

李希勇 郭惟嘉 阎卫玺 孙文斌 著

新汶矿区充填开采 地表移动规律研究



煤炭工业出版社

国家自然科学基金 (51274132) 资助
国家自然科学基金重点项目 (51034003) 资助
973 计划前期研究专项 (2011CB411906) 资助

新汶矿区充填开采地表移动 规律 研 究

李希勇 郭惟嘉 阎卫玺 孙文斌 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

新汶矿区充填开采地表移动规律研究/李希勇等著. -- 北京:
煤炭工业出版社, 2013

ISBN 978 - 7 - 5020 - 4179 - 3

I. ①新… II. ①李… III. ①矿区—煤矿开采—地表位移—
规律—研究—山东省 IV. ①TD173

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 020358 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 17¹/₂
字数 415 千字

2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷
社内编号 7002 定价 46.00 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

前 言

我国是一个富煤、少气、缺油的国家,煤炭在工业发展中的地位不可或缺。目前,我国探明可直接利用的煤炭储量为 1.886×10^{11} t, 可供开采 100 a 以上。全国煤炭资源赋存格局是北富南贫,西多东少,主要集中在山西、内蒙古、陕西、新疆、贵州和宁夏 6 省(自治区),占全国煤炭总储量的 82.8%,而耗煤量较大的京、津、冀、鲁、苏、沪、浙、闽、粤、琼、桂等 11 个省、直辖市煤炭储量仅占全国总储量的 5.3%,消耗量却占全国煤炭总产量的 65% 以上。据中国煤炭工业协会预计,2020 年全国煤炭需求量将达到 3.0×10^9 t 左右。因此,煤炭作为我国主体能源的地位在今后 50 年内不会改变,在一次能源消费结构中将长期是我国的主要能源。

随着我国经济的高速发展,对煤炭资源的开发利用越来越高,建筑物下、铁路下、水体下和承压水上(“三下一上”)压煤开采成为我国尤其是中东部地区煤矿开采面临的主要问题。据对全国国有重点煤矿不完全统计,我国目前“三下一上”压煤 1.379×10^{10} t,其中建筑物下压煤 9.468×10^9 t,铁路下压煤 2.417×10^9 t,水体下压煤 1.905×10^9 t。随着国民经济发展及城市化进程的进一步加快,实际压煤量要远远大于这一数字。仅在新汶矿区,“三下”压煤量就高达 2.67×10^8 t,占其可采储量的 70% 以上。

人类在消费煤炭资源的同时,也面临开采产生的煤矸石和电厂燃煤所产生的粉煤灰等所带来的空气污染、水体污染、耕地占用等一系列问题。因此,实现煤炭资源的“绿色开采”,是当前我国矿业领域亟须解决的一项重大课题。

国内充填开采技术在近 40 年内取得了较大的发展,由于近年来我国尤其是我国中东部地区的“三下一上”压煤问题越来越突出,国内学者对充填开采技术的研究达到了前所未有的高度。煤矿充填开采技术是开采“三下一上”压煤的重要途径,是提高煤矿开采安全可靠性的一项重要举措,是具有我国自主知识产权的一项新技术,为矿山采出矸石、解决矸石山污染及安全处理城市固体垃圾提供了一个新途径。目前我国充填法采煤主要有:矸石干式充填技术、覆岩离层注浆充填技术、冒落矸石裂隙注浆充填技术、(似)膏体充填技术、(超)高水充填技术。根据煤矿对现代充填采矿技术的要求来看,实现低成本、高效、绿色开采和提升安全保障程度是今后一段时间的研究内容和发展方向。

矿山开采地表移动变形的研究是一门研究开采地下矿物后引起岩层和地

表移动及其他相关问题的科学,是涉及采矿、地质、测量、岩石力学、弹塑性力学、统计学和计算科学等多种学科的交叉学科。地表移动参数及移动变形特征规律早就被人们所认识:从19世纪中叶以来,由于采矿业的发展,因采矿引起的地表塌陷给地面建(构)筑物和工农业生产带来了严重损害,引起了人们的关注。20世纪初开始建立地面观测站,对地表移动进行系统观测,以探讨覆岩与地表移动的规律。

无论是从理论上还是从现场实践,人们都进行了长期的研究并从控制地表和岩层的活动出发,提出了很多方法(条带开采法、充填开采法等)来控制地表的沉陷。控制地表沉陷,要准确选择地表移动预测参数,对相邻矿区的地表移动参数进行整理,进而得出相对准确的移动参数。

