

黄土沟壑区 地表开采沉陷规律及 采动损害研究

胡青峰 著


HUANGTU GOUHE QU
DIBIAO KAICAI CHENXIAN GUILÜ JI
CAIDONG SUNHAI YANJIU

黄土沟壑区 地表开采沉陷规律及 采动损害研究

胡青峰 著

HUANGTU GOUHE QU
DIBIAO KAICAI CHENXIAN GUILÜ JI
CAIDONG SUNHAI YANJIU



 中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书以山西西山煤电股份有限公司镇城底矿具体工作面开采为工程背景,研究了黄土沟壑区地表开采沉陷规律及采动损害,主要内容包括:研究背景与意义,国内外矿山开采沉陷研究现状;地表移动变形观测站设计与监测方法;电厂皮带运输走廊变形监测点的布设和测量方案;地表下沉盆地角量参数与概率积分预测参数的求取;电厂皮带走廊与皮带头机房采动损害分析;采动过程中覆岩与地表应力场、位移场和破坏场演化规律反演;最后基于实测结果,用概率积分法预测分析了皮带走廊的采动损害情况。

本书可供从事采矿工程、测绘工程等专业的科技工作者、研究生和本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

黄土沟壑区地表开采沉陷规律及采动损害研究 / 胡青峰著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2019. 10
ISBN 978-7-5170-8137-1

I. ①黄… II. ①胡… III. ①黄土区—矿区—沟壑—地面沉降—规律—研究 IV. ①P642.26

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第237044号

书 名	黄土沟壑区地表开采沉陷规律及采动损害研究 HUANGTU GOUHE QU DIBIAO KAICAI CHENXIAN GUILÜ JI CAIDONG SUNHAI YANJIU
作 者	胡青峰 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 8.75印张 181千字
版 次	2019年10月第1版 2019年10月第1次印刷
定 价	78.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

FOREWORD

煤层被开采以后，将造成采空区上覆岩层的垮落、断裂、离层、移动变形等破坏，最终传递到地表产生地面沉降，给矿区人文环境和生态环境带来一定的采动损害，不但破坏地面建（构）筑物，而且易造成大面积的农田损毁、地下水运移规律改变、水土流失加剧、荒漠化程度提高等灾害。地表开采沉陷的移动变形规律与煤层赋存条件、上覆岩层结构有关。各矿区的覆岩与地表移动规律及有关开采沉陷参数具有地区特征，为更加准确地掌握当地矿区的地表移动变形规律，最好的办法就是在相应矿区内开展地表岩移观测工作，根据实测数据反演分析地表移动变形参数以及概率积分预测参数，并以此指导矿山地表采动损害的防治工作。因此，掌握更加准确的地表移动变形规律，对于分析矿区的采动损害意义重大，特别是对于分析采煤工作面上方地表的建（构）筑物的采动损害程度具有重要的科学参考价值和实际意义。

山西西山煤电股份有限公司镇城底矿（以下简称“镇城底矿”）22618工作面上方地表距离开切眼1300m左右有正在运行的皮带运输走廊及其机头。根据开采沉陷的一般规律可知，该工作面开采到皮带运输走廊及其机头处将会对其产生采动损害。镇城底矿位于黄土沟壑山区，地质条件特殊。尽管早期获得了部分该类矿区浅埋煤层开采引起的地表沉陷规律，但目前采深均相对较深，对于该新地质采矿条件下的地表移动变形规律，国内外相关研究非常少见。为准确掌握该黄土沟壑山区地表开采沉陷规律，评估开采沉陷对皮带运输走廊及其附属建（构）筑物的采动损害影响，以镇城底矿22618工作面开采为工程背景，开展了黄土沟壑山区地表开采沉陷规律及其对建（构）筑物采动损害研究。

