

覆岩沉陷离层及工程控制

OVERBURDEN SUBSIDENCE BED-SEPARATION
AND CONTROL TECHNOLOGY

郭惟嘉 毛仲玉 著

by Guo Weijia Mao Zhongyu



地震出版社

煤炭科学基金资助项目

山东省自然科学基金资助项目

覆岩沉陷离层及工程控制

OVERBURDEN SUBSIDENCE
BED-SEPARATION AND
CONTROL TECHNOLOGY

郭惟嘉 毛仲玉 著

by Guo Weijia Mao Zhongyu

B32/E3/O1

地震出版社

1997

内 容 提 要

本书根据著者近年来的理论研究成果与工程实践体会撰写而成。全书共分 12 章, 其主要内容有: 系统地论述了覆岩的层面特征及力学性质、采动覆岩的离层性及研究方法等; 提出了层状岩体开采沉陷的三维半解析数值方法和计算机应用程序; 较详细地探讨了覆岩离层空隙带充填减少地表沉陷机理及注浆参数、工艺系统等关键问题, 并介绍了两个工程实例。本书是关于覆岩沉陷离层及工程控制研究方面的专著, 对于进一步开展沉陷研究和工程实践具有实用和参考价值。

本书可供从事开采沉陷研究与工程控制实践的相关专业研究工作者、工程技术人员及大专院校师生参考。

覆岩沉陷离层及工程控制 GVERBURDEN SUBSIDENCE BED-SEPARATION AND CONTROL TECHNOLOGY

郭惟嘉 毛仲玉 著
by Guo Weijia Mao Zhongyu

责任编辑: 吴 冰

责任校对: 王花芝

*

地 震 出 版 社 出版发行

北京民族学院南路 9 号 邮编: 100081

中国地质大学轻印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 13.125 印张 336 千字

1997 年 9 月第一版 1997 年 9 月第一次印刷

印数: 0001~1000

ISBN 7-5028-1472-8/P·905

(1916) 定价: 25.00 元

前 言

一般把煤层开挖引起的上覆岩层指向开挖区的移动与变形,由下至上依次分为垮落带、裂缝带和弯曲带三个部分,并对此进行了较多的现场观测和室内研究工作。但事实上,由于岩层在原始沉积时其沉积环境、颗粒大小和矿物成分的不同,使煤系地层中各岩层的岩性差别很大。在工程上表现为各层岩体的弹性模量、泊松比、抗压强度、粘性系数等力学参数的差异,这种差异使得采场覆岩受采动影响后,岩层间产生不同步的弯曲沉降,引起岩层在其层面薄弱带附近产生分离,即形成离层空隙,这种离层空隙有时可能随着岩层的充分移动最终完全闭合,有时则可能(部分)永久存在,这已被众多的现场工程实践所证实。

关于覆岩离层性问题,以往的研究较少,近几年发展起来的“钻孔注浆充填离层带”技术,被应用来控制岩层移动和地表下沉,并在数个工程的实践中获得了良好效果。该项技术的推广应用,须要对不同覆岩结构的采动离层发育规律进行深入的了解,同时,对覆岩离层的深入研究,也是进行采动引起地表变形移动规律研究不可缺少的。所以,采动覆岩离层性及离层规律的研究,具有较高的现实应用价值和重要的理论意义。

开采覆岩沉陷的三维力学计算问题过大,使得现行数值计算方法在微机的内存和主频或工作时间方面不能满足需要,给实际应用带来不便。特别在有任何倾角、厚冲击覆盖层条件下,计算显得力不从心,甚至有些实际工程问题难以进行解算。

地面钻孔高压注浆充填覆岩离层带控制沉陷技术,是目前倍受人们重视的新方法。它是通过地面钻孔将浆液材料注入覆岩离层空隙以阻止地下开采空间进一步向上转移,从而达到控制地面沉陷的目的,具有工艺简单、成本低、不影响井下生产、效果好等优点。我国80年代末起在抚顺、大屯等矿区进行了实验,初步取得了减少地表下沉30%~55%的成绩,但对其注浆减沉的力学机理、工艺系统设计、工程效果预测与评价等方面还远远不能满足工程的要求,影响了该技术的推广和应用。

