

Meikuang Jianzhuwuxia Tiaodai Kaicai Yu Chongtian Kaicai Bijiao Yanjiu



煤矿建筑物下条带开采与 充填开采比较研究

杜蜀宾 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

煤矿建筑物下条带开采与 充填开采比较研究

——以济宁太平煤矿为例

杜蜀宾 著

中国矿业大学出版社

Abstract

Based on the engineering geological theory for mining stratum displacement, taking Jining Taiping Colliery as an example, this paper established an equivalent material model test, numerical simulation and etc. for optimal mining method selection. The numerical simulation and stress analysis were carried out on strip mining and filling mining at No.3 coal seam of Jining Taiping Colliery under buildings. The stress distributing of overlying strata and the ground movement and deformation were studied under various mining conditions. This paper found out the damage process, forms, range of overburden and the laws of ground movement and deformation. The minimum surface movement and deformation with the maximum recovery coefficient were found out. The efficient way of mining for coal seams under villages was determined for production at coal mines.

目 录

第一章 导论	1
第一节 引言	1
一、利用开采方法减缓地表变形	2
二、地表注浆减缓地表变形	2
三、建筑结构吸收地表变形	3
第二节 国内外研究现状	3
一、条带开采技术概述	4
二、膏体充填技术概述	6
第三节 条带开采与充填开采研究方法	8
一、唯象法	8
二、连续介质力学法	9
三、数值分析法	9
四、物理模拟	10
五、工程地质模型	11
第四节 研究内容及技术路线	11
一、主要研究内容	11
二、技术路线	12
第二章 条带开采与充填开采基本理论	14
第一节 概述	14
一、充填法处理采空区	14
二、条带采煤法	15
三、采空区覆岩离层带注浆	16
四、采空区冒落矸石空隙注浆充填	18
第二节 条带采煤法	18
一、条带采煤法的适应条件	18
二、条带开采的类型	19

三、条带开采的岩层移动和变形特点	20
四、条带尺寸设计	22
五、条带开采注意的问题	28
六、我国采用垮落法管理顶板的条带开采参数	29
第三节 水力充填采煤法	29
一、水力充填系统	30
二、倾斜分层走向长壁水砂充填采煤法采准巷道布置特点	31
三、采煤工艺	32
四、粉煤灰井下充填概况	34
五、适用条件及评价	37
第四节 采空区冒落矸石空隙注浆充填法原理	37
一、长壁开采顶板冒落破坏分析	37
二、岩体碎裂扩容现象	39
三、冒落矸石空隙注浆胶结充填技术的特点	40
四、冒落矸石空隙注浆胶结充填技术决定因素	40
五、充填材料	40
第五节 采空区覆岩离层带充填注浆理论	42
一、两相流的主要物理力学性质	43
二、液流中固体颗粒的运动阻力	44
三、固体颗粒在液流中的沉降	47
四、固体颗粒在液流中的运动形式	50
五、固体颗粒在液流中的悬浮条件	51
六、离层带充填注浆参数	53
第三章 研究区的地质特征	55
第一节 地质概况	55
一、矿区地层	55
二、地质构造	58
三、煤层赋存特征	64
第二节 工程地质特征	67
一、煤系岩性岩相研究	67
二、近风化带覆岩性质研究	68
三、煤层顶、底板的工程地质特征	71
第三节 水文地质结构	72

一、松散含、隔水层组	72
二、基层风化带	74
三、红层砂岩	74
四、3号煤顶板砂岩含水性	74
第四节 太平煤矿柳沟村庄下压煤系及松散层的地质结构特征	75
一、柳沟村庄房屋概况	75
二、柳沟村的地质条件及特征	75
第四章 条带开采的物理模型试验研究	78
第一节 柳沟村庄煤柱条带开采的采留宽度初步设计	78
一、条带开采采宽的确定	78
二、条带开采留宽的确定	78
三、条带煤柱稳定性分析	79
四、条带开采方案的初步确定	81
第二节 相似材料物理模拟试验意义	81
一、物理模拟简述	81
二、相似材料模型试验的意义	83
三、模型材料需要满足的条件	84
第三节 条带开采的物理模型试验	87
一、模型试验的设计	87
二、模型制作	89
三、模型开采及观测	92
四、模型试验结果分析	94
第四节 条带开采覆岩移动变形破坏的特征与规律	101
一、覆岩的破坏特征与破坏范围的最终形态	101
二、条带开采覆岩移动变形规律	102
第五章 条带开采的数值模拟研究	104
第一节 数值模拟概述	104
一、有限元法概述	104
二、ADINA 有限元程序简介	106
三、有限元在岩层移动中的应用	107
第二节 数值模型建立与参数选取	108
一、基本思路	108

