

Caikongqu Gongcheng Jiegou Kangcaidong Sheji Lilun Ji Jiagu Xinjishu

# 采空区 工程结构抗采动设计理论 及加固新技术

段敬民 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

# 采空区工程结构抗采动设计理论 及加固新技术

段敬民 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书主要分析了矿山开采对建(构)筑物的影响,研究了矿山采空区地表变形规律和建(构)筑物及其基础变形与对应地表变形的关系;进行了相似材料模拟试验研究;研究了矿山采空区上部结构-地基-基础共同作用问题,建立了矿山采空区上部结构-地基-基础共同作用力学模型;分析了建筑物受采动影响的程度和使用的安全性,研究了矿山采空区已有建筑物的保护以及采空区新建条形基础建筑物的设计方法;提出了可移动及升降点式基础房屋抗采动设计理论和概念加固思想,结合工程实例进行了应用研究。

本书可供从事岩土工程、建筑工程、结构工程、矿山建设工程等的教学、科研人员及工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业高年级本科生和研究生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

采空区工程结构抗采动设计理论及加固新技术 / 段敬民

著. —徐州:中国矿业大学出版社, 2008. 10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0082 - 2

I. 采… II. 段… III. ①采空区-工程结构②采空区-建筑物-加固 IV. TU433 TU746.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第161986号

书 名 采空区工程结构抗采动设计理论及加固新技术

著 者 段敬民

责任编辑 褚建萍

责任校对 李 敬

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 8.5 字数 212 千字

版次印次 2008年10月第1版 2008年10月第1次印刷

定 价 58.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



## 序

随着社会的发展和科学技术的进步,人类对作为目前主要能源的煤炭需求量越来越大。我国是个煤炭储量丰富的国家,大小煤田遍布各地,有大量的村庄城镇位于煤田上方。随着煤炭需求量的急剧增加,煤炭开采量也随之加大,煤炭的开采范围越来越广,造成大量的建筑物和构筑物处于采动区之上,伴随着各矿区的地面建筑和公共设施的扩大,造成各矿区的地面建筑物及构筑物下压煤量不断增加。如何设计出结构更加合理的抗采动建筑物(构筑物),如何对既有建筑物(构筑物)进行检测、评估并采取有效的加固以延长其寿命,是建筑物下采煤及其地面建筑物保护至今没有彻底解决的理论问题及技术问题之一,本书主要在以下几方面作了研究。

(1) 分析了矿山开采对建筑物(构筑物)的影响,研究了采动区地表变形规律,并进行了建筑物(构筑物)及其基础变形与对应地表变形的关系研究。

(2) 综合应用建筑结构力学、矿山开采沉陷学、土力学、材料力学等相关知识,研究了采动区上部结构—地基—基础共同作用问题,应用采动区上部结构—地基—基础共同作用力学模型,分析了采动过程中基础、上部结构变形、内力及地基反力等变化规律及主要因素的影响规律。

(3) 研究了受采动(地表不均匀的下沉和水平移动产生的地表变形等)影响的条形基础建筑物基础的附加作用力,分析了计算附加作用力的基本假定。并分析了建筑物受采动影响的程度和使用的安全性,研究了采空区已有建筑物的保护,及采空区新建条形基础建筑物的设计。

(4) 针对采空区的条形基础建筑物(构筑物),本书提出了“可移动及升降点式基础房屋抗采动设计理论”,包括设计思想的提出、理论研究、附加作用力公式的推导与建立,建筑材料的优选及构造措施,并确定了可移动及升降点式基础的参数,该理论的实施改善了传统的“条形基础抗采动房屋”的结构受力性能,使得建筑物(构筑物)能更有效地吸收和抵抗地表移动和变形。研究表明:可移动及升降点式基础房屋抗采动设计理论技术可行,该房屋的基础结构属柔性基础,可升可降,且房屋基础的顶部安装有调节水平变形的装置,不但可以有效地吸收水平变形,而且有非常好的吸收竖向变形的功能。主体结构则采用刚性措施。这种“柔”和“刚”的有效结合,更有效地保护了采空区的建筑物,特别适用于综采放顶煤的地表建筑物保护。

(5) 在采空区既有工程结构加固方面,提出了“概念加固思想”,并阐述了其基本概念及内涵,提出了工程结构概念加固的基本原则及思路,提出了对既有结构基于概念的评估,结合工程实例进行了应用研究。

在创新方面,本书注重理论结合实际。对采空区常见的框架结构、砌体结构房屋有特点地分析了采动对其的影响,建立了采动附加作用的计算理论,明确了附加作用的施加方法及其与其他作用的组合方式;为适应采动变形,提出了可移动及升降点式基础设计理论,既明确了其概念及工作原理,也阐述了点式基础的抗采动设计理论,并附列了首次应用设计的情

况;对采空区既有房屋结构,提出了基于概念的综合评估方法和概念加固思想及基本原则,为大量采空区的既有房屋结构提供了一套切实可行的检测、评估及加固理论和方法。

深感作者为建筑物下采煤及其地表建筑物保护的最终解决提出了极有价值的设计理论及加固思路,撰写的内容为采空区建筑物抗采动加固机理研究的工程界亟待解决的问题,并为此付出了艰辛的工作,总结著书,为此在本书付梓之日,乐于应约表达我的感受,并祝贺本书的出版,鼓励作者,权以此为序。

