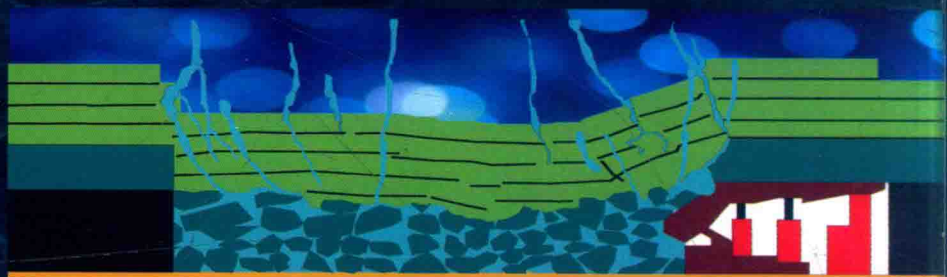


生态潜水流场的 采煤扰动与优化调控

夏玉成 代革联 等 著



科学出版社

生态潜水流场的采煤扰动 与优化调控

夏玉成 代革联 等 著

国家国际科技合作专项项目（2012DEG71060）资助

国家自然科学基金项目（41272388）资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在中华人民共和国科学技术部国际科技合作专项项目“开采沉陷矿区生态潜水保护技术研究”的基础上撰写而成。本书比较系统深入地分析了陕北侏罗纪煤田在高产高效开采条件下煤层覆岩的移动破坏特征,揭示了具有区域供水意义和生态价值的第四纪潜水含水层受煤炭井工开采扰动后地下水流场的变动规律,提出了生态潜水流场的优化调控策略及减缓地下水流失灾害的关键技术参数,为在我国陕北能源重化工基地实现煤炭资源开采与地下水保护的双赢提供了地质依据,同时,对矿井水害防治具有重要的参考价值。

本书可供在矿产资源开采与生态环境保护领域从事生产、教学、科研和管理工作的技术人员阅读参考,也可作为高等院校地质、采矿、环境、安全等学科专业的高年级学生和研究生学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

生态潜水流场的采煤扰动与优化调控/夏玉成,代革联等著. —北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-044694-7

I. ①生… II. ①夏… III. ①地下采煤—影响—地下水资源—研究
IV. ①TD823 ②P641.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 124204 号

责任编辑: 童安齐 王杰琼 / 责任校对: 刘玉靖

责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 7 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2015 年 7 月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 235 000

定价: 70.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

我国是世界上煤炭资源消耗最多的国家，多年来煤炭产量稳居世界第一。由于煤炭资源的开采而诱发的采煤沉陷和地下水流失已成为导致煤矿区生态环境恶化的主要人为灾害之一，煤炭开采-水资源破坏-环境退化日益成为政府和社会高度关注的热点，也是目前学术领域研究的重点。陕北侏罗纪煤田是中国 14 个特大型煤炭生产基地之一，在国家经济建设中具有重要的地位，煤炭资源开采与水资源保护之间的矛盾尤为突出。近年来国内外相关领域的专家学者围绕覆岩导水裂隙带高度预测和“保水采煤”问题开展了多方面卓有成效的研究工作。从总体上看，目前“保水采煤”理念已经深入人心，基本思路已经形成，但如何实现这一目标仍缺乏必要的理论与技术支持。根据不同地区工程地质及水文地质条件的特殊性，科学地揭示冒裂带发育高度与地下开采强度之间的关系以及由此而引起的地下水流场的垂向和侧向变动规律，以生态环境保护和煤炭资源开采“双赢”为目标，提出地下水流场的优化调控策略及减缓地下水流失灾害的关键技术参数，既是当前煤矿开采与环境保护领域亟待解决的难题，也是“保水采煤”技术研究的的发展趋势。

我国和南非在对矿区环境问题的研究方面各有特色，具有很强的互补性。西安科技大学在开采沉陷机理和开采沉陷预计等方面的研究工作，已经取得了富有特色的研究成果。南非地球科学研究院长期致力于矿区地下水保护等方面的研究工作，尤其在地下水流失、矿井水污染处理和开采造成的环境退化恢复方面开展了大量的研究和实践，取得了宝贵的经验和大量的研究成果。中华人民共和国科学技术部于 2011 年批准，由西安科技大学和南非地球科学研究院合作开展“开采沉陷矿区生态潜水保护技术研究”，该课题为国家国际科技合作专项项目“矿产资源安全高效开采加工关键技术合作研究”（项目编号：2012DEG71060）的子课题之一。

本书在该课题研究的基础上撰写而成，以煤炭资源开采引起的导水裂隙带发育规律及其对生态潜水流场的影响为主线，从陕北侏罗纪煤田地质概况与开发现状的介绍入手，依次论述研究区天然条件下生态潜水的赋存规律、导水裂隙带发育高度的预计方法、研究区冒裂带发育规律以及在开采扰动下生态潜水流场的垂向变动规律、生态潜水流场对采煤扰动的侧向响应、陕北侏罗纪煤田生态潜水流场的优化调控策略及关键技术等。科学地揭示了生态潜水含水层受开采扰动后地下水流场的变动规律，探究了以减轻煤炭开采引起生态潜水流失灾害，保护地下水资源为目标的矿区生态潜水流场优化调控策略及其关键技术参数。本书介绍的