二、影响覆岩破坏因素分析	109
三、模型的设计	110
第三节 二维计算模型	114
一、计算剖面及单元划分	115
二、条带综放开采数值模拟方案	115
三、开采前后地表变形的数值分析对比研究	119
四、计算结果分析	122
第四节 地表移动变形与建筑物破坏程度的关系	125
第六章 建筑物下充填采煤技术研究	128
第一节 膏体充填采煤技术	128
一、固体废物膏体充填不迁村采煤的意义	129
二、不迁村采煤固体废物膏体充填方法	131
三、膏体充填采煤的研究与采动岩层充填控制理论	133
第二节 膏体充填材料	134
一、膏体充填材料的组成与实验设备	135
二、膏体充填材料的强度	136
三、膏体充填材料的弹性模量	137
四、膏体充填材料的变形性能	137
第三节 充填开采覆岩移动的数值模拟研究	139
一、模拟的地质条件及数值计算模型	140
二、充填开采条件下覆岩的活动规律	143
第四节 膏体充填工艺与经济环境评价	144
一、膏体充填设备与工艺	144
二、充填采矿经济环境评价	145
第七章 展望	148
参考文献	149

第一章 导 论

第一节 引 言

我国煤炭资源分布甚广,不但广大平原地区、丘陵、山区的地下蕴藏着丰富的煤炭资源,而且一些城市和村镇建(构)筑物下、铁路下、水体下(简称“三下”)也滞压着大量的煤炭资源。据不完全统计,截至2005年底,我国国有重点煤矿“三下”压煤的可采储量为137.9亿吨,其中建筑物压煤可采量达到87.6亿吨,而村庄压煤占建筑物压煤的60%。大量的资源呆滞,不仅影响了煤炭企业对资源的开发利用,而且增加了开发难度,开采布局不合理,缩短了矿井服务年限,严重制约了煤炭资源的可持续发展,甚至影响了某些煤炭企业的生存。因此,合理地解决“三下”采煤问题,对缓解能源紧张、提高矿井的服务年限以及发展地方经济都具有重大意义^[1~6]。而实践经验表明,条带开采和充填开采是建(构)筑物下压煤开采的有效方法。

早在19世纪初,人们就开始研究建筑物下采煤引起的地表变形对建筑物的损害。近百年来,各国学者进行了不懈的探索和研究,在开采方法、建筑物加固和修复以及抗变形建筑物的设计等方面取得了丰硕成果。鉴于煤层赋存地质条件、开采方式以及建筑物的基础、结构形式和地基条件的多样性和复杂性,我们需要认真研究采动影响及损害建筑物的机理,以期寻找新的突破口。

采动影响及损害建筑物的机理是:开采沉陷引起地表变形,进而使地基反力产生畸变,基础与地基失去力学平衡,导致上部结构力学平衡破坏,出现应力再分配,在薄弱环节首先表现出破坏(如墙体出现裂缝),释放能量,然后又形成新的平衡。变形加剧,破坏愈加重。建筑物破坏实质上是建筑物基础及上部结构与地基自我调节的结果。

目前建筑物下采煤的研究工作,由以下几方面来体现:一是减缓地表变形;二是建筑物加固和修复;三是建造抗变形建筑物。这里简要叙述一下有关建筑物下采煤减缓地表变形的办法。

一、利用开采方法减缓地表变形

主要是根据井下煤层厚度、采深和地面建筑物的空间位置关系,科学合理布置采煤工作面、工作面推进方向、回采时间、回采层数和采煤工艺,使产生的地表变形达到最小。目前主要有:

(1) 以条带开采为代表的煤层部分开采方法。条带开采是将开采煤层划分为条带形状,按一定的采留比,采一条(采宽为 b),留一条(留宽为 a),使留下的条带煤柱支撑上覆岩层,减少地表变形的开采方法。我国自 20 世纪 60 年代末以来,已在抚顺、鹤壁和峰峰等矿务局几十个煤矿取得预期效果,其最大缺点是回采率低,造成资源浪费。

