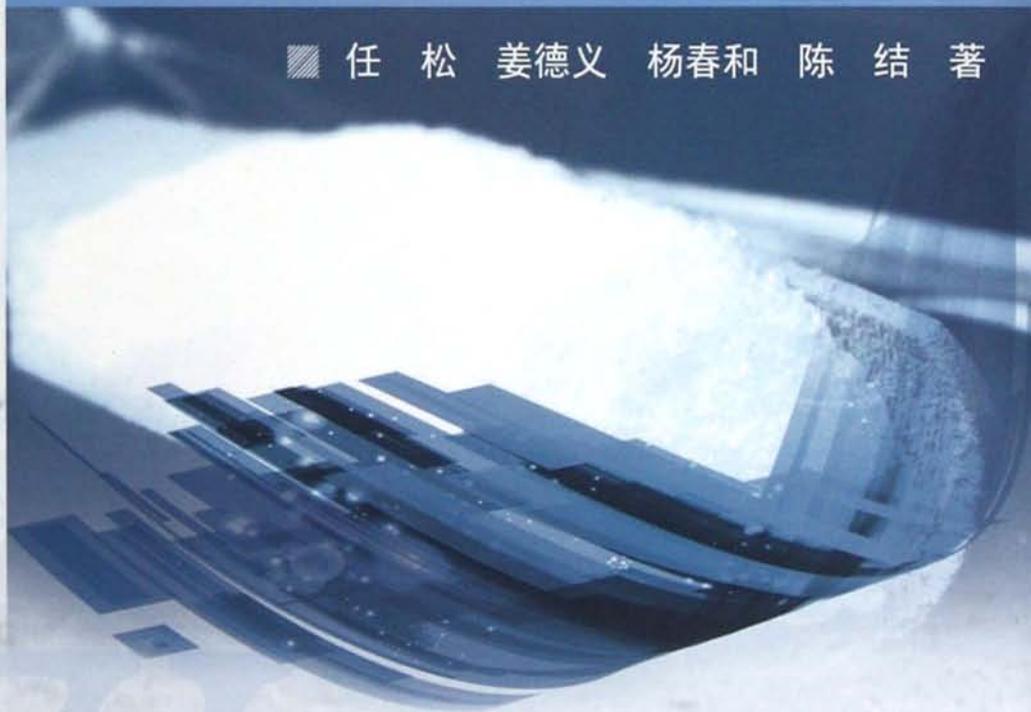


# 岩盐水溶开采沉陷 及溶腔稳定性

YANYAN SHUIRONG KAICAI CHENXIAN  
JI RONGQIANG WENDINGXING

■ 任 松 姜德义 杨春和 陈 结 著



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

# 岩盐水溶开采沉陷及溶腔稳定性

任 松 姜德义 杨春和 陈 结 著

重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本书深入系统地介绍了岩盐水溶开采沉陷和溶腔稳定性的相关内容。包括岩盐水溶开采沉陷的机理、相似材料模拟试验、数值计算及软件开发、预测理论及方法,以及溶腔稳定性影响因素、顶板失稳判据、长期稳定性评估模型等内容。本书最后对我国第一个岩盐地下储库——金坛岩盐储库进行了地表沉陷预测。

本书可供从事矿山开采沉陷、岩盐地下储库等方面的科研人员和工程技术人员参考,也可作为高等学校矿山开采沉陷学的教材或教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

岩盐水溶开采沉陷及溶腔稳定性/任松等著. —重庆:重庆大学出版社,2012.5

ISBN 978-7-5624-6612-3

I. ①岩… II. ①任… III. ①岩盐开采—水溶采矿—沉陷性—研究②岩盐开采—水溶采矿—稳定性—研究 IV. ①TD871

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 061222 号

### 岩盐水溶开采沉陷及溶腔稳定性

任 松 姜德义 杨春和 陈 结 著

策划编辑:曾显跃

责任编辑:李定群 邓桂华 版式设计:曾显跃

责任校对:贾 梅 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617183 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:10 字数:250千

2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷

ISBN 978-7-5624-6612-3 定价:38.00元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换  
版权所有,请勿擅自翻印和用本书  
制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 前言

岩盐因其优良的性能,成为能源储存的理想介质。近年来,我国规划了大规模的岩盐溶腔地下储库。这些储库的建设均采用水溶法。大规模群集的地下巨大腔体将会导致严重的地表沉陷。岩盐水溶开采沉陷具有其特殊性,主要表现为采空区形状复杂、预留矿柱难度大、开采沉陷为多个独立溶腔共同作用的结果。本书采用模型试验、数值计算、理论推导的方法对岩盐水溶开采沉陷这一问题进行了系统深入的研究。

本书共分为7章:第1章,介绍了国内外关于开采沉陷的研究现状;第2章,分析了开采沉陷的机理及水溶开采沉陷的特点;第3章,采用相似材料模拟实验研究了岩盐水溶开采沉陷的岩层损伤演化过程、岩层移动变形规律、层面效应、分层特征及破碎岩体尺寸特征等内容;第4章,开发专门的水溶开采沉陷有限元软件,研究了岩盐水溶开采过程中的层理效应、岩层倾角效应、断层效应和多溶腔影响规律等内容;第5章,基于随机介质理论给出了岩盐水溶开采沉陷的分层传递新概率积分三维预测模型;第6章,分析了溶腔稳定性的影响因素,给出了溶腔顶板、矿柱失稳的突变判据,建立了溶腔储库运营期稳定性综合评价模型;第7章,应用第5章的预测模型对金坛溶腔储气库的地表沉陷进行了预测。

