

# 地表及岩体移动研究进展

梅松华<sup>1,2</sup> 盛 谦<sup>1</sup> 李文秀<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071) (<sup>2</sup>河北大学机械与建筑工程学院 保定 071002)

**摘要** 从国内外理论与试验研究的角度总结了地表及岩体移动的预测方法。地表及岩体移动的预测方法可分为唯象法、力学方法、数值方法和物理模拟法 4 类；讨论了地表及岩体移动研究领域的一些热点问题，并从工程应用、数值方法及本构理论等方面探讨了其发展方向。

**关键词** 岩石力学，岩体移动，数值方法，研究进展，非连续变形

**分类号** TD 325 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2004)增 1-4535-05

## RESEARCH ADVANCES IN SURFACE AND ROCK-MASS MOVEMENT

Mei Songhua<sup>1,2</sup> Sheng Qian<sup>1</sup>, Li Wenxiu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>*Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China*)

(<sup>2</sup>*The College of Mechanical and Construction Engineering, Hebei University, Baoding 071002 China*)

**Abstract** The methods for the prediction of surface and rock-mass movement are summarized from the aspects of theoretical and experimental research and classified into four types, namely, fitting method, continuous mechanics method, numerical method and physical simulation method. Some current focuses in the research field of surface and rock-mass movement, including mining subsidence in the tectonic stress and other especial conditions, back-analysis of ground movement parameters, unification of time and space in rock-mass movement, are discussed. Some suggestions about engineering application, numerical method and constitutive models of surface and rock-mass movement are then proposed.

**Key words** rock mechanics, rock-mass movement, numerical method, research advances, discontinuous deformation

## 1 引言

随着工业的发展，人类对有用矿物需求量也随之增加，人们因而必须加大开采规模和范围，开采损害的事例也就越来越多；随着工矿业的发展，矿区老城镇的扩大及新城镇的发展与形成，意味着压矿问题愈来愈多，也愈来愈复杂。而人们对有用矿物需求的增加，给工程技术人员提出了一个迫切需要解决的问题——压矿开采问题。人们经过不懈的努力，利用多种研究手段和方法，对开采沉陷机理及

其岩体与地表移动规律进行了深入研究，开拓了多种互相补充的理论，形成了各具特色的岩体与地表移动预测理论和方法，建立了“三下”开采沉陷预测体系<sup>[1,2]</sup>。

在我国，地表及岩体移动研究工作是建国以后发展起来的。从 1953 年在开滦矿务局建立第 1 个地表移动观测站后，在一些矿区相继建立了地表移动观测站，获得了大量宝贵的实测资料。通过对这些资料的总结分析，求出了这些矿区的地表移动参数，为矿区采动损害及防护和地表移动理论研究提供了基础数据。中国矿业学院和峰峰矿务局提出了

2004 年 4 月 10 日收到初稿，2004 年 6 月 2 日收到修改稿。

作者 梅松华 简介：男，29 岁，现为中国科学院武汉岩土力学所在职博士研究生、河北大学讲师，主要从事岩石力学数值计算方面的研究工作。E-mail: msh\_mail@sina.com.

适合峰峰矿区的典型曲线；1963 年唐山煤炭研究所根据实测资料分析，建立了地表下沉盆地的负指数剖面函数。文[1]将随机介质理论介绍到国内并进一步改进完善，目前已成为我国较为成熟、应用最广泛的预测方法之一。自 20 世纪 80 年代以来，随着科学技术和电子计算机的不断发展，许多学者从不同角度采用不同理论提出了一些新的分析方法，在客观上推动了本学科的发展。近年来，随着社会对环境问题的关注，关于控制大规模地下开采(开挖)引起地表沉陷方面的研究越来越受到重视，并且得到蓬勃发展，同时也出现了不少新问题。本文试图通过总结目前我国地表及岩体移动预测方法、相关的研究热点及存在的问题，提出一些本学科发展的建议<sup>[1-8]</sup>。

