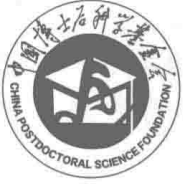


博士后文库  
中国博士后科学基金资助出版

# 采动影响下 岩体变形与工程应用

程健维 著

 科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

# 采动影响下岩体变形 与工程应用

程健维 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书独辟蹊径,将经典的基于影响函数法的对地表移动、变形预测的模型引入对地下岩层下沉及水平变形的描述当中,通过参数的改造及相关的模型推导,建立一整套新的岩体内部岩层移动变形二维计算模型,并推广三维条件下的数值模型。讨论由于连续采动引发的上覆岩层移动变形动态条件下对岩层孔隙率、渗透率变化的影响,建立应变-孔隙率-渗透率模型。应用建立的岩体内部岩层移动变形模型解决采矿安全工程领域中的工程问题,本书重点展示解决水体下采煤及工作面瓦斯抽采巷道优化等开采方面遇到的安全问题。

本书概念清晰、结构合理、可读性强,可供矿山生产管理、科研、设计部门的工程技术人员参考,也可用作高等院校采矿工程、安全工程专业的相关教学参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

采动影响下岩体变形与工程应用 / 程健维著. —北京: 科学出版社, 2019.6

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-061660-9

I. ①采… II. ①程… III. ①采动—影响—围岩变形—研究  
IV. ①TU454

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 116765 号

责任编辑: 李涪汁 沈旭 石宏杰 / 责任校对: 杨聪敏

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 许瑞

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

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年6月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 287 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵	傅伯杰	郭坤宇	胡 滨	贾国柱	刘 伟
卢秉恒	毛大立	权良柱	任南琪	万国华	王光谦
吴硕贤	杨宝峰	印遇龙	喻树迅	张文栋	赵 路
赵晓哲	钟登华	周宪梁			

## 《博士后文库》序言

1985年，在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下，我国建立了博士后制度，同时设立了博士后科学基金。30多年来，在党和国家的高度重视下，在社会各方面的关心和支持下，博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中，博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分，专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助，对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说，适逢其时，有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神，是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大，但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤，博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才，“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下，博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年，为提高博士后科学基金的资助效益，中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作，通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作，收入《博士后文库》，由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望，借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌，激励博士后研究人员潜心科研，扎实治学，提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年，国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》（国办发〔2015〕87号），将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段，这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信，我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用，促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才，为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

# 前 言

煤炭作为我国工业发展的重要原料和基础能源，其工业的发展关系着我国国民经济的命脉，支撑着国家经济的可持续稳定发展。统计表明，尽管 2003 年以后，我国年度煤矿事故死亡人数呈逐年下降趋势，但事故死亡人数却仍然占全世界煤矿死亡总人数的 70% 左右。长壁工作面开采强度大、速度快，煤层上覆岩层在短时间内应力平衡被破坏，会从直接顶到地面产生不同程度的位移变形，给井下开采活动及井上地面基础设施造成很大的影响和破坏。对上覆岩层在开采过程中沉陷规律进行研究，不仅可以提前充分预测开采沉陷所带来的影响，未雨绸缪早做准备，为煤矿安全生产提供保障，还有助于煤层采动卸压瓦斯抽采、指导煤矿地下水资源保护。因此，了解和掌握煤层采动条件下上覆岩层运移规律是实现煤矿绿色安全开采的重要基础，对开展煤层开采上覆岩层运移规律研究具有重要的理论与实践意义。

本书共分为 5 章。第 1 章介绍有关岩层移动与控制研究的现状，提出本书的研究内容及研究方法。第 2 章介绍开采沉陷导致地表移动变形研究，着重介绍影响函数法在其中的应用。第 3 章介绍开采沉陷导致岩体内部岩层移动变形研究，将第 2 章所述的影响函数法模型用于对地下岩层下沉及变形的预测，通过相关参数的改造与推导，建立一套新的岩体内部岩层移动变形二维计算模型，并推广至三维条件下的数值模型。第 4 章介绍采动影响下引发岩层渗透率变化的相关研究，讨论岩层移动变形对孔隙率、渗透率变化的影响，建立应变-孔隙率-渗透率模型。第 5 章应用建立的岩体内部岩层移动变形模型解决生产中的工程问题，重点展示解决水体下采煤及工作面瓦斯抽采巷道优化等开采方面遇到的安全问题，显示出模型良好的应用效果。

