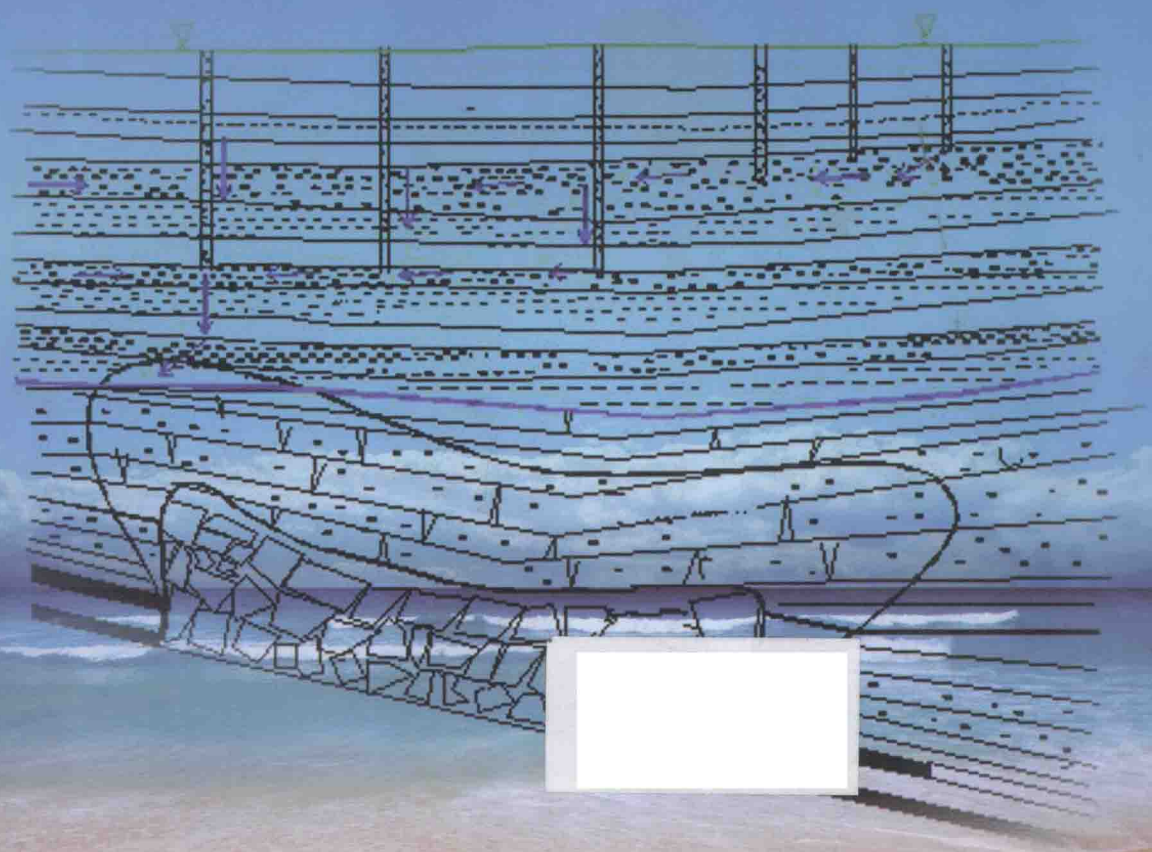


# 湖区开采观测技术

Lake District Mining Observation Technology

路明文 贾凤君 韦连波 栾元重 班训海 著

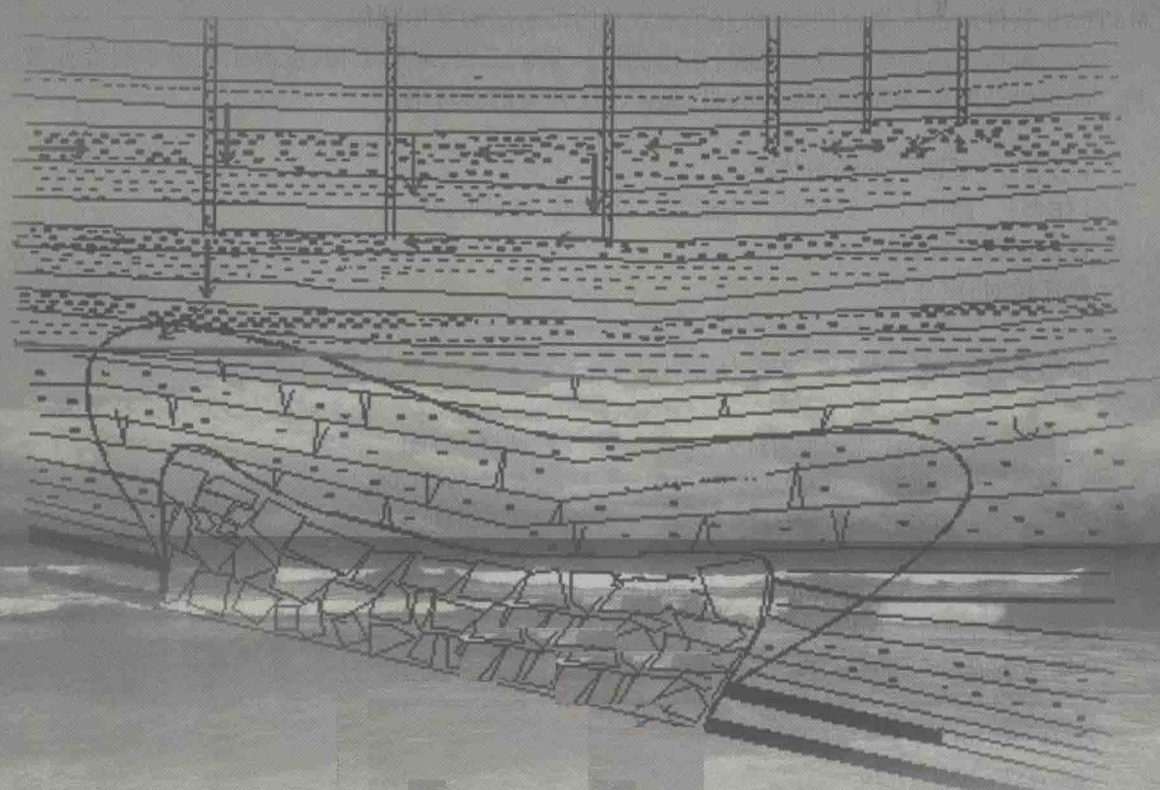


地震出版社

# 湖区开采观测技术

Lake District Mining Observation Technology

路明文 贾凤君 韦连波 栾元重 班训海 著



地震出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

湖区开采观测技术/路明文等著.——北京:地震出版社,2012.5

ISBN-978-7-5028-4079-2

I. ①湖… II. 路… III. ①湖区-厚煤层采煤法

IV. ①TD823.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第098085号

地震版 XM2641

## 内容摘要

本书采用地质分析、相似材料模拟实验、FLAC3D 数值分析、GPS-RTK 变形观测和开采验证等手段,系统地研究了微山湖水体和松散含水层复合水体下开采近距离厚煤层的有关科学问题。对工作面开采后采用双端堵水器技术进行了上覆岩体导水裂缝带高度实测;用机动船上进行 GPS-RTK 在水面上定位,并测定水深,开展湖区变形测量,通过地形差分技术求得水下变形值;采用 FLAC3D 数值模拟技术进行了各岩层变形计算,对数值模拟变形数据采用 MATLAB 软件对进行拟合回归,研究了地表及内部岩层的变形规律。

本书可作为高等学校测绘工程(矿山测量)、采矿工程、地质工程、资源工程等本科专业教材。亦可供地测采类硕士研究生教材,是矿山工作者的参考书。

(书名) 湖区开采观测技术

(作者) 路明文 贾凤君 韦连波 栾元重 班训海著

责任编辑:刘晶海

责任校对:庞亚萍

---

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:88421706

门市部:68467991

传真:68467972

总编室:68462709 68423029

传真:68467972

专业部:68467982 68721991

经销:全国各地新华书店

印刷:泰安农大印刷有限公司

---

版(印)次:2012年5月第一版 2012年5月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:260千字

印张:10.5

印数:0001~1000

书号:ISBN-978-7-5028-4079-2

定价:30.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)



路明文，男，1966年10月生，内蒙古商都县人，1989年6月黑龙江矿业学院采矿工程专业大学本科毕业，现任微山崔庄煤矿有限责任公司董事长、党委书记、总经理、高级工程师。

路明文同志自大学本科毕业后，一直扎根煤矿生产第一线从事煤矿开采的技术与管理工作，先后在微山湖矿业集团任采区技术员、区长、井长、集团公司总工程师、总经理等职位。该同志先后多次被微山县授予“优秀企业家”，“优秀共产党员”称号，2009年被济宁市授予“济宁市劳动模范”称号，2011年被山东煤矿安全监察局授予“安全生产优秀矿长”称号。