中国工程院院士



2008. 06. 18

## 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论                     | 1   |
| 1.1 研究的意义                    | 1   |
| 1.2 研究的背景                    | 1   |
| 1.3 研究的内容与重点                 | 10  |
| 1.4 研究采取的方法与技术路线             | 11  |
| 1.5 在理论及工程应用上的创新             | 13  |
| 第 2 章 地下矿山开采对建(构)筑物的影响和损害    | 14  |
| 第 3 章 采动覆岩地表变形规律及开采沉陷模拟研究    | 19  |
| 3.1 采空区地表变形规律                | 19  |
| 3.2 模型试验的意义与原理               | 22  |
| 3.3 试验模型的设计及制作               | 26  |
| 3.4 模型的开采和观测                 | 27  |
| 3.5 模型试验结果分析                 | 28  |
| 第 4 章 采空区框架结构与地基和基础共同作用的数值分析 | 31  |
| 4.1 地基土与建(构)筑物共同作用的概念        | 31  |
| 4.2 框架结构采动影响下地基与基础共同作用       | 34  |
| 4.3 采动下框架结构动态变形规律及影响因素       | 37  |
| 4.4 框架结构采动影响的有限元模拟           | 37  |
| 4.5 框架结构抗采动设计理论              | 46  |
| 第 5 章 采空区条形基础房屋抗采动设计理论       | 49  |
| 5.1 条形基础房屋采动下的基础附加作用力        | 49  |
| 5.2 采动下墙体内力分析与结构承载力计算        | 61  |
| 5.3 采动下砌体结构房屋墙体裂缝的成因与防治      | 77  |
| 第 6 章 采空区可移动及升降点式基础房屋抗采动设计理论 | 84  |
| 6.1 可移动及升降点式基础的概念及工作原理       | 84  |
| 6.2 可升降点式基础房屋抗采动设计理论要点       | 87  |
| 6.3 可移动及升降点式基础工程实例           | 99  |
| 6.4 小结                       | 100 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| <b>第 7 章 采空区既有房屋抗采动评估加固理论与方法</b> ..... | 102 |
| 7.1 矿山采空区既有房屋结构抗采动评估 .....             | 102 |
| 7.2 矿山采空区既有房屋抗采动概念加固思想及基本原则 .....      | 106 |
| 7.3 整体预应力加固技术及工程应用 .....               | 109 |
| 7.4 小结 .....                           | 118 |
| <b>参考文献</b> .....                      | 119 |
| <b>后记</b> .....                        | 127 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究的意义

作为中国能源工业主体的煤炭工业为保证国民经济的快速发展作出了重大贡献,但能源供应总量不足问题依然存在,应该说,我国能源的总量平衡矛盾将是长时期的。因此,煤炭工业的可持续发展对整个国民经济的发展起着非常重要的作用。目前,制约其可持续发展的因素很多,除了采煤技术自身以外,采动产生的负面影响日益突出。

针对矿山开采而造成的各类影响的研究已有一定的历史,比如,采动沉陷机理研究、沉陷工程控制方法、采动损害,等等,这些研究普遍偏重于地层受采动影响的变形研究,但由于岩土体本身的复杂性而未有突破。工程界乃至采煤界一直想获得在采动下建筑物的受力特征、抵抗采动作用的设计与加固理论及方法,从而突破大量“三下”(建筑物下、水体下、铁路下)压煤不能开采等现实困境,这也正是本书研究的初衷与目的。本书力求在理论分析、模型验证的基础上建立实用的抗采动设计及加固理论与方法,实现真正意义上采煤业的可持续发展。

## 1.2 研究的背景

在人类研究领域中,土木工程是一门较古老的门类,它始终产生于客观实际,并最终体现在客观实践中,即改造客观现实,使其更好地服务于人类生产与生活。本书的研究工作也不例外。采煤业的发展和采煤工艺的进步,造成了地表采动损害和大量压煤的事实,这是研究的工程背景;前人对采动的研究多集中于沉陷机理的研究和沉陷的工程控制方法,这是研究的理论背景;随着计算机技术的飞速发展,沉陷监测、模型研究乃至计算机仿真技术的出现与发展为本书提供了技术背景。

### 1.2.1 研究的工程背景

我国人口众多、矿产资源丰富,大量地下矿藏处在人类生活与生产区域内,随着煤炭的开采范围越来越大,大量的建(构)筑物处于矿山采空区之上<sup>[1~3]</sup>。据有关资料报道<sup>[4,5]</sup>,国有煤矿“三下”压煤总量约为137.9亿t,其中建筑物下压煤高达87.6亿t(占63.5%左右),而建筑物的压煤中有60%属于村庄下压煤。地下开采引起的地表移动,不仅会造成地面建筑物破坏,而且会严重地破坏人民群众生活条件和生态环境。随着矿区地面建筑物的逐渐增多,矿山采空区地面建筑物的设计、保护与加固问题直接关系到矿区和周围社会的生产、生活和环境。建筑物下的压煤开采正严重制约着许多矿区的可持续发展,直至影响到国民经济的可持续发展<sup>[6~10]</sup>。因此,解决在建筑物下采煤问题,不论从理论上、技术上还是经济上,都具有明显的经济效益和社会效益。

