

国家自然科学基金资助项目 (50904063, 51004101)

新世纪优秀人才支持计划项目资助 (NCET-12-0957)

江苏省高校“青蓝工程”项目资助

国家高技术研究发展计划资助项目 (863) 计划 (2012AA062101)

江苏省优势学科资助项目 (SZBF2011-6-B35)

浅埋煤层长壁工作面 保水开采机理及其应用研究

马立强 张东升 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金资助项目(50904063,51004101)

新世纪优秀人才支持计划项目资助(NCET-12-0957)

江苏省高校“青蓝工程”项目资助

国家高技术研究发展计划资助项目(863)计划(2012AA062101)

江苏省优势学科资助项目(SZBF2011-6-B35)

浅埋煤层长壁工作面 保水开采机理及其应用研究

马立强 张东升 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

为解决西部干旱半干旱矿区浅埋煤层普遍采用长壁开采而带来的水资源流失难题,提出由采动覆岩渗流场研究裂隙场的思路,研究了沙基型浅埋长壁工作面采动覆岩导水通道起始、扩展和闭合的动态发育过程及其分布特征。建立了统一的裂隙场、渗流场和采场矿压力学模型,分析采动覆岩破裂(断)及其再压实过程中渗流矢量、渗流速度及孔隙压力等变化规律;并将此规律与关键层结构运动全过程相结合,探讨关键层、含水层及隔水层的结构耦合效应,揭示了不同地质条件下开采参数对采动覆岩层间缝隙与层内裂隙发育的控制机理。提出浅埋煤层长壁工作面保水开采分类适用条件及其对应分类指标体系,从开拓部署、工作面布置及采煤工艺等方面,采取相应的控制性开采策略,并充分利用采后采空区,构建了浅埋煤层矿区保水开采设计与技术体系。

本书可供采矿工程、生态环境与科学等学科研究人员、专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

浅埋煤层长壁工作面保水开采机理及其应用研究/

马立强,张东升著. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.2

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1702 - 8

I. ①浅… II. ①马…②张… III. ①薄煤层—长壁工作面—长壁采煤法—研究 IV. ①TD823.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 255254 号

书 名 浅埋煤层长壁工作面保水开采机理及其应用研究
著 者 马立强 张东升
责任编辑 张 岩 章 毅 钟 诚
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 9 字数 220 千字
版次印次 2013 年 2 月第 1 版 2013 年 2 月第 1 次印刷
定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

长期以来,资源开发与生态环境保护一直是世界经济发展的两难选择。传统煤矿开采带来的矸石堆放、污水排放、地下水流失及煤层自燃等一系列生态问题,至今还没有一个系统性、整体性的有效解决方法。在西北干旱半干旱矿区,这一矛盾显得尤为突出。我国西北赋存有大量的浅埋煤层,最典型的如神东、陕北、宁东等亿吨级煤炭基地,位于毛乌素沙漠边缘与黄土高原丘陵沟壑区的过渡地带,属干旱半干旱大陆气候区,由于风大沙多,植被覆盖率低,水土流失严重,生态环境十分脆弱。

浅埋煤层采用大规模长壁开采后,上覆岩层从下至上将发生冒落、裂隙和弯曲下沉,从而使采空区上方地表发生大面积沉陷,造成矿区水土流失和水生态环境的破坏。若以传统方式进行超大规模煤炭开采,势必会对生态环境构成极大损伤,甚至是毁灭性的破坏。浅埋煤层开发引起的大范围地表水土流失,是西部煤炭可持续发展中亟待解决的重大课题。

本书作者研发了三维流固耦合开采试验系统及其配套监测系统和相似材料,首次进行了浅埋煤层三维流固耦合物理试验;采用 3DEC、FLAC^{3D} 数值计算软件的应力—渗流耦合系统,首次进行了大范围采动垮落条件下的三维流固耦合数值计算,克服了传统方法分析地下采场采动破坏覆岩导水裂隙场的局限性,分析了覆岩导水通道从起始、扩展到采后闭合的全过程及其对应分布特征,揭示了浅埋煤层采动裂隙与隔水层破坏机理,发现了采空区基岩与隔水层的移动规律,建立了隔水层采动条件下的隔水性判据。采用板理论中的差分法和变分法,应用应变分析原理,结合垮冒岩层的弹性地基特性,研究了软弱隔水层板的裂隙演化机理和发育过程;研究了基本顶关键层的破断过程,并阐述了其与下伏、上覆岩层的耦合关系,探讨了浅埋煤层覆岩中关键层、含水层及隔水层的结构耦合效应,并系统分析了采高、直接顶厚度、隔水层厚度和松散层厚度等不同采矿地质参数对采动覆岩导水通道高度的影响,揭示了保水采煤的可行性,可为降低西部干旱半干旱地区采动环境损害提供基础理论支持。

本书前言、第 1 章由张东升执笔,第 2 章至第 8 章由马立强执笔。感谢陕西省煤田地质局范立民副总工程师、西安科技大学侯忠杰教授和张杰博士等对作者提供的部分地质资料及对本书给予的无私支持和建议。感谢神华集团神东煤炭分公司王安总经理、赵永峰总工程师提供的支持和指导。在现场工业试验工作中,感谢神东地测分公司、科技中心、上湾煤矿和补连塔煤矿的领导及工程技术人员的支持。对于煤炭科学研究总院以及内蒙古伊泰集团伊泰煤炭分公司生产部和纳林庙二号井、酸刺沟煤矿、苏家壕煤矿和宝山煤矿的领导和工程技术人员给予的大力支持,在此表示衷心的感谢。他们丰富的工程实践经验使作者对浅埋煤层开采理论和实践的理解受益匪浅。感谢刘玉德博士、王红胜博士、金致远博士、范钢

