

渭北煤矿区采煤沉陷 灾变预警研究

孙学阳 著



科学出版社

国家自然科学基金项目(41272388) 共同资助
西安科技大学科技创新团队项目

渭北煤矿区采煤沉陷 灾变预警研究

孙学阳 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书依据构造环境特征,系统分析地表生态环境所能承受的最大损害程度与地下开采强度之间的关系,通过预报临界开采强度建立采煤沉陷灾变的预警模型。采煤沉陷灾变涉及因地下开采使地表建(构)筑物产生破坏,或者使导水裂隙带影响到具有区域供水意义的含水层造成地下水流失两种类型。采煤沉陷灾变预警模型的建立,实现了变“损害后治理”为“损害前防范”的“绿色矿区”建设理念,可为保护煤矿区生态环境提供理论和技术支撑。

本书可供矿产资源开采与生态环境保护领域从事生产、科研工作的技术人员阅读参考,也可以作为高等院校地质、采矿、环境、安全等学科专业的高年级本科生和研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

渭北煤矿区采煤沉陷灾变预警研究/孙学阳著. —北京:科学出版社,2016.12
ISBN 978-7-03-051459-2

I. ①渭… II. ①孙… III. ①煤矿开采-岩石沉陷-预警系统-研究-陕西
IV. TD327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 319302 号

责任编辑:元列梅 王 苏 / 责任校对:郑金红

责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2017年1月第一次印刷 印张:9 3/4

字数:150 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

煤炭在我国能源结构上占有的主体地位,在未来 10 年内不会发生根本性改变。由于煤炭资源的开发而诱发的采煤沉陷,已经成为煤矿区生态环境恶化的主要人为灾害之一。采煤沉陷对生态环境的影响从可以接受到形成灾害是一个突变的过程。采煤沉陷造成的地表建(构)筑物破坏和具有区域供水意义的地下水资源流失,是渭北煤矿区最主要的两种采煤沉陷灾变类型。研究特定地质条件下的采煤沉陷特征,控制采煤沉陷灾变的发生,是保护矿区生态环境的有效途径。

因煤矿区构造环境不同,一些煤矿区实施较强的开采强度不会引起采煤沉陷灾变,而一些煤矿区实施较小的开采强度却可能引发采煤沉陷灾害。因此,煤矿区构造环境决定了地质环境抵抗采煤沉陷扰动的能力。本书以不同煤矿区构造环境的差异性为切入点,分析构造环境的特殊性及其对采煤沉陷灾变的影响。在充分考虑开采因素的基础上,采用现场调研、相似材料模拟、数值模拟试验、力学分析等手段,系统研究构造介质、构造形态、构造界面和构造应力等构造环境要素与采煤沉陷的量化关系。

本书根据渭北煤矿区地层和构造特征,制定构造环境分类的依据。以铜川矿区为例,将构造环境划分为深埋似连续介质型、深埋不连续介质型和浅埋不连续介质型三种类型,并研究不同类型构造环境下采煤沉陷的发生、发展规律及其灾变机理。依据构造环境特征,研究地表生态环境所能承受的最大损害程度与地下开采强度之间的关系,通过预报临界开采强度建立采煤沉陷灾变的预警模型。如果工作面长度大于临界开采强度,则会引发采煤沉陷灾变,进而实现对研究区采煤沉陷灾变的预警,据此实现变“损害后治理”为“损害前防范”的“绿色矿区”建设理念,为保护煤矿区生态环境提供理论和技术支撑。

本书的研究成果可为煤炭资源合理开发与生态环境保护协调发展提供科学基础和技术手段,对实现煤矿区安全高效生产具有一定的参考价值。此外,本书能进一步丰富采煤沉陷学和“绿色矿区”建设理论。

本书是在国家自然科学基金项目“基于构造控灾机理的采煤沉陷灾害预计基础研究”(41272388)、西安科技大学科技创新团队项目研究成果的基础上撰写而成,是作者近年来从事煤矿区构造控灾理论研究的最新成果总结。西安科技大学的夏玉成教授对课题的研究给予了指导,侯恩科、余学义、柴敬、王生全等教授和杜荣军、王传涛、冯帆等博士研究生对课题的研究给予了帮助,硕士研究生李旭、付恒心、安孝会、刘自强等也参与了部分研究工作,在此一并表示感谢!

