

国家自然科学基金项目 (NO.51479108; NO.51404145)

山东科技大学学术著作出版基金资助出版

山东省矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地资助出版

# 海域下煤层安全开采上限 关键技术研究

■ 王 刚 陈连军 王文波 蒋宇静 夏宇君 著 ■



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 海域下煤层安全开采上限 关键技术研究

王 刚 陈连军 王文波 蒋宇静 夏宇君 著

北 京  
冶金工业出版社  
2015

## 内 容 提 要

本书以龙口矿区北皂煤矿为研究背景,通过地质考察及实测,确定了矿井充水水源及充水通道,并借助相似模拟试验、大型数值模拟软件以及现场实测确定了海域下采煤安全开采上限,提出了海域下采煤安全开采技术措施,建立了大型水体下开采安全性评价模型,为地质条件相类似的矿山在安全生产方面提供参考。

全书共分7章,主要内容包括绪论、海下采煤水体来源及导水通道特征、海下采煤安全开采上限理论分析、海下采煤安全开采上限相似模拟试验研究、海域下开采煤层合理开采上限数值模拟分析、海域开采工作面覆岩导高实测技术、确定安全开采上限及开采技术措施。

本书也可作为煤炭企业相关专业人员的培训教材和参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

海域下煤层安全开采上限关键技术研究/王刚等著. —北京:  
冶金工业出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-5024-7056-2

I. ①海… II. ①王… III. ①海域—煤层—煤矿开采—研究 IV. ①TD823.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 233276 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 俞跃春 贾怡雯 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7056-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2015 年 10 月第 1 版, 2015 年 10 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11.75 印张; 229 千字; 179 页

45.00 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

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

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

---

确定安全开采上限是海下安全开采关键技术之一。近年来,随着现代社会和工业对各种矿产资源需求增大以及陆上矿产资源的逐渐枯竭,研究和开发大洋海底矿产资源的问题就变得越来越迫切。在我国东部沿海地区,环渤海湾经济圈的胶东半岛从龙口到蓬莱已经勘测到海域下煤炭储量丰富,黄河入海口海域下也赋存有特厚煤层。其中,仅龙口煤田海下局部已探明地质储量就使我国大型水体下压煤资源量得到极大地扩容。

(1) 海域下煤炭资源使我国东部煤炭资源量得到进一步地补充和扩容,研究大型水体下安全开采,对稳定东部地区煤炭生产能力,保持东部地区煤炭生产长期可持续发展具有积极作用。

(2) 海域下采煤不涉及农田塌陷和工业民用建(构)筑物搬迁与保护等问题,大幅度降低吨煤成本,且由于海域下采煤不涉及留设村庄保护煤柱问题,故可使煤炭资源回收率最大化,同时可避免采煤引起的海水倒灌、沿海农田及淡水资源遭受破坏等,有利于在资源开发上实现绿色环保开采。

(3) 海域下采煤标志着我国煤炭资源开发进入了海域开发的新阶段,对于促进开发我国大量水体下煤炭资源,满足国民经济对煤炭的需求,提高我国在国际煤炭开采技术市场上的竞争力具有战略意义。

海域下采煤具有良好的经济效益、社会和环境效益,符合我国“环境保护日益加强的中长期可持续发展能源战略”的要求和“科学发展观的重大战略思想”。目前,在水体下开采的矿山为数不多,而海底开采的顶板稳定性又不同于露天开采,一旦覆岩发生破坏,水体的水流入或溃入井下,将会对矿床开采带来很大威胁。

对于安全进行海下采煤工作,首要问题是需要进行采空区上覆岩

层破坏规律及安全厚度研究。采空区覆岩破坏高度及形态研究是矿井开采中合理确定开采边界的基础,一旦确定正确的覆岩破坏高度和形态就可以据此合理确定井下开采边界,从而实现海底下安全采矿。

本书在中国科学院宋振骥院士的倡导下,以“以覆岩运动为中心的矿压理论体系”为核心内容,通过相似模拟试验、数值分析、理论计算以及现场实测,得出开采矿体时采空区覆岩临界安全厚度,为矿山的安全生产提供参考。全书共分为7章。第1章主要介绍国内外海下采煤研究进展,较为全面系统地总结了国内外海下采煤相关安全保障措施及导水裂隙带研究现状;第2章主要探讨龙口海域煤矿断层构造特征,总结了海下采煤充水水源以及导水通道类型及特征;第3章阐述海下开采基本理论,通过运用材料力学、普氏拱法及结构力学梁理论对海下开采隔离层厚度进行了预估,并建立海下开采覆岩运动结构力学模型,计算导水裂隙带高度;第4章主要通过相似模拟试验分析海下采煤覆岩运动规律,为确定导水裂隙带高度提供试验指导;第5章借助大型数值模拟软件(UDEC、FLAC3D)模拟海下开采覆岩运动规律,确定海下开采煤层合理开采上限;第6章阐述海域开采工作面覆岩导高实测技术,探讨井下仰斜钻孔导高观测原理与方法,在H2101、H2103工作面进行应用并加以验证;第7章阐述海下安全开采防水煤柱设计及相关安全开采技术措施,运用AHP决策分析方法对海下开采安全性进行评价。

