

“十二五”国家重点图书出版规划项目

固体密实充填采煤 方法与实践

Consolidated Solid Backfill Mining
Method and Its Applications

张吉雄 缪协兴 郭广礼 著



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

固体密实充填采煤方法与实践

**Consolidated Solid Backfill Mining Method and
Its Applications**

张吉雄 缪协兴 郭广礼 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书紧密结合近年来综合机械化固体充填采煤技术的发展,系统总结综合机械化固体密实充填采煤理论、技术与实践方面的研究成果。内容包括:综合机械化固体充填采煤技术、固体充填材料物理力学特性测试、固体密实充填采煤方法、固体充填采煤岩层移动与地表沉陷控制理论、固体充填材料井上下输送系统设计、固体充填采煤关键装备选型与配套、固体充填采煤沉陷控制工程设计方法、建(构)筑物下固体密实充填采煤,以及其他条件下固体密实充填采煤。

本书可供从事采矿工程、地质工程、矿山测量、环境工程、矿山安全以及岩石力学与工程等专业的工程技术人员、科技工作者、研究生和本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

固体密实充填采煤方法与实践 / Consolidated Solid Backfill Mining Method and Its Applications / 张吉雄, 缪协兴, 郭广礼著. —北京: 科学出版社, 2015. 1

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-045269-8

I. ①固… II. ①张…②缪…③郭… III. ①充填法-采煤方法 IV. ①TD823.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 024435 号

责任编辑: 李 雪 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 25 1/4

字数: 598 000

定价: 268.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

在我国能源结构中,煤炭始终是支撑经济发展的主体能源,在一次能源的生产和消费结构中一直占 70%左右,在未来相当长时期内,煤炭作为主体能源的地位不会改变。我国煤矿开采技术由简单手工开挖到采用辅助机械,再到现代机械化和自动化,不断创新与变革,但在占全国煤矿开采 95%的井工开采中,一直沿用全部垮落法管理顶板,在为经济社会发展供应能源的同时,带来的安全、煤炭资源损失和生态环境问题越来越严重,随着我国煤矿向深部、高强度发展,这些问题越发突出。因煤矿开采造成的煤矸石压占土地、地下水流失、土地塌陷及因搬迁补偿不到位引发的工农矛盾等种种问题,直接影响和制约着矿区生态和社会的和谐发展。煤炭工业发展“十二五”规划明确指出,煤炭工业虽然取得了长足进步,但发展过程中不协调、不平衡、不可持续问题依然突出,包括资源支撑难以为继、生产与消费布局矛盾加剧、整体生产力水平较低、安全生产形势严峻、煤炭开发利用对生态环境影响大等。长期以来,煤炭行业积极探索煤炭开发与矿区环境和谐发展,做了大量研究与实践工作,充填采煤以充填体作为控制岩层移动及地表沉陷的方式,成为煤矿解决资源开发与环境协调发展的重要手段,是煤矿生产方式的重大变革,对我国煤矿开采具有十分重要的意义。

充填采煤在国际上已有百年以上的发展历史,最早有计划地进行矿山充填的是 1915 年澳大利亚的塔斯马尼亚芒特莱尔矿和北莱尔矿应用废石充填矿房。近 60 年来,充填采煤技术在国内贵重金属和非金属矿山的研究和应用中取得了长足的发展,先后经历了废弃物干式充填阶段、水砂充填阶段、细砂胶结充填阶段和以高浓度充填、膏体充填、块石砂浆胶结充填、全尾矿胶结充填等为代表的现代充填采矿阶段,取得了显著的经济和社会效益。

为满足安全高效开采煤炭的需要,必须发展现代化充填采煤技术,该技术应满足三点要求:①高效、高回收率采出煤炭;②严格控制岩层运动与地表沉陷;③先进机械化装备与安全保障。