贾凤君，男，1961年3月生，1983年7月黑龙江矿业学院采矿工程专业大学本科毕业，分配在吉林省舒兰矿务局东富矿二井工作，1988年11调入微山县崔庄煤矿，先后任建井工区区长、副总工程师、矿长助理、总工程师、副总经理、常务总经理等职，现任山东省微山湖矿业集团副董事长、党委副书记、总经理。

贾凤君同志曾被评为微山县“劳动模范”，曾获济宁市“五一”劳动奖章，2011年被山东省煤炭工业局授予“优秀科技工作者”称号。



韦连波，男，1972年12月生，中共党员，大学文化，高级工程师，1993年7月毕业于山东矿业学院采矿工程专业，历任微山崔庄煤矿掘进技术员、区长、矿副总工程师，现任微山崔庄煤矿总工程师。发表科技论文10余篇，所主持科技项目获山东省煤炭科技进步二等奖，山东省科技进步三等奖，并被山东煤炭工业局授予“全省煤炭系统安全先进个人”荣誉称号。



栾元重，男，1963年5月生，博士、博士后，现为山东科技大学教授、博士生导师。主要研究方向为“工程测量理论与方法”和“灾害监测与控制技术”。先后出版了《动态变形观测预报》等四部著作，在“煤炭学报”等国内外刊物发表论文80余篇，获得国家测绘局、国家安监总局多项科技奖励，并先后多次获得山东省科技进步奖。



班训海，男，1965年12月生，中共党员，大学文化，研究员，1989年7月毕业于阜新矿业学院地测系，被分配到欢城煤矿生产技术科测量组工作，1992年4月调入崔庄煤矿，先后在崔庄煤矿技术科、地测科工作。历任测量技术员、副科长、科长、副总工程师等职，现任微山崔庄煤矿有限责任公司防治水副总工程师。

# 前 言

微山湖下近松散层提高开采上限重复开采技术,在崔庄煤矿 33<sub>上</sub> 01、33<sub>上</sub> 02、33<sub>下</sub> 01、33<sub>下</sub> 02 四个综放开采工作面中试采成功,该项实践突出了 3<sub>上</sub>、3<sub>下</sub> 煤层湖区提高开采上限重复开采与湖区变形观测技术,丰富和发展了水体下开采和湖区变形观测理论和方法,提升了上覆岩体及地表变形观测技术在指导矿山水体下安全开采中的作用。

## 一、主要内容

本书采用地质分析、相似材料模拟实验、FLAC3D 数值分析、GPS - RTK 变形观测和开采验证等手段,系统地研究了微山湖水体和松散含水层复合水体下开采近距离厚煤层的有关科学问题,其中包括:近距离厚煤层开采覆岩破坏叠加效应及规律、断层开采活化、断层错动和开裂对黏土层变形的影响、开采沉陷土体内部变形破坏、地表裂缝深度计算、地表水体和松散含水层综合影响等。

对工作面开采后采用双端堵水器技术进行了上覆岩体导水裂缝带高度实测,获得了崔庄煤矿 3<sub>上</sub> 和 3<sub>下</sub> 煤层均开采的导水裂缝带高度,并与模型实验和数值模拟结果进行了对比分析,三者的符合度比较好。

实施了湖区变形 GPS - RTK 监测技术,用机动船在水面上定位,用专用设备测定水深,按 20 个断面、点间距 30m 直接测定水下地形点标高。将原始水下地形与实测开采沉陷后水下地形进行 CAD 图形融合,并进行地形差分,求得水下沉陷区的下沉值及水下开采各种岩移角值与概率积分法岩移参数。并开展了湖区采沙引发的地质灾害监测工作。