本书的研究成果得到了中国博士后科学基金面上项目（2015M581897）、中国博士后科学基金特别资助项目（2016T90528）、煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金（JYBSYS2015108）、国家自然科学基金（513042032）、江苏省自然科学基金（BK20130191、BK20181355）、高等学校博士学科点专项科研基金（20130095120001）等科研项目的资助。成书过程中研究生李思远、赵刚和本科生戚凯旋做了相关内容的研究工作及大量的文本编辑工作，在此一并表示衷心的感谢！

由于本书所研究问题的复杂性，在未来的研究中，还需要在以下几个方面的问题做更加深入的探讨：①本书建立了针对倾斜煤层开挖后地表沉陷的预测模型，但是对倾斜煤层开挖后其上覆岩层的移动变形的微观特征没有给出清晰的描述；这对于揭示倾斜煤层采动后岩层运动的规律具有重要意义。②渗透率的变化影响因素很多，本书仅在宏观角度研究了岩石介质在变形条件下与渗透率的粗略关系，在低围岩应力状态下，由于裂隙的膨胀，剪切应变总是可以引起渗透系数的增加。但其适用范围仍主要受单一裂隙中立方定律的有效性和岩石基质及岩体变形弹性行为的限制，所以在使用时需注意其应用是否超出了适用范围。

由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

程健维

2018年11月

于中国矿业大学

# 目 录

《博士后文库》编委会名单

《博士后文库》序言

前言

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 本书研究的意义及目的	4
1.3 当前国内外研究动态及评述	6
1.3.1 地表沉陷工程的研究	6
1.3.2 岩层移动与控制研究	9
1.4 本书主要研究内容	11
第2章 开采沉陷导致地表移动变形研究	13
2.1 概述	13
2.2 经验法	14
2.2.1 图形法	14
2.2.2 剖面函数法	17
2.3 影响函数法	22
2.4 水平煤层开挖后二维主横断面地表终态移动与变形计算	26
2.4.1 地表点的最终沉陷	27
2.4.2 地表点的最终水平位移	31
2.4.3 地表点的最终倾斜	32
2.4.4 地表点的最终应变	33
2.4.5 地表点的最终曲率	35
2.5 水平煤层开挖后三维地表动态移动与变形计算	35
2.5.1 地表点的最终沉陷	35
2.5.2 地表点的最终水平位移	37
2.5.3 地表点的最终倾斜	38
2.5.4 地表点的最终应变	39
2.5.5 地表点的最终曲率	39
2.6 倾斜煤层开挖后二维地表终态移动与变形计算	40

2.6.1	影响函数 .....	40
2.6.2	最终地表运动和变形 .....	45
2.6.3	计算机程序 .....	47
2.6.4	案例研究 .....	47
2.7	本章小结 .....	50
<b>第3章</b>	<b>岩体内部岩层移动变形研究</b> .....	<b>51</b>
3.1	水平煤层工作面上覆岩层终态二维开采沉陷预计模型 .....	51
3.1.1	覆岩下沉变形预计终态二维连续函数模型 .....	51
3.1.2	连续函数模型实例应用 .....	55
3.1.3	FLAC <sup>3D</sup> 数值模拟验证覆岩变形终态二维连续函数模型 .....	60
3.1.4	覆岩下沉变形预计终态二维岩层等分层模型 .....	65
3.1.5	最终沉陷参数的确定 .....	66
3.1.6	二维岩层等分层模型案例研究 .....	68
3.1.7	按自然岩层分层模型 .....	71
3.1.8	沉陷参数推导 .....	72
3.1.9	案例研究 .....	75
3.2	水平煤层工作面上覆岩层终态三维开采沉陷预计模型 .....	91
3.2.1	模型开发 .....	91
3.2.2	案例应用研究 .....	94
3.2.3	覆岩终态三维沉陷预计模型的验证 .....	107
3.3	水平煤层工作面上覆岩层动态二维开采沉陷预计模型 .....	110
3.3.1	工作面覆岩动态二维沉陷预计模型的开发 .....	110
3.3.2	覆岩动态沉陷参数的确定 .....	117
3.3.3	试验工作面覆岩移动与变形的动态二维预计分析 .....	119
3.3.4	FLAC <sup>3D</sup> 数值模拟验证 .....	123
3.4	本章小结 .....	128
<b>第4章</b>	<b>工作面上覆岩层采动影响下渗透率变化研究</b> .....	<b>129</b>
4.1	采动影响下煤岩体渗透率变化的表征 .....	129
4.1.1	煤岩体全应变与孔隙率 .....	129
4.1.2	煤岩体全应变与渗透率 .....	131
4.2	终态二维情形下工作面覆岩渗透率变化 .....	133
4.3	终态三维情形下工作面覆岩渗透率变化 .....	138
4.4	动态二维情形下工作面覆岩渗透率变化 .....	147
4.5	本章小结 .....	149