本书围绕新汶矿区充填开采与地表移动变化规律,系统地阐述了矿区控制地表沉陷的开采方法,特别是对充填开采技术,从充填介质、材料分析到充填减沉机理等作了详细阐述,并对矿区工程实际地表移动变形监测成果进行分析,采用数值模拟、物理实验、演算总结等方法,研究得出了矿区充填开采后地表沉陷规律,同时对矿区环境保护与生态建设和充填开采技术的应用前景进行了展望。全书共分十二章:第一章对新汶矿区的概况和矿区充填开采研究作了简要汇总说明;第二章针对矿区控制地表开采沉陷的几种方法及典型案例作了总结阐述;第三章对矿区主要充填技术及其工艺特点作了详细说明,为煤矿充填开采技术进行了完善和改进;第四章对煤矿常用的充填材料进行了介绍,并对其物理、力学相关性质进行分析总结;第五章对煤矿上常用的充填介质进行了汇总研究,分析各充填介质的物理化学特性;第六章对矿山充填开采减沉理论进行了研究,从充填率、充填相关参数、充填材料等诸多方面,结合覆岩运动及地表移动变形特征,详细论述了充填开采减沉控制规律;第七章对矿区地表移动变形相关参数的计算方法作了研究分析,提出针对矿区岩移参数较为有效的智能求参模式方法;第八章对新汶矿区三个主要煤田垮落法开采的观测成果进行了汇总、整理分析;第九章针对矿区不同充填材料的充填开采技术,研究地表观测成果,分析矿区充填开采地表沉陷规律,总结翔实资料,为充填减沉技术提供了一定的理论指导;第十章为矿区资源可持续发展研究,重点介绍了固体废弃物、矿井水等综合利用技术;第十一章对充填开采技术的应用前景和进一步的研究方向进行了剖析说明,并对充填开采环境可持续发展的设想进行了阐述。

限于作者水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2012年11月

目 次

1 绪论	1
1.1 新汶矿区概况	1
1.2 充填开采研究概况	5
2 矿区地表减沉开采方法	8
2.1 协调法开采	8
2.2 条带法开采	11
2.3 充填法开采	17
2.4 压煤建(构)筑物维修加固开采	21
3 矿区主要充填技术简介	23
3.1 煤矿主要充填技术发展概况	23
3.2 矿区离层注浆技术	27
3.3 矿区固体充填技术	39
3.4 混合材料似膏体充填	51
4 矿区主要充填材料性能分析	58
4.1 固体充填材料分析	58
4.2 似膏体充填材料分析	65
5 矿区充填介质介绍	81
5.1 煤矸石	81
5.2 粉煤灰	83
5.3 普通硅酸盐水泥	86
5.4 矿渣	88
5.5 尾砂	89
5.6 赤泥	92
5.7 废石料	94
6 矿山充填减沉理论研究	98
6.1 充填开采地表沉陷控制机理	98
6.2 充填开采覆岩移动规律	100
6.3 充填参数对覆岩减沉控制规律分析	112
6.4 充填体材料强度对减沉效果影响规律分析	115
6.5 充填率对减沉效果影响规律分析	116
6.6 充填开采对覆岩移动和矿山压力的影响规律分析	117
7 矿区地表移动变形相关参数理论研究	128
7.1 矿区地表移动角量参数分析	128

7.2	矿区移动变形角量	129
7.3	矿区地表移动变形预测参数求取方法	136
7.4	求参准则的讨论	138
7.5	模式法求取参数	138
7.6	曲线最佳拟合方法	140
7.7	覆岩的模型识别与参数识别	143
7.8	矿区垮落法开采地表移动变形计算参数	143
7.9	地表移动变形持续时间和最大下沉速度	145
8	矿区垮落法开采观测成果及岩移规律	149
8.1	新汶煤田观测成果	149
8.2	莱芜煤田观测成果	162
8.3	华丰煤田观测成果	170
8.4	地表移动变形规律	177
9	矿区充填开采地表观测成果及沉陷规律研究分析	180
9.1	地表移动变形监测方法	180
9.2	固体充填开采观测成果	188
9.3	胶结充填开采观测成果	204
9.4	充填开采地表沉陷规律研究	208
10	矿区环境保护与生态建设	211
10.1	矿区环境状况及其评价	212
10.2	矿区固体废弃物综合利用规划	216
10.3	矿区矿井水利用工程	243
10.4	矿区可持续发展分析	251
11	充填开采技术的前景和进一步的研究方向	254
11.1	充填开采的前景及效益分析	254
11.2	充填开采环境可持续发展分析	255
11.3	充填开采的进一步研究方向	260
	参考文献	270

1 绪 论

1.1 新汶矿区概况

1.1.1 矿区地理位置

新汶矿区位于山东省中部的泰安市、莱芜市和宁阳县境内，地处大汶河支流、柴汶河与牟汶河沿岸，其主要生产矿井位于泰安市境内。

1.1.2 矿区煤田概况

新汶矿业集团公司处鲁中丘陵地带，北有泰山山系余脉，南有蒙山山系露头，东有鲁山、沂山脉，中有莲花山、徂莱山将矿区分为北（莱芜）、南（新汶）、西（宁阳华丰）三个煤田。

矿区南部为新汶煤田，东起新泰市的员外哨，西起禹村镇，南至煤系露头，北为莲花山大断层。东西长 70 km，南北平均宽 8 km，含煤面积为 304.7 km²。该煤田内分布有孙村、张庄、良庄、协庄、禹村、泉沟、汶南、翟镇、华恒十个生产矿井，还有市、县、乡办的地方小井 19 对。

矿区北部为莱芜煤田，位于莱芜市境内，南翼与新汶煤田以莲花山脉相隔，为一西宽东窄的楔形狭长煤田，东起梁坡断层，西迄羊流断层，南至煤系露头，北界为泰山大断层；沿走向东西长 32 km，南北平均宽 11 km，面积为 352 km²，其中已探明含煤地区面积为 41.7 km²。该煤田范围之内有潘西、西港、南冶、鄂庄 4 对矿井和市、镇、乡办的地方煤矿 11 对。

矿区的最西部为华丰煤田，位于京沪铁路磁窑车站以东 8 km，磁莱铁路华丰车站以北 2 km。东起北故城，西至西磁窑，南起十六层煤露头，北至 -1100 m 水平。井田东西走向长平均 7.7 km，南北倾斜宽平均 2.2 km，面积为 16.9 km²。

