

中国现代科学全书·矿业工程学

Chinese Encyclopaedic Series of Modern Science · Mining Engineering

矿山开采沉陷工程

Mining Subsidence Engineering

邹友峰 邓喀中 马伟民 编著

中国矿业大学出版社



邹友峰，男，湖北省天门市人，1964年生，1984年毕业于焦作矿业学院地质工程系，获矿山测量学士学位，1988年在中国矿业大学获工学硕士学位，1994年在中国矿业大学获博士学位。现为焦作工学院院长、教授，开采沉陷与土地利用研究所所长，中国煤炭学会矿山测量专业委员会副主任委员，中国煤炭学会开采损害技术鉴定委员会委员。主要从事矿山开采沉陷、岩石力学、工程测量及土地利用方面的教学与科研工作。主持和参与有关条带开采和建筑物下采煤方面的课题25项，出版教材和专著5部，在国内外学术刊物上发表论文40余篇。



邓喀中，男，四川省资中县人，1957年生，1982年毕业于中国矿业学院地质系，获工程测量学士学位，1986年获中国矿业大学工学硕士学位，1993年获中国矿业大学博士学位。现为中国矿业大学环境与测绘学院空间信息系主任，教授、博士生导师，开采损害及防护研究所所长，中国金属学会矿山测量专业委员会委员，中国煤炭学会开采损害技术鉴定委员会委员。主要从事矿山开采沉陷、岩土力学、工程测量及土地利用方面的教学与科研工作。主持和完成国家自然科学基金等项目50余项，出版专著1部，在国内外学术刊物上发表论文40余篇。

中国现代科学全书总编辑委员会

名誉主编	胡 绳	钱伟长	吴阶平	周光召
	许嘉璐	罗豪才	季羨林	王大珩
	郑必坚			
主 编	姜士林	郭德宏	刘 政	程湘清
	卞晋平	王洛林	许智宏	白春礼
	卢良恕	徐 诚	王洪峻	明立志

矿业工程学编辑委员会

主 编	宋振骐	王淀佐		
编辑委员	(以姓氏笔画为序)			
	马伟民	王淀佐	邓喀中	卢寿慈
	宋振骐	邹友峰	张荣曾	陈清如

序

多年来,矿业工程在社会主义建设中做出了重要贡献。进入 21 世纪,我国矿业工程在新形势下面临着新的机遇和挑战。随着经济迅速发展,全社会对矿业资源的开采与环境保护的要求日益增高和严格,如矿山地区地表沉陷和环境的破坏和污染便是突出的亟需解决的重要问题。

常见矿产资源采出后,开采区周围岩土体的原岩应力平衡状态遭到破坏,出现位移和变形。采矿工程活动诱发的开采沉陷可导致一系列环境问题,甚至引发重大的地质灾害事故,如建筑物的裂缝与崩塌,铁路钢轨的悬浮,高速公路路基的沉陷,水体的流失与矿井的淹没等,都将造成巨大的经济损失及严重的社会问题。因此,开采沉陷一直是世界范围亟待解决的技术问题。

本书作者的学术思想比较活跃,勇于探索,涉及学科中某些前沿课题和生产实践中的关键性问题。作者在《矿山开采沉陷工程》一书中总结了作者及国内外近 10 年来有关开采沉陷方面最新的研究成果。该书共有八章,在阐明矿山开采沉陷规律的基础上探讨了开采沉陷的各类预计理论和控制与监测技术、建筑物下及近水体矿产开采技术、矿山开采沉陷对环境的影响及治理。特别是在第三章的采动岩体动态力学计算中,作者结合研究成果提出了开采沉陷的动态力学模型,不仅计算了采动岩体的移动变形,而且可进一步分析岩层内部的离层状况。在第四章的矿柱法沉陷控制技术中作者提出了条带开采尺寸设计的弹塑性法和刚塑性法,并指出矿柱的宽高比应大于 3.62,同时探讨了条带开采优化设计及其他