### 1.2.1.1 采煤技术的发展与压煤情况

所谓采煤方法,就是根据不同的矿山地质及技术条件,结合不同的采煤系统与采煤工艺从而构成多种多样的采煤方法<sup>[11]</sup>。如在不同的地质及技术条件下,可以采用长壁采煤法、柱式采煤法或其他采煤法,而长壁与柱式采煤法在采煤系统与采煤工艺方面差别很大。由此可以认为,采煤方法就是采煤系统与采煤工艺的综合及其在时间和空间上的相互配合,但两者又是互相影响和制约的。采煤工艺是最活跃的因素,采煤工具的改革要求采煤系统随之改变,而采煤系统的改变也会要求采煤工艺做相应的改革。事实上,许多种采煤方法正是在这种相互推动的过程中得到改进和发展,甚至创造了新的采煤方法。我国煤层赋存条件多样,开采技术条件各异,因而,促进了采煤方法的多样化发展。

采煤方法分类很多,大体可分为壁式体系采煤法和柱式体系采煤法。

#### (1) 壁式体系采煤法

一般以长工作面采煤为其主要标志,产量约占我国国有重点煤矿的95%以上。随着煤层厚度及倾角的不同,开采技术和采煤方法有所区别。对于薄及中厚煤层,一般都是按煤层全厚一次采出,即整层开采;对于厚煤层,可把它分为若干中等厚度(2~3 m)的分层进行开采,即分层开采,也可采用放顶煤整层开采,综采放顶煤开采就是其中技术成熟的一种方法。综采放顶煤开采(简称“综采”)起源于苏联、东欧,但没有大范围使用,因此,矿山采空区地面建筑物损伤及破坏问题不突出。综采放顶煤开采技术在厚煤层多的中国得到广泛应用,由此带来地表的大下沉、大位移及其对建筑物的严重破坏情况<sup>[11~13]</sup>。煤炭科学研究总院唐山分院、中国矿业大学在该领域进行了深入研究,并进行了工业试验:一是在地下采煤工艺上进行研究,二是在地表建(构)筑物保护方面进行研究<sup>[14~21]</sup>。

#### (2) 柱式体系采煤法

柱式体系采煤法以短工作面采煤为其主要标志,我国国有重点煤矿中采用这类采煤法的产量比重在5%以内。柱式体系采煤法在地方煤矿应用较多,在国有重点煤矿,大多用于开采条件不正规、回收巷道煤柱或机械化水平较低的矿井等。近年来,我国引进了美国的一些配套设备,以提高机械化程度,进行正规开采。这种高度机械化的柱式体系采煤法作为长壁开采的一种补充手段,在我国也有一定的应用。

世界上各个采煤国家,无论是采用壁式还是柱式采煤法,为了保护地面建筑物、铁路等免受开采的有害影响,以及防止水体灌入采空区淹没矿井,都在井下留设了大量煤柱。而且,随着工业的发展,矿区地面建筑物和铁路线日益增多,煤炭开采深度逐渐加大,煤柱的尺寸要比地面保护对象的尺寸大得多,例如波兰的西里西亚煤田生产矿井压在保护煤柱中的煤炭储量达35亿t,占矿井总平衡表内储量的40%;英国海下压煤量达6.5亿t。我国“三下”压煤量也很大,有些新投产的矿井压煤就占全矿井储量的40%~60%。山东兖矿集团1995年用于压煤村庄搬迁及沉陷区土地赔偿的费用达1.5亿元。山东、江苏、河北、安徽、河南等人口密集的省份,村庄下压煤问题突出,其中山东兖州矿区121个村庄压煤6.0亿t;河南平煤集团114个村庄压煤2.1亿t;河北开滦矿区75个村庄压煤5.8亿t;安徽淮北矿区122个村庄压煤2.2亿t;而江苏徐州矿务集团村庄压煤2.1亿t,占总可采储量的31%<sup>[22,23]</sup>。同时,生产矿井留设大量保护煤柱使矿井开采条件复杂化,影响井下巷道和采区的正常布置,而且造成地下煤炭资源不能充分利用,缩减了矿井的服务年限。

## 1.2.1.2 采动损害与煤炭工业可持续发展

煤炭资源的大规模开采,一方面,满足了我国经济建设的需要,另一方面,诱发或引起了煤矿冒顶、震矿等井下安全事故和煤矿区地表地质环境灾害(简称采动损害)。曾有专家撰文指出:从全国范围来看,每年矿山开采沉陷灾害的总体损失不亚于一次地震或洪水<sup>[24]</sup>。在煤炭开采之前,由岩土、煤炭资源、地壳稳定性等构成的地质环境受自然地质作用控制,处于天然形成的应力平衡状态。由于煤炭井下开采,当开采面积达到一定范围之后,开采区域周围岩土体的原始应力平衡状态受到干扰,因此,在采煤的过程中以及开采以后一段时期内,岩土体和地表必然要通过连续的移动、变形和非连续的破坏(开裂、冒落等),使应力重新分布,以达到新的平衡。这种现象在采矿界被称为“开采沉陷”(Mining Subsidence)或岩层与地表移动(Rock Strata and Ground Movement)。开采沉陷或岩层与地表移动必然引起地表变形,导致位于移动岩体内的井巷、硐室等以及位于开采影响范围内的建筑物、水体、铁路和管线等改变其原有状态,甚至破坏,称之为采动损害<sup>[25]</sup>(Mining Damage)。