本书是作者近年来从事矿山开采沉陷与采动损害相关项目的研究成果，得到了国家自然科学基金（41301598、41671507、51474217），河南省科技攻关项目（182102311061、182102210330），华北水利水电大学青年科技创新人才支持计划项目（70433），煤化工资源综合利用与污染治理河南省工程实验室开放基金项目（502002-A04）和作者获批的2018年度上半年河南省博士后科研项目启动经费的资助。本书的主要内容包括：研究背景与意义，国内

外矿山开采沉陷研究现状，研究方法和技术路线；地表移动变形观测站的设计、监测方法、观测成果的检查方法以及地表移动和变形计算方法；电厂皮带运输走廊变形监测点的布设方案、测量方案和仪器选用；工作面开采地表下沉盆地角量参数与概率积分预测参数的求取；电厂皮带走廊采动损害与皮带头机房采动损害分析；基于 Phase2.0 平台分别沿 22618 工作面走向方向与皮带走廊走向方向，建立了相应的地质力学模型，对采动过程中覆岩与地表应力场、位移场和破坏场的演化规律进行了模拟；采用概率积分法对地表开采沉陷进行了动态预测，分析了皮带走廊的采动损害情况。

在本书即将出版之际，特别感谢华北水利水电大学刘文锴教授、曹连海教授、雷斌副教授对作者的悉心指导和帮助；感谢山西西山煤电股份有限公司地质处郝存孝高级工程师、康新亮高级工程师对本研究的支持和帮助；感谢河南理工大学测绘与国土信息工程学院的领导、华北水利水电大学测绘与地理信息学院的全体同事对作者研究工作的大力支持；书中引用了一些学者发表的研究成果，在此对所引用文献的作者及未能提及的作者表示衷心感谢。同时，作者要特别感谢国家自然科学基金委员会、河南省科学技术厅、煤化工资源综合利用与污染治理河南省工程实验室、华北水利水电大学、河南理工大学、河南省博士后管理委员会给予的经费支持！

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和不足，恳请读者批评指正！

作者

2019 年 10 月

目录

CONTENTS

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究背景与意义	3
1.2 国内外矿山开采沉陷研究现状论述	3
1.3 主要研究内容	9
1.4 研究方法与技术路线	10
第 2 章 地表移动变形观测站设置	13
2.1 设站作用	15
2.2 设站条件	15
2.3 观测站设计	16
2.4 观测方法及相关计算	22
第 3 章 建(构)筑物变形监测点的布设	27
3.1 观测对象概况	29
3.2 技术要求	29
3.3 皮带运输走廊基础监测点设置	29
3.4 机房监测点设置	31
3.5 测量方案与仪器选用	33
第 4 章 地表岩移观测数据分析	35
4.1 实测概述	37
4.2 地表沉陷分析	37
第 5 章 皮带及其机头房采动损害分析	47
5.1 皮带采动损害分析	49
5.2 皮带头机房采动损害分析	57
第 6 章 覆岩与地表采动损害数值模拟实验	61
6.1 研究内容	63
6.2 Phase2.0 数值模拟计算程序	63

6.3	模型建立	64
6.4	计算模型选择	66
6.5	岩层物理力学参数选取	66
6.6	模拟计算过程	66
6.7	方案一的模拟结果分析	67
6.8	方案二的模拟结果分析	72
第7章	地表移动变形预计	75
7.1	预计方法的选择	77
7.2	概率积分法的基本原理	77
7.3	预计参数选取	86
7.4	预计结果分析	87
第8章	结论	119
8.1	地表移动变形监测结果	121
8.2	皮带及皮带头机房监测结果	121
8.3	覆岩与地表采动损害机理	122
8.4	预测结果	123
参考文献		125