(2) 充填采空区采煤方法。有水砂充填、风力充填、水力充填和矸石自留充填等。该法有利于减缓地表变形,是建(构)筑物下压煤开采的有效方法之一。但由于充填材料缺少和充填费用较高,吨煤成本增加约 20%~30%,且工艺复杂。

(3) 多工作面联合开采方法。采用多工作面大面积联合开采,可使受保护建筑物下面不出现固定边界,而只出现移动边界,有效减缓地表变形。多工作面联合开采的实施,必须具有良好的地质条件和较高的技术管理经验和组织能力。

(4) 协调开采。就是利用两个煤层(或分层)同时开采所产生的地表变形互相抵消的原理,来达到减小地表变形的目的。

二、地表注浆减缓地表变形

煤层上覆岩层力学性质差异较大且下软上硬时,煤层采后覆岩在垂直方向上的移动呈现时间和空间上的不连续性和不同步性,于是产生离层。离层形成后,实时地由地面向离层间隙注入粉煤灰等充填材料,达到减小地表变形的目的。据有关文献记载^[2],在抚顺等地区减小地表下沉可达 60%以上。

三、建筑结构吸收地表变形

通过开采方法、地表注浆可减缓地表变形,但不可能完全消除地表变形。对建筑物结构采取适当措施,还能吸收消化一部分地表变形(主要是水平地表变形)。如:在基础与基础圈梁之间设置水平滑动层(水平滑动层对吸收水平变形最为有效),减少基础的水平变形向上部建筑物传递;将较长的建筑物人为设置变形缝,切割成几个单元的单体,使各单元均匀沉降,提高适应地表变形的能力;在建筑物基础外侧1 m左右,挖变形补偿沟,吸收地表压缩变形。

煤矿工程地质的主要任务就是查明矿区工程地质条件,对工程地质作出合理的评价。因此,合理有效地控制建筑物下条带开采和充填开采引起的采动沉陷与地表移动,真正了解开采引起的岩层移动的本质,最终建立符合客观实际的岩层与地表移动、变形计算方法,对最大限度地、安全地开采煤炭资源,具有十分重要的理论与现实意义。

第二节 国内外研究现状

在我国,因煤矿地下开采而引起的地表沉陷问题越来越严重,特别是在高潜水位矿区,开采后地表移动盆地内大面积积水,村庄被迫搬迁,生态环境受到严重的破坏,这不仅影响和损害了当地居民的利益,也严重影响和制约了煤矿自身的可持续性发展。因此,如何控制开采沉陷已成为一项重要技术工作。在这种情况下,条带开采与充填开采的优越性逐渐被煤炭行业认同,已成为控制地表沉陷、保护地面建筑物的重要开采措施之一。

19世纪末,德国在埃森矿区的充填试验标志着世界建筑物下采煤技术的兴起。为适应不迁村采煤的需要,一百多年来,国外逐渐发展形成了包括充填开采、联合开采、协调开采、条带开采、房柱式开采和离层区注浆等一系列建筑物下采煤方法。

一、条带开采技术概述

条带开采法是一种部分开采方法,就是将被开采的煤层划分成比较正规的条带形状,在被采煤层中采一条、留一条,使留下的条带煤柱足以支撑上覆岩层的重量,而地表只产生较小变形,达到既回收一部分煤炭资源又控制覆岩与地表沉陷的目的。它能控制垮落带、裂隙带的发育,减少地表沉陷,有利于安全生产。目前条带开采已日益成为建筑物下采煤的一种有效的采矿方法。尽管如此,条带开采由于影响因素繁多,其地表沉陷的机理并不十分明确,相应的地表沉陷预计方法也不太成熟,很少涉及到岩层内部的移动变形预计。因此,进行条带开采地表沉陷预计方法的深入研究具有十分重要的意义。

与全部陷落法开采不同,由于条带开采仅是部分地采出地下煤炭资源,保留了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。条带开采的资源回收率低,一般仅在需要控制地表移动和变形,保护地面设施、水体及铁路的情况下才应用。

1. 条带开采优化设计的原则

条带开采的目的是既要尽量多地回收煤炭资源,又要保证保护对象的正常使用及井下生产安全,因此条带开采在设计时必然面临以下两个方面的矛盾。

(1) 如果回采率太低,虽然保证了保护对象完好无损及其正常使用,但造成了不可挽回的资源损失;如果回采率过高,则难以保证保护对象的正常使用与安全。

(2) 在回采率一定的情况下,如果条带采宽、留宽设计得太小,则不仅会造成搬家倒面频繁,影响生产效率,而且难以保证条带煤柱的支撑能力和长期稳定性;如果条带采宽、留宽设计得太大,则不仅可能导致上覆岩层的大量沉陷,而且可能引起地面下沉盆地出现波浪,不利于实现保护目的。