地表沉陷预计的三维层状介质理论。在保安煤柱设计方面提出了临界面标高投影法,使矿柱的尺寸设计更趋于合理。

矿山开采沉陷工程是一门涉及采矿、力学、地质、测绘、土建、环保等知识的边缘学科,具有明确的理论性和工程实践性。在当前该著作的出版,不仅对矿山开采沉陷的预测与监测、控制与治理具有重要意义,而且对于矿山开采沉陷和“三下”采煤技术的发展更具有促进的深远意义。

中国矿业大学教授

中国工程院资深院士

韩德馨

2002年9月8日

前 言

据不完全统计,我国现有煤矿的建(构)筑物下、铁路下、水体下和承压水体上的压滞煤炭储量(以下简称三下一上压煤)超过130亿吨,不能用常规方法进行开采。研究因地下开采引起的岩层及地表沉陷规律和开采三下一上压煤的方法已成为煤炭科技人员面临的重要课题。

20世纪50年代初,我国开始了地下采矿引起地表沉陷的监测工作,至今已积累了1000多条观测线监测资料。峰峰、平顶山、枣庄、鹤壁、淮北等矿区对本区的监测资料进行了综合分析,获得了本区开采沉陷规律和计算参数。东北各矿区以300多条观测线的监测资料为基础进行了大范围综合研究与分析。以大量实际监测资料为基础的研究工作及其成果是中国在本学科领域发展中的一大特色,它丰富了人们对开采沉陷一般规律和地区性规律的认识,为解决实际生产技术问题提供了可靠的技术依据,并有效地促进了学科发展。

20世纪60年代中期我国开始进行三下一上压煤的开采试验。全国从三下一上压煤中采出的煤量由当时的年产数百万吨逐步上升到目前的近5000万吨,这充分说明了三下一上压煤开采研究与试验的规模和必要性。我国幅员辽阔,各产煤区的地质、采矿条件各异,不同时期的宏观经济条件变化较大,三下一上压煤开采的技术途径和措施亦不尽相同。对于建筑物,现已有采前加固、重建抗变形结构房屋、井下采空区充填、条带法开采、协调开采及近期发展的离层带充填技术;对于铁路,主要采取以维修为主的措施。更为突出的则是我国水体下采煤试验,它用大量钻孔探测地下采煤后上覆岩体的断裂高度及断裂形态,并研究其与地层岩性、煤层开采厚度等影响因素之间的关系。以实测资料为依据的水体下

采煤试验的研究成果填补了国内外本领域空白,是中国在本学科领域发展中的又一大特色。自 20 世纪 80 年代以来,在淮北、平顶山、徐州等矿区开展了以煤矿塌陷地用于农业和建筑为目的的土地复垦试验,取得了可喜成果。可以相信,随着人类环境保护意识的增强,有关土地复垦方面的研究工作必将会取得更大进展。

开采沉陷涉及地质、采矿、土建、岩石力学和计算机应用等学科。随着相关学科的发展,我国矿山开采沉陷工程在变形机理研究、预计方法、实验室模拟及数据处理等方面也取得了长足进展。20 世纪 60 年代以来相继提出了典型曲线法、剖面函数法、概率积分法和积分格网法等地表沉陷预计方法。经过 30 多年的应用研究,概率积分法以其使用方便、适用性强和预计精度高等优点而发展成为当前主导的计算方法。计算参数的求取由几何方法发展为全剖面曲线拟合法和全盆地曲面拟合法。在机理和规律研究方面较普遍地采用物理模拟和计算机数值模拟与实地监测相结合的综合研究方法。此外,还相继开发出了开采沉陷数据库、实测数据求参、地表移动预计等应用软件和综合性的系统软件以及供过程分析用的专家系统。

经过近半个世纪相当规模的研究与试验,在开采沉陷与防治领域积累的成果和经验已形成了一门相对独立有中国特色的采矿科学分支——“矿山开采沉陷工程”。我们相信,这门学科在新的世纪里必将得到丰富和发展。值此世纪之交,谨向读者奉献这部专著《矿山开采沉陷工程》,在借以简要介绍中国在“矿山开采沉陷工程”方面的发展成果,谨请各界专家指正。