限于作者水平,书中难免有不当之处,真诚欢迎同行专家和广大读者批评指正。

孙学阳

2016年10月

于西安科技大学

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 问题的提出与研究意义	1
1.1.1 研究背景	1
1.1.2 研究意义	3
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 采煤沉陷规律的研究	4
1.2.2 采煤沉陷机理的研究	5
1.2.3 采煤沉陷预计的研究	7
1.2.4 采煤沉陷灾变预警的研究	10
2 采煤沉陷灾变与构造环境的关系	12
2.1 采煤沉陷灾变	12
2.2 构造环境	13
2.3 构造环境对采煤沉陷灾变的控制作用和控制机理	15
2.3.1 构造介质对采煤沉陷的控制	15
2.3.2 构造形态对采煤沉陷的控制	18
2.3.3 构造界面对采煤沉陷的控制	24
2.3.4 构造应力对采煤沉陷的控制	27
2.4 本章小结	29
3 构造环境要素对采煤沉陷的影响度分析	31
3.1 构造介质对采煤沉陷的影响度	32
3.2 构造形态对采煤沉陷的影响度	37
3.3 构造界面对采煤沉陷的影响度	42
3.4 构造应力对采煤沉陷的影响度	46
3.4.1 构造应力型采煤沉陷数值模拟	46

3.4.2 构造应力型采煤沉陷相似材料模拟	48
3.5 影响采煤沉陷灾变的主要构造因素	54
3.6 本章小结	59
4 铜川矿区构造环境类型及其与采煤沉陷灾变的关系	60
4.1 煤矿区构造环境划分依据	60
4.2 铜川矿区地质概况及煤层赋存条件	68
4.2.1 地层与煤层	68
4.2.2 水文地质特征	70
4.2.3 构造特征	70
4.3 铜川矿区构造环境主要类型	71
4.4 深埋似连续介质型构造环境与采煤沉陷之间的量化关系	72
4.4.1 数值试验模型的建立	73
4.4.2 深埋似连续介质型构造环境对采煤沉陷的影响	77
4.4.3 深埋似连续介质型构造环境对采煤沉陷影响的机理分析	79
4.4.4 深埋似连续介质型构造环境与采煤沉陷量化关系的确定	81
4.5 深埋不连续介质型构造环境与采煤沉陷灾变之间的量化关系	83
4.5.1 数值试验模型的建立	83
4.5.2 深埋不连续介质型构造环境对采煤沉陷的影响	87
4.5.3 深埋不连续介质型构造环境对采煤沉陷影响的机理分析	93
4.5.4 深埋不连续介质型构造环境与采煤沉陷量化关系的确定	98
4.6 本章小结	101
5 采煤沉陷灾变辨识与预警	103
5.1 采煤沉陷的灾变点	103
5.1.1 采煤沉陷Ⅰ类灾变点	103
5.1.2 采煤沉陷Ⅱ类灾变点	104
5.2 采煤沉陷Ⅰ类灾变的辨识与预警	105
5.3 采煤沉陷Ⅱ类灾变的辨识与预警	107
5.3.1 关键层的极限破断距分析	108
5.3.2 软岩受力弯曲的水平变形分析	112
5.3.3 岩层下部自由空间计算	114

5.3.4 岩层破断与其下部自由空间高度的关系	115
5.3.5 采煤沉陷Ⅱ类灾变辨识与预警的实现	116
5.4 本章小结	116
6 应用实例	118
6.1 铜川矿区采煤沉陷Ⅰ类灾变预警	118
6.1.1 铜川矿区王石凹井田地质概况	119
6.1.2 铜川矿区王石凹井田构造环境特征	120
6.1.3 铜川矿区王石凹井田采煤沉陷特征	121
6.1.4 采煤沉陷Ⅰ类灾变预警	122
6.2 铜川矿区采煤沉陷Ⅱ类灾变预警	123
6.2.1 铜川矿区主要含水层和隔水层的赋存规律	123
6.2.2 铜川矿区徐家沟井田地质与采矿条件	126
6.2.3 铜川矿区采煤沉陷Ⅱ类灾变预警	128
6.2.4 防止采煤沉陷Ⅱ类灾变出现的措施	131
6.3 本章小结	135
7 结论	136
参考文献	140

