

于广明 著

矿山开采沉陷的非线性理论与实践

Nonlinear Theory and Practice of Mining Subsidence

煤炭工业出版社



矿山开采沉陷的非线性 理论与实践

于广明 著

国家自然科学基金重点项目 (编号: 59634030) 子项目

国家自然科学基金项目 (编号: 59674096)

共同资助

辽宁工程技术大学校出版基金项目

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

矿山开采沉陷的非线性理论与实践/于广明著. —
北京: 煤炭工业出版社, 1998
ISBN 7-5020-1681-3

I. 矿… II. 于… III. 矿山开采-围岩变形-非线性理论
IV. TD327

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1998) 第 00465 号

矿山开采沉陷的非线性理论与实践

于广明 著

责任编辑: 伊烈 牟金锁

*

煤炭工业出版社 出版发行

(北京朝阳区霞光里 8 号 100016)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

*

开本 $850 \times 1168 \text{mm}^{1/32}$ 印张 $5^{1/4}$

字数 133 千字 印数 1—555

1998 年 7 月第 1 版 1998 年 7 月第 1 次印刷

书号 4457 定价 15.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

内 容 提 要

本书是专门研究矿山开采沉陷过程中非线性机理和非线性规律的专著。书中在系统分析矿山开采沉陷复杂性的基础上,给出了建立矿山开采沉陷非线性理论的研究导引;重点介绍应用现代非线性科学所揭示的矿山开采沉陷非线性机理和非线性规律的理论研究和实验研究成果,以及在矿山生产实践中的应用。全书共分七章,第一章为绪论,分析了矿山开采沉陷的复杂性和建立矿山开采沉陷非线性理论的研究思路;第二章研究了节理对岩体采动沉陷规律的影响;第三章研究了采动岩体裂隙分形分布及演化规律;第四章研究了采动断层活化的分形界面效应;第五章研究了采动覆岩的层裂问题;第六章介绍了对矿山开采沉陷耗散过程中的协同与突变机理的认识;第七章介绍了矿山开采沉陷非线性理论在矿山生产实践中的应用。

本书介绍的是矿山开采沉陷学科中全新的内容,可供应用数学、力学、岩土工程、采矿、测量、地质等专业的科技人员、大学生和研究生参考,也可作为相关研究方向的高年级本科生、研究生用教材。

前 言

矿山开采沉陷是一个复杂的工程力学问题，然而因其学科特点及其对人类生存环境的损害特征决定了它又是一个灾害性的边缘和前沿学科。随着科学技术的发展和研究手段的进步，矿山开采沉陷的复杂性逐渐被人们所揭示，其中的一些非线性机理和非线性规律及其对矿山工程建筑和自然环境的破坏已由很多学者和现场工程技术人员所认识、研究和发表。我想，应该有一本系统总结这些零散成果的专著，并形成一较完整的知识体系，以促进矿山开采沉陷理论的发展和指导“三下”采煤生产实践，这对矿山开采沉陷学科的进步和完善无疑很有裨益。

矿山开采沉陷是一个物理的和力学的现象，在岩体受采动影响而发生一系列的力学破坏的同时，伴随着其物理性质的变化。因此，必须借助大量的实验研究和现场观测，才能揭示其真实的机理和规律。本书正是从这一指导思想出发，通过大量的实验研究、实地考察和理论研究，初步构成了矿山开采沉陷非线性理论体系，这是本书的最大特点。

本书的第二个特点是其先进性，应用先进的非线性科学研究了复杂的矿山开采沉陷现象。需要重申的是，本专著的形成决不是追求当今科技时代的时髦，而是立论有据。综合大量的实验研究和现场观测成果不难看出，在矿山开采沉陷研究领域，无论是其研究主体——岩体，还是开采沉陷的受力特征和作用机制，乃至开采沉陷的过程、采动岩体破坏特征、岩层与地表移动规律等等，均表现出强烈的非连续性、非线性和复杂性。矿山开采沉陷实质上是一个开放的非平衡岩体系统在不可逆采动应力作用下，复杂结构岩体由初始损伤扩展，形成非规则的分形裂隙网络，到众多裂隙分叉、协同扩展，导致岩体的变形和破坏，并向上传递