## 2 地表及岩体移动预测方法分类

从国内外的研究来看，地表及岩体移动的预测方法可分为唯象法、力学方法、数值方法和物理模拟法 4 类<sup>[1-5]</sup>，如图 1。

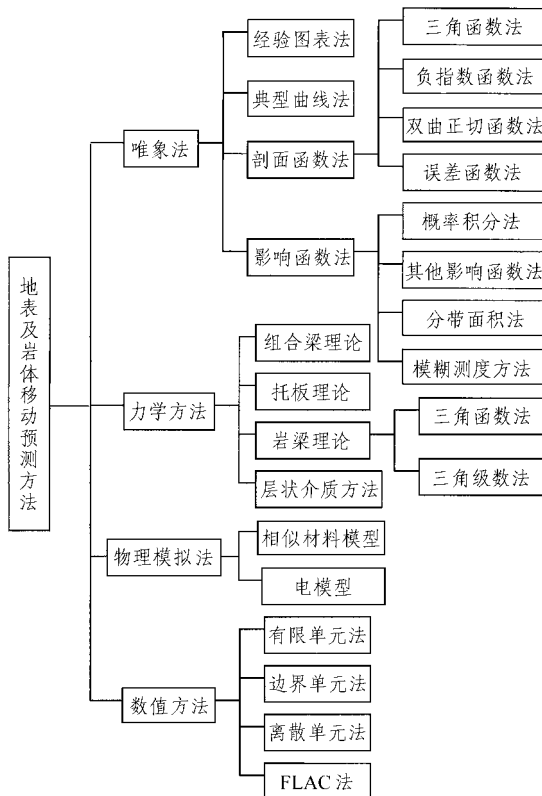


图 1 地表及岩体移动预测方法分类图

Fig.1 Classification of prediction methods of surface and rock-mass movement

### 2.1 唯象法

唯象法是根据现象或输入、输出(如采矿方法、工作面尺寸及地表观测站资料)而不详细考察内部结构(工程岩体性质、地质条件)得出的输入与输出之间的定性或定量关系。目前的地表及岩体移动普遍采用的预测方法主要归于此类。

唯象法是地表及岩体移动预测的基本方法，它能够较好地拟合地表的移动变形，适合于本地区的地表移动预测，而且应用非常方便。但由于曲线仅依赖于剖面方程的少数几个参数，避开了岩层与地表移动的主体、采动覆岩的力学性质和力学过程，只是应用宏观上符合统计规律的特征建立的预测理论。开采工程岩体的内部结构及其性质仅由通过实测资料拟合求得的预测参数来综合反映。因此唯象法在相同条件下的类比预测较为可靠，但条件若有改变，则预测精度不高<sup>[1, 4, 9, 10]</sup>。

### 2.2 数值方法

由于工程岩体的复杂性，数值方法显示了其独特的优越性。数值方法能否成功应用主要取决于对岩性的认识和计算模型的选取。人们广泛应用数值方法进行开采应力场、位移场及其矿柱稳定性的分析。目前使用的数值方法有：弹塑性有限单元法、损伤非线性大变形有限单元法、离散单元法、边界单元法及有限差分法等<sup>[5, 11-13]</sup>。

### 2.3 物理模拟法

物理模拟包括相似材料模型和电模型，但电模型应用较少。在我国已进行了大量的相似材料模型试验，但主要局限于平面模型，只能得出一些定性的或半定量的结论。由于平面模型不符合开采的边界条件，而矿柱处于三向应力状态，因此，立体相似材料模型试验是揭示开采矿柱荷载分布和矿柱强度的有效方法。然而立体相似材料模型因其费用大，难以进行内部移动变形观测，而且模型之间观测结果的可比性差，因而限制了其推广应用<sup>[1, 2]</sup>。

### 2.4 连续介质力学方法

力学方法是将开采工程岩体概化为满足特定边界条件的某种连续介质，利用相应的力学理论得出的地表及岩体移动预测方法。根据概化的连续介质的不同，可细分为岩梁理论、组合岩梁理论、托板理论及层状介质方法(无限大板叠合)。

