

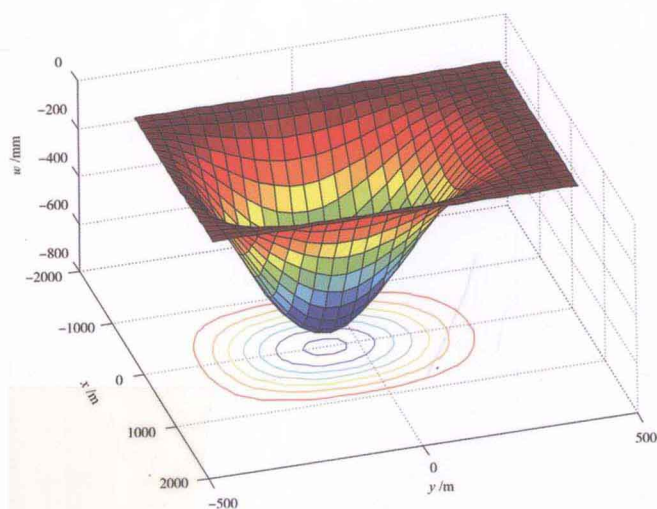


学 | 术 | 专 | 著

开采沉陷的 动态过程模型研究

刘玉成 著

Study of the ground surface dynamic
subsidence model due to underground coal mining



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

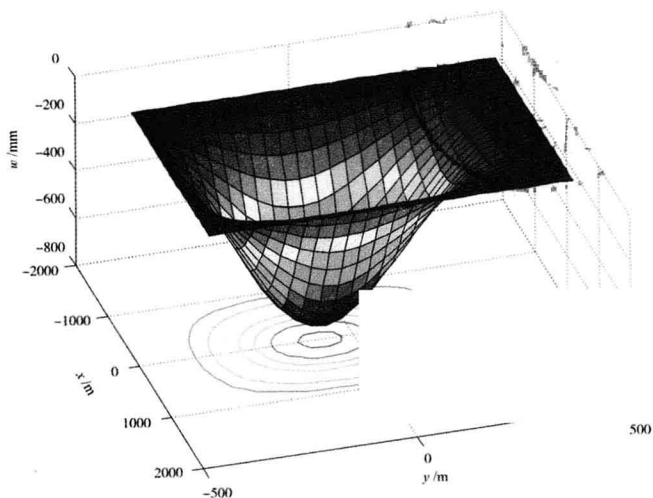


学 | 术 | 专 | 著

开采沉陷的 动态过程模型研究

刘玉成 著

Study of the ground surface dynamic
subsidence model due to underground coal mining



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

开采沉陷的动态过程模型研究/刘玉成著.

—长沙:中南大学出版社,2013.3

ISBN 978-7-5487-0821-6

I. 开... II. 刘... III. 矿山开采—沉陷性—地质动态模型—研究 IV. TD327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 035390 号

开采沉陷的动态过程模型研究

刘玉成 著

☐责任编辑 史海燕

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-88876770

传真:0731-88710482

☐印 装 长沙市华中印刷厂

☐开 本 720 × 1000 B5 ☐印张 10.5 ☐字数 200 千字

☐版 次 2013 年 3 月第 1 版 ☐2013 年 3 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978-7-5487-0821-6

☐定 价 35.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容简介

Introduction

本书以长壁工作面采煤引起的岩层移动和地表沉陷为主要研究对象,采用现场观测、数值模拟、理论分析、数学建模、实测验证等手段,对开采沉陷的动态过程进行了深入的研究和有益的探讨,提出了一种长壁式布置工作面开采煤层引起的地表沉陷盆地及走向和倾向主断面下沉曲线的拟合函数模型;建立了基于关键层及薄板理论的地表沉陷盆地力学模型;修正了 knothe 地表沉陷区观测点的时间序列拟合函数;建立了主断面沉陷曲线的动态模型。

本书可供开采沉陷及特殊采矿方法研究的科研人员及煤矿工程技术人员参考,也可作为高等院校采矿工程、测量工程、地质工程等专业的本科生及研究生的参考书。

前言

Foreword

“三下”采煤最主要的技术难题是开采沉陷的防治技术。目前,各种开采沉陷预计模型大多是建立在实测资料基础上的曲线拟合模型。这些模型只是描述开采沉陷现象的唯象模型而不是描述开采沉陷本质的理论模型(力学模型)。唯象模型虽然在一定的条件下可对开采沉陷表现出来的各种现象和指标进行定量的描述和预测,如概率积分法模型虽可较好地拟合或预测充分采动或非充分采动后地表沉陷的各种静态指标如下沉、水平移动、倾斜和曲率等曲线,但不能很好地描述、预测和揭示采场上覆岩层移动及地表沉陷规律。此外,煤层采场上覆岩层的变形移动及地表的沉陷过程是随地下采煤工作的进行而逐渐发展的动态过程。地表开采沉陷对地表建(构)物的损害程度不仅取决于各种指标的最终结果(静态值),还取决于各种指标的变化过程(动态值)。因此,研究开采沉陷的理论模型、动态过程规律及其模型具有重要的理论及现实意义。