各岩层变形进行了 FLAC3D 数值模拟,对数值模拟变形数据采用 MATLAB 软件对进行了拟合回归,研究了地表及内部岩层的变形规律。对地表下沉值选择二次多项式、三次多项式、正弦函数、四次多项式进行函数拟合,采用和方差、确定系数、校正后的确定系数、均方根误差四项标准,评价各函数方程与模拟数据的拟合效果,最终确定地表下沉最佳拟合函数方程为四次多项式函数方程。同理,确定了地表水平移动最佳拟合函数方程为正弦函数方程、内部岩层的最大下沉值最佳拟合函数方程为五次多项式函数方程、内部岩层下沉盆地边界最佳拟合函数方程为三次多项式方程,同时对各拟合函数方程的单调性、凹凸性做了分析。

## 二、章节分工

本书由微山崔庄煤矿有限责任公司总经理路明文高级工程师,微山湖矿业集团总经理贾凤君高级工程师、微山崔庄煤矿有限责任公司总工程师韦连波高级工

程师、山东科技大学博士生导师栾元重教授、微山崔庄煤矿有限责任公司副总工程师班训海研究员合作编著。

另外，山东科技大学韩李涛博士、王永老师及山东科技大学资环学院马德鹏硕士研究生、测绘学院薛白茹硕士研究生、周岩硕士研究生、姜敏硕士研究生、尹燕运硕士研究生参与了本书部分章节的编写工作。

中国矿业大学博士生导师隋旺华教授对本书的编写提出了许多宝贵意见和建议，在此，表示衷心的感谢。

该书的出版还得到了山东省自然科学基金的资助（项目编号为ZR2009EM002）。

笔者希望本书的出版，能够对测绘类、采矿类、地质类博士生、硕士生、本科生和工程技术人员在拓宽水体下开采和湖区变形测量的知识面、促进变形观测与灾害预报在提高开采上限方面的应用起到推动作用。水体下提高开采上限和湖区变形观测，涉及学科广泛，作者不可能面面俱到地深入研究，书中无疑存在缺点和不足，诚恳专家、学者批评指正。

作者

2012年5月于微山湖畔

王仁存 董二

# 目 录

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 第一章 绪论                                             | 1  |
| 第一节 研究意义及主要内容                                      | 1  |
| 第二节 近距离煤层开采覆岩破坏研究现状                                | 2  |
| 第三节 煤层开采对松散层变形破坏的影响研究                              | 5  |
| 第四节 岩层与地表变形数值模拟现状                                  | 7  |
| 第二章 矿井开采技术条件                                       | 10 |
| 第一节 矿井概况                                           | 10 |
| 第二节 井田地质特征                                         | 10 |
| 第三节 工作面底粘与基岩厚度统计                                   | 12 |
| 第四节 工作面概况                                          | 14 |
| 第三章 覆岩导水裂缝带高度预计                                    | 22 |
| 第一节 近距离煤层开采煤层综合厚度计算                                | 22 |
| 第二节 覆岩导水裂缝带高度预计                                    | 23 |
| 第三节 导水裂缝带最大高度形成时间分析                                | 25 |
| 第四章 近距离煤层开采覆岩破坏模拟研究                                | 28 |
| 第一节 数值模拟研究                                         | 28 |
| 第二节 相似材料模拟研究                                       | 33 |
| 第五章 导水裂缝带高度观测                                      | 42 |
| 第一节 井下仰上孔观测导水裂缝带高度原理                               | 42 |
| 第二节 仅采 33 <sub>上</sub> 01 工作面观测工程的布设与施工            | 45 |
| 第三节 探测结果分析                                         | 48 |
| 第四节 3 <sub>上</sub> 煤和 3 <sub>下</sub> 煤全采后观测工程布设与施工 | 55 |
| 第五节 实测数据                                           | 58 |
| 第六节 导水裂缝带观测误差分析                                    | 72 |
| 第七节 各方法结果对比分析                                      | 73 |

|      |                                                   |     |
|------|---------------------------------------------------|-----|
| 第六章  | 田岗断层探测技术 .....                                    | 74  |
| 第一节  | 钻孔的技术准备 .....                                     | 74  |
| 第二节  | 田岗断层产状分析 .....                                    | 80  |
| 第七章  | 湖区开采沉陷观测方案设计与观测方法 .....                           | 86  |
| 第一节  | 湖区开采沉陷观测方案设计 .....                                | 86  |
| 第二节  | 水下沉陷区 GPS - RTK 测量方法 .....                        | 89  |
| 第三节  | 水深测量方法 .....                                      | 92  |
| 第八章  | 湖区沉陷变形角值与岩移参数 .....                               | 96  |
| 第一节  | 主断面观测线下沉曲线绘制 .....                                | 96  |
| 第二节  | 湖区沉陷变形值与移动角值 .....                                | 98  |
| 第三节  | 一般岩移参数的确定 .....                                   | 101 |
| 第四节  | 岩移参数对比分析 .....                                    | 103 |
| 第五节  | 湖区水下开采沉陷概率积分法预计 .....                             | 104 |
| 第九章  | 地表变形数值模拟 .....                                    | 109 |
| 第一节  | 数值模型的建立 .....                                     | 109 |
| 第二节  | 3 <sub>上</sub> 煤层开采后模拟计算结果 .....                  | 110 |
| 第十章  | 采动土体变形及断层活化对土体变形的影响研究 .....                       | 114 |
| 第一节  | 煤层开采沉陷土体内部变形 .....                                | 114 |
| 第二节  | 地表土体采动裂缝深度计算 .....                                | 117 |
| 第三节  | 断层活化对上覆黏土层变形破坏研究 .....                            | 118 |
| 第四节  | 田岗断层与 SF1 断层分析 .....                              | 125 |
| 第十一章 | 地表与岩层内部变形规律 .....                                 | 143 |
| 第一节  | 拟合函数评价标准 .....                                    | 143 |
| 第二节  | 3 <sub>上</sub> 煤开采地表变形规律 .....                    | 143 |
| 第三节  | 3 <sub>上</sub> 煤开采岩层内部变形规律 .....                  | 147 |
| 第四节  | 3 <sub>上</sub> 、3 <sub>下</sub> 煤均采后地表变形规律 .....   | 150 |
| 第五节  | 3 <sub>上</sub> 、3 <sub>下</sub> 煤均采后岩层内部变形规律 ..... | 153 |
| 第十二章 | 湖区采砂灾害调查 .....                                    | 156 |
| 第一节  | 采砂活动的基本情况 .....                                   | 156 |
| 第二节  | 湖下采砂对煤矿安全生产影响的评估 .....                            | 158 |
| 第三节  | 地面塌陷坑内采砂对煤矿安全生产影响的评估 .....                        | 160 |
| 参考文献 | .....                                             | 161 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 研究意义及主要内容

