

■ 谭云亮 刘传孝 赵同彬 著

岩石非线性 动力学初论

煤炭工业出版社

国家自然科学基金项目 (50804005、50674063) 资助

国家自然科学基金重点项目 (50534080) 资助

教育部“矿山灾害预防控制重点实验室”基金资助

山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助

岩石非线性动力学初论

谭云亮 刘传孝 赵同彬 著

Elementary Theory for Rock Nonlinear Dynamics

Tan Yunliang Liu Chuanxiao Zhao Tongbin

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是岩石力学新的研究领域岩石非线性动力学方面的一本专著，是作者十几年来科学研究成果的结晶。本书对非线性岩石力学研究现状和发展趋势做了介绍，重点阐述了岩石动力学系统的混沌特征及其描述方法；岩石裂隙分布分形特征和基于时间序列的关联分维预报岩石动力学行为的方法；岩石力学中的突变描述方法；岩石力学中自组织行为及其临界现象；岩石破坏演化模拟的物理元胞自动机 PCA 理论的原理、算法及非均质岩石破坏演化、流变、瓦斯渗流等；非线性人工神经网络在岩石力学中的应用；基于遗传算法非线性反演识别岩石力学参数的方法。

本书可供矿业、水电、冶金、土木、石油等领域岩石力学方面的专家、学者、工程技术人员以及大学生参考使用，也可作为相关研究方向研究生的课程教材。

Summary

Rock nonlinear dynamics is becoming a new branch of rock mechanics and engineering, it is necessary to pay more attention to open out the nonlinear mechanism of rock failure and to establish some effective research methods. This book is the summings – up of authors' recent ten years researching jobs on rock nonlinear dynamics, it is composed of nine chapters. The research status quo and prospect for rock nonlinear dynamics as well as complexity of rock mechanics are introduced in chapter 1 and chapter 2. Chaotic features in rock nonlinear dynamics system and describing methods are introduced in chapter 3. Fractal characteristics of rock fissure distribution as well as correlative fractal dimension predicating method for rock dynamical behavior based on the time series are introduced in chapter 4. Catastrophe describing methods for rock mechanics are brought forward in chapter 5. Self – organization behaviors and critical phenomena are discussed in chapter 6. The rationale and arithmetic of physical cellular automaton i. e. PCA, the simulation achievements for inhomogeneous rock failure evolution, rheological features as well as gas seepage are introduced in chapter 7. The achievements for applying nonlinear neural network into rock mechanics are presented in chapter 8. A new kind of back analysis method based on inherit arithmetic for identifying parameters of rock mechanics is put up in chapter 9.

This book can be referred by the scientists, technicians, teachers and students in college majoring in mining engineering, mechanical engineering, hydroelectric engineering, metallurgical engineering, traffic, civil engineering, etc. It can also be used for the graduate students' teaching material.

前 言

岩石是自然界的产物，是世界上最为复杂的材料之一。从组成上讲，岩石是由多种矿物晶粒、孔隙和胶结物组成。从结构上讲，经过亿万年的地质演变和复杂的构造运动，岩石是极为复杂的非连续、非均质体，具有很强的各向异性、流变性和非线性。特别是岩石的非线性，成为近些年来专家们关注的焦点。如何有效揭示岩石的非线性特征，既是研究岩石非线性动力学的瓶颈，又是当前国内外关注的前沿课题。本书采用混沌、分形、自组织、突变及人工神经网络等非线性动力学方法，研究复杂的岩石力学问题。

本书共分为9章，第1，2，4，5，6，7，8章由谭云亮撰写，第3章由刘传孝撰写，第9章由赵同彬撰写。其中：第1章为绪论，就非线性岩石力学研究现状和展望做了介绍；第2章从岩石的介质性质、应力环境、解析描述方法和数值计算四个方面进行了讨论，为采用非线性方法研究岩石力学问题提供了支持；第3章就岩石动力学系统的混沌特征及其描述方法进行介绍；第4章重点介绍了岩石裂隙分布分形特征和基于时间序列的关联分维预报岩石力学动力学行为的方法；第5章介绍了岩石力学中的突变描述方法；第6章介绍了岩石力学中自组织行为及其临界现象；第7章介绍了岩石破坏演化模拟的物理元胞自动机PCA理论的原理、算法及非均质岩石破坏演化、流变等方面的成果；第8章介绍了基于人工神经网络非线性动力学特征研究岩石力学非线性行为的方法；第9章介绍了遗传算法非线性反演岩石力学参数的方法。本书每一章节，尽量有相应的实验或岩石力学工程中的实例，使得读者对本书所介绍的研究方法更易于把握，每章后还列有参考文献，以便读者查阅。

