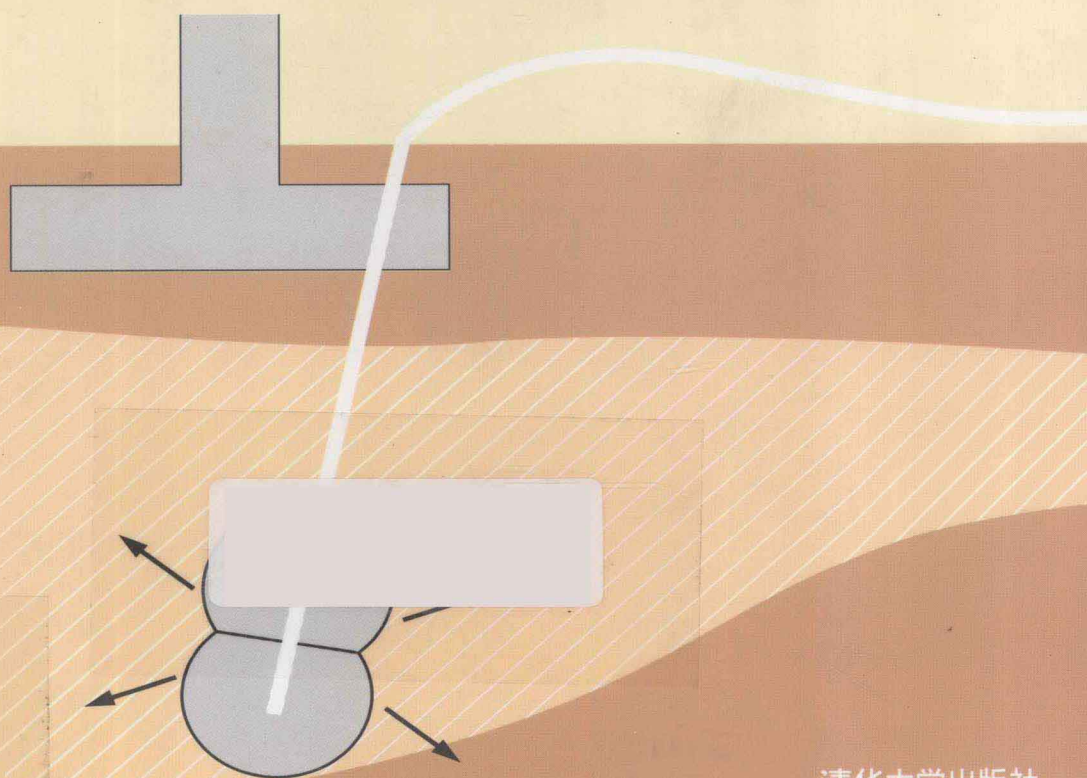


采空区注浆处治 技术及其应用

程敦伍 王树仁 王树理 穆满根 著



清华大学出版社

采空区注浆处治 技术及其应用

程敦伍 王树仁 王树理 穆满根 著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

由于受土地利用的限制,我国的许多道路工程不得不穿越地下采空区。地下采空区的隐伏性、空间分布的不完全确定性,会给采空区的处治带来极大的困难。本书结合工程范例试图解决采空区处治中的有关问题,希望帮助涉及采空区处治设计、施工的工程师完成他们的工作。

本书可供从事岩土工程、建筑工程、交通工程、水利电力工程以及矿山厂区建设等的采空区处治设计、施工、监理与监测的工程技术人员参考使用,同时,也可作为大学师生和科研院所相关人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

采空区注浆处治技术及其应用/程敦伍等著. —北京:清华大学出版社,2012.10
ISBN 978-7-302-29879-3

I. ①采… II. ①程… III. ①采空区—注浆加固 IV. ①TU746.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 199854 号

责任编辑:秦 娜 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:王淑云

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153mm×235mm

印 张:12.75

字 数:224千字

版 次:2012年10月第1版

印 次:2012年10月第1次印

印 数:1~1500

定 价:48.00元

产品编号:048232-01

编 委 会

组长 程敦伍

执行编审组长 王树仁 王树理 穆满根

成员(按姓氏笔画排序)