岩梁及组合岩梁理论都把开采工程岩体视为平面问题，理论过于简化。托板理论把开采工程视为“准三维”介质，在模型上是一大进步，但托板的位置、托板的断裂准则、托板的边界条件如何合理确定以及在岩层移动预测中如何考虑托板的作用

用, 还需作进一步研究。从煤系地层的形成过程来看, 岩体属于层状介质, 每一岩层为 1 个长度和宽度均为无限大而厚度为有限的板, 则工程岩体为各个岩层的组合, 即板的叠合。因此层状介质方法能够较好地描述工程岩体的性质, 适合于解决开采岩体移动预测问题。连续介质力学(解析)方法是在对工程岩体作了大量简化后得到的; 岩体本身是一种非连续介质, 在开采或开挖卸荷条件下, 变形规律复杂, 其预测模型的应用受到诸多限制。

实际上许多连续介质力学方法在经过简化后, 其单元开采下沉预测函数与正态分布函数类似:

$$W_e = \frac{1}{r^2(z)} e^{-\frac{\pi[(x-\xi)^2+(y-\zeta)^2]}{r^2(z)}} \quad (1)$$

矿体开采沉陷可以通过对式(1)的积分得到

$$W(x, y, z) = \iiint_Q \frac{1}{r^2(z)} e^{-\frac{\pi[(x-\xi)^2+(y-\zeta)^2]}{r^2(z)}} d\xi d\zeta dz \quad (2)$$

其实质与概率积分法相同, 都是通过正态或偏态分布函数拟合下沉曲线, 其中的参数大都没有物理意义, 下沉位移的求解最后归结为高斯数值积分<sup>[1, 4]</sup>。

综上所述, 通常条件下的地表及岩体移动计算方法在我国已经比较成熟, 应用较多的方法有概率积分法、负指数函数法及典型曲线法。应当指出, 我国目前建立的“三下”采矿地表及岩体移动研究体系主要是针对煤矿的, 或者说是在自重应力条件下的。

### 3 目前研究的热点

#### 3.1 特殊条件下的地表及岩体移动与变形规律研究

我国许多矿山、煤田分布在山地、丘陵地区, 如山东金矿、湘西金矿、锡矿山锑矿、程潮铁矿、宜昌磷矿、阳泉煤田、水城煤田等, 另外有河流压煤, 微山湖、矿湖和渤海等湖海压煤。由于生产实践, 需要进行山区开采、急倾斜矿体开采、厚冲积层覆盖地区开采、水体下开采、多矿层开采以及深部岩体开采等特殊地质采矿条件的地表移动规律研究。特别是在山区采矿引起的地表及岩体移动预测中, 不能忽略地形的影响, 因而不能套用平地地表及岩体预测方法; 山区开采还可能诱发山体滑坡, 研究其机理对于预防山区地质灾害有重要意义。通过对典型条件的现场实测及理论研究, 取得了有应

用价值的初步成果<sup>[14-25]</sup>。

#### 3.2 构造应力场条件下的岩层(地表)移动变形与预测研究

构造应力型矿山地表沉陷研究是地表及岩体移动的新领域, 构造应力开挖卸载影响是地表移动与变形的核心。通常构造应力意味着高地应力。在许多金属矿山, 构造应力显著的急倾斜矿体通常采用崩落法进行开采, 其地表及岩体移动变形的特征与自重应力条件下的地表及岩体移动规律有较大差别, 如金山店铁矿、程潮铁矿和鲁中矿区的小官庄铁矿等。我国学者研究认为: 构造应力场的开挖卸载作用, 是现有煤矿地表移动及变形预测方法不适用于急倾斜矿山开采地表沉陷问题的根本原因, 借用煤矿地表移动规律与变形预测方法远离了矿山地表沉陷破坏的真实状况, 有必要将随机介质方法加以改进从而完善构造应力型地表移动规律研究<sup>[26-28]</sup>。