到地表，所完成的自组织沉陷过程，该过程中又表现出结构面采动活化的分形界面效应和由渐变到突变的力学原理。可见，矿山开采沉陷是一个丰富多彩的非线性学科，其中表现出的非平衡、随机性、非线性、自相似性、协同性、突变性、自组织性、有序性等复杂的本质特征，恰是非线性理论关注的焦点。因此，非线性学科是打开矿山开采沉陷这座“迷宫”的金钥匙，建立在非线性学科理论基础之上的矿山开采沉陷理论，才能可靠地解决“三下”采煤及相关领域的工程技术问题。

本书的第三个特点是理论研究之所用，将一些研究成果试图应用于“三下”采煤生产实践中。

本人围绕该学科已进行了十六年的辛勤研究工作，在导师谢和平教授、杨伦教授、张玉卓研究员、Marek A. Kwasniewski 教授的指导下，先后完成了硕士论文、博士论文和赴波兰学习任务；先后主持或直接参加完成一项中俄国际合作项目、一项国家自然科学基金重点项目子项目、一项国家自然科学基金项目、一项辽宁自然科学基金项目、三项煤炭科学基金项目、一项煤炭高校科学基金项目、一项煤炭优秀青年科学基金项目、一项辽宁工程技术大学出版基金项目和十余项局矿科技协作项目。同时为研究生开设了《分形和损伤及其在开采沉陷中应用》、《岩体非线性破坏力学》两门课程。本书就是在前人的研究基础上，总结大量的国内外学者和本人的研究成果及研究生教学试用教程基础上完成的。

本书的完成与导师谢和平教授、杨伦教授、张玉卓研究员、Marek A. Kwasniewski 教授的指导密切相关。同时也得到了李特威尼申教授、克诺特教授、落考夫斯卡教授、佩图霍夫教授、巴杜金娜教授、刘天泉院士、宋振骥院士、马伟民教授、王金庄教授、范学理教授、何满潮教授、伊烈高工、邓喀中教授等国内外前辈和同仁们的大力支持和指导，也依赖于课题组成员苏仲杰高工、王旭春讲师、麻凤海副教授、宋伟东副教授、田荣博士、李禄华硕士、邵军助教、杨瑜助教等同志的辛勤工作，在此向他们

表示最诚挚的谢意！也向曾给予大量资助的有关机构致以最崇高的敬意！

事实上，矿山开采沉陷现象十分复杂，其影响因素繁多，本书所做的工作仅是探索开采沉陷复杂性科学的一个初步尝试，希望通过本书的工作，对促进新兴学科在开采沉陷研究领域中的应用、促进开采沉陷理论发展和实践应用起到“抛砖引玉”的作用；再者，矿山开采沉陷涉及学科十分广泛，工程应用涉及面宽，而本人仅能立足于矿业学科来认识和研究。因此，书中无疑存在一些缺点和不足，诚恳专家、学者不吝批评和赐教！

于广明

一九九八年七月于阜新

目 录

1 绪论	1
1.1 何为矿山开采沉陷	1
1.2 我们过去做了什么	2
1.3 我们现在何处	6
1.4 矿山开采沉陷的本质特征何在	8
1.5 我们怎样前进	10
2 节理岩体开采沉陷规律	13
2.1 概述	13
2.2 节理化岩体采动沉陷实验研究	15
2.2.1 实验设计	15
2.2.2 实验成果及分析	18
2.3 节理化岩体采动沉陷的统计损伤分析	28
2.3.1 损伤力学的基本概念——损伤变量与有效应力	28
2.3.2 损伤张量及节理岩体损伤张量定义	30
2.3.3 节理岩体采动沉陷实验模型的损伤张量计算及 沉陷量值的统计损伤分析	35
2.4 非贯通节理岩体采动沉陷规律的损伤岩梁弯曲效应	40
3 采动岩体分形裂隙网络及其演化规律	45
3.1 概述	45
3.1.1 研究意义	45
3.1.2 应用分形几何研究采动岩体裂隙分布的可行性	45
3.1.3 国内外研究现状	46
3.2 采动岩体裂隙网络的实验及结果分析	47
3.2.1 不同采宽条件下的采动岩体裂隙网络的 物理模拟	48
3.2.2 不同岩性条件下采动岩体裂隙网络比较	51
3.2.3 初始裂隙对采动岩体裂隙网络的影响	52

