

# 深部开采预防巷道滞后突水 技术与实践

刘伟韬 申建军 著



科学出版社



# 深部开采预防巷道滞后失稳 技术与实践

刘伟韬 申建军 著

国家自然科学基金项目资助(编号:51274135)

山东省优秀中青年科学家奖励基金项目资助(编号:BS2011SF016)

“973”计划前期研究专项资助(编号:2011CB411906)

国家自然科学基金重点项目资助(编号:51034003)

山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助

矿山灾害预防控制-省部共建国家重点实验室培育基地

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书基于深部开采工程背景,通过深部岩体力学常规试验和断层破碎带蠕变试验,探讨了深部岩石力学性质及其与突水有关的变形破坏特征。根据现场实测和理论分析,研究了深部地应力场特征及采动应力场特征。从断裂构造发育特征、构造形成机制、水文地质类型及断裂破碎带物质的岩体结构力学效应入手,探讨了断裂活化滞后突水机制以及承压水导升机理,分析了差异变形破坏与围岩变形、突水之间的关系,结合生产实际优化了深部开采巷道支护参数,在探明断层位置及富水性的基础上实施了断层带注浆加固技术,完善了煤矿巷道矸石充填技术与工艺,研究成果对预防巷道滞后突水具有很好的指导意义,在生产现场取得了良好的应用效果。

本书可供采矿工程、地下工程、地质工程、土木工程等专业和从事相关课题研究的科研人员、现场工程技术人员和高等院校师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

深部开采预防巷道滞后突水技术与实践/刘伟韬,申建军著. —北京:科学出版社,2013.9

ISBN 978-7-03-038640-3

I. ①深… II. ①刘… ②申… III. ①巷道-矿井突水-研究 IV. ①TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 221026 号

责任编辑:耿建业 刘翠娜 / 责任校对:赵桂芬  
责任印制:赵德静 / 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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年9月第一版 开本:720×1000 1/16

2013年9月第一次印刷 印张:17 插页:4

字数:329 000

定价:75.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



# 前 言

煤炭是我国主要的基础能源,在中国的能源生产和消费结构中,煤炭占总能耗的70%左右,煤炭工业在国民经济发展中占有举足轻重的地位,而煤炭作为我国主要能源的状况短时间内不会改变。在我国晚石炭世—早二叠世、晚二叠世、早—中侏罗世、晚侏罗世—早白垩世4个聚煤期,华北石炭—二叠系聚煤区是国家加大开发力度的首选煤炭工业基地,在能源工业中一直起着举足轻重的作用。由于华北聚煤区水文地质条件复杂,各矿井都不同程度地受到地下水的影响。顶板砂岩裂隙水、底板薄层灰岩水、巨厚奥陶岩溶水、老窑水等对煤炭的开采造成了巨大的威胁,突水危险无时无刻不在威胁着矿井的安全生产。

根据目前矿井开采的情况及已有矿井的深部开采经验,在高地应力和水压力长期作用下,深部巷道变形速度快,巷道支护难度增加,由此导致巷道围岩变形破坏严重,围岩有效隔水层厚度降低,在裂隙及断层破碎带处,容易导致巷道滞后突水事故的发生。认清煤矿巷道滞后水害问题的现状,研究巷道水害防治对策,采取有效的防治措施,对于确保煤矿安全生产,解放受水害威胁的煤炭资源,保障国民经济持续、稳定发展,具有现实和深远的意义。作者经过多年探索研究,认为深部开采存在以下几类复杂条件:①巷道揭露断层,且断层有可能切穿含水层,中间仅有较薄的有效隔水厚度;②带压掘进巷道,巷道距离含水层较近,且含水层水压较大;③深部开采矿井,开拓巷道或回采巷道在围岩应力、水压长期作用下,巷道发生流动变形,现场往往忽视这种变形,导致潜在突水通道转变为突水通道。因此,探索深部巷道滞后突水灾害形成的机理,并提出相应的预防和控制途径,是本书研究的主要内容。

