

(国家自然科学基金、煤炭科学基金资助项目)

开采沉陷预计 一体化方法

吴 侃 葛家新 著
王铃丁 周 鸣



中国矿业大学出版社

责任编辑:刘社育

封面设计:陈训雄

ISBN 7-81040-809-7



9 787810 408097 >

ISBN 7-81040-809-7

TD·86 定价:10.00 元

TD325

W-441

开采沉陷预计一体化方法

(国家自然科学基金、煤炭科学基金资助项目)

吴侃 葛家新 著
王铃丁 周 鸣

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以概率积分法预计理论为基础,从实测资料和室内模拟试验结果出发,结合岩土力学中的有关理论,建立了包括概率积分法预计模型修正体系、开采引起的地表裂缝发育规律预计模型和农村房屋裂缝预计模型在内的一体化预计方法及有关参数求取方法,详细论述了全盆地参数寻优及缺失测点的观测站求参问题,且讨论了各自的应用效果。

本书可作为采矿工程、矿山测量专业本科、研究生的教学参考书,也可供矿区采矿、测量、环境保护和土地复垦等专业的工程技术人员参考。

责任编辑 刘社育

开采沉陷预计一体化方法

吴 侃 葛家新 著
王铃丁 周 鸣

中国矿业大学出版社 出版发行

新华书店经销 北京地质印刷厂印刷

开本 850×1168 mm 1/32 印张 4.25 字数 105 千字

1998 年 3 月第 1 版 1998 年 3 月第 1 次印刷

印数:1~1000 册

ISBN 7-81040-809-7

TD·86

定价:10.00 元

前 言

中国是世界产煤大国,煤田多,分布范围广。据不完全统计,各主要矿区在建筑物下、铁路下和水体下(简称“三下”)压滞的煤量约130亿t。这些压煤量大多属于已开拓的煤量。为了解决“三下”采煤问题,也为了充分利用地下资源、延长矿井寿命,广大采矿工程技术人员、研究机构和高等院校的学者进行了大量的研究工作。研究工作包括现场实际观测研究、实验室物理模拟研究和理论研究。中国煤矿矿区开采沉陷研究的典型特色是:在各种不同的地质采矿条件下所进行的现场实际观测研究。现场实测资料最丰富的是地表移动变形观测。自50年代以来,各主要煤矿区为研究由于地下采煤引起的地表沉陷的规律而建立的观测线总数达到1000条以上,每个主要矿区有观测线20~40条不等,取得了大量的实测数据。经综合分析实际观测数据,各主要矿区都得到了反映本矿区开采沉陷规律的资料和参数,建立了具有我国特色的地表沉陷预计法——典型曲线法、指数函数法、概率积分法和威布尔分布法等。各矿区都能比较可靠地预测由于地下开采引起的地表沉陷,并进而分析由此给地面建筑物、铁路和环境等所造成的损害。但是,开采沉陷预计不能单纯指地表移动和变形的预计,应当包括地表移动变形、地表裂缝发育范围和发育深度、建筑物变形和裂缝宽度、塌陷地面积以及岩体内部破坏规律等的预计。以上诸多内容的预计都是相互关联的、一体的,都是对地下开采引起的一环扣一环的破坏的预计。本书试图初步建立起一体化的预计体系,着重讨论动态地表移动变形、地表裂缝发育范围和发育深度、建筑物变形和裂缝宽度等预计的预计模型和实际应用。

本书是作者参加的国家自然科学基金项目(开采引起的地表

裂缝发育规律部分)和煤炭科学基金项目的研究成果的综合,也是作者结合兖州北宿煤矿吴官庄村下采煤及其它矿区村庄下采煤实践的产物。在研究过程中,得到了中国矿业大学(北京校区)马伟民教授的悉心指导;得到了中国矿业大学采矿系何国清教授、胡振琪教授、郭广礼副教授、谭志祥讲师和三下采煤研究室全体同仁的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。感谢马伟民教授审阅了全部书稿。书中引用了一些单位和个人发表的文献资料,在此对所引文献的作者表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中难免有欠妥之处,恳请读者批评指正。