由于作者水平有限,书中内容难免存在缺点及不当之处,敬请读者批评指正。

作者

2012年2月

# 目 录

第1章 绪 论 .....	1
1.1 开采沉陷机理和规律 .....	1
1.2 开采沉陷预测理论和方法 .....	3
1.3 开采沉陷控制理论及方法 .....	5
1.4 岩盐水溶开采沉陷 .....	7
1.5 开采沉陷研究存在的不足及发展趋势 .....	8
第2章 开采沉陷机理及岩盐水溶开采沉陷特点 .....	9
2.1 岩体内应力状态 .....	9
2.2 地下开采引起的岩层移动形式 .....	10
2.2.1 弯曲 .....	10
2.2.2 冒落 .....	10
2.2.3 片帮 .....	11
2.2.4 滑移 .....	11
2.2.5 滚动 .....	11
2.2.6 底鼓 .....	11
2.3 岩层移动稳定后采动岩层内的三带 .....	12
2.3.1 冒落带 .....	12
2.3.2 裂隙带 .....	13
2.3.3 弯曲带 .....	13
2.4 地表移动破坏形式 .....	13
2.5 地表盆地形成机理及特征 .....	14
2.5.1 地表移动盆地的形成 .....	14
2.5.2 充分采动 .....	15
2.5.3 非充分采动 .....	15
2.5.4 地表移动盆地的特征 .....	16
2.5.5 岩盐水溶开采下沉移动盆地 .....	16
2.6 地表移动盆地移动和变形机理分析 .....	16
2.6.1 单点移动分析 .....	16

2.6.2	主断面地表移动和变形分析及对建筑物的影响	17
2.7	岩体初始损伤对开采沉陷影响的力学机制研究	19
2.7.1	岩体初始损伤对开采沉陷的影响	19
2.7.2	岩体初始损伤影响开采沉陷的力学机制	19
2.7.3	损伤量的测量方法	20
2.8	岩盐水溶开采沉陷的特点分析	21
<b>第3章</b>	<b>岩盐水溶开采沉陷相似材料模拟实验</b>	<b>23</b>
3.1	实验目的及方案	23
3.1.1	实验内容及目的	23
3.1.2	实验方案	24
3.1.3	实验设备及耗材	25
3.2	测量系统	25
3.2.1	模型力学参数及损伤量测量	25
3.2.2	岩层位移测量方法及原理	27
3.3	相似原理及相似准则	29
3.3.1	相似原理	29
3.3.2	量纲分析法及步骤	29
3.3.3	相似准则	30
3.4	相似比的确定	31
3.5	材料配比实验	32
3.6	模型制作	35
3.7	水的处理	36
3.8	开采及测量	36
3.9	实验误差及修正	37
3.10	实验结果及分析	39
3.10.1	岩层损伤演化过程	40
3.10.2	岩层移动变形	41
3.10.3	开采沉陷的层面效应及分层特性	43
3.10.4	岩层破碎岩体尺寸特征	43
<b>第4章</b>	<b>水溶开采沉陷有限元数值模拟</b>	<b>45</b>
4.1	2D-Sink 的特点及实现	45
4.1.1	有限元法的开挖	46
4.1.2	非线性接触元	47
4.1.3	单元破坏判断条件及处理	49

4.1.4	垮塌破碎岩体充填效果模拟 .....	51
4.1.5	渗透作用下的等效节点力的计算 .....	52
4.1.6	材料非线性问题处理方法 .....	53
4.1.7	非线性方程组的解法 .....	56
4.1.8	线性方程组的数值解法 .....	57
4.2	水溶开采沉陷有限元数值模拟 .....	59
4.2.1	地层条件及力学参数 .....	59
4.2.2	模型建立 .....	59
4.2.3	模拟结果及分析 .....	62
<b>第5章</b>	<b>分层传递新概率积分三维预测模型 .....</b>	<b>68</b>
5.1	概率积分方法 .....	68
5.1.1	基本原理 .....	68
5.1.2	概率积分法的缺点及改进 .....	72
5.2	新概率积分三维预测模型 .....	73
5.2.1	单元开采新概率积分三维模型 .....	73
5.2.2	新概率积分三维预测模型 .....	76
5.3	新概率积分三维预测模型参数及获取 .....	78
5.3.1	主要影响半径及力学获取途径 .....	79
5.3.2	下沉系数、水平移动系数的确定 .....	80
5.4	分层传递新概率积分三维预测模型 .....	81
5.5	分层传递新概率积分三维预测模型的数值解法 .....	82
5.5.1	地表下沉数值解算公式 .....	82
5.5.2	延指定方向的地表倾斜数值解算公式 .....	83
5.5.3	延指定方向的地表曲率数值解算公式 .....	84
5.5.4	延指定方向的地表水平移动数值解算公式 .....	85
5.5.5	延指定方向的地表水平变形数值解算公式 .....	85
5.5.6	分层传递模型的数值解法 .....	85
5.6	多溶腔开采沉陷预测模型 .....	85
5.7	开采沉陷动态预测模型 .....	86
5.7.1	模型原理 .....	86
5.7.2	时间影响因素的确定 .....	86
<b>第6章</b>	<b>岩盐溶腔稳定性 .....</b>	<b>88</b>
6.1	溶腔稳定性的主要影响因素 .....	88