1 绪 论

1.1 问题的提出与研究意义

1.1.1 研究背景

改革开放以来,我国能源事业取得了巨大成就。1979~2015年,我国能源消费年均增长约5.4%,而同期GDP年均增长达到9.7%,基本实现了能源消费翻一番,支撑经济总量翻两番的目标(周英峰等,2008)。我国是煤炭生产和消费大国,煤炭产量多年来稳居世界第一,2000年为9.8亿t,2004年猛增至19.6亿t,2007年为25.2亿t,2008年已经达到27.16亿t,2009年达到30.5亿t(王丹识,2010),2015年高达36.8亿t。

由于煤炭开采规模巨大,且绝大部分煤矿开采埋藏在人类生产、生活区之下的煤炭资源,所以由井工开采诱发的煤矿区地面沉陷、断陷、开裂(以下统称采煤沉陷)已成为煤矿区土地资源破坏和生态环境恶化的主要人为灾害之一(Wang et al., 2004)。按 $3\text{hm}^2/\text{万 t}$ (一般为 $2.80\sim 6.75\text{hm}^2/\text{万 t}$)的采煤塌陷率估算,仅2009年就有超过91.5万 hm^2 (约合1370万亩^①)土地遭到破坏。以“全国第一产煤大县”神木县为例,煤炭开采形成的采煤塌陷区面积约 30km^2 ,受灾人口3600多人,20多个井泉干枯,数十条河流断流,植被枯死、地表荒漠化加剧,致使当地许多居民陷入“无地、无水、无房”的生活困境。仅2004年1~9月,神东矿区群众因“三无”问题上访22批,其中大型上访9批,800多人次,进京2批,赴省2批;陕西铜川矿区已经形成了 70.69km^2 的采空沉陷区,全区有3.5万户、12万群众居住在沉陷滑塌危险地带,其中1.05万户、4.41万人急需搬迁。目前,国家正在对铜川市矿区采煤沉陷区进行治理,工程总投资约8.4亿元;山西省因采煤造成的地下采空区面积约为

^① 1亩=666.67m²。

10000km²,有近 5000km² 地面沉陷,受灾人口超过 230 万(弓凤飞,2008)。仅大同矿区的塌陷面积就高达 403km²,受损失的居民有 5 万多户,受损房屋 316 万 m²,受损失的企事业单位及商业网点 46 个、学校 97 所、医院 13 所、公路 45 条、铁路线 4 条、供水管道 132km、供热管路 15km、供电线路 50km、通信线路 109 处,由于塌陷所造成的直接经济损失高达 37 亿元(李连济,2004)。近年来,山西省每年生产原煤约 6 亿 t,大约会有 3000 亿元的收益,但它带给生态和资源长期的隐性和显性损耗近 1000 亿元(宋春霞,2012)。

多年来,我国煤炭占一次能源生产总量的比例一直居高不下,一般维持在 70%左右,比世界平均水平高出 43 个百分点(滕晓萌,2007)。我国经济建设的发展离不开煤炭,煤炭在国民经济发展和人民生活的重要作用 and 重要地位,在今后的几十年内不会发生根本性的变化。显然,不可能为了保护环境而停止煤炭开采活动。此外,农民失房、失水、失地的严峻现实,党和国家以人为本、关注民生、建设生态文明、和谐社会的治国理念,要求我们在获取资源的同时,必须走“生态矿业”发展之路(古德生,2001),广泛采用“煤矿绿色开采技术”,实施“科学采矿”(钱鸣高,2010;缪协兴等,2009),建设“绿色矿区”(夏玉成等,2002)。

“绿色矿区”建设的基本思路是“给定损害,限制开采”(孙学阳等,2008;Xia et al.,2005;夏玉成,2003)。煤炭资源的井工开采引起了煤矿区地质环境的恶化,但不能由此得出“只要开采煤炭就必然破坏环境”的推论。众所周知,地下采矿活动必然对煤矿区地质环境产生扰动,但煤矿区地质环境灾变一般出现在地下采空区达到一定规模之后,这说明煤矿区地质环境本身具有一定的抗扰动能力。此外,在不同的煤矿区,同样强度的地下采矿活动所造成的力学效应(地表环境损害或致灾程度)是有明显差异的。有些煤矿区可以承受较大的开采强度,而在另一些煤矿区,同样强度的地下开采,就会导致严重的地表损害甚至地质灾害。这说明在不同的煤矿区,地质环境本身固有的抗扰动能力是不同的。所谓“给定损害”,是指在开采之前比较准确地预计煤矿区生态环境可以承受的损害程度极限;所谓“限制开采”,就是把开采强度限制在煤矿区生态环境可以承受的范围之内,不至于出现采煤沉陷灾