为合理解决上述矛盾,条带开采设计时应遵循如下四项原则:

(1) 控制条带开采引起的地表变形,使其不超过保护对象的临界变形值,保证保护对象的正常使用。

(2) 回采率尽量高。

(3) 采出条带尽量宽。

(4) 保留条带煤柱尽量窄,但又具有足够的长期稳定性。

(5) 控制地表下沉量,避免因地面下沉而积水。

2. 条带开采在欧洲采煤国家的研究与应用

欧洲的主要采煤国波兰、苏联、英国等于 20 世纪 50 年代开始应用这种方法开采建筑物下尤其是村镇、城市下压煤,已取得了较丰富的实践经验。他们应用条带开采法采深一般小于 500 m,个别采深近千米;煤层采厚大多数为 2 m 左右,少数为 4 m 以上,个别达到 16 m;回采率一般为 40%~60%;条采下沉系数一般小于 0.10,仅个别深部条采的下沉系数达到 0.16,顶板管理方法一般为全部垮落法,仅波兰在回采厚 5.9 m 以上的煤层时采用了水砂充填;因采深及煤层厚度不同,全部垮落法管理顶板时条带煤柱的宽高比为 2.5~83.7 不等,而采用水砂充填法管理顶板时,条带煤柱宽高比为 1.2~5.1,平均为 3.15。

关于条带开采,这些国家从实践上做了不少工作,波兰和苏联曾根据实测资料对深部薄煤层开采地表移动和变形的参数进行了总结,特别是对一些地表移动的角度参数以及下沉系数随开采深度变化的规律进行了分析。但有关条带开采地表移动机理、条带开采优化设计、条带开采地表移动变形预计等方面的研究尚不充分。

3. 条带开采在我国的研究与应用

我国自 1976 年开始应用条带开采法回采建筑物下、铁路下、水体下压煤,迄今已在全国 10 个省的 15 个矿区近 40 个条带开采试验区进行了研究,主要用垮落条带法回采工业广场、农村村庄及工厂建筑物下滞压的永久煤柱,初步掌握了条带开采的地表沉陷规律及其对建筑物、构筑物等被保护对象的影响。

采用垮落条带法开采,其采深一般小于 400 m,采厚 6 m 以下;回采率一般在 40%~78.6%之间,除个别实例由于重复采动、煤体强度

低、回采率偏大等特殊原因影响,使得下沉系数较大之外,条带开采地表下沉系数一般小于 0.2(0.024~0.2);抚顺胜利矿采用水砂充填条带法,开采城市、工厂下部深 500 m、厚 10 m 以上特厚煤层,采宽 60 m,留宽 70 m,成功地控制了地表沉陷,其下沉系数小于 0.04。

我国已对 $0^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 各种倾角的煤层进行了条带开采试验研究,为条带开采法在我国的进一步应用打下了基础。实践表明,条带开采有时出现建筑物破坏现象,其原因是特殊地质采矿条件如断层露头、老空区活化、煤层太软等或开采不当如条带尺寸选择不合适、回采率过高等。

若用条带法开采回收建筑物下压煤,吨煤生产成本低,技术简单,生产管理也不复杂。最重要的是能保证建筑物免受地表移动变形影响而破坏,在开采过程中能保证建筑物正常使用,采后基本不需维修或仅需极少量维修。因此,近年来条带开采法已成为解决我国村庄下、重要建筑物及不宜搬迁的建筑物下压煤开采的有效途径。

由于条带开采能控制垮落带、断裂带的发育,减少覆岩与地表沉陷,有利于保护地面建筑物、构筑物、地形、地貌,有利于安全生产,因而条带开采在铁路下采煤、水体下采煤、管线下采煤方面,也将有广泛的应用前景。

二、膏体充填技术概述

充填开采法在波兰、德国应用较多,英国和苏联也有应用。国外使用的充填材料通常是河砂、矸石和电厂粉煤灰。在发展的初期,主要通过自重和手工充填,以后发展了水力、风力充填方式,其中,水力充填(常称之为水砂充填)应用最多,效果也最好,正常情况下长壁工作面使用水砂充填,地表下沉系数为 0.10~0.20。

