

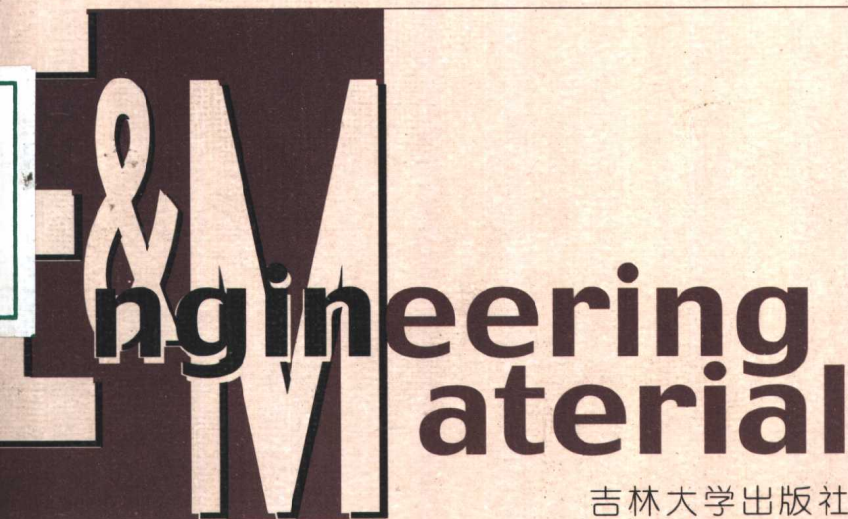


国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



采动岩体破裂与岩层移动 数值试验

唐春安 于广明 刘红元 芮勇勤



吉林大学出版社



国家自然科学基金研究专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA



采动岩体破裂与岩层移动 数值试验 章

唐春安 于广明 刘红元 芮勇勤

吉林大学出版社

· 长春 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

采动岩体破裂与岩层移动数值试验/唐春安编.
长春: 吉林大学出版社, 2003.3
ISBN 7-5601-2798-3

I. 采... II. 唐... III. ①矿山开采-岩体破坏形态-数值模拟②矿山开采-岩层移动-数值模拟
IV. TD3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 015054 号

采动岩体破裂与岩层移动数值试验

唐春安 于广明 刘红元 芮勇勤

责任编辑、责任校对: 崔晓光

封面设计: 孙 群

吉林大学出版社出版

吉林大学出版社发行

(长春市明德路 3 号)

长春市永恒印务有限公司印刷

开本: 850×1168 毫米 1/32

2003 年 3 月第 1 版

印张: 3.625

2003 年 3 月第 1 次印刷

字数: 85 千字

印数: 1 - 500 册

ISBN 7-5601-2798-3/TD · 7

定价: 10.00 元

前 言

煤炭等地下矿物资源开采,必将造成采场周围的岩体产生变形和破坏,同时这种变形和破坏还会波及到地表,引起地表沉陷。这种破坏不仅对矿山工程本身造成影响和危害,而且还对岩层中和地面上的其它工程或建(构)筑物造成影响和损害,是地下开采工程中一个重大的科学技术难题。我国许多有关科研院所和采矿专家都对这一课题进行了长期的研究,取得了许多突破性的进展。在相关研究中,尽管有人应用有限单元法、边界单元法和离散单元法等数值分析方法研究了采动岩体破裂与岩层移动问题,但直到目前为止,还没有一种成熟的数值计算方法,可以有效地进行采动岩体破裂与岩层移动全过程的数值模拟。因此,寻找一种新的更有效的数值计算方法,开发出相应的采动岩体破裂与岩层移动过程分析的数值分析系统,是岩石力学特别是采矿科技工作者为之奋斗并具有挑战性的课题。

1995年以来,东北大学岩石破裂研究中心借助国家杰出青年科学基金和国家自然科学基金面上项目的支持,一直致力于一种能用于岩石破裂过程研究的数值分析工具——RFPA^{2D}的研究与开发,已取得一些令人鼓舞的成果。本书就是将这一方法应用在地下开采引起岩层移动和地表沉陷过程分析的初步成果,旨在推动岩体破裂与岩层移动研究的进一步发展。

本书的出版,得到了岩石力学和采矿界专家和同行们的大力支持和帮助,也凝聚着研究生们的辛勤工作,在此一并表示感谢;也向给予大量资助的国家自然科学基金委员会和在本书出版中给予大力配合和鼎力支持的吉林大学出版社的同志们致以最崇高的



敬意!

