

江苏省优势学科建设工程（测绘科学与技术）项目资助
国家自然科学基金项目（51604266）资助
江苏省自然科学基金项目（BK20150187）资助
淮南矿业（集团）有限责任公司资助
煤矿生态环境保护国家工程实验室资助

厚冲积层矿区 开采沉陷机理及预测方法

周大伟 安士凯 吴侃 徐翀 李亮 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

江苏省优势学科建设工程(测绘科学与技术)项目资助
国家自然科学基金项目(51604266)资助
江苏省自然科学基金项目(BK20150187)资助
淮南矿业(集团)有限责任公司资助
煤矿生态环境保护国家工程实验室资助

厚冲积层矿区 开采沉陷机理及预测方法

周大伟 安士凯 吴侃 徐翀 李亮 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书首先展示我国开采沉陷的研究现状,分析了普通矿区覆岩内部动态移动和破坏规律;介绍了厚冲积层矿区地表沉陷的特殊性规律;分析了厚冲积层土体对覆岩内部破坏规律的影响作用,得到了厚冲积层矿区岩土体的协同作用机理;提出了厚冲积层矿区土体沉陷响应研究的新思路和方法。在此基础之上,系统研究了厚冲积层矿区开采沉陷特殊性机理;简单分析了厚冲积层矿区多煤层重复采动地表下沉系数变化的特殊性规律;介绍了厚冲积层矿区现存的开采沉陷预计理论,分析其在厚冲积层矿区应用中存在的问题;结合厚冲积层矿区开采沉陷机理,建立了适合厚冲积层开采沉陷的 Boltzmann 函数预测方法和组合预测模型。

本书可供开采沉陷和矿山测量科研人员、采矿工程及相关专业的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

厚冲积层矿区开采沉陷机理及预测方法 / 周大伟等

著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3305 - 9

I. ①厚… II. ①周… III. ①矿区—矿山开采—沉陷
性—研究 IV. ①TD327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 253069 号

书 名 厚冲积层矿区开采沉陷机理及预测方法

著 者 周大伟 安士凯 吴 侃 徐 翀 李 亮

责任编辑 章 毅 张 岩

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

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

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 12.5 字数 312 千字

版次印次 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



序 言

现在乃至未来几十年,煤炭资源在国民经济发展能源需求中仍占据主导地位。然而,煤炭开采势必引起地表沉陷并破坏环境,该过程在厚冲积层矿区具有特殊性。

淮南矿区是厚冲积层矿区的典型代表,是我国开展开采沉陷研究最早的矿区之一。过去很长一段时间中进行了大量的科研工作,建立了数百条地表移动观测线、近千个“三带”观测钻孔,积累了淮南老区和新区两种不同地质条件下的大量观测数据。该书充分利用淮南矿区的实测数据,结合淮南新区和老区的条件,通过对比研究,进一步探索出厚冲积层矿区的开采沉陷机理及预测方法。

该书涉及开采沉陷学科中较特殊和复杂的厚冲积层问题。在详细总结借鉴开采沉陷学科最新研究成果的基础上,针对厚冲积层矿区提出了新的研究思路和方法,遵循“物理模拟实验—数值模型建立—生产现场验证”的攻关路线,研究成果有所创新。如证实了厚冲积层土体抑制导水裂缝带发育高度和形态,使采空区破碎岩体空隙被压实,进而增加地表下沉;提出了厚冲积层矿区地表沉陷分为四部分组成的认识,可以很好地解释厚冲积层矿区开采沉陷特殊性问题;针对厚冲积层矿区的重复开采下沉系数的变化规律,提出了不同于常规的认识。该书理论与实际相结合,获取的研究成果及经验具有较高的理论水平和实用价值。

矿山开采沉陷学是一个理论和实践结合很强的学科,它综合了采矿、地质、测量和岩石力学等学科,甚至包括环境保护方面内容。我相信该书的出版很有意义,将对开采沉陷研究技术体系的形成以及煤炭绿色开采技术的补充产生较高的参考价值,可供国内外同行参考借鉴。

中国工程院院士:



前 言

厚冲积层矿区在中国分布广泛,主要集中在华东、华中、华北及东北等地区的两淮、兖州、大屯、焦作、平顶山、永夏、开滦、邢台等矿区。实测数据显示,厚冲积层矿区地表沉陷规律表现出一些独特的现象,比如下沉系数大于1.0,地表沉陷范围更大,边界处水平移动值大于下沉值,活跃期剧烈而集中,地表稳沉时间长等。由于冲积层土体的特殊性和复杂性,厚冲积层矿区的沉陷规律和机理一直是开采沉陷学领域研究的热点和难点问题。我国对厚冲积层下采煤沉陷机理的探讨及进一步研究始于20世纪80年代。当时华东地区地表移动变形发展范围异常的现象早已引起我国许多专家的关注。中国矿业大学1989年完成的“华东地区巨厚含水冲积层对地表移动规律的影响及其机理分析”项目对实测资料进行了较为详细的分析,提出造成这些特殊性的最主要原因就是开采沉陷引起含水层失水。这一研究成果,在当时对实际工程起到指导作用,具有积极的意义。

事实上,后来发现在我国许多矿区,其地下水位没有发生明显变化的区域仍存在移动盆地明显扩大、移动持续时间相当长的现象。因此,矿区出现诸多异常现象除了与地下水的变化有一定关系外,也与开采沉陷在土体中的传递范围扩大有密切的关系。