采动损害的定义可分为两种:狭义来讲,对地下矿藏的开采,使地上地下的建(构)筑物、自然对象受到的影响统称为采动损害,它与矿山岩体工程力学相对应;广义的采动损害主要指岩层和地表受开采影响而发生的大量移动变形导致的一切有害后果。岩层及地表移动规律对地表建筑物和自然对象的有害影响是这一研究的主要内容。采动损害的表现形式很多,主要有地表沉陷损害、地面倾斜损害(即开采引起的不均匀沉降改变了地表原始坡度,造成了地面倾斜)、地表弯曲损害、地面水平变形损害等,其中,地表沉陷损害最多,也被学术界研究最多。

开采引起地表沉陷使地表出现下沉、倾斜、曲率、水平移动和水平变形等,进而导致位于开采影响范围内的建(构)筑物(诸如自然村庄、铁路、公路、工业广场、管道设施等)受到破坏,严重时将失去原有使用价值。如阳泉矿务局四矿前家掌中央风井,受采矿影响,造成中央风井错位而报废;潞安矿务局屯留矿井铁路专用线大部分位于采空区,最大塌陷深度在4 m左右,地表倾斜达30 mm/m以上,致使该铁路营运受到严重威胁。至于采煤塌陷对居民住宅的破坏更是屡见不鲜。据不完全统计,山西省由于煤矿开采引起的地质灾害危及村民安全而被迫迁村的已多达145个自然村,另有200多个村庄的民房也遭到不同程度的破坏。淮南市的大通镇、九龙岗镇和淮北市的烈山镇均因地表塌陷遭到严重破坏,甚至成为一片废墟,原城镇不得不搬迁重建。

进入20世纪90年代以来,可持续发展的概念和理性思考已开始在全世界推行,并且在1992年巴西里约热内卢世界环境与发展大会上成为会议的主题,明确写入指导世界各国今后发展行动的《21世纪议程》。作为一种全新的发展模式和发展战略,可持续发展的概念已经为世人普遍承认。可持续发展的实质是,经济发展与社会发展、环境保护及资源的开发利用相互协调,“既满足当代人的需要,又不对后代人满足其需要的能力构成危害”<sup>[26]</sup>。

煤炭工业可持续发展的概念是:煤炭工业所属矿区的经济发展、社会进步、环境保护与资源的开发利用相互协调,并向社会提供洁净燃料、原料及电力;在运用市场机制、依靠科技进步及寻求可替代资源的基础上,调控煤炭资源的最佳耗竭率,使煤炭工业的发展既能满足当代人的需要,又不对后代人满足其需要的能力构成危害。显而易见,在目前的经济技术条件下,采动损害与地表下压煤是阻碍可持续进程的最大障碍。

### 1.2.2 研究的理论与技术背景

以往对采动的研究主要是针对开采沉陷理论的,基本上是沿着:现场观测、探测方法—理论分析方法—室内物理模拟方法—数值计算方法的技术路线来进行研究的,这是理论层面。在应用技术层面主要研究了采动沉陷工程控制技术。

#### 1.2.2.1 采动沉陷的研究现状

采动沉陷研究中,最具成果的就是覆岩沉陷理论。覆岩沉陷理论的首次系统调查研究应归功于比利时的采矿工程师们。19世纪20年代,列日市发生大面积的地表移动,引起建筑物破坏,由此开始了这方面的研究工作。此后的100年间,开采覆岩沉陷现象一直是煤矿重点研究的课题,特别是在井下开采采用长壁采煤最为普遍的欧洲,许多学者从事于开采沉陷研究工作,如Kratzsch、Budryk、Knothe、Litwiniszyn、Worotnicki、АБернунH等都作出了卓越的贡献,曾经提出许多理论来解释从开采区域通过上覆岩层运动发展到地表的岩层沉陷机理。这些理论包含了一些梁、拱弯曲及一些基于经验曲线的初步概念,也包含了现代覆岩沉陷数学模拟原理所假定的两个不同的概念:一是将上覆岩层看做是一种连续介质,另一认为是随机介质。从其技术路线可以了解其最新的发展情况。

##### (1) 现场观测、探测方法

包括覆岩移动观测、岩体应力观测、钻孔量测、工程物探,等等,可以观测地表及覆岩内移动、变形破坏的规律,获取围岩应力应变及岩体力学性质的实际资料。它是理论研究方法的基础,可以为理论研究提供必要的参量,同时又可以检验研究结论的可靠程度。目前比较先进的有:我国平顶山和枣庄网状观测站、美国SONOEX沉降系统、英国E2/OMS03/R48全站型仪器系统、GIS技术的应用、多道数字地震仪、钻孔电视、全波列数字测井系统、钻孔CT技术等。

##### (2) 理论分析方法

开采沉陷学科发展100多年来,理论研究方法更是复杂多样,主要有几何方法、随机介质方法、统计分析方法、材料力学方法、结构力学方法、弹塑性方法、黏弹性方法,等等。其中,Litwiniszyn基于开采引起的岩层及地表移动规律与作为随机介质的非连续颗粒体介质模型所描述的规律在宏观上相似原理,于1958年提出了随机介质的概念,并从统计的角度研究岩体移动问题。50年来,随机介质理论日臻完善,并为大量模拟及现场试验结果所证实。刘宝琛从随机介质的概念出发,导出了随机介质移动的基本方程及其在各种特定开采条件和地质条件下的特解,并逐渐发展成为目前在国内外应用最广、理论和实践上较为成熟的随机介质理论(Stochastic Medium Theory)。