近年来,为解决我国大规模煤炭开发中十分突出的资源和环境问题,走出我国独具特色的安全、绿色和高效的科学采矿之路,中国矿业大学缪协兴教授带领的研发团队,开发出了具有完全自主知识产权的综合机械化固体充填采煤技术,使长期以来的充填采煤技术攻关取得了关键性的重大突破,解决了一直困扰煤矿充填采煤发展的充填空间、输送通道和充填动力三大技术难题,实现煤矿开采安全高效、高采出率,并在大型城市建筑群下、铁路和公路下,以及大型水体下和松散含水层下等 20 余个矿区进行了规模化的工业性推广应用,取得了显著的经济、社会和环境效益。

全书以综合机械化固体充填采煤技术原理与发展状况为基础,系统阐述综合机械化固体充填采煤的基础理论与技术方法,增加了煤矿采选充采一体化固体充填采煤技术新内容,并结合作者所做的科研工作及典型试验矿井的基本条件,详细分析综合机械化固体

充填采煤技术在现场的应用,总结出较为完整的实践经验。全书共分为四篇十章,四篇分别为引言、基础理论、工程设计方法和工程实践,十章分别论述煤矿开采岩层控制理论与方法、综合机械化固体充填采煤技术、固体充填材料物理力学特性测试、固体密实充填采煤方法、固体充填采煤岩层移动与地表沉陷控制理论、固体充填材料井上下输送系统设计、固体充填采煤关键设备选型与配套、固体充填采煤工程设计方法、建(构)筑物下固体密实充填采煤和其他条件下固体密实充填采煤。

本书是由采矿、安全、矿山测量、矿山机械和岩石力学等专业人员组成的交叉学科团队,围绕“现代化充填采煤方法与技术”研究主题,在长期合作研究基础上的成果总结,本研究得到了众多现代化煤矿企业的支持与帮助。本书由张吉雄教授、缪协兴教授和郭广礼教授合著,具体写作分工情况为:第1、第2、第4章由张吉雄完成,第3、第5、第6、第7、第9章由张吉雄和缪协兴合作完成,第8、第10章由张吉雄和郭广礼合作完成。此外,巨峰副教授、黄艳利副教授、李剑讲师、周楠讲师,张强、邓雪杰、姜海强、李猛、孙强、毛仲敏、高端等研究生也参与了部分章节的写作工作。

本项研究的应用实践基地涉及多个现代化矿区和煤机制造企业,包括:新汶、冀中、淮北、皖北、平顶山、开滦、兖州、济宁、霍州、西山、阳泉、泰源、神东等矿区,以及卡特彼勒(郑州)有限公司等煤机制造企业。在此,对所有合作企业的大力支持表示衷心的感谢!

本书是在国家自然科学基金创新研究群体项目“充填采煤的基础理论与应用研究”(项目编号:51421003)、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究”(项目编号:2013CB227900)资助下完成的。同时,还感谢以下基金项目的资助:国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助项目“西部浅埋煤层薄基岩采动破断规律与灾变控制研究”(项目编号:U1261201)、国家科技支撑计划项目“大型煤炭基地高效勘探开发与充填技术及示范:煤矿采选充采一体化关键技术开发与示范”(项目编号:2012BAB13B00)、国家自然科学基金仪器专项“煤矿巷道锚杆动力无损检测方法 with 测试系统研究”(项目编号:51227003)、高等学校学科创新引智计划(111计划)项目“煤炭资源与环境科学技术”(项目编号:B07028)、江苏省高校青蓝工程科技创新团队项目“固体充填采煤与岩层控制”和国家自然科学基金青年基金项目“固体充填采煤物料垂直输送的动力特性研究”(项目编号:51304206)。