3.3	采动岩体分形裂隙网络研究	54
3.3.1	采动岩体裂隙网络分形维数计算方法的选择	54
3.3.2	Fractal. For 程序简介	55
3.3.3	采动岩体裂隙分布分形性检验	55
3.4	采动岩体分形裂隙网络的演化规律	58
3.5	采动岩体分形裂隙网络分形维数的理论价值与 工程意义展望	63
4	采动断层活化的分形界面效应	66
4.1	概述	66
4.2	断层面结构的宏观特征与微观特征	67
4.2.1	宏观特征	67
4.2.2	微观特征	69
4.3	断层面的分形性质研究	69
4.3.1	地质断裂面分形性质研究基础	70
4.3.2	地质断裂面几何形态的野外取样	71
4.3.3	断层面分形维数的量测方法	74
4.3.4	断裂面剖面线分形维数的意义	79
4.3.5	断裂面的各向异性分形性质	80
4.4	采动断层活化分形界面效应	82
4.4.1	实验模拟研究	82
4.4.2	分形断面对采动沉陷规律的影响	91
4.5	分形断层面采动活化数值模拟	94
4.5.1	数值模拟基本工作	94
4.5.2	模拟结果及分析	97
5	采动覆岩的层裂问题	112
5.1	基本概念	112
5.2	连续面的层裂问题	113
5.2.1	层裂力学机理	113
5.2.2	层裂的度量	113
5.2.3	纯拉离层形成的突变机理	114
5.2.4	层裂的扩展	116
5.3	水平节理引起的层裂	118
6	矿山开采沉陷的突变与协同机理	121

6.1 矿山开采沉陷的突变原理.....	121
6.1.1 概述.....	121
6.1.2 高角度节理岩体的突变破坏过程.....	121
6.2 矿山开采沉陷的协同原理.....	128
6.2.1 矿山开采沉陷孕育和发展过程的耗散结构特征.....	128
6.2.2 矿山开采沉陷中的协同现象.....	129
6.2.3 矿山开采沉陷自组织行为检验.....	129
6.2.4 结构化(缺陷)岩体变形和断裂演化方程.....	130
7 矿山开采沉陷非线性理论在矿山生产实践中的	
应用	132
7.1 阻隔地表非线性变形向地面建(构)筑物传递技术.....	132
7.1.1 活动基础的设计.....	132
7.1.2 活动基础的安装与调试.....	134
7.1.3 应用实例.....	136
7.2 采动覆岩离层注浆控制地层沉陷技术.....	139
7.2.1 离层注浆控制地表沉陷技术.....	139
7.2.2 实施离层注浆控制地表沉陷技术还应解决的 问题.....	140
7.3 采动覆岩扩容(胶结)控制岩体沉陷技术.....	146
7.3.1 扩容(胶结)技术.....	146
7.3.2 应用实例.....	146
参考文献	150

1 绪 论

1.1 何为矿山开采沉陷

进行地下矿物开采是出于国民经济发展对矿物资源的需要，但对矿山工程本身及周围岩体直至地表的重大损害却影响到矿业、矿区工农业、交通运输业及人民生活等各个方面，包括城镇和农村广大地区，是一个重大的社会和环境问题。研究岩体采动沉陷，实现减少和控制开采损害的目标，对国民经济建设和人民生活有着重大的实际意义。我国矿产资源极其丰富，矿产资源的开采（井工开采或露天开采）带来的严重副作用是开采沉陷（或岩层和地表移动）。地下有用矿物被采出后，开采区域周围的岩体原始应力平衡状态受到破坏，造成应力重新分布，并寻求新的平衡，从而使岩层和地表产生移动变形和非连续破坏，这种现象称为“开采沉陷”（Mining Subsidence）。矿山开采沉陷学（又称岩层与地表移动）作为一门实用性很强的学科，其主要研究内容是地下矿体采出后，开采空间及周围岩体及地表移动变形和破坏的发生、发展、终止、稳定的机理和过程及其分布形态、力学特征、破坏程度和预测并控制岩体与地表破坏及其所造成的一系列灾害性问题（地面建筑破坏、铁路损坏、水体溃漏、竖井偏斜和断裂、耕地损失等）的原理与方法。虽然也是以岩石、岩体及其内部的工程作为主要研究对象，但是它与矿山岩石力学有所不同^[1]：一是它所研究的范围大，研究采场及其所波及的所有岩体乃至地表；二是它研究的不仅是附加应力应变的分布规律，更主要的是研究采动影响范围及地表所产生的大变形和大位移；三是采动岩体损害特征复杂，既具有不可逆性，使岩体失去无法挽回的工程性质，同时又具有“可逆性”，形成一个可以恢复工程使用的再生结构；四