著 者

1998 年 1 月于徐州

目 录

1 开采沉陷及控制研究进展综述	1
1.1 开采沉陷基本理论研究	1
1.2 开采沉陷预计技术	4
1.3 野外测试技术的发展	7
1.4 开采沉陷模拟技术	8
1.5 复杂(特殊)地采条件下的开采沉陷研究	10
1.6 “三下”采煤进展	15
1.7 沉陷区利用	24
1.8 计算机在开采沉陷中的应用	25
2 开采沉陷预计概率积分法修正体系	28
2.1 地表移动变形预计概率积分法基本原理	28
2.2 概率积分法动、稳态预计及计算机实施模型	34
2.3 概率积分法预计存在的问题	39
2.4 概率积分法预计模型的修正体系	39
3 开采引起的地表裂缝预计	48
3.1 表土物理性质及有关强度理论	48
3.2 开采引起的地表裂缝分布区域的预计	58
3.3 开采引起的地表裂缝发育深度和宽度的预计	66
3.4 地表裂缝对耕地的影响	75
4 开采沉陷区内农村房屋破坏规律及预计	77
4.1 开采沉陷区内村庄房屋破坏等级的预计	77
4.2 村庄房屋移动变形与地表移动变形的关系	79
4.3 村庄房屋裂缝发育规律分析	80
4.4 村庄房屋裂缝宽度预计模型	83
5 预计模型中参数获取方法	85
5.1 全盆地参数寻优模型——模矢法求参及其应用	85

5.2	上行开采时参数求取·····	102
5.3	模糊模式识别法类比参数及其应用·····	112
5.4	下沉速度系数的计算公式·····	116
6	实时预计系统 ·····	119
6.1	在线实时预计系统·····	119
6.2	矿区沉陷一体化实时预计系统·····	119
	主要参考文献·····	122

1 开采沉陷及控制研究进展综述

1.1 开采沉陷基本理论研究

1.1.1 早期的开采沉陷基本理论

在上世纪中,对开采沉陷及其沉陷的影响因素有了比较明确的概念,认为其主要影响因素是开采方法、煤层倾角、厚度、埋藏深度以及岩石的力学性质等。早期的开采沉陷理论主要有:

(1)将采空区上方的岩层看作是悬臂梁,从而得出,地表的应变很可能是由于下沉引起的,其大小与地表的曲率半径成反比;

(2)将采空区上方的岩体视为由不同厚度和力学性质的分层所组成,岩层移动的基本形式是这些分层的弯曲,应用两端固定梁的理论,将移动过程看作是各个分层的逐层弯曲,从而计算出移动过程的要素。

二次大战后,人们着重从连续介质和非连续介质理论来研究开采沉陷问题。

1.1.2 连续介质理论

(1)利用力学的塑性理论对岩层移动进行了分析,并以理论分析的结果为指导建立了地表移动的计算方法。

(2)利用弹性基础梁理论得出了波动性的下沉剖面。

(3)将整个岩体视为均质线弹性体,分为平面各向同性、平面横观各向同性以及空间问题进行了分析。

(4)提出了更为一般的线弹性分析原理——面元原理,即

$$W(X, Y) = \int S(x, y) F(\rho^2) dA$$

式中 $S(x, y)$ ——顶底板闭合量的分布;

$F(\rho^2)$ ——影响函数;

A ——开采面积。

这一理论是开采影响理论的先进的变换形式。

(5)将覆岩看成是横观各向同性、纵观各层异性、同一层内各向同性的弹性层体接触^[1],求出了开采沉陷的位移和应变公式。该理论反映了地表移动是由开采空间一层层传到地表的,上一层移动是由下一层传上来的。

(6)中外学者逐渐认识到岩体结构的控制作用,强调岩体结构对岩体力学性质的影响大于岩石材料性质的影响。我国学者对开采沉陷岩体结构效应作了专题研究^[2]。该研究应用了损伤力学原理、相似材料模型和有限元计算机模拟等理论和方法,研究了节理对岩层及地表移动变形的影响、层面效应,得出了一些有用的定性和定量结论。同时提出了“层面滑移的多层岩梁模型”。

目前,广泛使用的弹性、弹塑性有限元法、边界元和离散元等模拟方法也都是建立在连续介质的理论之上的。

1.1.3 非连续介质理论

(1)非连续介质力学中最有成效的是随机介质理论,在我国发展成为概率积分法^[3]。经过我国开采沉陷工作者 20 多年的研究,目前已成为我国较成熟的、应用最为广泛的预计方法之一。

(2)将岩体看作是由椭圆形质点所构成的具有抗压和抗剪能力、而抗拉能力较小的松散介质,在求解双层岩体(基岩和冲积层)的问题时,得出了缓斜煤层开采的下沉剖面方程。

(3)将岩体假设为:岩体是由于开采破坏引起的和原生的节理系、裂隙系等所分割的不连续介质,可以用碎块体模型描述;岩体是各向异性的、非均质的、不连续的;承认“叠加原理”。仿照随机介质理论的分析方法,得到地表移动变形预计的威布尔分布法^[4,5]。该方法可以描述不对称移动盆地。

