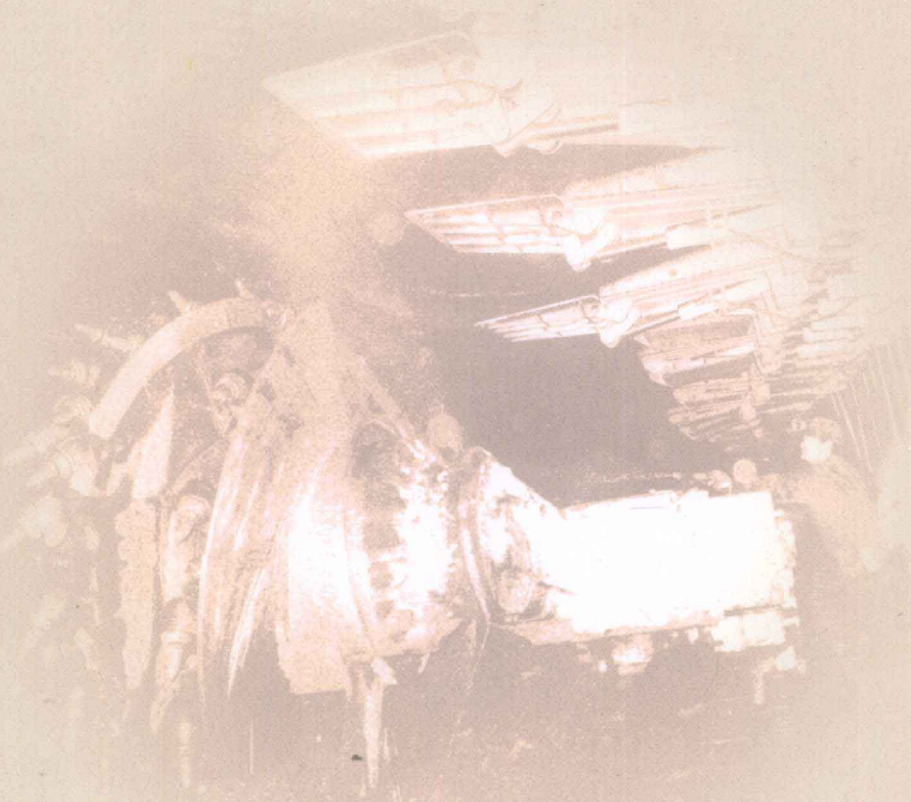


矿井突水危险性评价 理论与方法

Theory and Method of Water Inrush Risk Assessment in Coal Mine

孟召平 高延法 卢爱红 著



科学出版社

国家重点基础研究发展计划项目(“973”计划)(2007CB209405)

教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20100023110003)

神华集团科技创新项目(SHGF-11-08)

国家自然科学基金重点项目(51034003)

湖北省“楚天学者计划”特聘教授岗位资助

矿井突水危险性评价理论与方法

Theory and Method of Water Inrush Risk Assessment in Coal Mine

孟召平 高延法 卢爱红 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

煤层顶底板突水危险评价与预测是矿井水害防治的重要基础和依据。本书以开滦矿区范各庄矿等典型大水矿井为依托,从地质条件和采动破坏分析入手,采用实验研究、理论分析和数值模拟计算等方法,从煤层顶底板突水的水源、通道和介质条件分析入手,系统研究煤层顶底板突水的地质力学条件,包括煤层顶底板突水地质条件、岩石力学条件和地应力条件等,剖析了煤层顶底板突水与这些条件之间的相关关系,揭示煤层顶底板突水控制因素和作用机理。根据隔水层的岩性和结构特征,提出评价隔水层隔水性能和抗水压能力的岩性-结构分类,建立基于岩性-结构的煤层底板突水危险性评价理论与方法,对范各庄井田12#煤层底板突水危险性进行定量评价。针对煤层顶板含水层类型,根据上覆岩层的岩性、导水裂隙带高度和有效保护层厚度等参数,建立了煤层顶板突水危险性评价理论与方法,并对范各庄井田5#煤层顶板进行评价分析。针对煤层底板多层介质特征,建立煤层底板突水复合板力学模型和计算方法。进一步从采场围岩的变形与破坏分析入手,研究了煤层顶底板的变形与破坏规律及其影响因素,介绍了计算采动引起的底板破坏理论模型和相应的计算公式,研究了覆岩导水裂隙带的发育规律和导水裂隙带高度确定方法,提出了巨厚松散层条件下的保护层厚度留设的非线性理论与方法,并开发了“煤层底板突水危险性评价专家系统”,为矿井突水发生可能性的判断提供理论依据。研究成果对开滦矿区乃至全国其他大水矿区具有广泛的推广应用前景。

本书可供煤田地质、工程地质、水文地质、采矿工程、地质工程及矿井地质灾害等专业从事相关课题研究的科研人员、工程技术人员及大专院校的研究生和教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿井突水危险性评价理论与方法/孟召平,高延法,卢爱红著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-032135-0

I. ①矿… II. ①孟…②高…③卢… III. ①矿井突水-评价
IV. ①TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 170461 号

责任编辑:贾瑞娜 / 责任校对:张小霞
责任印制:张克忠 / 封面设计:迷底书装

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011年6月第一次印刷 印张:17

印数:1 2 000

字数:420 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在我国煤矿重、特重大事故中,矿井突水事故在死亡人数上和发生次数上仅次于煤矿瓦斯事故,但造成的经济损失一直居各类煤矿灾害之首。随着矿井开采深度的增加,矿井突水事故居高不下,据统计,2000~2010年发生重、特大矿井突水事故586起,死亡达3011人。在过去的20年内,有250多对矿井被水淹没,经济损失高达350多亿元人民币,同时,对矿区水资源与环境也造成巨大的破坏。煤矿突水事故难以遏制的關鍵问题在于人们对突水发生机理的认识还不够深入,缺乏有效指导矿井突水预测和防治的系统理论和方法。因此,如何在煤炭开采前对煤层顶底板突水因素及危险性进行预测,并采取相应的防治措施,已成为迫切需要解决的问题。