是它不仅需要研究岩体本身的损害控制,而且还需要研究岩体移动所波及的一切生产工程和生活设施的破坏控制。矿山开采沉陷学是一门理论性和实践性都很强的交叉学科,既要求具有很深的理论基础,以保证自身的发展和可靠地应用于实践,同时又要要切实可行地解决生产实践中所遇到的问题。它涉及到众多学科,如数学、力学、地质学、采矿学、非线性科学、建筑学、农林水利土壤科学甚至人文科学等等。它既能解决采矿行业本身因沉陷所带来的一系列问题,而且也能应用于相关领域,并有效地解决其中的问题,如矿山压力显现,地下水、石油、天然气开采及地下隧道开挖等引起的损害,工程岩体滑坡,建筑地基沉陷,溶洞陷落等等。所以,开采沉陷学科具有重要的理论研究价值,对科学的发展具有重要的推动作用,同时也具有重要的实践和工程意义,是国民经济发展和环境保护以及防灾减灾中不可缺少的一门重要学科。

1.2 我们过去做了什么

人们对矿山开采沉陷的最初认识是在 15 至 18 世纪,当时比利时列日城的地下含水层水源发生流失,经人们勘查发现是因地下开采所致,为此国家政府发布一项法令,对因开采而造成水源破坏的责任者处以死刑。但当时只是对开采沉陷现象的初浅认识,而对开采沉陷的机理和预测方法研究不够。到本世纪初,因地下开采造成的地面铁路、房屋破坏(如 1875 年德国的约翰载梅尔矿,地面突然塌陷,毁坏 31 座房屋)及井下透水(如 1916 年日本海下采煤时,海水沿着由于开采影响而扩大的构造裂缝溃入井下,使矿井全部淹没,造成 237 人死亡的惨案)等事故屡屡发生,更引起了人们对开采沉陷问题的高度重视,并进行了一些专门的研究工作。开采沉陷作为一个学科而进行系统的研究是从本世纪 20 年代开始的,特别是第二次世界大战以后,发展更为迅速,各主要采煤国家的矿山工程技术人员和科学工作者投入了越来越多的时间、技术和装备进行了此项研究,在开采沉陷基本理论上和“三

下一上”(建筑物下、铁路下、水体下和承压水上)开采及井筒煤柱开采技术上均取得了丰硕的成果。因此,可以将矿山开采沉陷的研究概括分为三个时期,自1838年对比利时列日城下开采所引起的地表塌陷的认识开始到第二次世界大战前夕,属于开采沉陷的认识和初步研究时期;第二次世界大战以后大致到80年代末期,属开采沉陷的理论形成时期;进入90年代,随着科学的发展和研究手段的进步,又掀起了矿山开采沉陷的第三次研究热潮,这一热潮的背景在于:国内外大量研究已揭示出天然岩体是非连续、非均质、非弹性、各向异性的介质,而且具有时效性,并存在着初始地质构造应力,所以用以往的沉陷理论无法综合考虑天然岩体的这些属性,因此需要发展一些新的沉陷理论。正如美国机械工程师学会在固体科学研究趋势报告中指出的“由于岩石和土的复杂性,需要发展一些全新的思想和方法……”,因此学者们试图把先进的理论和工具引进矿山开采沉陷学科中,解决矿山开采沉陷研究和实践中遇到的老难题和新问题,而分形理论、损伤力学的诞生和发展为其带来了极好的契机^[2]。

作为揭示岩层和地表移动、变形与破坏的开采沉陷基本理论的研究迄今已有一百多年的历史了,早在1838年,比利时工程师哥诺特经过对列日城下开采沉陷的调查提出开采沉陷的第一个理论“垂线理论”,并经过哥诺特及法国工程师陶里兹的改进,发展成为“法线理论”,给出了岩体下沉是沿煤层层面沿法线向上传播的直观机理和规律。后来又相继出现了依琴斯(1876)的二等分理论和高斯理论,耳西哈(1882)的自然斜面理论,裴约尔(1885)的拱形理论等等,这些理论为以后的深入研究奠定了基础。进入20世纪后,门者尔观测到水平移动和变形,使开采沉陷的理论研究更为丰富,除地表下沉以外,扩充至水平移动计算以及急倾斜煤层条件下的地表移动动态过程的分析。在1923至1940年间,舒密茨、坎因霍斯特、巴尔斯及派茨等人相继提出和发展了开采影响分布的几何沉陷理论。进入40年代,苏联学者阿维尔申对开采沉陷进行了细致的研究工作,出版了《煤矿地下开采的岩