### 一、研究意义

煤炭是我国的主要能源,煤炭工业是我国国民经济的支柱产业,现代科学技术的飞速发展,使得煤炭利用的新技术日趋成熟,煤炭资源得到更广泛的应用,煤炭仍将是人类生产生活中的无法替代的能源之一。在我国一次性能源消耗中,煤炭占 50% 以上,且在很长时间内,我国的能源结构不会有所改变,2005 年我国从地下采出的煤炭达 22.05 亿吨,2006 年达 23.50 亿吨,2007 年达 25.23 亿吨,2008 年更是达到 27.16 亿吨,2009 年我国煤炭产量超过了 29 亿吨。

近年来随着现代化采煤工艺的广泛应用,一次性采量大、推进速度快,造成的覆岩破坏和地表变形灾害异常严重,沉陷控制和损害治理难度极大,虽然近年来各级政府与组织注重预防和治理由地下煤炭开采所引起的破坏问题,但总体来说,煤炭开采引起的破坏及安全问题仍十分突出,岩层与地表移动研究仍是一项十分重要的工作。

随着计算机的飞速发展,同时计算数学与应用数学也有长足进步,基于这些条件,可以精确求解各种复杂的微分方程问题,开采沉陷数值模拟正逐渐成为人类研究煤矿开采岩层与地表变形的一个主要方法。

煤系岩层的结构和行为特征常表现为高度的复杂性和非线性,需要结合多种手段、多个学科及方法,才能对煤层开采后岩层与地表变形成因机理、发展演化等作出准确的预测评价,并根据此制定出科学合理的防护措施。煤矿开采数值模拟是将岩体力学、数学力学、土力学、计算机科学技术以及现代模拟技术有机地结合起来,采用模拟方法最大程度地实现岩层变形发展演化全过程的模拟,对岩层变形破坏过程和未来的发展趋势作出科学的评价和预测,并基于此,有目的地制定出合理、优化的预防措施和保护方案。

岩层与地表变形的数值模拟是开采沉陷发展的趋势与必然的结果,随着研究的深入,传统的方法和手段已经不能满足开采沉陷工程发展的需要。而由于开采沉陷中定量化研究的深入,传统的研究方法已经很难处理定量化带来的大量的力学、数学问题,尤其是其中的计算问题。将数值模拟应用于开采沉陷工程的研究,大大的拓展了研究的范围和手段,而且准确的模拟开采引起的岩层与地表变形将对指导煤层安全开采实践具有重要作用,为地下采空区的合理开挖和治理提供科学依据,对我国煤炭工业的发展、社会的稳定、生态环境的保护具有重大的现实意义和深远的社会意义。

### 二、主要内容

本书应用理论分析、数值模拟以及现场试验等技术手段对煤矿开采岩层与地表变形的规律进行研究,运用 FLAC3D 数值模拟对覆岩发育情况、地表变形情况进行模拟,主要研究内容

包括以下几个方面:

(1) 基于山东崔庄煤矿  $33_{上}01$ 、 $33_{上}02$  工作面、 $33_{下}01$ 、 $33_{下}02$  工作面的地质采矿条件,建立覆岩破坏数值模拟计算模型,采用 FLAC3D 软件对覆岩破坏发育情况进行数值模拟计算,确定冒落带、裂隙带发育高度。该煤矿三采区  $3_{上}$  煤与  $3_{下}$  煤的夹层厚度为  $7\text{m} \sim 19.5\text{m}$ ,选择  $7\text{m}$ 、 $14\text{m}$ 、 $19.5\text{m}$  三种方案再进行模拟计算,确定不同夹层厚度冒落带、裂隙带发育高度。

(2) 地表变形数值模拟计算,根据  $33_{上}01$  工作面、 $33_{下}01$  工作面的长度、宽度、顶底板岩层特征等建立数值模拟计算模型,依次计算仅  $3_{上}$  煤开采与  $3_{上}$ 、 $3_{下}$  煤均采后地表及中间岩层的变形。

(3) 基于数值模拟结果,将模型进行水平切片,输出各节点位移数据,对地表下沉值进行回归分析,确定拟合函数方程,并计算函数方程的误差,最终求得函数的标准差、均方根误差、函数方程的确定系数及校正后的确定系数。

(4) 基于数值模拟结果,将模型进行垂直切片,输出各层最大下沉值,对最大下沉值进行回归分析,确定拟合函数方程,计算函数方程的误差,最终求得函数的标准差、均方根误差、函数方程的确定系数、校正后的确定系数。

(5) 湖区 GPS-RTK 监测技术,用机动船在水面上定位,用专用设备测定水深,直接测定水下地形点标高,采用地形差分技术,求得水下沉陷区的变形值。

(6) 涉及水文地质、工程地质、开采沉陷、岩土力学等学科领域,研究问题有:

- ① 近距离厚煤层综放开采覆岩破坏的叠加效应;
- ② 采动土体变形地表裂缝发育深度;
- ③ 断层采动活化对土体内部变形及底部粘土层破坏的影响。

## 第二节 近距离煤层开采覆岩破坏研究现状

近距离煤层开采覆岩运动和破坏是一个复杂的动力学现象,其影响因素众多,对其研究存在很大的难度。几十年来,国内外学者对近距离煤层条件下的开采进行了一些研究,取得了一定的成果和经验,但对其研究非常有限,对于覆岩破坏和导水裂隙带的高度问题规程只是采用等效采高借用单一煤层开采的公式,难以做到较准确的预测,同时由于采矿地质条件的复杂性和差异性,在生产实践中又产生许多新的问题,目前仍处在经验积累和理论探索过程之中。