周辉、马志涛、颜伟、赵志刚、马洪岭、滕桂荣、高明等同志参加了本书的研究工作；岩石力学专家王泳嘉教授及肖亚勋、张玉明、孙伟芳等同志在本书撰写过程中给予了大力帮助；国内外许多学者的相关研究成果为本书所引用，使得本书能够比较系统地呈现在读者的面前；国家自然科学基金项目（50804005、50674063）和国家自然科学基金重点项目（50534080）、教育部“矿山灾害预防控制重点实验室”基金、山东省“泰山学者”建设工程专项经费及山东省自然科学基金的资助使本书得以出版，在此一并表示衷心感谢。

本书是我们课题组十多年来研究工作的总结，我们深知该研究工作还很

肤浅，还不成熟，尚有一些问题需进一步商榷和深化研究，因此将书名定为“岩石非线性动力学初论”。但愿本书的出版能够起到“抛砖引玉”的作用，引起岩石力学界同行的关注，并对不当之处予以斧正，以便帮助我们为岩石力学与工程的发展作出更大的贡献。

谭云亮

2007 年夏于青岛

目 录

1 绪论	1
1.1 岩石力学研究的主要任务	1
1.2 岩石非线性动力学问题	2
1.3 岩石非线性动力学研究展望	5
参考文献	5
2 岩石力学的复杂性	8
2.1 岩石介质性质的复杂性	8
2.2 岩石应力环境的复杂性	42
2.3 岩体力学本构模型的复杂性	49
2.4 岩石力学数值计算的复杂性	58
参考文献	59
3 岩石力学中的混沌性	63
3.1 混沌及其描述方法	63
3.2 坚硬岩层运动过程中的混沌性	78
3.3 节理岩体系统的混沌特征	97
3.4 软岩混沌性	113
参考文献	117
4 岩石力学中的分形特征	120
4.1 引言	120
4.2 分形基本概念及意义	120
4.3 不同尺度岩石裂纹分布盒维数分析	126
4.4 岩石断裂和破碎的分形特征	133
4.5 时间序列分数维计算的若干问题	138
4.6 煤矿顶板失稳垮落分形特征	153
4.7 岩体节理间距分布的分形模型	157
注记 1 B. B. Mandelbort 生平	161
注记 2 Fractal 一词的来历	162
注记 3 分形所涉及的主要研究领域	162
注记 4 分形的哲学意义	164

参考文献	166
5 岩石力学的突变问题	168
5.1 突变基本理论	168
5.2 煤巷掘进迎头煤与瓦斯突出的突变模型	174
5.3 洞壁层裂屈曲岩爆突变模型	178
5.4 煤柱失稳灾变分析	182
5.5 矿震胞映射-灰色光点突变预测模型	188
参考文献	193
6 岩石力学自组织	195
6.1 自组织基本含义及其特征	195
6.2 散体岩石的自组织性	199
6.3 不同尺度岩体破坏演化的自组织性	217
6.4 岩石力学的逾渗问题	234
参考文献	252
7 岩石破坏演化物理元胞自动机(PCA)理论	255
7.1 元胞自动机基本理论	255
7.2 岩石破坏演化的 PCA 基本模型	265
7.3 细观非均质岩石破坏演化的 PCA 模拟	272
7.4 非均质岩石破坏演化的自组织临界性 PCA 模拟	280
7.5 岩石流变行为的 PCA 模拟	287
7.6 基于遗传算法的物理元胞演化力学模型	294
7.7 裂隙煤体中瓦斯运移规律的 LB 元胞自动机模拟	296
7.8 基于 PCA 算法的有限差分法初步	303
参考文献	307
8 岩石力学的神经网络非线性分析方法	310
8.1 神经网络的非线性特征	310
8.2 岩石本构关系的径向基函数神经网络快速逼近模型	313
8.3 分级加载下岩石流变的神经网络模型	318
8.4 冲击地压 AE 时间序列小波神经网络预测模型	321
8.5 巷道分类指标的神经网络聚类分析模型	324
8.6 巷道稳定性类别的神经网络识别方法	328
8.7 初始地应力场人工神经网络识别方法	331
8.8 弹塑性有限元的神经网络计算方法	336
参考文献	339

9 遗传算法在岩石力学中的应用 342

9.1 遗传算法概述 342

9.2 基于 GA 的岩石力学参数反演 353

9.3 岩石边坡稳定性的遗传算法分析 362

9.4 挡土墙库仑土压力的遗传算法求解分析 369

参考文献..... 373

1 绪 论

1.1 岩石力学研究的主要任务

岩石力学是在具有专门的应用对象和需求条件下发展起来的应用力学学科之一。其应用目标始终是推动岩石力学发展的重要驱动力，而数理科学的进步则是引导岩石力学研究的牵动力。两者的结合构成岩石力学与工程学科发展的动力机制^[1]。岩石力学是研究在各种不同的物理环境下岩体力学行为的一门学科，是一切岩石工程设计与施工的理论基础，有很强的应用背景。岩体的几何形态及力学性质复杂，具有非均质性、各向异性、流变性和不连续性等特征。因此，岩石力学又是一门理论研究难度很大的学科。岩石力学探讨岩石在其周围物理和工程环境中变形、强度和破坏的力学性质和力学效应，岩石力学研究的本质就是服务国民经济建设，它的工程应用涉及采矿、交通、水电、石油、工民建、地震、国防工程和核废料处理等岩土工程领域。随着科学技术的进步，21 世纪岩石力学研究的主要任务，必须是从小尺度裂隙岩体问题的解决转向复杂的、大范围的地体系统问题的研究和解决。研究对象的多种因素相互作用，极大地增强了问题的不确定性和非线性。岩石力学中的耦合问题和系统分析变成了不可避免的研究任务^[1]。当今岩石力学研究的主要任务为：