衷心感谢本书所列参考文献的作者,是其卓越的研究成果为作者的科研提供了丰富资源;更要感谢那些虽然参考了其研究成果但由于作者疏漏而未能在参考文献中列出的各位作者们。

由于作者水平所限,书中不妥之处,欢迎读者批评指正。

作 者  
2015年5月

# 目 录

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 1 绪论 .....                              | 1  |
| 1.1 海下采煤工程实践 .....                      | 1  |
| 1.2 海下采煤研究进展 .....                      | 2  |
| 1.2.1 国外海下开采研究现状 .....                  | 2  |
| 1.2.2 国内水体下开采研究现状 .....                 | 6  |
| 1.2.3 导水裂隙带研究现状 .....                   | 8  |
| 1.3 本书研究内容 .....                        | 11 |
| 1.3.1 裂隙拱形成及上部岩层沉降规律研究(即裂隙拱稳定性研究) ..... | 11 |
| 1.3.2 不同裂隙拱高度条件下隔水岩层演化规律研究 .....        | 11 |
| 1.3.3 海域开采工程地质条件研究 .....                | 12 |
| 1.3.4 确定合理开采上限 .....                    | 12 |
| 2 海下采煤水体来源及导水通道特征 .....                 | 13 |
| 2.1 井田边界及断层构造特征 .....                   | 13 |
| 2.1.1 井田边界 .....                        | 13 |
| 2.1.2 断层构造及其水文地质特征 .....                | 14 |
| 2.2 海下采煤充水水源及隔水层 .....                  | 16 |
| 2.2.1 地表水 .....                         | 16 |
| 2.2.2 地下水 .....                         | 16 |
| 2.2.3 主要隔水层 .....                       | 18 |
| 2.2.4 岩层渗透性质 .....                      | 19 |
| 2.3 导水通道类型及特征 .....                     | 20 |
| 2.3.1 构造裂隙类导水通道 .....                   | 20 |
| 2.3.2 采动导水裂隙带通道 .....                   | 21 |
| 2.3.3 封闭不良钻孔造成的通道 .....                 | 21 |
| 2.3.4 海域煤层露头带安全煤(岩)柱击穿形成的导水通道 .....     | 22 |
| 2.4 海下采煤危险程度分析 .....                    | 22 |
| 2.4.1 海水与煤层水力关系 .....                   | 22 |
| 2.4.2 海下采煤危害程度 .....                    | 23 |