国外对导水裂隙带的理论也进行了长期研究,并各自根据本国实际制订了相关规程与规定。主要成果有:耳哈西(1982)的“自然斜面理论”;法国人 Fayol(1885)的“圆拱理论”;豪斯(1889)的“分带理论”;Halbaum(1903)将采空区上方的岩层看作是悬臂梁;Fckardt(1913)把岩层移动过程视为各岩层逐渐弯曲的结论;西德学者克拉茨(H. Kratzsch)(1961)总结概括了煤矿开采沉陷的预计方法,并发表《采动损害及其防护》;英国矿业局于1968年就颁布了海下采煤条例,对覆岩的组成、厚度、煤层采厚以及采煤方法等作了相应的具体规定;日本曾有11个矿井进行过海下采煤,海下采煤的水患防治措施严密,安全规程针对冲积层的组成与赋存厚度作出了允许与禁止开采规定;苏联于1973年出版了确定导水裂隙带高度方法指南,1981年颁布了有关水体下开采的规程,根据覆岩中黏土层厚度、煤厚、重复采动等条件的变化来确定安全采深。

在解决煤层群开采问题时,学者们首先试图给“近距离煤层”这一概念下一个定义。前苏联学者,根据煤层间的距离来作为确定能否采用上行顺序开采法的条件,主要是以煤层开采时

顶板破坏带高度来定义“近距离煤层”,并给出破坏带高度计算公式;在总结上行顺序开采试验的基础上,以开采下部煤层时对上部煤层是否发生影响以及影响程度确定出上行顺序开采煤层群的基本要素和条件。我国“煤矿安全规程”中对近距离煤层定义为:煤层群层间距离较小,开采时相互有较大影响的煤层。但是目前根据影响程度来确定为近距离煤层的判别标准还没有统一的确定方法,该定义概念尚未十分明确。

近距离煤层开采时,根据各煤层群开采顺序可分为下行式开采和上行式开采两种。国内外学者对上行开采研究基本是围绕煤层间距和采厚进行,把煤层层间距离作为决定能否采用上行顺序开采的主要衡量指标。一种观点认为上层煤应处于下部煤层开采形成的围岩弯曲下沉带,层间距为下层煤厚度的40~50倍以上;另外一种观点认为只要处于不规则垮落带上方即可,但垮落带高度的计算差异较大。

以往研究近距离煤层下行开采问题,大部分是煤层间距相对较远,实际生产中采场围岩控制方面与单一煤层开采变化不大。因此,主要是运用已有单一煤层开采的研究成果,关注的则是下部煤层巷道的合理位置。陆士良等依据大量实测资料,总结出巷道与煤柱边缘间水平距离 $S$ 与上部煤层间垂距 $Z$ 的经验关系。近距离煤层回采巷道布置主要有重叠布置、内错式布置和外错式布置三种形式。一般认为在煤柱或煤体下方的一侧为增压区,应力高于原岩应力,在采空区下方一侧为卸压区,应力低于原岩应力。为了提高巷道稳定性,使下部煤层巷道处于低应力区,往往内错一定距离布置下部煤层巷道,内错水平距离常用计算公式为:

$$S \geq \frac{Z}{\sin(\alpha + \theta)} \sin \beta \quad (1-1)$$

式中: $\alpha$ 为煤层倾角; $\theta$ 为 $\beta$ 角的余角, $\theta = 90^\circ - \beta$ ; $\beta$ 为煤体影响角,其值可变化 $25^\circ \sim 55^\circ$ 之间。

目前公式(1-1)在实际生产中被普遍运用,成为选择下部煤层巷道位置及巷道围岩控制的主要依据。

史元伟等采用解析法、数值分析方法对近距离煤层开采的相互影响进行研究,得出了3层4层煤开采时采场围岩应力分布规律、应力集中程度及其相互之间的影响范围和影响程度;模拟结果为合理确定煤层群开采顺序以及回采巷道和区段煤柱合理布置提供了参考。

在我国生产实践中近距离煤层的开采方式主要有联合开采、单层逐层开采和含夹矸煤层的综放开采。过去,由于我国采煤机械化程度较低,尤其是综采的比重不大,回采工艺落后,采煤工作面的单产普遍不高,一个大中型矿井数个采区、多个工作面同时开采才能保证要求的产量,通常需对煤层群中的数个煤层实行联合开拓与准备,联合开采主要是集中在联合开采合理错距的研究。根据岩层移动理论,给出上部煤层工作面超前下部煤层工作面的错距应满足以下经验公式:

$$X_{\min} = M \cdot \cot \delta + L + b \quad (1-2)$$

式中: $M$ 为煤层间距; $\delta$ 为岩石移动角; $L$ 为安全距离; $b$ 为上部煤层回采面的最大控顶距。

近年来,放顶煤技术在我国得到迅速发展和广泛普及,使得近距离煤层群采用综放开采成为可能。为此我国学者从理论和实践上进行了有益的探索,对夹矸层顶煤冒放性进行了研究。并结合现场实际提出了解决含夹矸厚煤层综放开采的技术措施。张顶立在力学性能试验的基础上,对煤矸组合系统的力学特性进行了深入的分析,确定矸石层块度,载荷层厚度及软化系数对夹矸极限厚度的关系。贾永军采用材料力学的方法确定顶煤中夹矸层的极限厚度为:

$$h_c < \frac{3\gamma + \sqrt{9\gamma_g^2 + 12\gamma_m h_m R_i}}{2R_i} \quad (1-3)$$

式中: $h_c$  为夹矸层厚度,m; $\gamma_g$  为夹矸层密度, $\text{MN}/\text{m}^3$ ; $\gamma_m$  为顶煤密度, $\text{MN}/\text{m}^3$ ; $h_m$  为夹矸层上方顶煤厚度,m; $R_i$  为夹矸层抗压强度,MPa。