煤层顶底板突水是一种复杂的地质及采动影响现象,是煤层上覆或下伏含水层水冲破顶板或底板隔水层的阻隔,以突发、缓发或滞发的形式进入采掘工作面,造成矿井涌水量增加或淹没矿井的自然灾害,其受地质因素与开采因素所控制。煤层顶底板突水危险性受控于含水层条件、隔水介质条件、导水通道条件及赋存环境条件(如地应力场条件)。含水层条件主要包括反映含水层富水性的承压水的厚度、裂隙发育程度和水压等因素,隔水介质条件包括煤层底板隔水层厚度、岩性和结构分布,导水通道条件包括断裂构造、岩溶陷落柱和采动裂隙。煤层顶底板突水不仅受地质条件所控制,而且与采动因素密切相关。因此,煤层顶底板突水是上述因素综合作用的结果,突水机理也具有多样性。2007年开始国家重点基础研究发展计划(“973”计划)设立“煤矿突水机理与防治基础理论研究”项目,围绕矿井突水的含导水构造地质特征及条件、采动岩体结构破坏与裂隙演化及渗流突变规律,以及矿井突水预测与控制的基础理论和方法三个科学问题开展研究。矿井突水危险性评价与预测是矿井水害防治的重要基础和依据,是国家“973”计划项目研究的重要内容,并设立了专题“矿井突水的危险性评价理论与方法”(2007CB209405),重点从地质因素和采矿因素方面研究和解决矿井突水预测的科学评价问题,为矿井突水发生可能性的判断提供理论依据。

本书共11章,以开滦矿区范各庄矿等典型大水矿井为依托,从地质条件和采动破坏分析入手,采用实验研究、理论分析和数值模拟计算等方法,从煤层顶底板突水的水源、通道和介质条件分析入手,系统研究煤层顶底板突水地质条件、岩石力学条件、地应力条件及煤层顶底板的变形与破坏规律等,剖析了煤层顶底板突水与这些条件之间的相关关系,揭示煤层顶底板突水控制因素和作用机理,并开发了具有自主知识产权的“煤层底板突水危险性评价专家系统”,为矿井突水发生可能性的判断提供理论依据。研究成果对开滦矿区乃至全国其他大水矿区具有广泛的推广应用前景。

全书由孟召平教授、高延法教授和卢爱红副教授合作完成,其中前言和第1~6章由孟召平教授撰写,第9~11章由高延法教授撰写,第7章由卢爱红副教授撰写,第8章由孟召平教授(8.1~8.3和8.6)和高延法教授(8.4和8.5)共同撰写,全书由孟召平教授统稿。

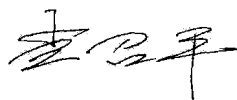
本书是作者负责承担的国家重点基础研究发展计划项目(“973”计划)“矿井突水的危险性评价理论与方法”、教育部高等学校博士学科点专项科研基金“矿井动力现象与地应力的耦合模型及作用机理”(20100023110003)、神华集团科技创新项目“神东矿区现代煤炭开采技术下对地下水资源和生态影响规律研究”(SHGF-11-08)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课

题“高产高效矿井地质保障系统标准”(SKLCRSM10B06),以及前期多项部门科研课题研究成果的整理和总结。需要指出的是,本书是我们研究集体的共同成果。参加这方面研究的成员还有易武博士和王睿博士。硕士研究生刘亮亮、王萌、兰华、谢晓彤、贾立龙、申正伟、张贝贝等为本书的插图进行了计算机清绘和部分资料的收集整理。在此特表谢意!

本书研究工作自始至终得到中国矿业大学彭苏萍院士、缪协兴教授、王家臣教授、孙亚军教授、武强教授、许家林教授、刘树才教授、白海波教授、崔若飞教授、刘盛东教授、茅献彪教授、陈忠辉教授和刘钦甫教授等;大连理工大学唐春安教授、梁正召博士;山东大学李术才教授、李树忱教授;东北大学杨天鸿教授、朱万成教授;三峡大学李建林教授、田斌教授、张国栋教授、彭慧明教授、易武教授、易庆林教授和程圣国老师;开滦(集团)有限责任公司洪益清副总工程师、刘伯科长,开滦能源化工股份有限公司范各庄矿业分公司冯树国副总工程师、王柏林科长,东欢坨矿业分公司张显峰总工程师和李瑛副总工程师的关心与帮助,在此表示衷心地感谢。同时,还要感谢书中引用文献作者的支持和帮助。

本书的出版得到了国家重点基础研究发展计划项目(“973”计划)、国家自然科学基金重点项目、教育部高等学校博士学科点专项科研基金、神华集团科技创新项目、煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主研究课题,以及多项部门科研课题的资助,同时,也得到了湖北省“楚天学者计划”三峡大学地质工程专业特聘教授岗位的资助。在此表示衷心的感谢。

由于矿井突水的危险性评价理论与方法研究涉及多学科理论与方法,有许多理论和实践问题仍有待于深入探讨与揭示,因此书中不妥之处敬请读者批评指正。



2011年5月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.3 本书研究的内容和方法	5
1.3.1 主要研究内容	5
1.3.2 主要研究方法	6
参考文献	8
第 2 章 矿井水文地质条件	11
2.1 引言	11
2.2 矿井涌水基本条件	11
2.2.1 矿井水的来源	11
2.2.2 矿井涌水的通道	14
2.2.3 矿井水文地质类型划分	17
2.3 研究区水文地质条件	18
2.3.1 区域地质背景	18
2.3.2 开滦范各庄井田水文地质条件	21
参考文献	29
第 3 章 煤层顶底板岩石力学条件	30
3.1 引言	30
3.2 煤层顶底板岩石力学性质	30
3.3 岩石全应力-应变-渗透规律	33
3.4 水对岩石力学性质的控制	36
3.4.1 含水量对岩石变形与强度的影响	36
3.4.2 不同含水量下的岩石变形破坏机制	38
3.5 沉积结构面及其对岩体力学性质的影响	40
3.5.1 引言	40
3.5.2 沉积结构面的成因类型	41
3.5.3 沉积结构面对岩体力学性质的影响	42
3.6 断层带附近煤岩体物理力学性质	45
3.7 岩石破坏的工业 CT 分析	47
3.7.1 工业 CT 分析	47
3.7.2 岩石破坏的基本形式	48
3.7.3 煤层顶底板岩石微观破坏机理	51
3.8 煤层顶底板岩石破坏准则	51