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| 2.4.3 矿井防治水工作难易程度的评价 .....          | 23        |
| <b>3 海下采煤安全开采上限理论分析 .....</b>       | <b>25</b> |
| 3.1 海下开采基本理论 .....                  | 25        |
| 3.1.1 海下开采代表性理论 .....               | 25        |
| 3.1.2 “三带划分”理论 .....                | 26        |
| 3.2 海下煤层安全开采上限分析方法 .....            | 27        |
| 3.3 海下开采隔离层厚度预估方法及分析 .....          | 28        |
| 3.3.1 力学模型与力学参数 .....               | 28        |
| 3.3.2 材料力学法 .....                   | 28        |
| 3.3.3 普氏拱法 .....                    | 30        |
| 3.3.4 结构力学梁理论计算法 .....              | 31        |
| 3.4 海下开采覆岩运动结构力学模型及参数计算 .....       | 32        |
| 3.4.1 预测推断模型 .....                  | 32        |
| 3.4.2 垮落岩层范围(直接顶厚度 $M_z$ 的推断) ..... | 33        |
| 3.4.3 裂断岩梁运动发展过程 .....              | 34        |
| 3.4.4 破坏拱高度的推断 .....                | 36        |
| 3.4.5 导水裂隙带高度计算 .....               | 36        |
| <b>4 海下采煤安全开采上限相似模拟试验研究 .....</b>   | <b>39</b> |
| 4.1 引言 .....                        | 39        |
| 4.2 相似模拟材料试验原理 .....                | 39        |
| 4.2.1 相似第一定律—相似正定理 .....            | 39        |
| 4.2.2 相似第二定律— $\pi$ 定理 .....        | 40        |
| 4.2.3 相似第三定律—存在定律 .....             | 40        |
| 4.3 实验模型制作与测点布置 .....               | 42        |
| 4.3.1 相似材料模拟实验设计的目的及要求 .....        | 42        |
| 4.3.2 相似材料模拟实验模型 .....              | 42        |
| 4.4 海下开采覆岩运动规律 .....                | 51        |
| <b>5 海域下煤层合理开采上限数值模拟分析 .....</b>    | <b>60</b> |
| 5.1 岩层力学性质和渗透性实验研究 .....            | 60        |
| 5.1.1 试验原理 .....                    | 60        |
| 5.1.2 试验条件 .....                    | 61        |
| 5.1.3 试验结果分析 .....                  | 61        |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 5.2 覆岩破坏规律离散元模拟 .....                | 65         |
| 5.2.1 离散元分析软件 UDEC 简述 .....          | 65         |
| 5.2.2 UDEC 节理模型 .....                | 66         |
| 5.2.3 煤层上覆岩层裂隙扩展贯通 UDEC 软件二次开发 ..... | 67         |
| 5.2.4 海下煤层开采过程 UDEC 模拟分析 .....       | 70         |
| 5.3 覆岩破坏规律有限差分法数值模拟 .....            | 87         |
| 5.3.1 概述 .....                       | 87         |
| 5.3.2 FLAC-3D 流固耦合基本原理 .....         | 88         |
| 5.3.3 计算模型建立及计算参数 .....              | 90         |
| 5.3.4 数值计算结果及分析 .....                | 93         |
| <b>6 海域开采工作面覆岩导高实测技术 .....</b>       | <b>135</b> |
| 6.1 井下仰斜钻孔导高观测原理与方法 .....            | 135        |
| 6.1.1 井下仰斜钻孔导高观测方法概述 .....           | 135        |
| 6.1.2 井下仰斜钻孔导高观测仪结构 .....            | 135        |
| 6.1.3 井下仰斜钻孔导高观测方法 .....             | 137        |
| 6.1.4 观测仪器的改进 .....                  | 137        |
| 6.2 H2101 工作面正常条件下覆岩导高观测 .....       | 137        |
| 6.2.1 导水裂隙带高度观测方案 .....              | 137        |
| 6.2.2 H2101 工作面导高观测成果 .....          | 140        |
| 6.2.3 H2101 工作面导高观测成果综合分析 .....      | 142        |
| 6.3 H2106 工作面断层条件下采场覆岩导高观测 .....     | 145        |
| 6.3.1 H2106 工作面覆岩导水裂隙带高度观测方案 .....   | 145        |
| 6.3.2 H2106 工作面采前对比孔观测成果 .....       | 150        |
| 6.3.3 H2106 工作面采后导高观测成果 .....        | 152        |
| 6.3.4 H2106 工作面导高观测成果综合分析 .....      | 152        |
| <b>7 确定安全开采上限及开采技术措施 .....</b>       | <b>155</b> |
| 7.1 防水煤岩柱留设 .....                    | 155        |
| 7.1.1 保护层厚度的选取 .....                 | 155        |
| 7.1.2 导水裂隙带高度的确定 .....               | 156        |
| 7.1.3 回采上限的确定 .....                  | 158        |
| 7.2 安全开采技术措施 .....                   | 158        |
| 7.2.1 留设防水煤柱的有关技术规定及方法 .....         | 159        |
| 7.2.2 开采技术措施 .....                   | 162        |



|                        |     |
|------------------------|-----|
| 7.2.3 防水安全措施 .....     | 163 |
| 7.2.4 开采过程中观测与监测 ..... | 164 |
| 7.3 大型水体下开采安全性评价 ..... | 164 |
| 7.3.1 安全性评价体系 .....    | 165 |
| 7.3.2 安全性评价模型的建立 ..... | 167 |
| 参考文献 .....             | 173 |

# 1 绪 论

## 1.1 海下采煤工程实践

我国重点煤矿受水威胁的煤炭储量大约 250 亿吨,其中受地表水体(江、河、湖、海等)、松散含水层、基岩含水层等水体威胁的煤炭储量近百亿吨。仅就受河流影响来看,就有 200 多个矿井受百余条大小河流威胁,而华北、华东、东北地区的煤田普遍被第四系和第三系松散层含水层覆盖,造成其开采效益相对最好的浅部露头区煤层开采困难。开发大型水体下煤炭资源不仅能够增加我国东部经济发达地区的煤炭产量,缓解煤炭紧张的局面,而且能够使煤炭资源回收率最大化,有效保护耕地和环境。

21 世纪是人类开发利用海洋资源的世纪。随着现代社会和工业对各种矿产资源需求的增大以及陆上矿产资源的逐渐枯竭,研究和开发大洋海底矿产资源的问题就变得越来越迫切。由于海下采煤具有经济效益好、不破坏环境和资源回收率高等优势,世界上有海下煤炭资源的国家均优先开发海下煤炭资源。