第5章 工程应用案例分析	151
5.1 工作面开采参数对岩体内部移动变形破坏的敏感性研究	151
5.2 煤层倾角对地表及地层的影响	174
5.3 工作面保护煤柱上覆岩层破坏影响	186
5.3.1 工作面保护煤柱上覆岩移动模型	186
5.3.2 案例研究	190
5.4 水体下采煤	196
5.4.1 采矿诱发地下渗透率变化	196
5.4.2 案例研究	198
5.5 瓦斯抽采巷道优化	203
5.5.1 工作面瓦斯概况	203
5.5.2 不同工作面推进长度下覆岩渗透率计算分析	204
5.5.3 晋东煤田某矿工作面高抽巷布置及瓦斯抽采效果评估	208
5.6 本章小结	210
参考文献	212
编后记	216

# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

我国能源资源储量的基本格局为“富煤、贫油、少气”，以煤炭为主的一次能源消费量在 2011~2015 年仍然保持在较高水平，如图 1-1 所示。“十二五”规划期间，煤炭、石油、燃气资源探明储量都有较大的增加。其中，燃气资源新增探明储量近  $4.5 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，石油新增探明储量超  $60 \times 10^8 \text{t}$ ，而煤炭新增探明储量近  $3 \times 10^{11} \text{t}$ 。而我国作为世界上煤炭开采量最大的国家，每年都会开采和新探明大量的煤炭资源，2015 年我国原煤产量为  $3.75 \times 10^9 \text{t}$ ，换算为标准煤大约为  $2.68 \times 10^9 \text{t}$ 。如图 1-2 所示，在 2015 年我国一次能源消费比例结构中，原煤贡献值占据了最庞