(1) 加强尺度化研究。岩石力学研究必须从小尺度试块研究向着大尺度岩体研究转化，以如何解决大范围、大尺度的地下或地面工程以及资源开发问题为己任。力学上均一体的尺寸效应进化为大尺度和多尺度问题，因此不可避免地将面临多尺度模型及其耦合。非线性分形理论的应用为这方面研究提供了初步的科学方法。

(2) 加强多介质耦合岩石非线性本构理论研究。岩体从本质上讲是包括固、气、液多相介质体，对其本构关系的研究应当包括非线性体积变化、非关联塑性与黏性流动、应变软化、各向异性、拉压异性、主应力旋转影响、加卸载路径依赖性和围压效应等。由微裂纹成核、扩展以及宏观裂纹的出现而导致的破坏与失稳全过程的非线性本构描述，局部化理论及高应变梯度等本构理论都是重要的研究方面。同时，应在细观流变力学研究和宏观流变试验基础上，建立流变理论模型；发展非连续岩体力学、非均匀岩体力学，建立起具有节理特征的岩体本构关系，其内容包括节理岩体的地质描述、节理面力学性质研究等。

(3) 强化多种营力场研究。随着岩石力学问题的拓展，热、流、固、化多场并存时其相互作用与耦合机制有待深入研究和突破，包括考虑固体矿物颗粒、水和气三相相互作用，岩石孔（裂）隙网络几何形状和裂隙表面粗糙度对渗流的影响，固流两相介质应力 -

变形和流动耦合分析,煤与岩体应力-气(液)渗流耦合分析,岩体中应力-热-气(液)体流动及化学材料渗流耦合分析等。同时静载和动载的复合影响也需要深入探讨。

(4) 加强岩石灾变力学行为分析与预报研究。岩石力学从工程岩体稳定性研究向极端灾害的非线性动力过程的预测及防治进军。高烈度地震,巨型山崩、滑坡、泥石流,大型矿山的塌陷等从孕育、形成、发展到成灾的非线系统动力学过程和时空预测将是重大的研究课题。

(5) 加强岩石的大变形研究。大变形力学在岩石工程中的应用始于 20 世纪 70 年代,主要是苏联力学家在进行应用。在小变形理论中,稳定问题由于引用小变形假设而消失了,要研究失稳问题必须采用大变形理论,这是岩石力学所必须面对的。

(6) 加强反演分析研究。长期以来,制约着岩石力学学科发展的主要原因之一就是“三不易确定”^[2]:工程岩体所受的作用力不易确定,反映岩石物性的数学力学模型不易确定和岩体力学参数不易确定。通过强化反演分析研究,从应力分布、物性方程到力学参数得到比较符合实际的结果,是值得重视的。

(7) 注重分形、混沌、灾变和自组织理论在岩石力学中的应用,加强交叉学科研究。其研究包括岩石工程失稳过程的分岔和混沌特征、岩石灾变可预报性及其预报尺度、岩石灾变演化及其非线性预报力学模型等,以便形成一个崭新的岩石力学分支。

1.2 岩石非线性动力学问题

1.2.1 以混沌为主体非线性动力学发展综述

长期以来,人们在线性关系的基础上解决了许多科学技术的重大问题,如弹性振动、电磁波传播等,促进了技术的迅速发展。但是,科学的发展越来越显示出世界在本质上是非线性的,正像直线是曲线的特殊情况一样,线性关系是非线性的特殊或简单形式。20 世纪 60 年代以后,非线性科学的发展如雨后春笋般地不断涌现,已取得了令人瞩目的成就,有人称之为 20 世纪内继量子力学、相对论两大发现后的第三次革命。