第 1 章

概 述

1.1 研究背景与意义

煤层开采会造成采空区上覆岩层的垮落、断裂、离层、移动变形等破坏,并传递到地表,使地面发生沉降,产生一定的采动损害。该过程不但破坏地面建(构)筑物,同时易造成大面积农田损毁、地下水运移规律改变、水土流失加剧、荒漠化程度提高等灾害。地表开采沉陷的移动变形规律与煤层赋存条件、上覆岩层结构有关。因此,各矿区的覆岩与地表移动规律及有关开采沉陷参数具有地区特征,为更加准确的掌握当地矿区的地表移动变形规律,最好的办法就是在研究矿区内开展地表岩移观测工作,根据实测数据反演分析地表移动变形参数以及概率积分预测参数,并以此指导矿山地表采动损害的防治工作。因此,掌握更加准确的地表移动变形规律,对于分析本矿区的采动损害意义重大,特别是对于分析采煤工作面上方地表的建(构)筑物的采动损害程度具有重要的科学参考价值和实际意义。

镇城底矿隶属于山西西山煤电股份有限公司。该矿矿井于1983年1月开工建设,1986年11月正式投产,设计生产能力150万t/a,2013年重新核定生产能力为190万t/a。井田面积23.8396km²,批准开采高程660.00~1120.00m。目前,该矿正在开采22618工作面,工作面上方地表距离开切眼1300m左右有正在运行的皮带运输走廊及其机头。根据开采沉陷的一般规律可知,该工作面开采到皮带运输走廊及其机头处将会对其产生采动损害。

镇城底矿位于黄土沟壑山区,地质条件特殊。尽管早期获得了部分该类矿区浅埋煤层开采引起的地表沉陷规律,但目前采深均相对较深,对于该新地质采矿条件下的地表移动变形规律,国内外相关研究非常少见。为准确掌握该黄土沟壑山区地表开采沉陷规律,评估开采沉陷对皮带运输走廊及其附属建(构)筑物的采动损害影响,以镇城底矿22618工作面开采为工程背景,开展了黄土沟壑山区地表开采沉陷规律及其对建(构)筑物采动损害研究。

1.2 国内外矿山开采沉陷研究现状论述

1.2.1 国外矿山开采沉陷研究现状

矿山开采沉陷及其采动损害早在19世纪就已经引起了人们的注意,对开采沉陷

形成初步认识,虽然进行了一些开采实践,但由于没有成熟理论的指导,这一时期“三下一上”[建(构)筑物以下、铁路以下、水体以下和承压水以上]开采尚未形成系统的理论。

1825年和1839年,比利时人对列日城矿山开采沉陷的形式和采动损害程度进行了相关调查,调查结果为覆岩与地表以陷落为主,结合当地的采深条件,形成了最初的开采沉陷假设,即“垂线理论”。随着对列日城开采沉陷规律的进一步研究,发现在工作面下山方向一侧煤柱上方地表的建(构)筑物也遭受了一定程度的采动损害。根据这一现象,1858年Gonot认为倾斜矿层的开采塌陷是沿矿层法线方向传播,且先偏向于开采工作面的下山方向上方,而不是出现在开采工作面的正上方,并以实测资料为基础提出了“法线理论”,由于该理论的提出是基于下山方向实测数据,对极倾斜煤层开采造成的地表塌陷现象并不能较好的解释,所以遭到了当时许多科学家的质疑。针对法线理论的不足,Dumont于1871年采用水准测量的方法对列日城下采用柱式开采方式的地表沉陷进行了测量,得出最大沉陷值不超过厚度的 $1/3$,并提出了下沉计算模式 $W = m \cos \alpha$,并指出法线理论只适用于矿层倾角小于 68° 的情况;同时他通过详细分析地表移动盆地的范围与工作面的对应关系,研究移动盆地各个部分对建筑物的危害性,认为最有危险的地点是移动盆地的边缘地带,对建(构)筑物产生危害的不是均匀下沉而是非均匀下沉,因此他不赞成在采空区内留设矿柱。他的一些认识至今仍对建(构)筑物下开采具有指导意义。

