文章编号：1000－7598－(2004)增刊－0001－09

试论我国岩石力学的研究状况及其进展

吕爱钟

（山东科技大学 土木建筑学院，山东 泰安，271019）

摘 要: 从岩石（岩体）基本性质的试验研究；岩石塑性力学研究及岩石塑性应变梯度理论；岩石流变力学研究；岩石损伤、断裂力学研究；岩石块体力学研究；分形－岩石力学研究；岩石渗流（耦合）力学及环境岩土工程；岩石力学计算方法及位移反分析；智能科学方法在岩石力学问题中的应用；非线性科学方法（混沌）在岩土工程中的应用 10 个方面介绍了我国岩石力学的研究状况及其进展，并回顾了岩石力学专家们一些年来所取得的主要成果。

关 键 词: 岩石力学；状况；进展

中图分类号：TU 45 **文献标识码：**A

Some situation and progress in rock mechanics study in China

LU Ai-zhong

(College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China)

Abstract: The present situation of rock mechanics study and its progress in China are stated from ten aspects such as test of basic behavior; plasticity and plastic strain gradient; rheologic theory; damage and fracture; black theory; fractal theory; coupling seepage/stress and environment geotechnical engineering; numerical methods and displacement back analysis; intelligence techniques; chaotic behavior and predictive. It also briefly reviewss the main success achieved in recent years.

Key words: rock mechanics; present situation; progress

1 引 言

新中国成立以后，交通、能源、水利水电与采矿工程各个领域遇到了许多与工程地质及岩土力学密切相关的技术难题。例如特殊的区域性构造地质、松散破碎复杂岩基、高地应力作用下的极软岩、大跨洞室围岩的大变形、水工隧洞群之间的相互受力作用、高陡边坡的长期稳定、以及“三下”采煤等等。由于这些领域的需要，对岩石力学与工程学科在我国的发展起到了有力的促进作用[1, 2]。

从上世纪 50 年代末开始，我国有历史意义的大型水利水电工程设计勘测的大规模展开，为岩石力学的试验和理论研究以及实际的工程应用注入了巨大的活力[3, 4]。80 年代末，中国政府决定正式兴建长江三峡工程，更大量的岩石力学与工程问题摆在中国专家、学者们的面前，如长达 6 km、最大坡高达 170 m 的永久船闸高边坡岩体开挖，其整体稳定性与变形机制、岩体流变与地下水渗流等等极为复杂多变的岩石力学课题[5]，需要研究和解决。

下面分 10 个方面，简述我国岩石力学的研究状况及其进展。

2 岩石（岩体）基本性质的试验研究

岩石试验是岩石力学的基础，是研究岩石力学与工程的重要手段之一。在我国，随着试验设备和手段的提高，岩石力学的试验水平有了较大的发展。特别是常规的岩石力学试验发展很快，如单轴拉伸压缩试验、三轴压缩试验、岩体抗剪试验、岩石流变试验、断裂试验等。近年来，随着大批重大岩石工程建设的需要，对岩石力学特性试验提出了更高的要求，进行了若干非常规的岩石力学特性试验研究。例如：利用高倍扫描电镜对岩石的细观时效损伤特性所进行的细观试验分析、岩石损伤力学特性的 CT 试验、岩石声发射试验、膨胀岩的膨胀试验，复杂应力条件下岩石在开挖卸荷条件下的多轴卸荷破坏试验等。

收稿日期：2004-7-15
基金项目：得到国家自然科学基金项目（50279018）的资助。
作者简介：吕爱钟，男，43 岁，博士，现任山东科技大学教授、博士生导师、土木建筑学院院长，主要从事岩石力学方面的教学和研究工作。
E-mail：lvaizhong@tom.com。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 岩石塑性力学研究及岩石塑性应变梯度理论

经典塑性力学难以反映岩土类材料的变形机制，其计算结果与实际受力、变形状况有一定差异，还会出现定性上的失误。例如一些实际体缩的材料会算出体胀，反之，体胀会算出体缩；又如岩土材料塑性应变增量方向与屈服面非正交，而按经典塑性力学算出的必然正交。诸如此类问题，国内外岩土力学界早有发觉，并通过大量试验加以证实。早在 20 世纪 70 年代，就有人指出岩土类材料不服从关联流动法则，提出了非关联流动法则及具有剪切屈服面与体积屈服面的双屈服模型来修正计算。然而，长期以来始终没有形成较为严密的理论体系，国内郑颖人、沈珠江、龚晓南等岩土塑性力学专家在借鉴国外研究成果的基础上，经过潜心研究，注意到经典塑性力学中存在传统塑性势假设、关联流动法则假设与应力主轴不旋转假设。正是这些假设，使经典塑性力学无法较好地适应岩土材料的变形机制，经过国内岩土塑性力学专家的共同努力，从固体力学原理出发，把经典塑性力学拓展为广义塑性力学，它既适用于岩土类材料，也适用于金属[6]。

