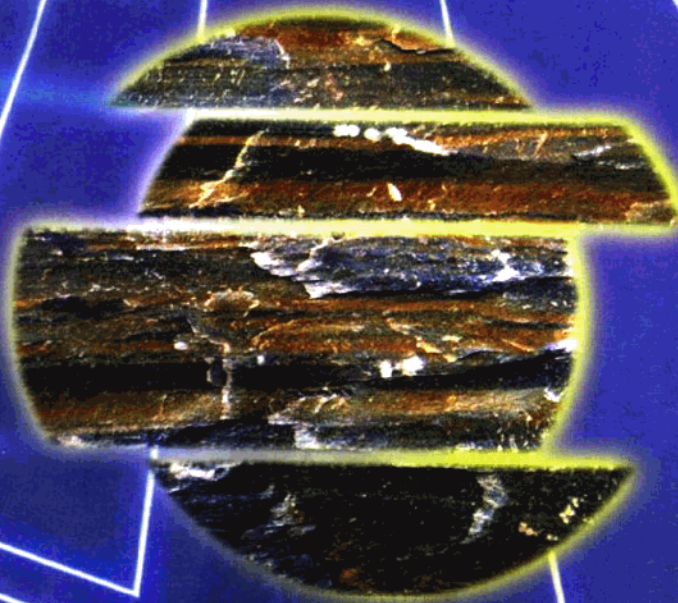


岩层移动及动力学过程 的理论与实践

麻凤海 著



煤炭工业出版社

岩层移动及动力学过程的 理论与 实 践

麻 凤 海 著

煤 炭 工 业 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

岩层移动及动力学过程的理论与分析/麻凤海著. —北京: 煤炭工业出版社, 1997. 12

ISBN 7-5020-1535-3

I. 岩… II. 麻… III. 矿山-岩层移动-研究 IV. TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 25158 号

岩层移动及动力学过程的理论与实践

麻凤海 著

责任编辑: 刘新建

*

煤炭工业出版社 出版发行

(北京安定门外和平里北街 21 号 100713)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

*

开本 $787 \times 1092 \text{mm}^{1/32}$ 印张 $7^{3/8}$

字数 159 千字 印数 1—1,000

1997 年 12 月第 1 版 1997 年 12 月第 1 次印刷

书号 4304 定价 13.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 简 介

本书系统介绍了作者近年来在矿山开采沉陷预测预报中的基础理论和应用方面的研究成果以及一些新观点。在将采空区直至基岩表面的整个岩体视为巨系统复合介质的基础上,建立三维层状—离散二重介质岩层移动模型,应用离散单元数值模拟研究了岩层内部移动及破坏规律。本书讨论了岩层移动流变特性,并结合三维层状模型计算了岩层移动的动态发展过程。另外,从人工智能角度,还讨论了地表沉陷预测的神经网络方法,以及由开采引起环境破坏的专家系统建立等问题。

本书可供从事岩石力学、采矿工程、矿山开采沉陷等应用基础理论研究的科技人员和高等院校的师生、研究生参考。

序 言

麻凤海博士送来他的学术专著《岩层移动及动力学过程的理论与实践》让我作序，我感到非常高兴。麻博士十余年来一直在范学理教授的指导下从事岩层移动和开采沉陷方面的研究工作，取得很多成果。1993年9月他到东北大学攻读博士学位，在范教授和我的指导下完成博士论文《岩层移动的时空过程》。由于他在本学科中努力出色的工作，他的博士论文仅用两年多的时间便完成了，受到评委们的高度评价，他本人于1996年3月获得东北大学的博士学位。之后他回到辽宁工程技术大学工作，得到了三项科学基金的资助，继续从事开采沉陷方面的研究。在这期间麻凤海博士不断进取，又发表了多篇高水平的论文。这本专著就是麻凤海博士长期甘于寂寞潜心研究的成果总结。

开采沉陷是一个既古老而又现代的问题。随着矿业的发展，早在四、五百年前人们就认识到开采沉陷对人类生产和生活的影响。特别从19世纪末至今，由于工业的高速发展，对有用矿物的需求成倍增长，矿区范围日益扩大，开采沉陷问题几乎成了矿业的“永恒的主题”，受到人们的普遍关注。近半个世纪以来，德国、英国、波兰和俄罗斯以及中国的学者都在研究开采影响下矿山地表移动和变形的规律，提出了多种预计地表移动的方法。60年代以来我国在较大规模上进行了对于“三下”（建筑物下、铁路下和河流下）开采的研究，无论在理论和实践方面都取得了丰硕的成果，举世瞩目。