新汶煤田煤系地层共含煤 19 层，可采或局部可采煤层，各井田不同，少者有 7 层，多者有 11 层，平均总厚度为 10.7 m。二叠系山西组共含煤 5 层，其中可采或局部可采煤层为 4 层，即一、二、三、四层，二、四两层比较稳定；石炭系太原群及本溪群，共含煤 14 层，其中可采或局部可采者为 7 层，即六、八、九、十一、十三、十五、十六煤。

新汶煤田各矿一般开采二、四、六、十一、十三、十五煤，构造中等复杂，煤层较稳定，上覆岩层为中硬岩层。

莱芜煤田各矿多在开采二、四、七、十五、十九煤，平均总厚度为 7.18 m。各井田内构造中等复杂，煤层稳定，但西部预测区因受火成岩侵入影响，煤层的稳定性已受到不同程度破坏，且煤层中有部分可采的现象。大部分已采空区为开采层数小于 3 层，开采深度多在 450 ~ 750 m，上覆岩层为中硬岩层的地质采矿条件。

华丰煤矿主要开采前组四、六煤，四煤一般为 5.5 ~ 6.5 m，六煤一般在 1.2 m 左右。由于覆岩第三系砾岩厚度大（500 ~ 960 m）、岩层坚硬、整体性好，且表土层薄（0 ~ 8 m），

煤层开采后,地表除产生明显的连续性的移动外,还出现严重的非连续变形——斑裂现象。

1.1.3 矿区充填开采概况

新汶矿业集团公司以国内外煤矸石利用理论和新汶矿业集团研究实践成果为依据,以前期现场先导试验为基础,在系统事例、技术集成的基础上,开发出矿井高效煤矸石充填、以矸石置换煤炭等系列化配套技术。

2006 年以来,新汶矿业集团充填开采情况见表 1-1。

表 1-1 新汶矿区矸石充填开采情况汇总

煤矿名称	采 区	充填方法	工作面	开采时间	煤 层	采高/ m	平均采深/ m	
翟镇	七采	长壁综采 矸石充填	7402 ~7406、7204	2007—2009 年	二、四	1.8	700	
	二采		2205	2008 年 5 月	二	1.8	500	
潘西	四采		4197	2008 年 6 月	十九	2.3	900	
盛泉	三采	长壁普采、炮采 矸石充填	31101、31102	2006—2008 年	十一	1.65	254	
	七采		7209	2008 年 4 月	二	2	360	
	二采		21103	2006 年	十一	1.65	340	
良庄	二采		21310	2008 年 4 月	十三	1.5	420	
华恒	六采		61303	2007 年 3 月	十三	1.62	890	
	四采		41303		十三	1.4		
协庄	三采	风力充填	3414		四	2.75	660	
			31113E		十一	1.95	680	
孙村	二采	矸石胶结充填	-210 煤柱面	2006 年 10 月	四	2.2	370	
鄂庄	二采		2202 东	2007 年 5 月	二	1.95	450	
			2407 东	2007 年 4 月	四	1.56		

1. 冒落条采和充填条采

采出部分用全部垮落法控制顶板时称为冒落条采,采出部分用充填法控制顶板时称为充填条采。冒落条采由于工艺简单、成本相对较低,应用较多。充填条采由于充填开采空间,可以提高煤柱的稳定性和采出率,减小岩层与地表移动,一般用于重要建筑物和密集建筑群下采煤,如波兰在城市下采煤就采用充填开采。但该法工艺复杂、成本较高,我国应用较少。

2. 原生矸石(抛矸)充填开采

抛矸机抛矸充填技术是将岩巷和半煤岩巷掘进矸石用矿车运至井下矸石车场,经翻车机卸载,而后经装载破碎机破碎,进入矸石仓。通过矸石仓,破碎后的矸石经带式输送机或刮板输送机运入上、下山,而后由带式输送机或刮板输送机转载进入采煤工作面回风平巷,再由工作面采空区可伸缩带式输送机运至抛矸带式输送机尾部,由抛矸带式输送机向采空区抛矸充填,并在邻近充填巷进行注浆强化。该技术具有系统简单,机械化程度高,

装备投资少, 充填效果好的特点, 但需要较多的矸石, 充填地点较远时运矸石距离长, 多适用于薄及中厚煤层普采或炮采工作面回收井筒煤柱、工业场地煤柱, 煤层有一定的倾角更有利于充填密实。

该方法具有代表性的是泉沟煤矿和良庄煤矿。以泉沟煤矿 21103 工作面为例, 工作面采用刮板输送机、带式运输设备运矸, 充填采用自行研制的抛矸带式输送机进行机械充填, 局部采用人工接实顶板。工作面推采控顶距达到 7 m 时, 由下向上开始充填, 随充填接顶及时回撤支柱。人工接顶时要两人一组, 并避开带式输送机抛矸方向, 防止抛矸及滚矸伤人, 并在完好支护的保护下操作, 严禁空顶作业。矸石带必须充实全部采空区, 要填满接实, 不留空隙, 严禁充填煤炭或其他可燃性材料, 随充填接实顶板及时回撤临时支柱。顶板破碎处可先支木支柱或托板梁, 将正规支柱替换下来。