伟博士、贾金龙硕士、陈涛硕士、李祥硕士、卢鑫硕士和曹新奇等人给予的协助。

本书仅仅是对神东矿区浅埋煤层保水开采的初步总结,限于作者水平,书中难免存在不妥或谬误之处,恳请专家及读者指正。

作 者

2012 年 11 月 20 日

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状及主要存在问题	2
1.3 展望	8
2 神东矿区浅埋煤层覆岩地质特征	9
2.1 矿区地质概况	9
2.2 覆岩地质特征	10
2.3 小结	12
3 隔水岩层裂隙演变规律	13
3.1 矿区隔水层特征	13
3.2 51201 浅埋煤层工作面物理模拟	14
3.3 32201 浅埋工作面物理模拟	19
3.4 采动覆岩裂隙发育规律	20
3.5 隔水层裂隙演变力学机理分析	23
3.6 小结	37
4 采动覆岩导水通道三维流固耦合模拟	38
4.1 三维流固耦合物理模拟	38
4.2 三维流固耦合数值模拟	46
4.3 小结	58
5 软、硬岩层的耦合破裂过程分析	60
5.1 基本顶关键层破断过程的模型分析	60
5.2 关键层与其下伏、上覆岩层的耦合关系	62
5.3 软、硬岩层的耦合破裂机理	69
5.4 软、硬岩层的耦合破裂模拟结论	74
5.5 小结	76
6 浅埋长壁工作面保水开采技术	77
6.1 浅埋长壁面保水开采适用条件分类	77
6.2 保水开采配套技术	83

6.3 小结	94
7 保水开采工程实践	95
7.1 上湾煤矿 51201 长壁工作面保水开采工业性试验	95
7.2 补连塔煤矿 32201 长壁工作面保水开采实践	108
7.3 浅埋厚硬顶板条件下保水开采技术	113
7.4 浅埋煤田采空区地下水库建设技术	119
7.5 小结	125
8 主要结论	126
参考文献	128

1 绪 论

1.1 研究背景

我国西部广泛赋存着浅埋煤田,主要有神府东胜煤田、陕北榆神煤田、宁夏的灵武煤田、新疆的吐哈煤田等,此外,彬长、黄陵、华亭等煤田中的相当一部分在开发初期也主要开采浅部煤层。这些煤田因可采煤层多、煤层厚、煤质优良、构造简单、开采技术条件优越而为世人瞩目。其中神府东胜煤田地处陕西北部内蒙古南部,探明储量达 2 236 亿 t,约占全国已探明储量的 1/4,属世界八大煤田之一,是我国储量最大的煤田。

西部浅埋大煤田的开发建设,在我国能源发展战略中具有重要地位,是西部大开发乃至全国经济发展的能源基础。神东矿区是我国首个亿吨级煤炭生产基地,是国家规划的十三个大型煤炭基地之一,也是我国目前最大的煤炭生产基地和重要的优质动力煤出口基地,煤炭生产能力仍以超过 1 000 万 t/a 的速度在递增。然而神东矿区恰好地处中国西北部干旱少雨且地下水资源不丰富地区,自被确定为国家 21 世纪的重要能源基地以来,以及一批千万吨级矿井相继投产及其相应的配套设施和匹配于矿业的火力发电等工业急速发展,城镇人口大幅度上升等原因,矿区用水量猛增。自 1999 年以来,出现了较严重的供水危机,使矿区生产生活秩序受到了干扰。如何有计划、合理地保护和开发利用地下水,为今后矿区发展以及即将投产的煤制油项目提供足够水源,已成为神东矿区发展亟待解决的重要课题。

但神东矿区煤层赋存的埋藏浅,顶板基岩薄,地表为厚风积沙覆盖层的突出特点使得该区沙漠覆盖层下蕴藏着的宝贵的地表潜水,在矿体开采过程中大量流失。加之矿区位于毛乌素沙漠风沙草滩区,水资源对环境的影响十分显著,这对于地表植被,甚至当地整个生态环境的保护和治理都造成了巨大的危害。随着我国可持续发展战略的进一步推进,煤矿生产的环境压力越来越大,如何解决神东亿吨级矿区超大规模开采和极脆弱生态环境保护之间的矛盾,也已成为神东矿区发展亟待解决的重要课题。

由于煤层浅埋和上覆松散充水含水层的大面积分布,浅埋煤田开发最大的技术难点是如何在煤炭资源安全高效开采的同时,最大限度地保护水资源。“保水开采”的概念伴随着以神东矿区为代表的西部浅埋煤田的大规模开发被提出了。同时,我国面临的水资源问题十分严峻,全国 660 多个城市中,60%的城市供水不足,110 个城市常年缺水。水的供需矛盾日益突出,这已成为制约我国工农业生产和城市发展的“瓶颈”。特别是北方地区,水资源短缺已成为当地国民经济和社会发展的最大制约因素。所以,随着煤炭开采强度不断加大提高,对采矿引起的地下水流失问题的研究已迫在眉睫。为此应尽量从开采的源头想办法,实施煤矿保水开采技术,以减少矿区地表和地下水流失,提高煤炭资源回收率。因此,煤矿保水开采技术涉及“中国采矿工业可持续发展的技术对策”、“高效安全的采矿新技术”和“矿物资源的综合利用技术与环境保护”三个与矿业科学发展密切相关的研究热点,研究成果应