3.8.1 莫尔-库仑(Mohr-Columb)准则	51
3.8.2 格里菲斯(Griffith)准则	53
参考文献	54
第4章 地应力条件及其对矿井突水的控制	56
4.1 引言	56
4.2 岩体中地应力场构成	56
4.3 开滦矿区地应力场特征	58
4.3.1 开滦矿区原岩应力测量	58
4.3.2 地应力随深度的变化	59
4.3.3 垂直应力与水平应力之间的关系	60
4.4 地应力对煤层底板压裂破坏的影响	62
4.4.1 煤层底板水压破坏突水机理	62
4.4.2 煤层底板水压破裂与最小主应力的关系	63
4.4.3 基于地应力的煤层底板采动破坏突水机理	64
4.5 裂隙岩体渗透特性与应力耦合关系	65
4.6 基于地应力的煤层底板突水危险性评价应用	70
参考文献	74
第5章 煤层顶底板突水危险性地质评价理论与方法	75
5.1 引言	75
5.2 矿井突水类型及典型案例	75
5.2.1 矿井突水类型	76
5.2.2 开滦范各庄矿典型突水案例	78
5.3 煤层底板突水危险性地质评价	81
5.3.1 煤层底板隔水介质条件	81
5.3.2 水压与隔水层厚度比	83
5.3.3 煤层底板突水危险性评价分类	84
5.3.4 煤层底板突水危险性评价方法	85
5.4 煤层顶板突水危险性地质评价	86
5.4.1 导水裂隙带高度	86
5.4.2 第四系冲积含水层的突水危险性	90
5.4.3 煤层顶板砂岩裂隙含水层的突水危险性	91
参考文献	91
第6章 开滦范各庄井田煤层顶底板突水危险性评价	93
6.1 引言	93
6.2 井田突水特征	93
6.3 煤层底板突水危险性地质评价	95
6.3.1 12#煤层底板突水地质条件分析	95
6.3.2 研究区12#煤层底板突水危险性评价	101
6.4 煤层顶板突水危险性评价	104
6.4.1 5#煤层顶板突水地质条件分析	104

参考文献	113
第7章 煤层底板突水的复合板力学模型及数值模拟分析	114
7.1 引言	114
7.2 多层厚板力学模型及计算方法	114
7.2.1 多层厚板力学模型	115
7.2.2 多层厚板状态方程的解	116
7.2.3 多层厚板理论解计算程序框图	117
7.2.4 突水危险性分析	117
7.3 煤层底板突水的复合薄板力学理论	119
7.3.1 三层薄板力学模型	119
7.3.2 中性面距离 e 的重新定位	120
7.3.3 弯曲等效导出抗弯刚度和弯曲折算模量	122
7.3.4 伽辽金法应用于薄板的小挠度弯曲问题	123
7.3.5 煤层底板力学特性对复合岩层变形的影响	124
7.4 复合薄板理论的数值模拟分析	129
7.4.1 计算模型	129
7.4.2 复合岩层力学参数的计算	130
7.4.3 数值模拟结果分析	131
7.5 煤层底板突水危险评价力学模型	133
7.5.1 煤层底板突水危险的理论判据	133
7.5.2 煤层底板复合岩层的极限水压力分析	133
参考文献	135
第8章 采场底板变形破坏规律及其预测	137
8.1 引言	137
8.2 煤层开采底板岩体变形破坏特征及渗透规律	137
8.3 煤层底板三带厚度的确定	139
8.3.1 煤层底板采动破坏深度的确定	139
8.3.2 有效隔水层保护带厚度的确定	140
8.4 采场底板破坏深度观测方法	141
8.4.1 底板破坏深度的影响因素分析	141
8.4.2 采场底板破坏深度观测方法	141
8.4.3 底板破坏深度观测实例	142
8.5 煤层底板突水影响因素及底板突水优势面理论	144
8.5.1 煤层底板突水影响因素	144
8.5.2 煤层底板突水优势面理论	145
8.6 开采因素对煤层底板变形破坏影响数值模拟分析	146
8.6.1 计算模型	146
8.6.2 煤层底板垂直应力分布	147
8.6.3 煤层底板岩体的变形破坏规律	149
8.6.4 开采深度的影响	153