本书的编著和出版得到中国现代科学全书总编辑委员会和矿业工程学编辑委员会的支持和资助,在此特别致以衷心谢意。

编著者

2000 年 5 月

目 录

序	韩德馨
前 言	1
第一章 矿山开采沉陷工程概论	1
第一节 矿山开采沉陷工程的研究对象和任务	1
第二节 矿山开采沉陷工程的研究方法	2
第三节 矿山开采沉陷工程与相邻学科的关系	5
第二章 矿山开采沉陷规律	8
第一节 岩体移动和破坏的基本概念	8
第二节 岩体内部移动变形及破坏规律	16
第三节 地表移动变形及破坏规律	25
第四节 地质采矿因素对开采沉陷的影响	54
第三章 矿山开采沉陷的预计理论	69
第一节 最大下沉和最大水平移动	69
第二节 剖面函数法	76
第三节 影响函数法	92
第四节 连续介质力学方法	106
第五节 数值模拟与物理模拟法	114
第六节 覆岩破坏预计	129

第七节 采动岩体动态力学计算·····	134
第四章 矿山开采沉陷的控制技术·····	154
第一节 充填法沉陷控制技术·····	154
第二节 矿柱法沉陷控制技术·····	167
第三节 条带开采地表沉陷预计的三维层状介质 理论·····	181
第四节 协调开采变形控制技术·····	196
第五节 保安矿柱设计技术·····	203
第五章 矿山开采沉陷的监测技术·····	213
第一节 地表沉陷监测技术·····	213
第二节 岩体移动及破坏监测技术·····	219
第三节 井筒变形监测技术·····	233
第四节 建(构)筑物变形监测技术·····	238
第五节 矿山开采沉陷信息系统·····	242
第六章 建(构)筑物下及近水体矿产开采技术·····	250
第一节 建(构)筑物下矿产开采技术·····	250
第二节 线性构筑物下矿产开采技术·····	271
第三节 井筒煤柱开采技术·····	282
第四节 水体下(上)矿产开采技术·····	293
第七章 矿山开采对环境的影响及其治理技术·····	317
第一节 矿山开采对生态环境的影响·····	318
第二节 地表沉陷区生态复垦技术·····	327
第三节 地表沉陷区建筑利用·····	352

第八章 矿山开采沉陷学科的回顾与展望.....	364
第一节 矿山开采沉陷学科的发展回顾.....	364
第二节 21 世纪矿山开采沉陷学科的发展展望	390
参考文献.....	396

第一章 矿山开采沉陷工程概论

第一节 矿山开采沉陷工程的研究对象和任务

地下岩土工程特别是采矿工程,由于其具有规模大、深度大、地质条件复杂等特点,不仅存在自身稳定性问题,而且存在对其周围岩土体的影响问题。采矿工程大面积开采引起的岩土体位形的变化(产生位移和变形),不仅可能对矿山工程本身造成影响和危害,还可能对其他岩土工程及含水层和地面的工程和耕地造成影响及危害,它早已成为采矿工程中的一个重大科学技术课题而受到人们关注。

早在 15、16 世纪,比利时人就已发现地下开采对地下含水层的影响,比利时曾颁布一项法令:在列日城下开采时开采深度应大于 100 m,并对由于采矿而破坏供列日城用水的含水层者处以死刑^[1]。德国的陶德曼矿山管理局曾在备忘录中记载:1875 年在约汉·戴梅尔矿出现因地表沉陷使铁路钢轨悬空事故。1895 年德国的《幸福》杂志刊载:在波希米亚的柏留克城发生地下开采危及地面建筑物的严重事故,地面的突然崩塌毁坏 66 所房屋,严重破坏的达 35 所,其原因是煤层开采厚度达 28~30 m,采深小于 100 m,且存在流沙层,地下开采引起流沙溃入井下而使地表产生崩塌。

