or \\ \sigma_3 \leq -\sigma_t, \sigma_1 \leq \sigma_c \left(1 - \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot \frac{1}{\lambda} \right) \end{cases} \quad (2.5)$$

式中 σ_c ($\sigma_c = C_0$) 为 I 类相变阈值， σ_t ($\sigma_t = T_0$) 为 II 类相变阈值， φ 为摩擦角。其中 $\sigma_c = \lambda |\sigma_t|$ ， λ 为拉压比。同时需要注意的是：库仑准则是摩擦准则，在这个准则中正应力必须满足 $\sigma \geq 0$ 的关系，才满足其物理假设。所以只有当 $\sigma_1 \geq \sigma_0$

($\sigma_0 = \sigma_c \left(1 - \frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \cdot \frac{1}{\lambda} \right)$) 时（见图 2.7），库仑准则才真正有效。而当 $\sigma_1 \leq \sigma_0$ 时，

库仑准则的物理假设不再被满足，而是满足单轴拉伸准则。

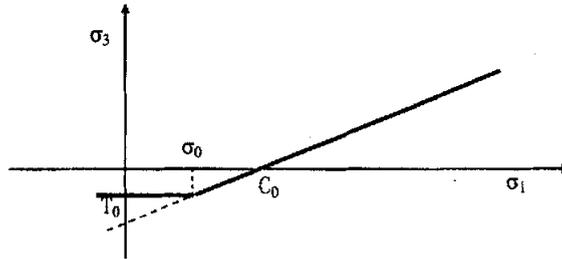


图 2.7 带拉伸截断的库仑准则示意图

Fig. 2.7 The sketch map of Coulomb criterion with tension cut-off

相变分析则是根据一定的相变准则来检查材料中是否有基元相变。对相变基元采用刚度特性退化（包括处理分离）和刚度重建（包括处理接触）的办法进行处理。在 RFPA^{2D} 系统的各组成模块中，基元相变分析是进行断裂过程分析的基础。

(2) 基元特性处理

RFPA 系统存在着三种基元：基质基元，空气基元，接触基元。所谓基质基元，就是基元在模型中的当前功能为实体介质，它的特性由岩石的本构关系来描述。所谓空气基元，就是指基元在模型中的当前功能为虚体特性。当基元介质发生断裂后，RFPA 系统用弹性模量极低的基元性质取代原有的实体基元的性质，由于新的基元弹性模量极低，可以近似地认为实体介质的行为已不存在。所谓接触基元，就是指基质基元破裂后，当裂隙两面的介质在压应力作用下产生接触时，则可以通过激活空气单元，使其刚度增加，起到传递应力的作用，但接触基元只能传递压应力，而不能传递拉应力。即当存在拉应力时，接触基元立刻转化成空气基元。

在特定的应力状态下，三种基元的特性可用图 2.8 来表示。图中各参数的意义分别为： σ_c —I类相变阈值， α —I类相变残余阈值， σ_t —II类相变阈值， α —II类相变残余阈值； ϵ_c 最大压应变， $\epsilon_{max,c}$ 极限压应变，当基元的压缩变形超过这个值时，基元的刚度将增加，变成接触基元。 ϵ_t 最大拉应变， $\epsilon_{max,t}$ 极限拉应变，当基元的拉伸变形超过这个值时，基元将变成裂隙基元。这里 α ， σ 控制了相变点。

由图 2.8 可知：（1）在基元相变之前，它代表实际的完好材料，这时候它具有线弹性的简单特性，见图 2.8 的第I阶段；（2）在基元相变之后的一定

范围内 ($\epsilon_c \leq \epsilon \leq \epsilon_{max_c}$, $q \leq \epsilon \leq \epsilon_{max_t}$), 它代表相变后阶段的材料, 这时候, 它具有残余阈值特性, 见图 2.8 的第II阶段; (3) 如果基元被高度双向挤压, 则基元犹如破裂后被挤压的材料, 刚度明显提高, 起着传递相临基元应力的作用 ($\epsilon \geq \epsilon_{max_c}$); 如果相变之后的基元承受拉应力的作用, 则不再将基元看成是它所代表的材料, 而是处理成裂缝 ($\epsilon \geq \epsilon_{max_t}$)。如果裂缝再次闭合产生接触时, 基元又可再度被激活成相变后被挤压的材料; 再次发挥传递上下左右单元应力的作用, 见图 2.8 的第III阶段。

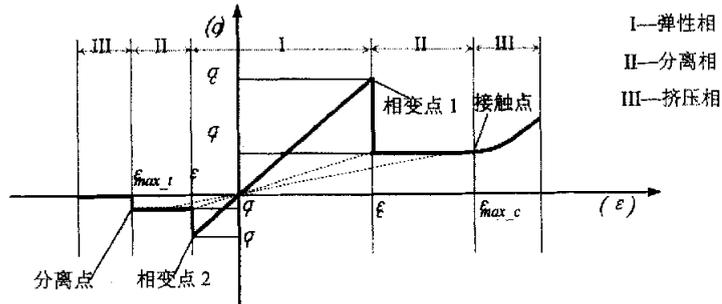


图 2.8 基元物理力学行为

Fig. 2.8 Element mechanical behavior

2.3.2 RFPA 分析过程流程图

基于以上章节的叙述, RFPA^{2D}的工作程序由三部分工作完成: (1) 实体建模和网格剖分。用户选择基元类型, 定义材料物理性质和力学响应行为, 进行实体建模及网格剖分; (2) 应力、应变分析。依据用户输入的边界条件和加载控制参数, 以及输入的基元性质数据, 形成刚度矩阵, 输出有限元分析结果 (应力、节点位移); (3) 基元相变分析。运用相变准则对有限元产生的结果进行相变判断, 然后对相变基元进行弱化处理, 最后形成下一步计算刚度矩阵所需的数据文件。整个工作流程可见图 2.9。对于每一步给定的位移增量, 首先进行应力计算。然后, 根据相变准则来检查模型中是否有相变基元。如果没有, 继续增加一个位移增量, 进行下一步应力计算。如果有相变基元, 则根据基元的应力状态进行刚度退化处理, 然后重新进行当前步的应力计算, 直至没有新的相变基元出现。重复上述过程, 直至整个材料产生宏观破裂。在 RFPA 系统执行过程中, 对每一步有限元计算采用全量加载, 计算步之间的有限元计算是相互独立。

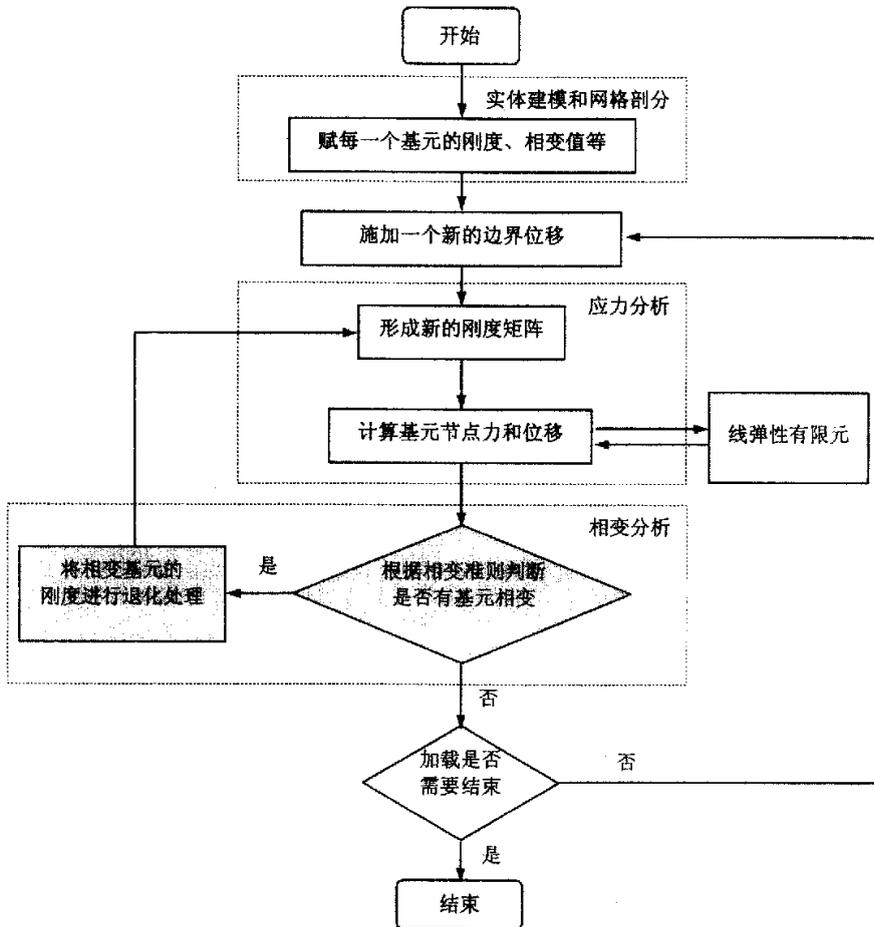


图 2.9 RFPA^{2D} 程序流程图
Fig. 2.9 The flow chart of RFPA^{2D} program

2.3.3 RFPA 主要功能

岩石破裂过程分析系统 (RFPA^{2D}) 主要功能包括应力分析和破坏分析两个方面。

(1) 应力分析

应力分析是工程设计的基础，特别是复杂的、大型的岩土工程尤其如此。

一般来讲，解析理论只能得到几种断面几何形状比较简单的围岩应力场的理论解，然而实际工程岩体涉及到的断面却是非常复杂，充满多种结构面的非均匀岩石体系，因此，用基于有限元理论，运用现代计算力学原理和计算机可视化技术的 RFPA 系统作为应力分析工具，其优越性不言而喻。图 2.10 给出了开切卸压槽后的圆形巷道围岩数值模型（左）和剪应力分布光弹图（右）数值模拟结果（图中水平压力与垂直压力之比为 0.15: 1）。

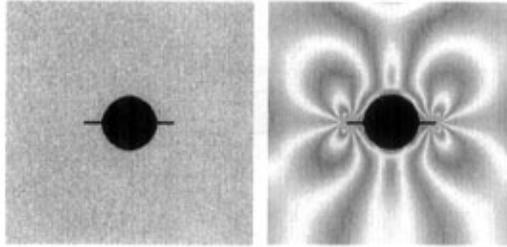


图 2.10 开切卸压槽后的圆形巷道围岩剪应力分布光弹图数值模拟结果（RFPA^{2D}模拟结果）
Fig. 2.10 The shear stress contour figure of surrounding rock for circular tunnel after the cutting of unload groove (simulated by RFPA^{2D})

(2) 应力分析

破裂分析是 RFPA^{2D} 系统的重要组成部分和主要特点。RFPA^{2D} 提供的相变分析模型适用于材料从加载初期损伤到后期宏观裂纹形成扩展的破裂全过程的分析。通过赋予介质不同构成部分的力学性质参数和相变后力学响应参数，可以完成岩石、混凝土和复合材料的破裂过程分析。

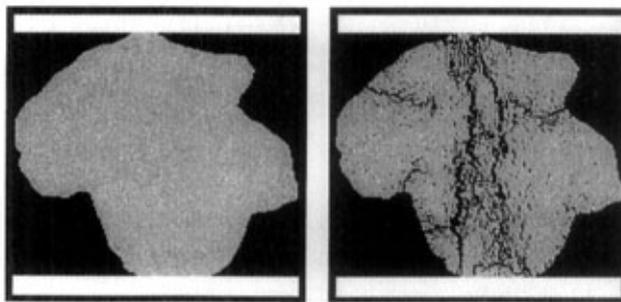


图 2.11 岩石颗粒破坏分析
Fig. 2.11 Failure analysis of rock grain

2.4 小结

首先在对自然界中几种常见的自组织现象如流体力学中的贝纳（Bénard）对流现象，化学振荡现象，半导体器件中的耿氏（Gunn）效应，石英管中明暗相间的光环，激光器中产生的单色激光，鱼种类的周期性变化以及日常生活中常见的松花蛋中的漂亮“松花”进行介绍的前提下，这样就给予了自组织临界特性以及岩石破裂过程的自组织临界特征一个更为清晰的概念，表明必须具有时空分形特征和长程关联现象的系统才能称其为自组织临界系统，同时提出了自组织临界性的动力学涌现机制，指出了自组织临界特性的常见应用领域。

接下来，阐明 RFPA 分析软件系统可以充分考虑岩石介质系统的非均匀性，可以通过构造小的岩石试件加载系统来仿真模拟大的岩石介质系统。在 RFPA 系统中，对于同一加载增量来说，在别无其它外界因素作用下，后面计算循环所得到的单元破裂完全是由于系统（整个岩石试件加载系统）内部先前单元破裂引起的应力转移所致，从而使得 RFPA 系统能直观地反映岩石试件的累进性破坏进程，这同时也充分地证明了 RFPA 系统能够有效地对自组织临界现象进行仿真模拟。

最后扼要介绍了 RFPA 分析软件系统以线弹性连续损伤理论研究非均匀非连续介质的非线性变形行为的基本原理，分析流程以及应力分析和破坏分析两个方面的主要功能。

第3章 岩石破裂过程自组织临界现象仿真模拟及其分析

在长期的地质作用下,岩石材料内部不可避免地存在着或多或少、大小不一、形状各异的缺陷与损伤。小到岩石试件的细观弱缺陷,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,从而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已对岩石破裂过程的非线性行为给予了广泛的关注,提出了许多的非线性理论研究方法,再加上计算机技术的飞跃发展,使得人们利用计算机作为研究手段对岩石非线性行为作更深层次的研究成为可能。

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微裂纹发生、发展的全过程入手,系统完整地研究断裂破坏性质转化的内在本质规律。本节运用 RFPA^{2D} 作为研究手段,以岩石单轴压缩数值试验为例,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,这对于探索岩石工程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。

3.1 岩石破裂过程的自组织临界特性

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强烈的非线性特征,其中,最为明显的就是累进性破坏现象和扩展的裂纹及其破裂过程中产生的声发射总是由随机、分散分布自发组织起来向最终破裂面丛集,形成宏观上的有序结构,表现出由无序向有序演化的自组织特征^[7-10,30-36]。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,岩石的变形突然从稳定破裂阶段跃升为不稳定破裂,在此阶段最为明显的特征就是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。岩石破裂过程中,裂纹由最初的随机分布向破裂面集中演化的现象实际上是一耗散系统从无序向有序演

化所表现出的临界特性。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 buildup)，应力转移(Stress transference)，应力阴影(Stress shadow)，简称“3S”现象；在高应力集中区产生的破裂单元数较多，在应力阴影区产生的破裂单元数则较少。

3.2 岩石破裂自组织临界行为理论分析

20 世纪 70 年代末期，Lemaitre 等^[49]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：

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

$$\text{或 } \sigma_e = \sigma / (1-D) \quad (3.1)$$

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 (3.1) 可知，随着加载过程中所加实际应力的不断增大 (σ 增大)，岩石试样中破坏单元个数增加 (即 D 不断增大)，两者的共同作用，使得式 (3.1) 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 (即有效应力 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，在刚开始加载时，每个基元所承受的有效应力不是很大，基元破裂对周围单元造成的影响也不是很大，单元破裂呈随机分布。而随着外界荷载的增加，单元储备的应力越来越大，一旦单元破裂，将释放巨大的能量，这时单元破裂将不仅仅是对周围临近单元造成较大影响，而且会波及到远处很远的单元，形成长程关联现象，所以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，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。