王树仁	王树理	邓美龙	石晓红	苏天明	吴胜仓
严 盛	张海清	油新华	赵书涛	郝本峰	胡晓欢
胡 骋	黄常波	程敦伍	穆满根		



前言

由于地下采空区具有隐伏性强、空间分布特征规律性差、采空区顶板冒落塌陷情况难以预测等特点,因此,对采空区进行工程处治的基本步骤如下:首先,需对地下采空区的分布范围、空间形态特征、采空区的冒落状况等进行工程地质和水文地质勘察;其次,对采空区顶板及其围岩的稳定状况进行稳定性分析和潜在危害性评价;最后,基于上述结果,合理确定采空区处治工程对策以及相应的工程技术措施。

本书遵循上述思路,对研究项目实施过程中的主要经验、体会、建议和管理方法等都进行了系统总结,以便涉及采空区处治的工程师参考。希望本书的出版,不仅为山西省煤矿采空区的处治提供设计和施工的思路,而且,为全国其他地区类似工程提供借鉴和指导。

本书内容丰富、实践性强,可供从事岩土工程、建筑工程、交通工程、水利电力工程以及矿山厂区建设等的采空区处治设计、施工、监理与监测的工程技术人员参考使用,同时,也可作为大学师生和科研院所相关人员的参考书。

本书的出版得到了国家自然科学基金面上项目(浅埋采空区层状结构顶板损伤失稳机理及安全风险分析, No. 51074140)的资助,在此表示感谢。同时,对研究生张海清、胡骋、吴胜仓和胡晓欢等所做的工作也深表谢意。

限于时间和作者水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请专家、学者不吝赐教,谢谢!

作 者

2012 年 06 月



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 采空区稳定性评价与处治技术现状	2
1.1.1 采空区勘察技术及探测方法	2
1.1.2 采空区覆岩沉陷理论发展综述	4
1.1.3 采空区稳定性分析方法	6
1.1.4 采空区稳定性控制技术	9
1.2 采空区上伏路基沉陷变形预测分析方法	10
1.2.1 曲线拟合预测法	11
1.2.2 灰色模型预测法	11
1.2.3 神经网络预测法	12
1.2.4 遗传算法预测法	12
1.2.5 反演分析预测法	13
1.2.6 组合加权预测法	13
第 2 章 采空区地质调查	15
2.1 岩石类型	15
2.2 地质构造	17
2.3 水文地质	19
2.4 工程勘察	20
第 3 章 采空区处治规划和流程	22
3.1 考虑因素	22
3.2 设计流程	23
3.3 质量管理	23
3.4 注浆钻孔钻进	24

3.5	注浆方法	28
3.5.1	按照处治类型划分的注浆方法	28
3.5.2	按照注浆阶段划分的注浆方法	34
3.5.3	注浆方法评述	37
3.6	注浆方法在建筑基础中的应用	40
3.6.1	注浆前的勘察	40
3.6.2	地基加固处治	41
3.6.3	岩质地基注浆	45
第4章	注浆施工	46
4.1	注浆材料	46
4.1.1	硅酸盐水泥浆液混合物	50
4.1.2	专业水泥混合物	53
4.1.3	混合物的调整	54
4.2	注浆设备	57
4.2.1	钻孔和注浆设备	57
4.2.2	特殊监测设备	69
4.3	现场施工	71
4.3.1	总则	71
4.3.2	钻孔作业	71
4.3.3	注浆作业	73
4.3.4	注浆完毕	78
4.4	评估方法	78
4.4.1	试验注浆	78
4.4.2	注浆记录	78
4.4.3	勘探钻孔评估	79
4.4.4	单位用量估计	79
4.4.5	投标事项	79
4.5	记录和报告	81
4.5.1	记录	88
4.5.2	现场施工流程图	88
4.5.3	注浆压力计算示例	88

第 5 章 阳—孟高速公路下伏采空区处治实践	101
5.1 地形地貌	101
5.2 气象水文	103
5.3 地表植被	103
5.4 地质构造	104
5.5 地层岩性	104
5.6 地震情况	105
5.7 采空区勘察	106
5.7.1 地球物理勘探方法及原理	106
5.7.2 公路下伏采空区工程勘察	108
5.8 室内外取芯岩样物理力学试验	108
5.8.1 现场钻探取芯	108
5.8.2 取芯岩样物理力学试验	110
5.8.3 岩石强度随勘察深度变化特征	119
5.9 采空区地表移动时间效应分析	122
5.9.1 采空区地表移动延续时间计算	122
5.9.2 地表移动延续时间与实际回采时间对比分析	122
5.10 采空区覆岩三带范围计算分析	123
5.10.1 采空区覆岩三带及其划分	123
5.10.2 采空区覆岩三带范围计算	124
5.11 公路下伏采空区顶板及路基稳定性评价	125
5.11.1 采空区稳定性评价	125
5.11.2 采空区顶板稳定性分析	125
5.11.3 公路地基稳定性分析	126
5.12 公路下伏采空区稳定性数值计算分析	126
5.12.1 有限差分方法	126
5.12.2 基本力学方程	128
5.12.3 显式有限差分算法	131
5.12.4 有限差分程序简介	132
5.13 构建三维计算模型	133
5.13.1 三维工程地质模型	133
5.13.2 三维数值计算模型	137
5.14 模拟分析方案	140