近些年,国内相关专家针对厚冲积层矿区开采沉陷问题进行了更深入的研究,得到一些有益的研究成果,比如认为厚冲积层矿区地表下沉系数偏大的内部机理为:①冲积层与基岩相比较软,呈现整体性下沉,内部不出现离层引起地表下沉增大;②土体受直接开采引起失水或排水固结以及沉陷土体出现流变引起地表下沉和移动偏大。该研究成果可以初步解释厚冲积层矿区地表沉陷的特殊规律,相对准确地预计地表开采沉陷。其他相关研究结果也均认为厚冲积层矿区地表沉陷特殊性的内部机理不能单纯归结于含水层失水这一个因素,并从不同角度进行了分析且取得了启发性的研究成果。作者在整理淮南矿区开采沉陷实测数据资料的过程中,对厚冲积层矿区开采沉陷的特性机理进行了研究,发现引起厚冲积层矿区沉陷异常一方面与岩体、土体的性质有关,另一方面冲积层土体在一定条件下影响采空区破裂岩体,产生岩土体的协同作用,也增加地表的下沉。

为了深入全面地研究厚冲积层矿区开采沉陷特殊性机理,在前人研究成果的基础之上,本书利用淮南矿区同时具备厚冲积层和薄冲积层条件下的开采沉陷特性,在大量实测数据的基础上,结合物理模拟、数值模拟和理论分析的方法,研究了岩体内部动态移动破坏规律,分析了厚冲积层矿区岩土体的协同作用,提出了厚冲积层矿区土体沉陷响应的新方法和新思路,系统研究了厚冲积层矿区的开采沉陷机理,在此基础上初步研究了多煤层重复采动下沉系数规律,构建了适用于厚冲积层矿区的 Boltzmann 函数沉陷预测方法和能反映厚冲积层土体沉陷作用的开采沉陷组合预测模型,对提高厚冲积层矿区地表沉陷预测精度具有指

导意义。

厚冲积层矿区主要分布的华东、华中和华北地区均为人口、房屋、铁路及河流水库等水体密集区,“三下”(建筑物下、铁路下和水体下)压煤问题尤为突出。据不完全统计,我国生产矿井“三下”压煤数百亿吨,其中厚冲积层分布的中东部地区占的比例最大。因此,在面临解放厚冲积层矿区“三下”压煤和减小地面建(构)筑物损害的双重压力下,深入系统地研究厚冲积层矿区开采沉陷机理、建立精确的地表沉陷预测模型,无论是对学科理论体系的完善和发展还是对解放厚冲积层矿区“三下”压煤实际工程应用均具有重要的理论和现实意义。

本书得到了江苏省优势学科建设工程(测绘科学与技术)项目、国家自然科学基金项目(51604266)、江苏省自然科学基金项目(BK20150187)、淮南矿业(集团)有限责任公司、煤矿生态环境保护国家工程实验室的资助。

事实上,本书在写作过程中得到了中国工程院袁亮院士及中国矿业大学环境与测绘学院汪云甲教授、郭广礼教授、邓喀中教授、高井祥教授、谭志详教授、张书毕教授和王坚教授的指导和帮助,在此表示感谢。

由于作者水平及时间的限制,书中缺陷和错误在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2016年5月

目 录

1 绪论	1
1.1 厚冲积层矿区分布	1
1.2 矿山开采沉陷研究现状	1
1.3 厚冲积层矿区开采沉陷研究回顾	8
1.4 本书的主要内容和逻辑结构	9
2 普通矿区覆岩内部移动及破坏规律	11
2.1 覆岩移动和破坏基本概念	11
2.2 覆岩内部动态破坏规律	17
2.3 采场覆岩内部动态破坏规律	30
2.4 采场覆岩内部动态移动规律	34
2.5 覆岩内部移动破坏高度的计算方法	43
3 煤炭开采引起的地表沉陷规律	46
3.1 地表下沉盆地的形成	46
3.2 下沉盆地内移动变形分析	48
3.3 地表沉陷的一般规律	49
3.4 厚冲积层矿区地表沉陷特殊性规律	55
4 厚冲积层矿区开采沉陷特殊性机理	56
4.1 厚冲积层土体与岩体的协同作用机理	56
4.2 厚冲积层矿区土体沉陷响应研究的新方法	65
4.3 厚冲积层矿区开采沉陷机理研究	80
5 厚冲积层矿区多煤层重复采动下沉系数变化规律	87
5.1 多煤层重复采动的基本概念	87
5.2 下沉系数的影响因素	88
5.3 重复采动下沉系数规律分析	88
5.4 实测资料验证	91
6 厚冲积层矿区开采沉陷的已有预计理论	94
6.1 概率积分法模型	94
6.2 概率积分修正模型	100
6.3 双曲函数模型	102

6.4	力学与影响函数结合法	103
6.5	模型评价及存在的问题	105
7	基于 Boltzmann 函数的开采沉陷预测模型	108
7.1	开采沉陷中土体的变形作用	108
7.2	基于 Boltzmann 函数沉陷预测模型建立	115
7.3	基于 Boltzmann 函数模型参数解算方法	128
7.4	基于 Boltzmann 函数模型参数全局灵敏性分析	132
7.5	基于 Boltzmann 函数模型精度对比分析	135
7.6	基于 Boltzmann 函数沉陷预测模型适用性研究	144
7.7	淮南潘谢新区 Boltzmann 函数模型参数选取	152
7.8	基于 Boltzmann 函数模型工程应用	155
8	矿山开采沉陷的组合预测模型	165
8.1	基本假设	165
8.2	计算原则和方法	165
8.3	组合预测模型建立	166
8.4	最大移动和变形值求定	175
8.5	实例计算及参数分析	176
	参考文献	180