随后,德国的Jicinsky通过总结分析大量实测资料,提出了“二等分线理论”,将覆岩移动过程分为两个时期,第一时期是迅速塌陷过程,第二时期是覆岩缓慢移动过程。Oesterr认为在采空区上方覆岩的塌陷形式为抛物线形状;同时他还认为下沉盆地是由自然斜面角圈定的,并给出了从完整岩石到厚含水冲积层的6类岩层的自然斜面角,范围为 $54^\circ \sim 84^\circ$,提出了自然斜面理论。他第一次提出了岩层移动范围与岩层性质有关的思想,其圈定的移动范围与现代开采沉陷理论相似,但没有对倾斜煤层上山和下山方向地表沉陷规律开展更深一步的研究。法国的Fayol认为采动覆岩破坏向上发育形状为圆拱形状,采空区将通过采动破碎岩石的碎胀作用来充填,充填后的圆拱将保持稳定,由此提出了“圆拱理论”。法约尔的圆拱理论已成为矿山压力学科的基本理论之一,一直沿用至今。Hausse提出了“分带理论”,认为采空区上方存在“三带”(冒落带、裂隙带和弯曲带)分布沉陷模式,并建立了覆岩与地表沉陷几何理论模型。

进入20世纪以后,许多学者开始大规模系统地对地表移动变形进行观测,从而使得开采沉陷理论得到了很大的发展。Halbaum将采空区上方岩层看作悬臂梁,经过推导得出地表应变与曲率半径成反比的结论。Korten根据实测数据总结出了水平移动与变形的分布规律。Fckardt把岩层移动过程视为各岩层的逐层弯曲。

Lehmann 认为地表沉陷类似于一个褶皱过程。1923—1947 年, Schmitz、Keinhorst、Bals 等人相继研究了开采沉陷影响的作用面积及其分带, 提出和发展了开采沉陷影响分布的几何理论。特别是 Bals 1932 年提出的连续影响分布的影响函数, 为后来的影响函数法奠定了基础。1950 年以后波兰学者 Budryk 和 Knothe 修正了几何沉陷理论, 并提出用高斯曲线作为影响曲线的方法。波兰学者 J. Litwiniszyn 采用数理统计的方法建立了单元开采地表移动表达式, 将随机介质理论引入开采沉陷, 为影响函数从经验走向理论奠定了基础。波兰学者沙武斯托维奇运用弹性基础梁得出了波动性下沉剖面方程。

Salamon 等将连续介质力学与影响函数法相结合, 提出了更为一般的线弹性分析原理即面元原理, 为现在的边界元法奠定了基础。Brauner 发表了计算地表移动的面积网格法, 并提出了水平移动的影响函数。20 世纪 60 年代中期英国的 Lee 针对断层对开采沉陷的影响, 基于对 29 处有断层影响的地表开采沉陷观测数据, 得出了断层有时能吸收变形, 断层滑移与开采深度无关的结论。苏联的 Kolebaeva 采用钢丝垂球法、同位素子弹等进行了岩体移动的大量观测, 获得了覆岩内部移动的大量数据, 绘制了覆岩内部移动等值线图。同时, Dahl、Brawn、Pothini、Lee、Strauss 和 Nair 开始对开采沉陷的数值模拟计算进行了初步研究。另外, Kratzsch、Ishijima & Isobe、Mueller、Mozuder、Dahl、Choi、Shoemaker 等学者在这方面也进行了进一步的研究。