5.15	采空区注浆处治前后效果对比分析·····	141
5.15.1	变形特征分析·····	141
5.15.2	应力特征分析·····	154
5.15.3	塑性区特征分析·····	161
5.16	主要结论·····	164
第 6 章	高速公路路基沉降变形监测预警系统研发·····	165
6.1	监测预警系统研发思路与功能·····	165
6.2	现场实测相关数据处理与分析·····	166
6.3	沉降变形预测模型和计算公式·····	171
6.4	沉降变形预测标准的判定·····	179
6.5	系统功能实现及相关说明·····	179
6.6	生成监测报告及相关说明·····	187
6.7	主要结论·····	187
参考文献	·····	188



中国是世界煤炭大国。据统计,2011 年我国煤炭的生产能力已达 3500Mt,居世界第一位。长期以来,我国多煤、少油、缺气的能源状况,决定了我国在今后较长时期内能源消费仍将以煤炭为主^[1]。山西省是煤炭大省,煤炭资源在全省大部分地区均有分布,经过长期的采掘,在三晋大地上留下的采空区比比皆是,形成了大规模、大范围的采空塌陷区。随着我国城镇化、工业化进程的加快,以及交通路网基础设施建设密度的逐年增大,可供利用土地资源日益减少,许多煤矿采空区逐渐被列为工业和民用建筑场地,导致一些地区的公路、铁路、桥梁、隧道工程等建(构)筑物不得不建在采空区上或穿越采空区而建。

地下煤炭资源的大量采出将导致采空区上覆岩体产生冒落、断裂和弯曲现象,覆岩力学强度损伤,致使采空区上方岩层的承载能力下降。在地表建(构)筑物荷载、岩体强度衰减及其他外力扰动作用下,有可能打破冒裂带岩体的相对平衡状态,重新活化采空区,产生应力再分布、导致地表产生附加移动和变形,进而致使地表(构)建筑物沉降、局部开裂、倾斜直至倒塌等灾害的发生,严重影响和危害着采空区上方建(构)筑物的规划、施工建设及安全运营。地下煤炭资源的开采对地表及采空区上覆岩体的破坏程度,主要受煤层赋存地质条件和采矿施工过程等因素的影响,与煤炭资源的开采深度、采高、煤层倾角、采矿方法、地质构造以及上覆岩体物理力学性质及顶板管理方法等密切相关。不同的采矿条件对地表沉陷的破坏程度差异很大,反映到地表的变形形态可归结为连续位移变形和非连续位移变形两类。连续位移变形多发生在开采深度大(采深与采高比大于 40~80)、开采范围较大的情况下,采动地表连续位移变形以连续沉陷为特征,连续沉陷一般会持续 2~5a。非连续位移变形发生在开采深度较小(采深与采高比小于 40~80)、开采空间较小的情况

下,其地表变形破坏的表现形式为地表出现拉裂裂缝,地表隆起、起伏不平,地表倾斜、扭曲,地表产生阶梯状、漏斗形塌陷坑等。非连续变形破坏以突发性、隐藏性为特点,没有一定的规律,有时开采后几十年还会发生较大的沉陷冒落破坏,这种情况对地面建(构)筑物危害极大。

与建筑物下、水体下开采相比较,煤矿采空区对新建公路的影响有它自身的特点。公路下伏采空区多是在建路之前就形成了,它对新建公路的影响是剩余沉陷引起的位移变形破坏。由于公路是线性工程、整体延伸范围大,不仅涉及采空区引起的地表剩余沉陷,而且在建设施工过程中,如路基开挖卸荷、填方加载、爆破振动荷载等因素作用下,可能会导致新的沉陷变形,甚至导致采空区顶板冒落、塌陷等现象。如在地表不均匀沉陷地带修建公路而不进行预先处理,在拉伸带范围的水平变形如超过公路路面的极限抗拉值,会使路面出现裂缝,轻则导致路面渗水破坏,严重的会使交通中断;在压缩带范围内施工,会出现路面隆起、起伏不平,使车辆行驶困难,或使高速行驶车辆颠簸、腾空而引起交通事故。路面的侧向倾斜或扭曲也会对高速行驶车辆不利,当出现在弯道上时尤为不利、危害更为严重。