20 世纪 60 年代,普利高津^[3,4]的自组织与耗散结构、Haken 的协同论^[5]、Thom 的灾变理论、Mandelbort^[16]的分形几何理论相继诞生,尤其是在 1963 年,美国气象学家 Lorenz^[6]在分析天气预报模型时,得出气象不可预测结论,并发现了混沌。从此以后,研究进展很快:1971 年 Ruelle 和 Takens^[7]提出奇怪吸引子 (Strange Attractor) 的名词;1975 年 Li 和 York 开始提出混沌名词^[8];1976 年 May^[9]研究了一维平方映射;在这个基础上 Feigenbaum^[10]于 1978 年发现了倍周期分岔通向混沌的两个普适常数,并引入重整化群思想,这是一个重大发现,具有里程碑意义。在这方面作出卓越贡献的还有 Arnold^[11]、Smale^[12]、Melnikov^[13]、Kolmogorov^[14]、Moser^[15]等学者。但总的来说,20 世纪 80 年代以前,人们对混沌的研究主要集中在计算机实验(如 Lorenz 系统、Logistic 系统、强迫的 Brusselator 系统)和物理实验(如 Duffing 振动、浅水波的强迫振动)上,而所借助的分析数学工具主要是分岔理论和突变理论。

在我国,郝柏林院士^[17]等率先对分岔、混沌、奇怪吸引子之间的关系进行系统研究。

郑伟谋、郝柏林等^[18]创立了实用符号动力学方法来研究混沌性态；郑祖先、刘式达^[19]对大气湍流发生的问题进行了探讨；朱照宣^[20]（1990）注意到非线性动力学混沌现象，并提出时间序列分析模式可以视为“时间序列 = 混沌 + 涨落”形式。Grassberger 等^[26]（1984）提出了从波动时间序列中提取奇怪吸引子分数维熵的方法。J. D. Farmer^[22]（1987）研究了如何预测混沌时间序列问题，这在混沌判定与预测方面具有重要的意义。

近年来，国内外许多学者在气象^[23-25]、生物^[21]、地震^[29-32]等领域，开展了卓有成效的非线性预报研究，取得了可喜的成果。值得一提的是，Stephen Wolfram^[33]提出的细胞自动机在地震活动等非线性力学自组织研究中已开始得到应用，如 Bak 和 Tang^[34]、Ito 和 Matsuzaki^[35]、郑捷^[36]等用细胞自动机模型研究了地震活动自组织临界现象，曹鸿兴^[37]将自组织临界状态应用于大气旋涡分析中。正像 Per Bak, Kan Chen^[28]所指出的那样，大的相互作用系统自然地朝着一种临界状态进化，在这种状态下，小事件能够导致大灾难。这和 Haken 的协同论、Prigogine 的自组织虽然在方法上不同，但研究的目的是是一致的。同时也看到，自组织的临界状态将预示着混沌状态的出现。

应当指出，Haken 的协同论由于强调系统之间的协作性及因素间的主次关系而导致自组织演化，钱学森称协同学为真正的系统学。

与混沌密切相关的 Mandlebort^[16]创立的分形几何理论在非线性学科中产生了巨大影响，其重要意义之一在于用来描述分形特征量化指标的分数维恰好是量度系统混沌性的重要指标。

对于著名的 Logistic 映射有

$$x_{n+1} = \mu x_n - \mu x_n^2 \quad (1-1)$$

当 $\mu = 3.57 \sim 4$ 时，是混沌区，其两个显著特征是具有周期窗口和自相似结构，而这种自相似恰恰是分形几何中两个重要特征（无尺度性和自相似性）之一。正因为如此，混沌性和分形性似乎相互耦合在了一起，而分数维便显示出了其巨大作用，它不仅用于描述分形特征，而且用于量度混沌（正的分数维往往对应着混沌运动）。Packara^[38]（1980）提出用时间序列重新构造吸引子的相空间图像方法。Takens^[39]（1981）提出嵌入理论，表明只要相空间的维数足够大，就可以刻划 D_0 维的混沌吸引子。刘式达^[27]讨论过吸引子的分数维特征，安镇文^[40]、陈子林^[41]研究了蕴震系统前兆场的分数维及混沌吸引子特征。

总的来看，混沌现象是非线性学科研究的中心课题之一，与之密切关联的内容有分形分岔力学、突变论、自组织和耗散结构、协同学、随机非线性微分方程。在研究方法上有拓扑学方法（如康托集合）、分数维方法、扭结理论（奇怪吸引子方法），有马尔尼科法等数学解析方法，有功率谱分析、映射、细胞自动机等数值方法，还有对实测时间序列进行统计意义上的分析（提取 Lyapunov 指数、分数维、信息熵等）及反演动力学模型方法等。

以混沌为中心的非线性动力学研究成为世界性的热点之一，已越来越受到世界的广泛关注。日本《触发器》月刊曾刊登题为“混沌论与相对论、量子力学并为 20 世纪三大发现”的文章。1990 年 5 月在美国 Los Alamos 召开了具有重要意义的非线性科学未来 10 年展望国际学术讨论会。自 1983 年 11 月中国力学学会召开“分叉、突变和混沌力学”学

术交流大会以来,我国对非线性学科的研究方兴未艾,人们对混沌等非线性动力学现象的认识日趋深刻。钱学森指出:在一个层次的混沌是紧接上一个层次的有序基础,所以没有混沌就死水一潭,不会出现有结构的有序化,也就没有“生命”。连一块石头都有原子、电子层次的混沌,石头有晶体结构,这是有序;但这个结构是“活”的,原子、电子进进出出都是混沌!