1 绪 论

1.1 厚冲积层矿区分布

在中国的煤炭开采区,根据煤层上方覆盖层的不同,大致可以分成三大类:普通地质条件矿区,东部厚冲积层矿区,西部黄土覆盖矿区。它们的特点如下:

① 普通地质条件矿区(以下简称普通矿区):覆岩主要为岩体,土体所占比例较少,即为薄(无)冲积层矿区,主要分布在华北地区。

② 东部厚冲积层矿区:覆岩由岩体和第四系冲积层土体共同组成,且冲积层土体占很大的比例,第四系冲积层土体主要为黏土层。至于冲积层土体占多大比例才能称为厚冲积层,目前还没有统一的定义。不过,一般将煤层覆岩以上的第四系冲积层厚度小于 50 m 的矿区称为薄冲积层(即常规地质条件)矿区;大于 100 m 的矿区称为厚冲积层矿区;大于 300 m 的矿区称为巨厚冲积层矿区。中国厚冲积层矿区分布十分广泛,主要集中在华东、华中、华北及东北等地区的两淮、兖州、大屯、焦作、平顶山、永夏、开滦、邢台等矿区。

③ 西部黄土覆盖矿区:覆岩由岩体和黄土层共同组成,且黄土层占很大的比例,黄土和第四系冲积层土体性质有本质的区别,主要分布在西部地区。

这三种矿区的地表沉陷具有不同的特点:

① 对于普通矿区的开采沉陷来说,地表沉陷符合一般规律,地表下沉系数小于 1.0,长壁开采充分采动条件下的地表下沉系数一般在 0.7~0.9 之间,开采沉陷预计理论符合概率积分法模型。

② 对于厚冲积层矿区的开采沉陷来说,下沉系数可能会大于 1.0,地表沉陷范围更大,边界处水平移动值大于下沉值,活跃期剧烈而集中,地表稳沉时间长。

③ 对于西部黄土覆盖区的开采沉陷来说,由于西部黄土覆盖区地表起伏多变,黄土层厚度占到采深的 30%~70%,黄土层地面沉陷、裂缝容易引起山体滑坡和水土资源流失、土地荒漠化等次生地质灾害。地形的变化对于开采沉陷规律的影响较大。

在这三种开采沉陷中,第一种开采沉陷规律和预计方法的研究最为透彻,对于缓倾斜煤层一般采用概率积分法模型进行预计,在实测参数的基础上,预计相对误差在 10%左右。第二种的地表沉陷的特殊性规律已经清楚,但其内部机理还有待于进一步研究,缺乏合适的预测模型和方法。第三种开采沉陷的规律和预计方法均没有研究透彻。

本书主要对厚冲积层矿区的开采沉陷特殊性机理进行系统研究,并在此基础上建立适合厚冲积层矿区开采沉陷的预计方法。

1.2 矿山开采沉陷研究现状

煤炭是我国的主体能源,在我国一次能源结构中煤炭生产与消费一直在 70%左右,因

此在国民经济发展中具有重要的战略地位。煤炭资源在现在乃至未来的几十年仍然在国民经济发展中占据主要的地位,且作用极其重大。煤炭资源的开采势必引起岩层的破坏及地表移动,对地面建(构)筑物等方面产生不同程度的影响。所以必须研究开采沉陷引起的覆岩和地表移动破坏规律,来更好地指导矿区的生产。

开采沉陷学是一门研究地下煤矿开采引起的连续与非连续岩层移动和地表沉陷变形现象及相关问题的学科^[1-5]。早在 20 世纪 30 年代,苏联、波兰^[2-4]等采煤先进国家就已把岩层及地表移动作为研究的主要对象,而后在 50 年代开采沉陷学形成一门专业的学科,并迅速发展。近几十年来,开采沉陷学在岩层移动规律、岩体力学模型研究、地表移动变形监测、地表沉陷变形预计、岩层及地表动态及可视化过程、“三下”开采、开采沉陷引起的环境评价与治理等相关特定条件下实际应用方面的研究都取得显著的成果,对指导矿区开采生产起到积极的促进作用。

矿山开采沉陷学是采矿学科与测绘学科结合的一个交叉学科。多年来,采矿者及测量者分别从不同的角度出发,采用不同的方法对覆岩移动破坏与地表沉陷规律进行了研究^[6]。采矿者从开采工作面的顶板支护与管理出发,基本掌握了开采工作面周围及下部岩层(直接顶、基本顶)的移动破坏规律,针对上部岩层(基本顶至冲积层底部)的移动变形提出了岩层移动的关键层理论^[6-16]。关键层理论强调坚硬岩层的控制作用,但对沉陷在土体的传递规律、岩体与土体协同作用涉及较少。同时,测量者展开了丰富的具有针对性的地表沉陷实测与统计工作,对开采后地表沉陷的分布形态有了充分的掌握,建立了多种有用的地表沉陷预测理论和方法,如影响函数法、典型曲线法及概率积分法等^[1,5,17-39]。以概率积分法应用最为成熟,但其理论基础及基本假设的缺陷,致使预测结果在一些条件下(非充分采动条件下,巨厚冲积层覆盖下等)与实测结果有一定的差异^[24-26,32-34,40]。