6.1.1	地应力的大小及方向对溶腔稳定性的影响	88
6.1.2	岩体的物理力学性质对溶腔稳定性的影响	89
6.1.3	地下水对溶腔稳定性的影响	89
6.1.4	地质构造对溶腔稳定性的影响	90
6.1.5	开采层厚度对溶腔稳定性的影响	90
6.2	岩盐溶腔稳定性突变模型	91
6.2.1	单溶腔顶板大变形失稳突变模型	91
6.2.2	连通井溶腔顶板失稳临界突变分析	94
6.2.3	井组溶腔间矿柱稳定性突变模型	97
6.3	溶腔储气库运营期稳定性综合评价模型	100
6.3.1	体系设计及评价指标	100
6.3.2	稳定性等级标准及指标评分方法	101
6.3.3	评价等级对应指标的量值	103
6.3.4	确定评价指标权重	105
6.4	金坛西 1 储气库稳定性可拓法评价	106
6.4.1	可拓法及评价步骤	106
6.4.2	金坛西 1 储气库运营期稳定性待评物元	108
6.4.3	西 1 储气库可拓法评价及结果	108
6.5	金坛西 1 储气库稳定性模糊综合评价	111
6.5.1	模糊综合评价及评价过程	111
6.5.2	西 1 储气库模糊综合评价及结果	112
<b>第 7 章 金坛溶腔储气库的地表变形预测</b>		114
7.1	金坛盐矿地质情况	114
7.1.1	区域构造	114
7.1.2	地层沉积特征	116
7.1.3	盐岩层特征	117
7.2	溶腔建腔及长期营运地层损失	120
7.2.1	建腔过程地层损数值模拟研究	120
7.2.2	溶腔储库营运期的地层损失计算	127
7.3	溶腔储气库运营期地层损失导致地表沉陷预测	129
7.3.1	典型溶腔 1——东 1 井	129
7.3.2	典型溶腔 2——东 2 井	130
7.4	单溶腔储库破坏失稳导致地表沉陷预测	133
7.4.1	典型溶腔 1——东 1 井	133
7.4.2	典型溶腔 2——东 2 井	133

7.5 多溶腔油气储库地表沉陷预测 .....	135
7.5.1 4 溶腔 20 年收缩变形导致的地表沉陷预测 .....	136
7.5.2 4 溶腔破坏失稳导致的地表沉陷 .....	138
7.6 溶腔储库地表沉陷动态预测 .....	139
7.6.1 单井——东 1 井地表动态预测 .....	139
7.6.2 单井——东 2 井地表动态预测 .....	139
7.6.3 多溶腔油气储库共同作用的地表动态预测 .....	140
参考文献 .....	142

# 第 1 章 绪 论

矿物地下开采,引起上覆岩层移动、变形和垮塌是必然的现象,称之为开采沉陷<sup>[1]</sup>。开采沉陷在两方面产生极大的危害<sup>[2]</sup>:一方面,开采沉陷将直接影响、破坏地下和地面的建筑物、构筑物,从而影响生产的正常进行,威胁人民的生命财产安全;另一方面,开采沉陷破坏地下、地表水系,各种开采溶剂混入其中,对生态环境造成极大破坏,严重影响人民的生活质量,威胁人民的生命安全。具体表现在,使地面标高降低,耕地淹没,山体滑坡;位于沉陷区内的铁路、公路、桥梁、隧道、堤坝、输电线路等人工建(构)筑物遭到损害;使含水层水位下降,河流、水库干涸;岩盐卤水上涌污染地下水系,盐碱化土地等。开采沉陷的危害早就引起人们的注意<sup>[3]</sup>。20世纪30年代至今,矿山开采沉陷及控制的科学技术获得了蓬勃的发展。然而,这些研究基本上是针对地下巷采(主要是煤矿)进行的。虽然巷采的开采沉陷研究仍然有许多亟待解决的问题,但已经有一个较为完备的科学理论体系,其许多研究成果可以应用于岩盐水溶开采沉陷方面。但是由于开采方式的不同,导致水溶开采沉陷与巷采沉陷有许多不同之处,巷采的一些预测理论和方法不能直接用于岩盐水溶开采沉陷。

鉴于此,本书对水溶开采沉陷的机理进行研究,建立水溶开采沉陷预测模型,并分别从力学及安全系统科学的角度建立溶腔稳定性模型及方法。最后将预测模型用于金坛已有储气库的地表变形预测。

## 1.1 开采沉陷机理和规律

最初的开采沉陷研究基于实测资料,从1858年以来<sup>[5]</sup>,许多学者提出了一些初始的理论。如1858比利时人哥诺(Gonot)提出的“法线理论”,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。1876德国人依琴斯凯(Jicinsky)提出了“二等分线理论”。1882耳西哈教授提出“自然斜面理论”,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。1923—1932年斯奇米茨(Schmitz)、凯因霍斯特(Keinhost)和巴斯(R. Bals)研究了开采影响的作用面积及分布,并提出了连续影响分布的概念。这些形成了早期有关开采沉陷的机理研究。