3.3 岩石破裂过程自组织临界现象仿真模拟

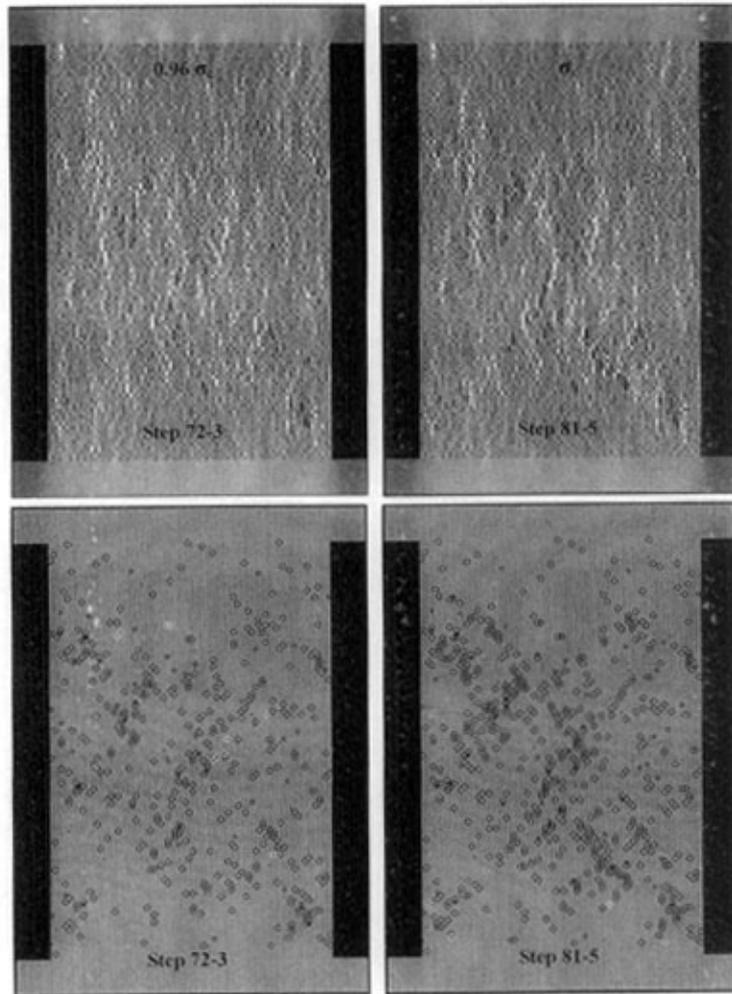
3.3.1 模型建立

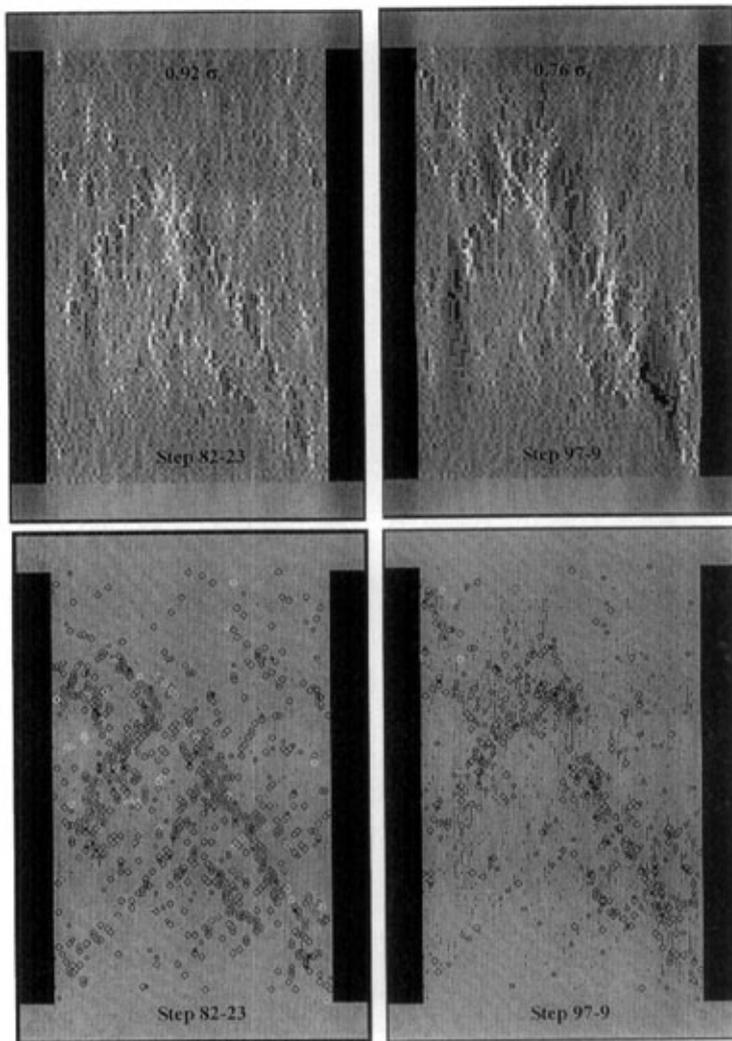
试验采用平面应力模型来模拟岩石在单轴压缩条件下的破裂过程，模型尺寸为 $120\text{mm} \times 80\text{mm}$ ，共划分为 $120 \times 80 = 9.6 \times 10^3$ 个细观单元，试样材料力学性质参数见表 3.1。在试样的两端添加了两块尺寸为 $10\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的加载垫板，其弹性模量为岩石试件的 10 倍，抗压强度为岩石试件的 20 倍，这样做主要是为了能更好的模拟实验室试样和加载板之间的摩擦效应，再者就是消除边界单元破坏造成受力不均匀的端部影响。在岩石整个加载过程采用位移控制的分布压缩加载方式，每步加载位移量 $\Delta s = 0.001\text{mm}$ 。

表 3.1 材料力学性质参数
Table 3.1 Material mechanical property

均值度系数	m	1.5	
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	150	MPa
抗拉强度	f_t	15	MPa

3.3.2 模拟结果





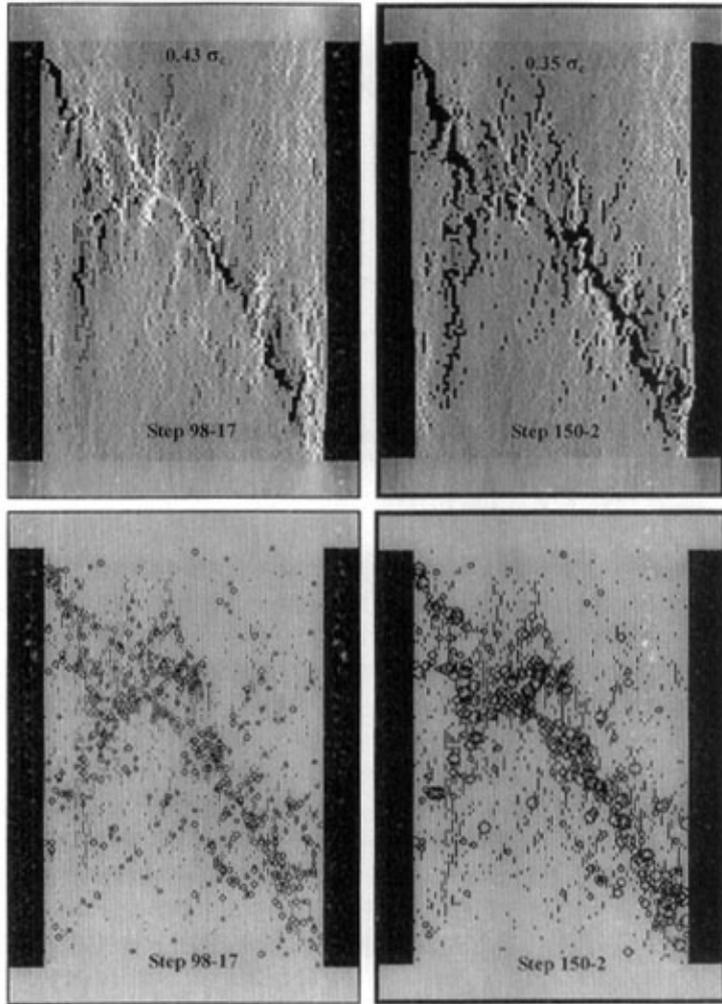


图 3.1 岩石单轴压缩破裂渐进过程
Fig. 3.1 Rock failure progress under uniaxial compression

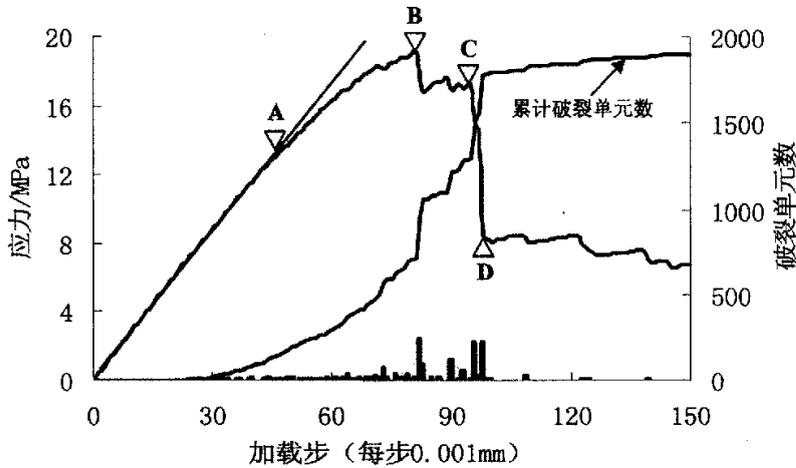


图 3.2 单元破裂事件与加载关系曲线
Fig. 3.2 The relationship of element failure event and loading step

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）及其破裂单元所产生的声发射事件分布情况（下排，圆圈越大表示破裂释放的能量越大）如图 3.1 所示，单元破裂事件与加载关系曲线如图 3.2 所示。由图 3.2 可知，岩石在整个加载过程中，可分为四个阶段^[1]：（1）弹性变形阶段至微裂隙稳定发展阶段（OA 段），岩石试件在加载初期处于应力积累（stress buildup）阶段，以弹性应变能形式储存试件体内，该阶段的应力与加载步曲线近似直线型。随着外部加载的逐步进行，当荷载加到第 25 步时，试件里的少量缺陷单元就开始产生破坏，微破裂进入稳定发展阶段。（2）屈服变形阶段（AB 段），A 点是岩石试件从弹性变形变为塑性变形的转折点，即为屈服点，在加载到第 52 步取得，相应于该点的应力为屈服应力（屈服极限），其值为峰值载荷的 75%。刚进入屈服变形阶段时，试件单元破坏仍呈随机、分散分布，如图 3.1 第 72-3 步所示。而在接近峰值强度时，岩石破裂表现出微弱自组织现象，也即是说岩石开始进入微破裂局部化发展阶段，如图 3.1 中第 81-5 步破裂单元分布图的中间区域所示。正是由于岩石内部随机分布的相变基元数量的增加和局部微裂纹的形成，岩石试件的弹性模量逐渐降低，从而使得应力—加载步曲线进入了非线性阶段。在本阶段的上界点，也就是图 3.2 加载曲线的 B 点，外部荷载进行到第 81 步，取得整个加载过程的峰值载荷，应力值为 19.14MPa，

但此时岩石仍处于稳定状态。(3) 应变软化阶段 (BC 段), 随着加载的继续进行, 在峰值载荷后, 由于微破裂局部化行为的快速发展, 在加载到第 82 步时产生了一个小的应力降, 相对于峰值载荷的降低了 8%, 如图第 82-23 步所示。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的应力转移 (stress transference) 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, 表明该加载步试件累进性破坏越强。显然第 82 步岩石试件产生了累进性破坏现象, 这一点也可从图 3.2 的破裂单元数得到印证。经过岩石内部微破裂的充足发展, 岩石内部结构受到极大损害, 在外部荷载加到第 97 步 (对应着图 3.2 的 C 点) 时取得岩石的长期强度, 这也是岩石破裂过程的自组织临界点。岩石此时处于一种非常危险的状态, 只要外界继续给予一定扰动 (位移荷载), 岩石微破裂将表现出连锁反应式的发展, 即使所加荷载保持恒定, 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。这样岩石最终在 D 点形成宏观剪切破裂面, 整体发生断裂而失稳, 其承载能力急剧下降, 仅为峰值强度的 43%, 这也即是岩石破裂灾变理论所描述的灾变点^[3]。参照图 3.1 第 98 步破裂单元分布图, 我们可以明显的看到岩石破裂过程的自组织临界特征: 破裂单元在最终宏观破裂面丛集, 岩石破裂出现长程关联现象, 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 (stress shadow)。(4) 失稳后的残余变形阶段 (D 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。

3.4 岩石破裂自组织临界特征统计分析

只有搞清楚了岩石破裂过程的临界特性才能更清楚地认识岩石工程的失稳特征, 对岩石工程失稳作出有指导性的预测预报工作。如第 2.1.2 章节所述, 自组织临界性系统除了规模与频率满足负幂律关系外, 在时间域上呈现闪烁噪声 (“flicker noise”或 “1/f 噪声”, 时间上的标度不变性和长程时间关联) 和空间域上的分形结构^[6]。我们可以用时间域上的表征: 标度不变性和长程相关性, 空间域上的表征: 分形结构, 来作为证明系统具有自组织临界性的有力证据。

为了更好地说明自组织临界特性的存在, 在 RFPA^{2D} 系统中, 我们最近特

意开发了一项新功能，就是可以统计每个加载步产生的破裂集团所包含的破裂单元数目及其产生该大小破裂集团的数目，而不是像以前那样只笼统地统计每步所产生的总破裂单元数。在 RFPA^{2D} 的此项功能中，若两个相邻的小方块都产生了微破裂，我们则定义它们属于同一破裂集团，然后统计每步产生了多少个相同大小的破裂集团数，这样我们就可以借助破裂集团的大小及其产生频率来详细研究岩石破裂过程的自组织临界特征。

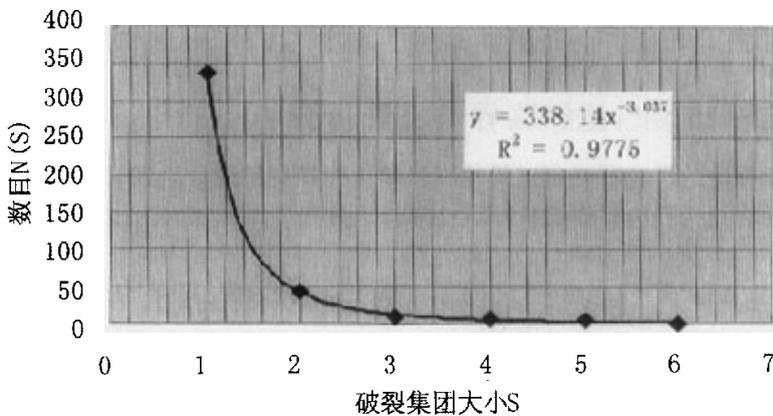
3.4.1 负幂律分布

根据自组织临界性理论，处于自组织临界状态的系统，当受到外部任何一个微小的扰动都可能发生连锁反应式的“雪崩”行为^[49,50]，“雪崩”事件的规模表现为大事件少，小事件多，那么以 A 为尺度的事件发生频率 N 可以表现为：