#### 3.3 地表非连续变形研究

由于地下开采活动, 在断层露头、煤层露头、岩层不整合面及软弱夹层处, 地表常发生超过正常值 2~10 倍的非连续变形, 表现为裂缝、台阶等破坏形态, 对地表建筑物危害极大, 需要对断层效应进行研究, 从而了解断层活化的影响因素。人们发现: 采动断层剪切滑移行为与其分形维数相关并影响附近岩体的应力场和位移场。研究地表非连续变形的目的在于寻求保护地面建筑物和设施有效合理的技术措施。研究发现: 大量的竖向应力和剪应力通过弱面介质得以释放, 使得弱面远离采空区一侧的岩体受到采动影响的程度较小, 从而使两侧岩体发生相对滑移, 造成弱面间的非连续变形<sup>[29-36]</sup>。

#### 3.4 关键层理论的研究

关键层在采动覆岩中的作用, 尤其是在浅部, 上可影响至地表, 下可影响至采场和支架, 因而它可作为采场矿压、岩层移动及地表沉陷研究统一的基础。关键层理论的研究可以进一步解决: (1) 工作面周期来压的离散性及各项支架-围岩参数确定的依据; (2) 岩层移动的周期性变化规律以及岩层移动裂隙与边界线的描述; (3) 地表沉陷与采场推进关系的力学描述等<sup>[37, 38]</sup>。

#### 3.5 地表及岩体移动的时空统一问题

地表及岩体移动不仅取决于矿体赋存的岩体力学性质、地质条件、采深、工作面尺寸、采矿方法等因素, 而且与开采时间、开采速度关系密切。开采沉陷不仅有静态移动变形, 更多的是动态移动变形。地表沉陷的时间因素导致其过程属于时空四维

空间性质问题。时空统一随机介质理论是这一领域的重要成果。随着岩体流变力学的发展,人们开始用流变学方法来处理地表及岩体移动预测问题<sup>[1, 39~43]</sup>。

### 3.6 地表及岩体移动与变形的参数辨识

由于各种地表及岩体移动理论在一定的适用范围内,都有其正确性,只要计算所用的基本参数选择合适,一般都能获得较好的预测结果,所以,正确确定基本参数是提高地表及岩体移动及变形预测精度的关键。目前工程实践中常用的确定地表及岩体移动基本参数的方法有:图解法、工程类比法、反分析方法。图解法及工程类比法都有一些优点,但其不足也十分明显。反分析方法是目前岩土工程领域内确定参数的最常见和最有效的方法之一。数学和计算机技术的发展,灰色系统、模糊系统、人工智能的广泛运用,使人们进行参数辨识越来越方便、有效<sup>[44~47]</sup>。

## 4 地表及岩体移动预测方法的发展

### 4.1 传统方法的改进——综合分析方法

矿山地表及岩体移动与变形预测是寻求量化的规律,就目前的研究水平,仅依赖于1种分析方法难以给出移动范围的精确估计,完全依赖于计算来准确地进行岩层预测也是不现实的。它应建立在工程类比、计算分析与现场监测的综合分析基础上,充分利用现代计算机技术和反分析方法,不断获取新信息,进行动态的对比分析、相互验证、逐步逼近正确的预测结果,进而建立动态预测预报专家系统<sup>[43, 48]</sup>。

### 4.2 连续与非连续的采动岩体变形的统一

由于节理、断层等弱面的存在,宏观上,开采引起的岩体变形一般存在连续变形与非连续变形的耦合,无论是连续介质理论还是非连续介质理论,都难以准确地预测其变形,迫切需要发展一种能统一这两种变形计算的新方法。

### 4.3 发展非连续介质力学及其相应的数值方法

由于岩层移动研究最早开始于煤系地层,因此,基于沉积层状的煤矿地层,人们提出了许多卓有成效的岩层预测理论。但是对于多为非沉积地层的金属矿床地层,其地质条件要复杂得多,预测理论受到极大限制。现今的所有弹塑性三维有限元等大部分数值计算方法是基于连续介质的,不能真正描述岩体的破坏过程与变形特征,不适应由于放矿引起的散体运动过程及由强度和稳定性所决定的岩