本书以长壁工作面采煤引起的岩层移动和地表沉陷为主要研究对象,采用现场观测、数值模拟、理论分析、数学建模、实验验证等手段,对开采沉陷盆地的力学模型进行了研究;以开采沉陷区地表观测点下沉量的时间序列为切入点,分析探讨了可拟合观测点下沉量的时间序列函数,在此基础上研究了开采沉陷的动态过程模型。通过研究,提出了一种长壁式布置工作面开采煤层引起的地表沉陷盆地及走向和倾向主断面下沉曲线的拟合函数模型;提出了在较大深厚比(开采深度与开采厚度之比大于25)条件下,长壁式工作面开采煤层的采场上覆岩层移动形成的地表沉陷盆地形态及大小主要决定于离地表最近一层坚硬厚岩层的弯曲变形,并且地表下沉量远远小于该岩层的厚度,该岩层的变形符合弹性薄板弯曲变形的学术观点,建立了基于关键层及薄板理论的地表沉陷盆地力学模型;修正了 Knothe 地表沉陷区观测点的

时间序列拟合函数,修正后的拟合函数不仅能高精度地拟合开采沉陷区地表观测点下沉量的时间序列,而且修正的时间函数模型在数学和物理意义上完全符合地下采矿引起的地表沉陷区观测点下沉过程规律;发现地表沉陷区观测点的下沉过程在时间和空间上具有相对的独立性,将沉陷稳定后的主断面剖面函数与同一主断面地表观测点下沉的时间序列拟合函数组合的方式,建立了主断面沉陷曲线的动态模型。

本书主要是作者的博士论文及其后续的研究内容,从宏观的角度建立了地下煤层走向长壁开采引起的地表沉陷盆地模型。模型体现了一些影响开采沉陷的主要因素如煤层倾角 α 、埋深 h (关键层位置体现)、岩层物理力学性质(荷载 q 、刚度 D_n 、下层岩层的反力系数 k)、开采尺寸(参数 a_n 、 b_n 、 d),认为比唯象模型更具有理论意义,希望能为开采沉陷力学模型的进一步发展有所推动和启发。由于采场上覆岩层的复杂性,研究采场上覆岩层移动及地表沉陷的力学模型具有很大的难度,本书的研究工作及成果有很多的不完善之处,还有很多方面需要进一步研究,敬请读者批评指正。

本书的研究工作主要得到贵州省科学技术基金(黔科合J字[2012]2006)、贵州省教育厅自然科学研究基金(黔教科2010073)、毕节学院高层次人才科研启动基金等项目的资助。此外,本书的出版还得到贵州省教育厅重点支持学科(采矿工程)和毕节学院重点建设学科(采矿工程)建设经费的资助。在研究过程中,重庆大学博士生导师曹树刚教授给予了诸多指导,也得到了重庆大学资源及环境科学学院多位老师的指导。本书的出版工作还得到了毕节学院领导的关心和支持。在此一并表示衷心的感谢。

目录

Contents

第 1 章 开采沉陷动态过程模型研究意义及现状	(1)
1.1 开采沉陷动态过程模型的研究意义	(1)
1.2 地表沉陷观测研究现状	(5)
1.3 岩层移动规律研究现状	(8)
1.4 开采沉陷的数值模拟研究现状	(9)
1.5 开采沉陷的相似模型研究现状	(11)
1.6 地表沉陷观测点下沉量时间序列研究现状	(12)
1.7 开采沉陷动态过程模型研究思路及方法	(14)
第 2 章 基于观测资料的沉陷曲线拟合研究	(18)
2.1 概率积分预计模型及其评价	(18)
2.2 近水平煤层开采引起的地表沉陷盆地拟合模型	(20)
2.3 常用的主断面沉陷曲线拟合函数简介	(25)
2.4 走向主断面沉陷曲线拟合研究	(26)
2.5 倾向主断面沉陷曲线拟合研究	(30)
2.6 主断面沉陷曲线拟合函数应用实例	(35)
2.7 小结	(38)
第 3 章 基于关键层及薄板理论的沉陷盆地模型	(40)
3.1 建模的理论基础	(40)
3.1.1 关键层理论	(40)
3.1.2 薄板理论	(44)
3.2 缓倾斜煤层开采引起的沉陷盆地模型	(46)
3.2.1 建模思想及步骤	(46)