参考文献	155
第9章 煤层底板突水危险性评价专家系统	156
9.1 引言	156
9.2 煤层底板突水危险性评价专家系统	156
9.2.1 系统设计目标及原则	156
9.2.2 专家系统的开发步骤	157
9.2.3 专家系统开发工具的选择	158
9.3 煤层底板突水危险性评价专家系统的结构与功能	160
9.3.1 底板突水危险性评价专家系统的结构体系	160
9.3.2 底板突水危险性评价专家系统的功能	161
9.3.3 底板突水危险性评价专家系统的特点	161
9.4 煤层底板突水危险性评价专家系统的结构	162
9.4.1 底板突水的主要影响因素	162
9.4.2 系统的参数选取及其量化分析	162
9.4.3 底板突水危险性评价专家系统的人机交互界面	163
9.5 煤层底板突水危险性评价专家系统的知识库	167
9.5.1 系统的知识库结构	167
9.5.2 系统的知识表达方式	168
9.5.3 典型突水案例知识库	169
9.6 底板突水危险性评价推理途径	174
9.6.1 专家系统的推理方法	174
9.6.2 底板突水危险性评价专家系统的推理途径	176
9.6.3 基于突水系数的底板突水危险性评价推理途径	177
9.6.4 基于突水优势面的底板突水危险性评价推理途径	180
参考文献	186
第10章 采场覆岩变形破坏规律及导水裂隙带高度确定方法	188
10.1 引言	188
10.2 采场覆岩变形破坏规律及垂直分带特征	188
10.3 覆岩导水裂隙与层向拉伸率的关系	190
10.3.1 覆岩破坏状态与导水裂隙带的发育	190
10.3.2 岩层弯曲下沉曲线形态与岩层拉伸率计算方法	191
10.3.3 裂采比、岩层层向临界拉伸率与岩性的关系	193
10.4 采场覆岩离层发育规律分析	194
10.4.1 层面的弱黏结特性及其离层方式	194
10.4.2 离层的三种采动状态	195
10.5 覆岩导水裂隙带高度观测方法	196
10.5.1 导水裂隙带高度的钻孔冲洗液漏失量观测方法	196
10.5.2 井下仰斜钻孔导高观测方法	199
10.6 巨厚松散层防水煤岩柱高度确定方法	201
10.6.1 防水安全煤岩柱的地层结构力学模型	201

10.6.2 松散层厚度与防水安全煤岩柱高度的关系分析	202
10.6.3 厚松散层条件下的防水安全煤岩柱留设方法	202
10.7 覆岩导水裂隙带高度观测应用实例分析	204
10.7.1 龙口矿区北皂煤矿海域导水裂隙带高度观测研究	204
10.7.2 开滦钱家营煤矿七煤层开采覆岩导高观测	207
参考文献	211
第 11 章 含水层(水体)下安全开采上限确定工程实例	212
11.1 引言	212
11.2 开滦钱家营矿巨厚含水冲积层下安全开采上限研究	212
11.2.1 钱家营矿六采区的地质开采条件	213
11.2.2 钱家营矿六采区覆岩结构分析	216
11.2.3 8#、9# 和 12# 煤层开采上限的确定	222
11.3 林南仓矿含水冲积层下安全开采上限研究	230
11.3.1 林南仓矿地质开采条件	230
11.3.2 林南仓矿西四采区煤层厚度及覆岩结构分析	232
11.3.3 林南仓矿西二采区导高观测与提高开采上限现状	237
11.3.4 林南仓矿西四采区煤层开采上限的确定	242
11.4 七台河铁麒麟煤矿桃山水库下煤层安全开采上限研究	246
11.4.1 铁麒麟煤矿地质条件	247
11.4.2 桃山水库下压煤开采可行性论证	248
11.4.3 桃山水库压煤区开采上限的确定	251
参考文献	260

第 1 章 绪 论

1.1 研究目的与意义

矿井突水是煤矿生产中的重大灾害之一。煤矿突水事故给煤炭企业带来的人身伤亡和经济损失极为惨重。在我国煤矿重、特大事故中,突水事故在死亡人数上和发生次数上仅次于瓦斯事故,给国家造成的直接经济损失一直居于首位。据统计,在过去的 20 多年里,有 250 多对矿井因突水而淹没,经济损失高达 350 多亿元人民币,同时,对矿区水资源与环境也造成巨大的破坏^[1~3]。近年来,随着科学技术的进步,煤矿生产与建设过程中的装备、工艺、技术都有了极大的提高,但煤矿突水事故却频繁发生。特别是 2000 年以来,煤矿突水事故又呈上升趋势。据统计,2000~2010 年发生重、特大矿井突水事故 586 起,死亡达 3011 人(表 1-1)。

表 1-1 2000~2010 年煤矿重、特大突水事故统计

年 份	事故次数/次	死亡及失踪人数/人
2000	9	98
2001	38	176
2002	93	387
2003	92	424
2004	61	254
2005	104	593
2006	38	267
2007	63	255
2008	49	263
2009	21	125
2010	18	169
总计	586	3011

频繁发生的矿井突水事故不仅造成矿井人员的死亡,也严重影响煤矿的正常生产,特别对一些年产量达 $500 \times 10^4 \text{t}$ 以上的高产高效现代化矿井影响极大,一旦发生突水事故,即使不淹井、不死人,也可能造成综采机械设备的严重损坏,被迫停产,造成巨大的经济损失。因此,开展矿井突水危险性评价理论与方法研究,有效遏制矿井突水事故的发生,保障煤矿安全生产,是目前煤炭工业需要解决的问题。

我国煤矿开采的水文地质条件复杂,矿井突水类型多,成因机制和防治方法也渐趋复杂化^[4]。我国主要开采的华北石炭二叠纪煤田和南方晚二叠世煤田主要含水层属于灰岩岩溶含水层类型,矿井涌水量很大,突水淹井事故频繁;黄淮平原的煤田又受到上覆第四纪冲积层水的危害。煤矿地下水害严重地威胁着煤矿的安全生产。据统计,我国有 60% 的煤矿不同程度地受到岩溶承压水的影响威胁,受水害的面积和严重程度均居世界各主要采煤国家的首位,且随着矿山开采深度的增加,水压不断增大,有些矿区底板承压已达 10MPa 以上,深部开采的水害问题日益

严重^[15],有些矿井因为底板水的威胁而不能开采,如我国的开滦矿区在生产过程中受到煤层上覆的第四系冲积层、地表水体、煤层顶底板砂岩裂隙水及底部奥陶系石灰岩岩溶裂隙承压含水层的威胁,历史上曾发生过多种类型的突水,给开滦矿区煤炭安全生产造成重要影响。例如,1978年3月8日,范各庄矿二水平延深中204开拓工作面发生突水,最大涌水量达 $468\text{m}^3/\text{min}$,经34h 15min便淹没了二水平,开拓工程推迟了一年。突水的原因是204工程在12#煤层底板砂岩含水层施工时,揭露一条宽度达0.4m的大裂隙造成突水。1984年6月2日,范各庄矿2171综采工作面,揭露隐伏导水陷落柱,奥陶系岩溶强含水层的高压水经陷落柱溃入矿井,高峰期突水量达 $2053\text{m}^3/\text{min}$,历时20h 55min便淹没了—一个年产 $300\times 10^4\text{t}$ 、开采近20年的大型矿井,因此矿井突水成为影响我国煤矿安全生产的重要地质因素。