岩石材料达到塑性破坏后的一个主要特征是：岩石破坏后具有应变软化特性，并有时伴随着变形失稳过程，这是岩石力学非线性本构研究的难点，也是固体力学中的核心研究课题。在经典塑性力学中将具有应变软化特性的这类岩土材料视为不稳定材料，经典塑性理论中的德鲁克（Drucker）公设不再适用，尽管伊留辛公设可以描述不稳定材料，但伊留辛公设与德鲁克公设一样要满足塑性势面与屈服面相同的条件（岩土材料的塑性势面与屈服面是不一致的）。具有应变软化特征的这种材料不总是不稳定的，在一定条件下，一些岩石在软化区是稳定的，而对另一些岩石在软化区是不稳定的。即使是同种岩石，在不同条件下，其软化区的稳定性也不相同。因此，传统的唯象学本构理论在岩石应变软化区的应用遇到了极大的理论困难。

基于传统的连续体力学的弹塑性理论和各种宏观尺度下的本构关系，没有考虑细观尺度的影响，实际上在岩石中含有可见尺度的小裂纹和节理，通过岩石试件的实验，已经发现试件的尺度效应和应变局部化现象。尺度效应现象已经比较熟悉，而应变局部化相对陌生。所谓应变局部化是指一个宏观均匀的岩石试件，受到均匀的压缩载荷作用，在峰值强度前，岩石试件各处的变形场基本上是均匀的，而在接近和超过峰值强度后，变形会强烈集中到一个区域或条带上，变成非均匀的变形场，破坏出现在局部。尺度效应和应变局部化这是传统的宏观连续介质理论不足以解释的现象。

为了解决这一问题，人们考虑在传统弹塑性理论的框架下，发展了应变梯度塑性理论，即在本构关系中引入应变梯度项。即材料的本构关系不仅与应变有关，而且与应变梯度有关，若考虑一维情况，则有

$$\sigma = f\left(\varepsilon, l\frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}x}\right)$$

式中 l 是为了应变梯度项与应变项在本构关系中量纲的匹配，而引入的一个依赖于材料细观结构的内变量，称为材料长度参数。通常认为，材料长度参数和材料的颗粒直径和裂缝尺寸有关，材料的质地越均匀，其值越小。当 $l = 0$ 时，应变梯度塑性理论退化为经典的塑性理论。

在金属类材料中，目前，应变梯度塑性理论有多种提法，例如，有用转动变量表示的偶应力理论，用应变梯度表示的应变梯度理论，并且有各种高阶梯度的理论，CS（Couple Stress）应变梯度塑性理论（也有称偶应力理论）和 SG（Stretch and rotation Gradient）应变梯度塑性理论已在断裂力学中得到了应用[7]，很多成果在岩石力学的应变梯度塑性理论中值得借鉴。

在国内岩石力学界，潘一山、冯吉利等人（1998）最早涉入岩石的应变梯度塑性理论的研究[8]，王学滨等人在此领域也做了大量的研究工作[9]。所涉及的主要工作有：岩石失稳破坏的应变梯度模型研究；冲击地压后变形破坏的梯度塑性理论；多孔介质动力应变局部化分析的梯度塑性模型；基于应变梯度理论的岩石试件剪切破坏失稳判据；岩石材料应变软化尺寸效应的实验和理论研究；岩石单轴压缩作用下变形局部化的梯度塑性解；考虑应变率及应变梯度效应的断层岩爆分析。

4 岩石流变力学研究

在软岩和极软岩、节理裂隙发育或高地应力条件下，岩石的流变特性更为明显，已成为工程设计计算中须考虑的主要因素。我国学者虽然在岩石材料流变学的研究方面起步比较晚，但发展较快。

在实验设备研制方面，早在 80 年代，同济大学研制了岩体弱面剪切流变仪(1982)，武汉水利电力大学研制了岩石三轴流变仪（1982），中国科学院地球物理研究所研制了多功能高温高压条件下的岩石

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

三轴流变仪（1985）等等都是其代表。这些试验设备的研制和应用大大促进了岩石流变力学在我国的发展[1]。

在岩石流变学理论与应用方面也进行了不少研究工作。已故的陈宗基教授在中国率先建立了岩石流变的扩容方程（1981），其特点是不仅考虑一般的蠕变，而且考虑其扩容变形也随时间增长而发展，并将这一理论应用于矿山井巷围岩稳定性评价以及岩爆和地震方面的研究；孙钧（1984）结合一些水电站地下厂房围岩流变研究，对岩块、节理和软弱夹层以及断裂破碎带的非线性流变特性分别进行了深入细致的研究，最近，又结合有限元数值方法，研制了真三维粘-弹-塑有限元非线性数值分析程序软件，用于三峡工程永久船闸高边坡开挖施工全过程做三维数值模拟，取得了良好的社会效益和经济效益；1989 年，夏才初提出了考虑加载历史影响的蠕变试验，并对岩石流变性的尺寸效应进行了探讨[10]；1993 年，金丰年对岩石的时间效应从试验到理论进行了深入的分析，讨论了应变速度、载荷速度对岩石强度的影响，提出了可变模量的非线性本构方程[11]；1995 年，李永盛研究了单轴压缩条件下，4 种岩石的蠕变和松弛试验[12]；1997 年，刘保国研究了岩体粘弹、粘塑性本构模型的辨识原理及其工程应用[13]。