近几年来,国内外在采用力学分析方法解决“三下”采煤引起的地面沉陷问题中,也取得了很大成绩。在这方面的研究成果中,Berv(1963, 1978)和Avasthi(1992)利用平面线弹性关系计算岩层与地表移动问题,而后推广到三维线弹性;白茅(1982)利用弹性理论的位移函数法导出了长壁采煤法采空区上方岩层及地表移动的函数表达式;李增琪(1983~1985)利用傅氏积分变换计算了开挖引起的地表移动;Kratzsch(1983)和刘宝琛(1982)研究了岩层移动的流变模型;Bahl(1972)对覆岩沉陷进行了弹塑性分析。

##### (3) 室内物理模拟方法

覆岩沉陷研究中最常用的室内物理模拟方法是相似材料模拟法,其次是离心模拟、电模

拟、光电模拟等。苏联于1937年首先采用相似材料模拟法研究覆岩移动变形,波兰、捷克等国也相继开展了这方面的工作。我国在20世纪50年代末开展此项研究,其中辽宁工程技术大学、中国矿业大学、煤炭科学研究总院开采所、山东科技大学相继建立了较好的实验室。这种方法能比较形象直观地研究地表移动,特别是便于观察岩体内部的运动特征,可以部分弥补理论分析方法的不足,且有成本低、周期短等优点。但也由于模拟条件复杂、平面模型边界条件难以满足、材料配比相似性差等原因,使得这一方法目前只能达到定性或部分定量分析的要求。

#### (4) 数值计算方法

数值计算方法,主要包括有限元法、边界元法和离散元法等。有限元法适用范围广,有着独特的优点,可以选用不同的本构关系,采用灵活多样的单元,尤其适用于覆岩沉陷这种复杂问题的求解。20世纪70年代以来,国内外学者广泛应用数值计算方法对开采覆岩沉陷及顶板“两带”发育高度、井筒开挖过程、条带开采等进行了一系列的模拟分析,取得了较大的进展。

采动覆岩沉陷研究涉及采矿、地质、测量、力学、建筑、计算机等多学科,近几年来,这些学科的新成果不断被引进到沉陷研究中来,产生了一些新方法和新理论,主要有:

(1) Litwiniszyn(1995)对随机介质理论法做了进一步的论述;刘宝琛(1996)研究了近地表开挖随机介质理论的实用性,并发展为多项介质的锅合计算;Rauch(1994)研究了开采沉陷的水力学作用效应;李文秀(1994)、张玉卓(1994)用模糊数学方法研究随机介质理论计算和选定基本参数,也取得了一些有意义的成果。

(2) 力学方法得到了更深入的应用。刘天泉(1995)提出了采动覆岩变形从量值上及分布形态上都取决于采动岩体的垮落空间形态的空间形态论,以及采动岩体和地表变形与地层的结构有密切关系的地层结构论;马伟民等(1994)提出了采动岩体空隙扩散模型以及考虑节理损伤的力学模型;王金庄(1994)、钱鸣高等(1996)相继发表了托板及关键层岩层控制的学术项目;沈光寒、吴戈(1990, 1991)研究了开采沉陷岩体力学模型的优化与参数识别问题。

(3) 王泳嘉(1991)把离散元应用于沉陷研究;何满潮(1989)提出了“拟连续性微元尺寸”概念,并借此用连续介质与非连续介质锅合大变形有限单元法研究了地下开挖位移问题;邹友峰(1994)编制了条带开采沉陷预计的三维层状介质计算机程序;麻风海(1994)用三维弹塑性节理有限元法探讨了井筒煤柱开采岩层移动规律;狄乾生(1992)、疏开生(1993)应用非线性三维有限元模拟了开采沉陷覆岩移动;吉小明(1995)探讨了开采沉陷三维数值模拟及参数反演问题。

(4) B. A. ByTnauxHH(1984)介绍了建立在移动衰减函数基础上的层状岩体的岩层变形计算,并用下列衰减函数描述了岩体内移动等值线,即移动过程不均匀,出现层离裂缝和断裂的情况。

$$q_M = \frac{1}{1 + (H/b)^m}$$

式中  $q_M$ ——第  $M$  层的相对下沉量;

$H$ ——开采深度;

$b$ ——采空区的尺寸;

$m$ ——影响系数。

邓喀中(1993)基于断裂和损伤力学分析了覆岩沉陷的节理变形机理,分析了层面效应对岩层及地表移动的影响;钱鸣高等(1995)研究了采场上覆岩层结构的形态与离层分析;吴戈(1994)、高延法(1996)、张玉卓(1997)分别从不同的角度初步探讨了采动覆岩移动不协调性及沿物理力学性质差异较大的岩层间弱面产生离层的判定条件。

#### 1.2.2.2 采动沉陷的工程控制技术

19 世纪末以来,欧洲工业快速发展,有用矿产的需求量迅速增加,新矿井不断兴建,与此同时,围绕大矿区形成了许多巨大的工业中心,如德国鲁尔煤田、波兰西里西亚煤田、俄罗斯的顿巴斯煤田等。相应的“三下”压煤量也不断增多,西里西亚煤田压煤量就达可采储量的 58% 以上,压煤及开采沉陷问题成了制约矿区发展的重大障碍。第二次世界大战后,欧洲学者重新集中力量研究开采沉陷损害及工程控制问题,其中波兰学者和工程技术人员获得了引人注目的成果。