具有较广的应用范围。

煤层开采前,矿区的生态环境基本是平衡的。矿区水环境的失衡及其衍生的水害皆由煤层开采引起,所以必须从开采理论与方法入手,解决矿井水资源流失问题。保水开采技术实际上包含采场顶板控制、隔水层裂隙分布特征及控制等技术,即必须分析清楚采动覆岩变形、破断、闭合过程中导水通道的形成和再闭合的可能性。神东矿区现有的开拓布置和采煤方法已考虑到要减少采煤造成的地下水资源流失,以期实现矿区内的水生态平衡。但随着开采强度的加大,其中心矿区的许多矿井已陆续涉及在沙基型薄基岩条件下进行保水开采的难题,这也是矿区生产的重要环节之一。本书针对这种情况,以“沙基型薄基岩浅埋煤层”为研究重点,进行采动覆岩导水通道分布特征及其控制研究,这是浅埋煤层保水开采技术的基础与应用研究。

1.2 研究现状及主要存在问题

通过中国矿业大学查新站和山西省科技情报研究所(都为国家一级查新中心)查新,以及查阅国内外博硕论文和 SCI、EI、ISTP 等数据库收录的文献,发现国内外对水体下安全采煤、采煤引起地表和地下水的变化规律的研究成果比较丰富,但涉及沙基型薄基岩浅埋煤层采动覆岩导水通道分布特征及其控制的研究尚不多,相关研究还主要围绕浅埋煤层开采和保水开采进行。

1.2.1 采动覆岩导水通道研究

采动覆岩裂隙带的裂隙主要有两种:一种是垂直或斜交于岩层的新生张裂隙,它主要是由于垮落带中的破碎岩石不断压实,上覆岩层弯曲下沉受拉及上位岩层受剪而产生,它可部分或全部穿过岩石分层,但其两侧岩层基本无相对位移而保持层状连续性;另一种是沿层面的离层裂隙,离层裂隙主要是因岩层间力学性质差异较大,岩层弯沉不同步所致。裂隙带上部的离层裂隙由于其纵向裂隙不发育,不与下部裂隙沟通。裂隙带的下部,纵向裂隙逐渐发展增强,离层裂隙与纵向裂隙连通,导水性明显增加,并能下渗直到采空区,一般将此部分称为导水裂隙带,即“导水通道”。采动覆岩导水通道的影响因素包括采厚和工作面参数、采煤方法和顶板管理方法、岩性和覆岩岩性结构、煤层的赋存状态、地质构造和时间过程等。不论是防治水害还是保护水资源,最基本的问题是采动覆岩导水通道的形成规律研究及其控制。只要掌握了导水通道的发育过程及其控制方法,就可以初步实现开采过程中的水资源保护。因此,采动覆岩导水通道分布特征及其控制是保水开采的核心技术。

(1) 导水通道分布特征

由于地质条件的差异,国外关于浅埋煤层采动覆岩导水通道分布特征及其机理的研究鲜有报道。

我国科技工作者为适应水体下采煤技术的迫切需要,开展了大量的裂高孔现场观测和试验性研究工作,在许多矿区裂高孔现场观测资料和试验性研究的基础上,结合煤层的采出厚度、岩体的强度类型等,总结出不同覆岩类型条件下,煤层采出厚度与冒高、裂高的相关关系式。基本上以覆岩体工程地质环境和岩体力学环境为主要研究内容,以导水裂隙带高度与岩体强度类型之间的关系为研究重点。

其中比较具有代表性的成果有文献[62]利用变形分析方法、相似材料模拟以及数值模

拟的方法对中硬覆岩的导水裂隙带产生发展机理及其最大发育高度进行了研究,并对其发育过程进行了分析。文献[63]以断裂力学和弹塑性力学知识为基础,将矿山压力理论和特殊开采理论紧密结合,对上覆岩层的破坏过程建立各种力学模型,对导水裂隙带高度边界处大于中部的力学机理进行了分析,得出了煤层开采以后其导水裂隙带最高点位于采空区内侧、外侧的覆岩条件。然后,针对综放开采条件,在对现场实测资料分析研究的基础上,获得了影响覆岩导水裂隙带发育的影响因素及其变化特征。结合现场实测资料、数值模拟、理论研究成果,分析了导水裂隙带的主要影响因素,综合考虑煤层采厚、覆岩性质和工作面几何参数等影响因素,得出了在综放开采条件下进行导水裂隙带高度预测的新方法与公式。

目前最前沿的研究是中国矿业大学的许家林教授对覆岩采动裂隙分布规律的如下总结:贯通的竖向破断裂隙是水与瓦斯涌入工作面的通道,故也称其为“导水、导气”裂隙,其最大发育高度与采高及岩性有关。在开采初期,下位关键层的破断运动对“导气”裂隙从下往上发展的动态过程起控制作用,导气裂隙高度由下往上发展是非匀速的,随关键层的破断而突变。当采空区面积达到一定值后,“导气”裂隙的分布呈“O”形圈特征,它是正常回采期间邻近层卸压瓦斯流向采空区的主要通道。从平面看,在采空区四周存在一沿层面横向连通的离层发育区,也同样呈“O”形圈特征。文献[64]经过分析研究也得到了与上述研究结果类似的结论。此外,文献[23]提出采动裂隙图像处理程序 FIMAGE,可对相似模拟中的覆岩采动裂隙模型实验结果进行定量统计。