本书就是针对上述情况而写的。全书分为三篇共12章,绪论部分主要叙述了覆岩沉陷研究及工程控制方法的现状和主要问题;第一篇为采动覆岩离层性的研究,首次提出了覆岩的层面特征及力学性质,层状岩体的模型与参数,覆岩离层的解析表达等问题以及离层规律的数值、物理及弹性波场特征模拟分析,现场离层裂缝勘探方法等;第二篇是覆岩沉陷三维半解析分析方法和计算机程序,介绍了半解析数值分析方法的基本理论,层状岩体开采应力、应变三维半解析方法及公式推导,并给出了覆岩沉陷计算机三维半解析程序;第三篇介绍覆岩沉陷离层的工程控制,研究了包括离层空隙带注浆充填机理、注浆参数、工艺系统、工程应用条件及减沉效果评价等一系列工程相关问题,弥补了这方面研究的缺陷。最后较详细地介绍了一例大户群村庄下压煤开采的工程研究和一例高潜水位矿区耕地保护的工程应用前景。

本书有关内容的研究及撰写过程中，得到了刘宝琛、沈光寒、李白英、孙振鹏等矿井特殊开采领域专家的支持与帮助，他们对作者学术思想的形成有重大影响。另特别致谢施德芳、刘立民、连传杰和李加祥以及黄福昌，他们在理论和实践的有关工作中及计算机程序的编制研究中，给予了大力的协助和支持。

由于作者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请诸君批评指正。

作 者

1997年6月

PREFACE

Overburden fail is supposed to be a result of underground mining. Displacement and deformation in the overburden takes place with the working face advancing. Overburden can be divided into, in ascending order, caving zone, fractured zone and bending zone, which has been studied by a great deal of detecting in-situ and research in laboratory. Because of the difference in deposition environment, grain size and the mineral constitution during sedimentation, adjacent strata in coal measures are greatly different in lithological characteristics. The distinctions are expressed through different rock mechanics parameters, such as the elastic modulus, Poisson's ratio, compressive strength, coefficient of viscosity of each stratum, etc. In fact, due to the differences in mechanical properties, strata's movement is not synchronous inflection in mining-affected overburden. Strata will be separated along the bedding planes, and form bed-separation gaps. The existence of bed-separation has been verified by numerous engineering cases. It has also been proved by experiences that some bed-separation gaps may exist forever while others may close finally when the strata movement stopping.

In the past, few studies were carried out on the bed-separation in mining subsidence. The newly emerged technology about high-pressure grouting in bed-separated through holes to control stratum's movement has obtained favorable results in engineering cases. To popularize this technology, we must study the laws of bed-separation in different overburden thoroughly, which are also essential to the study of surface subsidence. Consequently, study on the characteristics and laws of bed-separation is valuable in practice and important in theory.

The three-dimensional (3-D) numerical simulation of ground subsidence is very complicated. Because the memory and speed of the microcomputer are limited at present, some of the numerical methods, such as FEM, can not meet the needs of practice. The analytic model is unable to do as much as one would expect to, especially under the circumstance of large angle and heavy cover. Some of 3-D engineering problems can not be calculated by numerical analysis as yet.

The technology of grouting in bed-separated has attracted increasing attention. It can prevent the extracting space from transferring to ground with injecting material into bed-separation-gap, thus to control the ground subsidence. This technology of subsidence control has many advantages, such as simple operation, low cost and good results, etc. In the early days of 1990's, the trials were given in Fushun, Datun Mining District, where surface subsidence were reduced by the rate of 33% ~ 50% and subsidence velocity by 35% ~ 55%. Because the study of many aspects in such technology as the mechanism of grouting,

design of technological system, calculation of engineering effect, still can not meet the needs of practice, the development of this new technology has been confined at home.

This book is written in view of what mentioned above.

This book consists of three parts (12 chapters), Part I, II and III. In introduction, main problems of ground subsidence and the methods of control technology are analyzed in depth. The contents in Part I concerns the study of bed-separation characteristics in mining-affected overburden. The 3-D semi-analytic numerical method and program in ground subsidence caused by mining in Part II and subsidence control technology in mining-affected overburden in Part III are discussed respectively.