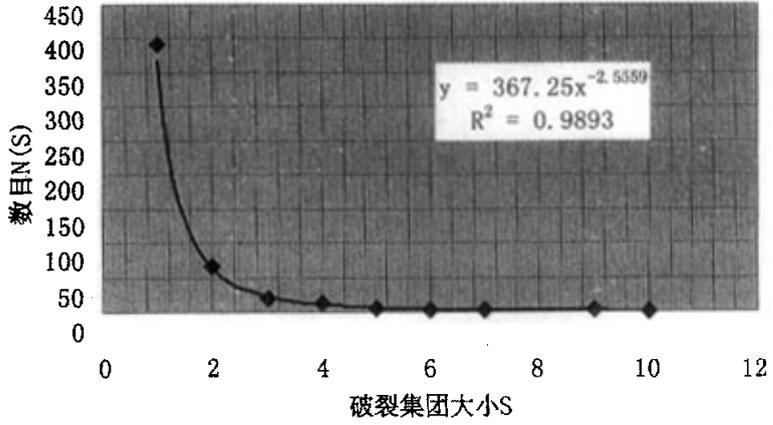
$$N \propto A^{-\alpha} \quad (3.2)$$

其中，N 是雪崩事件的发生次数，A 是该事件的规模，而 α 是常量。这里频率与规模的关系为负幂律，即大事件与小频率伴生，小事件与高频率伴生。

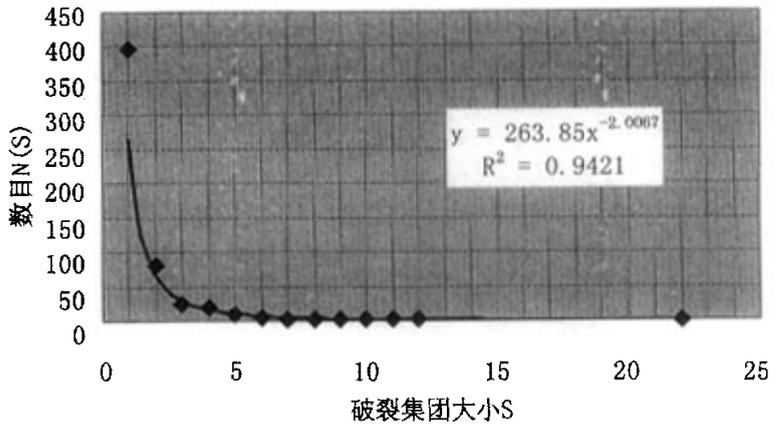
在这里，我们假设用 $S=1,2,3\dots$ 表示破裂集团的大小，N(S) 表示破裂集团大小为 S 的数目。显然，破裂单元集团大小 S 即为式 (3.2) 中的规模 A，与破裂单元集团大小相对应的数目 N(S) 即为式 (3.2) 的次数 N。表 3-3-2 给出了整个破裂过程与图 3.1 相对应的几个关键步所产生的破裂单元集团大小及其相应数目，图 3.3 是表中所列步数相对应的采用最小二乘法得到的幂指数回归拟合曲线。



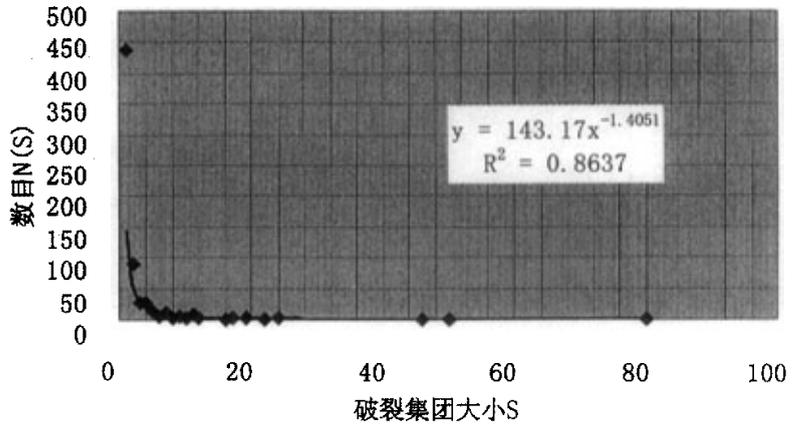
(a) Step 72



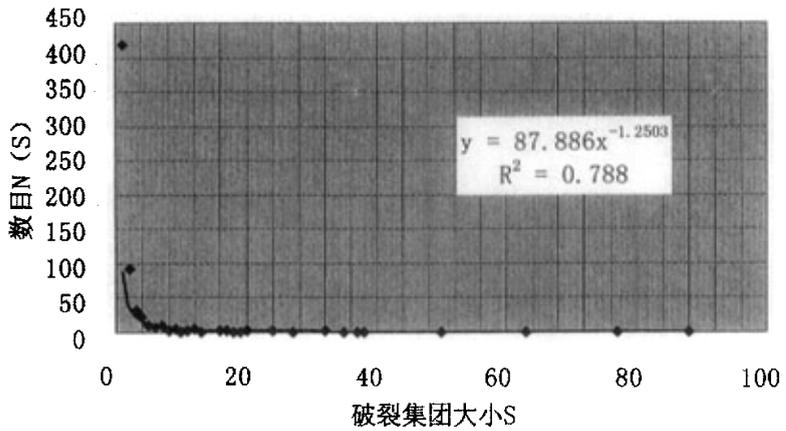
(b) Step 81



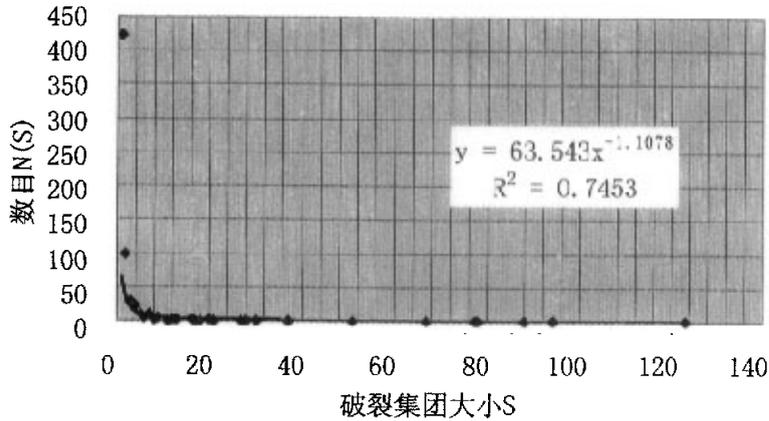
(c) Step 82



(d) Step 97



(e) Step 98



(f) Step 150

图 3.3 整个破裂过程破裂集团大小与其相应数目幂指数回归拟合曲线
Fig. 3.3 The relationship between damage group size and corresponding counts

从图 3.3 岩石整个破裂过程破裂集团大小的幂指数回归拟合曲线，我们可以看到幂函数公式中的幂指数是不一样的，不同应力阶段对应不同幂指数值。由此可见，岩石在整个破裂过程中的微裂纹分布基本都满足负幂律分布，具有自相似结构的分形特征。但是当接近自组织临界状态时，其幂指数却变化不大，大致在 1.5 左右，随着应力增加，其幂指数有所减小，但值都大于 1。这与地震学上所得到的常见的 α 值在 1.5 左右的结论相一致的。当 $R^2=0.7453$ 时，其相关系数 $R=0.8633$ ，可见其拟合相关性是非常好的。

表 3.2 整个破裂过程破裂集团大小及其相应数目
Table 3.2 The damage group size and corresponding counts in the whole failure progress

Step	72		81		82		97		98		150	
	S	N(S)	S	N(S)								
1		338	1	391	1	397	1	438	1	419	1	423
2		43	2	66	2	80	2	91	2	93	2	99
3		9	3	19	3	25	3	27	3	31	3	30
4		6	4	12	4	20	4	27	4	21	4	23
5		4	5	6	5	9	5	13	5	9	5	9
6		1	6	3	6	5	6	6	6	7	6	6
			7	2	7	2	7	11	7	9	7	9
			9	2	8	3	8	3	8	3	8	2
			10	1	9	3	9	6	9	4	9	4
					10	3	10	3	10	1	11	1
					11	3	11	7	11	3	12	3
					12	2	12	4	12	5	13	2
					22	1	16	1	13	1	16	2
							17	2	16	2	17	1
							19	2	17	2	18	1
							22	1	18	1	20	2
							24	2	19	1	21	1
							46	1	20	2	27	1
							50	1	24	2	28	1
							80	1	27	1	30	1
									32	2	37	1
									35	1	51	1
									37	1	67	1
									38	1	77	1
									50	1	78	1
									63	1	88	1
									77	1	94	1
									88	1	123	1

3.4.2 空间域的分形结构

分形是一种复杂的几何形体，但并不是所有复杂的几何形体都是分形，唯有具备自相似结构的那些几何形体才是分形。一个系统的自相似性是指某种结构或过程从不同的空间尺度或时间尺度来看都是自相似的，或者某系统或结构的局域性质或局域结构与整体类似。另外，在整体与整体之间或部分与部分之间，也会存在自相似性。

自相似性是指把要考虑图形的一部分放大，其形状与全体（或大部分）相同。如果经过放大，其形状与总体完全一样，称之为完全自相似，如果经过放大，其形状总体与（或大部分）相同，称之为统计意义上的自相似^[38-41]。

自相似性可表示为，当把尺度 r 变换为 λr 时其自相似结构不变，只不过是原来的放大或缩小， λ 称为标度因子，这种尺度变换的不变性称为标度不变性，所改变的只是外部的表现形式^[41]。

由上述频率与规模的负幂律分布可知，破裂集团大小及其破裂集团数满足负幂律函数：

$$D(V) = KV^{-\alpha} \quad (3.3)$$

我们用 λV 来替代上式 (3.3) 的 V ，作如下变换：

$$\begin{aligned} D(\lambda V) &= K(\lambda V)^{-\alpha} \\ D(\lambda V) &= K\lambda^{-\alpha}V^{-\alpha} \\ &= \lambda^{-\alpha}KV^{-\alpha} \\ &= \frac{1}{\lambda^{\alpha}} D(V) \end{aligned}$$

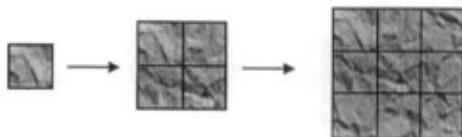
从上面变换我们可以看到，负幂律函数在作标度变换后其分布函数的曲线形式基本不变，只不过是原来的放大或缩小，可以看作是一种自相似结构。

下面举个简单的例子来说明岩石破裂过程破裂集团分布的自相似性。

假设破裂集团大小和数目满足最简单的平方关系： $y=x^2$ 。

下面我们取几个简单数据来说明上述幂函数具有自相似特性（分形特性）。

x	1	2	3
y	1	4	9



显然，上述图形非常明显的呈自相似特征。

在本单轴压缩数值试验中，岩石破裂过程产生的破裂集团（微裂纹）满足都满足负幂律分布，是一种统计意义上的自相似，但不是完全自相似。由此可见，岩石破裂过程产生的微裂纹在演化过程中总呈现出分形特征，文献也有类似结果。然而通过本数值试验可以发现，不同应力变形阶段的 α 值是不同的，在接近自组织临界点（岩石的长期强度）时，分形结构极为明显，其 α 值接近 1.5。大量经验分形的实际资料所统计分析表明：分数维常在 1 和 2 之间，绝大多数在 1.5 左右，极少大于 2。由此可见，本数值试验所得到的结论与经验分形所得结果是一致的。

3.4.3 时间域上的标度不变性和长程相关性

声发射时间序列分布情况如图 3.4 所示，从中我们可以清楚的了解声发射频数与时间步关系。

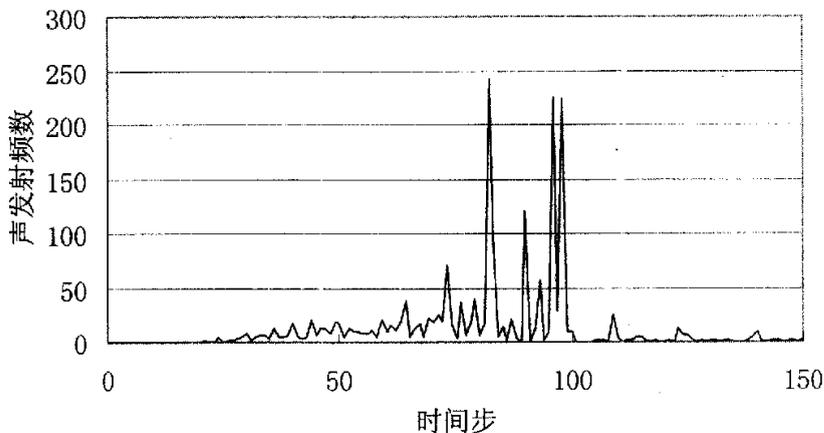


图 3.4 声发射频数与时间步关系曲线

Fig. 3.4 The relationship between AE count frequency and time step

通过对图 3.4 声发射频率曲线分析，我们可以看到，每隔一段监测时间所得到的声发射频数在大体上仍然表现为大规模的声发射事件少，小规模声发射事件多。在加载初期的弹性变形阶段没有声发射事件发生，当岩石试件刚开始进入屈服阶段时，其产生的声发射事件较少，随着屈服变形的加剧，声发射数目逐步增加。当达到峰值强度后，有一次规模极大的声发射事件发生，接着应力逐步减小，模型进入应变软化阶段。当达到岩石长期强度后，试件发生了宏观破裂，应力急剧降低，同时产生了规模较强的声发射事件。

下面我们将对上面所探测到的声发射序列作时间域上的标度不变性和长程相关性分析。

① R/S 方法分析时间域上的标度不变性

时间域上的标度不变性就是指时间尺度的大小改变而时间序列的特征不变，可用变尺度 (R/S) 方法来研究时间域上的标度不变性。

R/S 方法是由自仿射分形衍生而来的对随机时间序列进行分析的统计方法。它是英国水文学家赫斯特 (Hurst) [51] 研究尼罗河上修建水库问题时提出的。它是通过改变时间尺度的大小来研究时间序列统计规律的变化特征。在分析由各种自然现象抽象出的时间序列时，通常都忽略事件之间的长程相关性，认为事件只在短程范围内具有“记忆性”。R/S 经验关系式的存在却说明事件的发生具有长程相关性，后面事件的发生将受到前面事件的影响，即序列在不同的时间标度上有类似的统计特性，表现出长期相关性的特征。R/S 经验关系式反映了时间序列统计特征量的标度不变性，即一旦作了时间标度的调整，序列分布图像仍然保持同样的形状。那么，通过对时间尺度的变化，我们可以将小时间尺度范围的规律应用到大时间尺度范围，或者将从大的尺度得到的规律用于小时间尺度，为获知不同尺度下事件可能出现的涨落情况提供了思路 [52]。

首先介绍 R/S 方法中几个关键变量。考虑一个随机时间变量 $\xi(t)$ ，在研究时间间隔 τ 内的平均值 $\langle \xi \rangle_\tau$ 为

$$\langle \xi \rangle_\tau = E[\xi(t)] = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \tag{3.4}$$

定义累积离差(accumulated departure) $X(t, \tau)$ 如下：

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}) \quad (t=1, 2, 3 \dots \tau) \quad (3.5)$$

累积离差 $X(t, \tau)$ 中的最大值与最小值之差为极差 $R(\tau)$ (Range) :

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (3.6)$$

再定义标准均方差 S 为

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau})^2 \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

研究表明对于不同的时间范围 τ 。无量纲数 R/S 满足如下经验关系式:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim \tau^H \quad (3.8)$$

上式(3.8)即为 R/S 经验公式, H 称为 Hurst 指数, 相应的统计方法称为 R/S 分析方法。

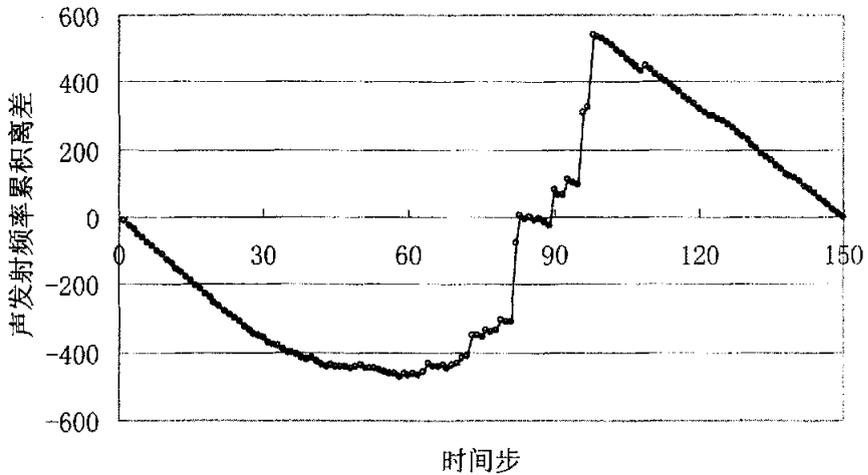
a. 平均值: $\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) = 12.66667$

b. 累积离差: $X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}) \quad (t=1, 2, 3 \dots \tau)$

