

# 顶板水害威胁下 “煤-水”双资源型矿井 开采模式与工程应用

◎ 申建军 武强 著

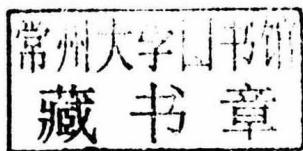


冶金工业出版社

[www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn)

# 顶板水害威胁下 “煤-水”双资源型矿井 开采模式与工程应用

申建军 武强 著



北京

冶金工业出版社

2019

## 内 容 提 要

本书以兴源矿和锦界矿松散含水层下薄基岩区开采为工程背景,研究了不同开采模式的可行性及相应的基础理论,介绍了基于顶板水害威胁下的“煤-水”双资源型矿井开采模式,可实现煤矿区防水、治水、疏水、排水、供水的统筹规划,既能防止水资源浪费、解决矿区供水紧张,还能保护和改善矿区生态环境。

本书可供采矿工程、安全工程、地质工程等领域的科研人员、现场工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

顶板水害威胁下“煤-水”双资源型矿井开采模式与工程应用/申建军等著. —北京:冶金工业出版社, 2019. 4  
ISBN 978-7-5024-8044-8

I. ①顶… II. ①申… III. ①煤矿开采—研究 IV. ①TD82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 056727 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 郑小利 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8044-8

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷  
2019年4月第1版,2019年4月第1次印刷

169mm×239mm; 8.75 印张; 167 千字; 129 页

36.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

我国煤炭资源储量居世界前列，作为煤炭消费大国，我国也是世界上生产原煤最多的国家。但是，我国煤矿床水文地质条件多种多样，矿床充水条件极为复杂，水害在煤矿重特大事故中所占比例高，已成为仅次于瓦斯事故的第二大杀手。

据统计，全国矿井水排放量达71.7亿立方米。由于矿井排水量大，昂贵的排水费用使得煤矿企业负担过重。另外，矿区的大量排水导致地下水位持续下降，煤矿区及周围地区的生产生活用水紧张；如果直接排放矿井水，则造成地表水体和地下水体污染；矿井大量疏排水易导致矿区生态环境恶化。更为严重的是，我国水资源的人均占有量仅为世界人均值的1/4，而且分布不均一，煤炭资源与水资源呈逆向分布，我国煤矿集中分布在缺水的华北和西北地区，其中70%的矿区缺水，40%的矿区严重缺水。因此，我国大部分煤矿受到顶板水害的威胁，而且在煤矿区也存在排水、供水、生态环境保护三者之间的矛盾与冲突问题。

本书基于我国煤-水资源分布特征及矿区排-供-生态环保矛盾，分析了煤层覆岩采动破坏特征与导水裂隙带高度预计，提出了“煤-水”双资源型矿井开采模式的概念与内涵，根据矿井主采煤层的具体充水水文地质条件，提出了优化开采方法和工艺参数、多位一体优化结合、井下洁污水分流分排、人工干预水文地质条件、充填开采等“煤-水”双资源型矿井开采的技术与方法，并将这些开采技术、防治方法和工程措施升华到具有理论性指导作用的模式和配套技术，以适应顶板水

害威胁下“煤-水”双资源型矿井开采的要求。

本书针对安全采煤、水资源供给、生态环境保护之间的尖锐矛盾和冲突问题，以兴源矿和锦界矿为工程背景进行了研究。全书共分7章：第1章介绍了本书研究意义及主要研究内容；第2章分析了我国煤-水资源分布特征与矿区排-供-生态环保矛盾；第3章分析了煤层覆岩采动破坏特征与导水裂隙带发育高度预计；第4章建立了顶板水害威胁下“煤-水”双资源型矿井开采模式；第5章以兴源矿为例，研究了松散孔隙含水层下开采模式工程应用；第6章以锦界矿为例，研究了基岩裂隙+松散孔隙含水层下开采模式工程应用；第7章为结论与展望。

本书内容所涉及的研究工作，得到了国家自然科学基金项目（编号：41807211、41877186）和国家重点研发项目“煤矿重特大事故应急处置与救援技术研究”子课题“矿井水灾识别理论及时空演化模型”（编号：2016YFC0801801）的资助；本书的编写出版工作，得到了滨州学院博士科研启动基金项目（编号：2017Y14）、滨州学院黄河英才特聘教授启动基金项目的资助。

书中的部分素材来源于现场，特向在资料收集过程中帮助过作者的现场工作人员表示感谢；部分素材来源于作者的博士学位论文，特向作者的导师——中国矿业大学（北京）武强教授表示衷心的感谢。