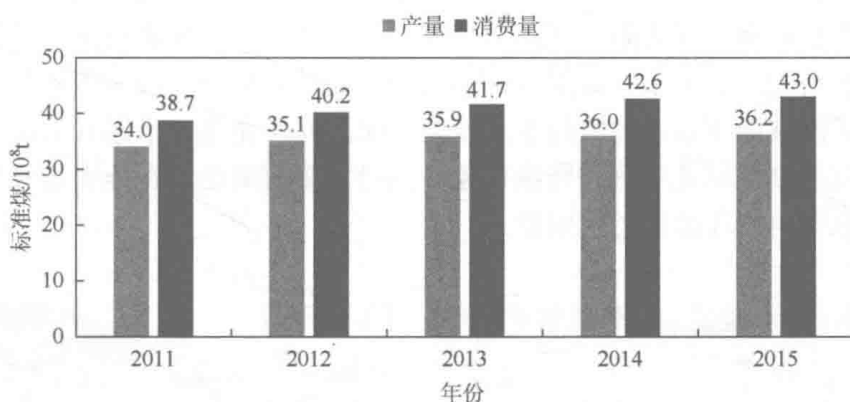


图 1-1 2011~2015 年中国一次能源产量与消费量变化情况

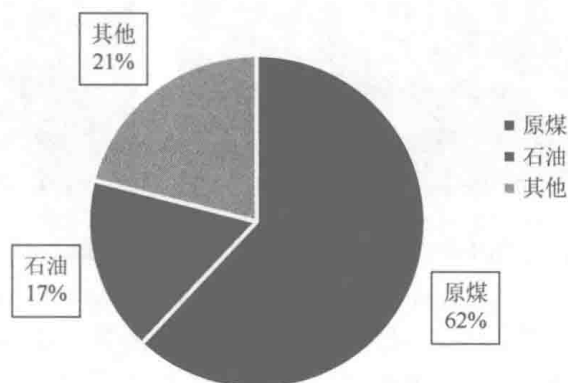


图 1-2 2015 年中国一次能源消费比例结构

大的份额，达到 62%，这也表明煤炭在我国能源结构中的主导地位。根据相关文献<sup>[2]</sup>的预计：即使到 2050 年，煤炭占我国一次能源消费比例也不会低于 50%。由此可见，煤炭作为我国一次能源的主体，在相当长的时期内不会产生较大的变化。煤炭资源在保障我国的能源安全方面同样发挥着举足轻重的作用，煤炭产量关乎国家经济社会发展的全局性、战略性稳定。然而大量煤炭资源在开采、运输等过程中产生的一系列连锁性的生态地质问题，成为制约煤矿矿区乃至因矿而兴的资源型城市、省份可持续发展的重要因素。

由于大量煤炭资源的开采，在地下会产生大面积的采空区，上覆岩层就会失稳垮落，这种岩层移动经过层层传播最后到达地表就表现为地表的下沉、沉陷和开裂。根据调查测算<sup>[3]</sup>，每开采  $1 \times 10^4 \text{t}$  原煤，采空区上方地表就会形成  $50 \sim 800 \text{m}^2$  的土地沉陷，平均值为  $200 \sim 300 \text{m}^2$ ，若以 2015 年我国总体原煤产量为基准进行计算，则在 2015 年我国因煤炭开采新增的地表沉陷面积可达到  $75 \sim 112.5 \text{km}^2$ 。而在浅埋深、大采厚、赋存条件简单的矿区，如我国陕西省榆林市神府煤田，每万吨煤炭开采后会使得高达  $3100 \text{m}^2$  的土地发生沉陷，部分地区开采每万吨煤炭后地表沉陷面积高达  $6000 \text{m}^2$ <sup>[4]</sup>。该矿区某工作面上方地表出现不同程度的龟裂、裂缝，以及山体裂缝和漏斗状塌陷，现场图片如图 1-3 所示。上覆岩层在采动影响条件下的移动会引起地表沉陷，岩层内部形成的采动裂隙分布也会影响地下水层位的稳定，破坏区域地下水，导致地下水流失。如图 1-4 是地表水因开采沉陷的影响出现的不同程度的河流干涸和断流现象。同时开采沉陷还会在地表造成采动损害和其他的危害自然环境的衍生问题。

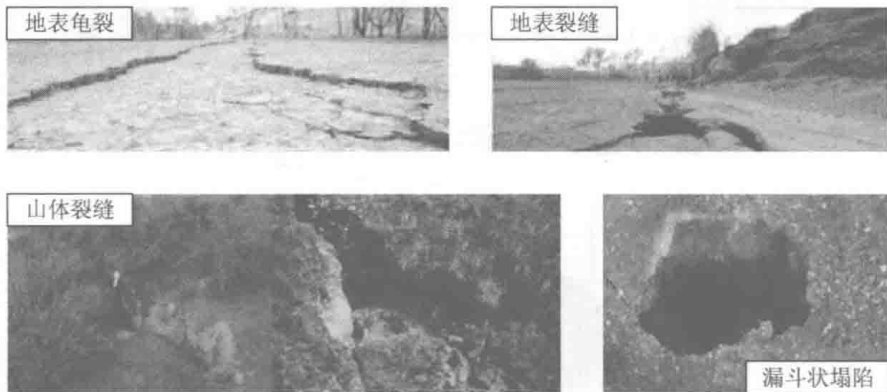


图 1-3 榆林市神府煤田地表开采沉陷

地下开采造成采空区上覆岩层垮落，进而传播所形成的地表沉陷，可能对地面建筑物、地表水系统和土地等造成巨大损害。与此同时，地层岩体移动可能对地下隧道、蓄水池及天然气管井等构筑物的稳定性产生巨大的影响。