从20世纪30年代至今<sup>[1]</sup>,矿山开采沉陷及防护的科学技术获得了蓬勃的发展。苏联、波兰和德国的学者提出采空区上方覆岩的移动和破坏过程呈现冒落带、裂隙带、弯曲带的“三带”理论,发现和论证了地面下沉的不均匀性对建筑物和构筑物的损害的理论,以及对采空区上覆岩层移动和变形的计算,为开采沉陷学的发展奠定了基础。为了研究矿山开采沉陷规律,我国在煤矿建立了几百个观测站1 000多条观测线,是世界观测数据最多的国家。掌握了地表移动的时间、空间分布规律,获得了水平、倾斜及急倾斜煤层开采沉陷的动态和静态规律,提出冒落带、裂隙带、弯曲带“三带”的经验计算方法,掌握了开采沉陷与地质采矿条件之间的关系。在此基础上,各大矿区均建立了适合本矿区的地表移动参数计算体系和计算方法。制定了适合我国煤矿区的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设及压煤开采规程》。这些理论和方法,为矿区各类保护矿柱的留设、地下开采对地面建(构)筑物的影响提供了科学依据,保证了地下开采安全。

近年来,初始节理、裂隙对开采沉陷的影响研究受到了空前的重视,随着非线性科学的大力发展,国内外许多学者把非线性理论用于开采沉陷机理研究,得到了长足的进步,取得了丰硕成果。于广明和谢和平用损伤变量来度量上覆岩层中的不规则、多分布的初始节理,根据节理裂隙的分布情况直接解算出岩体损伤变量,并采用相似材料模拟实验得到了地表移动特征值与损伤变量之间的关系<sup>[13-16]</sup>;与此同时,何满湖、王旭春采用超声波来测定上覆岩体的损伤变量,并给出了损伤岩体弹性模量与无损伤岩体弹性模量之间的计算式,建立了开采沉陷工程岩体的本构关系,为采用有限元方法来模拟上覆岩层的移动、变形和破坏打下了基础<sup>[17]</sup>。随着开采的进行,采动岩体裂隙分布越来越复杂,于广明和谢和平采用分形维数来描述这时的状况,采用简单的图形分析方法获得上覆岩层的分形维数,并采用相似材料模拟实验得到了开采宽度与分形维数的定量关系,以及地表移动特征值与分形维数之间的定量关系,还初步研究了上覆岩层的自组织特性,建立了离层突变过程的基本力学模式<sup>[18]</sup>。邓喀中、马伟明结合断裂力学,提出节理岩体的损伤张量来分析节理的受力破坏过程<sup>[19-20]</sup>。施群德从矿山开采沉陷的非线性机制出发,揭示和研究了矿山开采沉陷采动岩体裂隙分形分布性质及其演化规律<sup>[21-24]</sup>。

上覆岩层岩性对开采沉陷起决定性作用,然而并不是每层覆岩起的作用都一样,实际上往往是某一层或某几层覆岩起着重要作用,而其他覆岩的影响基本上很小,这就是关键层理论。1996年钱鸣高、缪斜兴等首次提出该理论<sup>[25-26]</sup>。他们建立了关键层的判别准则,深入研究了在关键层的作用下覆岩的变形、离层及断裂的规律。这一理论为开采沉陷离层注浆法找到了理论基础,经过多年的发展,离层注浆已成为一种常用的经济有效的覆岩控制方法<sup>[27-29]</sup>。

应用力学理论来分析和研究开采沉陷,是困难而又必需的方法。近年来,在这方面的研究也取得了不小进步。黄乐亭以黏弹性基础梁方式建立了地表沉陷的下沉公式<sup>[30]</sup>。李永树等对上覆岩层下沉和弯曲而引起地表水平移动机理及岩层间的剪应力对水平移动所起的作用,以及残余水平移动和下沉值的改变伴随着水平移动的改变等问题从力学角度作出了解释<sup>[31]</sup>。崔希明、杨硕以黏性流体质点运动的观点,利用广义牛顿黏性应力公式,建立了岩层与地表移动的黏塑性模型<sup>[32]</sup>。靖洪文等结合地下工程破裂岩体特点,采用“非连续变形分析(DDA)”计算程序,定量研究了非连续围岩体位移影响因素的变化规律,根据计算结果提出了地下工程支护“关键部位”的概念及其稳定性判据<sup>[33]</sup>。何满潮运用现代工程地质学理论和现

代数学力学理论,在对采动岩体本构关系进行深入研究的基础上,提出了用“黑箱”问题“灰箱”化的全息反分析法,确定采动工程岩体本构关系及其有关参数<sup>[34-35]</sup>。实例分析表明,对于复杂岩体结构的开采沉陷问题,能够取得较满意的结果。李云鹏等针对上覆岩体结构的复杂性,将节理、裂隙及正交各向异性岩体视为损伤岩体,建立了裂隙损伤岩体三维动态有限元分析模型,给出了较详细的三维仿真模拟有限元公式,完成了可考虑多种工程因素的三维模拟软件<sup>[36]</sup>。吴侃等应用相似材料模型实验,研究了开采沉陷在土体中的传递规律<sup>[37-38]</sup>,获得了开采沉陷在土体中传递的一般规律。