在书稿写作过程中，引用了部分专家、学者的研究成果，在此一并表示诚挚的谢意。

限于作者水平，书中不当之处，诚请读者批评指正。

作 者

2018年12月

# 目 录

1 概述 .....	1
1.1 研究背景及意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.2.1 国外研究现状 .....	3
1.2.2 国内研究现状 .....	6
1.3 本书研究内容 .....	13
1.4 本章小结 .....	14
2 我国煤-水资源分布特征与矿区排-供-生态环保矛盾 .....	15
2.1 我国煤-水资源分布特征 .....	15
2.1.1 煤炭资源区域分布不均衡性特征 .....	15
2.1.2 煤炭资源成煤-聚煤特征 .....	15
2.1.3 煤-水资源逆向分布特征 .....	15
2.1.4 煤-水共生共存特征 .....	17
2.2 我国煤矿区排水、供水、生态环保三者之间矛盾 .....	18
2.3 本章小结 .....	20
3 煤层覆岩采动破坏特征与导水裂隙带发育高度预计 .....	21
3.1 煤层覆岩采动破坏特征 .....	21
3.1.1 煤层覆岩采动破坏的分带特征 .....	21
3.1.2 煤层覆岩采动破坏的空间形态 .....	22
3.2 导水裂隙带发育高度主控影响因素 .....	23
3.3 长壁工作面导水裂隙带发育高度预计方法 .....	27
3.3.1 综采长壁工作面导水裂隙带发育高度预计的经验公式 .....	27
3.3.2 综放长壁工作面导水裂隙带发育高度预计的 RBF 神经网络 模型 .....	28
3.4 上覆水体采动等级及允许采动程度 .....	31
3.5 本章小结 .....	33

4	顶板水害威胁下“煤-水”双资源型矿井开采模式 .....	34
4.1	“煤-水”双资源型矿井开采概念与内涵 .....	34
4.2	“煤-水”双资源型矿井开采主要技术与方法 .....	34
4.2.1	优化开采方法与参数工艺 .....	35
4.2.2	多位一体优化结合 .....	36
4.2.3	井下洁污水分流分排技术 .....	39
4.2.4	人工干预水文地质条件 .....	39
4.2.5	充填开采 .....	40
4.3	顶板水害威胁下“煤-水”双资源型矿井开采模式构建 .....	40
4.4	本章小结 .....	43
5	松散孔隙含水层下开采模式工程应用——以兴源矿为例 .....	44
5.1	矿井自然地理与地质概况 .....	44
5.1.1	自然地理概况 .....	44
5.1.2	矿井地质 .....	45
5.1.3	矿井水文地质 .....	47
5.2	薄基岩区第四系松散层底部含水层沉积与水文地质特征 .....	51
5.2.1	第四系松散层厚度分布特征 .....	51
5.2.2	第四系松散层垂直分带特征 .....	51
5.2.3	第四系底部含水层沉积物组成 .....	53
5.2.4	第四系底部含水层厚度分布特征 .....	54
5.2.5	第四系底部含水层垂直结构特征 .....	55
5.2.6	第四系底部含水层水文地质参数的确定 .....	57
5.3	基于可拓物元理论的含水层富水性等级划分与分区 .....	59
5.3.1	物元分析法基本原理 .....	60
5.3.2	评价指标与权值确定 .....	61
5.3.3	评价结果 .....	62
5.4	煤层覆岩导水裂隙带高度预计与水体允许采动破坏程度 .....	65
5.4.1	基岩厚度变化规律 .....	65
5.4.2	煤层覆岩导水裂隙带高度预计 .....	70
5.4.3	水体允许采动破坏程度 .....	70
5.5	松散孔隙含水层下“煤-水”双资源型矿井开采模式分析 .....	70
5.6	“天然水文地质条件+短壁机械化开采”模式基础理论研究 .....	71
5.6.1	煤房的合理安全跨度 .....	71
5.6.2	屈服煤柱与压力拱理论 .....	76

5.6.3	短壁机械化开采覆岩运动规律 .....	79
5.6.4	屈服煤柱稳定性评价体系 .....	81
5.6.5	煤房之间屈服煤柱宽度理论计算 .....	83
5.6.6	区段之间刚性煤柱宽度理论计算 .....	86
5.7	本章小结 .....	87
<b>6</b>	<b>基岩裂隙+松散孔隙含水层下开采模式工程应用——以锦界矿为例 .....</b>	<b>88</b>
6.1	矿井自然地理与地质概况 .....	88
6.1.1	自然地理概况 .....	88
6.1.2	矿井地质 .....	89
6.1.3	矿井水文地质 .....	91
6.2	煤层覆岩导水裂隙带高度预计及水体允许采动破坏程度 .....	92
6.3	煤层与含水层赋存关系及隔水层控水控砂能力 .....	92
6.4	基岩裂隙+松散孔隙含水层下“煤-水”双资源型矿井开采模式 分析 .....	95
6.5	基于FLAC3D的不同采煤方法煤层覆岩破坏规律数值模拟研究 .....	96
6.5.1	工程地质概念模型 .....	97
6.5.2	边界条件与初始参数 .....	97
6.5.3	数值计算模型 .....	98
6.5.4	模拟方案设计 .....	99
6.5.5	模拟结果分析 .....	101
6.6	本章小结 .....	117
<b>7</b>	<b>结论与展望 .....</b>	<b>118</b>
7.1	结论 .....	118
7.2	展望 .....	120
	参考文献 .....	121