作 者

2014年9月

目 录

前言

第一篇 引 言

第 1 章 绪论	3
1.1 煤矿开采岩层控制理论与方法	3
1.2 煤矿开采地表沉陷控制理论与方法	5
1.2.1 煤矿开采沉陷国内外研究现状	5
1.2.2 煤矿开采地表移动的基本规律	7
1.2.3 开采沉陷对建(构)筑物的影响	8
1.2.4 煤矿开采地表沉陷控制的主要技术途径	9
1.3 充填采煤方法与技术	11
第 2 章 综合机械化固体充填采煤技术	17
2.1 综合机械化充填采煤技术发展历程	17
2.2 普采(或炮采)机械化抛矸充填采煤技术	19
2.2.1 机械化抛矸充填采煤系统布置	19
2.2.2 机械化抛矸充填采煤关键设备	21
2.2.3 机械化抛矸采煤与充填工艺	22
2.3 综合机械化采空区储矸充填采煤技术	23
2.3.1 采空区储矸充填采煤系统布置	23
2.3.2 采空区储矸充填采煤关键设备	24
2.3.3 采空区储矸充填与采煤工艺	25
2.4 综合机械化固体密实充填采煤技术	26
2.4.1 固体密实充填采煤系统布置	26
2.4.2 固体密实充填采煤关键设备	30
2.4.3 固体密实采煤与充填工艺	32
2.5 采选充采一体化固体充填采煤技术	35
2.5.1 采选充采一体化技术原理	36
2.5.2 井下煤流矸石洗选系统	36
2.5.3 采选充采关键设备	36
2.5.4 采选充采工艺	38

第二篇 基础理论

第3章 固体充填材料物理力学特性测试	41
3.1 固体充填材料来源与基本特性	41
3.1.1 固体充填材料来源	41
3.1.2 固体充填材料基本特性	42
3.2 固体充填材料的基本物理力学特性	43
3.2.1 固体充填材料的矿物成分	43
3.2.2 固体充填材料的细观结构特征	45
3.2.3 固体充填材料的力学特性	52
3.3 固体充填材料的碎胀与压实特性	53
3.3.1 固体充填材料的碎胀特性	53
3.3.2 固体充填材料的应变与应力关系	53
3.3.3 固体充填材料的压实度与应力关系	57
3.4 固体充填材料的时间相关特性	59
3.4.1 固体充填材料时间相关特性测试方法	59
3.4.2 固体充填材料时间相关特性试验结果	60
3.4.3 固体充填材料时间相关特性试验对比	65
第4章 固体密实充填采煤方法	69
4.1 固体密实充填采煤的原理与方法	69
4.1.1 固体充填采煤技术难点分析	69
4.1.2 固体充填采煤的技术原理	70
4.1.3 固体充填采煤技术关键	72
4.2 固体密实充填主动支护系统	72
4.2.1 固体充填采煤矿压控制原则	72
4.2.2 固体充填采煤采场支护系统	73
4.2.3 充填采煤液压支架支护阻力	74
4.3 固体密实充填全断面压实系统	82
4.3.1 固体充填采煤密实度控制方法	82
4.3.2 固体充填采煤全断面压实结构	83
4.3.3 固体充填采煤压实结构工作状态	84
4.4 固体密实充填密实度实时监控系统	86
4.4.1 固体充填采煤密实度监控内容与方法	86
4.4.2 固体充填采煤密实度监控装备	87
4.4.3 固体充填采煤密实度监控数据分析方法	87
第5章 固体充填采煤岩层移动与地表沉陷控制理论	92
5.1 固体充填采煤岩层移动分析的等价采高理论	92
5.1.1 固体充填采煤等价采高模型的建立	92

5.1.2	固体充填采煤等价采高关键参数的确定	93
5.1.3	固体充填采煤等价采高影响因素分析	94
5.2	固体充填采煤的采场矿压与地表沉陷规律	96
5.2.1	固体充填采煤采场矿压显现规律	96
5.2.2	固体充填采煤地表沉陷规律	105
5.3	固体充填采煤岩层移动物理模拟	107
5.3.1	相似材料模型的建立	107
5.3.2	固体充填体相似模拟试验	108
5.3.3	固体充填采煤覆岩移动规律分析	112
5.4	固体充填采煤岩层移动数值分析	116
5.4.1	固体充填数值分析模型的建立	116
5.4.2	固体充填材料与岩层移动关系分析	119
5.4.3	固体充填采煤岩层移动特征分析	131
5.5	固体充填采煤地表沉陷控制的设计方法	136
5.5.1	固体充填采煤地表沉陷控制目标	136
5.5.2	固体充填采煤地表沉陷设计流程	139
5.5.3	固体充填采煤地表沉陷预计参数选择	143