害(指造成失房、失水、失地等使地表生态环境产生灾难性破坏后果的采煤沉陷事件)。因此,提高采煤沉陷的预计精度是防范矿区生态环境灾害、建设“绿色矿区”的前提。但是,目前对不同地质条件下采煤沉陷的致灾机理及其判据有待于进一步研究,在预计采煤沉陷时,普遍采用由《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(以下简称“三下”采煤规程)推荐的预计公式,该公式只考虑开采厚度、煤层倾角和上覆岩层硬度(分坚硬、中硬、软弱三类),基本忽略了其他地质因素,预计结果往往和实际情况有较大的差距。

夏玉成等(2008a)深入系统地分析和总结了构造介质、构造形态、构造界面、构造应力等地质因素对煤矿区地表环境灾害的控制作用,认为在不同的地质条件下,同样强度的地下采矿活动所引起的采煤沉陷有明显的差异;与地下开采有关的煤矿区地表环境灾变(采煤沉陷),虽然源于采动,主要与开采厚度和开采工艺密切相关,但在同样的开采条件下,采煤沉陷的差异性受控于该区域构造环境的内在结构和动态因素,并将上述研究结论概括为“构造控灾”(孙学阳等,2008)。

本书以“构造控灾”研究为基础,以不同煤矿区构造环境的差异性为切入点,以研究采煤沉陷与地质因素的量化关系及其致灾机理为路径,以提高采煤沉陷预计精度和有效预防采煤沉陷灾害为目标。据此,以陕西省铜川矿区为重点剖析对象,在依据其地层、构造特征对煤矿区进行构造环境分类的基础上,揭示特定构造环境中采煤沉陷发生、发展规律及其灾变机理,建立具有较高可靠性的采煤沉陷量化预计模型和采煤沉陷灾变辨识模型,为铜川矿区有效预防和控制采煤沉陷灾变提供新的思路和地质依据。

1.1.2 研究意义

深入揭示煤矿区构造环境对采煤沉陷灾变的控制因素及其控制机理,构建采煤沉陷灾变与煤矿区构造环境要素之间的量化关系,可以拓宽构造地质学的应用领域,进一步丰富和完善开采沉陷学理论。

通过对煤矿区构造环境的分类,构建采煤沉陷量化预计和灾变辨识模型,进而对煤矿区采煤沉陷灾变进行科学预警,将地下开采强度控

制在该煤矿区地质环境可承受的范围内,变“损害后治理”为“损害前防范”,是建设“绿色矿区”的必由之路,对保护煤矿区的生态环境、促进煤矿区的社会和谐、环境友好和经济可持续发展具有重要的现实意义。研究成果不仅对铜川矿区的生态环境保护具有重要的指导作用,对我国其他矿区的环境保护,特别是对陕西省大型煤矿区的可持续发展也将具有一定的借鉴价值和推广应用前景。

1.2 国内外研究现状

煤矿区集煤炭资源开采、利用与土地资源占用和破坏为一体,是资源与环境、灾害矛盾显现相对集中的区域之一。2004年以来,随着我国煤炭产量的快速增加,采煤沉陷灾变更加突出,日益成为政府关注的重点和社会关注的热点问题。保护煤矿区生态环境是生态文明建设的必然要求,有效控制采煤沉陷是保护煤矿区生态环境的关键环节。目前,国内外对采煤沉陷问题的研究主要集中在以下四个方面。

1.2.1 采煤沉陷规律的研究

人类对采煤沉陷的研究由来已久。最初,人们多从对观测资料的分析入手提出各种假设,如 Gonot 在 1858 年提出的法线理论;Jicinsky 在 1876 年提出的二等分线理论;耳西哈在 1882 年提出的自然斜面理论等。1885 年,Fayol 开始利用模型进行研究,提出了开采沉陷的拱形理论,同期,Hausse 首次建立了采空区上方有三带分布的沉陷模式,为以后的理论研究奠定了基础,其许多研究方法至今仍被沿用。