矿井突水危险性评价与预测是矿井水害防治的重要基础和依据。由于矿井突水地质条件复杂,影响因素多,以往普遍使用的突水系数是用来判别突水与否的一个指标,在实际应用中,常常根据一个矿区的水文地质条件、底板受到的水压、厚度及岩性组合计算出一个确定的值。它与隔水层的阻水性能、岩性、地层结构、采煤方法、矿床充水含水层的富水性和水动力学特征等因素没有直接关系,也就是说,突水系数所包含的和反映的地质、水文地质及其他有关的信息量不够。突水事件发生的随机性与突水系数值的确定性在某些情况下是有矛盾的,实际应用受到了局限,尤其是在矿井深部开采时,其预测的准确度较低。矿井突水危险性评价与预测问题已成为迫切需要解决的问题。因此,在煤炭开采前对矿井突水危险性进行评价与预测,并采取相应的防治措施,对我国煤矿安全生产具有重要的理论和实际意义。

1.2 国内外研究进展

在世界产煤大国美国、中国、英国、澳大利亚、俄罗斯等国中,俄罗斯、匈牙利、中国等国地质和水文地质条件比较复杂,大水矿区分布较广,突水灾害严重。早在20世纪初,国外就有人注意到底板隔水层的作用,认识到隔水层越厚则突水次数及突水量越少。40~50年代,匈牙利的韦格弗伦斯第一次提出隔水层厚度与水压之比的底板相对隔水层的概念,指出煤层底板突水不仅与隔水层厚度有关,而且还与水压力有关。

原苏联学者B. 斯列萨列夫将煤层底板视作两端固定的承受均布载荷作用的梁,并结合强度理论,推导出底板理论安全水压值的计算公式。20世纪60~70年代,匈牙利国家矿业技术鉴定委员会将相对隔水层厚度的概念列入《矿业安全规程》,并对不同矿井条件做了规定和说明,利用相对隔水层厚度进行突水判别。原苏联、原南斯拉夫等国的学者这期间也开始研究相对隔水层的作用,包括采空区引起的应力变化对相对隔水层厚度的影响,以及水流和岩石结构关系等。70~80年代末期,很多国家的岩石力学工作者在研究矿柱的稳定性时,研究了底板的破坏机理。其中,最有代表性的是C. F. Santos(桑托斯)、Z. T. Bieniawski(宾尼威斯奇)。他们基于改进的Hoek-Brown岩体强度准则,并引入临界能量释放点的概念分析了底板的承载能力。原苏联学者A. A. БОРИСОВ首先采用相似材料立体模型对采空区底板岩层的变形进行了研究,Faria等从岩石力学的角度研究底板破坏机理,这些理论与方法对矿井突水研究具有重要的指导作用^[16~20]。

我国的水文地质研究起步较晚,20世纪50年代开始从原苏联引进教材,培养专业人才。60~70年代,开展了全国范围内大规模的水源勘察和开发,对基岩裂隙介质和岩溶发育与富水规律有了一定的认识。70年代末引入了欧美的地下水动力学的最新研究成果,丰富了地下水动

力学的研究内容和方法。由单一的稳定流抽水试验发展到非稳定流,水文地质条件评价和计算方法由解析、经验方法到有限单元和边界元等数值方法模拟计算,为我国水文地质科学研究奠定了基础。

我国煤矿突水一直是制约煤矿安全生产的重大技术难题。针对煤矿生产过程中断层突水、底板突水和岩溶突水预测与防治问题,我国学者开展了大量的科研工作^[21~31]。20世纪50年代我国首先引入了原苏联的斯列萨列夫理论进行突水预测。60年代我国学者总结了大量突水案例,统计了峰峰、焦作、淄博和井陘四个矿区与突水密切相关的水压和底板隔水层厚度资料,从促发与阻抗突水两方面的诸多因素中筛选出含水层水压和隔水层厚度两个主要因子,提出了突水系数的概念,建立了突水系数的经验公式并很快在全国推广使用。突水系数阈值(临界值)依据大量突水实测资料统计得到,确定为 $0.06\sim 0.07\text{MPa/m}$,并以此确定是否为受水害威胁,不同矿区依据实际情况选择临界突水系数。由于突水系数物理概念比较确定,公式简单实用,对在煤矿生产实践中预测煤层底板突水和在一定水压条件下进行带压开采,解放受承压水威胁的煤炭资源起了积极作用,所以一直沿用至今。近些年来,在煤矿底板突水危险性评价研究方面,由单一考虑水压问题发展至考虑矿压与水压共同作用,引入渗流-损伤耦合理论研究应力场与渗流场相互作用,进一步贴近了突水问题的实质与过程,提出了各自的评价方法,取得了一定进展。值得指出的是,70年代,煤炭科学研究总院西安分院借鉴匈牙利的经验,考虑了矿压对底板的破坏作用,对突水系数公式进行了修正。在多年的使用中又逐渐加入了采矿破坏深度和原始导升高度等指标。长期以来,上述方法在我国的矿井防治水方面发挥了重要的作用,不仅被写入了有关规程,而且至今在某些方面仍有应用。但各矿区临界值难以确定,特别是在断裂和陷落柱等岩体强度减弱的区域更难使用。为解决高压水对煤矿的威胁,原煤炭部组织了“六五”、“七五”、“八五”等以探查和突水治理技术为目的的科研攻关。在隐伏陷落柱探测与防治、煤层底板测试与突水预测预报、带压开采、浅层帷幕截流和控制疏水技术方面,取得了一定的突破,提出了突水临界指数法、“下三带”理论^[26]、原位张裂和零位破坏理论^[7]、板模型理论^[3]、关键层理论^[8]、突变及非线性模型^[24,25]、突水优势面理论^[11]、底板突水的动力信息理论^[5]、强渗流说、相似理论^[22,32]、岩-水应力关系说^[10]等突水判据和理论,形成了包括防水煤岩柱留设、双降采煤、底板注浆等突水防治方法。目前这些成果为防治煤矿底板突水起到了积极的指导作用。