研究成果可以为科学制定“保水采煤”策略，实现煤炭资源合理开发与生态环境保护协调发展提供科学基础和技术依据，同时对实现矿井的安全生产也具有重要的参考价值。希望本书能为丰富完善开采沉陷学理论和“绿色矿区”建设理论，以进一步提升我国在开采沉陷与地下水保护方面的科学技术水平有所裨益。

本书由夏玉成负责确定全书的基本架构并审定全书内容；代革联负责全书统稿工作。具体撰写分工为：第一章由夏玉成、代革联撰写；第二章由代革联、夏玉成、汤伏全、侯恩科撰写；第三章由代革联、杜荣军撰写；第四章由王悦、代革联撰写；第五章由王悦、杜荣军、贾海莉撰写；第六章由杜荣军、代革联、肖良撰写；第七章由孙学阳、代革联、邵小平、林立相撰写。

本书出版得到中华人民共和国科学技术部国家国际科技合作专项项目“矿产资源安全高效开采加工关键技术合作研究”（项目编号：2012DEG71060）之“开采沉陷矿区生态潜水保护技术研究”课题的资助。在本课题研究及本书撰写过程中，西安科技大学课题组与南非地球科学研究院首席科学家林立相博士为首的课题组开展了卓有成效的合作。南非西开普敦大学地球科学系资深教授、联合国教科文组织地下水主席兼授衔教授、非洲水资源部长委员会地下水顾问徐永新博士对本课题研究给予了帮助。研究生陈通、许武、陈聪、王超平、赵龙、王传涛、刘美乐、周英、高哲、杨韬等也参与了部分工作，做出了重要贡献。在本书出版之际，谨向为本书的研究和出版工作给予支持和帮助的所有单位和个人，以及参考文献的作者致以最诚挚的感谢！

由于著者水平所限，加上写作时间仓促，书中难免存在不当之处，真诚欢迎同行专家与广大读者批评指正。

夏玉成 代革联

2015年2月

于西安科技大学

目 录

前言	
1 绪论	1
1.1 煤炭开采引起的生态环境问题	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 煤矿区开采损害规律	3
1.2.2 井工开采对地下水流场的影响	6
1.2.3 导水裂隙带发育高度的探测与预计	7
1.2.4 地下水渗流的影响因素及调控技术	9
1.2.5 陕北侏罗纪煤田“保水采煤”研究	10
1.3 进一步研究的方向与意义	12
2 陕北侏罗纪煤田地质概况与开发现状	14
2.1 自然地理	14
2.1.1 交通位置	14
2.1.2 地貌类型	14
2.1.3 气象条件	16
2.2 地质概况	17
2.2.1 地层	17
2.2.2 构造	19
2.2.3 可采煤层	21
2.3 煤田勘探与开发现状	22
2.3.1 开发规划	22
2.3.2 勘探程度	23
2.3.3 生产与开发现状	23
2.4 开采沉陷与水资源破坏现状	24
2.4.1 采动条件下岩层移动与破坏特征	24
2.4.2 地表开采沉陷的类型与特征	26
2.4.3 水资源赋存与破坏特征	30
2.4.4 “涌水溃沙”对矿井安全的影响	33
3 天然条件下生态潜水赋存规律	35
3.1 区域地下水流系统与水文地质单元	35
3.1.1 区域地下水流系统的划分	35

3.1.2	区域地下水流系统的特征	37
3.1.3	研究区水文地质单元	38
3.2	生态潜水流场的基本特征	41
3.2.1	生态潜水含水层横向分布特征	41
3.2.2	生态潜水含水层垂向赋存特征	43
3.2.3	生态潜水的补给、径流与排泄规律	45
3.2.4	生态潜水含水层的富水程度分区	48
3.2.5	生态潜水的水位变化特征	52
3.2.6	生态潜水的量与开发利用现状	59
3.3	关键隔水层及其隔水性能稳定性	60
3.3.1	关键隔水层的空间分布	60
3.3.2	关键隔水层的物理力学性质与水理性质	62
3.3.3	关键隔水层对生态潜水的的影响	63
3.3.4	关键隔水层隔水性能的变化	64
3.4	煤层-地下水空间组合关系	70
3.5	岩体-水力学结构模型	72
3.6	生态潜水流场准三维非均质各向同性渗流动态数值模型	73
4	导水裂隙带发育高度的预计方法	75
4.1	经验公式预计法	75
4.2	理论分析预计法	76
4.2.1	理论分析的基本流程	76
4.2.2	理论分析法的预计实例	80
4.3	实测法	86
4.3.1	实测实例	86
4.3.2	实测结果的统计分析	88
4.4	数值模拟法	89
4.4.1	基本参数	89
4.4.2	模拟结果	91
4.5	物理模拟法	108
4.5.1	实验的基本参数	108
4.5.2	覆岩移动变形破坏过程分析	109
4.5.3	导水裂隙带发育高度的分析	111
4.6	研究区导水裂隙带发育高度	112
5	导水裂隙带发育规律及其对生态潜水流场的垂向扰动	113
5.1	导水裂隙带发育高度与煤层覆岩结构的关系	113
5.2	导水裂隙带发育高度与煤层开采厚度之间的关系	114