在我国东部沿海地区,环渤海湾经济圈的胶东半岛从龙口到蓬莱已经勘测到海域下煤炭储量丰富,黄河入海口海域下也赋存有特厚煤层。龙口煤田含煤面积  $350\text{km}^2$ ,其中延伸至渤海海域的煤田面积约  $150\text{km}^2$ ,已探明煤炭储量为 26.8 亿吨,其中陆地为 13.9 亿吨,海域下为 12.9 亿吨。蓬莱海域和黄河口海域尚未对煤炭资源进行有计划地勘探,但仅龙口煤田海下局部已探明地质储量就使我国大型水体下压煤资源量得到极大地扩容。一方面,海域下煤炭资源作为东部煤田的补充和扩展,研究大型水体下安全开采,对稳定东部地区煤炭生产能力,保持东部地区煤炭生产长期可持续发展具有积极作用,对缓解环渤海湾经济圈、胶东半岛煤炭紧张的局面具有重要作用,对东南沿海等地区煤炭市场的支持具有潜在价值。充分利用和安全合理地开发海域下煤炭资源,尽快进行我国海域下综合机械化采煤技术的研究与开发具有重要的现实意义。另一方面,我国东部陆上煤田具有村庄密集、高产农田多而人均耕地少的特点。煤矿开采不可避免地引起土地塌陷、耕地减少和农作物产量降低问题,从而发生房屋损坏,导致工农关系紧张。而海域下采煤不涉及农田塌陷和工业民用建(构)筑物搬迁与保护等问题,可节省土地塌陷赔偿、房屋损坏赔偿或村庄搬迁等巨额费用,大幅度降低吨煤成本,且由于海域下采煤不涉及留设村庄保护煤柱问题,故可使煤炭资源回收率最

大化。同时可避免采煤引起的海水倒灌、沿海的农田及淡水资源遭受破坏等,所以海域下采煤具有良好的经济效益、社会和环境效益,符合我国“环境保护日益加强的中长期可持续发展能源战略”的要求和“科学发展观”的重大战略思想。

北皂煤矿位于龙口矿区西北部,濒临渤海,其海域扩大区处于井田北部渤海海域内,东至海域 21 勘探线,西和北至煤层露头,南至渤海海岸线,面积约  $18.1\text{km}^2$ 。区内地势平坦,海域内除近岸潮间滩涂外,海水水深  $0\sim 15\text{m}$ ,由南向北渐深。北皂煤矿海域扩大区的西部、北部煤层自然抬升,存在煤层露头,上部为第四系冲积层及海水覆盖,在浅部开采受第四系水及海水的威胁。为了确保浅部开采过程中不导通第四系及海水,需留设第四系防水煤柱,即确定海下开采上限高度。该研究是海下安全开采关键技术之一。《北皂煤矿海域扩大区开拓延伸初步设计》和《山东省龙口矿业集团有限公司北皂煤矿海域扩大区延伸初步设计安全专篇》,确定“第四系底界面向下至基岩垂高不小于  $80\text{m}$  的原则,各煤层露头部分在 XF-57 断层以西南部各煤层留出  $-175\text{m}$ 、在 XF-57 断层以东留出各煤层  $-150\text{m}$  及 F8 断层以北至露头为防水安全煤柱”。山东省煤炭工业局鲁煤安管字[2006]46 号文批复“首采区开采范围控制在  $-200\text{m}$  水平标高以下,  $-200\text{m}$  水平以上的开采必须另行专题研究”。所以在没有进行上限专题研究前,开采深度不能超过  $-200\text{m}$ 。

鉴于上述问题,首要问题是需要进行采空区上覆岩层破坏规律及安全厚度研究。采空区覆岩破坏高度及形态研究是矿井开采中合理确定开采边界的基础,一旦确定出正确的覆岩破坏高度和形态就可以据此合理确定井下开采边界,从而实现海底下安全采矿。因此,针对海域矿井覆岩类型和开采条件,通过相似模拟试验、数值分析、理论计算以及现场实测得出开采矿体时采空区覆岩临界安全厚度,为矿山的安全生产提供参考,对合理解决水体下资源开发利用与矿井安全之间的矛盾、充分利用该矿山的地下资源、延长矿山生产年限、提高企业经济效益,都有重要的意义。

## 1.2 海下采煤研究进展

### 1.2.1 国外海下开采研究现状

#### 1.2.1.1 国外海下开采情况

世界上进行过海下采煤的国家有:英国、澳大利亚、日本、加拿大和智利,采煤方法多为房柱式部分开采,也有长壁综采。国外海下采煤有着悠久的历史,英国早在 1560 年就已开始开采海底煤田,日本于 1863 年在长崎县高岛矿建了一座深  $45\text{m}$  的竖井开采海底煤田,加拿大海下采煤始于 1874 年。