针对浅埋煤层,文献[58]以流固耦合物理实验方法,对荒漠化防治、地表厚松散层富含潜水浅埋煤层保水开采、保水相关参数的确定、煤柱稳定性以及流固耦合的相互作用规律等问题进行了研究,文献[58]是对浅埋煤层导水通道分布特征的专门研究。在不同地质条件下的二维流固耦合物理实验模拟基础上,分析了厚松散层富含潜水下以及河流下浅埋煤层保水开采的可能性,提供了不同地质条件下间歇式保水开采的参数,认为间歇式开采缓和了上覆岩层的破坏并抑制了导水裂隙带的发展,可达到保水目的。

从研究趋势看,近年来国内外对导水通道控制方面的研究呈现如下特点:

① 引入现代统计学、损伤力学、断裂力学、弹塑性力学、流变力学等理论和现代测试技术及计算机技术。

② 将定性模型分析与数值、物理模拟、现代测试方法相互结合、相互补充和完善。其中实验室模拟方法,已从二维固相物理模拟向三维固相物理模拟和流固耦合两相物理模拟发展。在测试方法上,除了传统的“钻孔冲洗液法”外,还发展及应用了各种探测手段,如:电测深法、浅层地震法、无线电波钻孔透视法、声波 CT 层析成像技术、超声波穿透法、微震监测法、彩色钻孔电视探测法、瞬变电磁法和高密度电阻率法等。

由于地质环境条件及岩(土)体结构的复杂性,目前的研究还存在较大的局限性,尤其缺乏专门针对浅埋煤层覆岩导水通道的研究。总体上看,浅埋煤层覆岩导水通道分布特征的研究,至今仍处在经验积累和理论探索之中。

(2) 导水通道控制

国外虽较早就进行了导水通道控制的工程实践,但基本都是采用留设煤柱来控制导水通道高度和范围。如前苏联规定在有隔水层(第四系黏土层大于 2 倍采厚)存在的情况下,防水煤(岩)柱高度取 20~40 倍采厚,否则,根据覆岩中不同性质的岩层所占的比例取 20~60 倍采厚。其他国家也采用类似前苏联的方法对水体下安全开采深度提出了判别标准,但

其安全采深基本采用经验值,美国规定在地表大型水体下的安全采深为 60 倍采厚。日本在海上采煤时,一般从海底至开采煤层留设 100 m 作为防水煤柱不予开采。许多国家还将含水层底界面最大拉应变值作为判别水体下采煤是否安全的标准,作为留设防水煤岩柱的依据,其水体下采煤时水体底界面的最大拉应变值分别用概率积分法和经验公式法进行计算。

我国先后在小汶河、淮河以及微山湖、渤海等地表水体下进行开采,取得了许多对采动覆岩导水通道控制的研究成果。尤其就不同的采煤方法和黏土、红土及风化岩层带对覆岩破坏或导水裂隙带的抑制作用进行了专门研究。

专门针对浅埋煤层,文献[67]在全面分析神东矿区煤层地质特征和顶板破断规律、顶板来压特征的基础上,对神东矿区涌水溃沙灾害产生机理进行研究,结合神东矿区浅埋采场顶板破断特性,提出了在裂缝中喷射速凝早强混凝土改变导水通道宽度的设想,但没有经过模拟及现场实践检验。采用先进的掘进机械,改进采掘工艺,减轻对顶板的扰动,运用先进的顶板管理方法,甚至注浆加固顶板降低覆岩破坏程度,可以控制导水通道的高度和范围。为此,文献[85]提出了从地表往下注浆封闭采动覆岩导水通道的技术及关键参数,是浅埋煤层导水通道的控制可行方法,但大面积注浆的经济和技术问题还有待进一步研究。因此,广泛应用的有效控制方法仍是留设合理的煤柱。

目前对覆岩导水通道控制的研究仍处于某一类条件的简单理论分析以及经验统计、类比、数值模拟、相似材料模拟、实测等的研究阶段,尤其鲜有针对浅埋薄基岩厚煤层长壁工作面开采条件的,因而不能从根本上应用于解决浅埋煤层保水开采问题。

1.2.2 保水开采研究

(1) 保水开采的内涵与定义

目前采矿界对保水开采的定义还不明确,有人认为保水开采就是保护隔水层或含水层,不使其受采动破坏,并认为保水开采意味着完全不让水资源流失。因此,有必要首先搞清保水开采的目的和保护对象。

保水开采的目的是保证煤田开发与区域经济的持续健康发展所需的水资源。浅埋煤层开采不可能不造成一定的地下水渗漏,但不能造成矿区范围内地表和地下水资源的大量流失;尤其不能对受开采影响区域的植被生长条件产生大的负面影响。因此,浅埋煤层保水开采的水体保护对象应为潜水资源和地表水资源。

我国东部的一些矿区,由于地表及大气降水丰富,一直将矿井水资源视为水害来治理,实际上暂不存在保水开采的要求。如淮南矿区在淮河下采煤及龙口矿区在渤海下采煤等。此外,许多矿区虽然对矿井水进行部分或全部处理,但在生产过程中还没有对水资源进行有意识的保护,只是被动地处理和利用矿井水。从保水开采的目的和对象来看,上述矿区只是涉及水体下安全采煤问题和矿井水处理,并不是真正意义上的保水开采。因此,对我国采煤现状而言,只有在开发西部半干旱区浅埋煤层的同时,防止该区潜水资源和地表水资源的流失,才可谓保水开采。