体破坏的力学过程的耦合问题;而目前离散单元法还不十分完善,离散元中块体之间阻尼系数、运算的时间步长等参数的确定带有极大的任意性和盲目性,至今没有确定这些参数时可供遵循的原则。因此,有待于完善或开发新的非连续介质力学数值计算方法及相关软件。非线性大变形力学及非线性科学的逐渐成熟,使人们有可能从非线性大变形力学基本理论入手,建立非连续介质力学计算模型。只有从力学机理方面入手,才能真正掌握地表及岩体移动和变形的内在动因,从而达到趋利避害、准确预测、合理采取措施的目的<sup>[26, 31]</sup>。

### 4.4 采动岩石本构理论的研究

数值分析方法成功应用的关键主要取决于对岩性的认识和计算模型的选取。由于复杂的构造运动,使岩石物质结构从本质上由宏观到微观都是极其复杂的非连续相非均质体。它具有非线性、各向异性及随时间变化等力学属性。在应用数学力学方法研究岩石力学行为时,必须考虑岩石介质本身的物质属性,因为它的变形性质和破坏性质与岩石的复杂结构密切相关。岩石损伤力学为描述岩石细观结构及演化过程开辟了新的有效途径,使人们有可能准确描述力学行为特征,揭示在采动条件下岩石的非线性大变形特性<sup>[48, 49]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 刘宝琛, 廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965
- 2 颜荣贵. 地基开采沉陷及其地表建筑[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995
- 3 李文秀. Fuzzy 理论在采矿及岩土工程中的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998
- 4 梅松华. 岩体移动空间层状模型及其工程应用研究[硕士学位论文][D]. 长沙: 长沙矿冶研究院, 2001
- 5 刘天泉. “三下一上”采煤技术的现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 1995, 23(1): 5~7
- 6 李永树, 刘文熙. 开采沉陷预报方法研究现状与展望[J]. 四川测绘, 1998, 21(3): 99~102
- 7 徐嘉谟. 大型开挖对环境的影响研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1997, 8(1): 43~44
- 8 栾元重, 伏庆辉, 赵会兴. 矿山地表移动的卡尔曼滤波模型[J]. 有色金属(矿山部分), 2002, 54(3): 32~34
- 9 刘宝琛, 张家生. 近地表开挖引起的地表沉降的随机介质方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(4): 289~291
- 10 阳军生, 刘宝琛, 阳生权. 竖井建设引起的地表移动及变形[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(3): 291~293