20 世纪 60 年代以来,相继成功地开采了 Byton Katowice 等 10 个大城市下的压煤,近年来平均每年从建筑物下采出的煤量占全国年产量的 40%~52%。俄罗斯也是从事“三下”采煤历史悠久的国家,平均每年从建(构)筑物下采出 5 000 万 t 以上煤炭,并相应颁布了 30 余部规程和规范。另外,英国、德国沉陷损害及工程控制的研究也居世界先进水平,各有一套行之有效的技术方法和规范,如英国 1975 年出版的《地面沉陷工程师手册》,在中国起到了很大的借鉴作用。

我国从 20 世纪 50 年代开始进行沉陷损害及工程控制方法的研究,开滦、淮南矿区在唐山煤矿研究院的协助下,首先建立了第一批岩移观测工作站,开始了我国的压煤开采沉陷研究和损害防治工作。到目前为止,我国已有 100 多个矿,2 000 多个工作面开采了“三下”压煤。据不完全统计,自建国到 1982 年我国从“三下”共采出 595 000 万 t 煤炭,平均每年采出 14 000 万 t。1982 年采出原煤达 36 000 万 t。1985 年出版的《建筑物下、水体下、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》,标志着我国开采沉陷损害工程控制研究达到了一定的水平。

#### 1.2.2.3 有限元计算与仿真技术

20 世纪工程界最大成就之一就是有限元的产生与发展。当今的土木工程界,整个学科已由理论与试验(包括工程实践与观察)两级构成变为理论、试验和计算的三级构成。大量依赖低水平重复试验结果、通过回归方法求得经验公式的做法逐步被淘汰。在许多研究课题中,人们常常用少量的高水平的精密试验和测试结果建立严密可靠的数学物理模型,然后利用计算机产生大量设计需要的表格曲线。在此环境下,有限元方法作为一种数值方法,借助于计算机的发展得到空前的发展,在理论与试验原有的关系之间出现了一条通过计算建立理论、试验之间关系的新途径。换言之,出现了结构理论、结构试验和结构计算三足鼎立的学科结构,这种学科结构的变化反过来极大地推动了学科的进步。在土木工程界,有限元分析与仿真已经成为一种常用工具,本书的部分研究工作也是基于有限元方法的。

#### 1.2.2.4 抗采动理论与概念加固

广义来讲,抗采动理论应包括地上(地表建筑物、构筑物的抗变形理论)和地下(抗采动开采技术)两方面的内容。

##### (1) 国内建(构)筑物下开采现状与技术措施

就国内而言,早在20世纪50年代开滦矿区就开始了建筑物下开采的试验。60年代初煤炭部建筑物下开采工作组首先对抚顺矿务局车辆修理厂的厂房煤柱成功地进行了20 m厚的特厚煤层开采。之后本溪、抚顺、焦作、峰峰、鹤壁、阜新、枣庄矿务局在许多建筑物下进行了开采,几十年来在煤炭科学研究总院、高等院校、煤业集团公司(矿务局)相互配合之下,建筑物下采煤技术取得了很大发展,获得了保护效果较好的开采技术:条带开采法、充填法、全柱式多工作面联合开采法、协调开采、长走向小阶段间歇开采法等。

条带开采是一种局部开采方法,即在开采范围内沿煤层走向或倾向划分一定尺寸的条带,采出一条,保留一条,采出条带与留设条带相间排列,依靠留设条带煤柱支撑上覆岩层,控制岩层的移动,减少采动损害。条带长轴方向沿煤层走向方向称为走向条带,而条带长轴方向沿煤层倾向方向称为倾斜条带。欧洲主要产煤国波兰、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压煤,已取得了较丰富的实践经验。我国自60年代末开始应用条带开采法开采“三下”压煤,取得了显著的经济效益。条带开采方法虽有单产低、采出率低、掘进率高的弊端,但是它能保护地面建筑物免受采动影响破坏,保护了环境,特别适于企业资金不足的衰老减产矿井和长期呆滞或永久煤柱的开采。条带开采是提高资源回收率、老井挖潜、延长矿井服务年限的一项重要技术途径<sup>[27~31]</sup>。

充填开采就是用充填材料来充填已采空间,从而限制和减少矿山采空区上覆岩层的变形与破坏。按照充填材料和输送方式的不同,可将矿山充填分为以下三种类型<sup>[32,33]</sup>:

① 水力充填。以水为输送介质,利用自然压头和泵压,从制备站沿管道或与管道相连的钻孔,将河砂等水力充填材料输送到矿山采空区。充填时,使充填体脱水,并将脱水排出。砂浆在管道中流动的阻力,靠砂浆柱自然压头或砂浆泵产生的管道输送压力去克服。选择输送管道直径时,需要先按充填能力、砂浆浓度和最大粒径算出砂浆的临界流速和水力坡度等。

② 干式充填。采用人力、重力、机械式风力等方式将砂石等干式充填材料运送到待充填矿山采空区,形成可压缩的松散充填体。

③ 胶结充填。将采集和加工的细砂等充填材料掺入适量的胶凝材料(如水泥)搅拌制备成胶结充填料浆,沿钻孔、管道向矿山采空区输送,充填材料胶结后形成具有一定强度和完整性的充填体。胶结充填技术经历了低浓度胶结充填、高浓度胶结充填、膏体泵送充填的发展阶段。膏体泵送充填的特点是料浆浓度大,其质量浓度可达75%~85%,呈牙膏状,充填到矿山采空区后不渗水,改善了井下作业环境。

目前,充填采矿的成本仍然很高,如对于胶结充填而言,充填成本占采矿直接成本的35%~50%。即便是成本最低的尾砂膏体充填工艺,充填1 m<sup>3</sup>材料的总成本也达110元左右。