采矿者多从矿压及顶板管理的角度研究问题,对上部岩层及土体的研究较少;测量工作者多从地表沉陷实测及地表的移动规律的角度研究问题,对岩层内部动态移动破坏规律研究较欠缺,二者并没有很好地融合在一起。井下开采引起地表沉陷是岩体与土体共同作用的结果,将岩体和土体(厚冲积层土体)结合研究是彻底弄清煤矿开采沉陷机理的关键。目前国内外的开采沉陷专家已经开始将采空区上方的岩体与土体作为双重介质来研究开采沉陷的传递过程,并取得一定的研究成果^[41-54],但仍然存在如下问题需要进一步研究。

- ① 开采沉陷在土体中的传递过程及引起的土体的响应机理;
- ② 厚冲积层土体影响下,岩体内部的移动变形规律及预测理论;
- ③ 岩体与土体(厚冲积层)的协同作用及对开采沉陷的影响;
- ④ 多煤层重复采动的岩土体的响应机理;
- ⑤ 反映开采沉陷在岩体、土体中传递过程的一体化预测理论及模型。

厚冲积层土体作为巨大荷载作用在岩体上,使开采引起的岩体内部的移动破坏特性与岩体上方没有厚冲积层土体覆盖时有很大不同;并且厚冲积层土体的存在,使得井下开采空间由下而上传递到地表过程中,冲积层土体内部产生了复杂变化。目前专家对岩体与土体的协同作用机理和开采沉陷中冲积层土体的作用研究不够,导致了厚冲积层矿区的开采沉陷预测精度较低,误差较大。更未能建立起符合厚冲积层矿区开采沉陷实际的预计方法。本书在此背景下,综合采矿学、测量学、岩石力学及土力学等相关学科的内容,在系统总结和分析现存理论及地表实测数据的基础上,研究开采沉陷在岩体、土体传递及其协同作用理

论,建立起符合厚冲积层矿区开采沉陷的预测模型。

1.2.1 开采沉陷基本理论

在 20 世纪中期,对开采沉陷及其影响因素有了较明确的概念,认为主要影响因素是开采方法、煤层倾角、煤层厚度、煤层埋深和覆岩的物理力学特性等^[1-5,55-62]。经过一个多世纪的经验积累和许多科学家的努力,现在关于开采沉陷基本理论的研究主要形成了两大学派:几何学派和力学学派。

1.2.1.1 几何学派

几何学派主要是从几何学角度分析开采影响分布规律。国外这方面的主要成果有坎因霍斯特的影响带法^[1-5]、克诺特(1950)的影响函数法^[62-66]。国内在此方面的代表有:魏庆余^[27,28]认为采动引起地表移动的主要因素有三项——地质影响因素、开采影响因素和时间影响因素。对于稳态问题,地表移动的主要影响因素为开采体积影响因素。并以此理论为基础,提出了地表移动预计的体积影响函数法。戴华阳等^[67-72]提出利用采空区矢量化,分别建立竖直和水平分量的移动变形预计公式,应用矢量原理,引入叠加参数,提出地表移动预计的新模型。

几何学派仅从几何角度出发来研究开采影响规律,不涉及地表移动的力学本质,不能揭示岩层和地表移动的机理,因而不能从本质上解释采动岩层和地表移动现象。

1.2.1.2 力学学派

根据对岩体结构假设的不同,分为连续介质力学理论和非连续介质力学理论。

(1) 连续介质力学理论

连续介质力学理论以弹塑性力学为理论基础,将岩体看作连续介质研究岩层和地表的移动变形规律。主要取得如下成果^[57,73-82]。

① 采用弹塑性力学理论,研究开采影响下岩层移动规律,并以理论上的分析成果为指导,构建了地表移动的计算方法。

② 采用弹性基础梁理论对岩体移动进行分析,并建立了下沉剖面函数。

③ 将整个岩层视为各向均质(平面各向同性、平面横观各向同性)的线弹性体进行建模分析。

④ 将岩层看成是横观各向同性、纵观各层异性、同一层内各向同性的弹性层接触,求出了开采沉陷在岩层传递过程的位移及应变计算公式。反映了地表移动是井下开采空间由下而上分层传递的结果。

⑤ 中外学者逐渐认识到岩体结构的控制作用,强调岩体结构对岩体力学性质的影响。我国学者采用相似材料模型、损伤力学理论和数值模拟等理论和方法研究了岩石节理和层面效应对岩层及地表沉陷的影响,并得出了一些有很好参考价值的结论。推出层面滑移规律,滑移函数及层面的滑移判断式。

国内外普遍采用的开采沉陷数值模拟(有限元、离散元、边界元法和有限差分法)技术也是基于连续介质力学理论之上的。

(2) 非连续介质力学理论

非连续介质力学理论在开采沉陷中取得的主要成果如下。

① 非连续介质力学中最有成效的是李特威尼申(J. Litwiniszyn)的随机介质理论^[17-18]。中国的开采沉陷学专家刘宝琛、廖国华后来将其发展为概率积分法^[1-5,19-25,83],经过我国开采

沉陷学者系统地分析和研究,已成为我国最为成熟和应用最广泛的预计方法。

② 从随机介质观点出发,认为岩体是由开采所引起的和原生的节理系、裂隙系所分割而成的不连续介质,可以用碎块体模型描述(岩体各向异性、非均质和不连续,承认“叠加原理”),得到地表沉陷预计的威布尔分布法^[20-21]。

③ 引入空隙扩散和空源的概念^[24-26],建立了空隙扩散模型,并初步阐述了在开采沉陷中的应用。

采动岩体是由连续介质动态变化到非连续介质,最终是部分岩体破碎(非连续介质),大部分岩体是完整的弯曲(连续介质)。因此,无论是连续介质力学还是非连续介质力学,单独都无法完整描述开采引起的覆岩破坏与开采沉陷传递过程,需要分析覆岩动态破坏规律及破断准则,研究连续介质与非连续介质的耦合关系,研究开采沉陷在岩、土体的传递与协同作用规律。