$X(t, \tau)_{t=1, 2, 3, \dots, 150} = -12.66666667, -25.33333333, -38, -50.66666667, -63.33333333, -76, -88.66666667, -101.3333333, -114, -126.6666667, -139.3333333, -152, -164.6666667, -177.3333333, -190, -202.6666667, -215.3333333, -228, -240.6666667, -253.3333333, -265, -277.6666667, -290.3333333, -299, -311.6666667, -323.3333333, -335, -344.6666667, -353.3333333, -358, -368.6666667, -376.3333333, -383, -389.6666667, -399.3333333, -400, -407.6666667, -416.3333333, -423, -418.6666667, -427.3333333, -437, -444.6666667, -436.3333333, -442, -441.6666667, -442.3333333, -447, -440.6666667, -436.3333333, -445, -445.6666667, -449.3333333, -452, -456.6666667, -461.3333333, -463, -470.6666667, -463.3333333, -467, -463.6666667, -465.3333333, -459,$

-433.6666667, -441.3333333, -442, -437.6666667, -445.3333333, -436,
 -429.6666667, -417.3333333, -411, -351.6666667, -348.3333333, -358,
 -333.6666667, -340.3333333, -334, -306.6666667, -312.3333333, -308,
 -77.66666667, 5.666666667, -3, -0.666666667, -12.33333333, -5,
 -14.66666667, -27.33333333, 80, 67.33333333, 67.66666667, 112,
 100.3333333, 96.66666667, 309, 325.3333333, 536.6666667, 534,
 531.3333333, 518.6666667, 506, 493.3333333, 480.6666667, 469,
 457.3333333, 445.6666667, 433, 445.3333333, 435.6666667, 423,
 411.3333333, 399.6666667, 391, 382.3333333, 370.6666667, 358,
 347.3333333, 334.6666667, 322, 310.3333333, 297.6666667, 298,
 291.3333333, 285.6666667, 275, 262.3333333, 250.6666667, 238,
 226.3333333, 214.6666667, 202, 190.3333333, 178.6666667, 166,
 153.3333333, 140.6666667, 129, 120.3333333, 117.6666667, 106,
 93.33333333, 81.66666667, 70, 58.33333333, 45.66666667, 34,
 22.33333333, 9.666666667, -1.45306E-12

上述累积离差生成函数图像如下:



c. 极差(Range):
$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau)$$

$$= 536.6666667 - (-470.6666667)$$

$$= 1007.333$$

d. 标准均方差:
$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau})^2 \right]^{1/2}$$

$$= 34.90018$$

f. R/S 值:
$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = 1007.333/34.90018 = 28.86326$$

表 3.3 不同时间研究尺度下的归一化极差值 (R/S)
Table 3.3 The rescaled range value (R/S) under different time scale

t	30	45	50	55	60
R/S	9.067078	15.57395	18.20201	20.53093	22.32722
t	70	74	75	80	81
R/S	24.6629	22.42142	22.7315	24.1892	24.49078
t	82	85	90	96	97
R/S	14.78576	16.3817	17.11226	18.05056	18.36447
t	98	99	100	105	120
R/S	19.4487	19.60295	19.75613	20.77903	23.50174
t	135	150			
R/S	26.19862	28.86326			

按照上述步骤，我们取了 22 个不同时间步作为研究尺度，对它们分别作了归一化的极差 R/S 分析，其 R/S 值列于表 3.3 中，对应曲线见图 3.5。图 3.6 是从第 98 步起的 R/S 值与时间步 (T) 分布取对数后 ($\text{Log}_{10}(\text{R/S})-\text{Log}_{10}T$) 的结果。图 3.7 给出了 22 个相应时间研究尺度的均方差值，从中我们可以得知每步声发射频数与平均数的离散程度，并在图 3.8 中分别给出了前 30, 60, 90, 120,

150 时间步的声发射频率累积离差曲线, 从中我们可以探索出一些关于声发射时间序列的规律来。

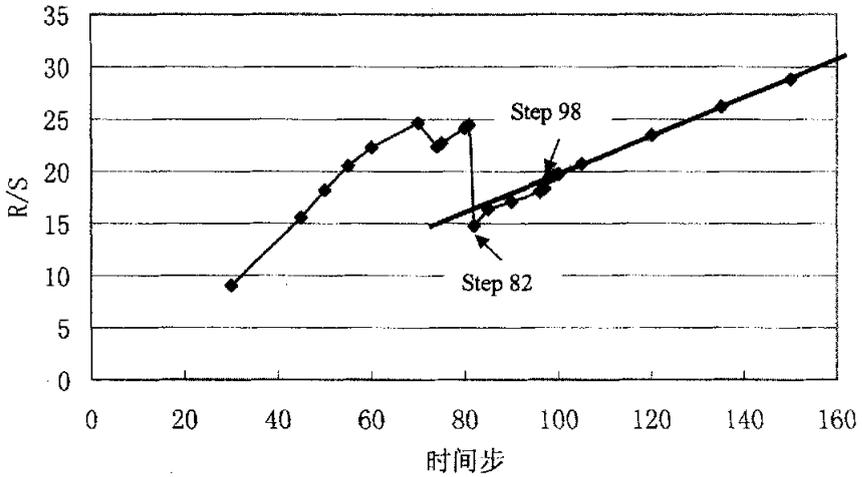


图 3.5 不同时间研究尺度下声发射频数归一化极差值 (R/S) 曲线

Fig. 3.5 The persistence of AE event time series through rescaled range (R/S) analysis

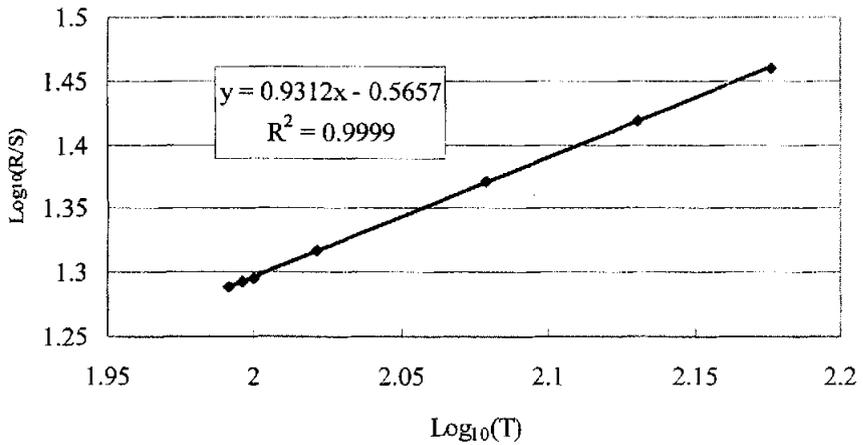


图 3.6 声发射序列 R/S 值与时间步 (T) 的对数回归拟合曲线 (时间步为 98 步起到 150 步止)

Fig. 3.6 The logarithm relationship between R/S value of time series and loading step from step 98 to step 150

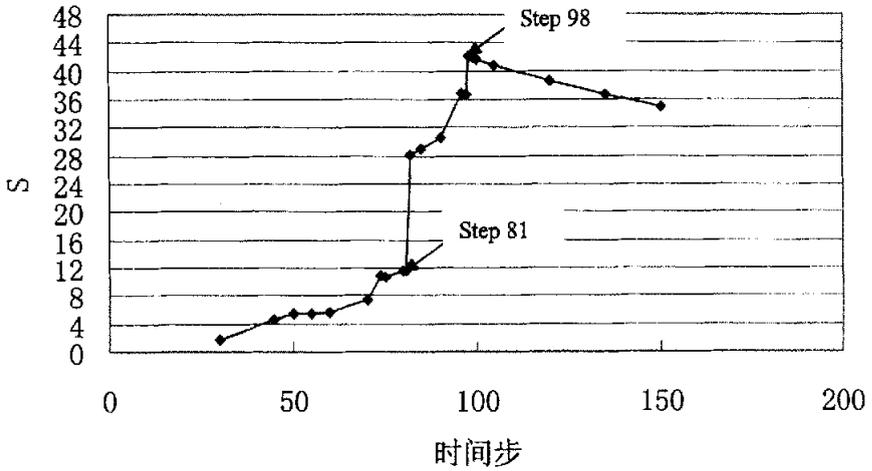
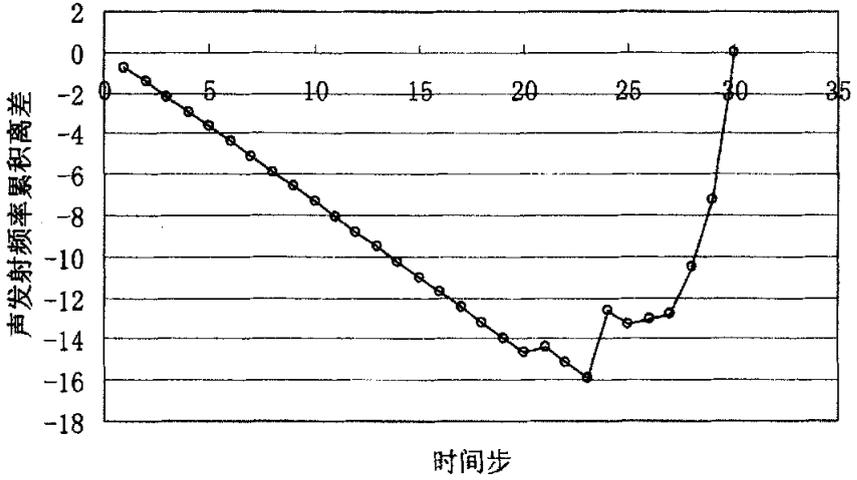


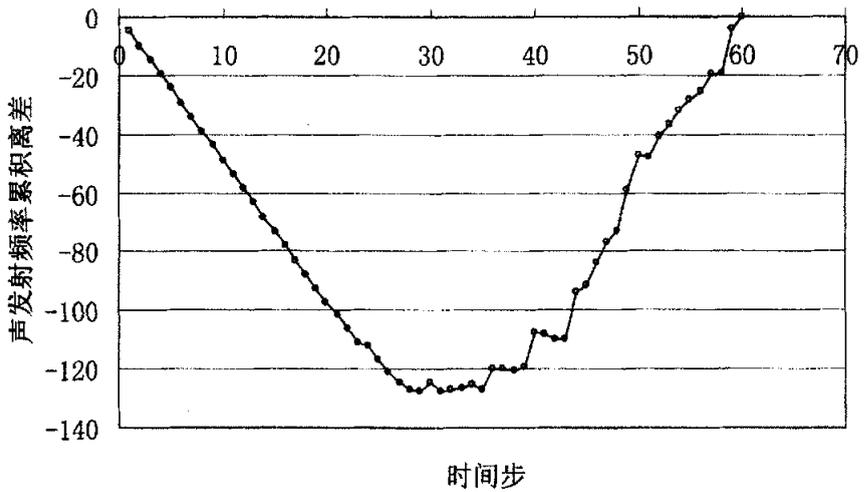
图 3.7 不同时间研究尺度下声发射频数均方差值 (S) 曲线

Fig. 3.7 The difference figure of average square root for AE frequency under different research scale

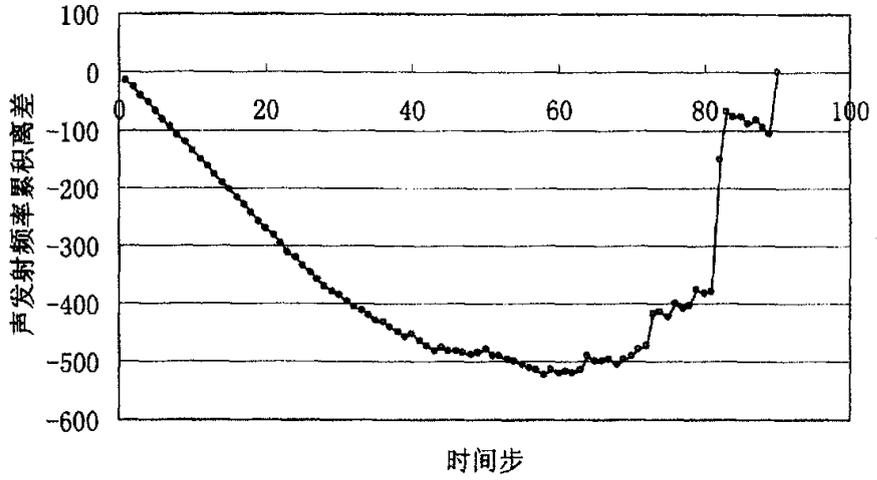
从图 3.6 声发射序列 R/S 值与时间步 (T) 的对数回归拟合曲线可以看到, 模型从第 98 步以后的声发射事件服从一定规律, 其 $\text{Log}_{10}(R/S)$ 值回归拟合在一条倾斜的直线上, 这说明声发射时间序列的极差和均方差与时间标度存在着幂指数关系 $\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim \tau^H$, 其 Hurst 指数为 0.9312, 其值大于 0.5, 这同时也说明达到自组织临界状态后, 声发射序列具有时间标度不变性。从图 3.7 可以看到, 当模型接近自组织临界态时, 其声发射频数与整个声发射序列的平均值的离散程度在大幅度增加, 一直达到自组织临界状态。



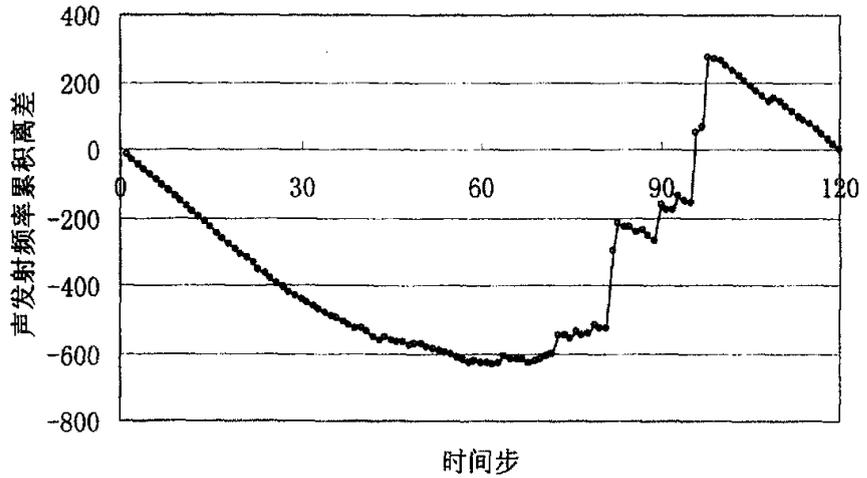
(a) 时间研究尺度为前 30 步的声发射频率累积偏差曲线



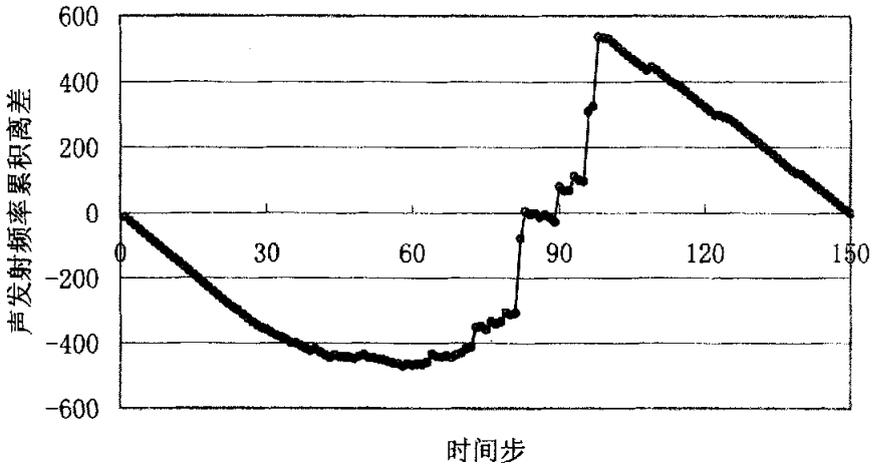
(b) 时间研究尺度为前 60 步的声发射频率累积偏差曲线



(c) 时间研究尺度为前 90 步的声发射频率累积离差曲线



(d) 时间研究尺度为前 120 步的声发射频率累积离差曲线



(d) 时间研究尺度为前 150 步的声发射频率累积离差曲线

图 3.8 不同时间研究尺度下的声发射频率累积离差曲线

Fig. 3.8 The accumulated discrepancy of AE frequency under different time research scale