此外,可以允许隔水层在采动过程中暂时受到破坏,只要采动覆岩导水通道在采后能闭合,能形成稳定的隔水层,地下水水位仍可以恢复。因此,保水开采可以简化为保护隔水层,且其保护可以分为采前、采中和采后几个时间段。保水开采的定义可分为三个层次:

- ① 含水层未受到采动破坏;
- ② 含水层受到采动影响水位下降后,能在较快时间内恢复;

③ 即使不能恢复如初,但仍不影响其正常供水能力,至少能满足生态系统对潜水的需水。

我们认为,保水开采就是在采动影响下,含水层的含水结构没有破坏;或虽有一定的损坏,造成部分水流失,但一定时间后仍可恢复,流失量应保证最低含水位不影响地表植物的生长,并保证水质没有污染,从而选择合理的采煤方法和工艺的开采技术。

矿区水环境的失衡及其衍生的水害皆由煤层开采引起,需要从开采理论与技术本身入手,将采动覆岩导水通道的动态变化特征与关键层及其控制的软弱隔水岩层的运动规律结合分析,揭示关键层(坚硬岩层)、隔水岩层(软弱岩层或风化岩层)和开采参数对覆岩导水通道的动态控制机理,研究采场顶板破断及破断岩块再组合压实过程中导水裂隙场的扩展、闭合普遍演化过程,进行浅埋煤层长壁工作面保水开采适用条件分类,构建保水开采技术体系,以求实现主动解决浅埋煤层保水开采问题。

(2) 保水开采的研究现状

国外迄今虽然没有明确提出与保水开采相似的采矿理念,但其对地表水和地下水受浅埋煤层开采影响后的实测和规律分析方面研究的比较深入,且已逐步扩展到对矿区及区域内的生物(植物、鱼类和候鸟等)种群的影响研究。

其中比较有代表性的成果是 C. J. Booth 等在美国伊利斯诺州进行的,长达 7 年的长壁工作面上覆砂岩含水层的观测研究。该研究系统分析了煤层开采后地表的沉陷特点,及由此引起的砂岩含水层水压、渗透性、储水能力及水理性质的正面和负面变化,并且描述了不同区域开采后水位恢复过程和水质变化特点。在此基础上,C. J. Booth 提出长壁开采因对地下水有影响而应予以限制,尽管因开采导致的与沉降相伴随的覆岩破裂所引起的采动影响范围几百米内的地下水位下降一般是可以恢复的。此外,G. Pessaran 在其博士论文中详细地介绍了英国某矿区进行了多年的地下水位观测成果,并得到了与 C. J. Booth 基本类似的结果,并提出了地表水向地下采空区的渗透形成地下水库的观点。A. Karaman 等人就开采区域水井的水位变化与长壁工作面的开采边界的关系进行了动态研究,通过相关分析可以得到采动覆岩含水层的渗透系数和储水系数等参数,进而可对含水层水位的变化进行预测。J. M. Kim 等人采用有限元方法,研究了采动条件下的覆岩破裂变形和地下水流动的耦合关系,并就水位下降的动态过程进行了描述。还有文献就地面生态环境受地下矿床开采的影响开展了许多研究,例如区域水质、供水水源、泉域、河流或生物(如鱼的种群和植物种群等)在其地下或邻近矿区开发后的变化等。研究还发现,地下长壁工作面开采后,尽管部分区域的含水层的水位可以恢复,但其地球化学性质发生了明显的短期内不可恢复的变化。

但国外鲜有文献提出具体的开采方法,从采矿的角度去系统解决上述难题。近年来,随着数值模拟算法成为岩石力学与工程研究的一个热点,国外有人开始采用数值模拟计算的方法研究地表变形与地下水位下降的固结耦合关系,且许多文献都开始尝试采用数值计算来研究采动覆岩与地下水活动规律之间的关系等矿山问题,尤以数值模拟本身的算法改进研究比较多。

国内自 20 世纪 90 年代初,陕西煤田地质局专家范立民开始从工程地质的角度,对陕北煤炭开采过程中的地下水保护进行了叙述,首次提出了保水开采(保水采煤)这一思想。此后,范立民等学者一直致力于对陕北榆神府矿区保水采煤研究。按照范立民等人的设想,保水采煤研究的主要任务是开展煤炭资源、水资源和生态环境的综合勘查,在查明各种资源空

间分布特征的基础上,运用煤田地质、水文地质、工程地质、环境地质、采煤科学、岩体力学等学科的理论和方法,结合室内模拟实验划分出不同的分区,区分出采煤对生态环境不产生影响的地区、采煤塌陷区和过渡区,在此基础上进行矿区规划和采区布置,指导煤矿采用不同的采煤方法或相应的工程技术措施,使采煤对地下水和生态环境的影响最小化。重点从煤田水文地质角度出发,建议进一步加强基础地质勘查与研究,进行煤炭资源、水资源及开采条件的综合勘查研究工作,从三维空间角度探明煤、水、岩等的组合形态等。

此外,叶贵钧以水文工程地质条件研究为基础,给出了榆神府矿区土地沙漠化、水土流失和水环境受开采影响的预期结果,提出了实现保水采煤的水工技术方案和工程措施建议。李文平以煤田地质勘探资料为基础,分析总结了榆神府矿区与保水采煤相关的工程地质条件特点,进行了工程地质条件分区,初步讨论了不同工程地质区保水采煤的可能性。按主采煤层的上覆岩层分布空间及其组合形态特征,将其划分成五大类:沙土基型、沙基型、土基型、基岩型、烧变岩型。