2 / 开采沉陷的动态过程模型研究

3.2.2	不考虑关键层下卧岩层反力的沉陷盆地模型	(47)
3.2.3	考虑关键层下卧岩层反力的沉陷盆地模型	(51)
3.3	倾斜煤层开采引起的地表沉陷盆地模型	(53)
3.3.1	不考虑关键层下卧岩层反力的沉陷盆地模型	(53)
3.3.2	考虑关键层下卧岩层反力的沉陷盆地模型	(57)
3.4	小结	(59)
第4章	沉陷区观测点下沉量时间序列模型	(60)
4.1	沉陷区地表观测点下沉变形特征	(60)
4.2	常用的时间序列模型分析	(62)
4.2.1	Knothe 模型	(62)
4.2.2	双曲线模型	(65)
4.2.3	Gompertz 模型	(67)
4.2.4	Logistic 模型	(70)
4.2.5	Weibull 模型	(74)
4.2.6	Knothe 分段模型	(77)
4.3	修正的 Knothe 时间函数模型	(80)
4.4	小结	(87)
第5章	煤层开采地表沉陷过程的 $FLAC^{3D}$ 模拟研究	(89)
5.1	$FLAC^{3D}$ 模拟煤层开采过程的实现方式	(89)
5.2	$FLAC^{3D}$ 模拟煤层开采研究实例	(93)
5.3	小结	(132)
第6章	沉陷盆地主断面动态沉陷曲线模型	(133)
6.1	主断面动态沉陷曲线模型的一般形式	(133)
6.2	沉陷盆地主断面动态剖面函数模型	(134)
6.3	地表沉陷的动态概率积分模型	(135)
6.4	主断面动态沉陷曲线模型验证	(136)
6.5	小结	(143)

第 7 章 主要研究成果及进一步研究的展望	(144)
7.1 主要研究成果	(144)
7.2 进一步研究的展望	(148)
参考文献	(149)

第1章 开采沉陷动态过程 模型研究意义及现状

1.1 开采沉陷动态过程模型的研究意义

矿产资源是一个国家的工业尤其是重工业发展的重要基础,它最主要的特征是具有不可再生性。随着经济和社会的发展,人们在生产和生活中对矿产资源的需求量不断增加,导致矿产的开采规模不断增加,使得资源短缺的问题越来越凸显。这种不断增加的需求量与资源量的逐渐减少之间的矛盾,迫切需要从事矿产资源开发的科研和技术人员发展先进的开采和利用技术,以便最大限度地开采和利用有限的矿产资源,尽可能地减少对有限资源的浪费。在各种矿产资源中,煤炭属于能源矿产。在今后相当长的时期内,煤炭仍然是我国最主要的能源之一。虽然我国煤炭资源储量比较丰富,但开采条件复杂多样。压覆在建筑物下、铁路下和水体下的“三下”煤炭资源占有相当大的比例。为了提高资源的采出率,科研技术人员必须研究“三下”开采的相关技术和解决这方面的相关问题。“三下”采煤的基本方法和工艺技术与非“三下”煤炭资源的开采并无较大的区别,其主要的技术难题是如何预测和防治由地下煤炭资源开采引起的地表移动对地表建筑(构)物造成的破坏。

对于“三下”资源的开采技术、地表沉陷规律及其预防控制技术的研究在东欧国家开展得比较早,从19世纪中期开始就有大量的研究成果。在我国,20世纪50年代开始在相关矿区进行了“三下”开采技术和地表沉陷方面的研究^[1-4]。但由于过去对“三下”煤炭资源的需求量不像现在这样紧迫,这方面的科学研究发展较缓慢。过去地表沉陷、岩层移动及控制的研究方法主要为在矿区地表沉陷范围内布置沉陷观测点进行现场观测。虽然现场沉陷观测法是一种最直接、最有效、最可靠的方法,但要通过现场观测获得整个矿区的地表移动和沉陷的规律,需要布置大量的观测点,这样投入的时间和精力较大,而且在某一矿区的实测研究成果以及由观测资料建立的如剖面函数、影响函数等预计公式和参数一般只适合本矿区,而对地质及开采条件相差较大的矿区其适用性较差、误差较大。因此,为了降低研究成本、缩短研究周期,从事这方面的科技工作人员试图采用一些间接的研究手段和方法。随着矿山岩石力学以及计算机技术等基础学科的不断进步,