1991 年德国矿冶技术公司与鲁尔煤炭公司合作,把在格伦德金属矿经过十余年发展起来的膏体材料充填技术应用到沃尔萨姆煤矿,充填长壁工作面后方的冒落采空区,控制开采引起的地表下沉和处理固体废弃物,试验工作面煤层厚度为 1.5 m。

沃尔萨姆矿应用的膏体充填材料由粉煤灰、浮选矽石、破碎岩粉等制成,材料的最大粒径小于 5 mm,浓度非常高,可以达到 76%~84%。膏体材料与泵送混凝土类似,其突出的特点是长时间静置不分层、不泌水,因此,膏体材料不存在临界流速,在很低流速(1 m/s)情况下也能够正常地泵送。

沃尔萨姆矿膏体充填工艺上使用普兹迈斯特公司生产的液压双活塞泵压力输送,工作压力为 25 MPa,最大输送距离达到 7 km,在井下回采工作面,主充填管顺工作面煤壁方向布置在输送机与液压支架之间,每隔 12~15 m 的距离接一布料管伸入到采空区内 12~25 m 进行充填,充填管路紧随着工作面设备前移。充填管接入回采工作面后方的长度决定于弯曲下沉带顶板对采空区冒落矽石的压实过程,在冒落矽石初步形成,还处于松散状态或只有轻微压实的时候及时充填的效果最好。膏体材料充填工作面不设置隔离滤水设施,利用冒落矽石的吸水效应可以防止膏体材料在扩散还未进入支架区就失去流动性,所以,这种充填对工作面的生产条件和环境条件没有明显的不良影响。

需要指出的是,由于德国煤矿相继关闭,膏体充填工作没能在国外煤矿中进一步深入开展下去。从德国煤矿膏体充填初步试验的情况来看,其地表下沉系数为 0.30~0.40,介于水砂充填与风力充填之间。

膏体充填的泵送设备实际上就是一类混凝土泵。1907 年,德国就开始研制混凝土泵并取得世界上第一个混凝土泵专利。1959 年,德国施维因(Schwing)公司生产了世界上第一台全液压混凝土泵。1979 年,德国普兹迈斯特(Putzmeister)公司研制成功了世界上第一台矿用膏体充填泵。与普通混凝土泵比较,矿用膏体充填泵为固定式,液压泵站与混凝土泵送缸体不组装为一体,而是分成两部分,一般矿用膏体充填泵缸体直径较大、活塞行程较长,这样可以降低冲程频率,减少震动和磨损,更适合长时间连续作业。

目前,国外膏体充填矿山使用的充填设备绝大部分是德国普兹迈

斯特公司生产的充填泵,其中俄罗斯诺雷尔斯克镍矿由3台KOS 2180泵并联组成的膏体充填系统是当前世界上最大的膏体充填系统,充填能力达到 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 。德国、美国和日本是世界混凝土泵和泵送技术的主要出口国家,代表了世界混凝土泵的先进水平。国外混凝土泵以液压活塞式为主,不断向高可靠性、高耐磨性、高泵送压力、大排量、低噪声和低振动方向发展,从反映混凝土技术水平的活塞与分配阀的寿命来看,国外已经达到活塞寿命 $30\ 000\text{ m}^3$ 以上,S型分配阀寿命 $80\ 000\text{ m}^3$ 以上。

第三节 条带开采与充填开采研究方法

为研究条带开采与充填开采引起的覆岩与地表移动规律、地表沉降预计,学者们采用了唯象法、连续介质力学法、数值模拟、物理模拟及工程地质模型等,并得出许多有价值的结论。

一、唯象法

所谓唯象法,就是指根据现象或者输入、输出(如采矿方法、工作面尺寸及地表观测站资料),而不详细考察内部结构(工程岩体的性质),得出的输入与输出之间的定性或定量关系。目前条带开采与充填开采地表沉降普遍采用的预计方法主要归于此类^[44]。唯象法主要包括经验图表法、剖面函数法、典型曲线法和影响函数法。

剖面函数法是根据地表下沉盆地剖面形状来选择描述下沉盆地剖面的相应函数,作为计算地表移动和变形的公式;剖面函数形式以曲线拟合或最优化方法确定,并常表示为与地质采矿条件数据有关的经验公式,以预计时采用。典型曲线法是用无因次的典型曲线表示移动盆地主断面上的移动和变形曲线的一种方法,它适用于矩形或近似矩形采区的地表移动和变形预计;典型曲线可以用诺谟图或分布系数表示。影响函数描述微小单元开采面积对地表影响的特性和程度。通过影响函数对开采面积的积分计算地表的移动和变形,其核心是影响函数和叠加原理;不同的影响函数可导出不同的预计方法,而应用