There are no specialized books dealing with the study of bed-separation characteristics systematically in mining-affected overburden. This book is the first one in China. Its contents are mainly related to the research fields of bedding-plane features and mechanical characteristics of overburden, models and parameters of stratified rockmass, analytic expression of subsidence bed-separation, simulation analysis of bed-separation movement and practical prospecting methods of bed-separation-gap. In Part II, basic theories of the semi-analytical numerical method are discussed, and the program of 3-D numerical simulation to analyze mining subsidence in stratified rockmass is given. Comparing with FEM, this program can save internal storage, calculating time, and greatly lower cost without reducing calculating accuracy, and can be applied to most mining-geological conditions and mining methods. The Part III, the control technology of ground subsidence, emphatically deals with the mechanism and technology of injecting flyash fluid into bed-separation-gap through surface boreholes to control subsidence, and presents two illustrative examples at the end of the book. Besides, Part III discusses different aspects about the control technology, such as the grouting mechanism, grouting parameters, technological system, effect evaluation and so on. These contents fill in the gap in the field.

Authors

June 1997

目 录

绪 论	(1)
§ 0.1 覆岩沉陷理论研究现状	(2)
§ 0.2 沉陷损害的工程控制方法	(4)
§ 0.3 覆岩沉陷的岩体力学模型及参数	(6)
§ 0.4 覆岩沉陷研究及工程控制存在的问题	(7)

第一篇 采动覆岩的离层性及离层规律

第 1 章 覆岩的层面特征及力学性质	(13)
§ 1.1 覆岩的层面特征	(13)
§ 1.2 层状岩体的力学性质	(16)
第 2 章 覆岩及地表的移动变形	(25)
§ 2.1 覆岩的移动变形及其分带特征	(25)
§ 2.2 地表移动变形的计算机绘图	(33)
第 3 章 采动覆岩离层的理论解析	(37)
§ 3.1 覆岩离层的傅氏积分表达	(37)
§ 3.2 覆岩离层发育的托板解析	(43)
第 4 章 覆岩离层的模拟研究	(53)
§ 4.1 数值模拟方法	(53)
§ 4.2 三维半解析数值计算	(55)
§ 4.3 粘弹性数值模拟	(57)
§ 4.4 相似材料模拟试验	(60)
§ 4.5 地震波场特征数值模拟	(62)
第 5 章 覆岩离层的现场探测	(64)
§ 5.1 覆岩离层的钻孔探测	(64)
§ 5.2 覆岩离层的地球物理勘探	(69)
第 6 章 覆岩离层的地表移动特征	(81)
§ 6.1 移动观测站	(81)
§ 6.2 观测结果	(83)
§ 6.3 移动参量分析	(83)
§ 6.4 覆岩离层的地表移动特征	(85)

第二篇 覆岩沉陷分析三维半解析方法及程序

第 7 章 半解析数值分析方法的基本理论	(89)
§ 7.1 概述	(89)

§ 7.2 半解析解函数	(90)
第 8 章 覆岩沉陷三维半解析方法及公式推导	(96)
§ 8.1 层状覆岩沉陷三维半解析模型	(96)
§ 8.2 柱单元向层单元的转化	(103)
§ 8.3 矿层开采后覆岩沉陷和应力分析	(106)
第 9 章 三维半解析程序及使用说明	(111)
§ 9.1 三维半解析程序	(111)
§ 9.2 沉陷三维半解析分析示例	(114)
第三篇 覆岩沉陷离层的工程控制	
第 10 章 离层空隙带注浆充填机理及工艺	(121)
§ 10.1 减沉机理和工程条件及应用	(121)
§ 10.2 层状岩体水压裂缝延展	(125)
§ 10.3 注浆参数	(129)
§ 10.4 注浆工艺及设备	(133)
§ 10.5 注浆作业	(136)
§ 10.6 离层注浆充填材料	(139)
第 11 章 覆岩离层注浆充填减沉工程	(144)
§ 11.1 地质开采环境特征	(144)
§ 11.2 岩体物理力学性质及地表破裂机理	(150)
§ 11.3 地面注浆系统及工程	(154)
§ 11.4 注浆工程效果评价	(160)
第 12 章 矿区耕地保护的工程应用前景	(163)
§ 12.1 矿区基本概况	(163)
§ 12.2 地表沉陷损害	(164)
§ 12.3 耕地保护的工程应用评价	(165)
§ 12.4 项目投资及效益	(168)
附录 1 计算地表移动变形的概率积分法计算程序 (Turbo C)	(171)
附录 2 覆岩沉陷三维半解析分析程序 (Fortran 77)	(177)
参考文献	(197)