# 1 概 述

## 1.1 研究背景及意义

我国已查明的煤炭资源储量和预测的煤炭资源总量均居世界前列,根据中国煤炭地质总局数据,我国 2000m 以浅煤炭资源总量 5.82 万亿吨,保有煤炭资源储量 1.94 万亿吨,尚有预测资源量 3.88 万亿吨。据《中国矿产资源报告》(2015),截至 2014 年底,查明的煤炭资源储量为 1.53 万亿吨,据《中国国土资源公报》(2016),2015 年新增查明资源储量 375.4 亿吨。同时,作为煤炭消费大国,我国是世界上生产原煤最多的国家。由于我国富煤、贫油、少气的基本特点,煤炭需求量到 2030 年将达到 45 亿~51 亿吨,煤炭在一次能源中的重要地位在很长时间内不会有明显变化<sup>[1]</sup>。

我国成煤时代多,各煤田成煤时的古地理条件、沉积环境及所处的大地构造背景和自然地理条件各不相同,造成煤矿床的水文地质条件多种多样,矿床充水条件极为复杂,因此,水害事故在我国煤矿重特大事故中所占比例高,已成为仅次于瓦斯事故的第二大杀手<sup>[2]</sup>。我国华北型煤田有些老矿区开采深度不断增加,煤系基底奥灰水压达 8~10MPa 以上,河南、河北、山东等地区的部分煤矿高压水上开采底部突水问题日趋严重。另外,我国大部分矿区普遍受(巨)厚新生界松散含水层、风化基岩裂隙含水层、大型地表水体(河流、湖泊、浅海)、大面积采空积水以及西北地区特殊的烧变岩含水层等顶板水害的威胁,有些矿井为了预防顶板水害不得不放弃大量的煤炭资源,有些矿井甚至发生过淹没工作面、采区甚至整个矿井的恶性事故,造成经济财产损失和井下作业人员重大伤亡。

长期以来,我国广大高校及科研院所学者和现场技术人员与煤矿地下水害进行了不懈的斗争,在“安全第一、预防为主、综合治理”安全生产方针的指导下,煤矿防治水工作取得了新成效,安全生产状况持续稳定好转,煤矿水害事故总量连年下降,但是总体形势依然严峻<sup>[3]</sup>。在总结历次突水淹井事故经验、教训的基础上,我国逐渐摸索和形成了一套适合我国煤田水文地质条件的防治水的技术和方法,完善了“预测预报,有疑必探,先探后掘,先治后采”的防治水原则和与其配套的“探、防、堵、疏、排、截、监”等综合治理措施<sup>[4,5]</sup>。

煤炭生产过程中,为了改善井下作业环境、保证生产安全,要常年排放出大量的矿井水,根据国家煤矿安全监察局 2012 年的调查统计<sup>[6]</sup>,全国矿井水排放量达 71.7 亿立方米,平均吨煤排水量达 2.0~4.0 立方米。由于矿井排水量大,

导致吨煤排水费用大幅度提高, 昂贵的吨煤排水费用使得煤矿企业负担过重。矿区的大量排水导致煤矿区及周围地区的生产生活用水紧张; 当排水量和供水量大于地下水补给量时, 地下水位持续下降; 如果不处理矿井水而直接排放, 就会造成地表水体及地下含水层水体污染; 另外, 矿井大量疏排水也会导致矿区生态环境恶化。更为严重的是, 我国水资源的人均占有量仅为世界人均值的 1/4, 而且分布不均一, 和煤炭资源的分布很不协调, 煤炭资源与水资源呈逆向分布, 存在“有煤的地方缺水, 有水的地方缺煤”的局面。我国煤矿集中分布在区域缺水的华北和西北地区, 其中 70% 的矿区缺水, 40% 的矿区严重缺水, 煤炭工业的发展受到水资源的严重制约。

我国东部地区新生界松散层的底部发育有一层厚度不等的松散砂砾石孔隙含水层(简称“底含”), 由于浅部煤层上覆基岩厚度小于导水裂隙带发育高度, 长壁综采时导水裂隙带易波及“底含”, 因此, 在设计时浅部露头区必须留设一定厚度的安全煤岩柱。据统计, 仅鲁豫皖苏四省煤矿区浅部第一水平按传统留设 60~80m 露头煤柱, 呆滞的压煤总量就多达 50 亿吨, 造成了煤炭资源的极大浪费。我国西部陕北地区侏罗系煤田位于毛乌素沙漠与黄土高原接壤地区, 该区域年降水量仅有 200~400mm, 气候干旱、水资源匮乏、生态环境脆弱, 而煤层赋存特点是浅埋深、薄基岩。新生代第四系松散孔隙含水层和中生代侏罗系直罗组风化基岩裂隙含水层富水性较强, 在榆神府矿区局部还分布有因煤层自燃形成的烧变岩含水层, 其裂隙、空洞发育, 富水性较强。在上述矿区松散含水层下开采煤层都存在共同特点, 即含水层富水性中等到强; 基岩薄, 采动后煤层与含水层之间的岩层隔水性能减弱甚至丧失, 易引发溃水溃砂事故。所不同的是东部松散沉积物以砂砾石为主; 而西部松散沉积物以细砂为主。若采用大规模高强度采煤法, 在采掘过程中覆岩采动破坏带极易波及上覆风化基岩裂隙水和第四系松散孔隙水, 因此, 保水采煤是浅部煤层薄基岩区开采面临的一个典型难题。