图 1-4 榆林市神府煤田地表水资源破坏

许多研究工作和研究方法（理论分析、现场调研、数值模拟和物理模拟等）已被广泛应用于地表沉陷工程的预测研究。地表沉陷实际上始于在井下长壁工作面采煤形成的巨大采空区，采空区上覆岩层的垮落引起所有覆岩层的运动。一般具体描述为：由于开采活动的进行，煤矿采空区体积不断扩大，当采空区体积发展到足够大时，则开采矿层上覆的直接岩层将随即垮落，从而导致在直接岩层以上的上覆岩层继续弯曲并断裂；随着采矿活动的进行，该过程也持续不断地进行，直到垮落的岩块到达能够支撑悬顶的高度。此时，悬顶不再垮落，只是弯曲并支撑在下方地层或采空区落石上。岩层的弯曲则不断向上发展，直到地面，最终在地表形成了沉陷盆地。图 1-5 显示了长壁开采对上覆岩层的扰动形成的四个区域。

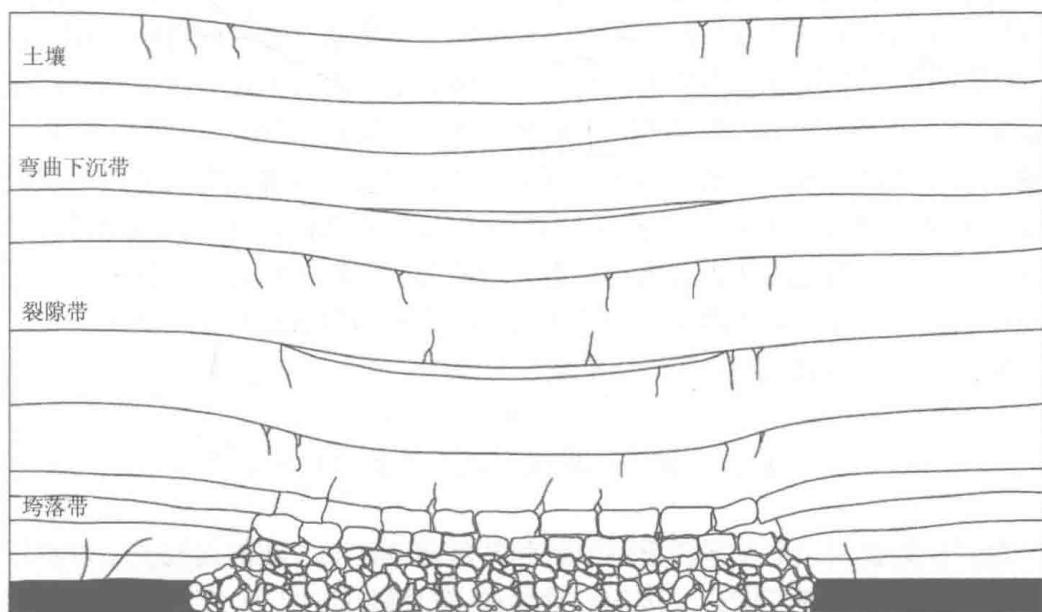


图 1-5 长壁开采对上覆岩层的扰动形成的四个区域

为了加深对大型煤矿采空区上覆岩层变形的理解，对地表下的岩层运动进行预测模拟是非常有必要的。而通过上一段的论述，地层岩层和地表下沉运动之间

存在一定的联系,这就使得利用地表沉陷的理论来研究岩层的运动成为可能。因此,用于研究地表沉陷的许多方法和模型可以转而用于研究地表下岩层的沉陷。最常见的一种方法是采用多锚钻孔伸长计直接进行现场监测。一些研究人员<sup>[5-7]</sup>曾进行过地下沉陷的现场调查。2009年,Du<sup>[8]</sup>安装了多锚钻孔伸长计来监测地下垂直运动。现场监测虽然可以提供直观的关于长壁开采时上覆岩层运动的第一手数据,但是由于经济成本巨大且操作耗时,所以这种方法并非最优的选择。