麻凤海博士的这本专著系统地总结了前人的研究成果。结合岩层的结构特点，把岩层移动问题视为在空间和时间中进行的动力学过程，应用连续介质力学的方法处理岩层的连续性和应用离散元数值模拟的方法处理岩层的非连续性，并从流变学的观点论述了岩层与地表下沉的动态发展过程。本书还对理论的实际应用给予充分的重视，对我国一些矿山的实际观测数据进行了分析并详细叙述了预测地表移动的方法。我相信本书的出版发行一定会引起采矿界，尤其是从事岩层移动研究和监测工作的科技人员、大学生和研究生的广泛关注和兴趣。

王泳嘉于东北大学

1997年2月28日

目 录

序言

第一章 绪论	1
第一节 岩层移动的国内外发展现状	2
第二节 岩层移动的近代理论	4
第三节 岩层移动研究的新思路	7
第二章 岩层移动的力学模式	9
第一节 岩层特性及变形破坏机理	9
第二节 岩层移动的结构及力学模式	11
第三节 岩层移动力学模型的建立	13
第四节 岩层移动过程的数学描述	14
第三章 复合介质岩层移动模型（静态分析）	20
第一节 复合介质岩层移动过程描述	20
第二节 复合岩层下沉公式的建立	26
第三节 岩层移动的位移和变形	35
第四节 岩层应力分析	40
第五节 多煤层联合开采问题	42
第四章 岩层移动的动力学过程	44
第一节 岩层移动时间过程的研究意义	44
第二节 岩层移动的压缩（流变）过程	45
第三节 开采引起的岩层下沉	52
第四节 岩层移动影响的时间问题	55
第五章 岩层移动及动力学过程的 离散单元法分析	58

第一节	离散单元法的基本原理	58
第二节	岩层移动问题的离散单元法	66
第三节	离散单元程序的计算机实施与特殊处理	67
第四节	岩层移动动力学过程研究	69
第五节	岩层离层时空分布过程分析	82
第六节	岩层移动中有关参数的选取	90
第六章	岩层下沉时间的影响因素	93
第一节	时间系数与深度之间的关系	93
第二节	时间影响系数的理论解释	96
第三节	关于时间系数的讨论	99
第七章	复合介质倾斜岩层移动	101
第一节	倾斜煤层开采岩层移动过程	101
第二节	倾斜煤层开采引起的岩层下沉	102
第三节	倾斜煤层开采岩层应力分析	106
第八章	实例	110
第一节	地表移动规律分析	110
第二节	算例分析	114
第三节	实际开采的时空过程	120
第四节	解析计算、离散元模拟及实际观测结果	121
第九章	岩层移动及动力学过程的物理模拟	124
第一节	物理模拟方法的重要性	124
第二节	相似材料模拟实验原理	125
第三节	实例	133
第十章	岩层移动的三维弹塑性节理有限元法	142
第一节	岩石的应力应变关系	142
第二节	含有断层构造岩体的数学模型	146
第三节	三维 8 节点弹塑性节理有限元原理	148
第四节	实例	159
第十一章	岩层移动动态预测神经网络模型	167

第一节	岩层移动的非线性问题	167
第二节	人工神经网络	168
第三节	神经网络模型与学习算法	173
第四节	人工神经网络求解机制	178
第五节	开采沉陷问题求解的神经网络设计	181
第六节	地表沉陷预测神经网络方法	189
第十二章	开采沉陷环境影响评价的专家系统	198
第一节	专家系统原理	198
第二节	GSES 专家系统设计	203
第三节	矿山开采沉陷神经网络专家系统	213
参考文献		220