(4)引入了空隙扩散和空源等概念^[6],建立了空隙扩散微分方程,并初步研究了该方程在开采沉陷中的应用。这是对随机介

质理论的补充和发展。

1.1.4 评述

无论是连续介质理论还是非连续介质理论,应用于开采沉陷及岩层移动的研究,所推导出的地表位移和应变应当同实地观测到的事实吻合。只有这样才能达到实用。

非连续介质理论中,象随机介质理论、碎块体理论等都是通过本身理论分析建立起来的基本方程,用它与实地观测到的事实作对比分析,求取沉陷方程中的有关参数。这些参数体现了开采条件、地质条件、上覆岩层结构和性质等在地表的综合反映。应用这样的模型和参数进行地表移动变形的预计能获得满意的结果。但是,对于岩体内部(从开采空间到地表的广大范围)从理论上也是可以作定量计算的,计算结果与实际常常相差甚远。

连续介质力学方法求解岩层移动变形的解析解很难求得,现有的解析解也只能是作了相当多的简化后的弹性力学问题解。且主要是针对简单开采条件(单一工作面开采水平煤层)的。该法中正确选取岩体力学参数相当困难。反分析法求得的参数一般也只能是作为一种等价参数来看待,而且可能不唯一。但是用作定性分析解释一些开采沉陷实际现象具有一定的实用价值。

连续介质和非连续介质理论应用于矿山开采沉陷,描述开采沉陷过程只能是宏观上的相似,要揭示开采空间上覆岩体内部的移动变形有很大的局限性。矿山开采导致上覆岩体破坏的最终结果是部分岩体破碎(成为非连续介质),大部分岩体是完整的弯曲(连续介质)。非连续部分的岩体是由连续岩体逐渐破断而形成的,它与开采的进程具有直接的关系。因此,要全面深入的研究上覆岩层的沉陷机理,必须:

- (1)研究开采沉陷工程岩体尺寸范围内岩体的破断准则;
- (2)岩体破断成为非连续介质后,在不同受力条件下所表现的力学性质;
- (3)连续介质和非连续介质之间在不直接接触、部分直接接触

和直接接触条件下的耦合问题,且这一问题必须在动态环境中进行考虑(原连续岩体部分转化为非连续,连续和非连续岩体之间从不直接接触到部分直接接触到直接接触)。

解决好以上几个关键问题,才有可能在开采沉陷基本理论方面实现重大的突破。

1.2 开采沉陷预计技术

开采沉陷预计方法一般可以分为三类。

(1)基于实测资料的经验方法(典型曲线法、剖面函数法):是通过对大量的开采沉陷实测资料的数据处理,确定预计各种移动变形值的函数形式(解析公式、曲线或表格)和预计参数的经验公式。这种方法是当前最为可靠的一种预计方法。我国、前苏联和英国等国家,几十年来积累了大量的开采沉陷实测资料,建立了这一类的预计方法,并在实践中得到了广泛的应用。

(2)理论模拟法:把岩体抽象为某个理论模型,按照这个模型计算受开采影响岩体产生的移动、变形和应力的分布情况。

(3)影响函数法:根据理论研究或其他方法确定微小单元开采对岩层或地表的影响(以影响函数表示),把整个开采对岩层和地表的影响看作是采区内所有微小单元开采的总和,据此计算整个开采引起的岩层和地表的移动和变形。此法所用的参数常根据实测资料求得。

1.2.1 开采沉陷预计发展简史

(1)陷落法开采中央正上方最早的下沉的计算公式为:下沉 = 采厚 $\times$ 煤层倾角的余弦。

(2)提出了:下沉 = 开采方法的系数 $\times$ 采厚 $\times$ 持续时间的影响。

(3)点的下沉与其影响范围内的开采面积有关,给出了相应的计算公式。

(4)进一步认识到了下沉还与点的位置有关,并将影响范围分

为两个环来计算下沉和水平移动。

(5)进一步提出了连续影响函数分布的概念,从而为影响函数法奠定了基础。

(6)二次大战后,影响函数法获得了许多进展。50年代初期,提出了影响曲线的概念,并得出了正态分布型的影响函数。

(7)前苏联学者在30年代开始以地表移动的直接观测数据——主断面下沉和水平移动为基础建立预计方法,首先提出了剖面函数。之后,人们从各种途径获得了许多剖面函数。前苏联、英国等还发展了用图或表表示的典型曲线。我国也建立了以负指数函数、威布尔分布法为代表的剖面函数,建立了峰峰型、平顶山型的典型曲线^[7]。