岩层采动破坏是形成矿井突水的通道,是进行矿井突水预测和制定矿井水害防治决策的重要理论基础。煤层顶底板岩石采动破坏受岩石类材料本身岩性及其力学性质和开采范围的影响。虽然完整描述采动覆岩变形—破断—移动及裂隙演化全过程十分困难,但采矿和力学等领域工作者从不同视角开展了系统研究^[33~43]。刘天泉院士等对我国煤矿开采岩层破坏与导水裂隙分布作了大量的实测和理论研究,对采场岩层移动破断与采动裂隙分布规律提出了“横三区”、“竖三带”的总体认识,即沿工作面推进方向覆岩将分别经历煤壁支承影响区、离层区、重新压实区,由下往上岩层移动分为垮落带、断裂带、整体弯曲下沉带;并得出计算导水裂隙带高度的经验公式,有效指导了我国煤矿的水体下采煤试验^[34]。原山东矿业学院荆自刚、李白英等^[26]提出了“下三带”理论的概念,将煤层底板分为底板破坏带、完整岩层带、承压水导高带。随后,许多研究人员采用综合观测、相似材料模拟、有限元计算分析等方法,推动了“下三带”理论的应用和发展。高延法^[38]采用多元统计回归方法,得到了底板破坏深度的统计公式。张金才^[3]讨论了工作面底板的采动影响规律,并推导出底板采动裂隙带最大深度的计算公式。王成绪^[39]采用结构力学的方法,运用极限弯矩理论,确定底板隔水层有效厚度的计算公式。冯启言等^[40]利用ADINA有限元计算程序,计算了底板的破坏深度,得出在正常无断层的情况下,底板的破坏形状为“马鞍

型”。这些理论和认识,在生产实践中得到了广泛的应用,并取得了好的效果。

国内许多学者还对覆岩离层进行了多方面的研究。在现场观测和试验的基础上,用静力平衡理论发展了弹塑性薄板理论和结构力学理论。认识到隔水层是由厚度较小的不同岩层组合而成,且其中的关键层起关键阻水作用^[3]。钱鸣高、黎良杰等在采用定性立体模型和平面应力模型对无断层条件和有断层条件的底板突水机理研究的基础上,提出了煤层底板突水的关键层理论,揭示了煤层底板导水通道的形成和突水机理^[33~37]。王作宇等基于现场观测实践和综合的理论试验研究,提出了突水通道形成的“零位破坏与原位张裂”概念和“承压水上采煤的采动应力场与承压水运动场耦合效应的底板突水机制”^[7]。

煤层顶底板突水与地质条件密切相关。地应力是影响煤层顶底板岩层渗透性和水压致裂突水的重要地质因素之一。人们获得地应力状态的途径主要是通过现场实测。地应力是存在于地壳中的内应力,地应力的形成主要与地球的各种动力作用过程有关^[44~53]。地应力的研究已有近百年的历史。从世界范围内看,地应力的研究领域涉及地质、地震、矿山、冶金、石油和建筑工程等部门。1912年,瑞士地质学家海姆(A. Heim)在隧道施工中通过观察和分析,首次提出了地应力的概念,并假设地应力是一种静水应力状态,岩体深处的垂直应力与其上覆岩体重量成正比,其值等于单位面积上覆岩层的重量。1932年美国垦务局进行了世界上第一次用解除法实测地应力的创举,设计了鲍尔德水坝。20世纪50年代初瑞典科学家N. Hast发明了测试地应力的仪器,测得了岩石中的绝对应力的方向和大小。1975年,南非的N. C. Gay等又建立了临界深度的概念:自临界深度以下,水平应力不再大于竖向应力。目前,已有20多个国家开展了地应力的测量及应用的研究工作。我国原岩应力测量及原岩应力预报地震的研究工作始于60年代,70年代有较大的进展,发展了多种测量方法。李方全等在华北地区进行系统的应力测量,获得华北地区地应力的初步结果,随后又在西南、西北、华东、中南等地陆续进行了原岩应力测量,其研究成果为我国现今构造应力场研究提供了重要的基础资料。80年代以来,开展了多种方法的地应力测量,如水压致裂法、应力(或应变)解除法、钻孔崩落法、单孔全应力测量和声发射法等,并在工程应用、地震预报和石油、煤炭开采等方面得到成功应用,其中应力(或应变)解除法和水压致裂法两种测量方法是目前地应力测量中应用较广的方法^[44~53]。在诸多煤矿突水的主控因素中,地应力是最重要的因素之一。长期以来,由于地应力测量点资料有限,大多数学者对煤层顶底板突水危险性研究主要从含水层条件、隔水介质条件和断裂构造条件等方面出发进行研究,在研究突水地质条件中,对现代地应力条件及其对突水控制作用研究重视程度较低。随着我国煤矿开采深度的增加引起的高地应力、高水压和强烈的开采扰动引起矿井突水严重。在煤层顶底板突水危险性研究中分析地应力分布及其对突水的控制具有理论和实践意义。