柴华彬等独辟蹊径对开采沉陷进行模糊聚类分析,他们从开采沉陷相似理论出发,将全国范围内的开采沉陷相似现象群近似分为3个大类,将第2大类分为6个小类,并得出各类型开采沉陷的基础岩移参数。对开采沉陷的机理研究具有指导性作用<sup>[39]</sup>。

矿山开采沉陷学是一个涉及众多学科领域的边缘学科,其研究内容繁多复杂,因此,要彻底认识和研究清楚这一复杂现象,控制其对人类的损害,必须借助众多学科的知识。

## 1.2 开采沉陷预测理论和方法

在开采沉陷的预测理论和方法研究方面,自德国的学者提出垂线理论后,比利时和波兰的学者相继提出了法线理论、剖面函数、影响函数及力学计算方法<sup>[40]</sup>。目前一般地质采矿条件下缓倾斜矿层开采的地表移动预测可达到的精度:下降预计、水平移动误差为10%,倾斜和水平变形预计的误差为20%,曲率预计的误差为30%。我国学者针对我国煤矿区提出的地表沉陷预测方法有概率积分法、负指数函数法、威布尔分布法,以及对于急倾斜煤层开采的皮尔森Ⅲ型分布等。近年来,随着岩土力学数值计算的发展,采用有限元、边界元、离散元、块体理论等计算岩层及地表移动得到了较大的发展。针对数值计算中岩体参数难以选择的问题,我国学者提出了模式识别和参数识别的方法,进行位移反分析确定参数。对于岩体层面、节理对岩层及地表移动的影响进行了系统的研究,建立了层面滑移函数和层面滑移判断式,为计算层面滑移量和采用有限元计算地表移动时层面位置的设置提供了帮助。针对采动破裂岩体,开展了破裂岩体本构关系对岩层及地表移动影响的研究,采用逐层次计算方法,建立了开采沉陷动态力学模型。该模型初步建立了连续介质与非连续介质之间的耦合关系,与以前的模型相比,不但能计算岩层及地表移动,而且能计算破裂岩体的高度、离层时空发育位置、岩体的动态移动及顶板的断裂步距,是目前较为完善的开采沉陷动力学模型<sup>[2]</sup>。

随着非线性科学、灰色理论等的发展,许多学者将这些方法应用于开采沉陷的预测。苏美德、赵忠明等采用灰色理论的费尔哈斯模型,建立灰色微分方程,来模拟地表移动的时间过程,求得地表移动时间的相应模型<sup>[41]</sup>。麻凤海采用神经网络对开采沉陷进行预测,他将开采沉陷的决定因素分为自然地质因素和采矿技术因素两类<sup>[42-43]</sup>。王坚等则采用自适应GM(1,1)模型对地表沉降进行预测<sup>[44]</sup>。尹光志、张东明等对地表沉陷表现出来的分形特征,采用分形插值函数法进行了研究<sup>[45]</sup>。董春胜等对开采沉陷过程中呈现了众多的复杂性、非线性和破坏性,针对传统三层BP神经网络预测地表沉陷精度较低的实际情况,引入遗传算法来改进BP神经网络,得到了较好的预测效果<sup>[46]</sup>。

数值计算技术的发展,使数值模拟日渐成为开采沉陷预测的一种有效手段。高明中等运用有限差分法(FLAC),对开采引起的岩体移动和地表沉陷进行了研究,总结出了岩体移动的基本特征和地表沉陷的相关参数<sup>[47]</sup>。唐又驰、袁灯平等应用 ANSYS 有限元对地表下沉曲线进行模拟研究<sup>[48-49]</sup>。余学义等将 Sulstowicz A. 假说:下沉盆地体积的增长率与开挖采区未压密的体积成正比,引入预计地表静态位移变形模型中,提出了预计地表剩余位移变形的方方法<sup>[50-51]</sup>。

虽然,涌现出了许多新的开采沉陷预测模型和方法,但概率积分法仍然是应用最方便和最广泛的方法之一。近年来,许多学者应用新的技术和理论,对概率积分法进行改进,使其预测精度不断提高,大有老树新芽之势。吴侃等应用时序分析方法,对开采沉陷动态过程的概率积分法预测参数进行分析,建立动态预测模型,使开采沉陷的相对预计误差一般为4%左右,与传统方法相比,预计精度可提高5%~15%<sup>[52]</sup>。针对概率积分法中,地表下沉系数的重要性,绉友峰等应用相似理论中的相似第二定律,推导出地表下沉系数的表达式,给出地表下沉系数的具体计算方法<sup>[53]</sup>。吴侃等在实测数据的基础上,提出了概率积分法的修正公式,通过对概率积分法预测参数的修正和单元水平移动盆地的修正,获得了较高的预计精度<sup>[54]</sup>。

综上所述,开采沉陷的预计方法大致可分为4类:

①经典唯象学方法 这类方法主要是一些经验方法,其特征研究停留在现象的外观描述上,即唯象学研究,绕开岩体本身的结构,从地表观测入手,直接将地表沉陷值与地质采矿因素联系起来,在大量的地表观测资料的基础上,进行统计分析,得到描述地表移动变形的统计方法,这类方法最具代表性的有概率积分法、典型曲线法、负指数函数法等。这类方法只适用于岩体结构比较简单的情况,因其简单易行,得到了广泛的应用,但因回避了岩体的本构关系,在岩体结构复杂的情况下,计算误差较大。

②基于经典力学原理的反分析方法 该方法直接按量测位移求解逆方程得到参数。它利用黑箱原理,进行采动岩体输入输出系统控制,来拟合地表移动曲线。这种方法避免了岩体本构研究,虽然减少了工作难度及时间,但所得到的描述岩体性态模型和参数,只是一种“等效模型”和“等效参数”,存在唯一性问题。由于岩体的复杂性,这种方法的实际应用效果不理想,应用很少。

③基于经典力学原理的正演分析法 该方法利用力学原理,通过假设,将岩体简化抽象为一定的力学模型,在此基础上建立岩体的基本微分方程,然后根据给定的边界条件,求解微分方程,得到应力、应变、位移等未知量。该方法因其考虑到岩体的固有属性,能适用于不同岩体采动情况,在一定程度上较为有效地反映出采动岩体的破坏状态,应用较为广泛,也是目前解决复杂条件下开采沉陷问题的常用手段。但这种方法也存在一些问题:参数调整困难、存在敏感性问题;采动岩体复杂,经典力学方法难以处理岩体呈现的不连续性等非线性问题;力学模型经过简化,难以准确反映岩体的真实情况;经典力学固有的缺陷,不能处理大变形问题等。

④基于非线性力学的正演分析法 这种方法克服了第3类方法的三、四项缺点。

### 1.3 开采沉陷控制理论及方法

几乎在人们关注开采沉陷危害时,人们就开始研究开采沉陷的控制方法。人们认识到,矿山开采地表沉陷是覆岩破坏、移动与变形等力学过程在地表的最终显现。为此,应从根本上控制覆岩的下沉。多年来,国内外学者、专家及工程技术人员针对具体的地质采矿条件及保护对象,研究出了许多覆岩控制技术,解决实际工程问题,并取得了良好效果。

#### (1) 完全充填采空区开采技术

这是一项在国内外成功的技术。其特点是既减小覆岩破坏力度,又减少地表沉陷量。如果采用密实充填,地表最大下沉量仅为采出矿物厚度的8%~15%。根据不同情况,可选带状充填、矸石充填、风力充填、水沙充填等。我国抚顺是该技术取得经验最多的矿区,采用水沙充填开采法实现了车辆检修厂、炼油厂等建筑物下的安全采煤;焦作寅马庄矿风力充填保证了村庄下采煤的安全性;蛟河矿采用矸石充填保证了稻田下采煤的安全等。波兰采用充填法采出了建筑物下压煤总量的80%;日本、德国、法国、美国、比利时及苏联等国都获得成功。充填方法的致命缺点是需专门充填系统和设备,并且必须有足够的充料来源。同时工艺复杂,不利于机械化生产,导致生产成本增大20%~30%<sup>[55]</sup>等。

#### (2) 局部开采技术

局部开采技术主要包括条带开采、房柱式开采、限厚开采及留设保护煤柱等方法。这些方法对于减弱覆岩破坏程度与地表沉陷量、保护地面建筑设施无疑是一种非常有效的措施。

其中条带法开采把要开采的煤层划分为条带进行开采,采一条,留一条,保留的一部分煤炭以煤柱的形式支撑上覆岩层,从而减少覆岩沉陷,控制地表的移动和变形,实现对地面建筑物、构筑物、地形、地貌以及地下结构的保护。条带法按煤层采出部分的顶板管理方式分类,可分为冒落条采和充填条采;按开采方案设计分类,可分为定采留比和变采留比条采;按条带长轴方向分类,可分为倾斜条采和走向条采;按煤柱的尺寸不同分类,可分为大、中、小3种条带类型<sup>[56]</sup>。

条带开采主要应用于以长壁开采为主的欧洲各采煤国和中国。波兰、英国、苏联等国于20世纪50年代开始应用条带开采法回采建筑物尤其是村镇、城市下的压煤,取得了较为丰富的经验。我国1967年开始应用条带开采法回采建筑物下、铁路下、水体下压煤。

房式及房柱式采煤法的实质是在煤层内开掘一系列宽为5~7m的煤房,煤房间用联络巷相连,形成近似于矩形的煤柱,煤柱宽度由数米至十多米不等,回采在煤房中进行。煤柱不回收的称为房式采煤法,煤柱回收的称为房柱式采煤法。由于房式采煤法与房柱式采煤法巷道布置基本相似,因此,美国现在将这两种方法统称为房柱式采煤法,前者称为这种采煤法的“部分回采”方式;后者称为这种采煤法的“全部回采”方式<sup>[57]</sup>。