“三下”煤炭开采技术及地表移动研究可采用相似材料模型、计算机数值分析模型和力学模型等手段进行间接的研究。

根据黑箱理论,目前开采沉陷的预计从方法大类上可分为唯象法和理论法两种。唯象法是只根据观测资料来整理地表沉陷的结果,而不考虑整个岩层内部的移动机理,其主要的特点是根据已掌握的现象去推断尚未发生的现象,主要是对沉陷规律的几何学描述。我国开采沉陷工作者建立的沉陷预计方法主要有概率积分法、负指数函数法、典型曲线法、积分格网法、威布尔分布法、样条函数法、双曲函数法、皮尔森函数法等,都是属于唯象法预计方式。其主要的特点是根据已有的实测资料拟合出地表沉陷曲线的数学模型,然后根据更广泛范围的观测进行参数的求取,比如剖面函数法、典型曲线法等就属于此类方法。这些预计方法虽然在实际使用时较方便简单,并有一定的实用价值,但因煤层的赋存状态、岩层的物理力学性质和结构、地质构造、开采方式等诸多的因素影响采空区上覆岩层和地表移动的特征。

概率积分法是因其所用的预计公式中含有概率积分而得名。该方法以随机介质理论为基础,又称随机介质理论法。随机介质理论最初由波兰学者李特威尼申于20世纪50年代引入岩层及地表移动的研究,后来我国学者刘宝琛、廖国华等发展成为概率积分法。该方法认为矿山岩体中分布着许多原生的节理、裂隙和断裂等弱面,因此可以将采空区上覆岩体看成是一种松散的介质。开采引起的采空区上覆岩层和地表的移动规律与随机介质的颗粒体模型所描述的规律在宏观上相似,认为开采引起的岩层和地表的移动过程类似于松散介质的移动过程,这种过程是服从统计规律的随机过程。从统计的观点出发,可将整个开采范围内的开采分解为无穷多个无限小的单元的开采,在单元开采的上方地表形成单元下沉盆地,单元下沉盆地的下沉曲线为正态分布的概率密度曲线。整个开采范围内的开采造成的岩体和地表的移动盆地为无穷多个单元盆地的叠加构成的总和。这个过程的叠加和计算用概率分布密度曲线的积分来完成。因概率积分法将上覆岩层视为均质颗粒介质,不涉及岩层的特性和地质构造,当工作面上方岩层存在巨厚冲积层、断层、褶曲等具体地质构造影响时,地表移动曲线不再符合概率积分法模拟的移动曲线。以概率积分法为主的经验性的预计法,这种主流的预计方法一般得出的结果只是地表充分采动或非充分采动后的地表的各種沉陷指标,而不能对地表移动的整个动态过程进行描述和预计。

虽然概率积分法是我国开采沉陷预计的主要方法,但由于其在实际应用中存在许多缺陷,地表沉陷的预计和建模还需做进一步的研究并有待发展。本章在现有的基于实测资料基础之上的开采沉陷预计函数模型研究现状的基础上,试图建立一种适合一定条件的更简便实用的沉陷预计函数模型。

除广泛采用的唯象预测方法外,许多学者试图从整个采区上覆岩层的移动和

变形的力学机理上研究和预计开采沉陷,试图将开采沉陷过程的黑箱白化。目前的研究成果主要有基于三维层状介质理论预计法和基于托板理论开采沉陷预计法等。但由于矿山岩体力学的复杂性和本身的不成熟性,用目前的岩层移动理论建立开采沉陷的预计模型困难很大。

近年来,随着矿山岩体力学及矿山压力与岩层控制技术的发展,应用相关的力学理论和研究方法进行采场上覆岩层移动和地表沉陷规律及控制技术的研究逐渐成为重要的发展趋势。近年来,矿山岩体力学和矿山压力控制理论有了很大的进步,尤其是矿山岩层控制的关键层理论的提出及进一步研究,为岩层移动及开采沉陷规律的研究提供了新的思路^[5-25]。

由于概率积分法立论于随机介质理论,将采场上覆岩层过于简化,实际上决定岩层移动和地表沉陷的因素除了煤层的开采厚度、采空区大小等外,采场上覆岩层的物理力学性质是决定采场上覆岩层移动和地表沉陷结果和规律的主因。随着对采场矿压控制及岩层移动研究的发展,20世纪90年代钱鸣高首先提出了矿山上覆岩层控制的关键层理论。该理论的核心是采场上覆岩层中的相对坚硬岩层对整个上覆岩层和地表的移动起着控制作用,并建立了关键层的判别准则。该理论提出后,相继有不少学者在此基础上对关键层的判别及在采场岩层移动和控制中的应用进行了深入研究,如翟所业^[13]弹性板理论建立了关键层的刚度条件和强度条件;缪协兴^[14-15]分析了具有厚关键层的采场覆岩的破断与冒落规律;刘开云^[24]进行了覆岩组合运动特征及关键层位置研究。