1.2.2 我国开采沉陷预计现状

我国开采沉陷工作者经过几十年的努力,已建立了适合我国实际情况的多种预计方法。主要有概率积分法^[3]、负指数函数法、典型曲线法、积分格网法、威布尔分布法^[5]、样条函数法、双曲函数法、皮尔森函数法、山区地表移动变形预计法^[8,9]、三维层状介质理论预计法^[10]和基于托板理论的条带开采预计法^[11]。

在这些预计方法中,积分格网法已很少使用,双曲函数法是基于淮南矿区具有巨厚冲积层时的开采预计方法,皮尔森函数法是基于淮南矿区急斜煤层开采时的预计方法,一般仅限于该矿区使用。三维层状介质理论和托板理论是针对条带开采提出的新方法,还有待于进一步的实践检验和完善。

根据我国各矿区的实际情况在这些预计方法中选择合适的预计模型,对于一般地质采矿条件下的预计,其精度是能满足沉陷治理工程需要的。对于存在特殊地质采矿条件时,仍然没有较成熟的预计方法,实际工程中一般采用数值模拟和物理模拟作定性或半定量的分析。

在我国《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》^[9]中列出的预计方法是概率积分、负指数函数、典型曲线和

山区预计法,这些方法使用范围较广,其中概率积分法是使用最广泛的。

在研究地表移动时间过程时,认为当地下突然采出某块矿体时,地表的下沉可用微分方程表示为

$$dW(t)/dt = g[W_K - W(t)]$$

式中 W_K ——某一点最终下沉;

$W(t)$ ——某点在 t 时刻的下沉;

g ——与岩性有关的下沉速度系数。

这一方程被许多岩层移动学者用来描述地表移动的时间过程,取得了相当符合实际的结果。下沉速度系数是描述时间过程的重要参数。我国学者研究了下沉速度系数和岩石流变力学参数间的重要关系^[12]。经过统计和理论分析得出了下沉速度系数与概率积分参数、采深及工作面推进速度之间的关系^[13]为

$$g = a \cdot v/r = a \cdot v \cdot \operatorname{tg}\beta/H$$

式中 a ——无量纲常数,一般地质采矿条件该数等于 2,在巨厚冲积层地区小于 2;

v ——工作面推进速度;

r ——主要影响半径;

$\operatorname{tg}\beta$ ——主要影响角正切;

H ——开采深度。

据此编制的动态预计程序可以计算工作面推进至任意位置时地表的移动变形。在实际应用中获得了满意的效果。还从理论上推导了地表移动空间—时间过程的统一计算公式^[14]。

近几年来,提出的概率积分法的线积分运算方法,对提高计算精度、计算任意形状工作面的开采预计非常有益^[15]。许多开采沉陷工作者在改进常用预计方法存在的一些与实际不符的问题方面作了许多工作。

1.2.3 预计参数

据统计,开采沉陷预计的主要误差是由于预计参数的误差而

造成的。为此,我国开采沉陷工作者利用大量的观测资料求取各个矿区的预计参数,为正确预计地表移动变形提供了基础。

在已有大量观测资料的矿区,通过综合分析建立了本矿区的经验公式。这些公式一般都反映了预计参数与地质、采矿参数之间的定量关系。如原东煤公司的各大矿务局、峰峰、淮南、平顶山、淮北及枣庄等矿务局都进行了综合分析。

用岩性综合评价系数反映不同地区的岩性变化,给出了概率积分法中各参数的预计公式^[16],为没有自己的预计参数的矿区提供类比的分析方法,为综合分析中的岩性描述提供量化指标。有的学者还用模糊数学来求取预计参数。

为了既节约观测站的投资又能获得较为可靠的预计参数,改进参数求取方法使观测站的测点尽量少而且布置位置要求不很严格(即相应地改进观测站的设置方法)是一有效的途径,为此提出了地表移动观测及参数分析—空间问题^[17,18],提出了设置观测站的新方法等^[19]。另外,还有用正交设计法求取预计参数^[20,21]的。