最广的是概率积分法。

唯象法是地表沉陷预计的基本方法,它能够较好地拟合地表的移动变形,适合于本地区的地表移动变形预计,而且应用非常方便。但由于曲线仅依赖于剖面方程的少数几个参数,或者说条带开采工程岩体的内部结构及其性质仅由预计参数来综合反映,因此,唯象法在相同条件下的类比预计较为可靠,但条件若有改变,其预计精度并不高。

二、连续介质力学法

连续介质力学法是将上覆岩层视为满足特定边界条件的某种连续介质,按现有的力学方法求解上覆岩层移动和变形的方程。以连续介质力学为基础的方法能够较好地反映岩层及地表沉陷力学发展过程的本质。根据概化的连续介质的不同,可细分为岩梁理论、组合梁理论、托板理论及层状介质(无限大板的组合)理论等^[1,45~46]。

岩梁假说提出,煤层开采时,在采空区裂隙带上方存在着一层完整的、起控制作用的岩梁,或者如同一个受煤柱和冒落拱局部支撑而产生弯曲下沉的弹性地基梁,然后按线弹性理论给出了复杂的应力与位移计算公式。在岩梁假说的基础上,提出了托板假说,认为顶板岩体内存在着一层强度相对较大的坚硬厚岩层,它的作用类似于托板,可以减缓和减小地表的下沉。

虽然连续介质力学法能够揭示地表沉陷的力学本质,但是,由于上覆岩层本身的复杂性,在建立力学模型的过程中不得不作出一些假设(比如假定上覆岩层为各向同性或横观同性等),这些假设与岩层本身的力学特性存在一定的差异。通过实验室试验获取的岩石力学参数并不完全相同,有时差别很大。这就使得连续介质力学法在开采沉陷预计中受到了限制。按这些理论不能解释地表为何出现盆地,也不能确定坚硬岩层之下位岩体的应力和位移分布。

三、数值分析法

在开采沉陷研究领域,常用的数值分析方法有:有限元法、离散元法、边界元法等^[8,47~50]。

有限元法是用有限个单元将连续体离散化,通过对有限个单元作分片插值,求解各种力学、物理问题的一种数值方法。

离散元法是将节理裂隙所切割的岩体作为完全分割的块体镶嵌系统。在岩体开挖前后,考虑系统各个块体在每一时刻占有的空间位置和相应的受力状态,由此可模拟岩体从开裂到塌落的全过程。

边界元法实质是一种求解偏微分方程边值问题的一种数值方法。该方法是对具有已知边界条件的域,把基本支配方程转换成相应的边界积分方程,然后通过对边界的离散化建立相应的代数方程组进行求解,故又常称为“边界积分方程法”。

数值模拟这种计算研究方法,随着计算机技术的发展得到了飞速的发展。在这种方法中,可以采用不同的模型进行计算分析。模型可以多种多样,计算分析的时间相对较短。但这种方法受所采用的计算模型的限制,对岩石这种复杂介质用单一或某些组合模型来模拟,因此还不能代替传统开采沉陷预计的方法。

四、物理模拟

物理模拟包括相似材料模型模拟和电模型模拟,但电模型模拟应用较少。

相似材料模拟试验是以相似理论为指导,在实验室内用缩小的模型再现开采过程中围岩变形破坏以至地表移动等一系列复杂的物理力学现象,定性及半定量地分析岩层移动规律。该方法可以根据需要对某个地质条件多次进行变换,从而可以研究地质采矿条件与开采沉陷之间的关系,还可以直观地了解开采过程中模拟岩层的移动破坏过程,为理论分析建立模型提供依据,但这种方法中的一些岩石力学参数的选取、模型制作的工艺过程以及观测技术等对实验结果有很大的影响,因而在目前只能得出一些定性或半定量的结果。目前的相似材料模型试验主要局限于平面模型^[51~54],由于立体相似材料模型费用大,难以进行内部移动变形观测,而且模型之间观测结果的可比性差,因而限制了其推广应用。

为了探讨覆岩及地表的沉陷机理,一般是进行物理模拟和数值模