关键层理论的提出,无疑为岩层移动和地表沉陷及控制提供了新的思路和方法。许多学者就关键层对地表和岩层移动的影响及在岩层控制中的作用进行了一些研究,如许家林^[17]根据关键层理论研究了岩层移动离层演化规律及其应用;许家林^[18]和朱卫兵^[23]分别采用物理、数值模拟与地面钻孔原位观测等方法,就覆岩主关键层对地表下沉动态过程的影响进行了研究,结果证明覆岩主关键层对地表移动的动态过程起控制作用。覆岩主关键层的破断将引起地表下沉速度和地表下沉影响边界的明显增大和周期性变化。也有学者结合板壳力学中的薄板理论,对用关键层理论对地表沉陷的预计方面进行了一些探索,如李文秀^[7]基于弹性力学中的薄板弯曲理论,在岩体移动领域建立了地表下沉预测分析的层状模型,通过单元开挖给出了地下工程开挖引起岩体移动变形分析的二维和三维问题理论计算公式。郝延锦^[5]将上覆受采动影响的岩层假设成弹性薄板,应用弹性板理论建立了开采沉陷中的走向和倾向主断面预计模型以及地表全断面预计模型,但是由于将下沉的表达式认定为一个只满足薄板理论中加支板的边界条件的具体的方程,没有理论依据,而且也没有指出该下沉的表达式到底是根据哪层岩板得出的挠曲方程。

综上所述,关键层理论的提出与进一步研究,给地表沉陷预计提供了新的思

路和方法,但目前的研究成果还存在一些问题,如地表沉陷盆地的形状和大小与最主要的关键层有关还是决定于离地表最近的一层关键层,用层板理论建立地表沉陷预计模型,其挠曲线方程如何选择等。

在此理论的启示下,很多学者以该理论为基础对矿山岩层移动及地表的沉陷做了进一步的研究,取得了一定的研究成果,如有学者尝试将矿山岩层看成是弹性板,用弹性理论研究煤层开采采场上覆岩层的移动和地表沉陷,部分研究成果表明这些理论对岩层移动和地表沉陷具有一定的适应性。但这方面的研究才刚起步,还不十分完善,还没有建立符合实际的煤层采场上覆岩层移动和地表沉陷过程的数学力学模型。

采场上覆岩层移动和地表的沉陷过程是一个随着地下开采空间逐渐扩大而变化的动态过程。煤炭的地下开采过程发生在具有一定深度的地下,其开采空间及采场上覆岩层的结构和构造复杂多变,开采过程的时间漫长,而且牵扯的岩层空间广阔,因此岩层移动和地表沉陷的动态过程是一个非常大的研究课题。由于这个研究课题的复杂性,必须从多个角度采用多种方法逐渐对其进行研究。目前已有的研究成果表明,研究岩层及地表移动的动态过程最简便直接和可靠的方法为实测法^[25-26]。由于受观测手段和现场实测条件的限制,大面积的现场观测研究岩层移动及地表沉陷有很大的困难,故早在1952年波兰的Knothe教授对某些观测点从开始下沉到下沉终止过程进行了研究,提出了可描述地表点下沉动态过程的Knothe时间函数模型^[27]。后来我国的研究人员发现Knothe时间函数模型描述的运动过程在本质上与由地下采矿引起的地表移动的物理过程不完全符合,因此一些学者对地表点沉陷的动态过程做了进一步的研究,有学者在Knothe时间函数模型的基础上做了一些修正性的研究^[28-29];有些学者采用生物增长模型来描述地表点下沉的动态过程^[30-34];也有学者尝试采用其他形式的数学函数式来描述地表点沉陷的动态过程^[35];也有学者对影响地表沉陷动态过程的参数进行了专门的研究^[36-39];此外,有学者还采用流变学等方法研究了地表点沉陷的动态过程^[40-44]。但目前各种文献中关于地表点沉陷动态过程的时间函数模型并不能完全适合于描述地表沉陷的动态过程,因此有必要做进一步的研究。另外有学者也试图从矿山岩体力学理论及岩层控制技术方面对岩层和地表移动的动态过程得出一些有益的成果^[45-50],通过这种途径对岩层和地表移动的动态过程的研究尚有诸多的困难,得出的成果在现场的适用性较低。相比之下通过实测和相似实验的手段较易入手。