已有的研究表明,煤层夹石对顶煤冒放性的影响比较复杂,其影响程度取决于夹矸层的岩性(即强度)、层厚、层数及空间位置。夹矸层较厚且强度较高时,可能出现夹矸层的悬露或破碎后块度较大而影响放煤效果;另一方面,夹矸层较厚时放煤含矸率大,影响煤质,因此对于近距离煤层采用放顶煤开采受一定客观条件的限制,不能完全解决近距离煤层群开采存在的问题。特别是对于“两硬”条件下(顶板硬和煤层硬)采用综放开采更不适合。

山东华源公司矿井三层煤的开采,山东孙村矿的前组二层煤,对近距离煤层开采侧向支承压力分布的相似模拟试验研究,在上煤层采场两侧向的支承压力分布及集中程度、峰值距煤壁的距离、支承压力的影响范围;一定范围内底板中集中应力的传递及渐衰减特征。研究了上煤层开采后下煤层开采过程中,采煤工作面两侧应力降低区范围、峰值应力的位置、应力集中的程度以及与上煤层开采时的对比关系。同时在近距离煤层开采工作面支护技术方面进行了研究,总结了近距离煤层开采工作面不同于一般煤层开采面的矿压特征,大同王村矿就对近距离煤层开采的巷道布置与施工、支护方式的选择、工作面设备配套与生产工艺、矿压显现规律等进行了研究阐述,生产实践表明王村矿近距离煤层采用的开采工艺技术是可行的。对于近距离多煤层开采时岩层垮落过程的规律也进行过数值模拟分析,基本上反映了多煤层开采时采动岩体的动态发展过程。

康全玉等通过对平顶山煤业集团公司八矿多煤层采区同采条件下,下部煤层开采对上部煤层开采影响的相似材料模拟试验结果的分析,得出了下组煤层开采时上覆岩层的移动及变形规律、有关岩层移动参数、上组煤层巷道变形预计方法及采动影响的时空关系。夏筱红等针对多煤层联合开采的特点和覆岩的工程地质特征,采用工程地质力学模型实验、数值模拟计算相结合的综合研究方法,分析了多煤层开采的采动影响及岩层动态断裂机理,得出了有关岩层移动参数和多层煤同采时应力分布状态。

综上所述,单一煤层开采围岩活动规律和控制的理论和实践研究近年来有了很大进展,然而对近距离煤层开采研究相对较少,特别是近距离煤层的开采覆岩破坏规律的系统研究更不多见。

由于煤层层间距离不同,相互间开采的影响程度各异,对于煤层群开采当煤层层间距离较大时,上部煤层开采后对下部煤层的开采影响程度很小,其矿压显现规律,开采方法受上部煤层开采影响小,与普通单一煤层开采基本相同。但是,随着煤层间距离减小,上下煤层间开采的相互影响会逐渐增大,特别是当煤层间距很近时,下部煤层开采前顶板的完整程度已受上部煤层开采而遭到损伤,且因上部煤层开采方法的不同,使得下部煤层开采顶板的整体力学环境亦不同,例如:当上部煤层采用长壁全部垮落法管理顶板时,下部煤层开采时的顶板为上部煤层开采而遭到损伤的层间岩层和上部煤层开采已垮落的矸石,下部煤层开采时的顶板边界条件为散体边界条件;若上部煤层开采为刀柱采煤法,上部煤层开采后采空区残留的诸多煤柱在底板形成集中压力,下部煤层开采时的顶板边界条件为集中载荷边界条件。这些不同的边界条件,必然使下部煤层开采出现了许多新的矿山压力现象,表现在顶板的活动规律、覆岩破坏规律、压力传递规律及矿压显现程度等各方面。而现有单一煤层开采和近距离煤层开采工作面顶板岩层控制的经验和理论,不能很好地解释这种矿压现象及机理,使得在近距离煤层开采的过程中,存在许多技术难题。生产实践表明,上部煤层采出后,进行下部煤层开采时,工作面极易发生顶板冒、漏事故,进而造成与上部煤层采空区沟通,工作面漏风,严重影响着矿井正常

生产和生产能力的发挥。

综上所述,近距离煤层开采主要存在的问题是:①在矿山压力研究方面,工作面矿山压力显现规律及支架——围岩关系不清晰,支护选型设计缺乏科学依据。②在安全生产方面,下部煤层顶板受上层采动损伤,易漏冒顶,严重时造成支架压埋,漏风严重,形成火灾隐患;③在覆岩破坏方面缺乏系统的理论和实测研究,导致对水体下开采此类煤层决策的盲目性,要么导致在开采中生产成本低,经济效益低,煤炭回采率低,资源浪费严重,要么存在安全问题严重影响到矿井安全。

因此,近距离煤层开采方面还存在许多需要深入研究的问题,例如:①近距离煤层采场的覆岩结构、覆岩运动及破坏规律;②近距离下部煤层开采矿压显现规律;③近距离煤层开采采场围岩控制理论和技术;④近距离下部煤层开采合理巷道布置形式及支护方式;⑤近距离煤层采煤工艺方式及其系统可靠性和开采技术保障体系等等。

### 第三节 煤层开采对松散层变形破坏的影响研究

国内外在厚含水松散层下开采覆岩移动方面的论述较多,但长期以来,对开采引起的土体尤其是隔水层内应力、变形、位移等方面的研究还不多。

20世纪80年代以来,在对有厚松散层存在的煤矿观测表明,地表移动变形表现出一些独特的现象,如下沉系数大于1.0,地表沉陷范围扩展,边界处水平移动值大于垂直移动值,活跃期剧烈而集中,地表沉陷稳定所需时间长等一系列独特的工程地质现象。

1990年之前,研究人员的主要注意力大都放在厚松散含水层下开采沉陷的特殊规律、参数及描述方法的修正上。近20年来,先后有一些学者对这些现象产生的机理作了理论和实验上的探讨。一般认为,除开采引起的地表沉陷外,矿井开采造成松散含水层水位疏降,引起松散层压缩,也造成地表沉陷。实际上,含水层失水只是开采沉陷造成的土体内部的一系列变化过程的一个方面。中国矿业大学狄乾生(1991)提出厚含水层下开采土体产生团结的设想。隋旺华(1999)认为超静孔隙水压力的产生与消散的水土相互作用是造成厚松散层地区开采沉陷特殊性的更为普遍的机理。