另外,理论分析、物理和数值模拟等其他方法<sup>[9,10]</sup>,也常用于研究岩层的移动,每种方法都有各自的优势和劣势<sup>[11]</sup>。Kratzsch<sup>[12]</sup>和 Peng<sup>[13]</sup>做了一些分析和建模,研究地表下岩层的沉陷。用三种形式的本构模型来研究和预测单一与多个长壁工作面上方的岩层沉陷,在计算方法上采用有限元法来进行计算<sup>[14]</sup>。Whittaker等<sup>[15]</sup>使用物理建模进行了一些实验室实验,研究不同地质条件的长壁工作面上的地面活动。他们详尽地描述了长壁开采地下岩层裂隙的发展,讨论了与维度有关的应变模式的意义及岩石强度方面地质背景的影响。有限元方法<sup>[16,17]</sup>、有限差分法和边界元法<sup>[18,19]</sup>也被用来预测开采水平到地面之间的地层运动的相互关系。Kwinta<sup>[20]</sup>进行了一项研究,预测地下沉陷引起的矿井周围水平和垂直的应力。Sheorey等<sup>[21]</sup>适当地修改了影响函数法来预测不同形状和大小的长壁工作面的沉陷。Luo和 Qiu<sup>[22]</sup>得出了一个改进的地下沉陷预测模型,涉及上覆岩层分层思想,即在长壁采空区的上覆岩层被分为几个有限数量的厚度相等的岩层,然后重复依次计算自开采水平到地面间的各层面,利用影响函数法进行岩层活动的预测。

大量现场经验和实验室研究表明,煤层开采后会引起上覆岩层的移动,进而在覆岩中形成采动裂隙,并成为井下各种流体(如瓦斯、漏风气体、水体等)运移的通道。通过研究矿区地质情况、开采方式、地貌特征等,应用岩层移动模型来发现采煤引起的岩层移动、地表沉陷的时间及空间规律,并对沉陷进行计算,进而对开采活动引起的地表沉陷进行有效地预防和控制;结合岩层移动模型研究采动覆岩应变-孔隙率-渗透率之间的关系,整体把握岩层移动应变及采动岩层渗透率分布,可以有效保障煤矿井下的安全生产。

## 1.2 本书研究的意义及目的

煤炭作为我国工业发展的重要原料和基础能源,其工业的发展关系着我国国民经济的命脉,支撑着国家经济的可持续稳定发展。国家“十三五”规划提出大力推进煤炭的清洁高效利用,并制定了“限制东部,控制中部和东北,优化西部”的煤炭资源发展战略,同时,大力推进煤炭基地的绿色化开采和改造,并鼓励采用新技术发展绿色煤电。由此可见,在我国的能源结构中,煤炭在一定时期内仍将处于主体地位,并在国民经济的发展中起到不可替代的作用。煤矿企业的安全

生产是国家安全生产的重中之重,随着国家安全生产的监管力度的进一步增强、煤矿企业对其安全生产的重视程度的加强及全国相关领域科技工作者的不懈努力,我国煤矿安全事故的发生次数和死亡人数均大幅下降;同时,煤矿企业的安全生产形势开始呈现出持续好转的趋势。但是当前我国煤矿企业的安全生产形势仍旧很严峻,特别是煤矿瓦斯安全事故,依然是煤矿企业安全事故的预防重点。

长壁工作面开采强度大、速度快,煤层上覆岩层在短时间内应力平衡被破坏,会从直接顶到地面产生不同程度的位移变形,给井下开采活动及井上地面基础设施造成很大的影响和破坏。对上覆岩层在开采过程中沉陷规律进行研究,可以提前充分预测开采沉陷所带来的影响,未雨绸缪,为煤矿安全生产提供保障。

研究开采后煤岩层移动规律,开发相应的模型,主要可以解决如下问题:

(1) 当上覆岩层产生位移、变形时,不可避免地会在岩体中产生裂隙和孔隙,这成为煤体中逸散出的瓦斯的聚集场所。瓦斯的大量聚集会成为煤炭开采过程中重要的安全隐患,一旦瓦斯大量地、意外地从裂隙中释放,容易引起瓦斯灾害事故。通过对瓦斯分布场和岩体裂隙场的耦合规律的研究,可以充分了解瓦斯分布的规律,优化瓦斯抽采系统的布置参数,高效抽采煤层瓦斯,降低瓦斯灾害发生的概率,避免造成人员伤亡、设备损坏及经济损失,达到安全生产目标。