国外海下采煤产量最多的是英国和日本,英国曾达到 1300 万吨/年,日本曾达到 1235 万吨/年。一般多在海滩及浅海下开采,离岸距离英国约为  $5\sim 8\text{km}$ ,

日本约为 12km 以上。英国海下采煤煤层厚度一般介于 0.6 ~ 3m, 海水深度为 7m, 没有发生过透水事故。当采用长壁或房柱式全部开采时, 英国、日本规定第四系黏土层厚度  $h_{\text{厚}} < 5\text{m}$  时, 采深应大于 105m, 其采深采厚比约为 60, 英国还规定煤系地层厚度应大于 60m; 在第四系黏土层厚度  $h_{\text{厚}} > 5\text{m}$  时, 采深应大于 70m。加拿大规定深厚比大于 100 时, 才允许用长壁垮落法开采。英国海下采煤的煤层厚度一般为 0.6 ~ 3.0m, 海水深度为 7m 左右, 没有发生过透水事故。

日本海下采煤的海水深度一般 0 ~ 15m, 局部达 70 ~ 80m, 采深一般在海下 200 ~ 500m, 井筒大多建在陆地, 井底至工作面一般 7 ~ 12km。由于工作面远离井筒, 造成运输和通风等条件恶化, 因此, 从 20 世纪 50 年代开始, 日本就在海域水深约 10m 处填筑人工岛开凿竖井解决通风问题, 人工岛最大直径达 205m, 并逐渐向海域深部发展。日本海下采煤积累了许多经验, 并制定了许多海下采煤的法律法规。由于资源枯竭, 大部分矿井已停止海下开采, 目前进行海下采煤的有原隶属于太平洋兴发株式会社的钏路煤矿等。日本宇部煤田曾发生 80 余次透水事故, 透水原因多数为断层受采动引发突水 (61 次), 覆岩塌落引起的 13 次。

### 1.2.1.2 国外海下采煤的相关安全技术规定

(1) 国外海下长壁法采煤的相关安全技术规定。海域下采煤的一条重要经验就是必须制定特殊的采掘计划和详细的安全措施。国外海下采煤国家多数采用房柱法或宽房回柱法, 而较少采用长壁法进行海下采煤, 且对允许采用长壁法的开采条件制定了较为严格的规定 (见表 1-1)。根据历年海下及其他水体下采煤矿井的涌水事故统计分析, 英国在 20 世纪 50 年代就对海下采煤提出了一些约束条件, 以后经几次修改, 有的以法律形式固定下来, 有的作为国家煤炭局颁发的指导性文件。日本煤矿保安规程对海下采煤规则和安全技术措施进行了原则性的规定。1975 年 1 月, 澳大利亚制定的《海下采煤指南草案》对海洋、湖泊等水体下采煤条件实行了较严格的规定。

表 1-1 国外海下长壁法采煤的相关安全技术规定

| 国 家  | 允许全采的最小覆盖层厚度/m | 允许最小深度下全采的最大采厚/m | 备 注             |
|------|----------------|------------------|-----------------|
| 英国   | 105            | 1.7              | 石炭纪地层的最小厚度为 60m |
| 澳大利亚 | 大于采厚的 60 倍     | 无限制              | 限制基岩面变形量        |
| 日本   | 100 (无第四系地层)   | 无限制              | 采区内必须建防水闸门      |
| 智利   | 150            | 无限制              | 最大可采厚度为 1.4m    |
| 加拿大  | 213            | 无限制              | 最大可采厚度为 2.74m   |

(2) 国外海下房柱法采煤最小覆盖层厚度的规定。实际上, 国外海下采煤大量地采用房柱法或宽房回柱法, 除了其传统习惯和技术装备外, 采用部分开采

法进行海下采煤其安全性相对要高，且最小覆盖层厚度相对较小，即其开采上限可以相对提高，达到提高矿井回采率的目的。有资料表明，澳大利亚在水体下大范围采用房柱法开采时，其最小覆盖层厚度大于 36.58m。国外对采用房柱法进行海下采煤时的最小覆盖层厚度的规定，见表 1-2。

表 1-2 国外海下房柱法采煤最小覆盖层厚度的规定

| 国 家       | 允许部分开采的最小覆盖层厚度/m | 规定形式      | 备 注     |
|-----------|------------------|-----------|---------|
| 英国        | 60               | 命令（国家煤炭局） | 仅用于部分开采 |
| 澳大利亚      | 46               | 指南（州政府）   | 仅用于部分开采 |
| 日本        | 93               | 法规        | 仅用于部分开采 |
| 智利        | 70               | 命令（矿山指导处） | 仅用于部分开采 |
| 加拿大（新斯科舍） | 55               | 命令（皇家法案）  | 仅用于部分开采 |