Helmut Kratzsch 概括总结了煤矿开采沉陷的预测方法, 并出版了《采动损害与防护》一书。屠尔昌宁诺夫推导出了台阶高度的计算公式。彼图霍夫给出了由于岩石沿层理面向倾斜方向移动而引起岩体移动的计算方法。Conroy 和 Gyarmaty 采用钻孔伸长仪和钻孔测斜仪观测了覆岩内部的竖向和横向移动, 不仅获得了覆岩内部的水平移动规律, 还观测到了覆岩沿层面的滑移和离层现象。H. 克拉茨深入研究了煤层群开采的相互影响以及采空区留设矿柱的影响, 提出了几种重复开采模型, 得到了重复采动移动角、边界角变化的实用公式。苏联学者 B. A. 布克林斯基认为第一次采动使岩体破碎产生碎胀, 这使得地表下沉小于煤层开采厚度, 重复采动时已产生碎胀的岩体将不再产生碎胀, 从而减少了岩体的碎胀量, 而地表下沉量增大。Su D. 等考虑到岩体存在层面, 数值模拟时在层面处设置节理单元, 在相同岩体力学参数的情况下获得了与现场实测相吻合的结果, 并将考虑层面的情况与不考虑层面的情况做了对比分析, 发现考虑层面后计算的移动量大约是不考虑层面情况的 5 倍。Peng S. S. 详细分析了开采对地下水环境的影响。

Ambrozič T. 等采用神经网络方法对地表沉陷动态预测进行了相干探讨。Gonzalez - Nicieza C. 等基于正态分布时间函数研究了采动过程中地表移动变形的动态特征, 并以阿斯图里亚斯煤矿地表沉陷实测数据为例, 将正态分布时间函数与

Knothe 时间函数以及双曲时间函数的预测结果进行了对比分析,表明函数该预测精度更高。Luo Y. 对 Knothe 时间函数进行了改进,以适应倾斜煤层开采时的动态预测。I. D. 等将 Knothe 时间函数和 GIS 软件结合以分析和评估矿区地表动态采动损害。Ikemi H. 等基于地理信息技术模拟了地表沉陷的动态过程。

1.2.2 国内矿山开采沉陷研究现状

生产实践和理论研究表明,矿山开采沉陷是一门涉及矿山测量、采矿、数学、岩石力学、煤田地质和计算机等多个学科的交叉性综合学科。因此,本研究将从以上方面论述分析我国开采沉陷的发展研究现状。

我国于 20 世纪 50 年代开始采用现场测量的方法研究由采矿引起的地表移动变形问题。1954 年我国在开滦建立了第一条完整的地表岩移观测站——黑鸭子观测站。1956 年唐山煤炭科学研究所成立以后,对黑鸭子观测站观测的数据进行了全面分析总结,获取了地表移动参数。之后,大同、淮南、阜新和抚顺等多个矿区也进行了地表移动观测站的规划、设计和建设。1957—1959 年唐山煤炭科学研究所先后分别完成了枣庄、开滦、淮南、焦作等矿区的 10 多条地表移动观测站的分析总结报告。1960 年由北京矿业学院、中南矿冶学院和合肥工业学院合编的《矿山岩层与地表移动》,该书全面论述了岩石物理力学性质、露天及地下开采岩层移动的观测方法及成果整理,用相似材料模型实验研究岩层移动,介绍了国内外岩层移动观测的主要成果及新的理论和经验,并结合我国各主要矿区的实际观测资料进行了阐述。1963 年,依据阳泉矿区 22 个地表移动观测站和 4 个覆岩内部移动观测站,以及 11 个山沟下、4 个建(构)筑物下的工作面开采沉陷观测资料,唐山煤炭科学研究所编制完成了《阳泉矿区地面建(构)筑物及主要井巷保护试行规程》,并在该矿区广泛应用,取得了较好的效果。1963—1965 年,为研究任一点的地表沉陷变形规律,周国铨教授等建立了我国第一个网状观测站,在研究分析大量观测数据的基础上,建立了地表下沉空间曲面方程,从而可以预计地表下沉盆地内任一点在任一方向上的移动和变形值。1954 年以来,各主要矿区都分别建立了十几个至几十个地表移动观测站,获得了关于本矿区岩层和地表移动的完整资料,为建立各种计算方法提供了依据。

由以上分析可知,早期对地表沉陷观测大多采用水准测量和导线测量,在地形条件比较复杂的偏远矿区,该方法存在一定的弊端,当地形落差较大或通视条件差时,会引起控制点引测不方便、测量速度较慢、测量结果精度不高等问题。尽管如此,随着测绘科学技术的发展,一些现代测绘新技术也正被引入到地表沉陷的监测工作中,例如: CORS 技术、InSAR 技术、地面激光扫描技术以及 GNSS 技术等,而且都