综上所述, 我国大部分煤矿受到顶板水害的威胁, 在煤矿区及其周围地区也面临着排水-供水-生态环境保护之间的矛盾问题。长期以来, 矿井水的焦点主要是其对煤矿建设与生产的灾害作用, 因此, 矿井水灾害的防治受到广泛关注; 随着社会对水资源和生态资源的重视, 干旱、半干旱矿区地下水资源的保护和合理利用也非常重要。目前我国缺水矿区和大水矿区还没有成体系的保水、控水、保生态的理论和技术方法, 大采高条件下的保水、保地质环境、保生态系统的压力非常大。因此, 如何解决华北、西北煤矿区上述三者之间的矛盾问题, 是值得深入研究和探讨的。

为解决煤炭资源安全绿色开发、水资源供给、生态环保之间的尖锐矛盾和冲突, 实现煤矿区水害防治、水资源保护利用、生态环境改善的多赢目标, 书中提出了“煤-水”双资源型矿井开采的概念、内涵及技术方法, 在此基础上形成了

顶板水害威胁下“煤-水”双资源型矿井开采模式。

在“顶板水害威胁下‘煤-水’双资源型矿井开采模式”的指导下,本书以兴源矿和锦界矿松散含水层下薄基岩区开采为工程背景,研究了不同开采模式的可行性及相应的基础理论。兴源矿四采区南部薄基岩区基岩厚度小于60m,第四系底部松散含水层富水性强,补给条件良好,可疏性较差,天然水文地质条件下不再适合采用长壁综采方法,本书研究了采用帷幕注浆及短壁机械化开采等方法解放薄基岩区呆滞资源的可行性及短壁机械化开采覆岩运动规律与煤房煤柱合理尺寸;锦界矿主采煤层顶板上覆有富水性较强的萨拉乌苏组松散孔隙含水层、直罗组风化基岩裂隙含水层及烧变岩含水层,煤层埋深大部为150m以浅,上覆基岩厚度小于50m,且基岩顶部为强风化的中粒砂岩,本书通过FLAC3D数值模拟方法研究了不同开采方法下导水裂隙带发育高度,并探讨了不同开采模式的可行性。

研究保护和利用宝贵水资源的“煤-水”双资源型矿井开采模式,是矿井防治水领域发展方向。基于顶板水害威胁下的“煤-水”双资源型矿井开采模式,是实现煤矿区防水、治水、疏水、排水、供水统筹规划的有效途径,既能防止水资源浪费,又能解决矿区供水紧张、保护和改善矿区生态环境。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

#### 1.2.1.1 顶板水害威胁下煤炭资源开采

国外在100多年前就开始了水体下采煤的实践工作,在海、河、松散含水层和基岩含水层等水体下进行了大量的工业试验。

张英环早在1975摘译了澳大利亚采矿与冶金学会新闻报道,详细介绍了日本、智利、英国等国家水体下采煤的规定及实践经验<sup>[7]</sup>。日本在水体下采煤时,防水煤岩柱的高度与煤层采厚的比值,在浅部大约为100倍,在深部约为34倍,在浅部开采时采用风力充填采煤法。加拿大也曾用长壁式采煤法或留设煤柱的方法进行海底采煤,安全条例中规定当采用长壁式采煤法时深厚比不得小于97。智利规定采用长壁式采煤法时,上覆岩层厚度不能小于140m,在断层和矿井边界处必须留设一定的安全煤岩柱。

英国在水体下采煤时为获得最大的回收率,在保护煤柱留设时主要考虑矿井排水成本与可采储量经济性的评价,有时不可避免会损失煤炭资源,减少矿井服务年限。水体下采煤时对地表水和地下水的影响主要通过以下方式:(1)开采沉陷改变地表径流方式和水位;(2)在一定条件下,促使塌陷坑的形成;(3)引起严重的矿井涌水。影响水体下采煤工作面设计的因素包括水体的大小、水体