现有绝大多数岩石流变模型没有考虑参数的时间相关性，而实际上，岩体在水和风化等因素的作用下，某些力学参数随时间的变化而变化是明显的[14]；现在国内学者对粘弹力学中的微分型模型研究和应用的较多，比较熟悉 Laplace 变换解法，而对积分型模型和积分算子方法国内知者甚少[15]，实际上，积分型本构形式包含了微分型本构形式所能表达的内容，并可以超越在它之外，也就是说积分型本构形式更具有一般性。

5　岩石损伤、断裂力学研究

损伤力学是近 20 年发展起来的一门新的学科，它是材料变形与破坏理论的重要组成部分。在外载和环境的作用下，由于细观结构的缺陷引起的材料或结构的劣化过程，称为损伤。岩石材料是一种自然地质体，其内部各种节理、裂隙和微缺陷的存在是不可避免的，损伤力学的发展为合理考虑岩石材料各种分布缺陷的研究提供了有力的手段。

20 世纪 80 年代末，损伤力学在岩石力学的应用在国内受到极大关注，周维垣（1985）首先将损伤力学应用于二滩拱坝坝肩稳定分析，进行了岩体损伤裂隙的统计，得出了损伤裂隙分布模型，并由此定义出损伤张量，进而引入有限元计算；谢和平（1987）将岩石粘弹塑性非线性大变形有限元计算与损伤力学相结合，在矿山地下开采、地表沉陷、路基稳定性分析方面得到一定的应用，并出版了《岩石、混凝土损伤力学》专著（1990）；杨延毅（1990）完成了《节理裂隙岩体损伤-断裂力学模型及其在岩体工程中的应用》博士论文；李新平（1990）完成了《多裂隙岩体的等效连续弹性损伤断裂模型、强度特性及有限元分析》博士论文，将损伤力学和断裂力学结合起来，考虑了裂隙对岩体应力、应变的损伤效应，建立了岩体损伤演化方程和本构方程（1992）[16]；孙钧（1992）、赵永红（1993）分别采用带有微型加载装置的扫描电镜对岩石的微损伤扩展进行研究，并用于三峡船闸高边坡闪云斜长花岗岩的损伤扩展分析（1997）；这些研究有力地推动了岩体损伤力学的发展，特别是在岩石损伤机理的解释方面起到了积极作用。近年来，杨更社等（1996）在岩石损伤的 CT 识别方面进行了尝试性的研究，通过 CT 可以定量地与岩石损伤变量和损伤扩展联系起来，为建立岩石损伤扩展本构关系奠定了基础[17]。李术才（1996）完成了《加锚断续节理岩体断裂损伤模型及其应用》博士论文，按应变能等效假设及自洽理论建立了加锚断续节理岩体在复杂应力状态下的本构关系及其损伤演化方程，并将其应用于三峡船闸高边坡稳定性分析中，重点分析了边坡节理尖端产生次生裂纹的可能性及演化长度和用锚固手段减少节理损伤演化区和边坡变形量的效果[18]。在开挖爆破、地震、核爆等动荷作用下动力损伤特性的研究国内外刚开始不久，李宁（2002）提出了裂隙岩体的细观动力损伤模型[19]。

6　岩石块体力学研究

浅部天然硬岩几乎都是受到非连续面切割的岩体。因此，一般可以将它看作一种块体结构。在块体理论中，认为结构面是贯通的，并且强度很低或不具有强度，而块体则是刚性的。这一理论首先是由石根华提出的（1977），块体理论首先将结构面和开挖临空面看成空间平面，将各种作用荷载看成空间向量，应用几何方法（拓朴学和集合论）详尽研究在已知各空间平面条件下岩体内可构成多种块体类型及其可动性，然后，通过静力平衡计算，求出各类失稳块体的滑动力，作为工程加固措施的设计依据，块体理论在我国水电工程、边坡稳定分析中得到较好的应用。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

近年来，石根华（1985）又将块体理论得以发展，形成了 DDA 的理论和方法，DDA（不连续变形分析）是分析块体系统运动和变形的一种新的数值模型，与前期的块体理论不同，它是将块体本身视为可变形体。邬爱清等学者（1997）认为，DDA 模型将岩体完全离散化，这与实际岩体的情况不十分相符，将 DDA 模型与连续介质力学数值模型结合起来，如将 DDA 模型与有限元数值方法相结合，应该是 DDA 模型工程应用研究的发展方向[20]。孙钧（1997）及其课题组研制了二维 DDA 程序软件，DDA 方法在三峡船闸高边坡岩体的应用显示出良好的效果。