20 世纪 50 年代后,人们着重从连续介质理论和非连续介质理论两个方面来研究开采沉陷问题(中国矿业学院等,1981;煤炭科学研究院北京开采研究所,1981)。连续介质模型有弹性介质模型和塑性介质模型等,如海尔鲍姆的悬臂梁模型、艾卡特的两端固定梁理论以及萨武斯托维奇的弹性基础梁理论等;按非连续介质理论开展工作的有波兰学者 Litwiniszyn 提出的随机介质理论(Litwiniszyn,1958)、姆列尔提出的松散介质理论以及何国清的碎块体理论等。

20 世纪中后期,随着试验手段和计算机技术的不断发展,各种相似模型试验和解析、半解析计算方法在采煤沉陷的研究中被广泛应用,从而极大地丰富和发展了采煤沉陷理论(方从启等,1999;郭惟嘉等,1996;吴戈,1994;Knothe,1994;余学义,1993;孙钧等,1991;袁礼明等,1990;Bourdeau et al.,1989;Jan,1989)。

在我国,随着“三下”开采(水体下特殊开采、建筑物下特殊开采和铁路下特殊开采)事业的发展,采煤沉陷规律的研究取得了长足的进展。在煤矿开采中,建立了以概率积分法、负指数函数法和典型曲线法为基础的地表变形预计方法体系。

黄乐亭等(2008)通过分析相似材料模拟试验结果和实测资料,将地表动态沉陷盆地发展变化的全过程划分为下沉发展、下沉充分和下沉衰减三个阶段,并用负指数函数分别表示出三个阶段走向主断面上的地表下沉规律。这与开采沉陷学中将采煤沉陷划分为初动期、活跃期、衰退期三个阶段是基本一致的。但在高产高效矿井,普遍采用综采放顶煤技术、全部垮落法管理顶板,煤炭开采对上覆岩土层的扰动强度比过去强烈得多,因而,采煤沉陷的三个阶段也会表现出一定程度的变异。滕永海等(2008)对综采放顶煤条件下的地表沉陷规律进行了研究,表明在综采放顶煤条件下,地表移动剧烈,地表下沉盆地陡峭,移动变形集中,地表断裂比较发育,地表下沉系数、主要影响角正切明显偏大,导水断裂带异常发育,其高度与煤层开采厚度近似成正比。

开采沉陷地表岩移观测和相似材料模拟试验表明,采煤沉陷的发生、发展是非线性的,地表下沉曲线从平变斜(从稳定不动到开始移动)、从斜变陡(由缓慢下沉到快速沉降),至少有两个拐点,分别对应着采煤沉陷发生与进一步恶化的灾变点,有可能引起房屋、耕地或地下水资源破坏。但目前,对采煤沉陷的非线性规律尤其是灾变点与构造环境之间的关系尚不清楚。揭示采煤沉陷灾变与其特定构造环境的关系是建立采煤沉陷灾变预警系统、预防采煤沉陷灾害必须首先解决的关键科学问题之一,有待深入研究。

1.2.2 采煤沉陷机理的研究

采煤沉陷既与开采因素有关,也受地质因素影响,这已成为大家的

共识。采矿学科和矿山测量学科的学者和工程技术人员,对采煤沉陷与其影响因素的关系进行了大量的深入研究,取得了许多较为成熟的理论与应用成果。人们关注最多的地质因素是煤层覆岩力学性质(Donnelly et al., 2001; Begley et al., 1996; Singh et al., 1996; Pimenov, 1991)。大家普遍认为,煤层覆岩中的厚硬岩层对地表沉陷具有托板式的控制作用(吴立新等, 1994),因而是影响采煤沉陷特征的关键层。关键层的变形、破裂将在采场覆岩中引起大范围的岩层活动。这种活动下可影响至采场和支架,上可影响到地表(钱鸣高等, 2003)。由于关键层的作用,当工作面推进到一定长度之前,开采引起的地表沉陷是很小的,以致可以忽略不计;明显的地表沉陷是在覆岩中的坚硬岩层破断后才突然出现的(Rao, 1996);主关键层的破断不仅引起地表下沉速度的明显增大,还导致地表移动影响边界的明显变化,一旦主关键层破断,地表移动影响边界明显向外扩大(许家林等, 2005)。