此后,“九五”国家科技攻关计划专题项目“采矿条件下地下水环境效应及水资源保护利用初期研究”,对大柳塔煤矿从井田地质、首采区 20601 工作面上覆岩层的分布特征和试采区(已采空)1203 工作面地表塌陷动态监测数据的数学模拟等多方面研究,取得了以下认识:保护水资源的根本所在是通过改善顶板管理方法保护好含水层的结构,使其免遭破坏。煤炭科学研究总院北京开采所和西安分院水文所,合作完成了“矿井水、地表塌陷与采矿相关性初期研究”项目,初步掌握了该区的水文地质特征和覆岩破坏规律。

近年来,中国矿业大学缪协兴教授进行了采动岩体的渗流试验,研究了峰后破裂岩体和破碎岩体的渗流特性,并将其应用于包括煤矿突水与瓦斯突出机理的研究上,取得了许多成果,可以指导煤矿保水开采实践。西安科技大学侯忠杰、师本强、张杰等研究人员从开采方法的角度对陕北榆神府矿区保水采煤方法进行了研究。在对顶板地质条件进行初步分类的基础上,采用现场地质评价、流固耦合实验、理论分析和数值模拟等方法,分析了厚松散层富含潜水下以及河流下浅埋煤层保水开采的可能性,提出了间歇式开采的保水开采方法,并对间歇式开采的合理推进距离和煤柱保水(防水)尺寸,以及流固耦合的相互作用规律等问题进行了研究。间歇式开采虽然缓和了上覆岩层的破坏并抑制了导水裂隙带的发展,是目前一种可行的保水开采方法,但要应用于长走向大尺寸长壁工作面大范围开采还有一定的局限性。

曾有人提出用旺格维利采煤法实现浅埋煤层保水开采。以前认为该方法采出率低,开采工艺相对落后,不值得提倡,但随着连续采煤机的大规模应用,连续采煤机房柱式体系旺格维利采煤法的保水意义有待进一步研究。也有研究人员最近提出充填式采煤的设想,在工作面回采过程中,随时对采空区进行充填,减少顶板破坏,来达到保水开采的目的。但大面积的充填在经济上是否可行,有待于必要的试验研究。此外,还有人提出降低采高等方法实现水资源的保护,但这会降低煤炭资源的回收率。

国内对保水开采较早进行系统研究的应属由中国煤田地质总局负责,陕西煤田地质局 185 队、中煤水文地质局和中国矿业大学等单位协作,承担开展的“中国西部侏罗纪煤田(榆神府矿区)保水采煤与地质环境综合研究”。该课题初步奠定了保水采煤研究的基础。这一研究主要从煤田地质学、水文地质学角度研究了以“厚松散层浅埋藏煤层”顶板裂隙水、孔隙水为特征的煤田的一些问题,特别是对榆神府矿区侏罗纪煤层开采对顶板含水层的破坏现

状进行了调研和叙述。但由于这一课题的研究地域广,研究深度不能满足保水与生态环境保护的需求,未涉及具体的开采模式,也没有考虑煤矿高产高效等问题,没有提出具体的有针对性的保水开采技术方法。后来,由于国家煤炭工业局撤销,已形成初步成果的研究被迫中断。

王双明、黄庆享、范立民在著作《生态脆弱区煤炭开发与生态水位保护》中,首次对整个陕北侏罗纪煤田的保水开采进行区域性的系统论述和深入研究,运用煤地质学、水文水资源学、生态与环境科学和采矿工程等多学科的理论和方法,研究了陕北侏罗纪煤田生态脆弱区煤—水—生态环境的空间配置特征等,划分了基于生态水位保护的开采条件分区,最终提出了适用于该区不同地质条件的采煤方法。

为适应当前浅埋煤层普遍采用长壁工作面大规模开采的现状,保水开采必须掌握、监测及控制上覆岩层移动过程中的裂隙场分布特征,分析清楚采动覆岩由下向上变形、破裂、闭合过程中导水通道的动态形成和闭合的可能性及其规律,为此必须研究浅埋煤层采动覆岩导水通道分布特征及其控制技术。

1.2.3 研究基础

(1) 岩层控制研究

覆岩导水通道的问题都是由采动所引起,首先得解决煤层顶板控制问题,岩层控制理论与实践的发展为这一问题的解决奠定了基础。采矿工程实践中普遍存在层状岩体破断后的块体与连续块体及块体与块体之间的铰接力学行为,正是这些行为构成了采场矿山压力显现。以对采场支护影响较大的下部岩层为研究对象,采矿界提出了多种假说与理论。钱鸣高院士从采煤工作面矿山压力控制的角度出发,以研究硬岩的破断规律为主体,建立了砌体梁理论,对坚硬岩层板模型的破断规律进行了研究,成功解释了包括顶煤采场在内的支架受力问题,为采场矿压显现的科学解释、预测预报与控制提供了理论基础,形成了矿山压力及其控制的完备理论体系。近年来,砌体梁理论也在进一步深化,正不断由下部采场矿山压力的研究转向上部岩层移动的研究。其研究的发展已从假说和模型进入定量化,并提出了关键层理论,其学术思想处于固体力学研究领域的前沿。

此外,将基本顶岩层视为夹持在弹性基础上而呈悬露状态的板时,其呈现的破断规律才能真正反映出回采过程中的真实状况。板模型对采场顶板的研究表明,在不同的支撑条件下,板达到极限垮落度时会形成各种“O—X”型破坏,具体的破断参数与顶板岩性及采场几何参数有关。但以前的采矿研究中基本以坚硬顶板为研究对象,应用板理论,考虑下伏垮落和断裂岩石的垫层支撑效应,对软弱隔水岩层的破坏规律进行系统研究和实践的文献尚不多,本书进行了尝试研究。