与煤层之间岩层的性质和厚度、不连续结构面和构造特征、应力分布模式、水压。早在 1968 年,英国在海底下采煤时主要按照政府依据过去的经验、开采沉陷与裂隙发育、不可预测因素的偶然性等方面制定的条约。开采方法包括:(1)长壁式开采,当覆盖层厚度大于 105m,且石炭纪地层厚度最小为 60m 时才允许开采,海底最大拉伸变形不应超过 10mm/m;(2)房柱式开采,当海底覆盖层小于 60m,且当石炭纪地层小于 45m 时不应该开采,煤柱的尺寸不应小于  $0.1H$  ( $H$  为煤层埋深),当煤层厚度大于 2m 时,煤柱尺寸不应小于  $0.1H+M$  ( $M$  为采高)<sup>[8]</sup>。

煤炭科学研究总院刘天泉院士等对澳大利亚海下采煤经验进行了总结。澳大利亚主要采取以下方法:(1)当基岩厚度小于 46m 时,禁止开采;(2)当基岩厚度大于 46m,小于 60 倍采厚时,采用房柱式开采,煤房宽度最大为 5.5m,煤柱最小为 1.5 倍的采高或 1/10 的覆盖层厚度;(3)当基岩厚度大于 60 倍采厚时,采用长壁法开采;(4)在海滨区域须保留隔离煤柱。

综上,国外在海下采煤时,仅对符合一定条件的煤层进行长壁式开采,其他条件下采用充填或房柱式采煤法。各国水体下采煤的基本规定见表 1.1<sup>[9]</sup>。

表 1.1 各国水体下开采的基本规定

国别	长壁采煤法		房柱式或充填采煤法	
	最小覆盖层厚度 /m	最小含煤地层厚度 /m	最小覆盖层厚度 /m	最小含煤地层厚度 /m
英国	105	60	60	45
日本	200~300	60~100	93	
智利	150		70	
加拿大	213 或 100 倍采高		55	

英国 Wistow 煤矿,在长壁工作面开采时曾发生多起顶板灰岩含水层溃水事故,通常缩小工作面宽度可减少顶板水害威胁程度。Dumpleton 定量研究了二叠系-三叠系砂岩含水层水力性质的采动效应,结果表明:深部采矿仍然对浅部的含水层产生重要影响,采后顶板砂岩含水层的渗透系数增加了 49%<sup>[10]</sup>。

印度学者 Gandhe 等针对地表水体下压煤开采,研究了水砂充填回采巷柱式煤柱的可行性,涉及地质条件分析、地表沉陷和应变值预计、采煤方法(垮落法或充填法)设计,研究了回收煤柱时顶板的运动规律<sup>[11]</sup>。印度规定在采空区积水下采煤时需留设 60m 的安全煤柱, Singh 开发了用以探测煤柱宽度的矿山雷达系统<sup>[12]</sup>。

### 1.2.1.2 顶板水害防治技术

在防治顶板水害方面,国外采用疏降强排法,例如,土耳其学者 Tokgoz 基

于 Modflow 软件和最优化方法对地面抽水方案进行了分析, 确定了抽水井的最佳位置<sup>[13]</sup>。国外在排水时多采用自动控制的高扬程、高排水量、大功率的潜水泵, 同时也采用帷幕注浆法堵截地下水的补给以减少矿井涌水。在矿井排水系统设计时, 国外学者比较重视矿井涌水量的预计, 常借助数值模拟软件预计涌水量以及矿井排水对地下水系统、地下水环境的影响<sup>[14-16]</sup>。

美国通过国家和联邦法律法规、工业协调和发展及政府、工业和学术界的科研, 致力于减少采场岩层扰动引起的水质水量变化。为减少矿井排水对环境的影响, 在采矿权审批制度中, 政府通过法律法规要求必须有详细的方案和措施。预防控制矿井污水是美国倡导的优先采取的措施, 包括水文平衡保持、矿井水悬浮物沉淀、岩层碱性和硫化物评价、保持碱性环境以确保硫化物的稳定<sup>[17]</sup>。近年来, 地下水的环境约束和长壁开采之间的矛盾和冲突不断成为争议点。Booth 认为地下水对长壁工作面开采产生了环境约束, 尽管顶板含水层的涌水在技术上可以通过矿井排水保护井下安全, 但是采动引起的下沉和裂隙发育会间接地对地下水的环境产生影响, 引起的降落漏斗可延伸几百米。由于地下水渗漏, 煤矿企业要补偿当地居民, 并且需提供可供选择的水源。由于供水水源地地下水的流失对当地居民产生了很多的影响, 成为当地居民和环保组织反对长壁采煤法的普遍原因, 也成为煤矿企业获得采矿权的最大障碍<sup>[18]</sup>。