鉴于 RFPA^{2D}数值分析系统的发展才刚刚起步,在地下开采引起岩层移动和地表沉陷过程分析中也仅仅是初步应用,加上我们的水平和经验有限,书中不当之处在所难免,恳请专家和学者批评指正。

著者

2002 年 10 月





目 录

1 绪 论	(1)
1.1 采动岩体破裂与岩层移动现象	(2)
1.2 采动岩体破裂与岩层移动过程中的基本力学问题	(4)
1.3 采动岩体破裂与岩层移动的研究简史	(5)
1.4 采动岩体破裂与岩层移动研究中存在的问题	(7)
1.5 数值计算方法在采动岩体破裂与岩层移动过程分析中的应用	(8)
1.6 岩石的破裂过程与细观力学分析方法	(10)
1.7 采动岩体破裂与岩层移动过程分析 RFPA ^{2D} 系统	(18)
1.8 本书的目的和内容	(19)
2 岩石破裂过程分析 RFPA 系统	(20)
2.1 介质破坏的基本构成单元——基元	(20)
2.2 基元的相变及其三种形态	(22)
2.2.1 基质基元	(23)
2.2.2 空气基元	(24)
2.2.3 接触基元	(25)
2.3 基元的相变	(26)
2.3.1 基元本构特性的描述	(26)
2.3.2 基元相变临界点	(27)
2.4 岩石破裂过程分析 RFPA 系统简介	(28)
2.4.1 RFPA 基本原理	(28)
2.4.2 网格剖分	(30)



2.4.3	基元赋值	(30)
2.4.4	应力分析方法	(32)
2.4.5	相变分析	(33)
2.4.6	RFPA ^{2D} 分析过程流程图	(33)
2.5	RFPA ^{2D} 主要功能	(34)
2.5.1	岩石中的应力分析	(35)
2.5.2	岩石破裂过程分析	(36)
2.5.3	岩石破裂过程中的流固耦合分析	(36)
2.6	小结	(37)
3	层状岩层及围岩结构中的应力场	(38)
3.1	层状岩体中单一开挖空间周围的应力场	(40)
3.1.1	圆形断面巷道	(41)
3.1.2	其他形状断面巷道	(43)
3.2	层状岩体中组合开挖空间周围的应力场	(44)
3.3	重复采动条件下岩体中的应力场	(45)
3.4	小结	(46)
4	采动影响下岩层的破断过程数值试验	(47)
4.1	动态仿真模拟模型的建立	(48)
4.2	顶板破断过程与机理分析	(51)
4.2.1	顶板的破断过程与破坏形态	(51)
4.2.2	顶板破断机理分析	(56)
4.3	工作面推进时上覆岩层的来压特点	(56)
4.4	工作面推进时煤柱支承压力变化特点	(60)
4.5	工作面推进时地表移动的变化特征	(63)
4.6	小结	(63)
5	典型覆岩岩层破断特征及岩层移动规律数值试验	(65)
5.1	覆岩岩层结构类型及性质	(65)





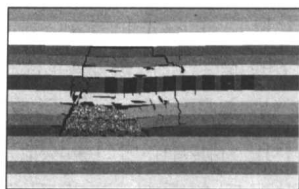
5.2 典型覆岩结构岩层破坏特征及规律的数值模拟	(67)
5.2.1 上硬下软型岩层破坏过程分析	(67)
5.2.2 平均型岩层破坏过程分析	(72)
5.2.3 上软下硬型岩层破坏过程分析	(73)
5.2.4 软硬复合岩层破坏过程分析	(75)
5.2.5 坚硬厚层岩层破坏过程分析	(76)
5.2.6 中等稳定厚层岩层破坏过程分析	(78)
5.3 小结	(80)
6 采动岩体破裂与岩层移动数值试验的综合分析	(83)
6.1 采动岩体破裂与岩层移动过程中的应力演化与变形分布	(84)
6.1.1 静态应力与变形分布	(85)
6.1.2 动态应力与变形分布	(85)
6.1.3 离层形成和发展的动态过程	(87)
6.1.4 覆岩影响带	(89)
6.1.5 覆岩破坏范围	(90)
6.2 条带法开采引起岩体破裂与岩层移动过程中的应力演化与变形分布	(91)
6.3 小结	(94)
参考文献	(95)