(2) 浅埋煤层开采研究

大型浅埋煤田在国外并不多,较为典型的是莫斯科近郊的煤田和美国 Appalachian 煤田,这些矿区的地表主要为表土层。前苏联根据莫斯科近郊煤田浅埋条件,对其进行矿山压力研究后指出:在埋深 100 m 且存在厚黏土层条件下,放顶时支架出现超载现象,说明浅埋煤层顶板来压迅猛。20 世纪 80 年代初,澳大利亚对新南威尔士浅埋长壁开采的一些矿压现象进行实测,发现采空区迅速压实,煤壁附近顶板岩层迅速发生整体移动。

国外虽有浅埋煤层的存在,但是覆岩中的积沙厚度仅为 3~6 m 左右,煤层厚度约 3 m 左右,且沙层底部的潜水也少得多,所以鲜有对沙基型浅埋煤层的专门研究。但值得提及的

是,美国许多关于煤层开采对地表水和地下水影响规律的观测和研究都是在 Appalachian 浅埋煤田展开的。C. J. Booth 等人通过多年的基础性观测工作,得出了一些普遍性分析结论,可为我们开展浅埋煤层导水通道分布特征及其控制研究提供有益借鉴。

自 20 世纪 90 年代初,石平五、侯忠杰和黄庆享等教授,以及孙宝铮和马云东等教授开始对我国西部浅埋煤层开采问题进行研究,从基岩破断规律、顶板破断机理及其控制、基岩及上覆盖层结构和来压规律、顶板支护、采煤方法等不同角度提出了一系列开采理论。黄庆享教授以浅埋煤层顶板结构及其稳定性控制为核心,分析了浅埋煤层矿压特征,对浅埋煤层定义进行了阐述,系统介绍了浅埋煤层顶板破断机理和规律,确定了岩块结构定量分析参数,提出了初次来压和周期来压的顶板结构理论,建立了浅埋煤层顶板控制的基本框架,为浅埋煤层的顶板支护及保水开采奠定了基础。

1.3 展 望

煤层开采后形成了覆岩裂隙场,引起了地下水在采动破坏岩体内的渗流问题。因此,在保水开采的具体研究手段上应涉及流固耦合问题。但目前在整个岩石力学工程领域,流固耦合理论和研究手段大都是针对完整岩体的。涉及采动破坏岩体,尤其是煤层开采后大范围采动覆岩断裂破坏的成果还很少。国内外对耦合作用的研究主要是耦合作用机制的研究,集中在建立渗透系数与应力应变之间的关系方程上,建立相应数学模型。以连续介质概念为基础的宏观研究方法,岩体破裂后其渗透性的演化及其对力学行为的响应,目前只局限于试验研究,需要从工程实际出发,进行三维流固耦合模拟实验研究。

随着采煤工作面推进,上覆岩层移动过程中导水裂隙场由下向上发展不同时期、不同区域的动态分布规律及其渗流量和渗流速度的定量描述,还没有好的理论判断方法。目前最实用的还是采用经验公式预计导水裂隙带最大高度或将塑性区和围岩变形量超过某一定值的区域判定为导水范围。这些方法将采动破坏区域视为导水区域,没有深入研究采动覆岩的流固耦合特性和软、硬岩层的耦合关系,以及相伴随的导水通道的起始、扩展、闭合的动态发展规律。此外,采动覆岩中软弱隔水岩层对导水通道的控制作用及其破裂规律都是亟待研究的问题。

合理的采场支护可以预防浅埋煤层顶板发生台阶下沉,局部影响导水通道发育形态,减少水资源流失。但已有浅埋煤层工作面支护阻力计算公式中的参数较多,尤其是在采前进行支架设计和选型时,难以定量确定这些参数。且所有这些计算方法都对时间因素及荷载传递系数考虑不足,没有涉及多个硬岩层相互影响和作用的情况。确定合理的采场支护阻力仍是未来采矿学者需要研究的问题之一。

浅埋煤层长壁工作面保水开采机理的形成与发展,需要岩层控制的关键层理论和采动岩体力学基础的建立,同时,也将促进关键层理论和采动岩体力学的完善和发展。

2 神东矿区浅埋煤层覆岩地质特征

我国西部赋存着大量的浅埋煤田,目前和将来很长一段时间内我国煤炭资源的开发都将逐步围绕浅埋煤田开展。由于目前保水开采的研究和实践基本都在神府—东胜等浅埋煤田开展,所以本章介绍了神东矿区的煤田地质概况,并围绕其沙基型薄基岩的空间分布及其结构特征,进行了分类,为沙基型浅埋煤层导水通道分布特征及其控制研究提供基础条件。

2.1 矿区地质概况

神府东胜矿区是神东煤田的一部分,矿区南北长约为 38~90 km,东西宽约为 35~55 km,面积约为 3 481 km²,位于晋、陕、蒙三省接壤处鄂尔多斯大型聚煤盆地的东北部,地处鄂尔多斯高原的毛乌素沙漠区,地表为流动沙及半固定沙所覆盖,最厚可达 10~50 m,沙漠化及潜在沙漠化土地面积约占总面积的 85%。图 2-1 所示为矿区原始地貌及分布范围。