许多自然现象，像降雨、树木的年轮、大气温度的变化、洪水的泻流量、湖底泥土层的厚度、小麦的价格等等，不仅满足 R/S 经验关系式，而且所得到的 H 值大都界于 0.69 和 0.80 之间，其平均值趋于 0.72^[53]。这说明自然现象背后有着某种特殊的共同规律性^[54]。

Hurst 指数 H 与分维数 D 存在如下关系：

$$D = 2 - H \quad (3.9)$$

R/S 方法和分形的密切关系使得 R/S 方法成为估计时间序列分维数的重要方法之一^[55-58]。在本例中，当达到自组织临界状态的第 98 步，其分维值为 1.2503，而 H 值为 0.9312，基本满足上述关系。

② 关联函数方法分析时间域上的长程相关性

A. 关联函数的定义：

对于一个存在随机涨落的经典平衡系统，用 x 表示涨落依赖的变量， $A(x)$ 表示每一次测量的测量值，其平均值用 $\langle A(x) \rangle$ 表示，定义其涨落为 $\delta A(x)$ ，则

$$\delta A(x) = A(x) - \langle A(x) \rangle \quad (3.10)$$

则 k 步滞后的关联函数为

$$\rho(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta A(x_i) \delta A(x_{i+k}) dx_i \quad (3.11)$$

对于有限的测量点 $A(x)$ ，用求和平均来代替积分，可得到

$$\rho(x) = \frac{1}{N} \sum_{x_i=x_1}^{x_i=x_2} \delta A(x_i) \delta A(x_{i+k}) = \langle \delta A(x_i) \delta A(x_{i+k}) \rangle \quad (3.12)$$

$\rho(x)$ 不依赖于测量点 $A(x_i)$ ，而只依赖于测量点间隔 $k = x_i - x_j$ 和测量点的数量 N 。进行归一化得到自关联函数为

$$C(x) = \rho(x) / \rho(0) \quad (3.13)$$

通过自关联函数，我们可以考察上述声发射序列是否具有长程相关性。

下面我们以测量点 $A(x_1)$ 为起点，以 $k = x_i - x_j = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75$ 为测量间隔，来分别考察 1, 2, 3, ..., 150 时间序列内的 150 个观测点的自相关性。

以滞后 75 步为例来求取声发射时间序列的自相关系数。

- a. 平均值: $\langle A(x) \rangle = 12.66667$
- b. 涨落: $\delta A(x) = A(x) - \langle A(x) \rangle$

声发射频率涨落曲线如图 3.9 所示。从中我们可以看到，声发射频率涨落曲线只不过是声发射频率曲线在 Y 轴方向上向下平移了 12.66667 个单位。

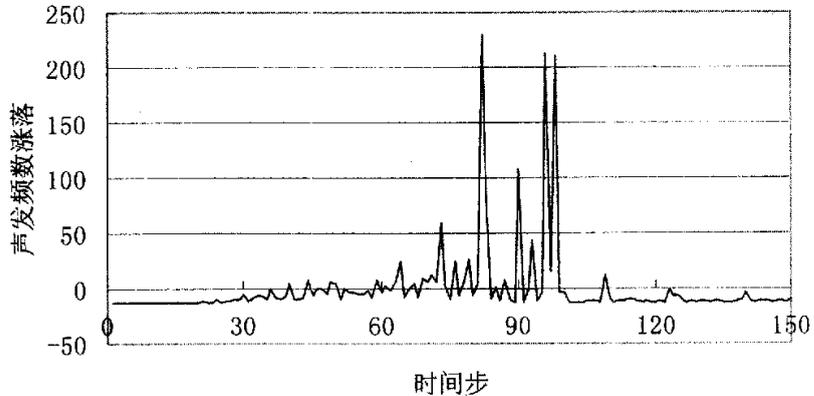


图 3.9 声发射频率涨落曲线
Fig. 3.9 The fluctuation figure of AE frequency

c. 自关联函数值:

$$\rho(x) = \frac{1}{N} \sum_{x_i=x_1}^{x_i+k} \delta A(x_i) \delta A(x_{i+k}) = \langle \delta A(x_i) \delta A(x_{i+k}) \rangle$$

$$\rho(75) = \frac{1}{75} \sum_{x_i=x_1}^{x_i=75} \delta A(x_i) \delta A(x_{i+75})$$

$$= \frac{1}{75} [\delta A(x_1) \delta A(x_{76}) + \delta A(x_2) \delta A(x_{77}) + \dots + \delta A(x_{75}) \delta A(x_{150})]$$

$$= -142.564$$

$$\rho(0) = \frac{1}{150} \sum_{x_i=x_1}^{x_i=150} \delta^2 A(x_i) = 1218.022$$

d. 自相关系数:

$$C(75) = \rho(75) / \rho(0) = -142.564 / 1218.022 = -0.11705$$

按照上述步骤, 依次得到滞后 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 的自相关系数, 如表 3.4 所示, 其函数图像如图 3.10 所示, 相应的自相关绝对系数绝对值函数图像如图 3-3-11 所示。

表 3.4 不同时滞条件下声发射序列的自相关系数

Table 3.4 The autocorrelation coefficient of AE event time series under different time delay

x	5	10	15	20	25	30	35	40
C(x)	0.060066	0.046251	-0.12602	0.032856	0.056191	-0.06529	-0.06231	-0.11591
x	45	50	55	60	65	70	75	
C(x)	-0.13706	-0.11806	-0.1427	-0.12602	-0.14652	-0.12435	-0.11705	

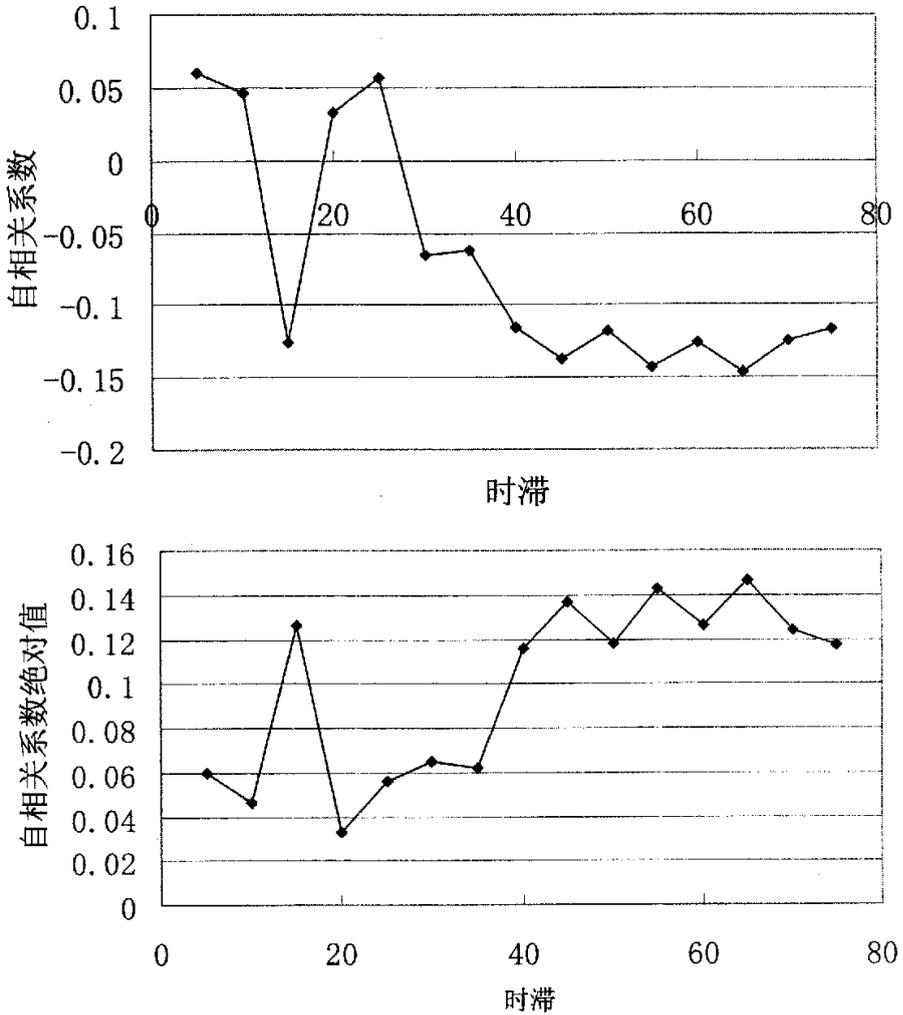


图 3.10 不同滞条件下声发射序列自相关系数绝对值函数图像
 Fig. 3.10 Absolute value (C) of autocorrelation coefficient of AE event time series

从图 3.10 可以看到，按照第 2 章 2.1.3 节所述，声发射序列在滞后很长时间（比如滞后 75 步）后，自相关系数绝对值仍然很大，表明声发射序列具有很强的相关性，声发射时间序列表现出长程关联性。

3.5 关于自组织临界行为存在的讨论

由于场量的时空幂律分布是 SOC 系统的两个特征,于是过去人们常把场量的幂律分布看成 SOC 的判断标准。但是在应用这个标准的时候,已存在一些争论。Rinaldo 等人提出了河网和地貌演化的模型,并被引入作为 SOC 模型的一个例证,但是 Sapozhnikov 提出异议,认为这些只具有空间特征上的负幂律分布模型并不真正符合 SOC 框架^[59-60]。Sornette 讨论了铌样品中由于氯化物的沉淀而形成的裂隙引起的声发射大小分布遵循幂律分布的事实,但他认为这种现象也可能来源于别的机制,如一个控制参数的大范围内的缓慢变化^[61]。Boer 分析了两个结构极为相似、“雪崩”的规模都服从幂律分布的生物体演化模型,但他认为其中的随机邻居模型没有表现出 SOC;他提议时空点的自相似性可能是更好的 SOC 的判据^[62]。我国国家地震局地球物理研究所的郑捷用细胞自动机模型证明,不仅仅是 SOC 状态,而且在进入临界状态前,也是大、小事件都有,其大小分布也符合幂律,所以不足以证明地壳处在 SOC 状态。他认为幂律并非仅仅如平衡态物理学中所证明的那样属于临界状态,一个开放的耗散的远离平衡态的系统,也有可能因为其具有门槛值的单元之间相互作用的自组织过程而具有幂律特征^[63]。

综上所述, SOC 一定会导致幂律,但幂律并不一定都是 SOC 现象。在物理学中,概念比计算更重要。因此在 SOC 判断时,必须将定性的分析与定量的判据相结合。SOC 还处于发展阶段,应用时对其不完善之处不能简单照搬,必要时还需针对自己的问题对 SOC 理论本身开展工作。

3.6 小结

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。要弄清岩石破裂过程的自组织临界特征,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,系统完整地研究断裂破坏性质转化的内在本质规律。本章运用 RFPA2D 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,数值模拟和自组织临界特性存在的表征三个方面证实了自组织临界状态点的存在,得到如下结论:

(1) 在整个破裂过程中, 破裂集团大小与其相应数目遵从负幂律分布。只不过, 不同应力阶段幂指数值不同, 当接近自组织临界状态时, 其幂指数却变化不大, 大致在 1.5 左右, 随着应力增加, 其幂指数值有所减小, 但都大于 1。由此可见, 岩石在整个破裂过程中的微裂纹分布基本都满足负幂律分布,

(2) 岩石破裂过程产生的破裂集团(微裂纹)分布都满足负幂律关系, 具有自相似结构的分形特征。但是一种统计意义上的自相似, 而不是完全自相似。

(3) 自达到自组织临界状态以后, 岩石破裂过程产生的声发射事件服从一定的统计规律。采用归一化的极差分析方法所得到的 R/S 值能回归拟合在一条倾斜的直线上, 这说明声发射时间序列的极差和均方差与时间标度满足 R/S 经验关系式 $\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim \tau^H$, 其 Hurst 指数为 0.9312, 从而说明达到自组织临界状态后,

声发射序列具有时间标度不变性。这样, 我们可以通过改变时间尺度的大小, 将小时间尺度范围的规律应用到大时间尺度范围, 对将来未出现的声发射事件出现的涨落情况作出预测。

(4) 通过声发射序列自相关分析表明声发射序列具有时间长程关联性。

(5) 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。

第 4 章 岩石破裂自组织临界行为相关特性讨论

在岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统中, 将所研究的对象均匀地划分为大小相等的正方形小方块, 每一小方块视为一个基元。由于岩石材料的非均匀性, 这样使得各个基元的物理力学性质不同。在 RFPA^{2D} 中, 基元的亮度代表了弹性模量的大小, 颜色越亮, 弹性模量越高。若两个相邻的小方块都产生了微破裂, 我们则定义它们属于同一破裂集团。在这样的条件下, 每个方块的微破裂长度就等于基元的尺寸, 因而每个单元上的微破裂长度相等, 各个破裂集团的总破裂长度仅由破裂集团占据的网格数来确定。这样我们就建立了“规则点阵, 最近邻作用、座逾渗”模型, 可以用逾渗模型来分析岩石破裂自组织临界行为相关特性^[64-66]。

4.1 破裂集团大小分布 $N(S)-S$

表 4.1 列出了整个破裂过程几个关键步破裂集团大小分布。设 p 表示该步破坏基元占整个试件单元数的百分比, S^* 表示最大破裂集团大小, $N(S^*)$ 表示最大破裂集团数, 表 4.1 列出了与图 3.1 相对应的步数的最大破裂集团大小, 破裂单元百分比。图 4.1 给出了最大破裂集团大小 S^* 、单元破裂百分比 p 与加载步之间的变化关系。

表 4.1 最大破裂集团大小在整个岩石破裂过程中的发展规律

Table 4.1 The developing law of the biggest damage group in the whole rock failure progress

step	72	81	82	97	98	150
p	0.0522	0.0748	0.1001	0.1619	0.1852	0.2294
S^*	6	10	22	80	88	123
$N(S^*)$	1	1	1	1	1	1

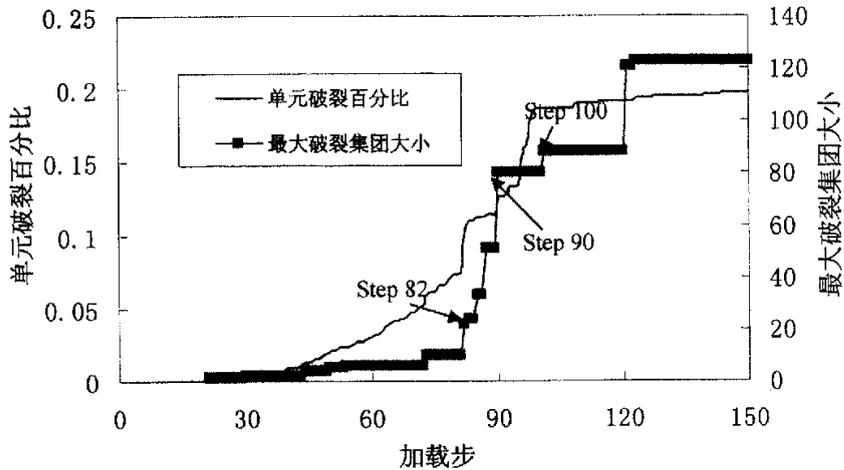


图 4.1 最大破裂集团大小 S^* 、单元破裂百分比 p 与加载步之间的变化关系
 Fig. 4.1 The relationship of the biggest damage group S^* , the percentage of element failure between loading step