从理论上来说,充填采矿是实现煤矿“绿色开采”的理想途径<sup>[28]</sup>,但由于目前充填采矿的成本相对偏高,限制了该项技术在煤矿的试验与应用。

充填采矿在金属矿应用较多、技术相对成熟,可以为煤矿的充填开采提供借鉴<sup>[34]</sup>。但煤系岩层属于层状岩层,与一般金属矿岩层层状不尽相同,采后岩层移动与破坏规律也不尽一致,煤矿充填采矿技术的研究与发展必须适应煤系岩层活动规律与控制要求。比如,在具有典型关键层覆岩条件的情况下,可以在关键层理论指导下采用部分充填降低充填成本<sup>[35]</sup>。目前,我国正积极开展煤矿充填采矿的试验研究工作<sup>[36]</sup>。

为了减少充填材料用量,降低充填成本,基于岩层控制的关键层理论提出了部分充填(条带充填)控制开采沉陷的思路:仅充填部分矿山采空区,只要保证未充填矿山采空区的宽度小于覆岩主关键层的初次破断跨距,且充填条带能保持长期稳定,就可有效控制地表沉陷<sup>[35]</sup>。

对于已有建筑物下开采需采取以下措施:

① 采前加固措施。为提高建筑物的强度和刚度,增强其抵抗地表变形的能力,设置钢拉杆、钢筋混凝土圈梁、基础连系梁、构造柱等。为了提高建筑物适应地表变形的能力,减小地表变形引起建筑物的附加应力,设置变形缝、变形补偿沟、滑动层和改变结构的支座形式。许多文献<sup>[1,2,37~40]</sup>在此方面进行了研究。

② 井下开采技术措施。当地面建筑物密集不允许采取加固措施,或仅仅采取加固措施不能保证建筑物安全,以及地表受采动之后地面形成大量积水的条件下,应采用井下开采技术措施:充填法开采(水砂充填、研石水力充填、风力充填、电厂粉煤灰充填等);条带法开采(冒落条带、充填条带);协调开采(单一煤层协调开采、多煤层协调开采);联合开采(同一水平多工作面开采);间歇开采(采完一层隔一段再采下一层)。为了减缓煤层开采引起的地表沉陷,目前常采用的开采技术措施如下:

a. 矿山采空区充填,即煤层开采后用水砂充填或风力研石充填工作面后方的矿山采空区。该方法在德国和波兰应用普遍,如波兰采用矿山采空区充填法的采煤量占全国“三下”总采煤量的80%左右<sup>[41~45]</sup>。我国目前仅在个别矿井应用该方法。

b. 部分开采法,主要有条带开采、房柱开采等,该方法的采出率较低,一般只能达到30%~60%。条带开采是目前我国“三下”开采所采用的主要办法<sup>[46,47]</sup>。

c. 协调开采,按照开采沉陷理论协调优化工作面位置和开采顺序,使地表变形值不产生累加,甚至能抵消一部分变形值。由于受到组织工作和生产地质条件限制,此法一般难于做到。

d. 覆岩离层注浆法,是20世纪80年代发展起来的一种技术,它与矿山采空区充填法相比,不受井下作业空间、时间的限制,不干扰工作面生产。已先后在抚顺、新汶、兖州等矿区开展了工业性试验,取得了一定的减沉效果。国外也有该项技术应用的报道。覆岩离层注浆减沉的基本原理<sup>[48]</sup>是利用岩层移动过程中覆岩内形成的离层空洞,从地面布置钻孔往离层空间充填外来材料以支撑覆岩,从而减缓覆岩移动向地表的传播。覆岩离层注浆减沉技术应用的前提条件是对煤层采后覆岩内部所形成的离层分布有所了解,从而根据离层位置的判别合理地布置注浆钻孔。国内外许多学者都对覆岩离层进行了多方面的研究,但目前对离层的空间动态分布规律仍然缺乏深入的认识,这对于离层注浆能否取得效果是至关重要的<sup>[49~51]</sup>。

对于新建建筑物的抗采动需采取如下措施<sup>[52~57]</sup>:

- ① 合理地选择建筑物的位置和建筑场地;
- ② 设变形缝以增强建筑物适应地表不均匀下沉的能力;
- ③ 设置基础圈梁、斜向联系梁、横向联系梁以及层间和上部圈梁<sup>[58~60]</sup>;
- ④ 地表曲率变形较大时,在墙体内设钢筋混凝土构造柱;
- ⑤ 采用整片式基础,并于基础下设置滑动层;
- ⑥ 设置变形补偿沟。

## (2) 波兰建(构)筑物下采煤概况与抗采动技术措施

波兰城镇及建筑物下采煤技术在上世界上处于领先地位,近年来又有新的发展,有许多经验值得借鉴。

采取的开采技术措施有:均衡开采,协调开采,采用其他有效的开采技术措施。

采取的建(构)筑物保护措施有:

矿山采空区内受采动影响的新建建筑物,为提高其抗采动能力一般采取:① 采用钢筋混凝土整体式基础;② 加强建筑物整体结构的刚度,地下墙壁一律为钢筋混凝土整体浇注,每层楼设圈梁,墙壁采用大板结构;③ 在房屋全长内,每隔 20~25 m 留设变形缝,缝宽 25~30 cm。