此种采煤工作面矸石充填工艺, 运输系统简单实效, 对矸石无选择性, 实现大面积连续充填, 使用抛矸带式输送机机械充填, 降低了工人劳动强度, 由于抛矸带式输送机的速度快, 充填接顶实, 空隙小, 效果好。

3. 破碎矸石风力充填开采

风管道充填技术是将采区轨道提升来的矸石车, 由人工推入自制前倾式翻车机, 将矸石卸入给料机内, 由其均匀落到电动滚筒带式输送机上。在电动滚筒带式输送机尽头, 将矸石进行破碎, 再由耙斗装岩机装入上平巷运矸带式输送机。破碎后的矸石经带式输送机运至风力充矸平台后, 由螺旋给料机转载到风力充矸管道内, 通过风机产生的高压风, 经连接管输送到运矸管路内, 把破碎的矸石沿 $\phi 200$ mm 管路输送到充填工作面内进行充填, 支撑顶板, 达到以矸换煤、绿色开采的目的。

以协庄煤矿为例, 工作面采用高档普采工艺, 充填采用“见五充二”的方法进行施工, 工作面每次出煤 2 个循环, 控顶距达到 5.6 m 时开始从下往上进行矸石充填, 每次充填 2 排。工作面矸石充填与出煤平行作业, 但工作面最大控顶距不得超过 6.6 m。

当工作面推采支设齐全 5 排支柱, 机道内挂齐全第 6 排顶梁后, 运矸管道沿第一个排距档接到下出口, 沿第三排支柱的里侧挂挡矸帘, 从下往上开始充填矸石, 充填步距为 2.0 m; 当矸石充填至单体支柱时, 停止充填并按照“自下而上, 由里向外”的顺序进行回撤柱梁, 每次最多回撤 2 只走向、1 只倾向柱梁鞋, 直至充填到管道出口; 周而复始, 按照接运矸管道→回柱→充填→缩管道→回柱→充填的顺序, 实现不间断充填。

4. 破碎矸石泵送充填开采

泵送矸石充填技术是将井下原生矸石经转载到卸载站后, 经碎石机破碎后卸至矸石仓内, 将破碎矸石料加入水和其他辅料, 在搅拌机作用下充分搅拌成似膏体状, 再经煤矸石输送泵通过管路充填到采空区。该方法具有工艺简单, 费用低, 易操作, 机械化程度高, 劳动强度低, 能够减少地表下沉量, 减少地表塌陷, 实现原生矸石不升井, 减少环境污染的特点。

以华恒煤矿为例, 掘进工作面产生的矸石装入 2 t 矿车, 经采区上山、下山、采区车场、-650 m 西大巷运至后四矸石仓, 经 PCS1200 碎石机粉碎后由 JS1000 型搅拌机进行搅拌, 由 HBM80/16 型煤矸石输送泵配合高强充填管路, 经提升道、工作面上巷向工作面采空区充填。矸石泵房至充矸工作面采用 $\phi 159$ mm 的无缝钢管连接。每节钢管采用配套标准管卡子, 密封垫对接严密, 钢管承受压力大于 25 MPa。

5. 混合材料似膏体充填开采

似膏体充填技术是将多年堆积存放的煤矸石、煤粉灰与水泥等材料按比例搅拌成浆,从地面通过钻孔和管道输送到井下待充填采场,快速凝结后有效支撑岩层。该方法具有成本低、流动性好、输送方便、充填强度高、保护环境等特点。

以孙村煤矿为例,工作面使用了两种充填方法:一是全部采用似膏体充填,二是采用先充填矸石作骨料再充填似膏体灌浆填实。 -210 m 充填面为4煤层,顶板为坚硬砂岩,煤层厚度为 1.8 m ,实际采出厚度为 2.2 m ,采出后全部进行回填,实际充填厚度为 2.2 m ,压实厚度为 2.2 m ,顶板无破坏迹象。到目前为止,共采出煤层体积为 19000 m^3 ,实际充填体积为 21000 m^3 。对 -210 m 矸石充填工作面的试验性充填,取得了良好的效果。

6. 高效机械化(综采法)矸石充填技术

高效机械化矸石充填技术以翟镇煤矿为例,工作面矸石充填采用液压支架后悬40T刮板输送机运矸,矸石通过中部槽卸载孔,自上而下进行采空区充填,充填过程中可采用卸矸中部槽之间增加普通中部槽的方式,调整卸矸中部槽底部孔距以保证充填效果。根据工作面实际情况及生产需要,采用双滚筒采煤机割煤、装煤。当工作面刮板输送机机头(尾)位置不合适、煤机割不透上下端头、断层落差较大、顶底破碎难以维护,需要采用打眼爆破处理时,另提补充技术措施。工作面充填主要包括以下四步:

(1) 煤机吃刀后,随推移刮板输送机,前移相应支架,顺直刮板输送机机头(尾)支架后悬充填刮板输送机。

(2) 煤机上(下)行割完一刀后,在下一刀割煤吃刀后,煤机停止割煤,顺直刮板输送机机头(尾)支架后悬充填刮板输送机。

(3) 先开动工作面矸石充填刮板输送机,然后开动轨道巷矸石运输中部槽,进行采空区矸石充填。充填过程中,充填刮板输送机需点动运行,保证充填效果。

(4) 采空区充填完后,运行采煤机割煤,进行下一循环。

1.1.4 充填开采地表沉陷控制效果

矿区应用充填开采技术方法,有效地控制了开采引起的地表沉陷。各类不同的充填方法,对地表下沉系数的影响不同,具体见表1-2。

表1-2 各类充填方法工艺特点及减沉效果

类 别	主 要 充 填 材 料	充 填 率	下 沉 系 数 (充 填 效 果)	适 用 条 件
原生矸石充填	掘进矸石、夹矸	0.6~0.8	0.35~0.50	薄煤层
破碎矸石风力充填法	破碎的矸石	0.75~0.85	0.20~0.40	薄煤层
破碎矸石泵送充填	破碎矸石、粉煤灰	0.65~0.85	0.25~0.40	中厚煤层
混合材料似膏体充填	破碎矸石、粉煤灰、水泥	0.8~0.95	0.10~0.36	中厚煤层
新型综采支架破碎矸石充填	破碎矸石	0.7~0.85	0.35~0.60	薄煤层

井下充填技术不仅解决了煤矿固体废弃物处置、岩层及地表移动控制和提高矿井资源采出率等困难问题,也为“三下”呆滞资源安全开采和地面重要设施保护提供了可靠的

技术保障,经济、社会和环境效益巨大。充填技术对实现煤炭行业技术进步和绿色开采技术的跨越式发展具有较大的促进作用,对矿区生产、社会和谐和环境建设的可持续发展具有重要意义。

1.2 充填开采研究概况

中国经济的高速发展,主要依赖煤炭产量的快速增长,但长期以来,我国煤炭粗放式生产造成了严重资源浪费和环境破坏。煤矸石固体废弃物露天排放和地表塌陷破坏是煤矿生产最主要的环境问题根源,留设建筑物、水体、铁路保安煤柱及其他各类永久煤柱是煤矿资源采出率低的重要原因。各矿区普遍存在严重的“三下”压煤问题,据统计,全国“三下”压煤量达 1.37×10^{10} t,仅在新汶矿区,“三下”压煤量就高达 2.67×10^8 t,占其可采储量的70%以上。在国内应用比较普遍的条带开采方法解决“三下”采煤问题,煤炭采出率只有30%左右,资源损失巨大且不能完全避免沉陷灾害,严重制约了资源的合理开发和矿区煤炭生产的可持续发展。解决好煤炭资源开发与环境保护的尖锐矛盾,是煤矿区社会可持续发展的关键。

利用井下采空区处置煤矸石的充填采煤技术,既可以减少煤矿固体废弃物排放,又可以减轻开采沉陷灾害、提高矿井资源采出率,是实现煤矿绿色开采的理想途径和关键技术之一。但长期以来,由于缺乏高效的充填设备和工艺系统,造成了过去矸石充填采煤充填效果差、工艺复杂和充填成本高的局面,尤其是不能实现地面沉陷的微变形和保障建(构)筑物安全,使得煤矸石充填采煤技术一直无法得到大面积推广应用,造成了大量矸石升井占地堆放并污染环境、地表塌陷破坏环境和“三下”呆滞资源浪费的多重被动局面。因此,系统开展矸石充填开采技术研究,对于掌煤炭行业技术装备水平提高和绿色开采技术进步,具有重要的理论意义和实用价值。

1.2.1 国外充填开采概况

矿山充填是为满足采矿业的需要而发展起来的,在国外已有100多年的历史。矿山充填首先在金属矿山中得到应用,在煤矿首次应用是1915年澳大利亚的塔斯马尼亚芒特莱尔矿和北莱尔矿。充填开采在波兰、德国应用效果较好,其中波兰在城镇及工业建筑物下采煤时采用水砂充填采煤量占全国建筑物下采煤量的80%左右,使用的充填材料通常是河砂、煤矸石和电厂粉煤灰等;英国、法国、比利时等国都不同程度地采用了风力充填方法。经过近百年的发展,充填开采技术在金属矿山和煤矿均取得了较大发展,国外充填采矿技术的发展主要经历了以下四个发展阶段。

(1) 第一阶段:20世纪40年代以前。以处理固体废弃物为目的,在不完全了解充填物料性质和效果的情况下,将废料直接送入采空区。如澳大利亚塔斯马尼亚芒特莱尔矿和北莱尔矿在20世纪初进行的废石干式充填,加拿大诺兰达公司霍恩矿在20世纪30年代将粒状炉渣加磁铁矿直接充入采空区充填。

(2) 第二阶段:20世纪40—50年代。为保护一座教堂基础安全,美国宾夕法尼亚州一个煤矿首次进行了水砂充填试验,随后南非、德国、澳大利亚等国相继应用了水砂充填工艺。由于水砂充填浓度较低,一般为45%~60%,需要在采场大量脱水,同时由于水砂源的限制,在20世纪70年代该技术逐步被淘汰。

(3) 第三阶段:20世纪60—70年代。由于非胶结充填体无自立能力,难以满足高采

出率和低贫化率的要求,因此在水砂充填得以发展并推广之后开始研发胶结充填技术。1960年加拿大国际镍矿公司开始试验波特兰水泥固结水砂充填技术,并于1962年在Frood矿投入生产应用。随着胶结充填技术的发展,这一阶段已开始深入研究充填材料特性、充填体与围岩相互作用机理及长期稳定性等。