1.3 野外测试技术的发展

传统的观测方法是用水准仪观测高程,用钢尺丈量边长。后来用测距仪代替钢尺观测水平移动。近来又出现了一些全新的方法。

70年代,前苏联利用不同时期的地形图、航空摄影测量图等矿山测量资料分析预计岩层移动的过程和状态。

匈牙利(1979年)和波兰(1982年)曾利用地面摄影测量研究地表移动。

中国(1982年)和德国的学者(1985年)用地面摄影测量观测建筑物变形。德国还用电子装置监测地表的变形(1979年),用地震法监测岩层移动。

加拿大研制了一种新式遥测装置,该装置以一组倾斜仪配带一台微型信息处理机,把地表点受采动后的倾斜信息用无线电传

递系统输送给计算机控制中心进行数据处理。通过两年多的试验证明了该装置是成功的^[22]。

英国采用一种轻便的钻孔仪可直接测量地面的倾斜(1982年)。美国在钻孔观测中采用钻孔伸长仪和钻孔测斜仪(1984年)^[23]。

波兰还采用激光测量检查井塔的移动(1982年)。

我国在野外观测方面也取得一些进展。采用全站仪观测三维坐标,记录、计算全部自动化;进行了三维监测网在矿区变形监测中的应用研究^[24],该法在固定点上架设仪器,采用多方交会,平面、高程整体平差,获得了较为理想的成果;利用GPS对位于放顶煤开采移动活跃区内的某一点进行了连续一昼夜的观测^[25],获得了很有意义的结果;钻孔伸长仪和钻孔测斜仪监测岩体内部的移动变形获得了很大的成果,如煤炭科学研究总院开采所(1986年以来)将该仪器应用于边坡稳定、煤矿井筒周围地层移动变形的观测^[26],中国矿业大学(1990年以来)将该仪器应用于受开采影响的淮河大堤内部的移动变形观测和煤矿井筒周围地层移动变形的观测,这些观测都获得了满意的结果,可以进一步推广应用;应用遥感技术(1991年以来)对矿区范围内的开采沉陷进行调查,并用于治理规划^[27]。

1.4 开采沉陷模拟技术

国内外普遍采用相似材料模拟和数值模拟方法研究开采沉陷的岩体移动规律和特殊情况下的开采沉陷问题。这些方法应用于前苏联、中国、德国、英国、捷克、印度、日本、美国和波兰,模拟方法仍然停留在定性分析的阶段,个别能达到工程应用的水平。

1.4.1 数值模拟

数值模拟主要是有限元、离散元、边界元法。边界元在开采沉陷中的应用已很少,离散元的应用有所进展,而大量使用的数值模拟方法是有限元法。

数值模拟已被应用于如下几个方面:

(1)条带开采(或房柱式开采)。例如我国学者研究了条带开采的地表移动特点及煤柱稳定性要素,条带开采覆岩移动规律研究,急斜煤层条带开采三维有限元分析^[28];美国、保加利亚等用有限元对房柱式开采的煤柱进行了结构分析^[29,30,31]。

(2)稳定性分析。例如受采动影响堤坝稳定性分析、老采区上方新建洗煤厂地基稳定性分析。

(3)导水裂缝带高度。例如岩层移动规律的有限元非线性模拟研究(1991)、煤层开采防水煤岩柱工程地质预计(1994)。

(4)特殊地采条件的地表移动规律。例如巨厚冲积层地表移动规律的研究、山区地表移动规律、基岩裸露地表移动规律。

(5)断层影响。例如断层存在时的地表移动规律。

(6)井筒煤柱开采。例如复杂条件下井筒煤柱开采三维有限元分析^[32]。

(7)抗变形建筑的受力分析。例如抗变形框架结构受力分析,滑动层对抗变形框架结构建筑物的作用分析、矿山采动区砖砌体房屋三维有限元模型的建立与分析^[33]。

其他还有许多学者用数值模拟的方法分析开采沉陷问题,在此不一一列出。

1.4.2 相似材料模拟

相似材料模拟已被应用于如下几个方面:

(1)条带开采。例如急斜煤层条带开采。

(2)老塘活化。例如波兰专门研究了老塘活化问题、老采区上方新建洗煤厂老采区活化研究。

(3)采空区周围岩体破裂规律。例如采煤工作面底板应力及位移的模拟实验研究。

(4)特殊地采条件的地表移动规律。例如重复采动问题、坚硬厚岩层对地面沉陷的控制、层面滑移、堤坝下采煤^[34]、厚黄土层覆盖地区地表移动规律和综采放顶煤开采的岩层移动的模拟。