南非学者 Morton 等认为, 矿井排水、地下水分散转移、堵水及其组合是有效的矿井水害防治方法, 其决策主要考虑最低成本; 其次, 在处理地下水时矿井不能不加选择地或任意地转移或封闭地下水, 而应将实际矿井涌水量作为必不可少的判断指标。他们研究了矿井水文地质工作的三个阶段: (1) 通过初步调查、钻孔勘探记录含水层层位以及水量; (2) 研究采矿对地下水的影响以及地下水的采矿的影响; (3) 实施如何减少或消除灾害, 并且处理或转移可能的涌水量。第二阶段工作完成后, 就能够评价地下水对采矿是否造成灾害, 其可信程度主要取决于第一阶段获得的数据, 如果能够引起灾害, 则开始第三阶段。第三阶段可通过工业排水、计算机模拟或者已有的经验, 其复杂程度取决于潜在成本和涉及的风险<sup>[19]</sup>。

### 1.2.1.3 矿井水处理与资源化利用

国外将矿井排水作为一种获利的手段, 即将矿井水处理后作为第二资源进行开发利用, 挖掘矿井涌水的经济效益, 使矿井排水不再成为采煤的负担, 且能取得较为可观的盈利。目前, 国外矿井水利用率较高, 可达到 80%~90%。例如, 波兰为消除煤矿排出的污水, 利用反渗透法进行了矿井水脱盐处理, 产生了约 8300m<sup>3</sup>/d 的饮用水和 370t/d NaCl, 实现了矿井污水零排放<sup>[20]</sup>。另外, 国外一直比较重视矿井酸性水 (acid mine drainage, AMD) 的处理与资源化利用, 科研工

作者提出了多种措施避免酸性水乱排放污染地表水及导致生态环境恶化<sup>[21-26]</sup>。

## 1.2.2 国内研究现状

受顶板水害威胁煤层开采即指水体下采煤,我国水体下压煤储量相当丰富,早在20世纪50年代就开始了水体下采煤的研究工作和实践,积累了大量宝贵的经验和理论成果,成功地进行了河流、湖泊、水库、海域、第四系松散含水层、基岩裂隙含水层等各类水体下压煤的开采工作,我国在煤层覆岩采动破坏特征、溃水溃砂机理、顶板涌(突)水危险性评价、水体下采煤技术、保水采煤技术等方面在世界上已处于领先地位。

### 1.2.2.1 煤层覆岩采动变形破坏与裂隙发育特征

原煤炭科学研究总院刘天泉院士提出了长壁工作面煤层覆岩破坏的“上三带”理论<sup>[27,28]</sup>,即当采用全部垮落法管理顶板时,只要采深达到一定深度,煤层覆岩形成垮落带、裂隙带和弯曲下沉带三部分,通常将垮落带和裂隙带合称导水裂隙带(或简称“两带”)。《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(简称“三下”压煤规范),将刘天泉院士提出的厚煤层分层开采“两带”发育高度预计公式以及露头区安全煤岩柱的留设理论写入规范,使得水体下采煤有了最基本的技术法规,目前国内主要以“上三带”理论作为研究顶板溃水溃砂的基础<sup>[29]</sup>。

中国科学院宋振骥院士提出“以岩层运动为中心”的实用矿山压力理论及工作面上覆岩层“传递岩梁”理论,即在采场推进过程中基本顶的每一岩梁始终能保持向煤壁前方和采空区矸石上传递力的联系;揭示了矿山压力及其显现与上覆岩层间的关系,以及随采场推进矿山压力及其显现的发展变化规律;研究了基本顶来压时刻的“支架-围岩”关系,提出了给定变形和限定变形两种基本顶控制方式<sup>[30]</sup>。彭林军等在实用矿山压力的指导下,建立了顶板控制信息动力决策模型,探讨了导水裂隙带和斑裂纹对顶板砂岩透水的影响机理<sup>[31]</sup>。

中国工程院钱鸣高院士提出了岩层运动的“关键层”理论及其判别准则(所谓关键层,是指对上覆的岩层活动全部或局部起到控制作用的坚硬岩层);以及上覆岩层采动破断后的结构模式,即“砌体梁”力学模型;创立了视基本顶岩层为弹性基础上暴露板的力学模型;研究了关键层作用下上覆岩层的变形、离层及断裂规律,提出了关键层能够有效控制顶板突水,顶板水害发生的条件是关键层断裂<sup>[32,33]</sup>。许家林等研究了主关键层位置与导水裂隙带高度的关系<sup>[34]</sup>。王连国等以关键层理论为基础,采用强度因子作为判断坚硬岩层是否破断导水的指标,采用应变强度因子作为判断软弱岩层是否破断导水的指标,建立了一种预计导水裂隙带发育高度的力学模型<sup>[35]</sup>。

对浅埋煤层而言,近松散层薄基岩开采的覆岩结构、岩层运动规律、采动裂隙与破断特征是研究顶板溃水溃砂的理论基础。石平五等提出了薄基岩在厚沙覆盖层作用下的整体切落是浅埋煤层顶板破断运动的主要方式<sup>[36]</sup>。侯忠杰提出了浅埋煤层上覆岩层台阶状切落的识别方法和基于关键层理论的判定准则<sup>[37]</sup>。许家林等将浅埋煤层覆岩关键层结构类型分为单一关键层和多层关键层结构,其中,单一关键层结构是产生特殊采动响应的根本原因,其破断失稳是神东矿区浅埋煤层出现台阶状下沉和工作面压架等现象的原因<sup>[38]</sup>。贾明魁为研究薄基岩结构稳定性建立了两种力学模型,即“短砌体梁”和“台阶岩梁”<sup>[39]</sup>。