取得了比较不错的效果。然而,对于覆岩内部沉陷的监测,与地表沉陷相比,其监测方法发展相对较慢,这可能与实施覆岩内部监测比较困难有关。在实际工作开展过程中,主要还是采用传统的监测方法:巷道和采场直接观测法、岩移钻孔钢丝绳观测法、钻孔伸长仪、钻孔倾斜仪。关于覆岩破坏的监测方法主要有:形变-电阻率探测法、水文地质钻孔观测法、声波探测法、钻孔透视法和钻孔电视法。

由于采动覆岩与地表沉陷规律与地下采矿情况息息相关,为此,我国许多学者从采矿工程的角度对开采沉陷进行了研究,并取得了大量的科研成果。

刘天泉等系统地总结了概率积分法在我国实际应用中的经验,较深入地研究了覆岩破坏的基本规律,提出了导水裂隙带的概念,并以实测资料为基础建立了垮落带——导水裂隙带的计算公式。白矛等研究了采用条带法开采条带尺寸对开采沉陷的影响。范学理等曾多次采用相似材料平面模型试验研究了不同地质采矿条件下开采覆岩与地表移动的情况。邓喀中等提出了开采沉陷的结构效应。崔希民等实验分析了潞安矿区综放和分层开采的岩层移动规律。郝延锦等也对放顶煤开采引起的覆岩移动规律进行了实验。梁运培等建立了采场上覆岩层移动的组合岩梁模型,将岩层移动的关键层、岩层组合以及层间离层统一在组合岩梁模型的体系中,给出了关键层、岩层组合以及层间离层的统一判别准则。姜福兴等研究了四面采场“ θ ”型覆岩多层空间结构的运动及其控制。戴华阳等人针对深部隔离煤柱对岩层与地表移动的影响规律进行了深入研究。

为了对沉陷进行准确的预计,我国学者通过对大量矿区沉陷资料进行分析,结合国外已有的预计理论开始从数学的角度来研究开采沉陷预计模型。

19世纪60年代刘宝琛和廖国华将李特威尼申建立的随机介质理论法引入我国,在其基础上将其发展为概率积分法。1973年《矿山测量》创刊,公开刊登了《“三下”采煤》一文,集中介绍了当时10年来有关地表移动和“三下”采煤的科研成果。论述了指数函数法、典型曲线法、双曲线正割影响函数法等地表移动的计算方法。1978年煤炭工业出版社出版了由开滦煤炭科学研究所编著的《铁路下采煤》一书。该书在地表沉陷方面,全面系统地介绍了负指数函数法计算公式与非主断面上任一点在任一方向上的地表沉陷变形的预计方法。吴戈(1981)提出了下沉盆地剖面的“ Γ ”分布模式。周国铨等给出了指数函数法计算地表移动的解析解。何万龙等总结了山区地表移动计算公式。何国清等建立了基于碎块体理论的地表沉陷的威布尔分布法。郝庆旺等提出了采动岩体开采沉陷的空隙扩散模型。王金庄等给出了巨厚松散层下煤层开采地表移动规律及其预计方法。郭增长等建立了极不充分开采条件下地表移动的预计方法。郭文兵等人进行了岩层移动角选取的神经网络方法研究。戴华阳等建立了适应于各级别倾角开采沉陷的统一模型和预计方法——矢量预计法。柴华彬等研究了用模糊识别确定开采沉陷预计参数的方法。朱刘娟等讨论了岩层移动角随开采厚度、开采深