- 11 麻凤海, 王泳嘉. 用离散元研究深部开采岩层移动大变形问题[J]. 阜新矿业学院学报, 1996, 15(2): 177~181
- 12 麻凤海, 王永嘉. 地层沉降控制的可变形离散单元模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, (2): 176~179
- 13 谢和平, 周宏伟, 王金安等. FLAC 在煤矿开采沉降预测中的应用及对比分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 397~401
- 14 何万龙, 康建荣. 山区地表移动与变形规律研究[J]. 煤炭学报, 1992, 17(4): 1~15
- 15 杨 伦, 于广明, 王艳春等. 地形条件对采动建筑物的影响[J]. 矿山测量, 1994, (1): 40~44
- 16 李文秀, 马 光. 港里矿区河下采矿地表变形分析[J]. 矿冶工程, 1995, 15(4): 5~8
- 17 梁 明, 汤伏全. 地下采矿诱发山体滑坡的规律研究[J]. 西安矿业学院学报, 1995, 15(4): 331~335
- 18 李文秀. 山区岩体移动的 Fuzzy 预测模型[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(5): 688~691
- 19 张荣亮, 刘德选, 袁 力等. 多煤层条带开采地表移动变形规律的研究[J]. 矿山测量, 2002, (1): 21~22
- 20 尹光志, 鲜学福, 代高飞等. 大倾角煤层开采岩移基本规律的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 450~453
- 21 王金庄, 李永树, 周 雄等. 巨厚松散层下采煤地表移动规律的研究[J]. 煤炭学报, 1997, 22(1): 18~21
- 22 李凤明. 厚冲积层矿区地表移动参数的特点及数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2001, 20(1): 535~537
- 23 栾重元, 贾维花. 厚冲积层下开采地表移动分析[J]. 矿山压力与顶板管理, 2001, (3): 81~82
- 24 张玉卓, 陈立良, 周万茂. 村庄下采煤的理论基础——地表沉降预测与控制[J]. 煤炭科学技术, 1998, 26(4): 39~42
- 25 邓喀中, 张冬至, 张周权. 深部开采条件下地表沉降预测及控制探讨[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 52~55
- 26 贺跃光, 颜荣贵, 曾卓乔. 构造应力作用下的地表移动规律研究[J]. 矿冶工程, 2000, 20(3): 12~14
- 27 曹 阳, 颜荣贵, 贺跃光等. 崩落法开采急倾斜矿床地表变形预测新方法[J]. 矿冶工程, 2002, 22(4): 5~8
- 28 曹 阳, 颜荣贵, 贺跃光等. 构造应力型矿山地表移动宏观破坏特征与对策[J]. 矿冶工程, 2002, 22(2): 31~33
- 29 邓喀中, 马伟民. 开采沉降中的岩体节理效应[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 345~352
- 30 邓喀中, 马伟民. 开采沉降模拟计算中的层面效应[J]. 矿山测量, 1996, (4): 39~44
- 31 于广明, 谢和平, 张玉卓等. 节理岩体采动沉降实验及损伤力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 16~23
- 32 张华兴, 仲惟林. 受断层影响的地表移动计算[J]. 煤炭学报, 1995, 20(2): 163~166
- 33 蒋建平, 章杨松, 阎长虹等. 地下工程中岩移的断层效应探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 20(8): 1257~1262
- 34 戴华阳. 地表非连续变形机理与计算方法研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(6): 614~618
- 35 戴华阳, 王金庄, 胡友健. 层间弱面引起地表非连续变形的机理分析[J]. 矿山测量, 1999, (2): 29~30
- 36 戴华阳, 王金庄, 滕永海等. 急倾斜煤层开采地表非连续变形计算方法研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(4): 356~360
- 37 缪协兴, 钱鸣高. 采动岩体的关键层理论研究新进展[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1): 25~29
- 38 钱鸣高, 缪协兴. 采动岩体力学基础研究与展望[J]. 岩土力学, 1997, 18(增): 14~18
- 39 沈惠群, 刘宝琛. 地表移动空间——时间过程研究[J]. 山东矿业学院学报, 1992, 11(4): 327~334
- 40 崔希民, 杨 硕. 开采沉降的流变模型探讨[J]. 中国矿业, 1996, 5(2): 52~55
- 41 麻凤海, 范学理, 王泳嘉. 开采引起地表沉降的时间空间过程分析[J]. 工程力学, 1997, (增): 562~570
- 42 崔希民, 缪协兴, 金日平. 基于时间函数的地表移动动态过程计算方法[J]. 中国矿业, 1999, 8(6): 58~60
- 43 于广明, 孙洪泉, 赵建锋. 采矿引起地表点动态下沉的分形增长规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 34~37
- 44 沈光寒, 成 枢, 吴 戈. 矿山沉降的模型识别和模型优化[J]. 煤炭学报, 1990, 15(3): 9~16
- 45 成 枢, 吴 戈, 沈光寒. 岩层与地表移动的参数识别[J]. 山东矿业学院学报, 1995, 9(2): 145~149
- 46 贵仁义. 岩层移动与变形的反演计算模型[J]. 昆明理工大学学报, 1996, 21(1): 8~14
- 47 郭文兵, 邓喀中, 邹友峰. 地表下沉系数计算的人工神经网络方法研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 212~215
- 48 黄乐亭. 开采沉降力学的研究与发展[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(2): 54~56
- 49 于广明, 谢和平. 岩体采动沉降的损伤效应[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(1): 185~188