方新秋等认为,“砌体梁”结构的稳定主要取决于基岩厚度和上覆表土层的力学性质及厚度;并根据垮落带高度、导水裂隙带高度和基岩后三者之间的关系定义了“超薄基岩”“薄基岩”“正常厚度基岩”<sup>[40]</sup>。

黄庆亨提出了以关键层、基载比和埋深为指标的浅埋煤层分类法,典型浅埋煤层存在单一关键层结构,浅埋深、厚松散层、薄基岩、基载比小,其顶板破断为整体台阶切落;近浅埋煤层存在两组关键层,厚基岩、薄松散载荷层,台阶下沉不明显。浅埋煤层可以采用以下指标判定:埋深不大于 150m,基载比  $J_z < 1$ ,单一主关键层结构,矿山压力显现具有明显动载现象<sup>[41]</sup>。

宣以琼研究了泥岩和砂岩的黏土矿物含量低、具有典型的脆性易裂、抗扰动能力差和再生隔水能力弱等新的破坏移动特性,针对浅埋煤层薄基岩区开采的地质条件研究了上覆岩层采动破坏的“两带”高度特征<sup>[42]</sup>。李振华等利用分形几何理论建立了裂隙网络分形维数与工作面推进度、矿山压力、覆岩下沉、上三带之间的关系<sup>[43]</sup>。张通、袁亮等在压力拱假说、应力壳理论和普氏理论基础上,建立了采场裂隙带几何模型,推导出工作面覆岩裂隙带计算公式<sup>[44]</sup>。范钢伟、张东升等分析了浅埋煤层长壁开采覆岩移动与裂隙在水平方向和垂直方向的扩展与分布的动态演变特征<sup>[45]</sup>。薛东杰、周宏伟等用分形与逾渗理论定量评价了采动裂隙演化特征,揭示了采动裂隙逾渗概率随推进度的线性关系,研究了切落式破坏形成机制,提出了岩层板簧效应并分析了崩塌式切落特征<sup>[46]</sup>。高召宁等在分析含、隔水层的分布特征以及基岩层的物理力学特性的基础上,建立了计算上覆岩层层向拉伸变形的公式<sup>[47]</sup>。黄庆亨研究了浅埋煤层隔水层“上行裂隙”和“下行裂隙”的发育规律,提出了以两种裂隙为指标的隔水层稳定性判据<sup>[48,49]</sup>。

### 1.2.2.2 薄基岩区开采顶板溃水溃砂机理

伍永平等基于泥沙起动理论和泥沙颗粒之间的力学关系给出了发生溃砂的基本条件<sup>[50]</sup>。张杰等在分析榆神矿区地质水文地质条件基础上,指出发生突水溃砂的 4 个必要条件,即富水砂层、静水压力、薄基岩和采动空间<sup>[51]</sup>。

隋旺华等研究了垮落带和裂隙带发生渗透变形破坏的类型和机制,得出了垮

落带和裂隙带上覆松散土层发生从上往下渗透变形破坏的临界水力坡度与土层粒度成分、物理力学性质和裂缝尺寸的关系及决定溃砂量的因素<sup>[52,53]</sup>。许延春等从覆岩裂隙破坏发展规律及松散层砂土颗粒性质入手,建立了工作面溃砂判据<sup>[54]</sup>。张玉军等基于地下水动力学理论,建立了预防溃砂的渗透破坏临界水力坡度条件<sup>[55]</sup>。郭惟嘉等研制了采动覆岩涌水溃砂灾害模拟试验系统,以松散层下薄基岩区开采为试验背景,从覆岩破坏、裂隙扩展、通道形成等视角再现了溃水溃砂灾害孕育、发展、发生的全过程<sup>[56]</sup>。

### 1.2.2.3 顶板涌(突)水危险性评价

中国工程院武强院士提出了“三图-双预测法”,即顶板充水含水层富水性分区图、顶板冒落安全性分区图、顶板突水条件综合分区图以及顶板充水含水层预处理前后回采工作面分段和整体工程涌水量预测。其中,在含水层富水性分析与评价方面,以往生产煤矿大多采用抽(放)水试验成果进行单因素或双因素分析,未能充分提取有用的地质勘探、水文试验和各种地球物理勘探以及地下水长期动态观测等地质学信息,“三图-双预测法”创新性地采用基于多元信息融合理论的富水性指数法,实现了对充水含水层富水性综合分区<sup>[57-59]</sup>。“三图-双预测法”在煤层顶板水害的评价及防治方面形成了一套理论体系,已被写入《煤矿防治水细则》。