(3) 国外海下采煤基岩面变形的规定。国外海下采煤在对允许开采煤层的覆盖层厚度做出规定的同时，更进一步地对基岩面变形量做出规定。实际上，当允许开采煤层厚度一定的情况下，其覆盖层厚度与其顶面变形量是相关的，这样做的目的主要是为了避免超强度开采引起基岩面过度开裂，导致井下涌水量增大，见表 1-3。

表 1-3 国外海下采煤基岩面变形量的规定

| 国 家       | 允许最大拉伸变形值/mm·m <sup>-1</sup> | 规定形式      |
|-----------|------------------------------|-----------|
| 英国        | 10                           | 命令（国家煤炭局） |
| 澳大利亚      | 7.5                          | 指南（州政府）   |
| 智利        | 5.03                         | 命令（矿山指导处） |
| 加拿大（新斯科舍） | 7.71                         | 命令（皇家法案）  |

澳大利亚根据其地质开采条件和海下采煤实践，对采动引起的基岩面变形开裂极为重视，并进行了地表移动规律观测研究，总结出具有普遍意义的预计公式。新南威尔士煤田得出的确定海床最大拉伸变形值的普遍公式：

$$E_{\max} = K \frac{S_{\max}}{D}$$

式中， $E_{\max}$ 为最大拉伸变形值，mm/m； $K$ 是由观测结果求出的系数为 0.75； $S_{\max}$ 为大范围全部回采的最大下沉值，由观测结果求出为 0.6M， $M$ 为煤层采厚； $D$ 为基岩厚度。

设基岩面的最大允许拉伸变形值为 7.5 mm/m，于是上述公式可写成：

$$D = K \frac{S_{\max}}{E_{\max}} = 0.75 \times \frac{0.6M}{0.0075} = 60M$$

也就是说,如果产生在基岩面的最大拉伸变形不超过  $7.5\text{mm/m}$ ,当全部回采时,采厚为  $1.0\text{m}$ ,基岩厚度应为  $60\text{m}$ 。该经验公式对第四系厚度小、基岩岩性较硬、开采深度相对较浅的大型水体下采煤具有很高的参考意义。

### 1.2.1.3 国外海下开采安全保障措施

英国海下采煤防水措施,主要是从采煤方法、开采顺序、回采工作面布置、探查断层构造以及水质分析等综合措施,达到控制海下采煤的涌水量,而不采取为了堵水在井下设置防水闸门或防水墙的措施。实际上进行海下采煤,首要的是严格执行有关法律条文和国家煤炭局的有关规定,其次是在覆岩厚度小的地段按规定将长壁开采改为短壁、房柱或条带开采,一般不采用充填开采。

日本煤矿保安规程制定了一系列详细的安全技术措施,最主要的包括:(1)对预定采掘的区域及其周围海域,必须进行周密的探测,通过钻孔探明海底至煤层之间的地层情况,钻孔必须用水泥封孔。(2)掘进巷道时,如果地质条件不明,应打  $10\text{m}$  以上的超前钻孔。必要时,还应在巷道前进方向的旁侧方向打超前钻孔,探测有无出水的可能性。掘进工作面推进到离超前钻孔孔底  $5\text{m}$  时,应重新钻孔。巷道掘进面要比采煤工作面超前  $50\text{m}$  以上。

日本在井下防水安全措施方面取得相当成功的经验。在宇部煤田过去发生的 80 多次出水事故,大部分防止了海水的大量溃入,或限制了灾害的扩大。宇部煤田突水经验是:(1)出水地点多在断层附近,因此在断层两侧需留  $20\text{m}$  的防水安全煤岩柱,掘进时需打超前钻孔,并视具体条件设置永久和临时性防水闸门。(2)采用临时性水闸墙,不失时机地尽快和尽可能接近出水点将水堵住是极为重要的。井下发生突水,具有较强烈的自然充填的特点,自然充填的结果,不仅可以避免断层或裂缝等的扩展,而且使得突水通路堵塞。在自然充填的作用下,临时水闸墙可以抵抗  $200\text{m}$  高的水头。(3)构筑临时水闸墙的位置和材料,必须尽可能地设置在出水地点附近。构筑临时水闸墙的材料可用木板或木垛,并在其间填塞滤水材料。(4)在海下采煤时,海水渗透到矿井,掌握矿井水中海水含量的变化,可以作为矿井突水危险性尺度。