关于其他地质因素与采煤沉陷的关系,也有一些专题研究。例如,戴华阳等(2006)把煤层倾角作为采煤沉陷预计模型的变量,构建了从近水平到急倾斜煤层开采中岩层与地表移动的统一化预计模型。长期以来,国内外许多学者已经注意到断裂对采煤沉陷的影响,发现断层的存在使采煤沉陷具有独特的性质,并已经逐步进行了卓有成效的研究(赵海军等, 2008; 张玉卓等, 1983)。冯国财等(2006)针对断裂活动影响矿区的采煤沉陷灾变问题,指出在受断裂活动影响的矿区,构造应力开挖卸载使地表产生附加水平移动变形,采煤沉陷灾变加剧。邓喀中通过现场调研和理论分析发现断层露头处地表产生台阶状裂缝、断层处地表变形增大、断层使地表移动范围增大或缩小,并且给出了断层露头处地表台阶产生的判断条件和预计台阶大小的计算公式。Chamine等(1993)、Kirzhner(1994)、Kang(1997)、Doglioni等(1998)、郭文兵等(2002)、郭迅等(2006)的研究发现,有断层存在时,地表移动范围比正常情况下扩大,断层露头处的地表移动和变形值大大超过正常值,并出现非连续破坏形态,地表裂缝发育经历时间较短,地表移动和变形程度剧烈;谢和平等(1998)通过相似材料模拟,得出了节理使覆岩破坏更加剧烈,使覆岩破坏范围增大,对采动岩体裂隙的开裂、扩展及分布起着

主控作用的结论;随后,于广明等(2002)将损伤力学及分形几何等现代非线性科学应用于采煤沉陷学科领域,就节理对岩体采动沉陷规律的影响进行了更加深入的理论研究和试验研究。构造应力对煤矿区岩层移动的影响,近年来逐渐得到煤矿研究人员的注意。隋惠权等(2002)认为,拉张构造应力是下沉盆地范围增大、地面破坏程度加剧、地表产生不连续变形和破坏的主要原因;方建勤等(2004)分析了构造应力型开采地表沉陷宏观破坏特征,指出现有的自重应力型地表沉陷规律的理论方法不适用于构造应力型地表沉陷规律的研究。夏玉成等(2003, 2004b, 2006, 2008b)针对在不同的构造环境下,同样强度的地下采矿活动所引起的采煤沉陷有明显差异这一事实,从地质角度系统分析和论证了煤层上覆岩土体的综合硬度、松散层比例和关键层位置,煤层倾角及褶曲翼间角,节理和断层发育特征,构造应力状态以及地下水等地质因素对采煤沉陷的控制作用和控制机理,依据地质工程理论中的构造控制论提出构造控灾的观点,丰富了采煤沉陷机理研究(夏玉成等, 2008a)。

总体来看,各种地质因素对采煤沉陷的控制作用已经逐步被人们认识。然而,对采煤沉陷机理的量化表达,即各种地质因素与采煤沉陷之间的量化关系的研究尚未取得突破,这将成为本书重点研究、解决的问题之一。

1.2.3 采煤沉陷预计的研究

采煤沉陷预计是采矿界研究的热点问题之一(Ding et al., 2006; Luo et al., 1999)。19世纪末,由于生产实践的需要,采煤沉陷预计的研究也逐渐深入,其中,有代表性的有Dumont、Schmitz、Keinhost和Baxs等提出的地表下沉预计方法。

近年来,有人尝试应用非线性科学理论和方法,如灰色系统理论、分形理论(张东明等, 2003; 谢和平等, 1998; 于广明等, 1997a, 1997b, 1998a, 1998b, 2001; Takayuki, 1989; Turcotte, 1986; Mandelbrot, 1982)、人工神经网络预测模型(Kim et al., 2008; 郭文兵等, 2004, 2005, 2007; 尹光志等, 2003, 2008; 曹丽文等, 2002; 丁德馨等, 2002a,

2002b;董春胜等,2001;麻凤海等,2001;王卫华等,2001;Singh et al., 1996;Petre et al.,1993)、突变理论(尹光志等,2005)等,对采煤沉陷进行预计。虽然非线性科学理论和方法在处理多因素的复杂非线性问题时,对数据有较高的拟合能力及预测精度,可以克服在不充分或极不充分采动条件下用概率积分法预计开采沉陷时,系统偏差影响预测精度的问题。但是,这些理论和方法的应用,必须以相同地质、采矿条件下有比较多的岩移实测数据,足以构成训练样本为前提。而实际情况往往难以满足这一要求,许多煤矿只有一两个工作面的岩移实测数据,甚至完全没有进行过岩移观测。此外,由于不同煤矿区地质条件的巨大差异,这类预计模型不宜直接用于其他煤矿,因而其推广应用受到客观条件的限制。