如图 4.1 的单元破裂百分比曲线所示，随着加载步的逐步增加，当荷载达到峰值强度，也就是加载到第 81 步时，单元破裂百分比发生了一个小的突跳，从第 81 步的 0.0748 跃为第 82 步的 0.1，对应着图 4.1 的最大破裂集团大小曲线可以看到，最大破裂集团也由第 81 步的 10 个单元大小跃为第 82 步的 22 个单元大小，这标志着单元破裂进入一个新的发展阶段，即变形破坏局部化发展阶段。随着加载的继续进行，单元破裂百分比呈逐步增加的趋势，没发生突跳，而最大破裂集团大小却不断发生大的突跳，直到第 90 步跨越集团的形成。然而整个岩石并没有形成宏观破裂面，并没有达到自组织临界状态，也就是说并没有达到岩石抗压的长期强度，如第三章中的图 3.2（单元破裂事件与加载关系曲线）所示，从中也可以发现岩石的峰值强度和长期强度的各自所对应的力学行为的差异。随着荷载的继续增加，当岩石取得其长期强度，发生了自组织临界行为，破裂而失稳后，单元破裂百分比基本没再增加，只发生了小部分单元的破坏。然而最大破裂集团大小却发生了三次次突跳，一次是从第 89 步的 51 个单元大小跃为第 90 步的 80 个单元大小，一次是从第 100 步的 80 个单元大

小跃为第 101 步的 88 个单元大小，最后一次是从第 120 步的 88 个单元大小跃为第 121 步的 121 个单元大小。从这段渐进破裂过程来看，从第 98 步破裂失稳后，岩石破裂一方面发生的是小破裂集团的逐渐合并，另一方面发生的少量单元的破裂，形成新的小破裂单元，这两个方面的相互作用与影响，从而使得单元破裂百分比基本保持一个略有增高的稳定水平。

4.2 总破裂集团数

总破裂集团数、最大破裂集团大小与加载步关系曲线，如图 4.2 所示。总破裂集团数与单元破裂百分比发展趋势比较，如图 4.3 所示。由图 4.3 可知，总破裂集团数和单元破裂百分比有着非常相似的发展趋势，不过在发生宏观破裂失稳后，单元破裂百分比略有增加，而总破裂集团数却有所减小，这主要是宏观破裂后只有少量单元发生破坏，主要发生的是裂纹的交叉联合，破裂集团合并所致。

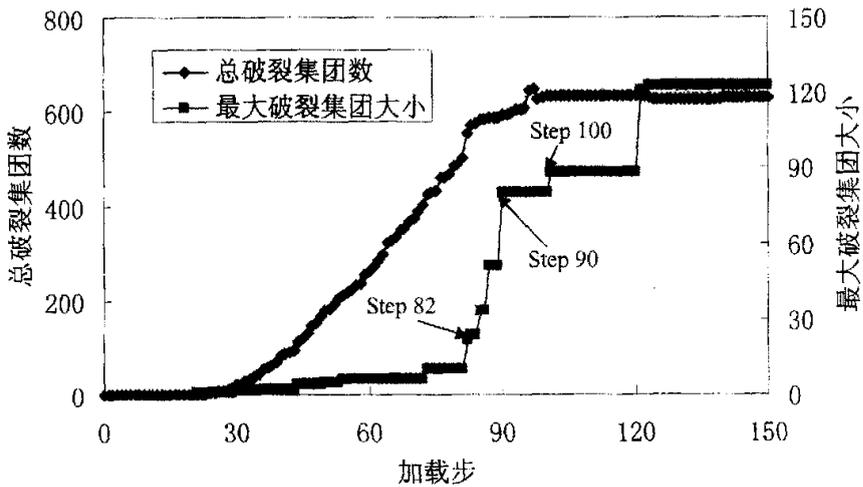


图 4.2 总破裂集团数、最大破裂集团大小与加载步关系曲线

Fig. 4.2 The relationship between total damage group, the scale of the biggest damage group and loading step

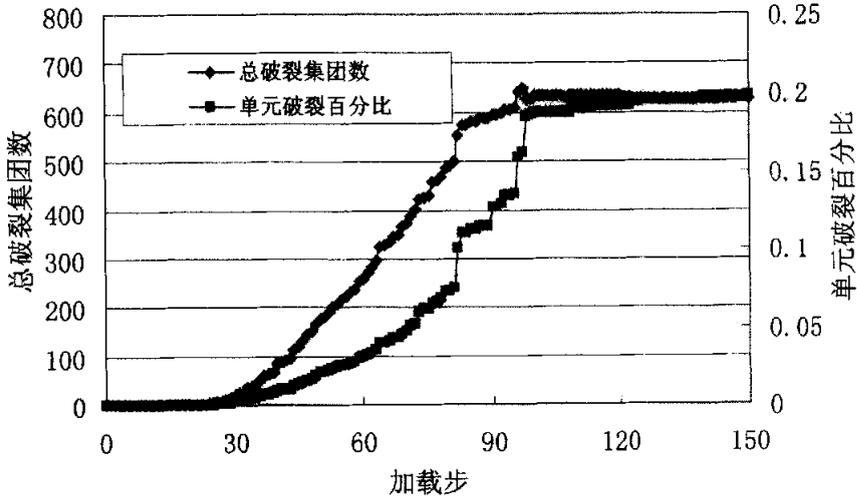


图 4.3 总破裂集团数、单元破裂百分比发展趋势比较

Fig. 4.3 The developing trend contrast between total counts of damage group and the percentage of element failure

4.3 破裂集团平均大小

破裂集团平均大小随加载步关系曲线如图 4.4 所示，破裂集团平均大小、最大破裂集团大小发展趋势比较如图 4.5 所示。由图 4.4 我们可以看到，随着加载的逐步进行，破裂集团大小有着逐渐增大的趋势，再从图 4.5 破裂集团平均大小与最大破裂集团大小的发展趋势比较中我们可以看到，在第 90 步时，最大破裂集团大小达到 80 个单元大小，然而破裂集团平均大小却只有 10.94 个单元大小。当加载步在 90 到 100 步之间时，最大破裂集团大小保持 80 个单元大小不变，而在第 98 步，自组织达到临界状态时，破裂集团平均大小却发生了变化，从第 90 步的 10.94 个单元大小减小到第 96 步的 10.79 个单元大小，然后从第 96 步的 10.79 个单元大小急剧增大到第 98 步的 19.62 个单元大小。从这个关键过程来看，在从第 90 步到第 96 步这个阶段主要发生的小破裂集团事件或少量单个单元破裂，从第 96 步到第 98 步主要发生的是小破裂集团合并成大破裂集团事件，形成大的宏观破裂面。按照於崇文院士文【6】的叙述：在临界点附近，不同空间点上的微小涨落突然扩大而导致空间上的关联，其平均长度称为“关联长度”

(correlation length)。那么我们可以认为第 98 步发生了长程关联。据地震学常识可知，临震前兆的范围是比较大的，在临近大震前，有许多点上的相态偏离平均状态，会出现涨落加剧(巨)现象^[67]。

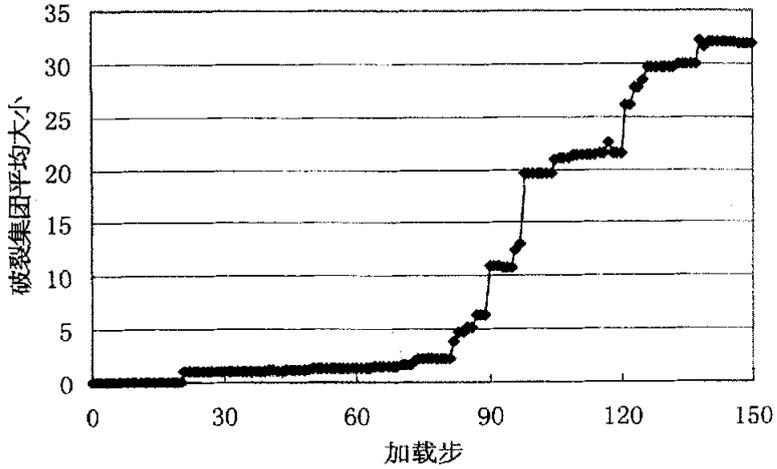


图 4.4 破裂集团平均大小随加载步变化关系曲线

Fig. 4.4 The relationship between average scale of damage group and loading step

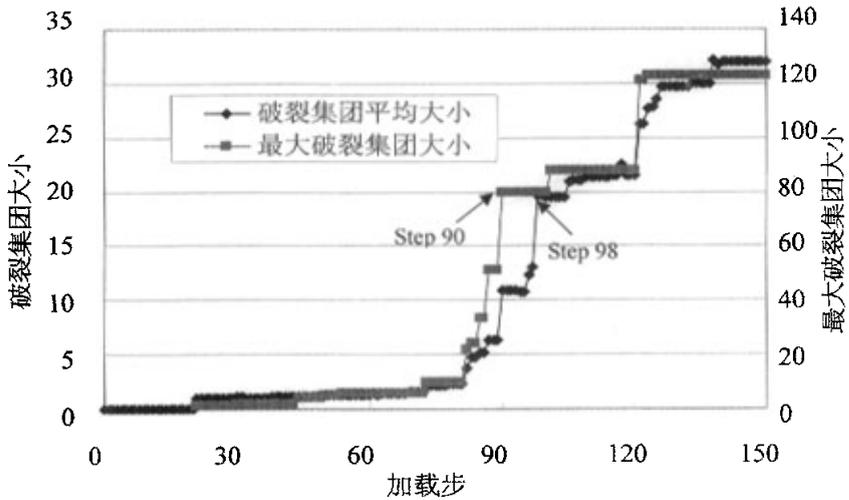


图 4.5 破裂集团平均大小、最大破裂集团大小发展趋势比较

Fig. 4.5 The developing trend contrast between average scale of damage group and the scale of the biggest damage group

4.4 \tilde{b} 值

大小地震之间的统计规律遵从著名的 Gutenberg-Richter 公式:

$$\lg N = a - bM \quad (4.1)$$

研究表明^[68], 实验室中所观测到的微破裂事件的统计特性和地震的统计特性有明显的相似性, 上面公式 (4.1) 可以适用于从大地震到小的微破裂事件。

由 $M \sim \log A$ 、 $A \sim L^2$, 有 $M \sim \log L^2$, 式中 M 为面波震级, A 为破裂面积, L 为破裂长度。则 L 相当于破裂集团的大小 S , 于是 $M \sim \log S^2$, 类比于 Gutenberg-Richter 公式可得:

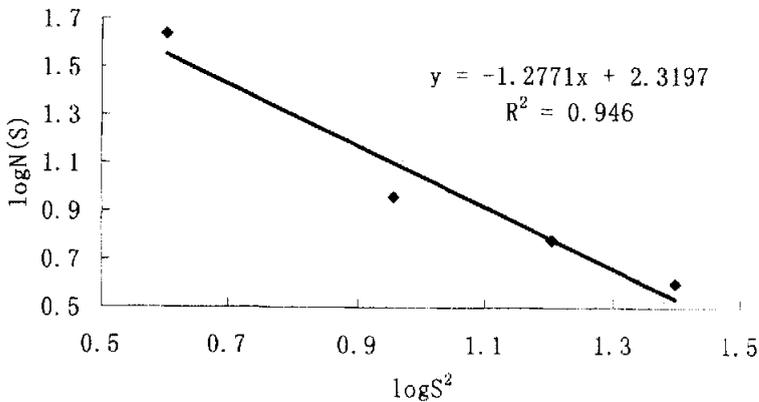
$$\log N(S) = \tilde{a} - \tilde{b} \log S^2 \quad (4.2)$$

按照上述公式, 可以求得整个加载过程不同加载步时的 \tilde{b} 值, 如表 4.2 所示。各加载步破裂集团大小事件双对数线性回归拟合曲线如图 4.6 所示。

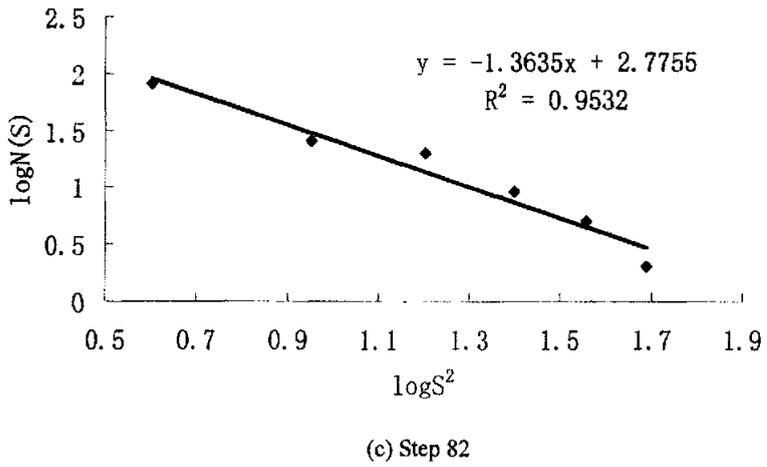
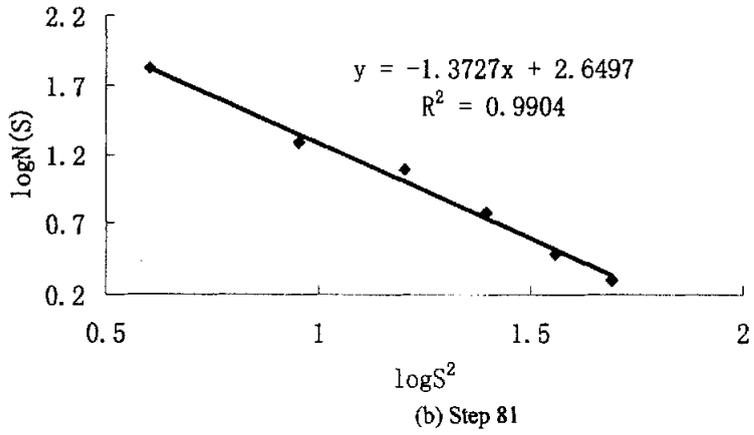
表 4.2 整个加载过程中不同应力阶段的 \tilde{b} 值

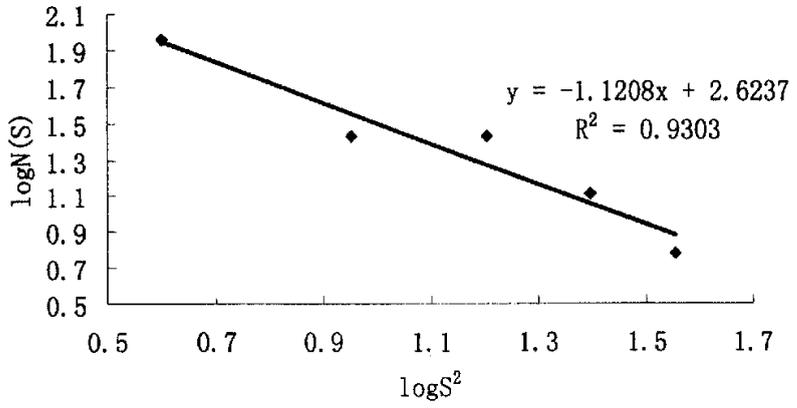
Table 4.2 The \tilde{b} value of different stress stage in the whole loading process