1.2.2 开采沉陷传递规律及机理

1.2.2.1 开采沉陷在岩体中的传递规律

采动影响在岩体中的传递规律研究大体可分两方面^[2-5]:一是采场周围(直接顶、基本顶即下部岩层)岩层的移动、破坏规律的研究;另一方面是基本顶至冲积层底部(即上部岩层)的移动变形研究。

针对下部岩层移动特征,提出了多种假说和理论:压力拱假说、悬臂梁假说、铰接岩块假说、砌体梁理论、传递岩梁假说等^[6,16]。以钱鸣高等^[7-16,84-85]提出的砌体梁理论最具有代表性,并对上覆岩层整体运动规律提出了横三区、竖三带的概念,见图 1-1。此外,邓喀中、王悦汉等^[35-38,86]将采动覆岩的破坏分为四个阶段三种介质属性,根据其动态发展过程,建立了采动岩体的动态力学模型,这是至今为止较为完善的有关采动覆岩移动变形规律的研究成果之一。

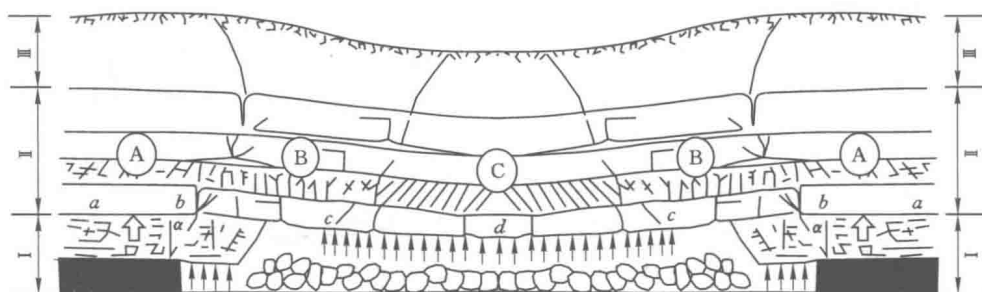


图 1-1 上覆岩层移动的横三区、竖三带

A——煤壁支撑影响区(a—b);B——离层区(b—c);C——重新压实区(c—d);a——支撑影响角

I——冒落带;II——裂缝带;III——弯曲下沉带

针对上部岩层移动变形分析,对开采沉陷领域主要是利用钻孔观测法对岩层内部移动变形进行观测,从而确定垮落带、断裂带的形态和高度,确定岩层内部的移动变形及离层^[1,33,45]。我国从 1958 年在唐家庄建立第一个岩层移动观测钻孔后,五十多年来,建立了大量的观测钻孔,获得的大量的岩层移动观测资料,在此基础上,提出了岩层的破坏特征、破坏形态及导水裂缝带发育高度的计算公式。近年来,钻孔伸长仪和钻孔测斜仪检测岩层内部移动变形取得很大的成果,比如中国矿业大学(1990 年)^[32,34]将该仪器应用于受开采影响

的淮河大堤内部的移动变形和煤矿井筒周围地层移动变形的观测,获得了满意的结果。钱鸣高、许家林等^[7-16]根据上覆岩层岩性的不同对岩层和地表移动变形所起的不同作用,提出了关键层理论。

此外,郝庆旺等^[24-26]分析了上覆岩层中坚硬岩层对地表下沉的控制作用,用弹性地基梁理论分别得出了下沉盆地的平衡型和非平衡型方程。崔希民等^[87]把覆岩看作是均质各向同性介质,利用广义 Newton 黏性应力公式,构建了岩层与地表沉陷的黏塑性模型,采用傅立叶变换对方程进行求解。张冬至^[40]采用物理模拟和数值力学模拟的方法,研究了覆岩的破坏规律和极不充分开采岩层及地表移动变形机理并建立了极不充分开采岩层移动的力学模型。李增琪^[29-31]认为岩层是横观各向同性的,把井下开采引起的地表移动变形看成是多层层状弹性力学平面问题(满足层间力学平衡条件和几何接触条件),用傅立叶变换及其反变换求出其解析解。何满潮等^[88-89]运用现代工程地质学和数学力学理论,提出了“黑箱”问题“灰箱”化的全息反分析法,获得了采动影响下岩体的本构关系及其参数,提高了采动岩体建模和求解的准确性。

随着科学技术的发展和研究方法的进步,数值模拟方法(有限元、边界元、离散元、有限差分等)在开采沉陷中得到了广泛的应用^[48-49,90-102],如谢和平^[103-105]的损伤非线性有限元法,何满潮^[88]的非线性非光滑有限元法等,推动了开采沉陷理论的研究。L. R. Alejaño^[106]利用 FLAC 软件对水平和缓倾斜煤层的开采沉陷的问题进行了模拟预测,得出数值方法能够较好地解决这类问题的结论。于广明等^[104]应用分形几何理论、突变理论、协同理论和混沌理论等非线性理论研究了开采沉陷的非线性机理和规律,得到一些有益的结论,初步形成了矿山开采沉陷的非线性理论体系。