(2) 浅埋深煤层(150m以内)具有薄基岩、上覆松散层较厚的赋存特征。以神东矿区为例,该区内各矿井开采的第一层煤(12煤、22煤或31煤),普遍距地表较浅,各矿井大巷全部采用条带式沿煤层布置,井田内无盘区划分,采用从大巷两翼直接布置长条带的方式,实行采煤面无隔离煤柱开采,形成以“大断面、低负压、多通道”为主要特点的矿井通风系统。回采工作面之间的煤柱宽15~25m,每隔50m设置一个联络巷道。采空区之间联络巷道多,加之封闭不及时、封闭质量不好,上覆岩层的移动垮落导致采空区与地表经常连通,采空区漏风普遍存在。神东矿区各矿井主要采用抽出式的通风方法,随着下层煤的开采,上覆采空区内与开采煤层之间的漏风通道将更多、更复杂。如果防范措施不到位,采空区遗煤自然发火的可能性便会大大增加。充分预测开采沉陷所带来的影响,可以有效地找到漏风源与漏风通道,提前进行安全评估,采取封堵、均压等防灭火措施,可以有效控制浅埋深煤层的发火危害。

(3) 在水体下采煤时,各类水体对矿井的威胁程度不同。尤其是松散层水构成的水体是否能够对工作面形成溃水问题,是煤矿生产者需要考虑的重要安全问题,主要涉及以下两个方面:①长壁开采沉陷是否会引起泄漏问题并改变储层的持水能力;②从储层泄漏的水是否会影响地下长壁作业。为了解决这两个问题,需要对上覆岩层在开采过程中移动变形过程进行全面的研究,尤其是讨论上覆岩层的连接表面层和地下开采采空区会形成连续的破碎带渗透率的变化是很重要的。

本书的写作目的在于:

(1) 对当前开采沉陷导致地表移动变形的研究进行综述, 同时将经典的基于影响函数法的地表的移动变形的预测模型引入对地层岩层下沉及水平变形的描述, 建立一整套新的岩体内部岩层移动变形模型, 尤其完善建立二维、三维条件下的数值模型。此外, 依据影响函数法发展对水平、倾斜矿层开采造成上覆岩体运动的统一计算模型; 讨论岩层移动变形的动态变化条件对孔隙率、渗透率的影响, 建立应变-孔隙率-渗透率模型。

(2) 应用建立的岩体内部岩层移动变形模型解决生产中的工程问题, 重点展示其在水体下采煤安全性评定、采空区漏风通道确定、工作面瓦斯抽采巷道优化等方面的应用。

## 1.3 当前国内外研究动态及评述

### 1.3.1 地表沉陷工程的研究

开采沉陷学最早来自德文 Bergschadenkunde 和英文 mining subsidence, 国外对于开采沉陷的研究始于 19 世纪 50 年代左右, 这是一门研究地下有用矿物开采引起岩层和地表移动及相关问题的科学。随着欧洲工业革命的兴起, 科学技术不断发展, 人类社会对于使用成本较低的一次能源的需求也在不断提高。煤炭是一种可以直接点燃发热的常规一次能源, 大规模的开采引发矿区地表的大面积沉陷, 造成大量的人员伤亡和财产损失, 因此地表沉陷成为最初开采沉陷学研究的主要对象。

工业起步早而又具有一定资源储量的部分欧洲国家率先展开了关于地表沉陷方面的研究并进行了大量的观测记录, 奠定了部分开采学的基础理论; 具有庞大资源储量、第二次世界大战后期强调优先发展重工业的苏联继续对开采沉陷学进行完善研究和补充, 开始在前人研究的基础之上对地表沉陷的动态移动进行研究; 发展中国家如中国也对开采沉陷学的发展做出了重要的贡献, 在岩层移动方面取得了巨大的成就。开采沉陷学在世界不同区域的发展趋势及研究重点分析如下。