5.2.1	地表下沉曲线对比分析	114
5.2.2	采高对冒裂带高度的影响	116
5.3	导水裂隙带发育高度与工作面长度之间的关系	122
5.3.1	主应力对比分析	122
5.3.2	地表下沉曲线对比分析	124
5.3.3	工作面长度对冒裂带高度的影响	125
5.4	导水裂隙带发育高度与工作面推进距离之间的关系	129
5.5	分层开采对导水裂隙带发育高度的影响规律	130
5.6	受采煤影响的生态潜水流场垂向扰动规律	131
5.6.1	采煤对井田内生态潜水流场的垂向扰动	132
5.6.2	采煤对矿区生态潜水流场的垂向扰动	134
5.7	生态潜水流场垂向变动的动态数值仿真	137
5.7.1	数值模拟实验模型	139
5.7.2	关键隔水层稳定时导水裂隙带高度与潜水垂向降深的关系	140
5.7.3	关键隔水层失稳时导水裂隙带高度与潜水垂向降深的关系	148
6	生态潜水流场对采煤扰动的侧向响应	152
6.1	生态潜水流场影响半径的确定	152
6.2	关键隔水层破坏前生态潜水流场对采煤扰动的响应	153
6.3	关键隔水层破坏后生态潜水流场对采煤扰动的响应	155
6.4	生态潜水流场侧向变动的动态数值仿真	157
7	陕北侏罗纪煤田生态潜水流场的优化调控	160
7.1	生态潜水流场受采煤影响程度分区	160
7.2	限高开采	161
7.3	限面积开采	168
7.4	条带开采	171
7.5	上行开采	178
	主要参考文献	182

1 绪 论

1.1 煤炭开采引起的生态环境问题

煤炭是目前全球储量最丰富的化石燃料，不论作为能源，还是作为化工原料，在促进全球经济发展特别是可持续发展方面，都发挥着极其重要的作用。煤炭作为中国的主要能源，在国民经济建设中具有重要的战略地位。根据国家统计局发布的年度统计公报，进入 21 世纪以来，中国原煤产量呈直线式增长（图 1.1），从 2001 年的 11.1 亿 t 快速增加到 2014 年的 36.8 亿 t。原煤生产总量占能源生产总量的比重虽有波动，但自 2003 年以来，一直在 75% 以上（图 1.2）。中国煤炭消耗量 2001 年不到 14.5 亿 t 煤，2014 年达到约 37 亿 t（图 1.3）。随着中国取代美国成为原油进口第一大国，在中国一次能源消费结构中，煤炭消费总量占能源消费总量的比重已经从最高位 71.1%（2007 年）下降到 64.2% 的历史最低位，但煤炭仍将是中国的最主要能源（图 1.4），煤炭供给直接关系到国家能源安全。

另一方面，中国每年生产的原煤大约有 95% 来自井工开采，由井工开采诱发的采煤沉陷和地下水流失已成为导致煤矿区生态环境恶化的主要人为灾害之一，煤炭开采-水资源破坏-环境退化日益成为政府和社会高度关注的热点。