第三篇 工程设计方法

第 6 章	固体充填材料井上下输送系统设计	149
6.1	固体充填材料井上运输方式与系统	149
6.1.1	固体充填材料井上输送方式选择	149
6.1.2	固体充填材料井上输送设备选型	149
6.1.3	固体充填材料井上输送系统设计	150
6.2	固体充填材料垂直输送系统	153
6.2.1	固体充填材料垂直输送基本结构	153
6.2.2	垂直输送系统投料管材质与结构	154
6.2.3	固体充填材料垂直输送缓冲装置设计	156
6.3	固体充填材料垂直输送监控系统	161
6.3.1	固体充填材料垂直输送监控指标	161
6.3.2	固体充填材料垂直输送监控设备	161
6.3.3	固体充填材料垂直输送监控系统布置	163
6.4	固体充填材料井上下输送系统设计方法	163
6.4.1	固体充填材料输送条件分析	163
6.4.2	固体充填材料输送系统结构与施工设计	165
第 7 章	固体充填采煤关键装备选型与配套	169
7.1	固体充填采煤设备的配套与选型	169
7.1.1	固体充填采煤设备的选型原则	169

7.1.2	固体充填采煤设备的性能要求	169
7.2	充填采煤液压支架与压实机构	171
7.2.1	充填采煤液压支架架型确定	171
7.2.2	充填采煤液压支架参数设计	171
7.2.3	充填采煤液压支架结构设计	174
7.2.4	固体充填采煤压实机构结构优化设计	177
7.3	多孔底卸式输送机	178
7.3.1	多孔底卸式输送机结构原理	178
7.3.2	多孔底卸式输送机卸料孔结构与尺寸优化	179
7.3.3	多孔底卸式输送机形式与参数	180
7.3.4	机头机尾升降平台	182
7.4	固体充填材料转载输送机	183
7.4.1	固体充填材料转载输送机结构原理	183
7.4.2	固体充填材料转载输送机形式与参数	185
7.5	固体充填采煤装备配套设计方法	186
7.5.1	固体充填采煤“四机”能力配套	186
7.5.2	固体充填采煤“四机”结构配套	187
7.5.3	固体充填采煤“四机”配套流程	188
第8章	固体充填采煤工程设计方法	189
8.1	建(构)筑物下固体密实充填采煤工程设计方法	189
8.1.1	建(构)筑物采动损害等级与设防标准	189
8.1.2	建(构)筑物下固体密实充填采煤设计方法及流程	191
8.2	铁路下充填采煤工程设计方法	193
8.2.1	铁路下采煤地表变形控制与维修治理对策	193
8.2.2	铁路下固体密实充填采煤设计流程	195
8.3	含水层下固体密实充填采煤工程设计方法	196
8.3.1	固体密实充填采煤导水裂隙带高度分析	196
8.3.2	水体下固体密实充填采煤设计方法及流程	197
	第四篇 工程实践	
第9章	建(构)筑物下固体密实充填采煤	205
9.1	平煤十二矿固体充填采煤	205
9.1.1	矿井概况与地质采矿条件	205
9.1.2	建(构)筑物设防指标确定	206
9.1.3	固体充填采煤系统与装备	206
9.1.4	固体充填采煤地表沉陷分析	214
9.2	淮北杨庄矿固体充填采煤	227