实际上,德国在居民区范围以外进行开采时,如在山区(像在哈茨、泽格格兰特和阿尔卑斯山),并不存在大的采动损害问题。那时(1356),德国的矿业法规定矿山开采权属于土地所有者。随着开采强度增大以及土地所有权与矿藏权的分离,开采影响及其损害问题日益突出,从 1830 年到 1850 年,此类问题在普鲁士议院进行

了长期讨论并形成了以下决议:开采对土地所有者造成的损害应由矿山企业予以补偿。这项决议于 1865 年纳入了普鲁士国家总矿业法中^[2]。

在近水体(地表水和流沙层下及承压水体上)采矿时常发生淹井事故,如 1916 年日本在海底采煤出现的淹井事故即致使 237 人死亡。当时,矿井开采两个煤层,工作面离海岸 1.2 km,上覆岩体为 47 m 厚的砂岩和 25 m 厚的冲积层和粘土层。事故发生在离海岸较远的岩层构造裂缝处。地下开采后,该裂缝因开采影响而裂开,海水沿导水裂缝溃入井下,两小时矿井即被完全淹没。

经过近百年实践特别是近 20 多年的研究,该类问题已逐渐发展成为采矿和岩体力学学科中一个相对独立的分支学科。其研究内容、基本理论和技术方法即被概括为矿山开采沉陷工程。其研究和服务的对象较广,包括建(构)筑物下采矿与保护,水体下和近水体采矿与水体保护,铁路、公路下采矿与保护,巷道附近采矿及井巷保护,采矿区山体崩塌和滑坡的原因分析与防治,开采沉陷区新建建(构)筑物的可行性分析,矿山各类各级受护物的安全矿柱设计,矿体的最佳开采顺序,矿山开采沉陷与土地保护、利用与治理等。

矿山开采沉陷工程学的研究内容主要有:采矿引起岩土体位移与变形的机理和规律,减小岩土体位移与变形的采矿技术,采动区建(构)筑物变形的机理与规律及其保护加固措施,受采动影响的岩土体及建(构)筑物变形的监测与预计技术,受护建(构)筑物保护矿柱设计技术,矿区与开采沉陷有关的环境影响评价与保护技术以及矿区建设规划等^[3~7]。

第二节 矿山开采沉陷工程的研究方法

地下矿产采出后,开采区周围岩土体的原始应力平衡状态受

到破坏,岩土体出现位移和变形,应力重新分布,达到新的平衡。在此过程中,岩土体上出现的位移和变形称之为开采沉陷(mining subsidence)。矿山开采沉陷工程的研究方法主要包括以下几个方面^[8~11]。

一、地质研究方法

开采是在岩体内进行的,开采活动产生的沉陷影响受构成工程岩体的组成成分、结构和赋存条件控制,特别是受岩体结构面和岩体结构特征控制,因此可利用地质研究方法确定开采工程岩体的以下地质特征。

1. 岩石、岩相和岩层特征,最重要的是软弱成分和薄弱环节,如粘土成分、可溶盐类、含水蚀变矿物,软的、弱的、不抗风化成分及原生结构与构造等。
2. 岩体结构,主要是岩体的结构面,包括软弱结构面、软弱结构面充填物和起伏程度等。
3. 地质环境因素,主要是地应力、地下水的分布等。

二、室内岩块的物理力学性质测试

岩块是岩体的组成成分,根据其物理力学性质并结合岩体结构面的力学效应,即可确定工程岩体的物理力学性质,并预测出地下开采在岩土体上产生的位移和变形。

1. 岩块的物理性质,主要包括岩块的湿度、密度和孔隙度、膨胀性和碎胀系数、岩块的波速等。
2. 岩块的力学性质,主要包括岩块的强度、应力应变关系,岩块的时间效应和流变性质等。
3. 弱面的力学性质,主要包括弱面的强度性质、变形关系等。

三、现场实测研究

1. 岩体结构面探测,采用地球物理方法与技术探测岩体的结构面。

2. 开采沉陷监测,采用工程测量上常用的仪器、方法和技术实时监测地表、道路及其建(构)筑物上出现的移动变形,据此研究其定性、定量规律并提出开采沉陷预计方法。这是矿山开采沉陷工程中常用的研究方法。