1

绪 论



在层状岩体中开采诸如煤等矿物资源时,开采面积达到一定的数值,不仅采场周围的岩体可能产生变形和破坏,同时这种变形和破坏还可能会波及到地表,引起地表的移动和变形等破坏。这种现象从人类开始利用地下资源时就已观察和认识到。开采作业中大面积开挖引起的这种岩层变形、移动和破坏,不仅可能对矿山工程本身造成影响和危害,而且还可能对岩层中和地面上的其它工程或结构物造成影响和危害,是地下开采工程中一个重大的科学技术难题。国内外许多有关科研院所和采矿专家都对这一课题进行了长期的研究,取得了许多突破性的进展^[1-57]。本章仅就目前用于采动影响下岩体破裂与岩层移动研究的数值计算方法研究作一简单介绍,有关岩层移动研究更丰富的其他成果,请参考本书后参考文献。



1.1 采动岩体破裂与岩层移动现象

开采首先引起的问题是对采场周围应力场的扰动,这种扰动造成采场周围应力场的重新分布。图 1-1 是这种由开采引起的应力场重新分布的一个例子。在这个例子中,假定开挖在一个煤层中进行。岩层由于自重产生自重应力场。随着开挖空间的形成,在开挖空间上部形成一个压力拱。横跨开挖空间上部的岩层则由于自重而产生向下的弯曲变形,这种弯曲变形则可能诱发拉伸裂纹的萌生和扩展。当直接顶在自重作用下与上覆岩层分离时,便产生所谓的离层,并形成岩梁。如果不对开挖空间实施支护,则处于压力拱中的岩层可能发生破裂与垮落。特别是当直接顶为泥岩类弱质介质时,垮落现象更容易发生。相反,当直接顶比较坚固时,则岩梁将形成自支撑系统,使整个围岩结构处于暂时稳定状态,直到岩梁悬空足够大的距离时,岩梁才能在自重应力和上覆岩