综合起来,现行的开采沉陷的预测方法主要有以下几种。①经验公式法。在对地表移动观测资料进行分析的基础上建立经验公式,然后把这些经验公式应用到类似地质开采条件的采煤沉陷地区。典型的经验公式有:俄罗斯应用的负指数函数法,英国煤田法,波兰学者Kowalczyk在1972年提出的积分格网法;中国学者何国清提出的威布尔分布和吴戈提出的 Γ 分布以及各矿区通过观测进行拟合的典型剖面曲线法等。②剖面函数法(Rafeal et al.,2000;Kulakov,1995)。利用公式或数表来预测下沉盆地指定断面的地表移动与变形值,如负指数函数法、双曲线函数法、典型曲线法等。③影响函数法。其为预计采动地表移动变形的一种有效方法,它的理论基础是分布函数,典型的影响函数有Bals函数、Perz函数、Beyer函数、Sann函数、Knothe函数。④解析模型法。当认为采煤沉陷问题可以利用某种数理定律解决时,则可以建立开采沉陷数理模型。该方法是建立在力学模型上,通过弹性或塑性理论基础进行的计算,如King和Whetton提出的岩体移动弹性分析法、Berry提出的各向同性岩层的二维分析法、Berry和Sales提出的横观各向同性岩层弹性分析法、Marshall等提出的黏-弹性分析法、Cherry提出的岩层移动塑性分析法、李增琪提出的使用傅里叶积分变换计算方法、以Salstowicz为代表的固体力学理论和以Litwiniszzy为代表的随机介质理论等(Liu,1993)。余学义以概率积分法和Knothe理

论为基础,应用极坐标闭合回路积分法,建立了采煤沉陷预计的数学模型,该模型是以影响函数为基础的概率积分方法,以几何积分理论为基础,由傅里叶二维积分变换法引入岩性及下沉时间影响参数(半力学、半经验参数),建立极坐标闭合积分数学模型,可对任意形状采空区域的采煤沉陷进行预计计算。建立在弹性或塑性理论基础上的计算方法有有限单元法、边界元法、离散元法、分形力学法、非线性力学法等,如张玉卓的模糊有限元法、谢和平的损伤非线性大变形有限元法、何满潮的非线性光滑有限元法、邓喀中的损伤有限元法、王泳嘉将离散单元法和边界元法相结合应用于开采沉陷预计中。这些数值方法为开采沉陷的预计计算拟合和定量预测奠定了基础。

在我国,开采影响下的地表移动规律的研究最先在煤矿开采研究中取得进展,建立了以概率积分法、负指数函数法、典型曲线法为基础的地表预计方法体系,以及适合我国实际情况的积分格网法、威布尔分布法、样条函数法、双曲线函数法、皮尔森函数法、山区地表移动变形预计法、三维层状介质理论预计法和基于托板理论的条带开采预计法等。其中以概率积分法,特别是随机介质理论概率积分法的应用最为广泛,极大地推动了“三下开采”事业的发展。

目前,在我国采煤沉陷预计中,普遍采用由“三下”开采采煤规程推荐的预计公式。但这套公式对影响采煤沉陷的地质因素考虑不够,以致预计结果往往和实际情况有较大差距;如果说这套公式对预计正常开采情况下的地表移动变形还比较有效,则对于开采强度非常大的综采放顶煤开采、深部大采宽条带开采或极不充分采动等特殊开采方式而言,其采煤沉陷预计结果与实际情况的差异将会大到失去预计的意义。针对这些问题,国内学者进行了多方面的研究和改进。吴侃等(2008)对断层影响下的开采沉陷预计问题进行了研究,将开采引起断层的离层空间看成一个等效倾斜采空区,分别计算实际采空区和等效采空区对地表的影响,然后将两者叠加起来,建立了基于概率积分法的地表变形预计模型;郭文兵(2008)针对深部大采宽条带开采的地表移动和变形预计问题,提出全采叠加预计方法;夏小刚等(2008)依据弹性薄板理论,建立了非充分采动条件下岩层和地表沉陷预计的新模型;谭