Step	72	81	82	97	98	150
\tilde{b}	1.2771	1.3727	1.3635	1.1208	1.1108	1.2211

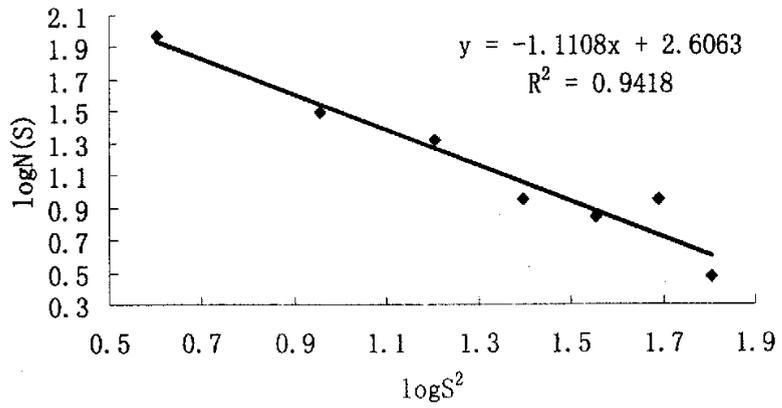


(a) Step 72





(d) Step 97



(e) Step 98

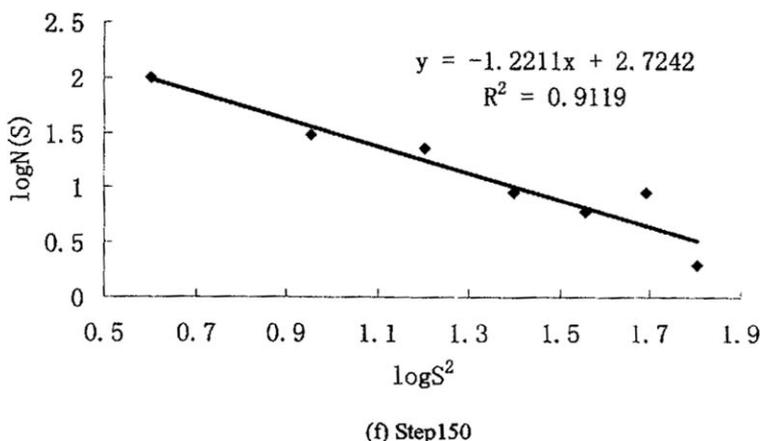


图 4.6 各加载步破裂集团大小事件对数线性回归拟合曲线
Fig. 4.6 The relationship of damage group scale for different loading step

从图 4.6 各加载步破裂集团大小事件对数线性回归拟合曲线可以看到，在取不同的无标度区域内，其 b 值大致在 1.5 左右，跟地震学上所得到的结论相当。

4.5 关于自组织临界特性的讨论

通过第三章的单轴压缩数值试验，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 98 步，而不是第 82 步，因为加载到第 82 步后的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 98 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。在峰值载荷点之前，试件主要处于应力积累阶段（Stress buildup），在峰值载荷点后则是应力释放形成应力阴影区和应力转移阶段（Stress shadow, Stress transference）。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^[69]。自组织临界点前岩石破裂主要表现出分岔、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。

4.6 小结

在岩石破裂过程分析 RFPA^{2D} 系统中，将研究对象均匀地划分为大小相等的正方形小方块，每一小方块视为一个基元。若两个相邻的小方块都产生了微破裂，RFPA^{2D} 则定义它们属于同一破裂集团。在这样的条件下，每个方块的微破裂长度就等于基元的尺寸，因而每个单元上的微破裂长度相等，各个破裂集团的总破裂长度仅由破裂集团占据的网格数来确定。这样就建立起了“规则点阵，最近邻作用、座逾渗”模型，可以用逾渗模型来分析岩石破裂自组织临界行为相关特性，得到如下结论：

(1) 破裂集团大小随着加载应力的增加而逐渐增大，在达到峰值强度时，最大破裂集团大小并没有太大变化，而在取得峰值强度后，最大破裂集团大小快速增大，而接近自组织临界点（岩石长期强度）之前，就出现了大的跨越集团，从而说明失稳前兆是可以观测到的，失稳是可以预测的。这也同时也说明了岩石的峰值强度和长期强度的表现根本不同的力学响应。

(2) 总破裂集团数和单元破裂百分比有着非常相似的逐步加的发展趋势，

不过在试件发生宏观破裂失稳后，单元破裂百分比略为有所增加，而总破裂集团数却有所减小。在此阶段，岩石破裂一方面发生的是小破裂集团的逐渐合并，另一方面发生的少量单元的破裂，形成新的小破裂单元，这两个方面的相互作用与影响，从而使得单元破裂百分比基本保持一个略为增高的稳定水平，而总破裂集团数却有所减小。

(3) 通过单元破裂长度得到破裂面积，从而得到的面波震级与频度遵从著名的 Gutenberg-Richter 公式： $\lg N = a - bM$ ，其 \bar{b} 值在 1.1 到 1.5 之间。

第 5 章 结 语

5.1 主要结论

随着我国国民经济的快速发展, 岩石工程建设规模空前浩大, 这些工程的稳定性也随之成为世人瞩目的焦点。然而岩石工程的失稳并不是一蹴而就, 而要经历一个由随机破坏到自组织逐步发展而最终达到破裂失稳的渐进过程。本文把岩石试件和加载机构看作一个小的岩石介质系统, 来探索岩石工程失稳的临界特性, 这无疑是一件有意义的工作, 它将对维持岩石工程的稳定性有所指导作用。

本文首先对自然界中几种常见的自组织现象进行介绍后, 给予了自组织现象一个清晰的概念并阐述了自组织临界特征, 其后通过建立岩石破裂过程的细观损伤统计本构模型从理论上证明了自组织临界点的存在, 然后运用 RFPA^{2D} 数值模拟方法对岩石破裂过程的自组织临界现象进行了仿真模拟, 最后借助 RFPA^{2D} 新近开发的功能, 对每步产生的破裂集团大小及其相应数目进行统计, 在此基础上采取最小二乘法、归一化极差方法、关联函数法等统计手段对岩石破裂自组织临界特征做了定量化分析, 并对岩石破裂过程的相关临界特性进行了详细讨论, 得到如下主要结论:

(1) 在整个岩石破裂过程中, 破裂集团大小与其相应数目满足负幂律关系, 不同应力阶段对应着不同幂指数值。当接近自组织临界状态时, 幂指数变化范围在 1.1 到 1.5 之间。

(2) 微裂纹的幂律分布并不一定代表自组织临界状态的出现, 只说明微裂纹的演化过程保持分形特征, 但这微裂纹 (破裂集团) 分布只是一种统计意义上的自相似, 而不是完全自相似。

(3) 达到自组织临界状态后的声发射事件满足 R/S 经验关系式 $\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim \tau^H$, 声发射序列表现出时间标度不变性。

(4) 通过自相关函数对声发射序列进行自相关分析表明, 声发射序列具有时间长期关联性。

(5) 岩石破裂过程的自组织临界点对应着岩石的长期强度。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。

5.2 应用展望

关于 SOC 的应用，目前多数局限于判断一种现象是否是 SOC 的初级层次上，即使是这样，也存在需要探讨的问题。

1) 既然场量的时空幂律分布是 SOC 系统的两个特征，于是场量的幂律分布就成了 SOC 的判断标准，但已有人对此表示怀疑。本文研究结果也表明，SOC 一定会导致幂律分布，但幂律分布并不一定都是 SOC 现象。在物理学中，概念也许比计算更为重要。因此在 SOC 判断时，必须将定性的分析与定量的判据相结合。

2) SOC 还处于发展阶段，应用时对其不完善之处不能简单照搬，必要时还需针对自己的问题对 SOC 理论本身开展工作。

3) RFPA 为 SOC 的判断提供了一种有力手段，可从现象直观模拟到数据统计分析多个角度去证实自组织临界行为的存在，通过 RFPA 方法所得到的自组织临界特性对岩石工程破裂失稳的预测、预报具有较高的应用价值。

参考文献

1. 蔡美峰. 岩石力学与工程. 北京: 科学出版社, 2002: 12~24
2. 仪垂详. 非线性科学及其在地学中的应用. 北京: 气象出版社, 1995: 1~15
3. 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变. 北京: 煤炭工业出版社, 1993: 10~20
4. 朱旺喜主编. 资源枯竭城市灾害形成机理与控制战略研讨. 北京: 地质出版社, 2003
5. 蒋良维. 散粒体自组织临界性及其应用. 成都: 西南交通大学硕士论文, 2003, 3
6. 於崇文. 固体地球系统的复杂性与自组织临界性. 地学前缘, 1998, 5(3): 159~174
7. P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfield. Self-organized Criticality: an explanation of $1/f$ noise. *Physical Review Letters*. 1987, 59(4): 381~384
8. P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfield. Self-organized Criticality [J]. *Physical Review A*. 1988, 38(1): 364~374
9. P. Bak, K. Chen. Self-organized criticality. *Scientific American*, 1991(1): 26~33
10. Bushev M. Synergetics. *Chaos, Order, Self-Organization*. Singapore: World Scientific, 1994, 1~275
11. G. A. Held, D. H. Solina H, and D. T. Keane. et al. Experimental study of critical-mass fluctuations in an evolving sandpile[J]. *Physical Review Letters*. 1990, 65(9): 1120~1123
12. 李仕雄, 姚令侃, 蒋良维. 影响沙堆自组织临界性的内因与外因. *科技通报*, 2003, 19(4): 278~281
13. S. R. Broadbent and J. M. Hammersley. Percolation Processes. *Proc Camb Phil Soc.*, 1957, 53: 629~641
14. (美) R 泽仑, 黄昀等译. 非晶态固体物理学. 北京: 北京大学出版社, 1988, 153~156
15. 彭自正, 王殚业, 许云廷, 牛志仁. 逾渗与岩石破裂的计算机模拟研究. *西北地震学报*, 1996, 18 (1): 22~28

16. 刘式达, 刘式适. 孤波和湍流. 上海: 上海科技教育出版社, 1994, 77~78
17. 马致考. 重正化方法及应用. 西北大学学报, 1998, 28(1): 30~33
18. 北京大学物理系《量子统计物理学》编写组. 量子统计物理学. 北京: 北京大学出版社, 1996, 312~461
19. C. J. Allegre, J. L. Le Mouél, A. Provost. Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction [J]. Nature, 1982, 297:47~49
20. T. R. Madden. Microcrack connectivity in rocks: a renormalization group approach to the critical phenomena of conduction and failure in crystalline rocks [J]. J. Geophys. Res. 1985, 88(B1): 585~592
21. R. F. Smalley, D. L. Turcotte, Sara A Solla. A renormalization group approach to the stick-slip to behavior of faults [J]. J. Geophys. Res. 1987, 90 (B2):1984~1900
22. Y. Huang, H. Saleur, C. G. Sammis, D. Sornette. Precursors, aftershocks, criticality and self-organized criticality. 1996, AreXiv: cond-mat/9612065 v1
23. 冯端. 金国钧. 凝聚态物理学新论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1992: 354~357
24. 周辉, 王泳嘉, 谭允亮, 冯夏庭. 岩石破裂演化的物理细胞自动机, 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 475~478
25. M. G. Velarde. Normand C. Scientific American, 1980, 243(1):93
26. 于渚, 郝柏林. 相变临界现象. 北京: 科学出版社, 1984, 189~200
27. Nicolis G. Portnow J. Chem Rev, 1973, 73: 365
28. Epstein I. R. et al. Scientific American, 1983, 248(3): 96
29. Winfree A. T. Scientific American, 1974, 230(6): 82
30. Haken H., Synergetics, an Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology, Springer-Verlag, New York, 1977
31. Haken H., Advanced Synergetics, Springer-Verlag, New York, 1983

32. 申维. 自组织理论和耗散结构理论及其地学应用. 地质地球化学, 2001, 29(3):1~5
33. 徐玖平, 罗久里. 拓展非平衡系统自组织理论的研究进展. 科学前沿与学术评论, 2000, 21(4): 52~56
34. 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. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 635~639.
35. Jean-Robert Grasso, Didier Sornette. Testing self-organized criticality by induced Seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 1998
36. Caldarelli G, Tolla F. D. Di, Petri A. Self-organization and annealed disorder in a fracturing Process. *Physical Review Letters*, 1996, 77(12): 2503~2506
37. 赵同, 戚飞虎. 协同神经网络的不变性研究. 上海交通大学学报, 1998, 32(10):34~38
38. 谢和平. 分形—岩石力学导论. 北京: 科学出版社, 1996: 29~158
39. 谢和平. 岩石类材料损伤演化的分形特征. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(1):74~82
40. 谢和平. 断层分形分布之间的相关关系. 煤炭学报, 1994, 19(5): 445~448
41. 张济忠. 分形. 北京: 清华大学出版社, 1995: 1~18
42. 田文栋, 王琦, 李松林等. 关联函数在耗散反应激发函数涨落中的应用. 高能物理与核物理, 2000, 24(2): 113~118
43. 傅宇方. 岩石破裂过程的数值模拟试验研究. 沈阳: 东北大学 (博士学位论文), 2000: 20~25
44. 傅宇方, 唐春安. 岩石介质的细观非均匀性对宏观破裂过程的影响. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 42~44
45. J. A. Hudson, C. Fairhurst. Tensile strength Weibull' theory and a general statistical approach to rock failure, "Structure, Solid Mechanics and Engineering Design" The Proceeding of Civil Engineering Materials conference, Eds Te'eni, Southampton, 1969
46. 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验, 北京: 科学出版社 2003: 56~58
47. Brady B H G, Brown E T. *Rock Mechanics for Underground Mining*. London: Chapama

- & Hall Press, 1993
48. 吴鸿遥, 程育仁. 损伤力学的基本内容, 1985, 7(1): 2~7
 49. 王晓颖. 泥石流产汇流系统自组织临界性模拟研究. 四川大学硕士学位论文(全国优秀硕士论文), 2003年4月30日
 50. 许强, 黄润秋. 岩石破裂过程的自组织临界特征初探. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(1):25~30
 51. Hurst H. E., Black R. P., Simaika Y. M.. Long-term storage: an experimental study, London: constable: 1965:1-155
 52. 李娟. 地震的分形特征及 R/S 标度不变性. 自然杂志, 23(4): 206~210
 53. Feder J. Fractals, New York: Plenum Press, 1998:149~199
 54. Bassingthwaite J. B., Raymond G. M. Evaluating rescaled analysis for time series. Annals of Bio-medical Engineering, 1994,22:432~434
 55. Boschette F., Dentith M. D., List R. D. A fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces. Geophysics, 1996, 61(4):10952~1102
 56. Dolan S. S., Bean C. J. Some remarks on the estimation of fractal scaling parameters-from borehole wire-line logs. Geophys. Res. Lett., 1997, 24(10):1271~1274
 57. Goltz C. Fractal and chaotic properties of earthquakes, Berlin: Springer-verlag, 1997:49~55
 58. Leary P. Deep borehole log evidence for fractal distribution of fractures in crystalline rock. Geophys. J. Int., 1991, 107:615~627
 59. Hideki Takayasu, Hajime Inacka. New type of self-organized criticality in a model of erosion. Physical Review Letters, 1992, 68(7): 966~969
 60. Victor B., Sapozhnikov, Efi Foufoula-georgiou. Do the current landscape evolution models show self-organized criticality. Water Resource Research, 1996, 32(4): 1109~1112.
 61. Didier Sornette. Power laws without parameter tuing: an alternative to self-organized criticality. Physical Review Letters, 1994, 72(14): 2306~23011

62. Jan De Boer, Jackson A. D. Tilo Wetting. Criticality in simple models of evolution. *Physical Review Letters*, 1995, 51(2):1509~1074
63. 国家地震局地球物理所. 非线性科学在地震预报中的应用, 北京:地震出版社, 1992, 146~149
64. 彭自正, 王殚业, 许云廷, 牛志仁. 逾渗与岩石破裂的计算机模拟研究. *西北地震学报*, 1996, 18(1): 22~28
65. 吴忠良. 逾渗模型的地震学含义. *地球物理学进展*, 1992, 7(4): 38~45
66. S R. Broadbent, J. M. Hammersley. Percolation process. *Proc Camb Phil Soc*, 1957, 53: 629~641
67. 郭增建, 秦保燕, 吴瑾冰. 统计物理学在地震预报中的应用. *国际地震动态*, 2000, 8: 1~7
68. C. H. Scholz. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rocks and its relation to relation to earthquakes. *Bull Seismol Soc. America*, 1968, 58(1): 399~415
69. 尤明庆. 岩石试样的强度及变形破坏过程. 北京:地质出版社, 2000: 37~51