从开采沉陷角度来看,一方面由于地下开采,造成原岩应力场变化,产生附加应力,在高附加应力作用下,黏土层容易产生较大的塑性变形,并且由于黏土层孔隙率高而孔隙小,渗透性极差,容易产生较高的超静孔隙水压力,不容易及时消散。采空区上方土体中水平应力为压缩应力,向上水平压应力范围渐趋缩小,在近采空区边界上方土层内水平应力则为拉伸应力,直至地表水平拉伸应力范围扩大为正曲率区。由此可见在采空区上方中、下部土层内产生了侧向水平压缩应力,而在煤柱至采空区边界上方土体内处于水平应力拉压交变带,侧向水平压缩应力也将致土体的压缩变形和位移。

另外,由于土颗粒骨架在持续荷载作用下发生蠕变引起的次固结沉降对黏性土的变形也起着相当大的作用,它是厚松散层下开采固结沉陷的重要原因之一。一般认为,次固结现象是由于颗粒之间内部摩擦阻力、黏滞流动和结合水排出的延滞作用造成的。开采土体固结沉陷中主、次固结同时产生,当主固结完成后,随着时间的推移,次固结沉陷将愈来愈起着重要的作用,所需时间往往达几年、几十年之久,这也是造成厚松散层下开采地表移动期长的重要原因。

从现有的文献来看,对厚松散层下开采土体变形机理的研究不多,且主要集中在松散含水层或土体的固结沉陷,而对开采引起的地表裂缝的形成及分布规律,以及断层错动对上覆黏土

层的破坏还没有清晰的认识。

隋旺华在长江科学院的大型离心机上进行了开采岩土层移动变形的模型试验,模拟了厚松散层地区的主要条件和岩层移动变形特征,对土体的沉降特征和机理给出了比较令人满意的解释。

地表土体在开采过程中会产生不均匀变形,局部产生拉应变,当土体单元的拉应变达到或超过极限拉应变时,土体产生开裂,并不断向深部扩展。现场实测表明,开采引起的地表拉裂缝的深度在一定的范围之内,目前的资料显示最大一般不超过 10m。另外,在断层发育区域采煤需要考虑断层错动造成上部含水层与井下采空区导通的影响。在有底部黏土层保护的情况下,分析断层错动对底部黏土层破坏的影响是必要的。然而,现有资料在这方面的研究还有欠缺,对诸如此类现象的解释需要借助模型试验手段进行系统研究。

近几十年来,随着计算机应用的发展,数值计算方法在岩土工程问题分析中迅速得到了广泛应用,大大推动了岩土力学的发展。常见的数值方法有:有限单元法、有限差分法、离散元法、边界元法、加权余量法、半解析元法、刚体元法、非连续变形分析法、无界元法以及流行元方法等。

土体本构模型的建立是通过试验手段,确定土的屈服条件,以及选用合理的试验参数,再引用塑性力学的基本理论,从而建立起本构模型。本构模型还需要通过试验与现场测试的验证,这样才算形成一个比较完善的本构模型。而一个合理的本构模型应该具备理论上的严格性、参数上的易确定性和计算机实现的可能性。

土体本构模型有上百种,但常用的只有几种,如 Mohr - Coulomb 理想弹塑性模型、Drucker - Prager 模型、Cam - clay 模型、Duncan - Chang 模型等。随着土体本构特性研究的深入,考虑土的结构性、各向异性等的本构关系逐渐被提出。

材料参数是决定数值计算结果是否符合实际的另一决定性因素。一般需要结合室内实验获得的土样物理力学指标和现场监测数据来试算调参,或者通过反分析方法等来获得模型所需的参数。

本项目研究的主要对象是黏土隔水层,根据经验比较可取的经典本构模型有 Cam - Clay 模型、Mohr - Coulomb 模型等,地层参数主要依据室内试验结果来选取。

有限元法和有限差分法等都基于连续介质假设,而土体在宏观上的特性往往能够满足这种假设,但是由于厚松散层所涉及到的深部土的工程特性研究较少,现有的本构模型未必能正确反映其应力应变特性,在对其研究时可辅以其其它的数值分析方法进行。

周健、廖雄华等利用颗粒程序对砂土和黏性土进行了初步的室内试验仿真研究,取得了一些探索性的成果。曾远(2006)对砂土和黏性土样进行了大量的颗粒流试验,得到一系列细观参数与宏观参数的定性关系,并就土坡破坏剪切带的形成进行了模拟。M. Cai 等(2006)将有限差分程序 FLAC 和颗粒程序 PFC 进行耦合,对一个地下硐室进行了分析。Jeoungseok Yoon(2006)运用颗粒程序 PFC 对岩石的单轴抗压实验进行了模拟分析,得出的结果与室内试验吻合。周健(2008)结合小比例尺细观模型试验,利用基于散体介质理论的颗粒流方法,考虑流固耦合作用,对砂土管涌的发生发展过程进行模拟,结果与有关的模型试验较吻合。颗粒流方法是离散单元法的一种,其在散粒体数值研究方面有独特的优势,能够根据颗粒及粒间胶结材料的物理力学参数来自动反映散粒体的本构关系,直观模拟材料的变形和破坏;但它的缺点也是明显的,如其所需要的细观参数目前还难以与宏观参数对应,应力边界条件的施加也不方便等,在很大程度上限制了这种方法的推广。

## 第四节 岩层与地表变形数值模拟现状

### 一、数值模拟发展与现状

近几十年来,随着计算机应用的发展,数值计算方法在岩土工程问题分析中迅速得到了广泛应用,大大推动了岩土力学的发展。目前,岩层与地表变形中常用的计算机数值分析方法有两种,一种方法是基于连续介质力学的方法,包括有限元法、边界元法、有限差分法,另一种方法是基于非连续介质力学的方法,比如离散元法。

有限元法的基础是最小总势能变分原理,将问题的求解域划分成若干大小有限的单元,并在单元上设置节点,在节点上定义求解的未知量,单元之间仅节点处相互联结。根据适当的物理场变分原理,把问题的微分方程转化为积分方程,积分方程的求解归结为在单元上的积分,从而把求解微分方程的场问题转化为单元积分,并最终转化为求解有限的单元节点未知量的代数方程组的问题。