### 1.2.1.4 国外海下开采指导国内海下开采的主要经验

根据对国外海下采煤资料的综合分析可知,国外海下采煤的安全性(评价)及其设计依据,主要套用一系列相关的法律、法规,而这些法律、法规来源于开采实践,经不断修改、补充直至完善。尽管国外对采场覆岩破坏没有明确的“两带”高度概念,研究思路与我国也不尽相同,以英国和澳大利亚为例,其思路是在保证海下采煤的安全前提下,寻求采煤量与排水量的最佳平衡点,达到最好经济效益。但分析研究国外海下采煤经验对我国海下采煤的研究仍有所启迪或参考,其中与我国水体下采煤具有共性且较有价值的经验主要有:

(1) 国外海下采煤都根据各自的开采条件和开采方法,制定了适应本国或

本矿区的有关海下采煤的条例、规定、准则等法规，并通过多年的开采实践，以法律法规的形式固定下来。以日本为例，日本是海下采煤发生突水事故最多的国家，凡是按照保安规程，并在符合保安规程规定的条件下，进行海下采掘作业的均未再发生突水事故，其安全性是有保障的。

(2) 断层构造是海下采煤突水的最主要因素。通过对日本宇部煤田 80 次突水事故原因的分析可知，由断层构造因素所引起的突水为 61 次，顶板冒落所引起的突水为 13 次。可见，断层构造因素是海下采煤突水的最主要原因。分为两种突水类型：其一是由于地质条件不清楚，掘进面遇断层突水。这种情况，通过严格执行一系列相关安全技术措施，可以避免该类突水事故的发生；其二是地质条件较清楚，回采面遇断层突水。这种情况的突水原因与以下的分析应属同类突水。另外在顶板冒落所引起的突水原因中，设其开采条件符合保安规程，则在很大程度上是由于断层构造开采条件下的采场“非正常”覆岩破坏高度的异常增大，超高发育的导水裂缝带与上覆含水层沟通引起突水。该分析结果虽然已经不可能得到现场的依据，但国内水体下采煤现场观测研究结果，使我们不得不对断层构造开采条件下的采场“非正常”覆岩破坏高度问题引起足够的重视。

### 1.2.2 国内水体下开采研究现状

我国在湖下、河下、水库下、含水层下的煤炭开采有着丰富的实践经验，制定有水体下采煤的相关规程《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》，从而使得水体下压煤的安全开采，有了可遵循的技术法规。我国建立并发展了覆岩破坏由垮落带、导水裂缝带和整体移动带组成的“三带”理论，得出了用分式函数预计“三带”高度的经验公式，用于指导水体下采煤的设计与实践。我国水体下采煤主要在含水松散层和地表水体下进行了大量的开采和相关研究，如枣庄柴里煤矿在复合含水松散层下开采时仅保留不足 20m 防砂煤柱，安全开采了厚度大于 5m 的煤层；河北邢台矿区在弱含水松散层下开采时仅保留不足 10m 垂高的防塌煤柱，实现了 4.5m 厚煤层综采一次采全高安全开采；兖州矿区在中等富水含水松散层下开采时保留不足 53m 或 78m 防水煤柱，实现了 8.65m 厚煤层分层综采和综放开采；在微山湖、淮河等地表水体下均实现了厚煤层安全开采。

我国多年来全面、深入地研究了炮采、普通机采、综采、分层综采、综放等不同采煤方法条件下的覆岩破坏规律、探测技术和手段以及防水安全措施等，取得了水体下采煤的丰富经验。我国水体下采煤方法基本为长壁全部垮落法，安全开采标高主要是根据覆岩破坏高度加以确定，所作研究工作较深入，规律掌握较清楚，设计方法较合理，安全生产较有保障，根据水体下采煤生产实践或按照《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》规定，所设计的保



护煤柱厚度一般仅 10~30 倍采厚（个别矿甚至小于 10 倍采厚），明显小于国外海域下采煤情况。

综放开采在我国水体下采煤领域的应用开始于 20 世纪 90 年代初，如兖州、邢台、龙口、大屯、淮南等矿区，针对不同富水性的松散含水层水体和不同类型的覆岩，在留设防水、防砂及防塌煤柱等条件下都成功地实现了综放安全开采。由于采煤方法的变革，也对覆岩破坏高度及程度产生了十分明显的影响。这些经验均可为我国海域下采煤在技术、理论上以及安全措施等方面提供借鉴。

虽然我国在江、河、湖泊和水库等一般水体下开采积累了丰富的经验，但海域下采煤研究在我国尚无先例，海域下综放开采在世界上也无先例，没有针对海域下采煤特殊条件进行全面、系统地研究和实验，更缺少海域下采煤实践经验。