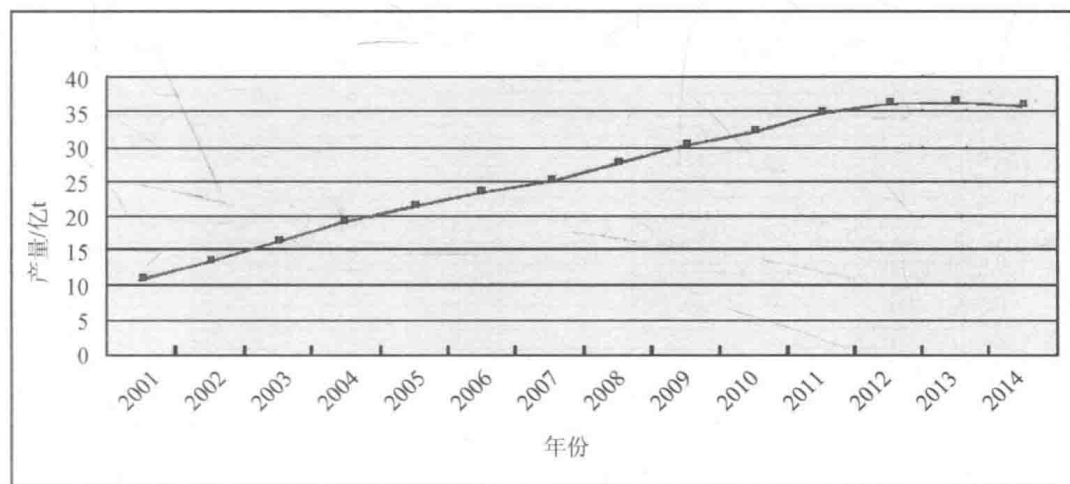


图 1.1 原煤产量增长趋势

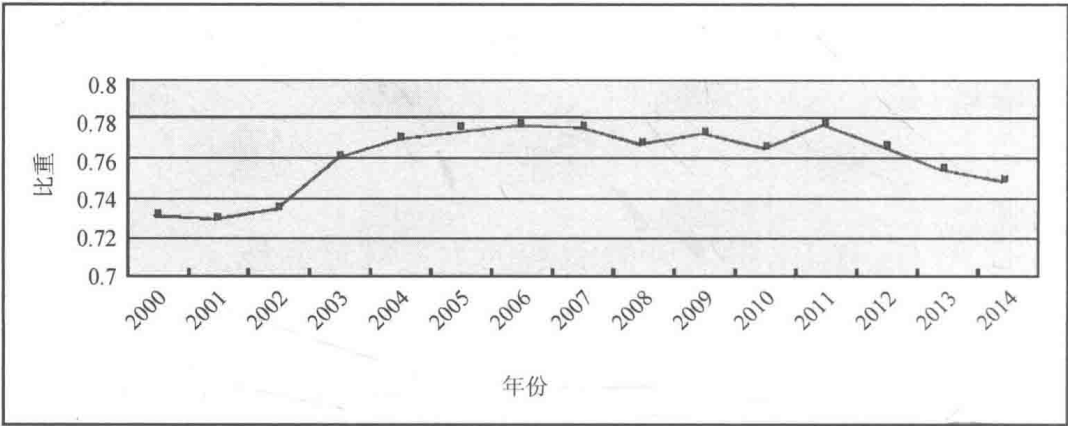


图 1.2 原煤占能源生产总量的比重

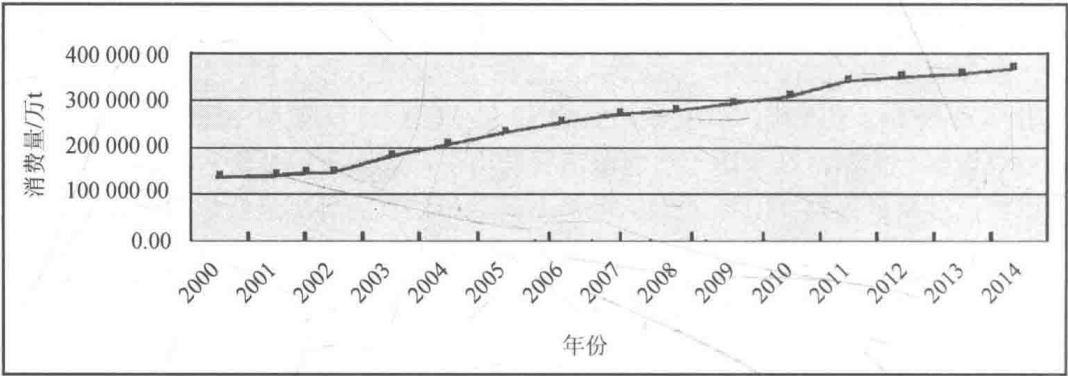


图 1.3 煤炭消费量增长趋势

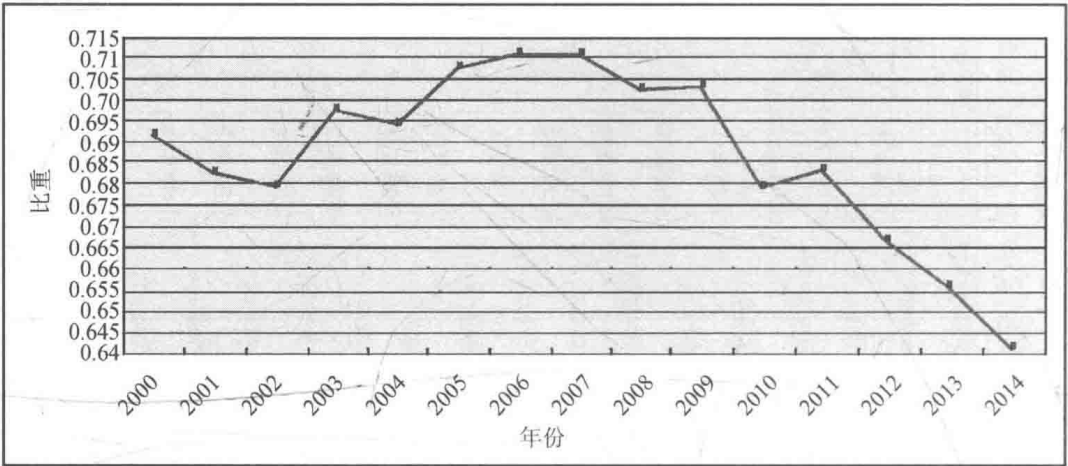


图 1.4 煤炭占能源消费总量的比重

陕北侏罗纪煤田地处毛乌素沙漠南缘，蕴藏有特低灰、特低硫、特低磷、中高发热量的动力煤和化工用煤，是中国现已探明的煤炭资源储量最大的煤田之一，

煤炭资源约占中国总量的 14%，是中国 14 个特大型煤炭生产基地之一。煤炭储量丰富、煤质优良、地质构造条件简单、开采技术条件优越，先后建成一批单个工作面年产原煤超过千万吨的现代化矿井，大量采用超大工作面一次采全高或放顶煤等高效开采技术，为国家经济建设生产了大量优质能源。但这些优质的环保型煤炭资源主要赋存于地表生态环境十分脆弱的毛乌素沙地之下，主采煤层上方广泛分布有萨拉乌苏组潜水（水质优良，是目前陕北沙漠滩地前缘地区居民生活与工农业生产的重要水源，也是维系沙漠滩地区植被生长的生态水源，本书将其称为生态潜水），在垂向空间构成了有机联系的地表生态环境-地下水资源-煤炭资源系统。在这样一个水资源贫乏，生态环境脆弱地区大规模开发煤炭资源，既造成地面塌陷、地裂缝等地表环境灾害，又对开采区的水文地质条件产生巨大影响，诱发地下水流场改变、地下水位急剧下降、泉水干涸、河流基流量大幅度衰减和流域生态环境恶化等一系列环境问题，以致严重影响到矿区群众的生活。“全国第一产煤大县”神木县，煤炭开采形成采煤塌陷区面积 30km^2 以上，受灾人口 3600 多人，20 多个井泉干枯，数十条河流断流，植被枯死，地表荒漠化加剧，致使当地许多居民陷入“无地、无水、无房”的生活困境。