(4) 第四阶段:20世纪80—90年代。随着采矿业的发展,充填工艺已不能满足回采要求和进一步降低采矿成本及环境保护的需要,因而发展了高浓度胶结充填技术,如膏体充填、碎石砂浆胶结充填和全尾矿胶结充填等技术。国外如澳大利亚坎宁顿矿,加拿大基德克里克矿、洛维考特矿、金巨人矿和奇莫太矿,德国格隆德矿和奥地利布莱堡矿以及南非、美国和俄罗斯的一些井工矿近年来也应用了这项技术。

国外在发展充填技术的同时也对开采沉陷理论进行了研究,人们从不同角度、按照不同标准进行了沉陷影响范围及采动后上覆岩层、地表变形移动规律等方面的研究。国外开采沉陷理论研究大致分三个阶段。

(1) 第一阶段:开采沉陷初步研究时期。19世纪30年代后期到20世纪20年代期间,比利时工程师哥诺特在1838年通过对烈日城下开采引起的沉陷问题调查,提出了第一个开采沉陷理论——垂线理论,后经与法国工程师陶里兹共同改进发展成为“法线理论”。另外,依琴斯在1876年提出二等分理论和高斯理论,耳西哈在1882年提出自然斜面理论,裴约尔在1885年提出拱形理论,这些理论都对沉陷控制研究作出了一定贡献。

(2) 第二阶段:岩移理论形成时期。从1923年到1940年,舒密茨、坎因霍斯特等人相继提出了开采影响分布的几何沉陷理论。苏联学者阿维尔辛通过塑性理论及实践经验提出了下沉剖面方程呈指数函数形式,并提出了水平移动与地面倾斜成正比的著名观点。波兰学者克诺特在1950年提出了几何理论,布德雷克解决了克诺特提出的下沉盆地中的水平移动及水平变形问题。波兰学者李特维尼申在1954年把开采过程作为一个随机过程,依据这一理论发展形成了至今在我国还在广泛应用的概率积分法。

(3) 第三阶段:开采沉陷理论的快速发展时期。20世纪80年代后,随着科学发展和研究手段的进步,研究人员又把新的理论和方法引入到地表沉陷的研究中,如分形理论和损伤力学等。从20世纪70年代至今,在经典理论的算法基础上编程,三种主要的计算方法(有限元法、边界元法和离散元法)均在开采沉陷预计计算中得到广泛应用。

1.2.2 国内充填开采概况

国内充填开采技术的发展也经历了与国外发展类似的四个阶段,只不过国内的充填开采技术是在近40年内取得了较大的发展,总体落后国外10~20年。由于近年来我国尤其是我国中东部地区的“三下一上”压煤问题越来越突出,国内学者对充填开采技术的研究达到了前所未有的高度。国家能源局在2012年4月底在山东泰安隆重召开了全国煤矿充填开采现场会,国家能源局副局长吴吟出席会议并指出:要认真贯彻全国能源工作会议和煤炭工作会议精神,总结煤矿充填开采工作,推广煤矿充填开采经验,探讨扶持煤矿充填开采的政策措施,推动煤炭生产方式变革,促进煤炭工业科学发展。

国内矿山充填开采技术发展分为四个阶段:

(1) 第一阶段:在20世纪50年代以前,以处理固体废弃物为目的的废石干式充填。废石干式充填曾在20世纪50年代初期成为我国主要的采矿方法之一,主要问题是生产能

力小和劳动强度大,满足不了高产、高效的要求。自20世纪50年代以后,废石干式充填比重逐年下降,目前基本处于被淘汰的边缘。

(2) 第二阶段:20世纪60年代,国内矿山开始采用水砂充填工艺。1965年在山南锡矿为了控制大面积地压活动,首次采用了尾矿水力充填工艺;湘潭锰矿也从1960年开始采用碎石水力充填工艺,取得了较好的效果;20世纪70年代在铜绿山铜矿、招远金矿和凡口铅锌矿等应用了尾矿水力充填工艺,至20世纪80年代水砂充填技术已在国内60余座有色、黑色等金属矿山中得到应用。

(3) 第三阶段:20世纪60—70年代,开始应用和研发尾矿胶结充填技术。国内初期胶结充填均为传统的混凝土充填,即完全按建筑混凝土的要求和工艺制备充填材料。这种传统的粗骨料胶结充填输送工艺复杂,对物料级配要求较高,因而一直未获得大规模推广使用。20世纪70—80年代,上述充填技术逐渐被细砂胶结充填技术取代。目前,以分级尾矿、天然砂和棒磨砂等作为集料的细砂胶结充填工艺与技术已日臻成熟,我国仍有20多座金属矿山应用细砂胶结充填技术进行开采。

(4) 第四阶段:20世纪90年代,国内开始发展高浓度充填技术,如膏体充填、碎石砂浆胶结充填和全尾矿胶结充填等技术。1994年在金川有色金属公司二矿区建成第一条膏体泵送充填系统并进行成功应用,之后铜绿山铜矿、湖田铝土矿、咯拉通克铜矿等相继建成了膏体充填泵送系统。