边界元法是在定义域的边界上划分单元,用满足控制议程的函数去逼近边界条件。在利用边界元法解非线性问题时,遇到同非线性项相对应的区域积分,这种积分在奇异点附近有强烈的奇异性,因此使求解遇到困难。

离散元法是假定离散的单元是刚性的,各块体单元通过块体间的角点或接触点相互联结,由运动方程式计算不平衡力所引起的速度和位移,结果用以评价结构是否已经破坏,或得出最终稳定时的累计位移。

有限差分法是把问题的求解域划分成网格,并在网格的节点上定义求解的未知量,用差分近似微分把微分方程换成差分方程。因此,有限差分法是利用数学上的近似,以求解差分网格上未知量的代数方程组取代求解微分方程。有限差分法是将问题的基本方程和边界条件以简单、直观的差分形式来表述,使得其更适用于在工程实际中应用。

### 二、岩土及采矿工程问题数值模拟方法

土体本构模型的建立是通过试验手段,确定土的屈服条件,以及选用合理的试验参数,再引用塑性力学的基本理论,从而建立起本构模型。本构模型还需要通过试验与现场测试的验证,这样才算形成一个比较完善的本构模型。而一个合理的本构模型应该具备理论上的严格性、参数上的易确定性和计算机实现的可能性。

土体本构模型有上百种,但常用的只有几种,如 Mohr - Coulomb 理想弹塑性模型、Drucker - Prager 模型、Cam - clay 模型、Duncan - Chang 模型等。随着土体本构特性研究的深入,考虑土的结构性、各向异性等的本构关系逐渐被提出。

材料参数是决定数值计算结果是否符合实际的另一决定性因素。一般需要结合室内实验获得的土样物理力学指标和现场监测数据来试算调参,或者通过反分析方法等来获得模型所需的参数。

本项目研究的主要对象是黏土隔水层,根据经验比较可取的经典本构模型有 Cam - Clay 模型、Mohr - Coulomb 模型等,地层参数主要依据室内试验结果来选取。

有限元法和有限差分法等都基于连续介质假设,而土体在宏观上的特性往往能够满足这种假设,但是由于厚松散层所涉及到的深部土的工程特性研究较少,现有的本构模型未必能正

确反映其应力应变特性,在对其研究时可辅以其它的数值分析方法进行。

数值模拟用于覆岩破坏研究已经非常普遍,无论是理论研究还是现场工程课题都较多地采用了此方法,例:煤科院北京开采所利用有限元反演分析进行了兴隆庄矿厚煤层分层开采的反演计算,利用离散元和有限元进行了放顶煤条件下的覆岩破坏模拟;疏开生、隋旺华等利用有限元程序中材料非线性模式和拉断计算屈服条件对覆岩破坏的发育进行了研究;王遗南利用附加主应力场分析法及主应力比值法进行了有限元的模拟研究;张文泉等利用应力分析法,根据双向受拉区边界处的应力值及岩体强度值给出岩体破坏情况,对南屯煤矿综放开采进行了有限元模拟研究。张庆松利用有限元对覆岩破坏进行反演,对覆岩不同层位的破坏进行了研究。王泳嘉等将离散元和边界元应用于开采沉陷中的应力、位移、变形的研究。麻风海应用离散元法研究了岩层移动的时空过程。唐春安给出了线弹性有限元法等等。虽然,数值模拟研究中存在参数及边界条件确定困难的问题,并导致计算结果不可能与实际完全吻合,但是,这些模拟对覆岩破坏规律的研究及工程实践都起到了一定的指导作用。

用基于有限差分程序的 FLAC3D 数值分析软件进行数值模拟,克服了以往其他方法需要确定一些既定参数的缺点,无需作任何假设和确定一些关键的参数,是建立在客观反映原型和模拟开挖过程力学效应的基础上的,模型越能反映原型的客观条件,就越能准确地预计开采引起的地表变形。FLAC3D 还有性能优良的后处理工具,可以绘制多种曲线和图形,其中包括等应力线、等位移线、弹塑性破坏状态图、应力实体图、位移实体图等,为用户分析模拟结果提供了极大的方便。此外,FLAC3D 程序建立在拉格朗日算法基础上,特别适合模拟大变形和扭曲。

根据有限差分法的特点,考虑到煤矿岩体的非均质、非线性等特点,同时也因为 FLAC3D 能有效地处理复杂的工作面边界、分析复杂结构以及能形象地模拟煤层开挖过程等诸多优点,本文选用 FLAC3D 进行数值模拟计算。

### 三、覆岩破坏的其他研究方法

#### 1. 经验统计和类比

利用与本矿区地质和开采条件相近的其它矿区的数据对照分析,确定本矿区覆岩破坏发育情况;或者根据已总结出的各类采矿地质技术条件下经验公式直接套用。但此类方法由于难以找到完全相同类比条件,而且经验公式中往往都用中误差( $\pm 3 \sim 8.9\text{m}$ )的形式来反映所在条件下的不确定情况。用简单的覆岩分类不能反映地质条件的差异大,另外许多地质特征,如岩体结构等都没有反映在预计公式中。因此,此法在应用与没有实际观测资料的矿区,当地质采矿条件差异比较大的时候,只能作为解决实际问题的参考。许延春等在总结前人经验的基础上,提出了利用覆岩岩体性质综合评价系数——“P”系数法预计导水裂缝带高度,在前人经验公式基础上进一步考虑覆岩岩性。

#### 2. 相似材料模拟

相似材料模拟也是目前广泛采用的研究手段,煤科院北京开采所对福建、兖州、淮南矿区条件进行了模拟研究,取得了许多现场实测及数值模拟不能得到的成果。马庆云、钟道昌、汤建泉等利用相似材料模拟进行了覆岩运动与破坏的研究,张永吉等进行了综放开采覆岩破坏及顶煤垮落的相似模拟研究,揭示了覆岩破坏的模式、超前支承压力与覆岩破坏关系、覆岩破坏损伤发展过程、断裂带、裂隙贯穿带特征等。张俊英采用相似材料模型实验与有限元数值模拟相结合的综合研究方法,得到了多煤层条带开采的移动变形规律,岩层内波浪沉降发育规律