第一章 绪 论

矿体被采出后，采空区周围岩体的自然应力状态受到破坏，岩层和地表产生移动、变形和破坏，这种现象称为矿山开采沉陷。矿山开采沉陷学是研究开采沉陷及相关工程问题的一门学科，是整个采矿学科中不可缺少的重要分支。它研究的内容包括由开采引起的岩层与地表移动的规律、观测方法、预计方法和模拟方法研究等。作为其工程应用，一些特殊条件下的采煤，如承压含水层上采煤、井筒煤柱开采等，也是其研究的重要课题。

国内外“三下”（建筑物下，水体下和铁路下）压煤问题极其突出。以中国为例，仅煤炭生产矿井“三下”压煤的工业储量就达133多亿t。其中建筑物下78多亿t，铁路下18多亿t，地面水体下19多亿t和石灰岩下17多亿t。由于许多矿区在地质勘探初期勘察程度不精，建矿以后造成了一些地面设施建立在矿体采动影响范围之内，造成了严重的压煤问题。解决“三下”开采问题，对于国民经济的发展和人们生活的需要有着极其重要的意义，而研究开采引起的岩层与地表移动问题，就显得尤其重要。国内外许多学者都曾对开采损害问题进行了研究。他们从理论和实践两方面，阐述了岩层和地表移动规律，形成了各种岩层移动理论，取得了引人注目的成就，从而使岩层与地表移动研究成为矿业科学中的一门独立的、综合性的学科。

本书在前人研究和实践的基础上，进一步探讨了岩层与

地表移动理论，特别是岩层移动的动力学过程。这项研究无论是在理论上还是在生产实践上都对矿山开采工作有重要的指导价值。

第一节 岩层移动的国内外发展现状

矿山开采引起的岩层与地表移动对人类生产和生活的影响早已被人们所认识。早在 15~16 世纪，比利时发布过一项法令，对因开采而使列日城的地下含水层水源受到破坏的责任者处以死刑。但由于对开采沉陷的研究不够，本世纪前，因地下开采使铁路、房屋遭到破坏，井下透水造成人员死亡的惨案时有发生。如 1875 年德国的约翰载梅尔矿，由于地表突然塌陷，毁坏了 31 座房屋；1916 年日本海下采煤时，海水沿着由于开采影响而扩大的构造裂缝溃入井下，使矿井全部淹没，237 人死亡。这些事故的发生引起了人们对开采沉陷问题的高度重视，并进行了一些专门的研究工作。开采沉陷作为一个学科而进行系统研究是本世纪 20 年代开始的，特别是第二次世界大战以后，发展更为迅速。各主要采煤国家矿山工程技术人员和科学工作者投入了越来越多的时间、技术和装备进行了此项研究。前苏联、波兰、德国、澳大利亚、英国、加拿大、日本和美国等国家，对开采沉陷的理论和应用技术（包括“三下”采煤）都进行了深入的研究，取得了丰硕的成果。我国学者对开采沉陷的研究是从本世纪 50 年代开始的，迄今已在开滦、淮南、抚顺、阜新、峰峰、枣庄、鸡西、鹤岗等一些主要矿区建立了地表移动观测站，积累了上千条观测线的实际观测资料，对开采沉陷规律有了进一步认识，提出了具有中国特色的地表移动预计方法，“三下”开采技术得到了很大的发展。

开采沉陷基本理论的研究已有 100 多年的历史。1838~1958 年,对列日城受采矿影响的专门调查导致了开采沉陷的第一个理论——“垂线论”的产生。此后,该理论发展为“法线理论”,试图以此种模式来描述采矿引起的岩层和地表塌陷问题。后来又提出了“二等分理论”、“自然斜面理论”、“拱形理论”、“综合弯曲带理论”等。进入 20 世纪后,门者尔观测到水平移动和变形,柯尔顿郭尔德列希给出了水平移动和变形的分布,使开采沉陷的研究更趋完善。20 世纪 20 年代以后,在进行水准测量观测下沉的同时,大规模地开展了系统的水平移动观测,形成了“临界开采面积”、“盆地剖面”及“线段伸缩”等概念。二次大战后,人们开始采用连续介质力学和非连续介质理论来研究开采沉陷的基本规律。采用连续介质力学研究开采沉陷的方法有阿维尔申的数学塑性理论、沙武斯托维奇的弹性基础梁理论以及贝里视岩体为均质线弹性体理论。近几十年随着计算机的迅速发展,数值计算方法在研究岩层移动上也得到了应用,并解决了各种复杂的开采沉陷问题。