1.2.2 岩石非线性动力学研究进展

唐春安、徐小荷^[42-44]率先注意到能够解释不连续、突变现象的灾变论,并将其应用到岩石破坏过程的描述上来,提出了岩石破裂过程的灾变模型。

谢和平、陈至达^[45-47]对岩石断口的不规则性进行统计意义上的分形分析,建立了穿晶以及沿晶界和穿晶耦合的微观断裂 fractal 模型及裂纹分叉的分形模型,描述了岩石微孔隙受压作用后演化过程的分形特征。但上述分形的研究成果主要集中在岩石介质结构特性分形描述上。谭云亮等^[48](1994)率先对煤矿顶板运动过程中声发射分形特征进行了讨论;谭云亮、王泳嘉^[49](1995)对顶板运动过程中声发射、顶板下沉速度等指标进行统计意义上的关联维数分析,详细讨论了用分数预报顶板来压、垮落的可能性,并初步提出了相应的预报方法,将分形方法从理论、实验探讨和描述向工程应用方面推进了可喜的一步。

Huang 和 Turcotte^[51](1990)曾研究过空间不对称的双滑块模型,发现了典型的混沌现象。田野等^[52](1994)用滑坡岩体蠕变位移观测数据计算李雅普诺夫指数,这对于进一步认识岩体蠕变运动混沌现象有一定的理论和实用意义。谭云亮等^[53](1997)对坚硬顶板运动过程中声发射时间序列 Lyapunov 指数进行计算分析表明,顶板运动经历了由周期运动、准周期运动与混沌运动的过程,这对通过实测信息来认知岩层运动的非线性动力学机制,具有重要意义。尹光志等^[54](2000)采用分叉和混沌理论对岩石细观断裂过程及微裂纹演化中的分叉与混沌特征进行一些探索性的研究。周辉^[55](2000)对矿震孕育过程的混沌性及非线性预测理论进行了研究。李泽农等^[56](2000)对软岩巷道运动规律的混沌动力学方法进行了研究,并对巷道运动的短期演化进行了模拟,建立了预报方程。秦四清^[57](2000)根据建立的斜坡演化非线性动力学模型,发现当斜坡本身的非线性作用与外部环境因素的作用能力相当时,斜坡演化过程会出现混沌现象,其通向混沌之路是通过倍周期分叉实现的。宋维源等^[58](2001)根据混沌学理论,研究了冲击地压发生的混沌特性,提出了在一定的尺度内预测预报冲击地压发生的方法。韩非^[59](2001)对矿井涌水量中的混沌及其最大预报时间尺度进行了分析。王连国等^[60](2002)对承压水上开采煤层底板变形破坏过程中岩移、注水量(渗透性)等矿压显现的时序,进行 Lyapunov 指数的提取,并对其混沌性态进行了研究,实例分析表明:煤层底板变形破坏过程中呈现出典型的混沌性态,另外,煤层底板渗透性指标的 Lyapunov 指数比岩移量指标大得多,表明用渗透性指标描述煤层底板变形破坏特征要比岩移量指标更敏感。刘华明等^[61](2003)根据滑坡位移时间序列的非线性性质,应用混沌时间序列预测方法,建立滑坡预测的非线性混沌模型,从而为滑坡位移提供了一种新的预测方法。蒋斌松^[62](2005)讨论深部岩体变形行为及其围岩稳定性分析中应用混沌方法,并给出了最大 Lyapunov

punov 特征指数的计算步骤,并给出了岩体位移时序的线性和非线性两种混沌预报模式。据此,建立了岩体工程位移观测数据的混沌预测方法。

1.3 岩石非线性动力学研究展望

透过岩石复杂性现象,岩石非线性动力学可望在以下几个方面有所突破:

(1) 充分利用分形自相似特点,从岩石细观结构及演化过渡到宏观裂纹结构及演化,解决岩体节理裂隙的尺度性问题,并为最终建立尺度岩石力学奠定基础。

(2) 深入研究其自组织临界状态及力学行为,特别是研究其自组织演化过程中的主宰系统演化的变量及特性,对于把握岩体破坏内在非线性机制具有十分重要的意义。

(3) 对不同结构和建造的岩体而言,研究用有效数值方法来模拟研究围岩破坏及运动过程中混沌特征、影响因素,乃是实现对混沌有效控制,使得岩体系统破坏演化向着有序化转化,实现用岩体破坏及运动非线性动力学行为进行可靠预测的重要途径。

(4) 开展对各类岩石破坏及运动非线性动力学行为的可预报性及预报尺度研究,并研究如何选取描述岩石破坏及运动演化过程的变量类型及变量数目的准则,最终建立起岩体破坏及运动的非线性动力学反演预测模型。