地下水的流失主要是由于采煤形成的导水裂隙与含水层的上下连通。煤炭资源被开采后，其所形成的采空区引发煤层上方覆岩向采空区的运移，在上覆岩层中依次形成冒落带和裂隙带。当冒裂带（冒落带和裂隙带的统称）破坏至上层隔水层，将导致地下水经由新生的裂缝涌入矿坑，打破地下水流场原有的天然平衡状态。为保证正常的开采条件，煤矿需采取疏干降压以及外排矿井废水等手段，减少顶板水压及从巷道和回采面不断涌出的地下水对生产造成的影响。这一方式将引起区域内地下水位下降、泉水衰减或干枯、地表径流减少或断流，从而导致生态环境被破坏、居民生活取水困难，同时造成了水资源浪费，而产生的大量矿井废水又将污染自然环境。

因此，如何协调优质煤炭资源开发和稀缺水资源保护之间的关系，实现科学开采、绿色开采，已成为陕北能源化工基地建设中迫切需要解决的重大课题，不仅关系到陕北老区的可持续发展，也关系到国家的能源发展战略。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 煤矿区开采损害规律

1. 采空区覆岩“三带”发育模式

大范围的煤层被开采以后，其覆岩要发生移动和破坏。长期的观测证实，覆岩移动和破坏具有明显的分带性，其特征与地质、采矿等因素有关。在采用走向长壁全部冒落法开采缓倾斜中厚煤层的条件下，只要采深达到一定的深度（采深

H 与采高 m 之比 $H/m > 40$), 覆岩的破坏和移动会出现三个明显不同的部分, 自下而上分别称为: 冒落带、裂隙带和弯曲带 (图 1.5)。

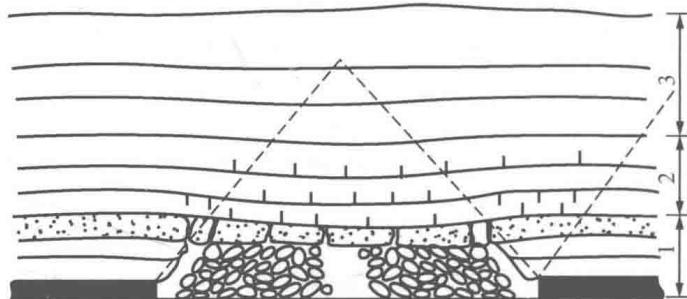


图 1.5 覆岩“三带”示意图

1—冒落带；2—裂隙带；3—弯曲带

(据何国清, 1991)

冒落带也称为垮落带, 是指脱离母体, 呈不规则岩块或似层状巨块向采空区冒落的那部分岩层。冒落带位于覆岩的最下面, 紧贴煤层。煤层采空后, 上覆岩层失去平衡, 由直接顶岩层开始冒落, 并逐渐向上发展, 直到开采空间被冒落岩块充满为止。

裂隙带又称裂缝带, 是位于冒落带之上, 具有与采空区相通的导水裂隙, 但连续性未受到破坏的那一部分岩层。裂隙带的裂隙主要有两种: 一种是于岩层垂直或斜交的新生张裂隙, 主要因岩层向下弯曲受拉而产生, 它可部分或全部穿过岩层分层, 但其两侧岩体没有明显的相对位移; 另一种是沿层面发育的离层裂隙, 因其要占据一定空间, 所以离层裂隙的出现可致使上部覆岩的下沉量减少。地表下沉量一般小于煤层开采厚度, 除冒落岩块碎胀外, 裂隙带的离层也是其主要原因, 离层裂隙是储水和导水的通道。当垂向裂隙逐渐发育增强, 离层裂隙和垂向裂隙会连通, 导水性明显增加, 并能向下渗流至采空区, 故裂隙带又称导水裂隙带。导水裂隙带若与水体沟通, 可将水导入井下。但由于裂隙宽度及途径转折限制, 一般不透泥沙, 特别是其上部, 透泥沙的可能性很小。

裂隙带随采区扩大而向上发展, 当采区扩大到一定范围时, 裂隙带高度达到最大。此时采区继续扩大, 裂隙带高度基本上不再发展, 并随着时间的推移, 岩层移动趋于稳定, 裂隙带上部裂隙逐渐闭合, 裂隙带高度也随之降低, 一般在采空区形成两个月左右后, 裂隙带发育最高。厚煤层分层开采时, 裂隙带总高度比开采一个分层大, 但比一次采全高形成的裂隙带高度要小得多。