范立民等选取沙层厚度、含水层富水性、有效隔水层厚度和采动空间作为溃水溃砂的关键因素,采用熵权法确定了各因素的权重,基于GIS软件构建了多因素融合的榆神府矿区溃水溃砂评价模型,对溃水溃砂危险性进行了综合分区<sup>[60]</sup>。

杨滨滨、隋旺华选取覆岩厚度、断层构造、第四系底部黏土层厚度、底部含水层的单位涌水量、煤层采高、导水裂隙带高度作为评判指标,并基于熵值法确定了权重,构造了松散含水层下开采可行性模糊综合评判模型<sup>[61]</sup>。王文学,隋旺华等选取松散层底部含水层单位涌水量、底部黏土层厚度、覆岩厚度、导水断裂带高度为关键因素建立了松散含水层薄基岩下安全开采等级评价的物元模型<sup>[62]</sup>。

孟召平等针对新生界松散含水层下开采问题,基于突水危险系数提出了顶板水害危险性评价方法<sup>[63]</sup>。宁建国等建立了包括目标含水层位置确定、最小保护层厚度确定、覆岩裂隙发育规律确定、砂质泥岩等效厚度确定和覆岩裂隙导通性判定的保水开采评价方法<sup>[64]</sup>。王忠昶等采用弹性理论获得了大平矿区采动地表裂缝深度为6.59m,根据地表裂缝和导水裂隙带之间的覆岩厚度及各组分岩性的厚度等值线,对透水安全性进行了评估<sup>[65]</sup>。

刘伟韬、张文泉等从裂隙带高度与含水层至主采煤层间距比、裂隙带顶部至含水层底界面之间岩层的渗透系数、含水层富水性、水压、地质构造等方面分析

了影响涌突水等级的因素, 基于模糊评判的数学方法确定了顶板涌水等级<sup>[66]</sup>。

#### 1.2.2.4 顶板水害威胁下采煤实践与水害综合防治技术

##### A 顶板水害威胁下采煤实践

我国已在微山湖、淮河、小浪底水库等大型水体下成功地应用了综采、综放等采煤技术, 积累了较丰富的经验。在河流、湖泊、水库下采煤时一般是根据主采煤层具体的地质条件, 按照《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》中有关规定进行安全性评价及科学合理留设防水安全煤岩柱<sup>[67-74]</sup>。

我国于2005年在龙口矿区进行了首个海域工作面的综采放顶煤开采工作, 成功改写了我国无海下采煤的历史, 也是继英国、澳大利亚、智利、日本和加拿大之后世界上第六个在海下采煤的国家。在试采之前, 广大科研工作者在防止海水溃入技术、综放开采可行性、煤层开采覆岩运动规律及控制技术、灾害预警系统和安全保障体系等方面进行了充分的研究与论证, 积累了较为丰富技术经验, 为国家海下采煤技术标准的制定奠定了基础<sup>[75]</sup>。

近年来, 针对我国华东、华北和西北地区的新生界第四系松散含水层下压煤问题, 许多矿区开展了提高开采上限的研究, 即开采近松散含水层下薄基岩区传统的防水、防砂煤岩柱, 取得了一系列的成果。

申宝宏根据我国水体下采煤的实践经验, 用模糊数学的方法考虑含水层厚度、单位涌水量、渗透系数将松散含水层富水性划分为五类, 并进一步将松散含水层分为可疏降和不可疏降两大类, 针对不同类型的含水层提出了抽水疏干和放水疏干治理措施, 分析了每种方法的使用条件; 针对水压折减系数、残余水头及疏水引起的地面沉降进行了深入分析<sup>[76]</sup>。

众多学者从导水裂隙带发育高度、松散层的沉积特征、富水性评价、基岩厚度分布规律、松散层底部黏土层特性、风氧化带工程地质特性、安全煤岩柱的合理留设等方面入手, 进行了大量的研究, 安全解放了华东、华北地区松散承压含水层下大量呆滞煤炭资源, 延长了矿井服务年限<sup>[77-86]</sup>。

张吉雄、李猛等采用FLAC3D软件研究了矸石充填采煤导水裂隙带发育高度的变化规律, 提出了含水层下矸石充填提高开采上限的确定方法。其采用钻孔冲洗液漏失量监测法, 得到五沟煤矿矸石充填采煤工作面实测导水裂隙带发育高度仅为10m。在采高小于3.5m, 充实率达到85%条件下, 将开采上限由-300m提高至-255m, 解放了大量松散含水层下的煤炭资源<sup>[87,88]</sup>。

##### B 顶板水害综合防治技术

经过科研工作者和现场技术人员60多年的不懈努力, 我国已形成了一套较完整的顶板水害防治理论体系与技术方法。由我国煤矿防治水领域的众多专家和学者参编的《煤矿防治水手册》对近年来防治水成功经验和先进技术进行了总