Cundall（1971）提出的离散单元法是分析裂隙块状岩体的较好方法之一。离散元法是专门用来解决不连续介质问题的数值模拟方法，最初它的研究对象是岩石等非连续介质的力学行为，它的基本思想是把不连续体分离为刚性元素的组合，使每个刚性元素满足运动方程，用时步迭代的方法求解各刚性元素的运动方程，继而求得不连续体的整体运动形态，离散元法允许单元之间的相对转动、滑动乃至块体的分离，不一定满足位移连续和变形协调条件，尤其适合求解大位移和非线性问题。王泳嘉（1986）首次向国内介绍了离散元法的基本原理及几个应用例子，将这一方法应用于矿山边坡的稳定分析，按裂隙、断层等结构面的切割情况并由计算机优化划分单元，得到了边坡破坏过程的动态分析。此外，离散单元法在矿山放矿动态模拟中也有应用。当考虑单元本身的变形时，这就是可变形的离散元法[21]，DDA 方法实际上也是一种可变形的离散元模型。

目前，开发离散元商用程序最有名的公司要属 Cundall 加盟的美国 Itasca 国际咨询公司，该公司开发的二维 UDEC（universal distinct element code）和三维 3DEC（3-dimensional distinct element code）块体离散元程序，主要应用于模拟节理岩石或离散块体岩石在准静态或动载条件下力学过程的工程问题。近年来，离散单元法和有限元、边界元的混合分析在岩石力学与工程中更加显示出它的优越性。

离散元法允许单元之间的相对转动、滑动乃至块体的分离，当假定节点位移满足连续条件时，可利用 Itasca 公司开发的 FLAC（fast langrangian analysis of Continua）程序进行计算。FLAC 是一种显式差分程序，该程序的基本原理和算法与离散元法相似，可以对连续介质进行大变形分析。FLAC 程序可以进行边坡、基础、坝体、隧道、地下采场、洞室、开采沉陷预测、岩石变形局部化分析等问题的模拟分析。FLAC 还具有很强的前处理功能和后处理功能。由于该程序特别适合于岩土工程问题分析，推出以后，立即受到重视，目前，在国际岩土界相当流行。FLAC 程序引入国内仅有数年时间，现已从 $FLAC^{2D}$ 拓展到 $FLAC^{3D}$，已引起许多科研单位的广泛兴趣。该方法求解使用了离散模型方法、动态松弛方法和有限差分方法 3 种技术，从而，将连续介质的动态演化过程转化为离散节点的运动方程和离散单元的本构方程求解。

7 分形-岩石力学研究

岩石内部含有大量不同阶次、形状极不规则的微孔隙、微裂纹等内部缺陷，是造成岩石宏观非弹性变形和各向异性的根本原因，这些微孔隙和微裂纹的扩展与岩石的强度有直接的联系。20 世纪 70 年代由法国数学家 Mandelbort 创建的分形理论，研究数学领域和自然界中经典欧氏几何无法表述的极其复杂和不规则几何形体与现象，并用分形维数定量刻画其复杂程度。分形-岩石力学是定义在分形度量空间的岩石力学理论，具体地说，是研究考虑自然分形效应的岩石介质变形破坏规律的力学理论[22]。

20 世纪 70～80 年代，分形-岩石力学研究的第一个层次是对现象的描述，如对地形地貌、裂纹扩展路径、裂隙网络的分形计算，然后与一些物理量挂钩，得到一些关系并加以解释。目前，分形-岩石力学的研究已进入第二个层次，也就是对岩石分形的物理机制和演化规律的研究。

我国学者在分形-岩石力学这一领域里的研究是令人瞩目的，其中谢和平的工作最具代表性。他在国内最早开设“分形岩石力学”（Fractals-Rock Mechanics）课程。自 1985 年以来，将分形理论与岩石损伤和断裂力学有机地结合，从刻画岩石材料细观结构入手，在微、细、宏观不同层次上揭示岩石和岩体的力学机理、行为和演化过程。

以谢和平为代表的中国学者在分形岩石力学方面的主要成果为：应用分形维数反映岩石损伤演化程度（用分形维数构造损伤张量）；用分形几何描述岩石节理与断裂表面形态、断层分布、岩石孔隙结构；将分形理论应用于地震、滑坡、煤与瓦斯突出的预报，根据矿震的分维变化预测冲击地压和岩爆；岩石爆破块度分布的分形结构、岩体裂隙间距的分形特征、煤岩变形及破裂电磁辐射信号的分形规律、岩石渗流过程的分形研究等等。这些研究成果已部分直接或间接地应用于岩石工程实践中，但要完整

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

而理想地应用于工程实际看来还有一个相当长的过程。如何将分形的研究成果进一步应用于实际工程是当前国内岩石力学工作者正在努力的方向。

8 岩石渗流（耦合）力学及环境岩土工程

天然岩体并非总是单一的固相介质，有时在固相介质中的孔隙中赋存有液相和气相，这样的介质称为三相介质体。在许多情况下，必须考虑液体（水或油）、气体（煤矿瓦斯等）在多孔隙和裂隙岩体中的流动规律，这是一个三相介质耦合的相互作用问题，所形成的应力场对岩体的变形和稳定有着重要的影响。例如，岩体中的冷库、气储存库、油库、核废料处理等都涉及多相介质的相互作用问题。当前，水电站大坝建设中的岩体渗流是其中的一个重要领域。三峡高边坡需要研究水位上升的渗流诱发的滑坡和地震。因此，耦合岩石力学研究应予以高度重视。我国在这方面的研究起步较晚，但已取得了很大进步。陶振宇把岩石力学的应力-渗流耦合分析应用到水库诱发地震的预测研究上，得到了一些有意义的结果。赵阳升（1993）针对矿山岩石力学特点，建立了煤体-瓦斯耦合的力学模型，并对冲击地压与瓦斯突出的统一失稳理论进行研究，在矿山工程中取得了初步成功[23]。目前，在核废料的地质贮存和高温岩体的地热开发中所涉及的耦合力学分析还要考虑由热产生的温度场耦合。