层移动》专著,并给出了地表下沉盆地剖面方程及数学塑性理论。以后沙武斯托维奇提出了岩层下沉的弹性基础梁理论,贝里视岩体为均质线弹性体提出计算岩体下沉的方法。第二次世界大战之后,开采沉陷学科领域出现了更大的发展,特别是1950年以后,波兰学者布德雷克和克诺特对几何沉陷理论作了修正,提出了连续分布影响函数的概念,并选用了高斯曲线作为影响函数曲线。1954年,波兰学者李特威尼申提出开采沉陷的随机介质理论,把开采沉陷理论的研究提高到一个新的阶段。

在中国,开采沉陷学科是建国以后发展起来的。60年代以前,基本上借用苏联的典型曲线法。1958年起在我国一些矿区如开滦、淮南、阜新等地制定了开展地表移动观测的规划,并相继建立了一些观测站。在多年观测的基础上求出一些矿区的地表移动参数,并编制淮南等三矿区的“地面建筑物及主要井巷保护暂行规程”,从而改变了过去那种引用苏联经验解决中国实践问题的局面;1963年,唐山煤炭研究所根据实测资料分析,建立了地表下沉盆地的负指数形式的剖面函数;1965年,中国学者刘宝琛、廖国华^[3]编著了《煤矿地表移动的基本规律》,其中最大贡献是将李特威尼申的随机介质理论加以引入和完善,提出了地表移动预计的概率积分法,该方法在我国采矿行业中现仍广泛应用;1978年,刘天泉提出了保护煤柱开采方法,1981年,他又和仲惟林等学者合作,研究提出覆岩破坏的基本规律,并针对水体下采煤提出一些经验性的成果和方法;1983年,马伟民、王金庄等^[4]组织编著了《煤矿岩层与地表移动》,详细地总结了前一段的研究成果。

80年代至90年代间,我国开采沉陷理论和实践研究出现了日新月异的发展。何国清(1981)^[5]和吴戈(1981)分别给出了地表下沉盆地剖面的偏态表达式“威布尔分布”和“Γ分布”;杨伦(1984,1987)^[6]提出了岩层二次压缩理论,将地表下沉直接与岩体的物理力学性质联系起来;李增琪(1983,1985)^[7]将采动岩体看成是多层梁板的弯曲,采用Fourier变换推出岩层与地表移动表达式;张玉卓(1987)^[8]提出岩层移动的位错理论;郝庆旺

(1988)^[9]提出了采动岩体沉陷的空隙扩展模型;杨硕(1990)^[10]建立了开采沉陷力学模式;邓喀中(1993)^[11]提出了岩体开采沉陷的结构效应;吴立新、王金庄(1994)^[12]提出了条带开采覆岩破坏的托板理论;刘天泉(1995)^[13]提出和发展了矿山岩体采动影响与控制工程学;于广明(1994~1997)^[14,15]从非线性科学角度认识开采沉陷的复杂性,开始研究开采沉陷的非线性机理和规律;范学理、赵德琛、张玉卓、徐乃忠等(1986~1997)^[16,17,24]着手研究采动覆岩离层形成的基本规律和离层注浆控制地表下沉的理论机制,为离层注浆减缓地表沉陷技术的实施提供了有力的理论依据;崔希民(1996)^[17,18]对主断面的地表移动与变形进行了实时位形上的分析,建立了开采沉陷的流变模型等等。

在开采沉陷的数值模拟上,一些学者利用不同的模型模拟,得出一些非常有价值的成果。如谢和平(1988)^[19]的损伤非线性大变形有限元法;张玉卓(1987)^[20]模糊内时有限元法;何满潮(1989)^[21]的非线性光滑有限元法;邓喀中(1993)^[11]的损伤有限元法;张玉卓(1996)^[22]和麻凤海(1996)的离散单元法等等。这些数值方法为开采沉陷的计算拟合和定量预测奠定了基础。

实验室再现岩体与地表采动沉陷的过程是相似材料模拟。该方法于1937年首先被应用于研究岩体与地表移动问题的。第二次世界大战以后,这种方法在许多国家如波兰、捷克等得到了广泛地应用和发展。在我国,中国矿业大学、阜新矿业学院、煤科总院唐山分院首先开展了这方面的开发和应用研究,并相继建立了相似材料模拟实验室,大力开展了地下开采对岩体的破坏规律研究和“三下及井筒柱内外”开采的实验室试验工作。