作者简介



张后全,男,1979年6月生于四川省邻水县,2002年毕业于山东科技大学土建学院,同年考入东北大学资源与土木工程学院,主要从事岩石力学与工程以及脆性材料的损伤与断裂方面的研究,从师于唐春安教授。攻读硕士学位期间,参与了3项国家自然科学基金项目,发表学术论文25篇。

攻读硕士学位期间的学术成果:

发表学术论文:

1. 张后全, 杨天鸿, 赵德深, 李连崇, 唐春安, 采场工作面顶板突水渗流场分析, 煤田地质与勘探, 2004年第5期
2. 张后全, 夏洪春, 唐春安, 徐涛, 宋力, 圆形巷道破坏与支护方案选取可视化研究, 金属矿山, 2005年第2期
3. 张后全, 赵德深, 赵兴东, 赵明祥, 杨天鸿, 采场上覆岩层运动范围与顶板事故控制可视化研究, 矿业研究与开发, 2005年第2期
4. 张后全, 杨天鸿, 唐春安, 刘俊杰, 赵德深, 冯启言, 煤矿顶板突水事故数值模拟分析, 煤炭学报, 2004增
5. 张后全, 常旭, 唐春安, 杨天鸿, 刘文彬, 岩石多裂纹剪切断裂数值试验研究, 东北岩石力学会议, 大连, 2004.5.29
6. Zhang H. Q., Zhao D. S., Tang C. A., Xu T., Numerical Study on Fracture in Rock Surrounding a Circular Tunnel under Different Confining Pressure, the 3rd Asia Rock Mechanics Symposium, Kyoto, Japan, 11.30~12.2,2004
7. Zhang H. Q., Song L., Liu J. J., Xu T., Chen X., Numerical Study on Shear Strength and Failure Pattern of Jointed Rock under Shear Testing, the Asian Pacific Conference for Fracture and Strength, Korea, 2004
8. Zhang H. Q., Li Y. H., Tang C. A., A New Numerical Approach for Studying Self-organized Criticality Behavior in Rock Failure Process, the International Conference on Computational Methods, Singapore, 2004
9. Song L., Zhang H. Q., Liang Z. Z., Jiao M. R., Ma T. H., Effect of Element Size on Rock

- Shear Strength and Failure Pattern by Finite Element Analysis, the Asian Pacific Conference for Fracture and Strength, Korea, 2004
10. 常旭, 张后全, 唐春安, 张永彬, 姚旭朋, 层状岩层裂纹饱和现象的数值模拟研究, 东北岩石力学会议, 大连, 2004.5.29
 11. 宋力, 张后全, 解英艳, 肖丽萍, 侧向压力对岩块极限承载能力的影响研究, 应力力学学报, 2004年第4期
 12. 刘俊杰, 陈雄, 张后全, 唐春安, 运用 RFPA^{2D} 数值模拟开采条件下的渗流通道, 岩石力学与工程学报, 2005年第11期
 13. 宋力, 肖丽萍, 张后全, 岩石试样弹塑性破裂过程的数值模拟分析, 计算力学学报, 2004年第5期
 14. 刘俊杰, 陈雄, 张后全, 基于 RFPA^{2D} 的采动区水资源流失控制方法研究, 中国地质灾害与防治学报
 15. 常旭, 唐春安, 张后全, 张永彬, 那新, 层状复合陶瓷增韧机理的数值模拟, 无机材料学报, 2005年第2期
 16. 刘文彬, 唐春安, 张后全, 圆环试样内径对抗拉强度的影响, 岩土工程技术, 2004, 18(6): 286~290
 17. 张娟霞, 唐春安, 王述红, 张后全, 王列东, 钢筋混凝土结构在偏心加载条件下的数值模拟, 东北大学学报, 2005年第4期
 18. 李维红, 王立久, 包亦望, 张后全, 脆性材料中倾斜裂纹断裂评价的数值试验研究, 东北岩石力学会议, 大连, 2004.5.29
 19. 石崇, 毕卫国, 陈士海, 张后全, 傅立叶分析与小波分析在分析地震波信号中的应用比较, 东北岩石力学会议, 大连, 2004.5.29
 20. Zhao D. S., Xu T., Tang C. A., Zhang H. Q., Avalanche Behaviour in Microfracturing Process of 3-D Brittle Disordered Material, the Asian Pacific Conference for Fracture and Strength, Korea, 2004
 21. Liang Z. Z., Song L., Wang L. D. Zhang Y. B., Zhang H. Q., 3-D Micromechanics Model for Progressive Failure Process Analysis of Laminated Cylindrical Composite Shell, the Asian Pacific Conference for Fracture and Strength, Korea, 2004
 22. Wang X. H., Chen S. Y., Tang L. X., Zhang H. Q., Application of fuzzy optimal selection of similar slopes to the evaluation of slope stability, 哈工大学学报英文版
 23. 唐烈先, 唐春安, 张后全, 刘文彬, 唐世斌, 宋力, 静态破碎的主裂纹导向技术探索, 岩土工程学报
 24. 张后全, 唐春安, 徐爽, 唐烈先, 刘俊杰, 切槽卸压护巷机理分析及其方案设计, 岩土力学
 25. 张后全, 唐春安, 不同布孔方式对孔洞材料宏观力学性能的影响研究, 应用力学学报

参加的科研项目：

- 1) 国家自然科学基金项目 (编号: **50134040**): 煤矿瓦斯灾害预防及煤层气开采中的应用基础
- 2) 国家自然科学基金项目 (编号: **50204003**): 岩石破裂过程损伤与渗流耦合作用研究
- 3) 国家自然科学基金项目 (编号: **50174013**): 岩石破裂过程应力场变化的数值模拟与红外热像实验研究

致 谢

自 2002 年，我有幸进入东北大学岩石破裂与失稳研究中心 (CRISR) 学习，三年的学习生活即将结束，在这里，首先向导师唐春安教授表示最崇高的敬意。唐老师为人宽厚，思想活跃，为我们创造了宽松、愉悦的学习环境；唐老师引而不带的育人思想，培养和提高了我分析问题、解决问题的能力；唐老师谦虚严谨的治学态度、开拓进取的科研精神时刻激励着我不断前进。同时向师母杨菊英女士表示最衷心的感谢，感谢她多年来对本人的莫大关心与帮助。

CRISR 是一个团结向上的集体，一个勇于开拓创新的集体。该中心的杨天鸿教授在本文的完成过程中给予了我不少启迪，叙小荷老教授在本文的最后定稿中提出了非常宝贵的建议，在此表示我最诚挚的谢意。与此同时，我十分感谢王述红博士后、朱万成博士、徐涛博士、梁正召博士等、李连崇博士，马增天博士，张哲博士，谭志宏博士，赵兴东博士，张永彬博士，唐世斌硕士、于庆磊硕士、李慎刚硕士及其他诸位 CRISR 成员给予我学习与生活上的帮助与支持，使得我能够在这样一种轻松、愉悦、和睦工作环境下安心进行研究，这三年的 CRISR 生活将使我终生难忘，永记在心。

毕业之际，在此一并感谢东北大学资源与土木工程学院对我的悉心培养，感谢全校老师对我的谆谆教诲。几年来，东北大学绚丽多姿的校园生活，让我沐浴了老一辈革命家的创业情怀，领略了东北人的宽阔胸襟……回想起来，历历在目，催人泪下。在此还得感谢在大连大学期间得到宋力，赵德深，刘俊杰等教授的关怀和帮助。

最后，我把我最崇高的最诚挚的敬意献给在后方无形支持我的父母，正是他们辛苦的劳作形成了我坚强的后盾，激励我向前，向前，再向前……

作者于东北大学，沈阳

2004 年 12 月 28 日

作者: [张后全](#)
学位授予单位: [东北大学](#)

参考文献(69条)

1. [蔡美峰, 何满潮, 刘东燕](#) [岩石力学与工程](#) 2002
2. [仪垂详](#) [非线性科学及其在地学中的应用](#) 1995
3. [唐春安](#) [岩石破裂过程中的灾变](#) 1993
4. [朱旺喜](#) [资源枯竭城市灾害形成机理与控制战略研讨](#) 2003
5. [蒋良淮](#) [散粒体自组织临界性及其应用](#)[学位论文]硕士 2003
6. [於崇文](#) [固体地球系统的复杂性与自组织临界性\(上\)](#)[期刊论文]-[地学前缘](#) 1998(3)
7. [P Bak, C Tang, K Wiesenfeld](#) [Self-organized Criticality:an explanation of 1/f noise](#) 1987(04)
8. [P Bak, C Tang, K Wiesenfeld](#) [Self-organized Criticality](#) 1988(01)
9. [P Bak, K Chen](#) [Self-organized criticality](#) 1991(01)
10. [Bushev M](#) [Synergetics Chaos, Order, Self-Organization](#) 1994
11. [G A Held, D H Solina H, D T Keane](#) [Experimental study of critical-mass fluctuations in an evolving sandpile](#) 1990(09)
12. [李仕雄, 姚令侃, 蒋良淮](#) [影响沙堆自组织临界性的内因与外因](#)[期刊论文]-[科技通报](#) 2003(4)
13. [S R Broadbent, J M Hammersley](#) [Percolation Processes](#) 1957
14. [R·泽仑, 黄昀](#) [非晶态固体物理学](#) 1988
15. [彭自正, 王殚业, 许云廷, 牛志仁](#) [逾渗与岩石破裂的计算机模拟研究](#) 1996(01)
16. [刘式达, 刘式适](#) [孤波和湍流](#) 1994
17. [马致考](#) [重正化方法及应用](#) 1998(01)
18. [北京大学物理系《量子统计物理学》编写组](#) [量子统计物理学](#) 1996
19. [C J Allegre, J L Le Mouel, A Provost](#) [Scaling rules in rock fracture and possible implications for earthquake prediction](#) 1982
20. [T R Madden](#) [Microcrack connectivity in rocks:a renormalization group approach to the critical phenomena of conduction and failure in crystalline rocks](#) 1985(B1)
21. [R F Smalley, D L Turcotte, Sara A Solla](#) [A renormalization group approach to the stick-slip to behavior of faults](#) 1987(B2)
22. [Y Huang, H Saleur, C G Sammis, D. Sornette](#) [Precursors, aftershocks, criticality and self-organized criticality](#) 1996
23. [冯端, 金国钧](#) [凝聚态物理学新论](#) 1992
24. [周辉, 王泳嘉, 谭云亮, 冯夏庭](#) [岩体破坏演化的物理细胞自动机\(PCA\)\(I\)——基本模型](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2002(4)
25. [M G Velarde, Normand C](#) [查看详情](#) 1980(01)
26. [于淦, 郝柏林](#) [相变临界现象](#) 1984
27. [Nicolis G](#) [查看详情](#) 1973
28. [Epstein I R](#) [查看详情](#) 1983(03)

29. [Winfree A T 查看详情](#) 1974(06)
30. [Haken H Synergetics, an Introduction:Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics](#) 1977
31. [Haken H Advanced Synergetics](#) 1983
32. [申维 自组织理论和耗散结构理论及其地学应用](#)[期刊论文]-[地质地球化学](#) 2001(3)
33. [徐玖平, 罗久里 拓展非平衡系统自组织理论的研究进展](#) 2000(04)
34. [尹光志, 代高飞, 万玲, 张东明, 魏作安 岩石微裂纹演化的分岔混沌与自组织特征](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2002(5)
35. [Jean-Robert Grasso, Didier Sornette Testing self-organized criticality by induced Seismicity](#) 1998
36. [Caldarelli G, Tolla F D Di, Petri A Sel-organization and annealed disorder in a fracturing Process](#) 1996(12)
37. [赵同, 戚飞虎 协同神经网络的不变性研究](#)[期刊论文]-[上海交通大学学报](#) 1998(10)
38. [谢和平 分形-岩石力学导论](#) 1996
39. [谢和平, 高峰 岩石类材料损伤演化的分形特征](#) 1991(01)
40. [谢和平 断层分形分布之间的相关关系](#) 1994(05)
41. [张济忠 分形](#) 1995
42. [田文栋, 王琦, 李松林, 胡鹏云, 罗亦孝 关联函数在耗散反应激发函数涨落中的应用](#)[期刊论文]-[高能物理与核物理](#) 2000(2)
43. [傅宇方 岩石脆性破裂过程的数值模拟试验研究](#)[学位论文]博士 2000
44. [傅宇方, 梁正召, 唐春安 岩石介质细观非均匀性对宏观破裂过程的影响](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2000(6)
45. [J A Hudson, C Fairhurst Tensile strength Weibull' theory and a general statistical approach to rock failure](#) 1969
46. [唐春安, 王述红, 傅宇方 岩石破裂过程数值试验](#) 2003
47. [Brady B H G, Brown E T Rock Mechanics for Underground Mining](#) 1993
48. [吴鸿遥, 程育仁 损伤力学的基本内容](#) 1985(01)
49. [王晓颖 泥石流产汇流系统自组织临界性模拟研究](#) 2003
50. [许强, 黄润秋 岩石破裂过程的自组织临界特征初探](#)[期刊论文]-[地质灾害与环境保护](#) 1996(1)
51. [Hurst H E, Black R P, Simaika Y M Long-term storage:an experimental study](#) 1965
52. [李娟 地震的分形特征及R/S标度不变性](#)[期刊论文]-[自然杂志](#) 2001(4)
53. [Feder J Fractals](#) 1998
54. [Bassingthwaite J B, Raymond G M Evaluating rescaled analysis for time series](#) 1994
55. [Boschette F, Dentith M D, List R D A fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces](#) 1996(04)
56. [Dolan S S, Bean C J Some remarks on the estimation of fractal scaling parameters-from borehole wire-line logs](#) 1997(10)
57. [Goltz C Fractal and chaotic properties of earthquakes](#) 1997
58. [Leary P Deep borehole log evidence for fractal distribution of fractures in crystalline rock](#) 1991
59. [Hideki Takayasu, Hajime Inaoka New type of self-organized criticality in a model of erosion](#)

1992(07)

60. [Victor B Sapozhnikov, Efi Foufoula-georgiou](#) [Do the current landscape evolution models show self-organized criticality](#) 1996(04)
61. [Didier Sornette](#) [Power laws without parameter tuning: an alternative to self-organized criticality](#) 1994(14)
62. [Jan De Boer, Jackson A D, Tilo Wetting](#) [Criticality in simple models of evolution](#) 1995(02)
63. [国家地震局地球物理所](#) [非线性科学在地震预报中的应用](#) 1992
64. [彭自正, 王殚业, 许云廷, 牛志仁](#) [逾渗与岩石破裂的计算机模拟研究](#) 1996(01)
65. [吴忠良](#) [逾渗模型的地震学含义](#) 1992(04)
66. [S R Broadbent, J M Hammersley](#) [Percolation process](#) 1957
67. [郭增建, 秦保燕, 吴瑾冰](#) [统计物理学在地震预报中的应用](#)[期刊论文]-[国际地震动态](#) 2000(8)
68. [C H Scholz](#) [The frequency-magnitude relation of microfracturing in rocks and its relation to relation to earthquakes](#) 1968(01)
69. [尤明庆](#) [岩石试样的强度及变形破坏过程](#) 2000

相似文献(0条)

引证文献(1条)

1. [张后全, 贺永年, 韩立军, 唐春安, 康伟, 黄兴根](#) [岩石破裂过程微裂纹演化规律有限元统计分析](#)[期刊论文]-[中国矿业大学学报](#) 2007(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y817127.aspx

下载时间: 2010年5月31日