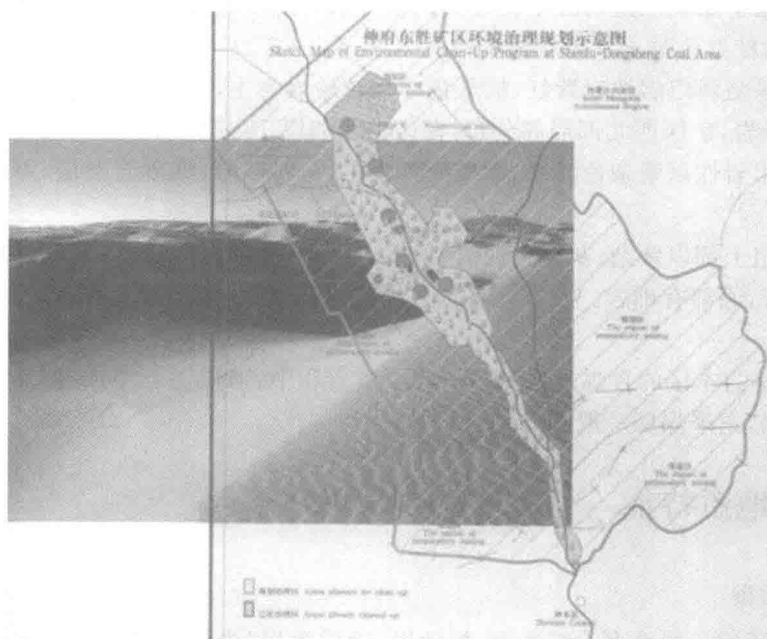


图 2-1 矿区原始地貌及分布范围

矿区属典型的半干旱、半沙漠的高原大陆性气候,风沙频繁,年降雨量平均为 194.7~531.6 mm,降水多集中在 7 月,8 月,9 月三个月,而且蒸发强烈,年蒸发量为 2 297.4~2 838.7 mm。由于地形地貌的原因,降水大部分形成地表径流而流失,不利于地下水的补给

渗入,渗入岩土层的不足 15%。地形切割强烈,沟谷纵横,大气降水多沿沟谷以地表水的形式排泄,地下水径流速度缓慢;由于构造简单,岩层产状平缓,构造裂隙不发育,不利于地下水的储集,而且形成本区承压水头高但水量小的特点;本区水文地质条件的基本特点是地下水较贫乏,总量相对较少,但往往在局部富集,对煤层开采构成威胁。

矿区总体以单斜构造为主,地质构造简单,断层发育较少,岩层裂隙不发育;从区域地质构造分析,煤田位于鄂尔多斯台向斜内次一级构造东胜台凸与陕北单斜翘曲交界处。中心区属于侏罗纪煤田,主要含煤地层延安组发育广泛,煤层主要是侏罗系一套黄绿色砂岩、泥岩与煤层的互层,从上到下可分为 5 个含煤组,有 13 个煤层,其中可采煤层有 7~8 个,总厚度超过 30 m。煤系地层近似水平,微向南倾,分布稳定、构造不发育,是大规模机械化采掘的理想煤田。主要可采煤层包括 1^{-2} 、 2^{-2} 、 3^{-1} 、 4^{-2} 和 5^{-2} ,其赋存特点是:浅埋深(大部分在 100 m 左右)、薄基岩(最小仅 1.4 m)、厚松沙(在基岩之上为 10~50 m 厚的风积沙)、富潜水(在松散层中有水柱高达 10 m 的地下潜水)。

矿区内地层比较具体的描述如下:

(1) 风积沙分布广泛,是地表沙漠的组成物质,以浅黄色粉细砂为主,厚 0~50 m;

(2) 萨拉乌苏组分布广泛,是区内最主要的含水层,岩性以中细砂为主,厚 0~145 m,其厚度受控于基岩顶面古地形,为一套河湖相沉积物;

(3) 离石组分布不连续,岩性为灰黄、棕黄色亚砂土、亚黏土,夹多层古土壤,具柱状节理,厚 0~150 m;

(4) 新近系上新统三趾马红土在各大沟系分水岭地带有出露,分布不连续,在矿区呈零星分布,岩性为棕红色黏土及粉质黏土;

(5) 白垩系洛河组岩性以紫红、橘红色中粗粒砂岩为主,巨厚层状,胶结疏松、大型交错层理,底部为砾岩,矿区西北部局部分布,在区内一般厚 18~30 m;

(6) 安定组岩性以紫杂色泥岩、砂质泥岩为主,与粉砂岩、细砂岩互层,厚 0~114 m,平均 30~40 m;

(7) 直罗组上部以紫杂、灰绿色泥岩、粉砂岩为主,夹砂岩透镜体;下部以灰白色砂岩为主,夹泥岩条带,底部有砾岩。在矿区各沟谷上游出露,风化裂隙较发育,厚 0~134 m,平均 30~50 m;

(8) 延安组为本区的含煤地层,由中、厚层砂岩和中、薄层泥岩组成,厚 150~280 m,含可采煤层 13 层,主采煤层一般 3~6 层。

2.2 覆岩地质特征

2.2.1 岩土类型

本区煤层顶底板岩性多为细砂岩、粉砂岩、砂质泥岩(少量有泥岩及中粗粒砂岩),可将其分为 3 大工程类型,分别为:

(1) 土质岩类

包括松散沙层、黄土层、红土层、亚砂土、亚黏土层、砾石层和冲积层,岩性疏松。

(2) 软弱岩类

主要指风化岩层、煤层和泥岩夹层,位于基岩顶部的风化岩,抗压强度小于 30 MPa,岩