环境岩土工程是近年来新发展起来的一个研究分支，环境岩土工程越来越受到人们的重视，环境岩土工程学是一门新兴的交叉学科，它涉及岩土力学与岩土工程、环境工程、土壤学、地质学、水文地质和工程地质、地球化学、采矿工程等。袁建新（1996）对环境岩土工程的发展历程作了回顾，并对各类废料的力学和化学性质及溶质传输问题进行了论述，提出了环境岩土工程可供选择的课题（水土流失、海水入侵、地面沉降、土地砂化或盐碱化、滑坡与山崩、城市垃圾、核废料处置、地震、洪水等问题）[24]。

环境岩土工程问题其表现方式可分为环境污染和环境破坏两种类型[25]。环境污染是指人类活动向环境排放了超过环境自净能力或环境质量标准的有毒有害物质和能量所引起的环境问题，例如，大气污染、水体污染、土壤污染和固体废物污染等；环境破坏是指在开发利用自然环境和自然资源的非排污性活动过程中所引起的问题。例如，边坡开挖引起的滑坡灾害，打桩、盾构和顶管推进以及基坑开挖对周围建筑、道路和地下管线的影响，地下开采引起的地表移动对地面建筑物、道路、土地的破坏等问题。应用以力学为基础的岩土工程的原理和方法是无法解决大部分环境岩土工程问题的，因为环境岩土工程问题不是单纯的力学问题，在多数情况下，它是一个化学的或生物的问题，甚至还涉及到社会问题。

方晓阳（2000）在关于 21 世纪环境岩土工程展望中[26]，论述了对环境岩土工程进行评价的重要性，同时，讨论了常规岩土工程方法不适用研究土与环境相互作用问题的原因，提出了 21 世纪最具挑战性的两个环境岩土工程问题——台湾海峡横跨工程（相当不利的环境条件有地震、火山活动、海啸、台风、暴雨、强海浪及复杂的地质构造和地理特点）和戈壁沙漠绿化工程（沙漠的主要环境问题有：热、风和水，沙漠绿化目的是使沙漠-水-环境的相互作用处于最佳状态，从而，使广大的废地变成人类赖以生存的良田）。

9 岩石力学计算方法及位移反分析

前面所提到的岩土塑性力学、流变力学、损伤、断裂力学、块体力学、分形—岩石力学、渗流（耦合）力学的理论（在数学上往往是由一系列偏微分方程组构成）等一旦建立，对于具体问题，在给定的边界条件下如何进行求解？这是我们最为关心的问题，一般情形下难于通过解析的方法求出它的解析解，通常必须采用数值计算的方法进行求解，数值法具有较广泛的适用性，它不仅能模拟岩体的复杂力学特性，也可很方便地分析各种边值问题和施工过程，并对工程进行预测和预报，因此，岩石力学数值分析方法是解决岩土工程问题的有效工具。

30 年来，岩石力学数值计算方法得到了迅速发展，出现了有限差分、有限元、边界元、离散元、块体元、无限元、流形元及其混合应用等各种数值模拟技术，使复杂的岩石力学与工程问题的设计成为可能。值得指出的是，在我国，有限元数值计算方法已不仅由线性发展到高度非线性和大变形问题，由二维发展到三维，同时，还可以考虑流变、渗流与应力场耦合、损伤、断裂以及动力效应。国内出现了一些享有声誉的有限元程序，这些程序均在许多大型岩石工程中得到了良好应用。不同数值计算方法的结合，更能充分发挥各种数值方法优势互补的作用。如有限元-边界元的混合、有限元-离散元的混合、有限元-无限元和有限元-块体元的混合采用等。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

王泳嘉（1996）提出[27]：拉格朗日元法和流形元法这两种方法都适用于非线性大变形的问题。我们都有这个经验，就是用有限元法计算时的位移通常较实测的结果要小，有时甚至差一两个数量级，究其原因主要是在计算中忽略了非线性的大变形和沿弱面的不连续变形，而用拉格朗日元法和流形元法计算有望对岩石力学的计算方法做出重大的改进，两者的结合则有可能成为 21 世纪岩石力学数值方法的主流。