国内从20世纪60年代初开始对采动引起的地表沉陷影响研究,一些理论也是沿用国外的研究成果。由于我国煤矿赋存情况复杂,建(构)筑物下、水体下、铁路下压煤量巨大,我国专家学者在这方面做了大量的工作,在理论和实践方面均取得了重大进展。地表移动变形机理研究成果主要由刘宝琛、廖国华将波兰学者李特维尼申等建立的岩层或地表下沉预计随机介质理论引入我国,成为我国应用最广泛的地表下沉预计方法之一。刘天泉、马伟民、王金庄等对水平煤层、缓倾斜煤层、急倾斜煤层开采引起的覆岩破坏与地表移动规律作了深入研究,提出了导水裂隙带概念,并总结了地表移动变形的一般规律;国家煤炭工业局分别于1985年、2000年颁布了《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》,代表了我国在采动地表移动变形及其控制方面所取得的研究成果。刘长友研究了采空区全部充填情况下,充填体的压缩率对上覆关键层活动的影响规律。张华兴研究了宽条带充填全柱开采地表沉陷的主控因素,采用数值模拟的方法分析了充填率、充填体强度、隔离煤柱宽度对上覆岩层运动的影响。孙晓光开展了膏体建筑物下压煤开采的数值模拟研究,对膏体充填后地表沉陷控制、支承压力分布进行了研究。

2 矿区地表减沉开采方法

2.1 协调法开采

协调法开采就是根据不同的受护对象,通过合理布设开采工作面,如合理设计工作面之间的相对位置、回采顺序等,让各工作面开采的相互影响能够得到有利迭加,使迭加后的变形值小于地表建(构)筑物的允许变形值,以达到减小采动影响的目的。

新汶矿区莱芜、新汶煤田各矿为中厚、薄多煤层开采,应用协调开采的方法在大多数情况下,可起到较好的效果,现将可行的方法作如下介绍。

2.1.1 合理设计开采边界和残留煤柱

1. 全柱开采

地表移动变形规律表明,地表不均匀下沉和地表变形主要集中在开采边界附近上方。井下每出现一个永久性的开采边界,地表就出现一个较大的变形区。因此,在建(构)筑物,甚至整个建(构)筑物群范围内,有效地进行大面积全柱开采,不形成永久性的开采边界,可最大限度减少地下开采对建(构)筑物的影响。为了实现全柱开采,可采用长工作面开采和分层间歇开采方法。

(1) 长工作面开采。长工作面开采的布置方式有:单一长工作面,它是在煤柱范围内只布置一个工作面,一般仅在煤柱面积较小时采用;当煤柱面积较大时,可采用台阶状长工作面;当煤柱面积很大时,可把煤柱划分为若干个区段,然后在每个区段内布置台阶状长工作面,即分区阶梯状长工作面。这种方法,一般仅在采深大、采厚较小时采用。

(2) 间歇开采。间歇开采是在煤柱内一次只允许回采一个煤层(或分层),第二个煤层(或分层)的回采要在第一个煤层(或分层)回采结束,地表移动变形稳定后进行,以消除或减小多个煤层开采影响的迭加。这一方法在新汶各矿应用较为广泛,如翟镇矿七采、三采村庄下的二、四层煤间歇开采,鄂庄矿高庄镇下二、四层煤间歇开采,南冶矿莱城区十三、十五层煤间歇开采等。

(3) 连续开采。一般情况下,地表的动态变形总是小于其静态变形(60%~70%)。因此,当开采面积较大的压煤煤柱时,要求一个工作面接一个工作面,一个采区接一个采区,一个阶段接一个阶段连续地回采下去,不应过久地停顿,以免形成永久性开采边界,使本来只承受动态变形值的地方变为承受静态变形值。

2. 合理设计开采边界

多煤层开采时,应避免开采边界的重叠。当两个煤层的开采边界重叠时,地表变形出现最不利迭加。反之,若两煤层的开采边界之间的距离为:

$$s = 0.4(r_1 + r_2) + s_1 - s_2 \quad (2-1)$$

地表出现有利迭加,迭加后地表的水平变形和曲率大大减小。这里 s 为两煤层的错距, r_1 、 s_1 和 r_2 、 s_2 分别为第一煤层与第二煤层的主要影响半径和拐点偏移距。

3. 合理设计残留煤柱

实测资料表明, 残留于采空区内的煤柱将在一定程度上出现地表移动变形的迭加, 因此尽量回采干净, 不留残柱, 若因某些需要而留设残柱时, 也应合理设计残留煤柱的尺寸。

2.1.2 平行长轴开采

地下开采后, 地表移动变形的方向总是指向采空区, 即垂直于开采边界。而建筑物的抗变形能力与其平面形状有一定的关系, 矩形建筑长轴方向抗变形的能力较小, 短轴方向抗变形的能力较强。建筑物抵抗压缩变形的能力较强, 抵抗拉伸变形的能力较弱, 建筑物抵抗扭曲变形的能力最弱。因此, 根据此特点, 在建筑物下可采用平行长轴开采。

(1) 当建筑物位于开采区域之内时, 工作面推进方向应与建筑物长轴方向垂直。

(2) 若建筑物位于开采区域之外, 工作面推进方向应与建筑物长轴方向平行。

(3) 应尽量避免工作面与建筑物长轴斜交。

对于建筑群或城镇下采煤时, 应以大多数建筑物或主要建筑物为准来考虑。如翟镇矿七采下山区翟镇建筑物群下开采等。

2.1.3 对称背向开采

当建筑物抵抗压缩变形的能力较大, 而对倾斜(如烟筒等)和拉伸变形又十分敏感, 则可采用对称背向开采。其方法有:

(1) 直接在建(构)筑物正下方布置两个背向开采的工作面, 此时建筑物始终处于压缩变形区内, 不承受拉伸变形, 也不产生倾斜。

(2) 背向开采工作面离建(构)筑物中心有一定的距离, 该距离一般为建筑物煤柱临界宽度的 $1/4$, 此时建筑物所遭受压缩变形和拉伸均较小, 有利于建筑物保护。