CONTENTS

Introduction	(1)
§ 0.1 Present Situation of Mining Subsidence Study.....	(2)
§ 0.2 Control Technology Methods of Subsidence Damage.....	(4)
§ 0.3 Mechanical Model and Parameters of Rockmass.....	(6)
§ 0.4 Main Problems of Subsidence Studies and Control Technology	(7)
 Part I Characteristics of Bed-separation in Mining-affected Overburden 	
1 Characteristics and Mechanical Properties of Bedding Plane	(13)
§ 1.1 Characteristics of Bedding Plane in Overburden	(13)
§ 1.2 Mechanical Properties of Stratified Rockmass.....	(16)
2 Overburden and Surface Displacement	(25)
§ 2.1 Overburden Displacement and Zoning Characteristics	(25)
§ 2.2 Drawing Curves of Surface Displacement by Computer.....	(33)
3 Theoretical Analysis of Bed-separation	(37)
§ 3.1 Fuller's Integral Expressing	(37)
§ 3.2 Plate-supported Analysis	(43)
4 Simulation Studies of Bed-separation in Laboratory	(53)
§ 4.1 Numerical Simulation Method	(53)
§ 4.2 Three-dimensional Semi-analytic Numerical Calculation	(55)
§ 4.3 Viscoelasticity Finite Element Analysis.....	(57)
§ 4.4 Simulation by Simulated Materials	(60)
§ 4.5 Numerical Simulation of Elastic Wave Field Features	(62)
5 Field Exploration Methods of Bed-separation	(64)
§ 5.1 Borehole Exploration Methods	(64)
§ 5.2 Geophysical Exploration Methods	(69)
6 Surface Subsidence Characteristics with Bed-separation	(81)
§ 6.1 Surface Subsidence Survey	(81)
§ 6.2 Survey Result	(83)
§ 6.3 Parameter Analyzing	(83)
§ 6.4 Surface Subsidence Characteristics	(85)
 Part II The Semi-analytic Numerical Method in Ground Subsidence Caused by Mining 	
7 Basic Theory of the Semi-analytic Numerical Method.....	(89)
§ 7.1 Abstract	(89)

§ 7.2	Semi-analytic Functions	(90)
8	Method Sketch and Formulas Inference of 3-D Semi-analytic Numerical	
	Method in Ground Subsidence	(96)
§ 8.1	Semi-analytic Numerical Model of Stratified Rockmass	(96)
§ 8.2	Transformation from Columnar Unit into Stratiform Unit	(103)
§ 8.3	Three-dimensional Analysis of Ground Subsidence Caused by Mining ...	(106)
9	Program and Specification of 3-D Semi-analytic	(111)
§ 9.1	The Program Directions	(111)
§ 9.2	The Examples Analysis of 3-D Semi-analytic	(114)
	Part III Subsidence Control Technology	
	in Mining-affected Overburden	
10	Mechanism and Technology of Injecting Flyash Fluid into	
	Bed-separation to Control Subsidence	(121)
§ 10.1	Mechanism and Conditions and Present	(121)
§ 10.2	Extension of Hydraulic Fracture about Stratified Rockmass	(125)
§ 10.3	Grouting Parameters	(129)
§ 10.4	Grouting Technology and Equipment	(133)
§ 10.5	Grouting Activity.....	(136)
§ 10.6	Grouting Materials	(139)
11	Subsidence Control Technology of Grouting Bed-separation in	
	Mining-affected Overburden	(144)
§ 11.1	Geological Conditions and Mining Environment	(144)
§ 11.2	Physical and Mechanic Nature of Rockmass and Ground Crack	
	Mechanism	(150)
§ 11.3	The Grouting System and Control.....	(154)
§ 11.4	The Evaluation of Effect	(160)
12	The Prospect of Grouting Technology to Protect Arable Land	
	in Mining District.....	(163)
§ 12.1	The General Situation of Mining District	(163)
§ 12.2	The Surface Subsidence Damage	(164)
§ 12.3	The Evaluation of Grouting Technology to Protect Arable Land	(165)
§ 12.4	The Technology Contents, Fund Budget and Beneficial Analysis	(168)
APPENDIX 1	The Surface Subsidence Analysis Program of Error	
	Probability Method	(171)
APPENDIX 2	The Three-dimensional Analysis Program of Semi-analytic	
	Numerical Method in Ground Subsidence Caused by Mining	(177)
REFERENCES		(197)