在地层控制、“三下一上”及井筒柱内外开采的实践中,我国研究了疏降开采、带压开采及综合治理方法,使煤层底板水害得以控制;发明了离层注浆减缓地表下沉技术,在很大程度上减小了开采对地面的损害^[24];研究和推广了抗变形房屋技术和活动基础保护采动建筑物专利技术^[25];研究了井筒柱内外开采及保护技术^[26];进行了大规模的土地复垦试验^[27],这些成功的技术对保障

矿产资源的开发和充分利用、保护矿山的安全生产环境和人类的生存生活环境起到很大作用。

1.3 我们现在何处

综观上述的开采沉陷理论与实践的研究，可以看出矿山开采沉陷理论发展很快，一些相应的控制和保护技术比较切实可行。其理论研究可概括为：唯象学理论研究，经典力学理论研究（反分析），力学理论研究方法（正演分析）（据何满潮，1996）^[21]。

理论研究也称理论模拟，它是把岩体和开采抽象为一定理论模型，根据该理论模型的理论解及实测、实验求得的参数，对岩体内部及地表因采动引起的位移和应力进行计算。在开采沉陷的研究中，把这种理论模拟称为理论研究方法，其研究流程简化为图 1-1 所示：

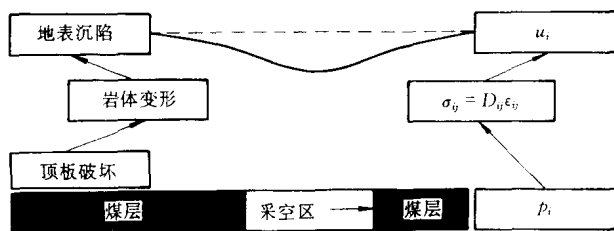
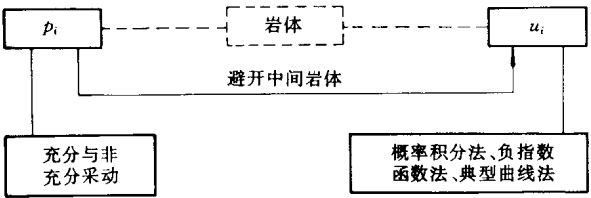


图 1-1 矿山开采沉陷的理论研究示意图

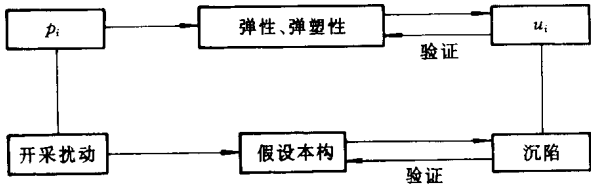
唯象学理论研究方法（图 1-2a）包括概率积分法、负指数函数法、典型曲线法。这些方法简便易行，在岩体结构表现为简单的层状性质时计算结果比较符合实际，因此目前在“三下采煤”生产实践中仍广泛使用；但它避开了岩体本构，岩体结构复杂时，计算结果误差较大，甚至无法预计，而且所用的参数没有明确的力学意义，且各矿区不尽相同，所以仅适用一定的具体地质采矿条件。

经典力学理论研究方法（反分析）（图 1-2b）是利用黑箱原

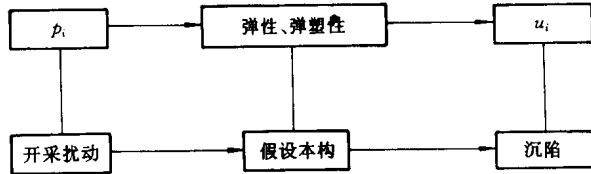
理，进行岩体采动系统调制，来拟合采动岩体与地表的移动曲线。其反映实际效果较差，因此较少使用。



(a) 唯象学方法



(b) 反分析



(c) 正演分析

图 1—2 理论研究方法各类别示意图

力学理论研究方法（正演分析）（图 1—2c）是利用力学原理，将岩体抽象为力学模型，编制相应的计算程序对采动岩体与地表的沉陷进行数值模拟。这种方法因其能够考虑岩体固有属性，适应不同特征（岩性、结构等）的岩体采动沉陷研究，较为有效地反映出采动岩体的沉陷状态，因而获得广泛应用。但该法的种类繁多，很难统一，它们是针对岩体不同属性和变形特征来模拟采