房柱式采煤法是美国、澳大利亚、南非等国应用比较成熟的一种采煤技术,可以作为一种常规的采煤方法,在煤层赋存不规则的区段使用;也可以作为煤矿地表沉陷控制的开采手段。

我国神府东胜矿区大柳塔矿采用连续采煤机房柱式采煤法,开采不适于布置长壁工作面的边角煤,取得了较好的经济效益;鸡西矿务局小恒山矿将连续采煤机房柱式采煤法应用于

薄煤层开采,最高月产达 21 475 t,回采率达 85%;陕西黄陵矿是我国第一个完全采用连续采煤机房柱式采煤法设计的大型矿井,设计采出率达 70% 以上<sup>[58]</sup>。

在开采范围内每隔一定距离留设一条窄煤柱,称为刀柱。刀柱法只用于煤层直接顶板坚硬的条件,采留比大,一般采 30~40 m,留 5~8 m,但全采区的煤柱面积与回采面积的比值仍可达 10%~25%,因此,开采面积小时,减沉效果好,开采面积大时,有时发生切冒,造成地表突然塌陷。如大同姜家湾煤矿采用刀柱法只开采一个煤层,顶板为沙砾岩,该井田范围内有 4 片面积分别为 34、40、50 和 142 万方的回采块段,当煤柱面积与回采面积的比值超过 20% 时,地表无明显下沉。

我国抚顺、阜新、蛟河、鹤壁、丰城等矿区均采用过局部开采法在水体下、工厂、村庄、铁路及隧道下采煤,达到了预期的效果。但其最大缺点是采出率低,一般在 50% 以下,资源浪费严重。

### (3) 全柱开采法

该方法是在保护煤柱的全部范围内时间上不间歇、工作面之间不间隔地多工作面同时开采,或在主要影响范围内同时开采。使被保护对象处于地表下沉盆地的中间区或压缩变形区之内。在这种情况下,被保护对象只承受动态下沉和动态变形以及最终的均匀下沉的影响,而不承受最终的拉伸变形的影响。

波兰在卡托维茨城下采煤时,在整个城市煤柱内由乌叶克煤矿、哥特瓦尔煤矿和卡托维茨煤矿 3 个煤矿布置互相联系的 3 组阶梯长壁工作面同时开采 1 个煤层或厚度深度近似的 1 个煤层。我国峰峰一矿在辛寺庄村下采煤时,在村下整个煤柱内布置了 7 个工作面同时开采。丰城八一煤矿在村庄下布置两个工作面同时开采,使村下不出现固定开采边界,减少了地表变形<sup>[59]</sup>。

### (4) 间隔式跳采法

该方法是采一个面留一个面,使地表下沉分次出现,从而减轻建筑物承受的采动影响。第一次开采时,由于开采面积较小,地表属于非充分采动,下沉与变形值均小于充分采动,如工作面布置合理,建筑物所在地的下沉均匀,变形值的一部分能被第一次开采时的变形值抵消,从而有利于建筑物的保护。

### (5) 离层充填技术

离层充填技术是在覆岩离层中充填物体,来减缓地表沉陷的技术,该技术是赵德深在 20 世纪 80 年代开发的新技术<sup>[60]</sup>。其理论可靠、技术路线合理、操作简单、实效显著,于 1992 年获得国家发明专利,目前正在全国范围内推广应用。实践证明,该技术对地面沉陷的控制效果极为显著。

该技术的力学机理是地下煤层采出后,从顶板向上依次形成垮落带、裂缝带和弯曲带。由于煤系地层沉积的分层性,导致不同岩层在结构与岩性上有一定差异,采动覆岩在弯曲沉降过程中将产生不同步,这种不同步弯曲沉降将引起岩层在其层面(或弱面)上产生离层。注浆减沉就是由地表向开采覆岩中某一选定层位(注浆控制层假说)打钻孔,通过注浆管路,依据开采过程中离层形成的动态关系,向离层空间充填易取材料支撑控制层,从而抑制采动空隙向地表传递,达到减缓地表沉陷的目的<sup>[61]</sup>。徐乃忠等推导出了覆岩离层注浆减缓地表沉陷的动态力学模型,为离层注浆技术打下了理论基础,为提高注浆效果提供了理论依据<sup>[62]</sup>。

刘文生等在覆岩离层充填技术原理、覆岩离层产生机理和离层分布规律的基础上,分析了离层充填控制地表沉陷技术的工程实施要点,对该技术的设计、施工与应用具有参考和指导意义<sup>[63]</sup>。姜德义等以矿山开采沉陷理论和弹性薄板理论为基础,提出了覆岩离层注浆沉降计算模型,可以确定上覆岩层离层空间发育的层位和岩层间的最大离层间隙量,并可对覆岩离层注浆开采地表沉降进行量化预计<sup>[64]</sup>。

我国学者刘天泉曾预测,覆岩离层注浆减缓地表沉陷技术将成为21世纪控制地表沉陷的主要途径之一。

#### (6) 采空区冒落矸石空隙注浆充填

该方法是在采空区冒落矸石之间的空隙未被压实之前注入浆液予以充填,充填材料胶结冒落岩块后,一起支撑上覆岩层,起到控制地表沉陷的作用。

应用该项技术的意义主要在于两个方面:一是作为一项地表沉陷控制措施,对地表沉陷进行控制;二是充填材料选用粉煤灰、煤矿粉碎矸石等工业废物,实现工业废物的地下安全处置,对减少粉煤灰场占用的耕地及环境污染,有重要意义。该技术源于德国,煤炭科学研究总院王建学博士对该技术作了较为系统的研究<sup>[58]</sup>。