绪 论

地下有用矿体被采出以后,其开采周围的岩体的原始应力平衡状态受到破坏,应力重新分布,达到新的平衡。在此过程中,覆岩产生非连续破坏(断裂、垮落)和连续的移动、变形(挠曲),随着开采,不久这种移动变形就会达到地表形成盆地,这种现象称为覆岩沉陷(overburden subsidence)。

因开采而引起的覆岩运动称为开采扰动或采动,处在采动影响范围之内的设施及自然对象称为采动对象。实践证明,任何采动对象承受采动变形的能力是有限的,采动变形达到一定程度时,采动对象就会受到损害,这种损害称为开采损害(mining damage)。开采损害的表现形式可以是:

- (1) 采动对象的使用条件恶化,甚至不能继续使用。
- (2) 采动对象的稳定性恶化,部分丧失甚至全部丧失稳定。

几个世纪以来,人们认为覆岩沉陷地表损害是大多数地下开采的必然结果。从上世纪中叶开始,这种地表损害已对地表建筑物、结构物、道路和农业带来严重破坏。事实上,有关开采损害财产的争论和诉讼,在英国法院的记载中可追溯到15世纪初,比利时16世纪曾经发布过一项法令,对因进行开采而使列日城的含水体受到破坏的责任者处以死刑。19世纪至20世纪以来,美国、英国、德国、波兰也纷纷制定相应法令,对开采造成的损害,矿主负责加以修复和赔偿损失。

为了防止在诉讼中提出无根据的赔偿要求,采矿企业的矿山工程人员本世纪初开始在矿上建立观测站,对地表移动进行系统观测。在综合这些观测成果和进行相关理论探讨的基础上,从本世纪开始逐渐产生了一门新的科学——开采沉陷及损害防治(mining subsidence and damage control)。

世界各个采煤国家在煤田开发过程中,为了保护地面建筑物、铁路等免受开采的有害影响,以及防止水体溃入采空区淹没矿井,在井下留设了大量煤柱。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的对象大得多,例如,波兰上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,为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”压煤量也很严重,压煤可开采储量达145亿t,有些新投产的矿井压煤占全矿井储量的40%~60%,山东省特大型煤炭基地兖州煤炭集团有限责任公司1995年用于压煤村庄搬迁及沉陷区土地赔偿费就达1.5亿人民币。其压煤情况见表0.1所示。山东、江苏、河北、安徽、河南等省地区人口密集,农村村庄下压煤问题突出。我国主要产煤省村庄下压煤情况见表0.2。其中山东兖州矿区121个村庄压煤6.0亿t;河南平顶山矿务局114个村庄压煤2.1亿t;河北开滦矿务局75个村庄压煤5.8亿t;安徽淮北矿务局122个村庄压煤2.2亿t;而江苏徐州矿务局村庄压煤2.1亿t,占该局总可采储量的31%。

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。特别在高潜

水矿区，地表沉陷不仅损害地表建（构）筑物，而且破坏耕地，造成巨大经济损失，由此引起地貌变异和地质作用过程所造成的环境破坏将影响到子孙后代。它涉及矿业及矿区工农业生产和人民生活等各个方面，是一个重大的社会和环境问题。近 30 年来，随着科学的发展，人们在科学生产和科学实验中逐步加深了对采动覆岩沉陷规律性的认识，世界上大多数采煤国家都主张尽可能不留保护煤柱，寻找和采用在经济上和技术上合理的工程控制方法，防治开采损害。