地表建(构)物受地表移动的影响不仅表现在地表移动稳定后的最大下沉量、最大水平变形量、最大倾斜量等指标,而且地表移动的整个发展过程对地表建(构)物的影响更重要。目前地表移动的研究成果多属于地表沉陷稳定后的成果,而地表移动的动态过程的研究较少,因此地表移动的动态过程需要做进一步的研

究。本研究试图在前人研究的基础上,结合实际的研究条件对地表下沉的 Knothe 时间函数模型进行进一步的研究和改进,使改进后的模型更符合一般情况下矿产开采引起地表移动的动态过程;再结合近年来在矿山压力控制方面提出的新理论,在一定合理假设的基础上,试图用关键层和弹性板理论建立岩层移动和地表沉陷的一种预计模型。

1.2 地表沉陷观测研究现状

科学研究人员采用多种研究手段和方法,对开采沉陷机理及其岩层与地表移动规律进行了深入的研究。研究方法和手段主要有岩层移动及地表沉陷的现场观测、相似模型模拟试验、数值模拟试验及理论分析等。据文献[1-3],在我国对于由地下煤层开采引起的岩层移动及造成地表沉陷的研究工作是建国以后才开始进行和发展的。1953年在开滦矿务局建立第1个地表移动观测站,随后在其他的一些矿区也相继建立了地表移动观测站,取得了大量矿区现场的实测资料。通过对观测资料的总结分析,得出了部分矿区的地表移动参数,掌握了部分矿区的地表移动及沉陷规律,为采动损害的预防及控制研究提供了基础性的数据。中国矿业学院和峰峰矿务局通过对沉陷观测数据的研究,提出了适合峰峰矿区沉陷盆地主断面地表移动曲线预计的典型曲线数学模型。1963年唐山煤炭科学研究所根据对实测资料的分析,建立了地表沉陷盆地主断面下沉曲线的负指数函数模型。目前,大部分矿区仍然采用在煤矿开采区域的地表建立地表移动观测站的方法开展地表移动及沉陷的研究。通过对大量观测资料的分析,取得最大下沉量、移动边界角、水平移动角等一些可描述地表移动稳定后的开采沉陷基本参数。在观测数据分析的基础上,选择合适的数学函数拟合开采沉陷盆地主断面上的下沉曲线,如典型曲线模型和剖面函数模型等。这些模型在一定程度上可预测地质及开采条件相同区域的地表移动稳定后的下沉曲线,但这些函数模型大多是基于实测基础上的数据拟合曲线,其适用性有一定的局限性。若地质及开采条件发生较大的变化,这些函数模型预测出的地表沉陷稳定后的下沉曲线较真实的下沉曲线误差较大。由大量的观测资料可知,对于由近水平及缓倾斜煤层走向长壁开采造成的地表沉陷盆地为一近似的椭圆形盆地,其中心为采空区中心,长轴为煤层的走向方向,短轴为煤层的倾斜方向。因此,对于这种情况下的地表沉陷曲线可采用椭圆函数拟合,如郝延锦^[5-6]建立了开采沉陷盆地的预计模型,在此基础上可以分别给出走向和倾斜方向的地表下沉曲线、倾斜曲线和曲率曲线。但直接用椭圆函数拟合近水平及缓倾斜煤层走向长壁开采造成的地表沉陷盆地误差较大,主要原因是地表沉陷曲线在垂直方向上不完全符合椭圆盆地的形状。因此,这方面的研究还需深入。

国外对于由地下固体矿床开采引起的地表移动及沉陷的研究也主要采用的是现场观测研究。如 Ramesh P. Singh^[51] 在分析地表沉陷观测数据的基础上,应用弹塑性理论建立了地表曲线及指标的预计模型。L. J. Donnelly^[52]、J. ToranÄo^[53]、Kalendra B^[54]、Tomam Ambromi W^[55] 在分析地表沉陷观测资料的基础上,采用人工神经网络预计地表移动及沉陷的指标。C. Carnec^[56] 用雷达技术对法国某矿区的地表移动及沉陷进行了 3 年的监测。A. Chrzanowski^[57] 用 GPS 监测了加拿大某矿区的地表移动及沉陷。M. I. A'lvarez - Ferna'ndez^[58] 在分析地表沉陷观测资料的基础上,采用影响函数法拟合了地表移动及沉陷的曲线和指标。A. K. Soni^[59] 观测研究了上覆岩层较薄的煤层开采造成的地表移动及沉陷。Rajendra Singh^[60] 采用在煤层上覆岩层的地表打观测钻孔的方式实时观测了在煤层开采过程中的上覆岩层及地表的移动情况。Srivastava AMC^[61] 和 Van der Kooij^[62] 对地表移动及沉陷的一些参数如边界角等进行了测试和探讨。Scharroo^[63] 用卫星监测了某矿区的地表移动及沉陷过程。Finnie^[64] 也采用在煤层上覆岩层的地表打观测钻孔的方式,通过电子传感器实时观测了在煤层开采过程中的上覆岩层及地表的移动情况。通过以上综述能查到的国外关于由地下固体矿床开采引起的地表移动及沉陷方面的研究文献,发现国外这方面的研究主要是借助比较先进的一些观测和测试仪器如雷达、GPS、卫星和电子传感器等对矿床开采过程中的地表移动进行观测研究,在理论研究及建模方面的研究报道较少。因此,对于由地下固体矿床开采引起的地表移动及沉陷的理论建构及模型方面的研究是今后主要的研究方向之一。