9.2.1 矿井概况与地质采矿条件	227
9.2.2 建(构)筑物设防指标确定	228
9.2.3 固体充填采煤系统与装备	229
9.2.4 固体充填采煤地表沉陷分析	230
9.3 阳泉东坪矿固体充填采煤	237
9.3.1 矿井概况与采矿地质条件	237
9.3.2 建(构)筑物设防指标的确定	238
9.3.3 固体充填采煤系统与装备	239
9.3.4 固体充填采煤地表沉陷分析	242
9.4 济宁花园煤矿固体充填采煤	246
9.4.1 矿井概况与地质采矿条件	246
9.4.2 建(构)筑物设防指标确定	248
9.4.3 固体充填采煤系统与装备	249
9.4.4 固体充填采煤地表沉陷分析	262
9.5 开滦唐山矿固体充填采煤	275
9.5.1 矿井概况与地质采矿条件	275
9.5.2 建(构)筑物设防指标确定	276
9.5.3 煤流矸石井下分选系统布置	276
9.5.4 固体充填采煤系统与装备	282
9.5.5 固体充填采煤地表沉陷分析	291
第 10 章 其他条件下固体密实充填采煤	302
10.1 五沟矿含水层下固体充填采煤	302
10.1.1 矿井概况与地质采矿条件	302
10.1.2 固体充填采煤充实率指标设计	309
10.1.3 固体充填采煤系统与装备	314
10.1.4 固体充填采煤导水裂隙分析	319
10.2 兖州济三矿大型堤坝下固体充填采煤	326
10.2.1 矿井概况与地质采矿条件	326
10.2.2 大型堤坝设防指标确定	328
10.2.3 固体充填采煤系统与装备	329
10.2.4 固体充填采煤地表沉陷分析	334
10.3 内蒙古泰源矿铁路下固体充填采煤	344
10.3.1 矿井概况与地质采矿条件	344
10.3.2 铁路设防指标确定	345
10.3.3 固体充填采煤系统与装备	348
10.3.4 固体充填采煤地表沉陷分析	358
10.4 阳泉新元公司高速公路下固体充填采煤	369

10.4.1	矿井概况与地质采矿条件	369
10.4.2	高速公路设防指标确定	370
10.4.3	固体充填采煤系统与装备	372
10.4.4	固体充填采煤地表沉陷分析	379
参考文献		386

第一篇

引言

第 1 章 绪 论

1.1 煤矿开采岩层控制理论与方法

煤是古代植物遗体在经历了泥炭化和煤化作用两个复杂的生物化学、物理化学及地球化学变化转变而来的固体可燃矿产。含煤岩系简称煤系,是指含有煤层,并有成因联系的沉积岩系,它是在一定的古构造、古地理、古气候条件下形成的一套具有共生关系、多相组合的沉积物。煤层开挖过程中形成煤矿特有的采空区,从而引起整个地层应力重新分布,导致岩层移动变形,正因为这种层状分布特征,形成了煤矿开采中普遍存在的岩层运动规律。

地下煤体在开挖之前,原岩应力处于平衡状态。在煤炭的开采过程中,采空区上覆岩层自下而上发生移动、破坏,最终发展至地表并导致地表沉陷,这种现象称为岩层移动或开采沉陷。前人大量的研究成果表明,用传统的全部垮落法管理顶板时,采空区上覆岩层直至地表的整体移动破坏特征可分为“横三区”、“竖三带”,即沿工作面推进方向上覆岩层分别经历煤壁支撑影响区、离层区和重新压实区,由下向上岩层移动分为垮落带(冒落带)、裂缝带(断裂带)和整体弯曲下沉带,如图 1-1 所示。

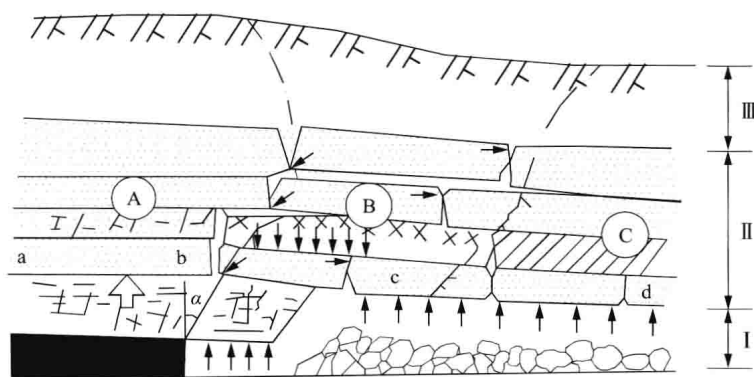


图 1-1 上覆岩层移动的“横三区”与“竖三带”