表 0.1 兖州矿区三下压煤情况

单位：万 t

矿 井	矿井地质	三下压煤		建筑物下		水 体 下		铁 路 下	
	储 量	储 量	比例 / (%)	储 量	比例 / (%)	储 量	比例 / (%)	储 量	比例 / (%)
全 局	12813.8	65550	51.1	51905.3	40.5	7133.5	6.0	5911.4	4.6
南 屯	17193.7	9120.1	53.0	7065.8	41.5	342.2	7.8	772.4	4.1
兴隆庄	32161.6	12945.0	40.2	11262.7	35.0	364.1	1.1	1318.2	4.1
鲍 店	30575.2	17670.2	57.8	13359.3	43.7	2796.6	9.1	1514.4	5.0
东 滩	37255.7	19091.3	51.2	15210.9	40.8	1729.9	4.6	2150.5	5.8
北 宿	5673.1	3330.0	58.7	2058.4	36.3	1055.7	8.6	215.9	3.8
杨 村	5324.5	3393.2	63.7	2948.2	55.4	445.0	8.3		

表 0.2 我国主要矿区村庄压煤量

单位：亿 t

省 名	村庄压煤量	省 名	村庄压煤量
山 东	6.9	山 西	7.8
江 苏	2.3	陕 西	5.0
河 北	9.5	吉 林	1.5
安 徽	3.1	辽 宁	3.2
河 南	6.6	黑 龙 江	1.2

§ 0.1 覆岩沉陷理论研究现状

覆岩沉陷机理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，引起建筑物破坏以后，开始了这方面的研究工作，1871 年 Gonot 发表了题为《正态理论》的论文，这是当时比利时学术界最为引人注目的成就之一。此后的 100 年间，开采覆岩沉陷现象一直是矿山重点研究的课题，特别是在井下开采采用长壁式采煤最为普遍的欧洲，许多学者从事于开采沉陷研究工作，如德国的 H. Kratzsch，波兰的 Budryk、Knothe、J. Litwinsky，英国的 Worotnicki，前苏联的 Аверкий 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、弯及一些基于经验曲线的原始概念，也包含了现代覆岩沉陷数学模拟原理所假定的两个对立的观念：一是将上覆岩层看作是一种连续介质，另一认为是随机介质，张家生（1995）对这些理论的历史发展作了很好的评述。

0.1.1 覆岩沉陷研究的主要方法

1. 现场（或室内）观测、探测、测试方法

这种方法又包括覆岩移动观测、岩体应力观测、钻孔量测、工程物探等。这种方法可以观测到地表及岩层移动、变形破坏的规律，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，可以为理论研究方法提供必要的参量，同时又可以检验方法研究结论的可靠程度。目前比较先进的有我国平顶山、枣庄网状观测站，美国 SONOEX 沉降系统，英国 E2/OMSO3/R48 全站型仪器系统，多道数字地震仪，钻孔电视，全波列数学测井系统等。

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、材料力学方法、结构力学方法、弹塑性方法、粘弹性方法、随机介质方法、统计分析方法，等等。其中波兰学者 J. Litwinsky 基于开采引起的岩层和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，1954 年提出的随机介质理论方法（stochastic theory），由于其数理概念明确，实用性强，而得到国际上广泛的应用。我国 50 年代末由刘宝琛、廖国华引入此方法，并逐渐发展成为目前应用最广，理论和实践上最为成熟的概率积分法（Probability error），理论分析方法的优点在于它能够通过一定数理分析获得对问题的一般性认识，而不必花费大量的人力、物力和财力，并常可得到计算模型的数学结构；其缺点在于多数情况下必须将实际条件大大简化，或将复杂的自然条件笼统为一不变常量，使得概化的理论模型对具体条件的适应性较差，这样，问题复杂时，往往使分析结果与实际偏差过大（30%~70%）。

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。前苏联于 1937 年首先采用相似材料模型方法研究覆岩移动变形，相继波兰、捷克等国也应用之。我国 50 年代末开展此项研究，其中阜新矿业学院、中国矿业学院、山东矿业学院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，特别是便于观察覆岩内部的运动特征，可以部分弥补理论分析方法的不足。且有成本低、周期短、直观等优点。但由于模拟条件复杂，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半定量分析的要求。