3. 岩层移动监测。

4. 采动岩体破裂范围测定,即导水裂缝带测定。

5. 岩体物理力学性质原位测定。

四、力学分析

力学分析可分为两个阶段:开采工程岩体结构分析和数学力学分析。结构分析主要是从地质信息中抽象出力学模型,数学力学分析是通过数学力学计算给出岩土体中的应力、位移和变形等。

1. 解析法。通过力学模型,利用平衡条件、本构方程、变形条件、边界条件、破坏准则,求解应力、位移和变形,确定岩体中出现的破坏区域,预测开采沉陷对受护物产生的影响及其影响程度。

2. 数值分析。常用的方法是有限单元法、边界单元法、离散单元法和差分法等。

五、物理模拟分析法

1. 相似材料模型试验。主要用于定性或半定量分析,通过相似材料模型试验,了解给定地质条件下各种开采方案的岩层和地表移动变形规律及其对建(构)筑物的影响。

2. 光弹应力分析。

3. 电模拟分析。

六、过程辨识法

过程辨识是从含有噪声的输入输出数据中提取被研究对象的数学模型。该模型只是对象的输入输出特性在某种准则意义下的一种近似,近似的程度取决于人们对于过程先验知识认识的深化程度和对数据集合性质的了解。过程辨识包括模型结构辨识、模型参数辨识和模型检验。

开采沉陷预计方法中,典型曲线法、剖面函数法、影响函数法中的部分方法及现在的“黑箱”与“灰箱”理论都是自觉或不自觉应用过程辨识法取得的成果。

七、综合分析法

矿山开采沉陷是一个非常复杂的物理力学现象,其每一个环节都是多因素的且信息量大,因此一般情况下应根据实际的情况综合应用上述各种方法。比如,我们可通过室内岩块物理力学试验和相似模型试验而获得工程岩体的力学模型和力学参数,然后运用力学分析法中的有限单元法来计算地下开采后岩土体中将产生的应力、位移和变形,并分析开采沉陷对建(构)筑物可能产生的影响。

第三节 矿山开采沉陷工程与相邻学科的关系

矿山开采沉陷工程研究的内容比较广,其基础理论和应用技术涉及的学科亦较多,主要有采矿工程学、地质学、工程地质学、水文地质学、工程力学、岩土力学、计算方法、建筑工程学、工程测量学、环境保护学、相似理论等学科。因此,它是一门多学科相互结合的边缘性学科。

一、与地质学、工程地质学和水文地质学的关系

地质学是研究人类的生存环境——地球(特别是地壳)的组成、演变和发展的一门科学,而工程地质学和水文地质学均是地质科学的一个分支。工程地质学是研究与工程规划、设计、施工和运用有关的地质问题的科学。水文地质学是研究地下水的形成、运动和分布规律的科学。

矿山开采是在岩土体内进行的,岩体的岩石和矿物成分、形成环境、岩体的结构面特性、岩体的水文地质和工程地质特征等必将对岩土体的移动和变形产生影响,因此,需要应用地质学、工程地质学、水文地质学的有关理论和方法分析岩石、岩相和岩层的特征,分析岩体的结构,了解地质环境因素。

二、与岩土力学的关系

矿山开采沉陷问题属于岩土力学研究的问题,即是说矿山开采沉陷工程属于岩土工程的分支学科。这样,岩土力学中有关岩体的应力、位移、应变的测试技术和计算理论均可以结合矿山开采的特点应用于矿山开采沉陷学科。

三、与采矿工程学的关系

矿山开采沉陷工程研究的主要问题是开采沉陷的预计理论及其“三下一上”采煤。要经济合理地回采受护物附近的呆滞煤量,需要应用采矿工程学的基本理论特别是采取特殊的采矿方法,如充填开采、条带开采、多工作面协调开采等。

四、与建筑工程学的关系

在建(构)筑物下采矿时,为确保受护物安全正常使用,需对建(构)筑物的结构稳定性进行分析,有时需要在开采前和开采后对