国内学者也采用地表沉陷观测、沉陷预计、数学建模及理论分析等多种方法开展了多种地质条件、多种倾角的煤层开采造成的地表沉陷研究。如刘光庆^[65] 在兴隆庄煤矿 4326 超长综合机械化放顶煤开采工作面上方的地表设立了移动观测站,获得了地表移动变形规律和有关参数,给出了煤柱上方的概率积分法预计结果的修正公式,并与普通综合机械化放顶煤开采的岩层和地表移动参数进行了对比,认为超长综放面地表最大下沉速度及滞后角均大于普通综放面,地表移动更加剧烈。吴侃^[66] 在南屯煤矿的综合机械化放顶煤开采煤层的上覆岩层中布置了岩层移动变形监测钻孔,采用钻孔测斜仪和钻孔伸长仪组成的三维测量系统对上覆岩层的变形和移动规律进行了全过程的监测,得出综采放顶煤开采煤层的上覆岩层及地表的移动活跃期很短,具有突变性,地表土体内部存在短暂的离层现象,在特殊岩层面有明显的相对滑移。贺平^[67] 采用双曲线函数对某矿煤层上覆岩层中具有较厚松散冲积层情况下的煤层开采造成的地表移动和沉陷进行了预计,预计的结果与实测数据的对比发现,在预计参数选取比较准确的情况下,双曲线预计模型可解决常用的概率积分法预计模型在预计上覆岩层中具有厚松散层煤层开采造成的地表沉陷时出现沉陷盆地边缘偏差较大的问题。余华中^[68] 根据

鹤壁矿区放顶煤方法开采条件下的地表移动观测资料,分析了地表移动参数的特点,给出了地表移动参数与地质采矿条件之间的函数关系。谢广祥^[69]用计算机数值模拟和室内相似材料模型试验,对谢桥煤矿13号煤层在综合机械化放顶煤开采时上覆岩层及地表的移动进行了研究,深入分析了不同推进速度下综放面围岩应力、位移、破坏情况,得出随着工作面推进速度增加,工作面低应力区和周围煤岩体破坏区的范围以及位移都相应减小,而前方支撑压力峰值位置向工作面煤壁靠近,峰值应力增大,说明适当加快采煤工作面的推进速度,有利于保持巷道的稳定性和改善巷道支护结构的工作状态。余华中^[70]基于对厚松散层土体一般岩层在物理力学性质上存在明显差异的考虑,根据岩层移动的分层传递特点,建立用于预计具有厚松散层上覆岩层的煤层开采造成的地表移动的修正的概率积分法预计模型。高明中^[71]采用相似模型试验和计算机数值模拟,总结出了新集三矿急倾斜煤层多煤层具有后冲积层的上覆岩层在重复采动情况下的移动规律和地表沉陷的相关参数。曹树刚^[72]研究了南方薄覆松散盖层山区地下近水平煤层开采引起的地表移动规律。刘成^[73]为了判别在河北省范各庄煤矿沉陷区内建立尾矿库安全问题,将建立尾矿库前的沉陷变形及未来开采引起的变形进行了评估与预测。剧成宇^[74]通过沉陷观测研究了多个矿区停采后地表下沉和下沉速度的变化规律,并结合采空区上覆岩体变形规律,分析了停采后地表下沉速度变化的机理,分别建立不同阶段下沉量的预计模型,对工作面停采后下沉速度和下沉值进行预计,为老采空区残余移动变形的预测提供了基础。聂卫平^[75]利用光弹试验对条带开采方案进行分析,并对开采后引起地表移动与变形程度进行预计。李德海^[76-77]采用连续介质力学理论探讨条带开采的合理条带煤柱尺寸,利用弹性理论的复变函数模型推导出条带煤柱屈服区的宽度。王东攀^[78]采用室内实验、现场实测和理论分析等研究方法,研究了永夏矿区厚松散含水地层内部非采动沉陷原因,揭示了厚松散含水层地区开采沉陷的特殊性机理。彭苏萍^[79]利用岩层弯曲下沉带内的一条巷道,通过设点观测下沉值、量测巷道两帮及顶底移近量,结合采面推进速度及矿压观测资料研究了岩层弯曲下沉带内部巷道的变形和岩层移动规律。陈则连^[80]分析地下采矿引起的地表变形对某一铁路工程稳定性的影响。黄平路^[81]以典型复杂地质矿山程潮铁矿东区为例,以多年地表变形监测结果为依据,对在其特殊地质条件下地表变形和岩层移动的机制进行了分析研究。采用现场观测的方法研究地下采矿引起的地表沉陷是一种直接的研究方法,得出的结果直观可靠。上述的文献综述表明,这方面的研究面很广。黄庆享^[82]对浅埋煤层条件下地表厚砂土层地区地下采煤引起的地表沉陷进行了研究。尹光志^[83]对大倾角煤层开采引起的上覆岩层及地表移动的基本规律进行了研究。也有学者对非煤矿床开采引起的地表沉陷进行了研究,从煤层的赋存条件和地表条件来看,众多的学者针对不同的条件开展了地下采矿引起的地表沉陷的研究,既