已有矿井突水统计资料表明^[54~58],80%以上的突水事件与断裂构造有关。针对断层突水问题,20世纪80~90年代,国内外许多学者针对断层的水文地质类型(如富水断层、导水断层、储水断层、无水断层、阻水断层等)、断层突水类型划分(如断层揭露型突水、断层采动型突水)、断层诱发突水的原因(如削弱底板隔水层阻抗变形的能力、缩短了煤层与底板含水层之间的距离、断层或断裂构造作为弱化的导水通道)、水对断层的作用(软化作用、水楔作用)、断层突水防治等方面展开研究。岩溶陷落柱是影响煤矿安全开采的重要地质因素,在我国北方石炭二叠纪煤田中普遍存在,其导致的突水具有隐蔽性、突发性,如开滦范各庄矿于1984年6月2日,2171综采工作面发生了世界采矿史上罕见的透水灾害,为岩溶陷落柱突水所致。其突水是由奥陶系石灰岩强含水层承压水经9#陷落柱溃入矿井,高峰期11h的平均突水量为2053m³/min、仅历时20h 55min就淹没一个年产300×10⁴t、开采近20年的大型矿井,造成经济损失5亿元人民币以

上^[58]。因此,开展断裂构造和岩溶陷落柱研究对于煤矿安全生产具有理论和实践意义。

20世纪80年代以后,随着一些新理论、新观念的引入,国内对突水预测预报的研究出现了异乎寻常的繁荣现象,许多新理论、新方法开始应用于矿井突水预测。目前应用较多的突水预测方法大体上可分为两类,即条件分析法和模型拟合法。前者主要是根据工作面的水文地质条件,预测工作面有无突水发生的可能,为超前疏放水提供依据。这种预测通常是分采区或采面进行的,侧重于定性分析。后者在不同程度上具有定量的特点,可以预测整个矿井存在突水的地点。模型拟合法又可以分为统计模型、GIS模型、模糊综合评判模型等^[59~66]。

随着计算机技术的发展,以GIS为工作平台,利用其强大的空间分析等功能,建立多因素突水预测模型,对突水进行预测预报,取得了显著进展。

在对突水水源及通道评价与预测中,应用地球物理和化探技术如槽波地震、坑道透视、地质雷达、瞬变电磁、井下电法、连通试验和氡气测定等方法。发现地质异常体,确定地下水水源和导水通道,其中抗干扰的瞬变电磁、红外探测和三维地震勘探及超前钻探等综合方法探测突水点,取得了好的应用效果,为煤炭安全开采提供了有效手段和方法。近些年,有关突水过程的动态监测,如通过传感器对岩体应力、应变、渗透和水压变化等参数的分析处理来预测突水区域,确定突水点位置受到广泛关注和重视,并取得了显著进展和成效。高性能的微震监测技术、网络传输技术、并行计算技术、渗流耦合力学和现代地质学理论与方法为矿井突水危险性评价与预测奠定了理论基础和条件。

虽然国内外对矿井突水危险性评价理论与方法进行了大量的研究,由于矿井突水地质条件复杂,影响因素多,仍有许多理论及实践问题仍有待于深入研究,如在突水预测与评价方面缺乏针对不同突水类型的系统性研究和矿井突水水源、通道的有效探测方法。因此本书针对矿井突水预测的科学评价问题,以开滦矿区典型矿井为依托,从地质因素和采矿因素入手,采用试验研究、理论分析和数值模拟计算等方法系统研究煤层顶底板突水地质条件、岩石力学条件和地应力条件,以及煤层顶底板的变形与破坏规律等,揭示煤层顶底板突水的地质力学特征和控制机理;并综合考虑与煤层顶底板突水有关的各种控制因素,建立煤层顶底板突水危险性评价理论与方法,为煤炭安全开采提供可靠的地质保障。

1.3 本书研究的内容和方法

煤层顶底板突水是一种复杂的地质及采动影响现象,是煤层上覆或下伏含水层水冲破顶板或底板隔水层的阻隔,以突发、缓发或滞发的形式进入采掘工作面,造成矿井涌水量增加或淹没矿井的自然灾害,其受地质因素与开采因素所控制。煤层顶底板突水危险性受控于含水层条件、隔水介质条件、导水通道条件及赋存环境条件(如地应力场条件)。含水层条件主要包括反映含水层富水性的承压水的厚度、裂隙发育程度和水压等因素,隔水介质条件包括煤层底板隔水层厚度、岩性和结构分布,导水通道条件包括断裂构造、岩溶陷落柱和采动裂隙。煤层顶底板突水不仅受地质条件所控制,而且与采动因素密切相关。因此,煤层顶底板突水是上述因素综合作用的结果,突水机理也具有多样性。

1.3.1 主要研究内容

1. 矿井突水地质力学条件分析

以开滦矿区范各庄矿为依托,系统收集试验区矿井突水点资料,从煤层顶底板突水的水源、

通道和介质条件分析入手,系统研究煤层顶底板突水的地质力学条件,包括煤层顶底板突水地质条件、岩石力学条件和地应力条件等,剖析煤层顶底板突水与这些地质力学条件之间的相关关系,揭示煤层顶底板突水控制因素和作用机理,为煤层顶底板突水危险性评价提供理论依据。

2. 煤层顶底板突水危险性地质评价理论与方法研究

针对煤层底板隔水介质条件,分析煤系岩石力学性质,煤层底板突水的岩性、结构和厚度特征,根据隔水层的岩性和结构特征,提出评价隔水层隔水性能和抗水压能力的岩性-结构分类,建立基于岩性-结构的煤层底板突水危险性评价理论与方法。对范各庄井田 12# 煤层底板突水危险性进行定量评价。针对煤层顶板含水层类型,根据上覆岩层的岩性、导水裂隙带高度和有效保护层厚度等参数,建立煤层顶板突水危险性评价理论与方法,并对开滦范各庄井田 5# 煤层顶板进行评价分析,为本区煤炭安全开采提供理论依据。