尽管国内对公路下伏采空区的治理已有多年的历史,在采空区的勘察、稳定性评价方法和处治技术等方面积累了宝贵的经验,但由于各地公路下伏采空区的工程条件差别较大,新的工程实践中仍存在许多挑战性难题,尤其在考虑地表施工与运营荷载影响的采空区稳定性评价方法、评价依据、治理标准及工程处治技术等方面,尚未形成成熟的理论及工程设计体系可供借鉴和指导,国际上相关文献也不多。因此,本书拟结合山西省阳泉—盂县高速公路下伏采空区工程实践,进行高速公路下伏采空区稳定性分析和路基沉降变形监测预警系统的研究,取得的研究成果将对类似条件下的采空区处治工程实践,具有重要的理论指导意义和工程实用价值。

1.1 采空区稳定性评价与处治技术现状

1.1.1 采空区勘察技术及探测方法

在进行公路下伏采空区稳定性评价与进行工程处治之前,必须进行工程地质勘察工作,查明采空区的范围、规模、形态及场地工程地质条件等,并通过室内外试验提供岩土体的物理力学参数指标,为进行采空区的稳定性分析提供基础依据。

目前,国内外常用的采空区勘察方法及相关内容如表 1-1 所示。通常的

做法是：结合场区工程地质条件,采用多种物探方法、工程钻探和水文试验对下伏采空区进行详细综合勘察。

表 1-1 采空区主要勘察方法对比表

主要勘察方法			应用条件	主要特点	勘测结果
工程物探	高密度电法		采空区与围岩有明显的电性差异,地形起伏不大,埋深 $\leq 100\text{m}$	采空区充水显示低阻异常,采空区充气显示高阻异常	圈定充分采动区的范围
	瞬变电磁法		采空区与围岩有明显的电性差异,埋深 $\leq 500\text{m}$	采空区相对周围介质呈低阻,无杂散电流干扰	反映采空区范围及裂隙带分布
	地震	折射法	采空区与围岩有明显的波速差异,埋深 $\leq 100\text{m}$	波组不能连续追踪,频率变化,波形杂乱变化	采空区密度小,波速低
		反射法	采空区与围岩有明显的波速差异,埋深 $\leq 500\text{m}$		
	土氡测量		有土层覆盖,有一定规律的、可对比的 α 粒子强度异常	属于定性测量	探测异常区,圈定采空区范围
综合测井		配合钻孔进行	测试深度随孔深而定	得到地层的各种物性、电性参数,确定采空区“三带”在钻孔中的详细分布情况	
工程钻探			配合物探进行,广泛应用。可以直接获得地质资料。采空区勘察工作中,所有地质测绘、物探方法等得到的结论常用钻探结果来验证		采空区“三带”划分,覆岩结构及工程地质特征的定性、定量描述,确定治理范围
水文试验			查明区内水文地质条件,包括含水层的富水性及水力联系,地下水的补、迳、排条件,涌水量,采空区的地下流通情况、岩溶、裂隙发育程度等		抽水试验:含水层的参数值大于区域范围值,说明该区域受采矿活动的影响,形成冒落带和塌陷带,增大了地下水的水力联系。压水试验:根据渗透系数确定采空区充填密实情况
沉降观测			判断采空区对地表建筑物的影响,测定当前地表变形速率及形变,预测采空区的未来变形量,定量评价采空区的稳定性		沉降是否完成,是否需要治理

对于国有大型矿山采空区,如果收集的矿山地质资料、采矿工程图纸等齐全,能够查清采空区的分布范围,可不进行物探和钻探工作;对于小煤窑,上述资料往往不全,甚至无资料,这时必须辅以物探和钻探工作。

对于富水多层采空区,可先采用地球物理勘察方法;然后,在分析物探资料的基础上,初步确定可能的采空区分布范围;再布置钻孔进行勘察,并对勘察孔进行孔中综合测井及水文试验。这样不仅可节省大量的勘察费用,而且可有效提高勘察的准确性和精度。