40 多年来,在现场实测、理论研究和“三下”采煤实践的基础上,我国开采沉陷的研究取得了重大发展。目前,全国各大矿区的一般条件下的开采沉陷规律的参数已基本掌握,一些理论研究,如概率积分法、典型曲线法和负指数函数法等已得到广泛的应用。我国开采沉陷的基本理论和应用技术的研究已出现了一批重要成果,主要包括:水体下采煤时地表覆岩破坏规律的研究、建筑物下采煤技术及抗变形结构的研究、塌陷区的土地复垦技术、承压水上开采和山区地表移动规律以及井筒变形的弹塑性理论和井筒煤柱开采技术等。辽宁工程技术大学开采沉陷与治理工程研究所通过对现

场实测资料进行整理分析,总结了我国东北矿区 17 个矿务局几百条观测线的观测成果,探讨了岩层移动的综合移动分布规律,特别在分析各种岩层移动角值方面做了大量工作。近年来,他们在减缓地表沉降、离层高压注浆充填理论与实践方面成果显著。

第二节 岩层移动的近代理论

矿山岩层与地表移动这门学科,涉及到地质、测量、采矿工程、数学、力学、电子计算机和建筑等许多学科的知识。近年来,这些学科的新成果不断被引进到矿山岩层与地表移动研究领域中来,产生了一些新的理论和方法。

一、弹性力学研究方法

煤炭科学研究总院北京开采研究所李增琪工程师用富氏积分变换计算开挖引起的地表移动。把开挖引起的地表移动看成是层间既满足力学平衡条件,又满足几何接触条件的多层层状弹性介质的弹性力学问题,其四周边界条件为:上部为自由的地层表面,下部为开挖造成的附加位移,而左右两侧在无限远处开挖所造成的影响为零。通过富氏积分变换和反演公式,求得了这一边值问题在滑动接触和弹性接触状态下的解析解。数值计算结果与现场实测数据的对比表明,计算结果达到令人满意的程度。该研究成果考虑了岩体的弹性特性,但没有考虑岩层移动的时间因素,属于静态过程分析。

二、数值计算方法

数值计算方法是近 20~30 年内,随着电子计算机发展起来并引入开采沉陷研究中来的一种方法。它可以解决理论研究的计算过于复杂(有时复杂得实际无法进行计算)的问题。如岩体中节理裂隙的影响、断层滑移产生的影响、采

场周围一定范围内的大位移和大变形破坏等。

到目前为止，在开采沉陷领域研究中应用的数值方法主要有：有限元法、边界元法和离散单元法（DEM）等。

1. 有限单元法

有限单元法是一种求解具有边值条件的偏微分方程的数值计算方法。它具有理论完全可靠、物理意义直观明确、解题效能强等优点。1970年，Kratsch 提出用有限元法来计算地表移动及其变形。后来该方法在岩层与地表移动的研究中得到了进一步的发展，开发出了适合求解岩层移动问题的专用有限元程序。目前在岩层移动问题研究中普遍应用平面有限元来解决开采沉陷问题，应用三维有限元解决开采沉陷问题却很少见。本人曾用三维弹塑性节理有限元方法解决了部分立井煤柱开采问题。其特点是用节理单元模拟断层，一般单元模拟岩体。但有限元法能解决的都是一些岩体小变形问题，象冒落带、裂缝带那样的出现垮落和裂缝等大变形问题，有限元方法是无能为力的。

2. 边界元法

边界元法起步较晚，至今只有约 20 年的历史。在我国研究最早的是东北大学王泳嘉教授，在实际问题的研究中得出了一些有实际意义的结果。但该方法也存在一些问题，它不易求解多种材料复合的岩体内部移动变形问题。

3. 离散单元法

离散单元法是美国学者坎达尔（Cundall, P. A）教授于本世纪 70 年代提出来的。80 年代中期由王泳嘉教授引入国内，引起国内岩土力学与工程界的浓厚兴趣和注意，已经在我国的采矿、隧道和大坝等工程的设计和研究中得到了应用。这种方法特别适用于有节理岩体的应力分析，以受裂缝切割