李宁（1997）提出了当前岩石力学数值方法存在的问题[28]：将数值方法仅仅作为计算工具的多，作为研究工具的少；数值分析人员有相当一部分追求新理论的多，考虑实际应用的少；对各种岩样本构模型研究的多，对岩体中的各种节理、裂隙等不连续结构面模型及其参数的选取研究的少；当前国内外流行的通用大型软件（如 ADINA，ANSYS，ABAQUS，MARC， NASTRAN 等）大都是针对金属、混凝土等人工材料开发的，对岩体中的节理、裂隙等不连续面、塑性软化、膨胀湿陷、孔压消散、损伤断裂等以及各种施工方法如分期开挖引起地应力释放转移、喷锚支护、预应力加固、排水固结、回填灌浆等力学响应都无能为力；国内各家自己开发的软件大都只有 3～5 个人年的开发积累，其功能、可靠性、精度、前后处理等方面无法与国外的大型软件相比，且普遍存在着功能单一、应用范围窄、适用条件苛刻，无法处理常见的病态方程，没有经过严格的验证与考验等问题；目前引进国外的岩土工程方面的大型软件如 FINAL，FLAC，EFG 等程序，不是因为仅有执行程序、目标程序而无法进一步开发，就是因为版权问题而使开发推广受到限制。

此外，合理确定岩石力学性态的诸有关参数是数值计算结果可靠性与否的关键。然而，由于岩体性态十分复杂以及地质条件的影响，使得计算参数的取值问题变得十分困难。这是至今数值分析手段仍不能为工程设计和工程决策提供可靠依据的重要原因。位移反分析正是为克服求找岩石和岩体原始参数而出现的一种新方法，它可以直接利用实地量测的位移值，根据选择的力学模型，同时求出岩石性质参数及原始地应力。

我国近年来在位移反分析方面进行了大量的研究工作，所采用的力学模型越来越复杂，已由简单的线弹性反演问题发展到非线性、粘-弹-塑性反演分析；考虑岩体损伤、渗流等复杂特征的反演分析；从单一的毛洞围岩到考虑支护结构体系的反演；反演的参数越来越多；从确定性反演到非确定性随机反演等等。从位移反分析方法的实施过程来看，总体上可分为正反分析法和逆反分析法，前者比后者具有更广泛的适用性，且可以沿用现有的正问题计算方法及程序，在原有正问题的计算程序中添加上最优化程序即可，所采用的最优化程序越来越多。但必须注意位移反分析的唯一性和稳定性问题。

位移反分析已在水电站地下厂房、铁路隧道、矿山井巷、岩坡和坝基等岩土工程中得到了不少应用。在位移反分析的理论研究和应用方面，杨志法（1986）、王芝银、刘怀恒（1988）、吕爱钟（1988）、孙钧、杨林德（1990）等人的研究在国内具有代表性[29~33]。

10 智能科学方法在岩石力学问题中的应用

在通常情况下，岩石力学所涉及的岩体是非常复杂的，其力学行为大多具有高度的不确定性与非线性，采用现有以连续介质力学为基础的确定性研究方法进行求解时，使得岩石力学模型越来越复杂，要确定的力学参数越来越多。但对于有些问题，仍未得到恰如人意的效果，这主要是因为能够真实反映这种复杂岩体特性的理论体系尚未建立。“ 在将来，不敢断言这种方法是否会对这样一类问题的研究有新的突破，但至少在今天还不可能将这类问题的研究提高到一个新的高度，谋求新的、更为综合的手段来解决问题，是迫待研究的当务之急 ”[34]。

鉴于岩体的力学性质是如此复杂，在实际的岩石工程中，依靠人们实践经验进行技术决策的方法仍然起到相当重要的作用。我国自解放以来，进行了大规模的工程建设，积累了大量的实践经验，把这些经验用于人工智能方法使其更好地发挥作用，无疑对中国的岩土工程建设和研究是一笔宝贵的财富。

首先，在我国发展起来的是人工智能中的专家系统，张清（1988）最早利用专家系统进行岩体分类[35]；随后，针对解决不同技术问题研制了相应的专家系统，例如，隧道及地下结构岩溶灾害预报专家系统（张清，1993）和采矿巷道围岩设计专家系统（林韵梅等，1992）等等。这些专家系统多是以产生式规则组成的知识库，以及对于处理不精确问题采用上述的模糊推理或概率统计方法。冯夏庭、林韵梅、李效甫（1993）出版了有关这方面的专著[36]。

人工神经网络是在现代神经科学研究成果的基

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

础上，依靠人脑基本特征，试图模仿生物神经系统的功能或结构而发展起来的一种新型信息处理系统或计算体系[37]。它是模拟人脑学习功能的一种智能方法，人们发现这可以用于预测。张清（1991）将人工神经网络引入岩石力学与岩石工程，人工神经网络可用于岩石力学行为预测和巷道分类指标聚类分析，近年来又把它应用于岩石工程系统和岩石工程参数重要性分析。