目前,国内外常用的探测方法主要包括电法勘探中的电测深和电测剖面法、自然电场法、激发极化法、甚低频法、无线电波透视法、地质雷达法、微重力法等。随着计算机技术的发展,工程物探的观测设备及资料处理方法有了长足的进步,数字化采集设备及专业处理软件的出现,使工程物探进入了高精度、高效率的发展阶段。这些都为地下采空区的地面勘测定位提供了有利条件,勘察技术除传统的现场调查、钻探、物探手段外,还出现了一些新的勘探方法,如高密度电阻率法、人工地震 CT、地质雷达、SWS 探测及钻孔电视、钻孔 CT 等技术方法。

进行采空区探测的工程物探方法种类很多,这些物探方法各有不同的适用条件,且往往单一的物探方法不能满足工程勘察的需要,一般宜考虑采用两种或两种以上的物探方法。

1.1.2 采空区覆岩沉陷理论发展综述

“开采沉陷学”术语来自德文 Bergschadenkunde 和英文 Mining Subsidence,而俄文称之为 Сдвижение горных пород и земной поверхности——矿山岩层与地表移动。它是一门研究地下矿物开采引起岩层和地表移动及相关问题的科学。

地表开采沉陷问题早已被人们所注意,15 世纪到 19 世纪末是沉陷理论的萌芽阶段,最主要的理论是修正的“法线理论”,并被用来确定开采破坏范围,其中确定破坏极限角的方法一直沿用至今。19 世纪末到 20 世纪初是理论发展的初期阶段。这个阶段的欧洲工业发展使得有用矿产的需求大幅增加,围绕矿区形成了许多大工业中心,从而使沉陷理论研究逐渐深入,开始了开采地表下沉与变形规律的研究,一些学者主要从几何学角度分析开采影响分布规律,研究地表移动与变形形成过程及机理,形成了以坎霍斯特(影响带法)和克诺特(影响函数法)为代表的地表沉陷几何学派理论。自 20 世纪初到现在是沉陷理论大幅度发展的阶段,国内外许多学者提出了许多有代表性的采矿沉陷理论。如 20 世纪 50 年代,波兰学者李特威尼申(J. Litwinisyn)用严密的数学理论将岩体视为非连续介质,提出了随机介质理论,之后经我国学

者刘宝琛、廖国华等发展完善,成为目前应用广泛的变形预计方法。苏联继阿维尔辛之后,出现了以学者沙武斯托维奇为代表的弹性岩梁理论等。

19世纪中叶以来,由于采矿业迅速发展,采矿给地面建(构)筑物和农业生产带来的严重危害也引起了人们的关注。20世纪初,在对地表移动观测成果进行综合分析和地表移动规律进行探讨的基础上,产生了新的学科领域——开采沉陷学^[2]。20世纪30年代,苏联开始矿山岩层与地表移动实地观测工作。1947年苏联学者出版了《煤矿地下开采的岩层移动》。1949年德国学者 Oskar Niemczyk 出版了开采沉陷方面具有代表性的《Bergschadenkunde》,该书根据实测资料系统地分析了地表移动规律并用移动变形曲线表示。此后苏联学者应用实地观测方法研究岩层和地表移动,于1958年出版了《岩层与地表移动》,书中首次提出采空区上方岩层移动形成了垮落带、裂隙带和变形弯曲带的“三带”理论,系统地研究了地表移动和变形分布规律及有关参数,提出了地表移动变形计算方法——典型曲线法。20世纪70年代,英国人 Jonce^[3](1977)等研究了采矿塌落对公路的影响;20世纪80年代后,Wang^[4](1982)、Jonce^[5](1988)、Sargoand^[6](1988)等人又分别研究了采矿及下伏空洞对建筑物地基的危害,这些研究都是建立在经验和调查的基础上,研究成果零乱,没有形成系统的普遍规律。Drumm(1985)等人在实际调查的基础上,将和空洞接触的岩土简化为理想的线弹性介质,研究了在弹性极限条件下岩石的沉陷破坏机理^[7]。此外,欧美国家一些专家学者也不同程度地研究了洞穴的塌陷对地面基础工程的影响。