（1）目前我国指导水体下采煤的相关规程为《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》，主要根据几十年来对中厚煤层或厚煤层分层开采后覆岩破坏规律实测和研究，对厚煤层综放开采条件下覆岩破坏高度的预测和保护层厚度的确定没有进行规定。随着煤矿机械化水平的不断提高，综放开采逐渐普及，采煤方法的变革，对覆岩破坏高度及程度产生了十分明显的影响。因此，采用新的研究方法深化研究不同采煤方法，尤其是较准确地预测综放开采条件下的导水裂缝带发育高度，合理确定水体下综放条件下保护层厚度，对于水体下综放安全采煤具有重要的现实意义。

（2）由于多种原因，目前国内对断层构造条件下“非正常”覆岩破坏规律的实测研究相对甚少，对断层构造条件下的采场“非正常”覆岩破坏高度的异常增大问题，至今尚未引起足够的重视，这也是在大型水体下开采需要加强研究的一个重要问题。

（3）预警系统和应急预案在我国矿井瓦斯和煤层底板突水预测方面应用较多，且多是针对某个工作面的短期监测，没有形成长期、系统的监测系统，在体系结构、通讯方式等方面与煤矿现代化生产的需要之间存在较大差距；在大型水体下开采中，不管是理论研究和实际应用都处于起步阶段，新的理论和方法需要综合统一后形成系统体系，并在实践中开展应用。

（4）同一般水体下采煤相比，海下采煤有其特殊性。海下采煤从广义上讲是属于水体下采煤范畴，除了存在一般水体下开采所遇到的共性问题之外，尚存在一些特殊的困难和问题：

1) 海下采煤以前，难以取得足够的地质资料，由于勘探费用过高，很难按煤田地质勘探的要求进行勘探，因而达不到陆上采煤地质勘探的精度。

2) 水文地质资料几乎完全依赖陆地资料向海下的推演，井下钻孔局限性的钻探资料难以满足海下采煤的实际需要，断层导水性等类似问题很难解决。

3) 海下采煤决不允许发生任何由于海床变形与破坏而造成海水溃入和淹井，



一旦发生海溃将造成巨大的灾害。

因此,针对海下采煤的安全问题,建立完善的地质保障、信息管理和监测体系、设立防灾害性溃水工程设施及其应急预案、研究海域下开采覆岩破坏和地下水场变化规律、确定合理的回采上限、保证海下开采的安全等是实现海底安全采煤的重要内容,对实现大型水体下煤炭资源的安全高效回采,形成我国大型水体下安全高效开采的理论与拥有自主知识产权的关键技术、设备,全面提升我国水体下采煤的综合技术水平具有重大意义。

### 1.2.3 导水裂隙带研究现状

导水裂隙带高度及形态研究是矿井开采中合理确定开采边界的基础,是矿井水体下采煤安全生产的关键。对于近水平煤层矿井的开采,合理确定其开采边界,不但是安全生产的问题,更是提高开采上限、扩大矿井储量,延长矿井服务年限,提高经济效益的有效途径。

#### 1.2.3.1 国外导水裂隙带研究现状

国外对导水裂隙带的理论也进行了长期研究,并各自根据本国实际制订了相关规程与规定。英国矿业局早在1968年就颁布了海下采煤条例,对覆岩的组成、厚度、煤层采厚以及采煤方法等作了相应的具体规定;日本曾有11个矿井进行过海下采煤,海下采煤的水患防治措施严密,安全规程针对冲积层的组成与赋存厚度作出了允许与禁止开采规定;俄罗斯于1973年出版了确定导水裂隙带高度方法指南,1981年颁布了有关水体下开采的规程,根据覆岩中黏土层厚度、煤厚、重复采动等条件的变化来确定安全采煤,但这些规定与规程大多是统计经验而没有深入的理论与方法研究。

#### 1.2.3.2 国内导水裂隙带研究现状

我国对导水裂隙带的研究仍基本处于经验统计、类比、数值模拟(包括以ADINA、ANSYS、FLAC为主的有限元,以及UDEC、MDEC等离散元、边界元、离散元与边界元耦合等)、相似材料模拟、实测钻孔冲洗液法、钻孔电视法、瞬变电磁法、高密度电阻率法、超声波穿透法、声波CT层析成像技术、井下仰孔注水测漏法以及某一类条件的简单理论分析等研究阶段。对于导水裂隙带高度的计算,《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中给出一组统计经验公式,该公式是基于当时炮采与普通机采、推进速度在40m/月左右的开采条件下取得的,并且每一公式都有其应用条件。随着生产力水平的提高和发展,出现了分层综采、厚煤层一次采全高、厚煤层综放开采及快速推进高产高效的新采煤技术。《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》中的导水裂隙带高度的预测公式不再完全适用,而针对海下三软煤层的开采则有必要对其进行新的探讨和研究,获得在海下开采条件下导水裂隙带的发育规律及导