(5) 从能量角度出发,研究岩石破裂演化的物理元胞自动机(PCA)方法、岩体渗流的格子气模型和裂隙逾渗模型。

(6) 建立岩爆、煤与瓦斯突出的分岔、突变模型及其判据。

(7) 充分利用神经网络的非线性动力学机制,进行岩石力学的仿真与计算^[63]。

参 考 文 献

- [1] 王思敬. 岩石力学与工程的新世纪 [C] // 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 北京: 科学技术出版社, 2002: 1-3.
- [2] 李铁汉. 岩体力学的学科属性及发展战略 [J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12 (3): 286-289.
- [3] 普利高津. 非平衡系统的自组织 [M]. 徐锡申, 等译. 北京: 科学出版社, 1986.
- [4] 普利高津. 探索复杂性 [M]. 成都: 四川教育出版社, 1986.
- [5] Haken H. Advanced synergetics [M]. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, 1983.
- [6] Lorenz E N. Deterministic no periodic flow [J]. J Atoms Sci, 1963, 20: 130-192.
- [7] Ruelle D. Takens F. On the nature of turbulence [J]. Commun. Math. Phys. 1971, 20: 167-192.
- [8] Li T Y, York J A. Period three implies chaos [J]. Am Math Monthly, 1975.
- [9] May R M. Simple Mathematical models with very complicated dynamics [J]. Nature, 1976, 261: 459-467.
- [10] Feigenbaum M J. Quantitative universality for a class of non-linear transformations [J]. J Stat Phys. 1978, 19: 25-52.
- [11] Arnold V I, Smale I. Mappings of the circumferences onto itself [J]. Amer Math Soc Transl, 1965, 2 (46): 213-284.
- [12] Smale S. Different morphisms with many period points [M]. S S Cairns; Princeton University

Press. 1963.

- [13] Melnikov V K. On the stability of the center for time periodic perturbations [J]. Trans. Moscow Math. Soc., 1963, 12; 1 – 57.
- [14] Kolmogorov A N. Periodic movements with small change in the Hamilton function [J]. Akad Navk SSSR Doklady, 1954.
- [15] Moser J. Stable and random motions in dynamical systems [J]. Princeton University Press, 1973.
- [16] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature [J]. San Francisco, 1983.
- [17] 郝柏林. 分岔、混沌、奇怪吸引子、湍流及其他 [J]. 物理学进展, 1983, 3 (5): 25 – 32.
- [18] 郑伟谋, 郝柏林. 符号动力学 [J]. 物理学进展, 1990, 10 (2): 316.
- [19] 郑祖先, 刘式达. 对大气湍流发生问题的探讨 [J]. 中国科学, 1987, 17 (6): 669.
- [20] 朱照宣. 关于时间序列分析 [J]. 力学与实践, 1989, 4 (1): 22 – 27.
- [21] 吴祥宝. 混沌时间序列的非线性预测及其在研究人脑功能中的应用. 中国科学院研究生院学报, 1993; 198 – 194.
- [22] Farmer J D. Predicting a chaotic time series [J]. Phys Rev Lett, 1987, 59 (8): 845.
- [23] 林振山. 当代气候的时间序列分析和模式特征 [J]. 北京大学学报, 1991, 27 (3): 358 – 364.
- [24] 林振山. 长期预报的相空间距平符号预报法 [J]. 应用气象学报, 1991, 14 (4): 440 – 446.
- [25] Fraedrich K. Estimating weather and climate predictability on tractor [J]. J Atmos Sci, 1989, 44: 7.
- [26] Grassberger P, Procaccia I. Dimensions and entropies of strange attractor from a fluctuating dynamics approach [J]. Phys Rev D, 1984, 13 (341).
- [27] 刘式达. 地球系统模拟和混沌时间 [J]. 地球物理学报, 1990, 33 (2): 144 – 153.
- [28] Per Bak, Kan Chen. 自组织的临界状态 [J]. 科学, 1991 (5): 8 – 16.
- [29] 安镇文, 王琳英, 朱传镇. 大震前后地震活动的时空分维特征 [J]. 地震学报, 1989, 11 (3): 251 – 258.
- [30] 安镇文, 王琳英, 姚栋华, 等. 大震孕育过程中的混沌特征 [J]. 地震学报, 1992, 14 (4): 393 – 399.
- [31] 白超英, 朱令人, 王海涛, 等. 地震活动信息熵及时空维在地震预报中的意义 [J]. 地震, 1992, 1 (4): 7 – 10.
- [32] 胡平, 杨培才, 李卫. 地震过程动力行为和预报性问题的研究 [J]. 地球物理学报, 1990, 33 (6): 647 – 656.
- [33] Stephen Wolfram. Statistical mechanics of cellular automata [J]. Rev. of Modern phys, 1983, 55 (3): 601 – 643.
- [34] Bak P, Tang C. Earthquakes as a self – organized critical phenomenon [J]. J G R, 1994 (B11): 635 – 637.
- [35] Ito K, Matsuzaki M. Earthquakes as self – organized critical phenomenon [J]. J G R, 1995(5): 6853 – 6860.
- [36] 郑捷, 李兴才. 具有滑动弱化模式本构关系的断层滑动细胞自动机模型 [J]. 中国地球物理学会会刊. 北京: 地震出版社, 1992.
- [37] 曹鸿兴, 等. 大气大型涡流的自组织界态. 分形理论及应用 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993.
- [38] Packard N H. Geometry from a time series [J]. Phys Rev Lett, 1980, 45: 712.
- [39] Takens F. Detecting strange attractor in turbulence [J]. Lecture Notes in Math, 1983, 23: 151 – 157.