对大型的重要建筑物,则采用特种结构。例如采用独立柱的伞形结构;基础为整体的半球形结构;建筑物上部为悬索和悬吊结构。对采动后倾斜的建筑物则采取整体调平措施。

在有地面积水威胁的地区,采前在建筑物周围布置变形补偿沟,并与泵站连通形成排水网。此时补偿沟既能疏干积水,又起到吸收地表水平压缩变形的作用。

## (3) 西德建(构)筑物下采煤概况与抗采动技术措施

西德开展建筑物下开采历史悠久,有一整套行之有效的开采措施和对建(构)筑物的维修、加固、保护措施。建筑物下开采时常规的做法是对建筑物采取采后维修,仅对少数建筑物采取采前加固。如果地质采矿条件对保护建筑物不利时,则采取充填开采(风力充填)或限厚开采等措施。

针对已有建筑物采取采后维修等加固保护方法,具体措施有:

① 变形缝:单元长度,对于砖木结构的房屋为 10~12 m,钢筋混凝土房屋为 20~25 m,缝一般为 10~20 cm。变形缝采用电锯或电钻进行施工,缝处用瓦楞铁皮封住。

② 弹簧垫:将多组弹簧垫放在房屋基础板下方,用以吸收地基出现台阶状的不均匀沉降。

③ 千斤顶调平:鲁尔矿区埃森市郊区有一幢两层楼房,受采动影响后倾斜值为 40 mm/m。为此在地下室顶部沿纵横墙体设 50 台千斤顶,利用计算机控制各千斤顶上升高度的同步动作。每次抬高 3 mm,最终抬高达 1.3 m。

④ 补偿沟。

针对新建房屋的保护措施主要有:

① 设变形缝。

② 当地表下沉、变形值比较大时,地下室顶板可采用 10~20 cm 厚的钢筋混凝土板。为了提高抗变形的能力,地下室底板也可采用 20~30 cm 厚的钢筋混凝土板。为了增强建筑物的刚度,可设置钢筋混凝土圈梁。

③ 基础采用箱形基础。

④ 当建筑物所处位置可能出现台阶时,基础悬臂长度一般不宜超过 3 m。并在预计出现台阶的落差较大处,在基础下安设弹簧垫用以支撑日后可能出现的悬臂区。

⑤ 房屋基础下增设滑动层。

### 1.3 研究的内容与重点

本书是在上述理论、技术及工程背景下创作完成的。在前人的研究中,较深入地分析了采动引起的沉陷,提出了一些抗采动的开采方法及抗采动的建筑物设计、构造措施。但是,工程界真正关心的抗采动设计与加固理论却没有形成一个完整的体系,也更谈不上真正意义上的指导实际应用,这正是本书研究的出发点,也是目标。

研究的主要内容试图从采动对建(构)筑物的影响入手,归纳地下矿山开采对建(构)筑物的影响与损害规律;利用理论分析与有限元仿真的技术方法,进行框架结构、砌体结构的地基基础共同作用研究,并建立基于自组织理论指导下的抗采动设计理论,提出切实可行的设计方法与构造技术措施;创造性地建立可移动及升降点式基础房屋抗采动设计理论;对矿山采空区既有房屋,提出了采动评估及概念加固的思想与基本原则。总之,本书主要研究矿山采空区建(构)筑物抗采动设计与加固理论,建立实用的设计与工程加固方法,使矿山塌陷区的房屋在设计时有切实可行的抗采动的理论与方法,加固时有具体实用的评估方法与加固原则、技术。

#### 1.3.1 地下矿山开采对建(构)筑物的影响与损害规律的研究

在矿山采空区,建(构)筑物的变形与破坏是由于地下矿山开采对地表的影响所产生的。地下矿山开采后,使矿山采空区周围岩体的力学平衡状态被打破,需要重新建立平衡状态,将不可避免地引起覆岩的变形、移动和破坏,最终反映到地表,使矿山采空区上方及其周围地表产生移动与变形。地下矿山开采对地表的影响主要有垂直方向的移动和变形(下沉、倾斜、曲率、扭曲)与水平方向的移动和变形(水平移动、水平拉伸与压缩变形)以及地表平面内的剪应变三类。

#### 1.3.2 创造性地建立可移动及升降点式基础房屋抗采动设计理论

提出了“可移动及升降点式基础房屋抗采动设计理论”,该理论的实施改善了传统的“条形基础抗采动房屋”的结构受力性能,使得建筑物能更有效地吸收和抵抗地表移动和变形。理论研究表明,可移动及升降点式基础房屋抗采动设计理论技术可行,房屋的基础结构属柔性基础,可升可降,且房屋基础的顶部安装有调节水平变形的装置,不但可以有效地吸收水平变形,而且有非常好的吸收竖向变形的功能。主体结构则采用刚性措施。这种“柔”和“刚”的有效结合,更有效地保护了矿山采空区的建筑物,特别适用于综采放顶煤的地表建筑物保护。

#### 1.3.3 采空区既有房屋抗采动评估与加固理论及方法研究

首次明确提出了矿山采空区既有房屋抗采动评估,并且指出了基于概念的组合评估方法的基础步骤。基于“概念”的思想在抗震设计中较早也较广泛得到应用,其内涵与思想具有广泛性。“概念加固”是根据事物的本质特征,按一定的目的要求,运用人的思维和判断,从宏观上决定工程加固中的基本问题、基本概念及基本原则,进而制订方案及实施措施。对结构工程师而言,概念加固就是对工程结构的受力特征进行分析,掌握工程结构受力的规律