新中国成立以后,我国开始开采沉陷工作的研究。1954年在开滦矿务局林西矿设置了我国第一个地表移动观测站。1956年开滦煤炭研究所成立,积极开展岩层与地表移动的实地观测研究工作。随着我国煤炭事业迅速发展,研究理论和方法取得了长足进展。20世纪80年代,以中国工程院院士钱鸣高教授为首的科研群体在前人研究的基础上,提出了采场上覆岩层活动中老顶岩层破断后的“砌体梁”结构理论等。在90年代后期,进一步提出了岩层控制的关键层理论,实现了矿山压力、岩层与地表移动、卸压瓦斯开采、突水防治的有机统一,为更全面深入地解释采动岩体活动规律与采动损害现象奠定了基础。1994年,肖玉人、靳钟铭等人提出了上覆岩层为厚硬岩的托板沉陷理论,认为地下开采层状矿体时,上覆厚硬岩层对地表沉降起主导作用。1999年,于广明就节理对岩体采动沉陷规律的影响、采动岩体裂隙分形分布及演化规律、采动断层活化的分形界面效应等问题进行了一系列的理论研究和实验研究,取得了一定成果。上述研究成果极大地推动了煤炭开采工业的发展,使我国在该领域步入了国际先进行列。

1.1.3 采空区稳定性分析方法

采空区稳定性分析方法主要有定性分析方法、定量分析方法和不确定性分析方法等,主要是对地基承载力、剩余地表变形量及残留空洞的稳定性、地表破坏范围等进行分析和评价。

1. 定性分析方法

定性分析方法主要是通过工程地质勘察,对影响采空区稳定性的主要因素,如采深、采厚、采矿层数、采矿方式、采矿历史、顶板管理方法等进行统计分析,对采空区覆岩可能的变形破坏方式以及采空区覆岩失稳的力学机制进行分析,对已损伤、变形上覆岩体的成因及其演化史进行分析等,从而给出被评价的采空区有关的稳定状况及其可能发展趋势等定性的说明和解释。

定性分析方法的优点是能综合考虑影响采空区稳定性的多种因素,快速地对采空区的稳定状况及其发展趋势作出评价。定性分析方法的主要缺点是评价采空区的稳定状况时往往以人的经验为主,解决工程问题的范围较窄,并带有很大的主观随意性。

2. 定量分析方法

采空区稳定性定量分析方法主要有预计法、解析法、半预测半解析法、数值模拟方法和物理试验方法等。

1) 预计法

预计法的特征是研究停留在对现象的外观描述上,绕开岩体的本构,从地表移动观测入手,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基础上进行统计分析,得到描述岩层与地表移动变形的统计方法。例如,在我国广为使用的有负指数函数法、典型曲线法、概率积分法等,在波兰推广使用的 Budryk-Knothe 理论法等。该方法只能应用于岩体结构比较简单的情况下,因其简便易行得到了广泛应用,但因回避了岩体本构关系,在岩体结构复杂的情况下,计算结果误差大,甚至无法预计。回避岩体本构关系,给该方法带来了致命的缺陷。

2) 解析法

解析法是对采空区进行各种假设简化,建立地质模型,再按一定的原则抽象为一个理想的数学物理力学模型,按照结构力学方法予以求解,如常用该方法计算采空区地下残留硐室和矿柱稳定性、单硐室或多硐室弹性地基上梁模型或拱模型等。

3) 半预测半解析方法

半预测半解析方法是预测法和解析法的结合,如 B. Dzezli 教授在

Budryk-Knothe 理论上引入傅里叶二维积分变换形成的方法。

4) 数值模拟分析方法

采空区稳定性数值模拟分析可使用有限单元法、边界单元法、离散单元法以及有限差分法等。如 SAP2D 是加拿大学者研发的一种二维情况下开采沉陷计算应用较好的有限元程序。P. L. Meyer 给出了适用于求解岩石力学平面问题的非线性分析程序 NCP-1。目前,用于沉陷分析的有 S. L. Crouch 等提出的 TWODI 程序及 E. Hoek 等完成的二维线弹性程序。应用边界元法可进行三维非线性分析、蠕变岩体、裂隙及断层研究。离散单元法特别适用于节理岩体的分析,模拟采动破碎岩体有明显的优点,在采矿工程中得到了重要的应用,目前,二维离散单元程序如 UDEC2D^[8~32] 已很成熟,研究三维问题的 3DEC 进展也很快。FLAC^[33~42] 是由美国 ITASCA 公司开发的显式有限差分程序,特别适用于模拟岩土类地质材料的大变形力学行为。