1.2.2.2 开采沉陷在土体中的传递规律

矿山开采沉陷是井下开采工作面覆岩复杂的时空传递过程的综合体现。当基岩上方覆盖有第四系厚冲积层时,其开采沉陷规律更加复杂,且难以预测预报。厚冲积层矿区沉陷特征表现出明显的变化和异常^[1,45,50-54,107-114]:① 下沉系数明显增大或大于 1;② 上山移动角、边界角小于或接近于下山移动角、边界角;③ 水平移动范围大于下沉范围。针对厚冲积层沉陷的复杂性,吴侃等^[41-47]研究了开采沉陷在土体中的传递规律和传递范围、土体受直接开采引起的失水或排水固结的计算方法、沉陷土体出现流变的条件和计算方法、沉陷土体移动变形的控制方法等,获得了一个相对完备的地表沉陷预测预报模型(土体移动变形综合预测模型),即地表沉陷=开采沉陷(直接影响)+固结沉陷(附加影响)+流动沉陷(附加影响)。该研究成果可以初步地解释厚冲积层矿区地表沉陷的特殊规律,相对准确地预计地表开采沉陷。

吴侃等^[31-34,41-47]以地表移动变形预计为基础,通过对地表任意点应变的预计获得地表任意点的应变值,求出其应力状态,根据摩尔—库仑破坏准则判定土体裂缝的范围;利用相似材料模型和弹性理论求出了裂缝发育深度的理论公式。隋旺华等^[51-53]以离心模型试验为基础,利用土力学理论,并结合有限元从工程地质学角度分析了由于土体固结和次固结而引起的土体变形规律的特殊性,并通过实验、实测及理论分析研究了开采沉陷水土耦合作用机理,揭示了厚松散含水层开采沉陷特殊性的机理。李文平等^[49,115-116]以徐州和两淮矿区的深部土体的工程地质和水文地质性质为研究基础,首次从吸附结合水的含量和性质出发,研究了该区深部土体失水变形机理,得到了与现有一般认识不同的结论:该区内底部含水层失

水时,黏土层不产生压缩变形、而砂砾层产生压缩变形。桂和荣等^[48]研究了台阶状六方堤(淮南)堤体荷重的傅立叶级数展开式和堤基应力计算系数的计算原理,通过堤基应力计算和塑流判别,对六方堤多层土堤基塑流稳定性进行了评价。李永树等^[110,117-118]分析了厚冲积层下采煤地表裂缝产生的原因,分析了裂缝与水平变形之间的关系,结合弹塑性变形理论给出了地表裂缝宽度的具体计算公式。王金庄^[110,119-120]等将厚冲积层土体和基岩看成两种介质,运用弹塑性原理推导了基岩面的移动方程,选用双曲函数法计算厚冲积层的沉陷,根据叠加原理得到地表移动变形公式。刘义新等^[109,113]通过模拟实验,得出了厚冲积层矿区采动影响下岩土体沉陷规律,指出松散土体沉陷规律有其特殊性,并阐述了基岩面移动盆地和地表移动盆地的差异性。梁庆华等^[121]基于概率积分法,推导了黏土体失水引起的地表下沉计算公式,并应用于煤矿实际地表沉陷分析,结果表明黏土体失水对地表沉陷的影响比较大,不容忽视。

1.2.3 沉陷预测与控制

1.2.3.1 开采沉陷的预测方法

开采沉陷预测方法大体可概括为三类:基于实测资料的经验方法、影响函数法及理论模型法。

(1) 基于实测数据的经验方法

通过对开采引起地表沉陷实测数据的处理,建立预计公式函数模型(解析公式、曲线或积分格网)和预计开采沉陷参数的经验公式^[1-6,17-34]。比如我国、苏联和英国的典型函数——剖面函数法等。这类预计方法在实践中得到了广泛的应用^[122-147]。

(2) 影响函数法

影响函数法用分布函数描述微小单元开采面积对岩层和地表的影响(即影响函数),把整个开采对岩层和地表的影响看作采区内所有微小单元开采影响的总和。这种方法遵循以下几个假设:等效原理、线性原理和叠加原理。常用的分布函数有:巴尔斯的三角函数, Beyer 的级数形式,波兰克诺特的高斯曲线的分布函数法等。这些方法在预计时将影响函数做成积分格网来预测地表点的下沉值^[148-155]。

(3) 理论模型法

理论模型法是将岩层抽象为某个数学、力学模型。根据模型的变形计算地表移动。可分为连续介质模型和非连续介质模型。

1.2.3.2 开采沉陷的控制方法

为了减缓煤层开采引起地表沉陷,国内外常用的方法开采、技术措施如下:

① 采空区充填,即煤层开采后用水砂充填、风力充填、水力充填、矸石充填、膏体充填及固体密实充填等。充填方法在德国和波兰应用普遍。我国近几年发展较快,在我国的新汶矿、邢台矿、平顶山十二矿、济宁花园矿及峰峰小屯矿等地得到了初步的应用,并取得较好的效果。

② 部分开采法,主要有条带开采、房柱开采等。

③ 协调开采,按照开采沉陷理论协调优化设计工作面位置和开采顺序,使地表变形值不产生累加,甚至抵消一部分变形值。比如中国矿业大学在北宿矿村庄下实施的双对拉工作面开采,取得较好的效果^[46]。