有大采深也有浅埋煤层开采引起的地表沉陷研究,既有地表厚松散覆盖层也有地表薄覆盖层条件下地下煤层开采引起的地表沉陷研究,既有近水平煤层也有大倾角煤层开采引起的地表沉陷的研究,既有平原地区也有山区地下煤层开采引起的地表沉陷的研究,既有煤层开采也有非煤矿床开采引起的地表沉陷的研究。观测研究主要得出地下采矿引起地表移动的一些规律,测得描述地表沉陷的参数,也有少数学者通过观测数据的分析建立了一些沉陷指标的预测模型。地表沉陷观测虽然是一种很直观和可靠的研究方法,但进行大面积的沉陷观测所费的人力和物力巨大,而且得出的观测结果只能分析和描述本观测区域内的地表沉陷规律,对条件变化较大的地区不一定有用。因此,在观测基础上的理论分析、数学建模和数值模拟研究是开采沉陷学未来研究的主要方向。

1.3 岩层移动规律研究现状

国内很多学者从理论分析及数学建模方面研究了长壁工作面全部垮落法管理顶板方式开采煤层的上覆岩层及地表的移动规律。根据一定的实测资料以及理论分析,有学者依据岩层的受力变形特点,认为煤层顶板上覆岩层的移动可形成四个分带^[45],即从采煤工作面到地表依次为破碎垮落带、离层裂隙带、弯曲下沉带和地表松散沉积带。李新强^[50]在煤层上覆岩层的移动可形成“四带”学说的基础上,认为采煤工作面的推进速度、上覆岩体中的结构演变、岩体流变变形和垮落矸石的压缩变形四大要素控制着采场上覆岩层的运动状态及表现形式。王悦汉^[46]在分析了煤层顶板岩梁从未跨落到跨落再到充满采空区3个变化过程周期性更替的基础上,利用材料力学中的梁理论建立了岩体移动的动态模型。张向东^[47]采用流变力学和梁板组合运动理论,研究了上覆岩层运动过程中离层发展的时空过程,推导出了控制岩层弯曲变形及离层裂缝宽度的计算公式。梁运培^[48]提出了采场上覆岩层移动的组合岩梁模型。自从钱鸣高^[12]提出岩层控制的关键层理论以来,近年来采用关键层理论研究岩层的移动取得了一些突出的成就,缪协兴^[14-15]在关键层理论的基础上,分析了具有厚关键层的采场上覆岩层破断与冒落规律。许家林^[16-18]采用实验、实测及数值模拟方法研究了关键层对采场上覆岩层及地表移动的控制作用和关键层破断块度对地表位移曲线形态的影响,提出了“砌体梁”结构位移曲线的拟合方程。赵晓东^[8]从弹性力学基本方程出发,建立了岩层移动的复合层板模型。刘开云^[24]把煤矿上覆岩层的组合运动视为以坚硬岩层为依托的复合关键层的运动,运用弹性薄板理论和复合材料力学的层合板理论讨论了复合关键层中的应力。此外,有学者尝试采用弹性力学中的薄板理论研究采场上覆岩层运动,贾喜荣^[9]把断裂前的基本顶岩层视为弹性薄板结构,其断裂后视为铰接板结构,根据不同支撑边界条件建立相应的力学模型,