- [40] 安镇文. 分形与混沌理论在地震学中的应用与探讨. 分形理论及应用 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993.
- [41] 陈子林, 周硕愚. 蕴震系统前兆的混沌吸引子及其分维 [J]. 地震学报, 1993, 15 (4): 463 - 470.
- [42] 唐春安, 徐小荷. 岩石破裂过程失稳尖点灾变模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 1990, 9 (2): 100 - 107.
- [43] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
- [44] Chunan Tang, John A, Hudson, et al. Rock failure instability and related aspects of earthquake mechanics [M]. China Coal Industry Publishing House, 1993.
- [45] 谢和平, 陈至达. 分形 (fractal) 几何与岩石断裂 [J]. 力学学报, 1998, 20 (3): 264 - 271.
- [46] 谢和平, 陈至达. 岩石类材料裂纹分叉非规则性几何分形效应 [J]. 力学学报, 1989, 12 (5): 613 - 619.
- [47] 谢和平. 岩石力学中的分形 [M]. 荷兰: balkema 出版社, 1993.
- [48] 谭云亮, 石永奎. 煤矿顶板活动过程中声发射前兆分析 [J]. 东北大学学报, 1994 (S).
- [49] 谭云亮, 王泳嘉. 煤矿顶板冒落分形预报方法 [J]. 中国安全科学技术学报, 1995, 25 (32): 121 - 125.
- [50] 谭云亮, 杨永杰. 煤矿顶板冒落分形预报可行性 [J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(1): 90 - 95.
- [51] Huang J, Turcotte D L. Are earthquake and example of deterministic chaos? Geophys Res Lett, 1990, 17 (3): 223 - 226.
- [52] 田野, 徐平. 用岩体蠕变数据计算 Lyapunov 指数 [J]. 长江科学院院报, 1994, 11 (2): 49 - 66.
- [53] 谭云亮, 宋扬. 顶板运动过程中混沌性分析 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1997, 4 (3): 227 - 229.
- [54] 尹光志, 鲜学福, 等. 岩石细观断裂过程的分叉与混沌特征 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2000, 23 (2): 56 - 59.
- [55] 周辉. 矿震孕育过程的混沌性及非线性预测理论研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (6): 813.
- [56] 李泽农, 王圣公. 软岩巷道运动规律的混沌动力学方法研究 [J]. 煤炭学报, 2000, 25 (增刊): 107 - 111.
- [57] 秦四清. 斜坡失稳的突变模型与混沌机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19 (4): 486 - 492.
- [58] 宋维源, 潘一山, 等. 冲击地压的混沌学模型及预测预报 [J]. 煤炭学报, 2001, 26 (1): 26 - 30.
- [59] 韩非. 矿井涌水量中的混沌及其最大预报时间尺度 [J]. 煤炭学报, 2001, 26 (5): 520 - 524.
- [60] 王连国, 宋扬, 等. 底板岩层变形破坏过程中混沌性态的 Lyapunov 指数描述研究 [J]. 岩土工程学报, 2002, 24 (3): 356 - 359.
- [61] 刘华明, 齐欢, 等. 滑坡预测的非线性混沌模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (3): 434 - 437.
- [62] 蒋斌松, 韩立军, 贺永年. 深部岩体变形的混沌预测方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (16): 2934 - 2940.
- [63] 冯夏庭. 智能岩石力学的发展 [J]. 中国科学院院刊, 2002, 6 (4): 256 - 259.

2 岩石力学的复杂性

2.1 岩石介质性质的复杂性

2.1.1 岩石材料的类型及其形成

1. 岩石的定义

陈颙^[1]将岩石进行了如下定义：岩石是一种或几种造岩矿物按一定方式结合而成的矿物的天然集合体。岩石是在地球发展到一定阶段时，经历各种地质作用形成的坚硬产物，它是构成地壳和地幔的重要物质。由于岩石具有自己特定的密度、孔隙度、抗压强度等许多物理性质（表 2-1），因此岩石虽由矿物组成，但其所表现出来的特性，却常常不能用一种或几种矿物的特性加以替代或描述。换言之，岩石像其他材料一样服从同样的力学定律，但其在形态上有很大差异。