弯曲带又称弯曲下沉带, 位于裂隙带之上直至地表。弯曲带中的岩层移动, 基本上是成层的、整体性的移动。弯曲带的下部可能出现离层和不导水的细微裂缝。

上述岩层移动的分带性特征, 可能随地质和采矿条件的变化而变化。例如,

当采用长壁式全部填充采煤法时,仅出现裂缝带和弯曲带,而不出现垮落带;当煤层较厚而开采深度较小时,裂缝带可能直接波及到地表,而不出现弯曲带。开采急倾斜煤层时,不仅煤层顶板会出现垮落带、裂缝带和弯曲带,底板也可能出现沿层面滑动现象,如果煤层厚度较大,在采空区上方的煤柱可能出现片帮或垮落,并扩大到地表,形成地表塌陷坑。

2. 关键层理论

由于采场覆岩各分层沉积特征的差异,其在覆岩移动和破坏中的作用不同。有些较为坚硬的厚岩层在覆岩移动和破坏中起控制作用,即承载主体与骨架作用;有些较为软弱的薄岩层在覆岩移动和破坏中起加载作用,其自重大部分由坚硬的厚岩层承担。因而,在采场覆岩层中存在多个岩层时,对覆岩移动和破坏全部或局部起控制作用的岩层称为关键层。关键层判别的主要依据是其变形和破断特征。在关键层破断时,若其上部全部岩层的下沉变形与关键层变形相互协调一致,则称其为主关键层;若其上部局部岩层的下沉变形与关键层变形相互协调一致,则称其为亚关键层。也就是说,关键层的断裂将导致全部或相当一部分的上覆岩层产生整体的运动。显然,关键层的断裂步距即为上覆岩层部分或全部岩层断裂步距,从而引起明显的岩层运动和矿压显现(钱鸣高等,2003)。

一般来说,关键层即为主承载层,在破断前可以“板”(或简化为“梁”)结构的形式承受上部岩层的部分重量,断裂后则可形成砌体梁结构,其结构形态即是岩层移动的形态。而各亚关键层之间或主关键层和亚关键层之间移动的不协调即形成了岩体内部的离层。

采动岩体中关键层有如下特征:

- (1) 几何特征,相对于其他相同岩层而言厚度较大。
- (2) 岩性特征,相对于其他岩层而言较为坚硬,即弹性模量较大,强度较高。
- (3) 变形特征,在关键层下沉变形时,其上部全部和局部岩层的下沉量是同步协调的。
- (4) 破坏特征,关键层的破断将导致全部和局部上部岩层的破断,从而引起较大范围岩层的移动。
- (5) 支承特征,关键层在破断前可以“板”(或简化为“梁”)结构的形式作为全部岩层或局部岩层的承载主体,断裂后则可成为砌体梁结构,继续作为承载主体。

由此可见,关键层通过控制覆岩移动和破坏,向下影响采场矿压,向上影响开采损害。覆岩中的巨厚、坚硬岩层(关键层)能遏制其下部开采裂隙向上发展,同时支撑上部覆岩的重力,从而减轻采煤对地表的损害。在一定的开采强度下,位于覆岩上部的关键层,对地表生态环境具有更强的保护作用。

3. 构造控灾理论

煤矿区地表环境灾害最直观的表现是矿区地表沉陷或开裂、塌陷。从构造地质学的观点来看,以采煤沉陷为代表的煤矿区环境灾害(environment hazards induced by coal-mining)是由人类地下采矿活动在主采煤层上覆岩、土体(简称覆岩)中引起或诱发的一种特殊的变形现象。变形的物理过程在覆岩中进行,引起变形的力在覆岩中传递,因此,覆岩在采煤沉陷过程中扮演着构造介质的角色。大多数煤矿区在地质历史时期曾经受过构造运动改造,形成单斜、褶皱等构造形态和节理、断层等构造界面。因此,采煤沉陷是经受过变形、遭受过破坏的煤层及其覆岩,在环境应力条件改变时,产生的再变形和再破坏。构造变形决定构造介质中的原岩剩余应力状态。构造界面决定着构造介质的岩体结构,从而影响岩体的变形习性。构造应力则与岩体重力共同构成区域地应力场的主要成分,为岩体发生变形提供了动力学背景。如果说构造介质本身的特点(力学特性、构造形态、构造界面)是地质历史时期产生的影响煤矿区地表环境灾害的静态因素,那么,构造应力就是反映目前覆岩动力学状态且影响煤矿区地表环境灾害的动态因素。构造介质、构造变形、构造界面、构造应力相互影响,相互制约,协同作用,为人类地下采矿活动营造了一个特殊的环境——构造环境(tectonic settings)。

构造环境是地质环境的重要组成部分,它更多地反映着地球的内动力地质作用。大量观测资料和实验证明,在不同的构造环境下,同样强度的地下采矿活动所引起的采煤沉陷有明显差异。这说明,煤矿区地质环境对人类地下开采产生的扰动具有一定的抵抗能力,而且由于构造环境的不同,其抗扰动能力有强弱之分。抗扰动能力强的煤矿区可以承受较大的开采强度;而抗扰动能力差的煤矿区,同样强度的地下开采,就会导致严重的地表损害甚至环境灾害。由此可见,在一定的生态环境质量目标下,煤矿区地质环境所能承受的最大开采强度(称为地质环境承载能力),因其所处构造环境的不同会有明显的差异。因此,构造环境的内在结构和特性是煤矿区地表环境灾害形成与发展的控制性因素(夏玉成等,2008)。