2.1.4 协调法开采实例

1. 协庄矿小胡庄村下压煤开采

1) 概况

小胡庄村下煤柱压煤面积约 0.56 km^2 , 所压二层、四层煤量为 3.983 Mt , 二层煤平均厚 2.4 m , 四层煤平均厚 2.6 m , 煤层间距 20 m , 煤层赋存较稳定, 为北单斜构造, 倾角为 $7^\circ \sim 18^\circ$ 。区内北部被井田北边界的 F28 断层切割, 煤层局部有冲刷变薄带及若干条小断层。

煤系地层为山西组, 其上多为砂岩, 表土层厚 10 m , 潜水位在地表下 4 m 。

小胡庄村位于协庄矿 -300 m 水平七采下山区上方, 占地 153 亩 , 居民 300 多户, 建筑面积为 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^2$, 地面标高为 $+165 \sim +167 \text{ m}$, 地势呈北高南低, 东高西低。村庄内分布两条季节性河流。

2) 开采方案

小胡庄村下压煤区: 二层煤布置 7 个工作面, 开采厚度为 2.4 m , 平均采深 435 m ; 四层煤布置 6 个工作面, 开采厚度为 2.2 m , 平均采深 448 m 。二、四层煤平均采深 442 m , 开采厚度为 4.6 m , 其深厚比为 96 倍。根据以上情况采取相应开采措施。

工作面采取走向长壁全部垮落法控制顶板, 高档普采。开采过程中采取了以下措施:

(1) 合理安排开采顺序, 实现全柱式开采。在工作面开采顺序上合理安排各区段之间的开采间隔时间, 相邻区段的开采选择在邻面开采的深度的 40% , 避免永久性开采边

界产生的不利变形影响。

分煤层顺序间隔开采, 分层交错布置, 错距为 60 m, 减少了地表不均匀下沉和静态变形值, 使部分变形得以抵消。

(2) 合理确定工作面推进方向。根据村庄建筑物结构及抗压不抗拉的变形特点, 在村庄边界采取两翼背向同时开采, 虽对建筑物产生压缩变形和迭加, 但村东建筑物反应不敏感, 也取得了较好效果。

(3) 二层煤协调开采。结合该区特点, 先开采正中的 7210E 工作面, 区段宽度取充分采动条件下应采区域宽度的 20%, 然后开采村北侧的 7211E 工作面使地面建筑物受到的附加拉伸和压缩应力明显减少, 特别是拉伸变形几乎没有显现。

(4) 四层煤上行开采。为减少一次下沉与变形强度, 四层煤采取上行开采。

(5) 确定合理的工作面推进速度, 匀速推进。采取日推进 1.6 ~ 2.4 m, 匀速推进, 取得了较好的效果。

3) 开采效果

采区二层、四层煤开采后, 实测地表最大下沉 2983 mm, 最大水平变形为 3.7 mm/m。小胡庄有民房 1285 幢, 采后完好的为 1151 幢, 占 90%; 轻微破坏不影响使用的 61 幢, 占 4.7%; 裂缝 4 ~ 15 mm 的 50 幢, 占 3.8%, 破坏较严重, 裂缝 10 ~ 25 mm 的 23 幢, 占 1.8%。共采出村庄压煤 3.597 Mt, 采用综合治理措施 (如村庄排水、裂缝房维修补偿) 后, 避免了迁村带来的一系列问题, 节约资金 712 万元。取得了巨大的经济和社会效益。

2. 翟镇矿三采东翼前、后羊村下开采

1) 概况

-400 m 水平西翼三采区基本属一单斜构造, 区内煤岩层走向为 $90^{\circ} \sim 160^{\circ}$, 倾角为 $2^{\circ} \sim 17^{\circ}$, 中小断层发育, 采区上限标高为 -190 m, 下限标高为 -290 m, 走向长平均约 1380 m, 倾斜平均宽 950 m, 面积约 1.31 km²。区内开采二层、四层煤, 二层煤厚 2.2 m、四层煤厚 2.5 m, 二层、四层联合布置, 各布置 5 个工作面。

前、后羊村位于三采区东翼地表上方, 位于莲花山与小汶河之间, 地势北高南低、东高西低, 村庄占地面积约 1250 亩, 其中, 前、后羊村二、四层煤压煤可采储量合计 609.8 万 t。前羊村有村民 850 余户、后羊村有村民 1150 户左右, 村庄内房屋以砖石结构为主 (约占 80%), 土木结构为辅 (约占 20%), 村内无高层建筑及高压线、工业厂房等设施。

2) 开采方案

重点考虑采用协调开采的技术措施, 能有效地减少地表移动变形对村庄房屋的影响, 根据区域开采煤层与地表村庄的井上下对照关系, 设计三采东翼二、四煤各区段开采顺序如下:

二层煤: 3201E→3204E→3205E→3202E 和 3203E;

四层煤: 3402E 和 3403E→3404E 和 3405E→3401E 和 1401E。

即煤层间采用大剥皮间歇开采, 煤层内跳采与双对拉工作面协调开采结合, 减少采动变形对村庄房屋的影响程度和影响范围。

3) 开采效果及效益分析

采用协调开采的方案后, 村庄内地表最大下沉 2800 mm, 最大水平变形为 +6.0 ~