4. 数值分析方法

数值分析方法，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。近十几年来，国内外在采用有限元解决“三下”采煤引起的地面沉陷问题中取得很大成效。在这方面的研究成果中，Hachott（1959）、Berry（1960）、Sales（1961）以及 Salemon（1968）利用平面线弹性关系计算岩层与地表移动问题；次后推广到三维线弹性；Marshall 和 Berry（1966）进行了粘弹性分析；H. Doughes、Danl（1972）分别用二维、三维弹塑性进行了覆岩沉陷分析；H. J. Siriwardane（1985）考虑位移不连续方法弹塑性关系模拟了长壁开采的沉陷问题。国内，北京开采研究所、唐山煤炭科学分院、中国矿业大学等相继对开采覆岩沉陷“两带”发育高度、井筒开挖过程、条带开采等进行了数值模拟分析。

0.1.2 覆岩沉陷研究的新进展

采动覆岩沉陷研究涉及采矿、地质、数学、力学、建筑、计算机等多学科,近十几年来,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) 刘宝琛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耦合计算(1996), H. Rauch 研究了开采沉陷的水力学作用效应(1994), J. Litwinsky 最近在 Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. (1995) 发表文章对随机介质理论做了进一步的论述,长沙矿冶研究院李文秀(1994)、北京煤炭科学院开采研究所张玉卓(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) 岩体力学的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(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。钱鸣高、王金庄(1995, 1996)相继发表了托板及关键层岩层控制的学术论文。沈光寒(1994)研究了开采沉陷岩体力学模型的优化与参数识别问题。

(3) 王泳嘉以及 K. M. Oconnor 把离散元应用于沉陷研究,何满潮提出了“拟连续性微元尺寸”概念,并借此用连续介质与非连续介质耦合大变形有限单元法研究了地下开挖位移问题。邹友峰编制了条带开采沉陷预计的三维层状介质计算机程序。麻凤海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,疏开生应用非线性三维有限元模拟了开采沉陷覆岩移动。吉小明探讨了开采沉陷三维数值模拟及参数反演问题。

(4) 前苏联 B. A. Бутлнцкий 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。

$$q_M = \frac{1}{1 + \left(\frac{H}{b}\right)^m} \quad (0.1)$$

式中 q_M —— M 层的相对下沉值;

H —— 采深;

b —— 采空区尺寸;

m —— 影响系数。

邓喀中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。吴戈、高延法也分别从不同的角度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。

§ 0.2 沉陷损害的工程控制方法

19 世纪末起,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、前苏联顿巴斯煤田等。相应“三下”压煤量也不断增多,西里西亚煤田压煤量就达采出量的 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。二次大战后,欧洲学者重新集中力量研究开采沉陷损害及控制工程问题。其中波兰学者和工程技术人员获得了引人注

目的成果, 60 年代以来, 相继成功地开采 Bytom、Katowice 等 10 个大城市压煤。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%。俄罗斯也是一个从事“三下”采煤历史悠久的国家, 平均每年从建筑物下采出 5000 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》, 在中国起了很大的借鉴作用。

我国从 50 年代开始进行沉陷损害及工程控制方法的研究和实践, 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, 2000 多个工作面开采了“三下”压煤。据不完全统计, 自建国到 1982 年从“三下”共采出 5.95 亿 t 煤炭, 平均每年采出 1400 万 t, 1982 年采出 3600 万 t, 1985 年制定出版了《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》, 标志了我国开采沉陷损害工程控制研究达到了一定的水平。

目前, 沉陷损害的控制方法主要是从控制沉陷即控制地表下沉、变形和水平移动着手, 结合对部分建(构)筑物的工程加固和维修。这些措施中既有从井下考虑, 也有从井上地表着手的。

0.2.1 井下采取的主要工程控制方法

1. 充填采空区采煤

主要有水力、风力、自重和手工充填。充填材料有矸石、河沙、电厂粉煤灰等。井下充填开采是减少地表沉陷变形的有效方法, 各类充填开采法引起的地表下沉系数(q)如下:

长壁开采水砂充填法: $q = 0.10 \sim 0.20$;

长壁水力矸石充填法: $q = 0.20 \sim 0.30$;

长壁风力充填法: $q = 0.30 \sim 0.50$;

手工矸石充填法: $q = 0.40 \sim 0.50$ 。

波兰于 50 年代初就广泛采用水砂充填等井下充填方法减少地表沉陷, 目前水砂充填占建筑物下压煤开采的 50%, 风力充填占 5%。我国在数个矿区也相继进行了井下充填法开采。近年来, 由于充填材料缺少和充填费用较高, 很少采用井下充填方法来解决开采损害问题。但随着煤炭事业的发展, 煤炭销售价的提高, 井下充填方法不久有可能成为一种重要的工程控制措施。