度及煤层倾角等的变化规律,建立了深部开采条件下岩层移动角的计算公式。胡青峰等针对泰勒级数展开法求参的缺陷,提出采用 Broyden 算法对其进行改进。廉旭刚等建立了 Knothe 时间函数参数 c 、充分采动程度和采后时间之间的关系式。胡青峰等研究了影响 Knothe 时间函数时间系数的因素,基于采空区的充分采动宽度建立了 Knothe 时间函数求参模型,并于 2015 年基于充分采动角对该模型进行了优化改进。Nie L. 等根据矿区地表监测点下沉曲线“S-型”的特征,构建了反正切函数模型,并以抚顺台河矿地表监测资料为例进行了实例验证。

为进一步深入研究覆岩内部岩层的移动情况,仅依据地表移动观测数据建立数学模型显然不能达到预期效果。由于地表移动与覆岩内部岩层移动密不可分,我国学者开始从岩石力学的角度对开采沉陷进行研究。

李增琪采用 Fourier 变换推导出了岩层与地表移动变形的弹性力学表达式。谢和平等提出了损伤非线性大变形有限元法。何满潮提出了非线性光滑有限元法。杨伦等提出了岩层二次压缩理论,将地表沉陷与岩层的物理力学性质联系起来。杨硕等建立了开采沉陷的力学模型。王泳嘉等将离散单元法和边界元法应用于开采沉陷中应力、位移和变形的研究。吴立新等建立了条带开采覆岩破坏的托板理论。于广明提出了开采沉陷的非线性机理和规律,以及分形损伤在开采沉陷中的应用。麻凤海应用离散单元法研究了岩层移动的时空效应。崔希民等对主断面的地表移动与变形进行了实时位移分析,采用流变模型对开采沉陷进行了研究。唐春安等给出了线弹性有限元法。王悦汉等充分考虑了采动岩体破裂的特性,将岩体移动划分为不同的阶段,针对各个阶段分别采用不同的模型,采用逐层逐次的计算方法建立了岩体移动的动态力学模型,不仅可以用来计算岩体与地表的动态移动变形,而且还可以计算覆岩离层裂缝的发育高度、岩体断裂高度和岩层的周期断裂步距,初步建立了采场围岩、覆岩和地表相统一的动态力学模型。Ximin Cui 等将大变形力学理论引入开采沉陷预计与地表裂缝分析中,基于沉陷的实时位形分析了其移动变形指标,并于 2001 年基于概率积分法,采用 Knothe 时间函数建立了地表动态移动变形的计算方法,给出了 Knothe 时间函数参数的计算方法和单元划分的周期来压步距法,并在钱家营矿沙河采煤沉陷及矸石筑坝中得到了应用。

另外,针对一些特殊的地质采矿条件,我国学者也开展了相关研究。张玉卓等采用边界元法研究了断层对地表开采沉陷的影响,提出了岩层移动的错位理论。隋惠权等基于地球动力区划的理论和方法,分析研究了深部开采条件下,煤层底板形变、断层活化及动力突变现象等。夏玉成探讨了构造应力对地表采煤沉陷的影响,指出在构造挤压区,一定的开采强度有可能不会对地表造成强烈的损害,而在构造伸展区,相同强度的开采则有可能对地表生态环境造成严重的破坏。崔希民等分析了弱面对地表移动范围和不连续变形的影响,根据基岩移动角与断层面倾角之间的关系,分析研究