1.2.2 井工开采对地下水流场的影响

采煤对地下水资源的影响主要体现为采煤引起上覆含水层破坏,造成水资源流失,从而引起地下水位下降,井泉枯竭,地表水量衰减。国外有关浅埋煤层开采对地表水、地下水、矿区及区域内生物种群等的影响比较有代表性的研究成果,是Booth等在美国伊利斯诺州进行的长壁工作面上覆砂岩含水层的观测研究。该成果系统地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,且描述了不同区域开采后水位的恢复过程和水质的变化特点,提出了长臂开采引起的地下水位下降的可恢复性。此外诸多研究认为,地下长壁工作面煤层开采后,尽管部分区域含水层的水位可

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。Thomas 等(1976)研究发现黄石河流域煤炭资源开采与水资源消耗之间成正比关系,Hickcox(1980)发现 Tongue 河盆地煤炭大规模开采后地表河流径流量衰减 50%以上。有研究表明,山西阳武河流域上游受煤矿开采影响,多年平均地表水资源量减少了 32.2%,地下水天然补给量减少了 14.9%,总水资源量减少了 20.3%(张念龙等,2008)。

煤层开采后,地下水循环途径由采煤前的水平排泄改变为垂直排泄(张凤娥等,2002),地下水流程将逐渐形成以采空区为中心的排泄区,地下水位等高线也向采空区一侧倾斜(范立民等,2003;马雄德等,2010),即使采空区和受影响区处于不同的水文地质单元,也会受渗流通道的影响改变地下水的径流方向和方式(刘俊杰等,2005)。Karaman 等人对长壁工作面的开采边界与开采区域地下水变化之间的关系进行了动态研究,通过分析采动覆岩含水层的渗透系数和储水系数等参数预测含水层水位的变化情况。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。刘海涛(2005)认为煤炭开采对水资源的破坏范围和破坏程度,受水文地质条件、地质构造特征、煤矿开采的不同阶段等因素的影响,采用 Galerkin 有限元法预测了水位降深等的变化。方樟等(2010)利用 GMS 对黑龙江省东部宝清露天煤矿首采区不同方案下地下水流场的变化进行了预测。

井工开采除了对地下水资源产生不利影响外,采煤塌陷裂缝对潜水的均匀补给还可产生正效应,使原来不具备渗水条件的采场成为可以接纳很大渗流量的地下水库。张发旺等于 2005 年提出了“含水层再造”和“再造的含水层”概念,分析研究了采动条件下煤层顶板裂隙的生成、含隔水性能的变化以及煤层顶板在采动应力状态下含水层再造的过程和分布,阐明了利用“含水层再造”进行“采煤保水”的机理,探讨了煤层顶板含水层再造变化规律及对地下水渗透性变化效应,并以大柳塔煤矿为例在采动条件下对煤层顶板含水层再造观测与模拟,分析了含水层再造对包气带水分运移的影响。范立民等(2006)从陕北地区广泛分布的烧变岩及其特殊的水文地质条件得到启发,认为对部分小流域进行高强度的煤炭开采,使采空区顶板岩层破裂后,形成类似于烧变岩的地下水储存空间,经过一定时期的含水层再造,形成新的含水盆地。党学亚、张茂省等(2010)提出在煤炭开采过程中,在做好矿坑清洁和消毒工作的基础上,可以实施含水层再造工程。可见,地下水流场的变化是具有两面性的,关键在于正确评价采矿活动与地下水流场变化之间的关系,使得地下水流场变化在不影响生态环境的情况下,与采矿活动相协调。

1.2.3 导水裂隙带发育高度的探测与预计

由于采煤裂隙带存在于地表以下顶板以上部位,无论从地表或者是从巷道都

不可能很直观的得以观察。20 世纪 20 年代以来,国内外为确定采煤裂隙带高度进行了广泛深入的研究,取得了丰硕的成果。目前常用的方法主要包括现场探测法、理论计算法、经验公式法、相似材料模拟和数值模拟法等。

现场探测法是获取采动形成的导水裂隙带发育规律最为直接的方法。其手段主要有钻孔注水试验法、冲洗液观测法、超声成像法、声波 CT 层析成像法、高密度电阻率法、微地震 (MS) 监测法等。其中,现场常用的是钻孔注水实验法,它具有装置简单、工程量少、观测结果准确可靠、效果明显等优点 (王连富等, 2005)。成像法主要通过超声成像数控测井仪 (王双美, 2006)、人工激发声波 (程学丰等, 2001)、井下探头 (杨永秀等, 2003) 等方式直观反映导水裂隙带发育高度。电法主要通过对比采动前后的电阻率 (王双美, 2006)、电磁辐射 (Frid 等, 2005; Rabinovitch 等, 2007) 确定裂隙带高度,也有学者根据岩层电场变化,反演电阻率值,确定上覆岩层破裂情况 (Loke 等, 1996)。安徽理工大学王桦等将基于二级电阻率法的并行网络电法监测系统应用于导水裂隙带高度探测中,可以实时探测到导水裂隙带的发展过程及其最大高度。微震监测法采集岩石破坏时产生的声波,通过震源定位和相应的理论分析,间接探测覆岩破裂发生的位置,具有远距离、动态、三维、实时监测的特点 (邹德蕴等, 2009)。Reginald Hardy 等将此技术应用于美国 Bureau 煤矿,详细介绍了此种设备的组成,以及在确定长臂工作面开采过程中覆岩破裂范围的基本方法。Sato (1986,1988) 认为,煤矿开采引起微震事件的能量大小和频数符合 Gutenberg-Richter 方程,且微震事件除了与岩体破裂有关外,与顶板岩体落入采空区、底板岩层地鼓起以及采矿技术参数、矿区地质特征也有关联。该技术在澳大利亚“急流煤矿”LW4 工作面探测时,证明了层间岩层以高应力下的压剪破坏为主 (姜福兴等, 2003; Luo 等, 1998); 在对鲁西煤矿 3[±]107 工作面的研究认为导水裂隙带高度对应微地震事件的密集区高度 (汪华君等, 2006)。