2. 煤层部分开采

主要有条带法开采、房柱式开采和限采厚开采等。

1) 条带开采法

该法是减少覆岩及地表沉陷变形的有效方法, 其采出率一般为 40%~60%, 地表下沉系数仅为煤层采厚的 3%~15%, 当采出率为 50%时, 能减少地表下沉和变形达 85%, 效果是十分显著的。波兰 1930~1936 年间就在上西里西亚 Sosnowiec 煤矿冶金厂下用条带法开采 8.6 m 的煤层, 在英国对条带开采有着较深入的研究, 也有许多成功的例子。我国自 50 年代末以来, 已在几十个煤矿取得预期的效果, 如鹤壁九矿、蛟河矿、峰峰一矿、抚顺胜利矿, 等等。

2) 房柱式开采

目前这种开采方法主要在美国等国家实行, 回采率一般在 50%~60%之间, 下沉系数

$q = 0.35 \sim 0.68$ 。

3) 限厚开采方法

根据对“保护对象”的要求，在煤层厚度大、层数多的情况下，只采部分厚度煤层，以获得控制覆岩及地表沉陷的效果。

3. 多工作面联合开采

在地面建（构）筑物只能承受动态变形值，而不能承受静态变形值情况下采用多工作面大面积联合开采，一般动态变形值是静态变形值的 40%~70%。波兰、英国、前苏联采用此控制工程方法开采了大量建筑物下压煤。如波兰在 Katowice 下由三个煤矿布置互相联系的三组阶梯形工作面同时开采取得了成功。我国峰峰、丰城、兖州等矿区相继进行多工作面村庄下压煤联合开采试验，安全采出了大量煤炭。

4. 移动边界协调开采

根据地面保护建（构）筑物的特点，使地表部分变形值相互抵销，减少不均匀下沉，而采取在工作面尺寸、推进方向、开采时间等方面的相互配合、协调平衡，达到控制工程的目的。两个煤层工作面之间的合理错距可按下式计算：

$$r = 0.4(r_1 + r_2) \quad (0.2)$$

式中 r_1, r_2 —— 主要影响半径， $r_1 = H_1 / \tan \beta_1$ ， $r_2 = H_2 / \tan \beta_2$ ；

H_1, H_2 —— 上、下煤层的采深；

β_1, β_2 —— 两个煤层工作面分别与水平面的夹角。

0.2.2 井上采取的主要工程控制方法

井上采取的主要工程控制方法包括目前在国内外广泛采用的原有建筑物加固保护措施、新建抗变形建筑物、采后维修建筑物以及基岩地基建筑物间接锚固强化等。

近数年来，我国的环保意识逐渐增强，矿区塌陷地环境问题及生态重建、水资源保护已逐渐提到重要的控制工程地位。特别像兖州、两淮等厚煤层高潜水位矿区，塌陷地的治理、土地还耕对区域经济持续发展和人民生活具有重大意义。

地面钻孔高压注浆充填覆岩离层带控制沉陷技术，是近几年来发展起来，倍受人们重视的新方法。它是通过地面钻孔将注浆材料注入覆岩离层内部，阻止地下开采空间进一步向上转移，从而达到控制地面沉陷的目的。我国 80 年代末起在抚顺、大屯等矿区进行了实验，初步取得了减少下沉 40%~65% 的成绩。但对其覆岩离层性及离层规律的研究以及注浆减沉力学机理、工艺系统设计等方面还远远不能满足工程的要求。

§ 0.3 覆岩沉陷的岩体力学模型及参数

开采的结果使覆岩失去支撑，并随工作面推进使覆岩的应力状态同步地遭到破坏，从而引起采空区顶板岩层冒落、断裂、离层、挠曲以至地表形成稳定的沉陷盆地。覆岩这种由下而上的移动与变形运动，是复杂的物理力学现象，参与这一运动发展过程及其结果的影响因素是十分复杂的，许多因素及其作用尚难弄清。

把岩体作为一种地质介质，并在此介质中开采煤层时，研究岩体力学的性态必须注意到：