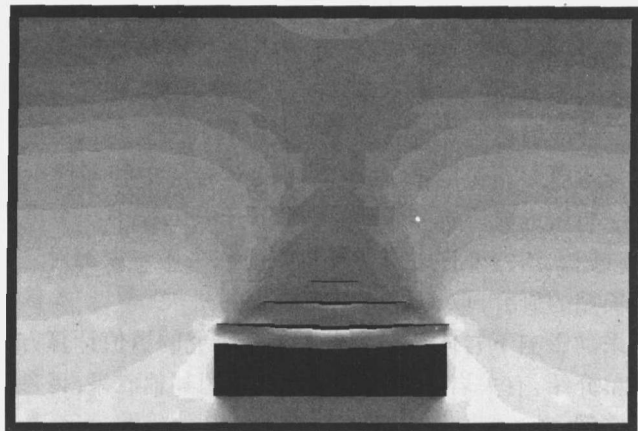


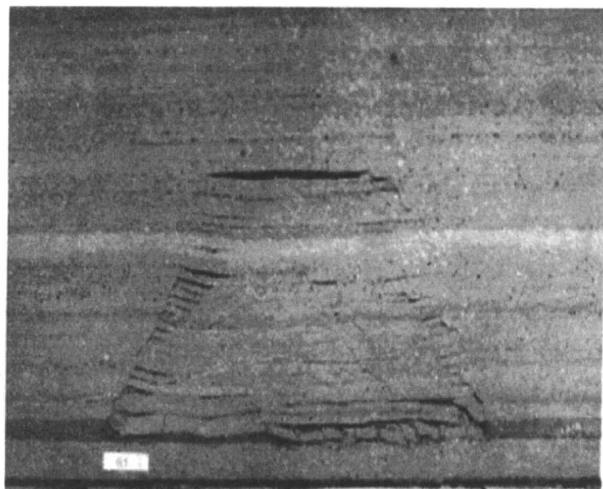
图 1-1 岩层中开挖引起的应力场再分布



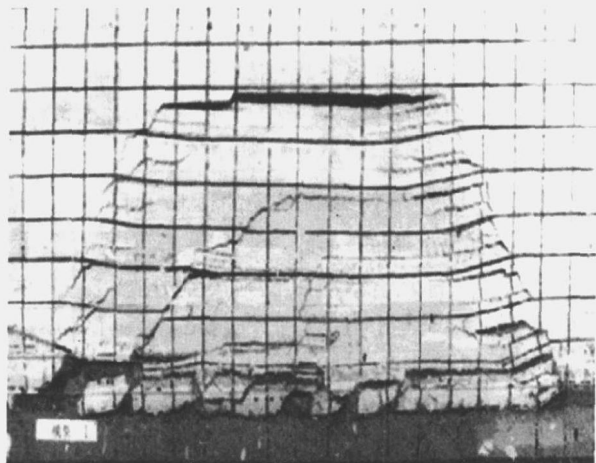
层的压迫下发生断裂,进而冒落。由于自然压力拱的形成,在压力拱以下将形成一个应力梯度区。当开挖空间顶板的跨度较小、上覆岩层的厚度较大时,应力梯度区的三维应力可能不足以使顶板或两帮产生破坏。但当跨度较大时,应力梯度区的应力可能会造成顶板或两帮的破坏。

岩层的破裂与垮落不仅影响采场的工作,而且可能波及地表,造成地表沉陷。地表沉陷的深度主要取决于开采的强度、开挖空间的几何尺度、岩层的力学性质以及地表到开挖区的高度等。

图 1-2 给出了一个顶板破裂与岩层移动的相似材料模拟实验照片^[50]。图中可以清楚地看到开采引起的顶板垮落与岩层破坏情况。这种垮落空间向上的传递直至地表,便使地表产生较开采垮落空间大几倍的沉陷范围。



(A) 模型正面



(B) 模型背面

图 1-2 无节理岩体采动沉陷实验照片

1.2 采动岩体破裂与岩层移动过程中的基本力学问题

经过一百多年的实践与研究,特别是经过最近 20 多年来我国煤炭开采科学研究与工程技术人员的实践与研究,有关采动岩体破裂与岩层移动^[1~49]过程的研究取得了长足的进步。综合开采实践和前人的研究结果,目前对采动影响下的岩体破裂与岩层移动过程的认识,主要包括如下几个方面:

(1) 开采过程是一个岩层中的原岩应力状态不断受到扰动,地应力或应变不断重新分布,由一种平衡状态达到另一种平衡状态的发展过程;

(2) 受扰动的采场应力可能诱发采场周围的岩层破裂或破



断,引起采场垮落或顶板冒落,甚至产生冲击地压、岩爆或煤爆;

(3) 以上过程不仅会影响到周围岩层的变形、移动和破坏,而且会通过上覆岩层波及到地表,引起岩层分离(离层)、地表移动或沉陷等;

(4) 当顶、底板富含承压水时,可能导致突水;

(5) 当煤层富含瓦斯时,可能导致含瓦斯煤岩突出。

因此,有关层状岩体中开采诱发的破坏问题,实际上主要包括两个方面:一方面是有关开采诱发的采场变形和破坏问题,以采场地压、顶板冒落、突水、含瓦斯煤岩突出等为主要研究内容;另一方面则是有关开采引起的岩层移动和地表沉陷问题。

1.3 采动岩体破裂与岩层移动的研究简史

人类从一开始利用地下资源时,就观察和认识到了开采诱发的覆岩活动与破坏问题,并开始探索控制岩层移动的方法。早在15世纪,关于允许开采深度的界定就被比利时人写进了法律。18世纪下半叶,已能对移动范围进行估计,这就是所谓的“法线理论”和“自然斜面理论”。这些理论为以后有关岩层移动的深入研究奠定了基础。进入20世纪后,门者尔观测到地表沉陷中的水平移动和变形,使覆岩活动的理论研究更为丰富,除地表下沉以外,扩充至水平移动计算以及急倾斜煤层条件下的地表移动动态过程的分析。第二次世界大战后,生产力的发展及社会对煤炭需求量的增大,使地表移动问题更为突出。许多学者开始对地表移动计算进行深入探索。苏联学者阿维尔申对覆岩活动进行了细致的研究工作,出版了《煤矿地下开采的岩层移动》专著,并给出了下沉盆地剖面方程及数学塑性理论。波兰学者克诺特提出了几何理论,布德雷克解决了克诺特提出的下沉盆地中的水平移动及水平变形