鉴于人工智能在岩石力学中的发展，冯夏庭1994年提出了建立“智能岩石力学”的设想，2000年完成了《智能岩石力学导论》专著[37]，他在书中提出：智能岩石力学是智能科学、系统科学、非线性科学、不确定科学与岩石力学交叉融合发展起来的新兴边缘分支学科。现在，智能岩石力学已渗透到岩石力学与工程的许多方面，取得了一系列重要进展：建立了适用于围岩分类、隧道(巷道)支护设计、边坡破坏模式识别与安全性估计、采场稳定性估计的专家系统；发现边坡、隧道、巷道的位移时间序列、岩石破裂过程的声发射事件序列和煤矿顶板来压序列的当前时刻的信息可以用先前n个时刻的信息进行合理的描述；提出了基于神经网络学习的本构模型识别初步方法和岩石力学参数辨识的二种智能方法（遗传算法和进化-神经网络方法）。

此外，为了处理岩石力学中的不确定性，一些例如模糊数学、概率统计、灰色系统等理论直接引用到岩石力学中来。早在1981年，模糊数学即用来解决岩石分类问题；概率统计用于岩石工程可靠度分析；陈子荫（1988）首先将时间序列分析用于预报岩体力学行为[38]。邓聚龙（1981）所提出的灰色控制系统已广泛应用于规划、预测、控制和决策等方面[39]。

11 非线性科学方法（混沌）在岩土工程中的应用

由于岩石是一种十分复杂的地质材料，其复杂性、模糊性、非线性和不确定性使得传统的力学方法难以很好地应用。因此，对于岩石力学与工程这样高度非线性的复杂系统，要对它的力学行为进行预测和控制，必须借助现代非线性科学，建立适合于岩石力学与工程特点的岩石非线性动力系统理论。目前，非线性科学体系中发展比较成熟的学科主要包括：耗散结构理论、协同学、突变理论、分形理论、混沌理论和人工神经网络。

耗散结构理论、协同学和突变理论三者研究内容基本相同，都是依据系统的稳定性分析，揭示系统动态演化过程中的自动合作行为、反馈机制和涨落过程，但它们研究的思维方法和侧重点有所差异。

下面只简述非线性科学中的混沌理论有关基本概念及在岩石力学中的应用情况。

以往描述自然现象往往采用确定性理论或随机性理论。目前，解决岩石力学问题所采用的方法大部分为确定性方法，而随机性方法（例如：时间序列分析、灰色控制等）也时有采用。所谓随机性理论是指给定初始条件之后，只能对系统的状态变化做概率性的描述。在相空间里来看，服从确定性理论的状态可以用一条明确的“相”轨道来表示，而服从随机性理论的状态只能用状态“云”来表示，“云”的密布之处，其相应状态出现的概率最大。

确定性理论和随机性理论，可以描述自然现象的两个极端情况。在自然界中是否存在介于两者之间的情形呢？以往我们总认为，根据确定性理论建立的方程（例如微分方程等），方程中各个参数都是确定的，对于给定的初值，应该求出一个确定解。但出人意料的是，只有很少几个参数描述的确定性系统，在一定条件下竟也会出现随机性行为，这种随机性行为并非来自外界的干扰，而是产生于系统内部的非线性。更令人惊奇的是，这种随机行为中蕴涵着一定的秩序。把非线性的确定性系统所表现出的这种随机行为称为混沌。混沌是一种看似随机却并非完全随机的系统。混沌理论的发现突破了确定论与随机论之间不可逾越的障碍。

混沌系统对初始条件具有极端敏感性，即无论初始状态的误差多么微小，都会随系统的演化而迅速放大，这主要是由于系统在演化过程中误差成指数增长，无论多么小的误差都会迅速增长到完全影响系统宏观行为的程度，因而，混沌系统的长期行为是不可预测的。

迄今为止，混沌一词还没有一个公认的普遍适用的数学定义。要判断某一现象是否是混沌现象，起码要确定它满足的最少必要条件，如是否存在奇异吸引子（无论系统的动态特性多么复杂以及初始状态如何不同，系统的状态最终会回到吸引子区），是否存在正的LyaPunov指数等等。

田野等（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[40]；谭云亮等（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，

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

具有重要意义[41]；尹光志等（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[42]；周辉（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[43]；李泽农等（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[44]；秦四清（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[45]；宋维源等（2001）根据混沌学理论，研究了冲击地压启动的混沌特性，提出了在一定的时间尺度内预测预报冲击地压发生的方法[46]；韩非（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[47]；王连国等（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）等矿压显现的观测时序，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，由于煤层底板渗透性指标的 Lyapunov 指数比岩移量指标大的多，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[48]。刘华明等（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[49]；蒋斌松（2004）在他的博士论文《矿山岩体变形的混沌行为及其预测研究》中，评述了混沌研究的历史过程和非线性科学方法在岩石力学中的研究现状，在此基础上系统地阐述了混沌在岩石力学中应用的理论体系，提出了采用混沌分析方法进行岩体稳定性预测预报的方法[50]。

参 考 文 献

[1] 孙 钧. 岩石力学在我国的若干进展[J]，西部探矿工程，1999，11(1):1—5.

[2] 陶振宇. 试论岩石力学的最新进展[J]，力学进展，1992，(2):161—172.

[3] 周维垣. 高等岩石力学[M]，北京：水利电力出版社，1991.1—6.