④ 覆岩离层注浆法,是 20 世纪 80 年代发展起来的一种技术,与充填法相比,不受井下

作业限制。在我国最先由范学理^[156]在抚顺老虎台矿试验并取得了一定成效。目前,已先后在抚顺、大屯、新汶及兖州等矿区开展了工业性试验,取得一定的减沉效果。

1.2.4 沉陷监测新技术

传统的观测方法是通过水准仪测高程、钢尺量边、经纬仪测角等获得地表观测站点的下沉和水平移动。后来测距仪代替钢尺测量水平移动等。现在的全站仪代替了传统的观测方法,可以实现平面测量和高程测量的一体化。但是仍然是效率低、劳动强度大。随着科技的发展,各种测量新技术也不断被引入矿山开采沉陷观测中,概括起来主要有以下几种:① 合成孔径雷达干涉测量^[157-159]。合成孔径雷达干涉测量(SAR interferometry)是利用合成孔径雷达的相位信息提取地表的三维信息和高程变化的一项技术。合成孔径雷达干涉及其差分技术(D-InSAR)在变形监测中有广阔的应用前景,具有不可替代的优势。② GPS 一机多天线技术。GPS 一机多天线技术是指一台 GPS 接收机连接多根天线,使每个监测点上只安装 GPS 天线,不安装接收机,多个监测点共用一台接收机。GPS 多天线系统测量结果完全与常规 GPS 测量结果的精度相当,甚至 GPS 多天线系统还可以提供比常规 GPS 测量更高的精度^[2,133]。③ 地面三维激光扫描技术^[160-162]。激光扫描测量是通过激光扫描仪和距离传感器来获取被测目标的表面形态数据,采集的数据经过相应的后处理软件进行一系列的数据处理获取目标表面三维坐标数据,从而进行各种量算或建立立体模型。就目前而言,虽然合成孔径雷达干涉测量应用在矿区沉陷变形监测上面具有很大的发展潜力,但该技术受大气、地形、植被覆盖及季节性影响显著,且在小于卫星重访周期内,对矿区出现剧烈的地表沉陷这种大变形监测受限,该技术尚处在探索阶段,离大规模的应用还有一定的距离。而 GPS 技术虽然成熟,但是就矿区大面积的沉陷区域和较多的监测点而言,鉴于 GPS 测量效率依旧较低,并且仍然是传统的线状观测模式。三维激光扫描仪在开采沉陷中的应用是近几年发展起来的,其应用前景将随着扫描仪精度、速度以及信息量的发展而日益广阔。

岩体内部观测主要是在井下巷道中布设测点进行观测。后来钻孔测斜仪和伸长仪可以在地表打钻孔进行岩体内部的观测。目前岩体内部观测除了这些方法之外,一些传感器被引入井下测量。今后,传感器与计算机融合观测岩体内部的变形是发展方向。

1.2.5 问题及发展趋势

综合分析,开采沉陷在岩体、土体中的传递受到多种因素的影响,是非常复杂的时空过程。虽然国内研究在一些领域取得了国际领先的成果,但仍有如下需进一步研究的问题:

- ① 特殊条件下(地质条件特殊、采矿条件特殊),开采沉陷基本规律及预计方法;
- ② 岩体内部的动态移动变形规律及预测理论;
- ③ 岩体与土体(巨厚冲积层)的协同作用及对开采沉陷的影响;
- ④ 多煤层重复采动的岩土体的响应机理;
- ⑤ 开采影响下的岩、土体与水体的耦合作用;
- ⑥ 开采沉陷影响下,地表水与地下水之间的水力联系机理。

这些方面成为今后开采沉陷研究的方向,并且在实测数据方面,地面观测已经有摄影测量与遥感等新的观测手段引入;在岩体内部的观测方面也需要引入新技术,比如新的传感器等,做到计算机实时观测岩体内部的动态变形规律等。

1.3 厚冲积层矿区开采沉陷研究回顾

近年来,我国部分具有厚冲积层地层的矿区,如永夏、淮北、淮南、开滦等矿区,在其地面沉陷观测中发现,这些矿区地表沉陷出现不同于常规的现象^[22,32-33,163],这些不同于常规的情况得到了专家学者的重视和有关各方的关注。传统的常规沉陷理论而言,还不能对厚冲积层出现特殊现象的原因给出较为全面的解释。厚冲积层矿区煤层开采地表移动变形的特殊性向科技工作者提出了新的研究挑战,人们不得不去考虑和重新认识厚冲积层下开采的沉陷机理及预测方法。地下采煤引起岩层及地表移动是极其复杂的岩体力学问题。百余年来,人们根据实测资料采用多种研究手段,经过不懈努力,对一般条件下采煤引起的岩层及地表移动规律有了比较深刻的认识。但对于特殊地质采矿条件下采煤引起岩层及地表移动就是其中之一,尤其是巨厚冲积层下采煤引起的地表移动研究较少。

我国对于厚冲积层下采煤沉陷机理的探讨及研究始于20世纪80年代。当时华东地区地表移动变形发展范围异常的现象早已引起我国许多专家的关注。中国矿业大学1989年完成的“华东地区巨厚含水冲积层对地表移动规律的影响及其机理分析”项目对实测资料进行了较为详细的分析,用弹塑性有限元进行了模拟研究,提出了可用于该条件的开采沉陷预计方法——空隙扩散模型^[24-26,83]。研究认为在该条件下地表移动具有如下特殊性:①下沉系数大于1;②煤柱上方垂直变形异常;③上山移动角、边界角小于或接近于下山移动角、边界角;④最大下沉角接近或大于 90° ;⑤水平移动范围大于下沉范围。引起这样一些特殊性的最主要原因就是开采沉陷引起含水层失水。事实上,在我国许多矿区,这些区域的地下水位没有明显的变化,但实测显示该区域的地表仍存在移动盆地明显扩大,移动持续时间相当长的现象。例如,淮南矿区谢二煤矿,对工业广场煤柱内建筑物的长期监测表明,工业广场的地表和建筑物长期处于移动状态,在1995年前的20年间,办公楼移动了4.6 m,且这种移动仍在继续。兖州、徐州、大屯、淮北等矿区工业广场煤柱内的井筒破坏,除了与地下水的变化有一定关系外,也与开采沉陷在土体中的传递范围扩大有密切的关系。