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

α -支撑影响角;I-垮落带;II-裂缝带;III-整体弯曲下沉带

图 1-1 所示覆岩“三带”特征如下:

(1) 煤层开采完后顶板发生破坏并向采空区垮落的岩层范围称为垮落带。垮落带一般是由直接顶垮落后形成的,其高度一般为 2~3 倍采高,根据垮落带岩块的移动破坏特征及堆积分布的形态可分为不规则垮落带和规则垮落带。在不规则垮落带中破断后的岩块失去了原有层位,呈杂乱堆积状况,排列也极不整齐;而规则垮落带内岩块堆积较为整

齐。垮落带内岩块的松散系数较大,一般可达 1.3~1.5,但经重新压实后,碎胀系数可降到 1.05~1.10。

(2) 垮落带上方岩层产生裂缝或断裂,破断岩块间存在水平力的传递作用并保持其原有层状的岩层范围称为裂缝带(断裂带)。垮落带与裂缝带合称“两带”,又称为“导水裂隙带”,意指上覆岩层含水层位于“两带”范围内,将会导致岩体水通过岩体破断裂缝流入采空区和回采工作面。

以上阐述的这种岩层运动一般规律,都是由于煤层开采后形成的采空区引起岩体向采空区内移动的结果,在整个岩层移动破坏过程中,造成了煤矿采动损害及相关的安全问题,主要包括形成矿山压力、形成采动裂隙和引发地表沉陷等。矿山压力是由于矿山开采活动的影响,在巷硐周围岩体中形成的和作用在巷硐支护物上的力,而在这种力的作用下引起如岩体变形、破坏、塌落及支护物变形、破坏、折损等动力现象称为矿山压力显现,它将引起采场和巷道顶板的下沉、垮落和来压,甚至引发冲击地压等灾害,已占据我国煤矿安全事故的首位,特别是随着开采深度不断增大,煤矿冲击地压问题也日益严重。煤矿开采岩层运动还将形成采动裂隙,引起周围煤体中的水与瓦斯的流动,导致井下瓦斯事故与突水事故,瓦斯爆炸、煤与瓦斯突出一直是我国煤矿所面临的重大灾害,瓦斯造成的死亡人数达到了煤矿事故总死亡人数的 40%左右,同时,因煤炭开采而排放至大气中的瓦斯还加剧了温室效应,造成了严重的环境破坏,其中,因岩层移动导致的煤岩体应力场与裂隙场的变化是引起瓦斯卸压和煤层渗透率增大的原因所在。煤矿开采岩层移动由下往上发展至地表将引起地表沉陷,导致农田、建筑物设施的毁坏,岩层移动还会破坏地下水系,当地面潜水位较高时,地表沉陷盆地内大量积水,影响农田耕种,引发一系列环境、经济和社会问题。

显然,煤矿开采采场围岩活动和地表沉陷等一系列灾害均是煤炭采出后岩层移动过程中岩体损伤和破坏变化的结果,因此,掌握整个采动岩体的活动规律,特别是岩体内部岩层的活动规律,有效控制岩层移动才是解决采动岩体灾害的关键。近百年来,国内外学者对煤矿开采岩层控制方面进行了大量的理论研究和现场实践,取得了丰富的研究成果,建立了完善的岩层控制理论体系与方法。