问题,这一理论现在被称为布德雷克——克诺特理论。1954年波兰学者李特威尼申在岩层移动计算理论方面做出较大贡献。他把岩层移动过程作为一个随机过程,推证地表下沉服从柯尔莫哥罗夫方程,这一理论被称为随机介质理论,依据这一理论发展了至今在我国广泛应用的概率积分方法。

与波兰、前苏联等国相比,虽然我国岩层与地表移动的研究起步较晚,但成绩斐然。60年代以前,我国还只是基本上借用苏联的典型曲线法。1958年起在我国一些矿区如抚顺、开滦、淮南、阜新等地制定了开展地表移动观测的规划,并相继建立了一些观测站。在多年观测的基础上求出了一些矿区的地表移动参数,并编制了淮南等三矿区的“地面建筑物及主要井巷保护暂行规程”,从而改变了过去那种引用苏联经验解决中国实践问题的局面;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形式的剖面函数;1965年,中国学者刘宝琛、廖国华^[2]编著了《煤矿地表移动的基本规律》,其中最大的贡献是引入了李特威尼申的随机介质理论并加以完善,由此提出了地表移动预测的概率积分法,该方法在我国采矿行业中现仍广泛应用;1978年,刘天泉提出了保安煤柱开采方法;1981年,他又和仲惟林等学者合作,研究提出覆岩破坏的基本规律,并针对水体下采煤提出了一些经验性的成果和方法^[3];1983年,马伟民、王金庄等^[4]组织编著了《煤矿岩层与地表移动》,详细地总结了该领域的研究成果。

80年代至90年代间,我国覆岩活动理论与实践出现了日新月异的发展。1983年,钱鸣高^[6]提出了采场矿山压力与控制理论,并出版了《采场矿山压力与控制》。1988年,宋振骐^[13]提出了以研究采场上覆岩层运动为中心的矿山压力和岩层控制理论,并出版了专著《实用矿山压力控制》。杨伦、于广明^[12]提出岩层二次压缩理论,将地表下沉直接与岩体的物理力学性质联系起来;李增琪^[9]将采动岩体看成是多层梁板的弯曲,采用 Fourier 变换推出岩





层与地表移动表达式;张玉卓^[14]提出岩层移动的位错理论;钱鸣高^[25]提出了关键层理论,推动了岩层移动理论的发展;赵经彻、何满潮^[29]从可持续发展角度深入研究了建筑物下煤炭资源的开采战略;于广明^[31,37,50]从非线性科学角度认识开采沉陷的复杂性,开始研究覆岩活动的非线性机理和规律。等等。可以毫不夸张地说,我国在采动岩体破裂与岩层移动的理论研究和实际应用方面都取得了巨大的成绩。

1.4 采动岩体破裂与岩层移动研究中存在的问题

尽管采动岩体破裂与岩层移动过程的研究已取得了重大的进展,但人们对岩体破裂与岩层移动过程的规律性,仍然缺乏从力学高度上的完整的认识。目前有关岩体破裂与岩层移动过程的研究,主要存在如下几个方面的问题:

(1) 目前可用于岩层内部移动与破裂过程分析的理论和方法大多建立在连续介质力学的基础之上,很难真正用于岩层移动特别是破裂过程的分析;

(2) 岩体内部结构的复杂性使传统的岩体破裂与岩层移动理论难以准确地分析岩体破裂与岩层移动实际现象;