2. 岩石的类型及其成岩过程

1) 岩浆岩

岩浆岩是岩浆冷凝而形成的岩石。绝大多数岩浆岩是由结晶矿物所组成，是组成地壳的主要岩石元素。构成岩浆岩的元素主要有氧、硅、铝、钙、钠、钾、镁等。其中二氧化硅在岩浆岩中的比例最大，在各种不同的岩浆岩中占 35% ~ 78%。在岩浆岩中，二氧化硅被称为酸性成分，铁、镁、钙被称为基性成分，钠、钾被称为碱性成分。一般而言，将二氧化硅含量大于 65% 的岩浆岩称为酸性岩，如花岗岩、流纹岩；将二氧化硅含量为 52% ~ 65% 的岩浆岩称为中性岩，如安山岩、闪长石等；将二氧化硅含量小于 52% 的岩浆岩称为碱性岩，如玄武岩、辉长石等。

岩浆岩的形成过程称为火成过程，即地壳深部的岩浆在地下或喷出地表发生结晶或固化作用。如果岩浆在地下活动，冷凝固化后可以形成侵入岩；如果岩浆由火山活动喷发到地表后才冷凝固化，则形成喷出岩。

2) 沉积岩

沉积岩是由母岩（岩浆岩、变质岩和早期形成的沉积岩）在地表经风化、剥蚀、搬运、沉积和硬结作用而形成的岩石。上述过程，称为沉积过程。沉积岩的主要物质成分为颗粒和胶结物。颗粒包括各种不同形状和大小的岩屑及某些矿物。胶结物常见的成分有钙质、硅质、铁质及泥质等。一般而言，硅质、钙质胶结的沉积岩强度较大，泥质胶结的沉积岩强度较小。另外，由于受沉积环境的影响，沉积岩具有层理构造，这就使得沉积岩沿着不同方向表现出不同的力学性能。

尽管岩浆岩占据了地壳总体积的 95% 之多^[2]，但地壳表层分布最广的是沉积岩。沉

积岩覆盖了大陆面积的 75%（平均厚度 2km）和几乎全部的海洋地壳（平均厚度 2km）。由于沉积岩的沉积过程与岩浆岩的成岩过程有着明显的不同，因而在内部微结构上二者有着明显的差异。一般而言，岩浆岩多为晶粒结构，而且在成岩时各种矿物彼此紧密接触，很少有孔隙；沉积岩是由松散的沉积物固结而成的，而且经过压实、胶结再次硬化，中间有很大的孔隙，往往具有层状结构。沉积岩的种类很多，但考虑到矿物颗粒大小及成分等因素，可以将其分为砂岩、页岩和石灰岩^[1]三类。

表 2-1 常见岩石的某些物理性质

岩石类型		密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度/%	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
岩浆岩	花岗岩	2.6 ~ 2.7	1	200 ~ 300	4 ~ 7
	闪长岩	2.7 ~ 2.9	0.5	230 ~ 270	
	玄武岩	2.7 ~ 2.8	1	150 ~ 200	
沉积岩	砂 岩	2.1 ~ 2.5	5 ~ 30	35 ~ 100	1 ~ 2
	页 岩	1.9 ~ 2.4	7 ~ 25	35 ~ 70	
	石灰岩	2.2 ~ 2.4	2 ~ 20	15 ~ 140	
变质岩	大理岩	2.5 ~ 2.8	0.5 ~ 2	70 ~ 200	4 ~ 7
	石英岩	2.5 ~ 2.6	1 ~ 2	100 ~ 270	
	板 岩	2.6 ~ 2.8	0.5 ~ 5	100 ~ 200	

砂岩包含的矿物颗粒的大小范围为 1/16 ~ 2mm。这些颗粒大多来源于风化等作用后的岩浆岩碎片，还有一部分来源于已经存在的砂岩风化物，其主要矿物是石英、长石和钾长石。在沉积岩总量中，砂岩约占 50%，如图 2-1 所示。

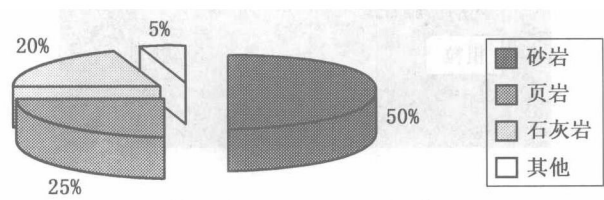


图 2-1 沉积岩组成比例图

页岩是由直径大小不足 1/16mm 的细颗粒组成。页岩以黏土矿物为主要造岩矿物，也包括许多细粒的石英、长石等矿物。这些颗粒细密，渗透性差。页岩在沉积岩总量中，约占 25%。

石灰岩以方解石和白云石为主要造岩矿物，它占沉积岩总量的 20% 左右。

3) 变质岩

变质岩是岩浆岩、沉积岩甚至是变质岩等现存的岩石在地壳中受到高温、高压及化学活动性流体的影响发生变质而形成的岩石。它在矿物成分、结构构造上具有变质过程中所