我国钱鸣高院士通过大量的研究,先后提出了采场上覆岩层活动规律中基本顶岩层破断的“砌体梁”结构力学模型,建立了“砌体梁”结构的“S-R”稳定条件,揭示了基本顶岩层“板”的“O-X”型破断规律;以基本顶岩层“砌体梁”模型为基础,在考虑直接顶变形条件下,结合“支架-围岩”相互作用刚度系统,建立了采场整体力学模型;提出了采场“支架-围岩”关系和支护质量监测原理,形成了一整套监控指标及其控制方法。20 世纪 90 年代中期,随着对岩层控制科学研究的不断深入,为了解决采动对环境的影响,相关研究涉及岩层控制中更为广泛的问题,主要是开采引起岩体裂隙场的改变和更准确地描述开采对地表沉陷的影响。钱鸣高院士领导的研究团队进一步提出了岩层控制的关键层理论,旨在研究覆岩中厚硬岩层对层状矿体开采过程中的矿山压力和采动对环境的影响。关键层理论以关键层作为岩层运动研究的主体,用力学方法求解采动后岩体内部的应力场和裂隙场改变,由此对采场矿压、开采沉陷、采动岩体中水和瓦斯运移有统一的认识和完整的力学描述。

由于成岩时间及矿物成分不同,煤系地层形成了厚度不等、强度不同的多层岩层。实践表明,其中一层至数层厚硬岩层在岩层移动中起主要的控制作用。将对采场上覆岩层活动全部或局部起控制作用的岩层称为关键层。覆岩中的关键层一般为厚度较大的硬岩层,但覆岩中的厚硬岩层不一定是关键层。关键层判别的主要依据是其变形和破断特征,即在关键层破断时,其上部全部岩层或局部岩层的下沉变形是相互协调一致的,前者称为岩层活动的主关键层,后者称为亚关键层。也就是说,关键层的断裂将导致全部或部分的上覆岩层产生整体运动。覆岩中的亚关键层可能不止一层,而主关键层只有一层。我国学者对关键层理论开展了全面深入的研究,内容主要包括:①关键层破断的复合效应及其判别;②关键层载荷特征与影响因素;③关键层运动对采场矿压显现、覆岩移动与地表沉陷及裂隙场动态分布的影响规律;④关键层理论在采场围岩控制、卸压瓦斯抽放、开采沉陷控制与突水防治等方面的工程应用。

基于关键层理论等煤矿开采岩层控制理论,发展了一些煤矿开采岩层控制的技术方法,主要包括条带开采、局部充填采煤和采空区全部充填采煤技术,条带开采是煤矿常用的最典型的岩层移动控制方法,它将开采的煤层划分成若干条带,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,从而起到有效控制岩层移动的目的,但这种技术方法在煤矿开采中的采出率较低。注浆充填是典型的采空区局部充填采煤技术,根据岩层控制的关键层理论,提出了冒落区注浆充填和离层带注浆充填两种岩层控制技术,先后在新汶华丰煤矿、兖州东滩煤矿、开滦唐山煤矿等矿区进行了采空区离层注浆减沉工业性试验,从现场实际工程实践结果来看,在某些采矿地质条件下,离层注浆充填技术在减小地面沉降量、控制地表下沉速度等方面取得了一定的成效,之后还提出了采空区膏体条带充填、覆岩离层分区隔离注浆充填、条带开采冒落区注浆充填三种技术,主张在关键层理论的基础上,结合采动岩层移动规律对采空区离层区域、冒落区域进行部分充填,靠充填体与部分煤柱共同支撑覆岩,控制关键层的移动,从而达到控制开采沉陷的目的。与局部充填采煤技术相比,采空区全部充填采煤技术将井下生产过程中产生的矸石、尾矿或地面的矸石、粉煤灰、风积沙等固体废弃物充填采空区,实现井下所有采空区的充填,先后经历了废弃物干式充填阶段、水砂充填阶段、细砂胶结充填阶段和以高浓度充填、全尾矿胶结充填、膏体充填、高水材料充填、固体废弃物直接充填等为代表的现代充填采矿阶段,对煤矿开采岩层移动起到较好的控制作用,取得了显著的经济效益和社会效益。