3. 煤层顶底板采动破坏规律及其预测理论与方法研究

煤层顶底板突水是地质因素和开采因素综合作用的结果,由于采动影响,破坏了岩体中原岩应力平衡状态,导致煤层顶底板岩体移动变形和破坏。从采场围岩变形与破坏分析入手,研究煤层顶底板的变形与破坏规律,揭示煤层顶底板采动破坏的受控机制;建立煤层顶底板采动破坏及煤层底板突水复合板力学理论与方法,为煤层顶底板突水危险性评价和防治提供理论依据。

4. 煤层底板突水危险性评价专家系统研究

煤层底板突水危险性评价专家系统(简称系统)属预测、咨询型专家系统,综合考虑与底板突水有关的各种控制因素,运用目前形成的突水危险性预测与评价理论、方法,按照领域专家的推理逻辑和经验,对受承压水威胁矿井在巷道掘进、煤炭开采过程中的突水危险性作出预测和评价,指导现场工作人员采取合理的掘进、开采方法和措施,防止底板突水的发生。系统由知识库、推理机、动态数据库、解释机制和人机接口五个部分组成,建立突水案例知识库,提出并采用依据突水优势面理论的推理途径,即在开采平面内搜索四类突水优势面,根据其特征分别进行突水条件分析和突水案例类比,计算其突水概率,最终判断是否突水。

为了能对上述问题深入研究,必须采用合理的研究方法。因为任何问题研究的成败都与所采用的研究方法有直接关系,目前研究煤层顶底板突水危险性时,广泛采用综合研究方法。

本书通过地质分析、实验研究、数值模拟计算及现场观测等方法综合研究。在充分利用我们及前人研究成果的基础上,首先进行野外和井下实测、描述与样品采集,然后进行室内试验分析和数值模拟计算,以开滦矿区范各庄矿等典型大水矿井为依托,并有计划地对全国有关矿区进行广泛调研,收集水文地质条件和突水案例开展研究。

1.3.2 主要研究方法

1. 资料收集与地质分析研究

系统地收集研究区水文地质勘探资料和突水点资料,现场分别对开滦矿区范各庄矿、东欢坨矿、钱家营矿等进行地质编录。针对深部开采地质条件复杂、钻孔资料少的特点,采用采区三维地震勘探技术,查清三维地震勘探区内 5m 以上断层、裂隙带分布及小褶曲等构造形态及其分布,并加强微构造或隐伏构造的研究。编制井田含水层水压等值线图、突水系数等值线图和底板

承压含水层与开采煤层之间隔水岩柱的岩性分布图,研究煤层底板突水与煤炭开采的关系及其时空规律。系统收集试验区煤层底板突水点资料,通过对突水动态数据的系统分析和统计学研究,分析煤层底板突水地质条件,揭示煤层底板突水的地质特征和控制性因素。地质分析开展如下几方面的研究:

(1) 研究含水层的水文地质特征及其边界条件。查清研究区范围内含水层的分布范围、厚度、岩性及岩性分层组合,在空间上的变化规律,对岩溶含水层进一步研究岩溶发育特征;研究含水层的含水性、补给条件及地下水的径流特征,分析含水层之间的水力联系,确定矿井水文地质边界。

(2) 承压含水层与开采煤层之间隔水岩柱的介质条件研究。研究隔水岩柱的岩性、厚度、分布规律及其力学特性和其与可采煤层的空间位置,对隔水岩柱的岩性、厚度及分布规律进行分区评价。

(3) 井田断裂构造研究。研究井田断裂构造的规模、大小、方向及其分布规律和断裂构造结构面力学性质,研究断层影响带及其附近煤岩体物理力学性能,分析在水压和矿压作用下断层带煤岩体变形与破坏特征,分析断裂构造与含水层之间的导通关系,以及断裂构造本身的导水性能和断裂构造的量化评价。

2. 实验研究和数值模拟分析

采集研究区煤层及其顶底板样品,在室内进行煤层岩石微观结构和物质成分定量分析,以及岩石物理力学实验研究,揭示煤岩石应力-应变-渗流规律。结合开滦矿区实际,建立不同岩性和不同构造条件(断层和陷落柱)地质模型,借助于岩石力学分析软件进行数值模拟分析,分析各种地质因素和采矿因素对煤炭开采过程中顶底板突水的影响程度,并将获得的参数与实际观测结果进行对比分析,研究煤炭开采过程中底板隔水岩层在承压水水压、矿压和采动破坏作用下的变形、破坏特征及突水规律,揭示煤层底板突水控制因素和作用机理。

3. 理论分析和预测模型研究

在煤层顶底板突水地质特征分析的基础上,研究煤炭开采过程中底板隔水岩层在承压水水压、矿压和采动破坏作用下的变形、破坏特征和突水规律以及顶板岩层的变形破坏规律针对煤层底板多层介质特征,建立煤层底板突水复合板力学模型和计算方法;剖析煤层顶底板突水与煤层顶底板介质条件、构造条件和地应力条件等因素之间的相关关系,分析各种地质因素和采矿因素对煤炭开采过程中顶底板突水灾害的影响程度,建立煤层顶底板突水危险性评价理论与方法,对煤层顶底板突水危险性进行定量评价与预测。

4. 煤层底板突水危险性评价专家系统开发

专家系统作为一个程序系统,其开发也存在一个生命周期的问题,称为知识工程生命周期。专家系统是一种能够对领域问题给出具有专家水平结论的特殊复杂程序,鉴于其开发难度、领域问题的特点,为解决知识获取及其形式化方面存在的瓶颈问题,引入原型技术的专家系统开发方法,即在开发一个实用专家系统之前先开发一个专家系统原型,然后在此基础上逐步开发实用的专家系统。引入原型技术的专家系统开发过程的生命周期可分为问题选择与任务确定、需求分析、原型化设计、规划与设计、系统实现、测试与评价、系统维护与完善7个阶段。

(1) 初步知识获取。知识获取主要是由知识工程师从领域专家等知识来源获取知识,并将这些解决领域问题所需的专门知识以正确的形式表达并存储到知识库中,可能的知识来源包括