此外,学者们认为产生特殊现象的主要影响因素一为煤层上覆岩层薄,综合岩性偏软;二是由采煤引起孔隙水压力降低,有效应力增加造成含水层和隔水层的压缩。即认为厚冲积层矿区采煤引起的沉陷主要由采矿引起的沉陷和土体的附加沉降(土体固结压缩及水位降引起的沉降)组成。如:吴侃,靳建明等^[32-34,41-47]采用实测方法和物理模拟方法初步研究了厚冲积层矿区开采沉陷在土体中的传递规律。马立强^[164],高明忠^[165],许延春^[166]等通过数值模拟的方法研究了厚冲积层矿区沉陷规律的特殊性,得到一些有益的结论。

李永树等^[167]对厚冲积层条件下开采沉陷盆地的形态进行了分析。认为采空区上方岩层和煤层上方岩层的移动机理不同,煤壁上方下沉是由自重引起的,而采空区上方下沉量是煤层顶板下沉量减去上覆岩层的离层量和碎胀值。许延春等^[168]对兴隆庄矿工业广场内深厚冲积层水平移动进行了研究,观测到水平移动集中的位置在深部深厚黏土与承压含水砂土的交界面附近,证明了地层弯曲是水平移动集中的主要原因。谭志祥等^[169]利用离散元方法研究了深部开采厚冲积层条件下的地面移动变形情况,总结了基岩厚度和开采宽度与最大下沉和水平移动的数学关系。杜锋等^[170]研究了厚冲积层薄基岩综放开采条件下覆岩石破断机理,认为超薄基岩在风化作用下,力学性质大幅度降低,应力拱发育高度决定采动

裂隙的发育高度,解释了该条件下采动裂隙发育不充分的现象。于广云^[53,171]分析了采煤扰动大变形扰动土物理力学性质的演变及工程响应,提出了采动扰动率的概念,研究了采动后土体垂直移动变形曲线与采矿条件的相互关系。李培现^[172]提出的双重介质传递模型,冲积层内采用三维概率积分传递模型,基岩采用基于弹性薄板的下沉计算模型。刘义新^[113]采用FLAC3D分别就不同的冲积层厚度和基岩厚度对地表移动规律的影响进行研究,揭示了冲积层在地表沉陷中起到的作用及冲积层和基岩的耦合关系。以上这些研究并没有对冲积层的响应变化做深入研究,只是定性地将土体看成随机介质。中国矿业大学狄乾生教授于1986年曾提出厚含水层下开采土体产生固结的设想。郝庆旺^[24-26](1988)提出了采动岩体扩散模型,将含水层失水压缩孔隙度的减小视为一种空源,并将其叠加在采空区单元和采空区上方破坏区的四边形空源上,这一理论丰富了随机介质理论。

国外在这方面的研究报道很少见,文献检索表明^[62,55-56,173-178],国外对厚冲积层下采煤地表移动和深厚土体的工程性质研究并不多见,主要涉及冲积层下洞室开挖、抽水等引起地表沉降、土层地基沉陷、石油开采沉降等问题。A. K. Soni等^[173]对浅部采空区的地表沉陷问题进行研究;S. S. Peng等^[62]对房柱式开采的地表沉陷规律进行了深入研究。目前关于国外冲积层条件下开采情况,只收集到了苏联顿巴斯和西顿巴斯矿区的相关资料,其地表预测下沉系数为0.85,水平移动系数为0.4,最大下沉角为 90° ,剧烈期占总移动期的70%,剧烈期最大下沉值占最大下沉值的97%^[179]。波兰学者曾详细研究过疏排含水层引起的地面沉陷问题,他们将含水层分为两类,第一类为松散含水层,第二类为基岩含水层。第一类含水层被疏干时产生地表变形,第二类不会。德国学者研究了下莱茵地区露天开采时设法降低地下水位造成地表移动的规律,实测资料表明,就大空间分布而言,地下水影响与地表下沉彼此是相应的,第四系冲积层中,地下水下降1 m,会导致地表下沉约2~3 mm^[23]。

综上所述,将矿区出现的许多异常现象单纯归结为含水层失水这样一个因素是片面的。如要全面解释厚冲积层矿区开采特殊性,必须对开采沉陷在土体中的传递机理进行深入的研究。本书的研究利用淮南矿区便利的研究条件,根据提出的新的研究思路,采用相似材料模拟、理论分析和实测数据相结合的研究手段,从深层次研究厚冲积层矿区的地表沉陷机理,为全面解释厚冲积层矿区的沉陷的特殊性提供依据。通过本书的研究,可以完善开采沉陷学等相关理论,为开采沉陷损害与控制提供技术支持;为煤炭资源的安全开采、地面建(构)筑物的安全使用提供保障,从而减轻煤矿开采对生态环境的破坏。因此本书的研究具有非常重要的理论及现实意义。

1.4 本书的主要内容和逻辑结构

本书的主要内容包括以下几个方面:

第1章详细分析了开采沉陷研究现状。

第2章分析了普通矿区覆岩内部移动和破坏规律。

第3章分析开采沉陷的一般规律和厚冲积层矿区的特殊性规律。

第4章系统研究了厚冲积层矿区开采沉陷特殊性的内部机理。

第5章分析了厚冲积层多煤层重复采动地表下沉系数的变化规律。

第6、7、8章主要为厚冲积层矿区开采沉陷预计理论相关内容。