1.2 煤矿开采地表沉陷控制理论与方法

1.2.1 煤矿开采沉陷国内外研究现状

当地下有用矿物被采出以后,采空区周边岩体的原始应力平衡状态被打破,经过应力重新分布达到新的平衡。在此过程中,岩层和地表将产生连续的移动、变形和非连续的破坏(开裂、垮落),这种现象统称为“开采沉陷”。其中采空区周围岩体直至地表的地层内部移动变形称为岩层移动,地表的移动和变形成为地表移动或地表塌陷。

地下煤炭资源属于层状矿体,其大规模开采通常会导致大范围的岩层移动和大面积

的地表塌陷,威胁地表及地下水体和地表建(构)筑物的安全,并破坏工矿区的生态环境。因此,世界各国对开采引起的沉陷问题高度重视,并通过多年的研究取得了丰硕成果。

1. 国外矿山开采沉陷研究的发展

19世纪,由于比利时的列日城受采矿影响而造成极大的破坏,引起了比利时对开采沉陷影响的调查研究,由此拉开了矿山开采沉陷学基本理论研究的序幕。

1838年产生了开采沉陷的第一个理论——“垂线理论”,之后被“法线理论”所代替。随后,又相继出现了一系列的理论假设,主要有“二等分线理论”、“自然斜面理论”、“拱形理论”、“三带理论”。这些早期的理论研究主要是针对覆岩移动变形与地表下沉的关系,并在此基础上提出了相关的几何理论模型。

第二次世界大战结束以后,人们开始着重从连续介质和非连续介质理论来研究开采沉陷的分布规律。1947年,有人提出利用数学塑性理论对岩层移动进行分析,并以理论分析的结果为指导建立了地表移动的计算方法。后来,又提出了更为一般的线弹性分析原理——“面元原理”。波兰的学者们提出了影响曲线的概念,得出了正态分布的影响函数。紧接着将岩石视为不连续介质,将岩层移动过程作为一个随机过程的观点被提出,形成了开采沉陷的随机介质理论和概念。此时,苏联的专家们也系统地分析了地表移动和变形规律,并提出了苏联通用的地表移动变形计算方法——“典型曲线法”。后又采用钻孔伸长仪和钻孔测斜仪观测岩体内部的竖向和横向移动,获得了岩体内部的水平移动分布规律,并发现了岩体沿层面的滑移和离层现象。

随着社会的不断发展和科学的不断进步,经典的理论算法通过计算机程序得以实现,使得过去难于计算的问题成为可能。一些数值分析方法,如有限元法、边界元法和离散元法等,在开采沉陷计算中得到了广泛的应用,新的数值计算方法,如不连续变形分析法和流形元法等,的出现也给岩层移动计算带来新的契机。许多适合岩土工程数值计算的数值软件也应运而生,如岩土工程和岩土环境模拟计算的仿真软件 GeoStudio、有限元分析软件 ANSYS、有限差分法程序 FLAC、离散单元法程序 UDEC、颗粒元法 PFC 等软件。这些都为开采沉陷理论研究及计算预测奠定了基础。

2. 国内矿山开采沉陷规律研究的发展

我国对开采沉陷的研究工作是从新中国成立以后才开始的。20世纪50年代起,在我国的一些主要矿区,开滦、抚顺、淮南、阜新、峰峰、大同、鹤岗等,先后建立了地表观测站,展开了对开采沉陷的观测工作。随着我国综合实力的不断增强,科学水平的不断提高,我国的开采沉陷基本理论和实践研究都有了全面而深入的发展。我国不仅积累了上千条观测线的实测资料,而且在大量现场实测岩层与地表实测资料的基础上,对岩层与地表移动变形规律进行了深入的研究,提出了一系列具有中国特色的岩层控制理论。在开采沉陷预计方面,我国学者经过几十年的努力,已经建立了适合我国实际情况的多种沉陷预计方法,主要有概率积分法、负指数函数法、典型曲线法、积分格网法、威布尔分布法、样条函数法、双曲线函数法、皮尔森函数法、山区地表移动预计法等,其中概率积分法在我国各大矿区应用最为广泛。在煤层开采岩层移动机理研究方面,我国学者相继提出岩层移