#### 1) 欧洲

在世界范围内, 1838 年欧洲学者最早开始关注开采沉陷问题并且开展了相关研究, 其中关于地表沉陷方面的研究作为开采沉陷学奠基了基础。众学者在 19 世纪主要侧重于在地表观测的基础上进行研究, 对具体岩层的移动变形计算研究还略显空白。虽然已经出现现代开采沉陷理论的雏形, 但对于开采沉陷规律还是依靠推断来认识的, 提出的理论与实际情况有较大的出入。

比利时科学家通过研究提出了一些对开采沉陷学的基本认识。例如, 在 1825 年

和 1839 年比利时组织专门的调查组对列日城的开采影响进行了调查, 得出了垂线理论, 认为采空区上下边界开采影响范围可用相应点的层面法线确定<sup>[23]</sup>; 1858 年, 戈诺 (Gonat) 进一步研究垂线理论, 提出法线理论; 1882 年耳西哈 (Oesterr) 提出了自然斜面理论, 该理论具备了现代开采沉陷理论的雏形, 发现了岩层移动与岩层性质是存在联系的, 但该理论是基于水平开采的矿体提出的。1884 年德国依琴斯凯 (Jlcinsky) 提出了二等分线理论; 1885 年法国人法约尔 (Fayol) 在提出了圆拱理论; 1907 年德国克尔顿 (Korten) 提出了采空区地表的水平方向移动变形的分布规律; 1949 年德国克拉奇 (Kratzsch) 出版了第一本关于开采沉陷的代表性著作 *Bergschadenkunde*。波兰布德雷克 (Budryk) 解决了克诺特 (Knothe) 提出的下沉盆地中的水平移动及水平变形问题, 这一理论现在称为布德雷克-克诺特理论。

在有关开采沉陷比较早期的研究中, 地表沉陷是主要的研究方向, 对于岩层移动更深入的研究比较少。总而言之, 欧洲学者对地表沉陷的机理进行了大量的研究, 提出了较多至今仍具有非常大参考价值的理论和方法。

## 2) 苏联

苏联的学者开始从地表沉陷的研究延伸到了岩层移动, 他们认为当新采空区逐渐靠近老采空区时, 岩层移动加剧、移动角变小; 20 世纪 30 年代开始了有关地表移动的计算, 1935 年, 苏联中央矿山测量科学研究所提出地表下沉速度的概念, 标志着地表动态移动研究的开始。1947 年, 苏联学者阿维尔申利用塑性理论对岩层移动进行了分析, 并结合实践经验建立了地表移动计算方法, 下沉剖面方程呈指数函数形式, 提出了水平移动距离与地面倾斜角度成正比的著名观点<sup>[24]</sup>。1974 年阿维尔申通过大量研究得出了对沉陷预测有重大影响的理论: 地表倾斜与地表水平移动成正比, 地表曲率与地表水平变形成正比。在阿维尔申的影响下, 各国学者开始不断深入了解开采沉陷形成机理和规律, 建立了大量的预测方法和公式。

部分苏联开采沉陷研究学者已经开始将研究目光聚焦到岩层移动问题上, 其主要研究方法的基础仍然是来自前人有关地表沉陷的研究思想和理论。

## 3) 中国

我国是从中华人民共和国成立后开始对开采沉陷进行研究, 至今积累了大量的实测资料, 并根据不同监测矿区的差异性建立了不同采矿条件下地表移动变形的计算方法, 为采煤工作提供了科学指导, 并取得了显著的社会、经济和环境效益。

1953 年, 北京矿业学院 (中国矿业大学的前身) 在国内最早开展沉陷学方面的教学工作, 聘请苏联采矿沉陷方面的专家为部分矿院师生讲授“岩层与地表移动”课程, 并将此作为矿山测量专业的第一门专业课, 1955 年开始招收第一批矿山测量专业的大学生; 1954 年, 我国在开滦矿区林西矿建立了第一个地表移动观测站点并于 1956 年由开滦煤炭科学研究所矿山测量研究室开展岩层和地表移动的实地观测研究工作<sup>[25]</sup>; 1959 年煤炭科学研究总院开始从事开采沉陷及沉陷防护