了断层对地表移动范围及非连续变形的影响规律，给出了断层露头处台阶和裂缝的计算方法。

1.2.3 黄土沟壑区地表开采沉陷研究现状

黄土沟壑山区地表开采沉陷研究较深入、成果较突出的为何万龙教授，他通过对阳泉和西山矿区多年的地表开采沉陷观测资料分析，得出山区开采影响下的地表移动，除受地质采矿条件和覆岩性质影响外，还与地表倾向、倾角以及表土层的强度有关；山区采动地表点的移动向量是该点在重力作用下沿采空区中心和地表倾斜两个方向移动向量的叠加；山区水平移动受地形倾斜影响最为明显，其次为下沉。当地面坡度基本一致时，山区地表的其他变形值受地表的影响较小，但坡度变化较大时，倾斜地表各种变形值都将较类似条件下的平地增大。通过观测受滑移影响的竖井井筒的内部，发现在风化表土层与基岩接触面上有明显的错台，井壁的破坏主要发生在覆岩表土层内，滑移方向指向下坡。由此得出，山区采动地表向下坡方向的滑移主要发生在风化表土层内；结合实测数据和实验结果对山区采动滑移机理进行了揭示。另外，通过对大量的采动滑坡实例进行分析，给出了影响采动坡体稳定性的主要因素，并对采动滑坡破坏类型进行了分类。何万龙教授的研究成果对我国研究山区采动损害起到了推动作用，同时为后续研究山区采动损害奠定了基础。

由于山区采动地表裂缝不仅对土地破坏力大，而且使得山区地表坡体的稳定性受到影响，极易造成滑坡等矿山环境灾害。为此，许多专家学者针对山区采动地表裂缝做了大量的研究工作。康建荣根据现场实测资料，分析了地表产生裂缝的四个阶段及其形成过程机制，揭示了采动裂缝对山区地表移动变形的影响；余学义等在对西部多个矿区地表裂缝破坏调查的基础上，应用概率积分法计算基岩顶界面的应力应变分布规律，分期了其于地表裂缝的关系，研究了开采引起黄土层地表裂缝产生的机理；韩奎峰等以山区地表下沉、水平移动预计值为主要参数，按照矢量分解与合成法则求取坡段变形预计值，将岩土力学中的临界变形值作为地表起裂判据，进而确定采动裂缝出现的坡段及单位长度内地表裂缝宽度；王晋丽以西曲矿为例，通过分析调研资料和实测数据，给出了山区采煤地裂缝的分布特征，认为地形微地貌、表土层性质及开采方法是决定山区采煤地裂缝分布特征的主要因素等。

1.3 主要研究内容

本书拟采用现场实际调查与测量、数值模拟实验、理论分析等相结合的方法对黄

土沟壑山区地表开采沉陷规律及其对大型带状建（构）筑物产生的采动损害开展研究，主要研究内容如下：

（1）结合矿区具体工作面地质采矿参数及其上方地貌情况，设计其地表移动变形观测线及其观测方案，分析其地表移动变形规律、地表下沉盆地的角量参数和概率积分预测参数。

（2）以某电厂粉煤灰皮带运输走廊为例，结合具体工作面的地质采矿参数和实际变形监测数据，分别从沿皮带走廊和垂直于皮带走廊 2 个方向，研究大型带状建（构）筑物的采动损害特点与规律。

（3）依据具体工作面的实际地质采矿条件，基于 Phase2.0 平台分别建立其走向主断面剖面的地质采矿模型和沿皮带运输走廊方向的地质采矿模型，反演工作面开采过程中，覆岩与地表应力场、位移场和破坏场的演化规律，揭示该类矿区覆岩与地表沉陷以及皮带走廊的采动损害机理。

（4）基于具体工作面开采地表移动变形实测数据，采用概率积分法，分 3 种情况对皮带下方地表移动变形进行预测，并将预测结果与实测数据进行对比分析，以印证本研究的科学性、实用性和可靠性。

1.4 研究方法与技术路线

1.4.1 研究方法

本书拟采用现场实际调查测量、数值模拟实验、理论分析等相结合的研究方法。现场实际调查测量方法是研究煤层开采地表沉陷情况的主要方法，也是取得第一手资料的根本方法。数值模拟实验可以人为控制和改变实验条件，从而确定单因素或多因素对所关心问题的影响，而且实验周期短、成本低、见效快、可视化效果好，实验结果清楚直观，实验可多次重复进行且能保存实验结果，该方法已在力学和采矿学得到广泛的应用。理论分析主要是采用概率积分法，结合实测数据对项目区地表沉陷进行预测。

1.4.2 技术路线

本书采用的技术路线如图 1.1 所示。