## 1.4 岩盐水溶开采沉陷

目前矿山开采沉陷的研究工作基本上都是针对地下巷采(采煤)而进行的,由于开采方式的不同,水溶开采沉陷与巷采沉陷有许多不同之处,使岩盐水溶开采沉陷有别于巷采。巷采的一些预测理论和方法不能直接用于岩盐水溶开采沉陷。

然而在岩盐水溶开采沉陷研究方面,国内外学者所作的研究工作十分有限。查阅近年来与岩盐水溶开采有关的国内外文献,绝大多数与利用岩盐溶腔贮存石油、天然气和处置核废料有关<sup>[65-75]</sup>。德国 R. B. Rokahr 和美国 Chunhe Yang 等,长期致力于岩盐蠕变特性研究<sup>[66-67]</sup>,并用数值方法等分析地下溶腔储室的安全性,瑞典 Ottoson 则利用黏弹性——黏塑性模型来研究岩盐溶腔<sup>[76]</sup>;加拿大 Dusseult 等人,对于利用岩盐溶腔处置固体有毒及放射性物质的安全可靠作了广泛研究<sup>[72-73,77]</sup>。在地下溶腔储室的建造过程中,德国 Alheil 等人,用地震波方法监测溶腔的破坏范围,以确保建成溶腔的安全稳定性<sup>[79]</sup>。西方发达国家从岩盐物理力学特性、溶腔设计,到溶腔建设、储室营运监测,都进行了深入的研究,成功地建造了许多大型地下储室,取得了很好的经济社会效益,但在岩盐水溶开采沉陷方面所作的研究工作则很少。

同样,国内在钻井水溶开采溶腔稳定性方面也取得了不少研究成果。矿山生产现场一般是靠卤水压力的变化、套管的损坏情况以及经验来判定地下溶腔的稳定与否。梁卫国等在群井致裂控制水溶盐矿开采理论与技术研究方面取得了突出的成绩<sup>[80]</sup>。余海龙把岩盐溶腔顶板看作支承于理想弹塑性双参数基础上的板进行分析,研究了顶板破裂和垮塌条件及顶板断裂前后的矿山压力显现规律,并用岩体水力学耦合模型分析了溶腔的稳定性<sup>[81]</sup>。余贤斌用轴对称线弹性有限单元法,对水溶开采厚岩盐矿体中的溶腔稳定性进行了分析和计算<sup>[82]</sup>。

在岩盐水溶开采沉陷研究方面,姜德义、刘新荣和谭晓慧等从概率积分角度对岩盐溶腔上覆岩层的移动破坏规律及顶板垮落高度作了一些研究,得出了溶腔形状为倒圆锥体的上覆

岩层移动的二维表达式<sup>[83-84]</sup>。李永山等根据应城盐矿二采基地地表塌陷的事实,经过实际观测与理论分析,得到了云应盐田特有的地质与采矿技术条件下,岩盐采出后岩层与地表移动在时间和空间上所呈现的一般规律<sup>[85]</sup>。余勇近对薄层复层状岩盐水溶开采的地表沉降规律作了一定的研究工作<sup>[86]</sup>。

总的来说,在岩盐水溶开采沉陷方面的研究还远远不够,有很多问题需要进一步深入研究。

## 1.5 开采沉陷研究存在的不足及发展趋势

从根本上来看,可以将开采沉陷的研究方法归为两大类:一类以地表移动作为讨论对象,不考虑岩体特性的唯象学理论研究方法,包括几何理论、非连续介质理论(随机介质理论、碎块体理论、空隙扩散理论)及经验型预计方法(典型曲线法、剖面函数法)等;另一类以力学原理为基础的正演法和反分析法,通过研究岩体的力学性质及力学行为来研究开采沉陷现象。

唯象学研究方法中,以地表移动作为讨论对象,计算中选用的参数物理意义不明确,很难反映岩层内部的移动规律。因此,唯象学研究方法不能很好地解释岩层和地表移动的物理、力学本质。

基于力学的正演法和反分析法,应用力学理论研究岩体力学性质及力学行为,主要包括弹性理论、塑性理论、黏弹塑性理论、断裂理论、损伤力学等。

这种方法能对岩层移动过程作出解释,计算中所需参数有各自的物理意义,概念比较清楚。但由于岩体结构及其力学行为、开采实际条件非常复杂,目前还没有成熟的计算岩体力学性态的模型和方法。

事实上,矿山开采沉陷现象十分复杂,影响因素繁多,研究内容广阔。国内外开采沉陷理论的研究正向纵深方向发展,以下是几个发展方向<sup>[2]</sup>:

①解决复杂地质开采条件下的开采沉陷预测,即从水平和缓倾斜开采沉陷预测到研究急倾斜矿层开采沉陷预测。

②从研究无地质构造、简单的开采沉陷预计到研究有地质构造、复杂地质开采条件的开采沉陷预测。

③从研究静态的开采沉陷预测到动态的开采沉陷预测。

④从经验统计研究方法向力学研究方法发展。

⑤各种研究方法有机结合。