20 世纪 80 年代后期,Sirivardane 和 Amanda (1991)、Yao (1993)、Wood (1990)等学者相继运用有限元和边界元法,研究了采动覆岩产生垮落的开采条件和垮落高度、覆岩产生离层裂缝的力学条件及离层裂缝的位置等;康建荣(1999)运用相似材料模拟和离散元法研究了采动覆岩离层形成的过程、机理及基本规律,并开发了适用于任意形状、多工作面、多开采线段的开采沉陷预计系统(MSPS)。常江(1995)以弹塑性理论为依据,将采空区地层概化为一个连续介质和碎裂介质的耦合体,运用有限元法分析了不同覆岩组合对采空区建筑地基稳定性的影响;孙忠弟等(2000)在研究高等级公路下伏空洞对路基场地稳定性的影响时,开发了二维弹塑性理论有限单元法计算软件等。

数值分析方法能从较大的工程范围考虑采空区覆岩介质的复杂性,比较全面地分析采空区覆岩的应力与变形状态,能够对采矿区覆岩从局部开始渐进扩展至整体破坏的过程进行量化表征,能够加深人们对覆岩破坏模式和变形破坏规律的认识。由于采矿工程的复杂性,如何合理概化采矿工程岩体的连续性、建立符合采矿工程实际的计算模型、正确选用计算参数和合理的本构关系等,仍是值得深入探讨和研究的问题。

5) 物理试验方法

世界上大多数国家,为了达到观测开挖沉陷过程的目的,使用小比例尺相似材料试验方法,表现地下空间开挖过程中岩层与地表移动特征,并获得不同程度的成功。

制作物理模型的材料多种多样,最获成功的材料是沙、明胶和弱粘结状态的熟石膏。由这类材料制成的物理模型便于考虑到地质方面的参数,很容易观测到开挖沉陷引起的裂缝生长和传播过程以及其主要移动特征,还能够结

合特殊地质与地下空间开挖条件进行试验,包括多层地下空间开挖或存在岩柱等情况。

物理模型法的显著优点是开挖空间上覆岩层各分层的移动、变形及断裂过程能直接观测。物理模型法能够运用于各种各样复杂地质与地下空间开挖条件下的测点移动与变形预报工作,如断层构造、褶皱构造、含水地层及厚冲积层等特殊地质条件。

3. 不确定分析方法

基于对采矿工程岩体、采矿工程复杂性和不确定性的认识,对采空区覆岩运移规律的不确定性与非线性研究已成为新的研究趋势,如人工智能方法等。

人工神经网络是20世纪80年代后期在现代神经科学研究成果的基础上发展起来的一种新的信息处理技术。人工神经网络(Artificial Neural Net, ANN)是指由大量与自然神经系统细胞类似的神经元联结而成的网络,是用工程技术手段模拟生物神经网络的结构特征和功能特征的一类人工系统。因其具有学习、联想客观程度高、容错能力强等特点,在许多学科中得到了很好的应用。

以往开采沉陷预测的方法有随机介质理论中的概率积分法、剖面函数法以及经验函数法等,结果往往不甚理想,原因是这些理论和方法都缺乏自学习能力,对于在实际中遇到含有噪声和缺乏认知时很难得出令人满意的结论,特别是地下开采的对象——岩体具有非常复杂的力学特性,岩体中含有节理、裂隙、断层等不连续结构面,把岩体力学性状抽象成数学模型时很难把这些因素都作为变量纳入加以分析。神经网络可以模拟人脑的某些智能行为,如知觉、灵感和形象思维等具有自学习、自组织、自适应和非线性动态处理等特性,将其应用于矿山开采沉陷预测,可以解决现有的各种预计方法所难以解决的问题。即使是描述性的因素,也可以作为变量输入,较好地解决了岩体各向异性问题。

目前,不确定性分析法尚存在着诸多不足,如对采空区进行稳定性评价时,不能考虑采空区覆岩变形破坏时的受力状态,也不能考虑采空区覆岩渐变变形破坏的过程,即对采空区覆岩动态稳定性演变过程不能进行分析,此外,不确定性分析方法普遍存在着理论上还不完善的问题,限制了其在工程中的推广应用。

此外,还有其他一些分析方法,如灰色预测方法、采空区矢量法、模糊数学方法等,但这些方法尚需在实践中进一步验证。

综上所述,采空区稳定性分析方法多种多样,各有其优点和局限性,因此,在对采空区进行稳定性分析时,需综合运用各种分析方法,应用系统科学原