由于煤层覆岩结构的多样性和采矿方法的差异性,各种现场探测技术在实际应用中各有其局限性,而且现场探测需要实施难度较大的探测工程,影响因素较多,成本高,还会影响正常生产,但其探测结果的可靠性较高,是目前普遍认可的方法。

理论分析法主要是建立在固体力学基础之上的解析法。Goel 等 (2007) 给出了采掘空间顶板破坏的临界最大应力的计算公式; Bandopadhyay (1988) 给出了最大拉张应力的描述方程; Sheorey (1989) 则将改进的三轴强度方程用于预测顶板发生破裂的高度。国内许多学者 (康建荣等, 2002; 钱鸣高等, 2003; 李琰庆, 2007, 2008) 应用关键层理论研究导水裂隙带的发育高度,认为导水裂隙带的高度可以由关键层和软岩的极限跨距以及其下部的自由空间高度来判断。

经验公式法主要是在分析矿区覆岩结构类型的基础上,利用国家煤炭工业局颁布的《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设及压煤开采规程》或国家技术

监督局颁布的《矿区水文地质工程地质勘探规范》(GB12719—91)中推荐的经验公式,预计导水裂隙带高度。但这些经验公式是对过去煤矿生产中所获得大量实际观测值的经验总结,可以比较准确地预计在条采、普采等开采强度较低的情况下裂隙带的发育高度。在目前陕北广泛采用高产高效综采技术的情况下,岩层与地表移动的规律出现了新的变化,已有的经验公式显然不能满足原有的适用条件,因而其预计结果与实际差距很大。

目前,相似材料模拟和数值模拟法已经广泛应用于冒裂带的预测中。相似材料模拟法是通过建立与原型相似的物理模型,模拟煤层开采时覆岩破坏过程的一种试验研究手段。相似材料模型可以模拟在不同的地质与开采条件下开采煤层时覆岩的破坏过程、特征和规律,直观地显示导水裂隙带的空间形态。但相似材料模拟方法劳动强度大,工作效率低,耗费时间长,难以大量使用。

随着大容量、高速度计算机的出现,数值模拟已经成为裂隙带预测的常用手段。目前,常用的数值模拟方法有离散元法、有限差分法、边界元法、有限元法等。数值模拟一般通过“塑性区法”和“应力法”预测冒裂带高度。塑性区,即模型中单元体所承载的应力符合屈服准则的区域,该方法在应用时关键在于确定破坏类型与冒落带、裂隙带之间的对应关系,不同模拟软件有所差异。应用基于有限差分原理的FLAC软件模拟时,将剪切破坏区作为工作面的破坏范围(Charlie等,2006;刘增辉等,2006),或根据拉伸破坏和拉伸裂隙区判断垮落带、裂缝带的高度(陈秀友等,2007);应用基于有限元原理的RFPA(岩石破裂过程分析)软件模拟时,可以根据岩层破坏(即空单元)情况来确定冒裂带高度(张东升等,2006),但一般难以区分覆岩冒落带高度和裂隙带高度(陈荣华等,2006)。基于离散单元法的UDEC软件,则可根据正在屈服、已经屈服、张拉破坏等破坏状态,概算出“三带”高度(Gui Herong等,2002;陈陆望等,2007)。应力法主要根据模拟结果中应力、应变的分布特征判断冒裂带发育的最大高度。已有研究认为,冒落带处于低拉压应力区,裂隙带岩层处于塑性破坏状态,裂缝带上方直至上边界对应双向压应力区,在采空区边缘,岩体处于拉压应力区。故此,将拉张破坏区和拉张裂隙区的上界限(汪林等,2007;武雄等,2004)、中间主应力零线(师本强等,2006)、铅直应力由最大主应力变成最小主应力的“拱形”地带(杜时贵等,1997)、水平应力(Loui等,2007)以及应力相对集中分布范围(彭苏萍等,2002)等作为判别冒落带、导水裂隙带高度的依据。虽然数值模拟方法弥补了相似材料模拟方法的某些弱点,但无论是数值模型还是物理模型,如果与地质采矿实际的相似性不能得到保证,就谈不上预计结果的可靠性。

1.2.4 地下水渗流的影响因素及调控技术

煤层上覆地层中的软弱岩土层,如果不被开采形成的导水裂隙带破坏,将对其上覆含水层起到保护作用,因而称为隔水关键层。缪协兴等研究建立了隔水关