[4] Zhou Weiyuan. The development and state of art of rock mechanics in China[A]. Proc. of int. syom. on application of computer method in rock mechanics and engineering[C], Xi'an :[s.n], 1993.8—13.

[5] 孙 钧. 三峡工程永久船闸高边坡岩体稳定与变形分析[R]. 上海：同济大学岩土工程研究所，1997.1—12.

[6] 郑颖人，沈珠江，龚晓南. 广义塑性力学－岩土塑性力学原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社，2002.5.

[7] 黄克智等. 应变梯度理论的新进展[J].机械强度，1999，21(2):81—87, 21(3):161—165.

[8] 潘一山. 岩石失稳破坏的应变梯度模型[J]. 岩石力学与工程学报，1998，17(增刊)：760—765.

[9] 王学滨等人. Analysis of localized shear deformation of ductile metal based on gradient dependent plasticity[J]. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**，2003，13(6):1348—1353.

[10] 夏才初，钟时猷. 考虑加载历史影响的蠕变试验数据整理方法[J]. 中南矿业学院学报，1989，20：31—37.

[11] 金丰年.岩石的非线性流变[博士论文 D].南京：南京工程兵学院，1997.

[12] 李永盛. 单轴压缩条件下四种岩石的蠕变和松弛试验研究[J].岩石力学与工程学报，1995，14(1):39—47.

[13] 刘保国. 岩体粘弹、粘塑性本构模型的辨识及工程应用[博士论文 D]. 上海：同济大学，1997.

[14] 吕爱钟. 岩体非定常应变模型辨识及三峡船闸工程时效变形预测. 国家自然科学基金申请书，2002.

[15] 陈子荫. 围岩力学分析中的解析方法[M].北京煤炭工业出版社，1994.337.

[16] 李新平，朱维申. 多裂隙岩体的损伤断裂分析及工程应用[J].岩土工程学报，1992,14(4):1—8.

[17] 杨更社. 岩石损伤特性的 CT 识别[J].岩石力学与工程学报，1996，15(1):48—54.

[18] 李术才、朱维申. 加锚断续节理岩体力学特性的研究及其应用[J].煤炭学报，1997,22(5):490—494.

[19] 李宁，尹森等. 裂隙岩体的细观动力损伤模型[J].岩石力学与工程学报，2002,21(11):1579—1584.

[20] 邬爱清、任放、董学晟. DDA 数值模型及其在岩体工程上的初步应用研究[J].岩石力学与工程学报，1997，16(5):411—417.

[21] 王泳嘉、邢纪波. 离散单元法及在岩石力学中的应用[M].东北大学出版社，1991.

[22] 谢和平、刘夕才、王金安. 关于 21 世纪岩石力学发展战略的思考[J].岩土工程学报，1996,18(4):98—102.

[23] 赵阳升. 矿山岩石流体力学[M]. 北京：煤炭工业出版社，1994.

[24] 袁建新. 环境岩工程问题综述[J]. 岩土力学，1996, 17, (2): 88—93,17(3):86—93.

[25] 徐至钧、徐卓. 环境岩土工程的特点及开发前景[J].岩土工程学报，1989，11(2):30—36.

[26] 方晓阳. 21 世纪环境岩土工程展望[J].岩土工程学报，

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2000,22(1):1—11.

[27] 王泳嘉、冯夏庭. 关于计算岩石力学发展的几点思考[J]. 岩土工程学报，1996,18(4):103—104.

[28] 李宁. 当前岩石力学数值方法的几点思考[J].岩石力学与工程学报，1997,16(5):502—505.

[29] 杨志法等. 岩土工程反分析原理及应用[M].北京：地震出版社，2002.

[30] 王芝银等. 地下工程位移反分析原理及程序[M].西安：陕西科技出版社，1993.

[31] 吕爱钟、蒋斌松. 岩石力学反问题[M].北京：煤炭工业出版社，1998.

[32] 孙钧等. 岩土工程反演理论的随机理论与方法[M].广州：汕头大学出版社，1996.

[33] 杨林德等. 岩土工程问题的反演理论与应用[M].北京：科学出版社，1996

[34] Detournay EJ, Modeling rock mechanical processes in petroleum exploration and production[J].**new journal of ISRM**，1993,2(1):17—20.

[35] Qing Zhang，An expert system for classification of rock masses[A]. Proc.U.S. Symp. rock mechanics[C].1988, 283—288.

[36] 冯夏庭、林韵梅. 岩石力学与工程专家系统[M]. 沈阳：辽宁科技出版社，1993.

[37] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京：科学出版社，2000.

[38] Chen Ziyin，Time series analysis applied to displacement prediction in NATM[A]. Proc. Int. Symp. On modern mining technology[C].Taian：[s.n]. 1988, 315—320.

[39] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 华中理工大学出版社，1985.

[40] 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.

[41] 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，No.3—4:227—229.

[42] 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.

[43] 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.

[44] 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.

[45] 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.

[46] 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.

[47] 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.

[48] 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.

[49] 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.

[50] 蒋斌松. 矿山岩体变形的混沌行为及其预测研究[博士论文 D]. 北京：北京科技大学，2004.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net