或分立的块体为出发点，块和块之间的相互作用在角和面上有接触，角点可以有较大的位移。在某些情况下，如滑坡或冒顶时岩块可以滑动甚至脱离母体而自由下落，这种具有不连续性的破碎岩体，很难用传统的有限单元方法或边界元法来处理，离散单元方法可以比较好地模拟这种情况。王泳嘉教授把离散单元法应用于地表移动问题的研究，取得了一些比较有意义的结果。特别是用离散单元法研究裂隙带高度，成果显著，具有实际意义。本书应用离散单元数值方法，在现有研究成果的基础上，进一步探讨了该方法在岩层与地表移动中的应用。研究重点是岩层移动的动力学过程。

三、损伤力学研究方法

最近几年出现了把损伤力学理论应用于岩层与地表移动的研究。中国矿业大学谢和平教授应用岩体损伤力学和分形理论分析了地下开采引起的岩层及地表移动，得到了一些有实际意义的结论；中南工业大学尹德潜博士将损伤理论应用于金属矿岩层移动理论研究中，建立了可用于金属矿岩移预计的损伤有限元模型。这些研究使岩层移动的形态向微观发展迈进了一步。

四、人工智能研究方法

随着电子计算机技术的迅速发展，近几年人工智能神经网络和专家系统理论在岩土工程和采矿工程中得到了迅速发展。人工智能理论可以解决一些非线性、不确定性的问题，在开采沉陷预测预报方面有很大的应用前景。本人在近几年的研究中，用人工智能神经网络和专家系统方法预测开采沉陷损害以及开采沉陷造成的矿区环境破坏综合评价，取得了一些初步的研究成果。

五、岩层与地表动态移动方法

地下开采引起的地表移动并不是瞬间完成的，而是有一个时间过程。这包括两个方面的含义：一是地表移动与工作面的推进速度有关，随着开采推进速度的变化地表呈现动态移动特征；二是采区上覆岩体具有流变特性，尽管不进行地下开采工作，岩石应有蠕变和松弛等力学特性。刘宝琛教授对地表移动时间过程作了细致的研究工作，提出了地表移动下沉速度的概念。王泳嘉教授在 60 年代曾用流变力学方法研究了地表移动的时间过程，他用流变力学中的凯尔文流变模型研究了岩层和地表移动的时间因素。后来，中南工业大学曾卓乔教授用流变力学方法解释了下沉速度系数 C 的物理意义。作者也曾使用粘弹原理研究了地表动态下沉，并发表文章探讨了地表移动和变形预计，使用凯尔文流变体和弹性元件串联的流变模型研究地表移动的时间空间统一过程，为进一步研究岩层移动的动力学过程打下了基础。

第三节 岩层移动研究的新思路

近些年发展起来的岩石移动理论和研究方法，都是以实际观测资料为基础而提出来的。在一定的开采深度内，这些方法弥补了早期岩移理论和方法的缺陷和不足，能够很好地预测“三下”开采引起的岩层及地表移动，并且能够不同程度地与实际观测相吻合。

但是，这些理论和方法，大多没有严格地从力学角度去解释岩层移动的机理。岩石移动是一种力学现象，不仅存在着弹性、塑性，而且还有流变特性。另外，从岩体移动特点来看，岩层移动“三带”（垮落带、断裂带和整体移动带）特征是不一样的，整体移动带具有连续变形特性，可用连续介质力学方法去进行研究，而垮落带、断裂带及离层传递带属

于非连续、大变形区域，把它和整体移动带统一起来研究是不合适的。前述的那些方法，大多只能预测地表移动，不能研究岩体内部的移动变形。

岩层移动问题本质上是三维的，以往的研究囿于理论研究和计算手段，通常止于二维问题的研究。本书结合地层结构特征，从弹性薄板弯曲理论出发，将岩层移动的研究从二维推广到三维。同时结合岩体的流变特性，引入时间因素，把岩层移动问题视为在空间和时间中进行的动力学过程。并用离散单元法数值模拟开采影响的动态过程，得到岩层移动和应力变迁的全过程。同时采用离散元法处理岩层的非连续性变形，解决了采区周围一定范围内岩体的大位移、大变形的模拟和计算问题。本书的研究方法对于岩性中硬或较软地层的地表移动可进行实际的动态预测。