(3) 由于岩层介质是经过复杂地质运动所形成的地质体,它在力学特性上表现出高度的非均质、各向异性等非线性特征,在几何形态上,表现出了多样化的矿层赋存形态、非连续性,在目前数学力学理论的基础上,很难利用解析的方法对上述问题进行的描述和分析。随着计算机技术的发展,数值方法在岩土工程中的应用已越来越得到普及。将数值计算方法引入岩体破裂与岩层移动过程的研究,必将是今后一个时期岩体破裂与岩层移动过程研究的发展方向之一。正如钱学森^[58]所指出的“今日力学是一门





用计算机计算去回答一切宏观问题实际科学技术问题……”。

1.5 数值计算方法在采动岩体破裂与岩层移动过程分析中的应用

在过去的三十多年中,岩石力学中的数值计算方法得到了蓬勃发展。与解析理论相比,数值计算有如下一些基本特点:

(1) 通过离散求解域,将复杂的宏观层次模型离散成可求解的若干简单的细观层次模型;

(2) 利用计算机计算速度快和精度高的特点,可以进行问题的快速求解;

(3) 可以设计更复杂的计算模型,可考虑多种工况情况;

(4) 可以得到全场应力、应变信息,更适合于工程问题的分析。

目前在岩石力学中应用的计算方法和商业软件众多^[59],应用较普遍的有:(1)有限差分法(Finite Difference Method),例如,美国 ITASCA 公司的 FLAC 软件;(2)有限单元法(Finite Element Method),例如,宋文洲的 2D- σ 和 3D- σ ,加拿大 Rocscience 公司的 Phase^{2D};(3)边界元法(Boundary Element Method),例如,加拿大 Rocscience 公司的 Examine^{2D} 和 Examine^{3D};(4)离散元法(Discrete Element Method),例如,王泳嘉^[60]的 2D Block, DDA (Discontinuous Deformation Analysis)、UDEC 和 3DEC;(5)拉格朗日元法(Lagrangian Element Method);(6)不连续变形分析法(Discontinuous Deformation Method);(7)流形元法(Mainfold Element Method),还有无单元法、半解析法、有限分析法、有限条法等等。这些计算方法在岩石力学发展中起了不同的作用,表现出不同的特点和适用领域。然而,尽管人们针对不同的科学问题发展了各





种不同数值计算方法,但目前可用于岩体破裂与岩层移动研究的数值计算方法主要包括两类^[61~64]:一类是建立在连续介质力学基础上的数值计算方法,诸如有限单元法、边界单元法等;另一类则是通常所说的非连续介质力学分析方法,其中最具代表性的当属离散元方法。应该说,这些方法均有各自的适应范围和优缺点。

以上介绍的数值计算方法不同程度地在岩层移动的计算中得到了应用。日本学者石岛洋二等人曾运用有限元方法计算煤层开采引起的地表移动问题^[65]。宋扬等人^[66]曾利用有限元方法研究了支承压力的显现过程。此外,王泳嘉^[60]、张玉卓^[28]、麻凤海^[26]、古全忠^[67]、林崇德^[68]等都利用离散元法或边界单元法研究了岩层的移动规律及其冒落、离层等问题。谢和平等^[69]将FLAC数值计算方法应用于煤矿开采沉陷预测的分析之中。现在,岩层移动计算正向着自动化、智能化、复杂化和直观化方向发展。在自动化方面,可以根据已有观测资料反求参数,计算不同采矿方案下的地表移动变形;在智能化方面,根据计算理论和专家经验设计的专家系统可以辅助决策;在复杂化方面,不仅能对倾斜煤层、岩层内部进行计算,而且对复杂地质条件(如有断层)下的移动变形也能计算,同时还能给出应力分析的结果;在直观化方面,计算结果能直接以曲线图甚至三维图的方式给出,十分直观,一目了然。

尽管各类数值计算方法已在采动岩体破裂与岩层移动过程的研究中得到了应用,但直到目前为止,还没有一种能够较为有效地解决采动岩体破裂与岩层移动过程数值模拟问题的方法。岩层在采动影响下的变形、破裂直至破断过程的研究,则一直是岩体破裂与岩层移动过程数值计算方法发展的难点之一。寻找一种新的更有效数值计算方法,开发出相应的采动岩体破裂与岩层移动过程分析的计算机数值分析系统,是岩石力学特别是采矿科技工作者为之奋斗的一个具有挑战性的课题。