本书通过对巷道滞后突水机理以及优化支护参数预防巷道支护突水机理展开探讨,对优化支护参数预防巷道突水技术进行了较为全面、系统的研究。通过理论分析、室内试验、数值模拟、现场工业性应用等手段,将这些理论结合不同矿区的具体情况应用与实践,取得了很好的效果,对预防巷道滞后突水具有很好的指导意义。本书共分为8章:第1章为绪论,介绍本书的研究意义及主要内容;第2章为深部岩石力学性质试验,重点从常规力学试验和断层破碎带蠕变力学试验进行了研究;第3章为深部原岩应力及采动应力场特征,从现场实测和理论分析等方面研究了矿井应力场特征;第4章为深部巷道断裂滞后突水机制,从突水时效、断裂构造发育特征、断裂活化机制、承压水导升机理等方面进行了探讨;第5章为优化支护参数预防巷道滞后突水机理,分析了开挖的岩体突水点和突水点附近的岩体

围岩变形和破坏与围岩的基本流动变形破坏规律——差异变形破坏之间的关系,并提出了消耗突水潜能和增加防突潜能两种防突措施,并从优化巷道参数、巷道围岩断层破碎带注浆加固、巷道矸石充填等方面增强防突潜能的机理进行了探讨;第6章为深部巷道锚杆支护参数设计,以山东华泰矿业有限公司深部扩大区三采区为工程背景,进行巷道支护参数优化研究,通过分析已有支护方式在深部巷道围岩支护中出现的问题,提出了特殊地质条件下巷道支护初步方案,底臬、流变围岩巷道支护初步方案,以及巷道锚杆锚索平衡支护初步方案,在初步方案的基础上,利用数值模拟手段对锚杆支护长度、锚杆安装应力以及锚杆受力等支护参数进行了优化,通过现场实测,验证了优化支护参数控制巷道围岩差异流动变形和预防滞后突水的有效性;第7章为断层破碎带富水性探测与注浆加固技术,根据水害防治的“有疑必探、先探后掘”原则,利用瞬变电磁法在掘进头进行探测,探明了断层位置及富水性,并通过注浆技术进行了围岩加固;第8章为巷道矸石充填技术与实践,结合理论分析和数值模拟,进行了巷道矸石充填方案及充填工艺的研究,并在济宁矿业集团阳城煤矿进行现场应用,结果表明将井下原生矸石进行废弃巷道充填或者巷道充填开采,对于有效预防巷道滞后突水具有很好的效果。

本书得到国家自然科学基金项目(编号:51274135)、山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(编号:BS2011SF016)、“973”计划前期研究专项(编号:2011CB411906)、国家自然科学基金重点项目(编号:51034003)以及山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助。

在本书的撰写过程中,先后得到了开滦矿业集团公司、范各庄煤业公司、山东华泰矿业有限公司、济矿集团阳城煤矿等单位的大力支持和热情帮助。中国科学院地质与地球物理研究所周瑞光研究员提供了大量珍贵的试验素材和研究资料,书中引用了部分专家、学者的研究成果,在此一并表示诚挚的谢意。

书中的部分素材来源于作者的博士学位论文,特别向作者的导师——中国矿业大学(北京)武强教授表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2013年5月于青岛

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 巷道滞后突水研究的意义 .....	1
1.1.1 研究目的与意义 .....	1
1.1.2 巷道滞后突水分析 .....	2
1.1.3 巷道滞后突水原因分析 .....	5
1.2 国内外研究现状 .....	6
1.3 本书主要内容 .....	7
参考文献 .....	9
<b>第 2 章 深部岩石力学性质试验</b> .....	11
2.1 常规岩石力学参数测试 .....	11
2.1.1 试验系统简介 .....	11
2.1.2 标准岩石的试件 .....	12
2.1.3 试样制备 .....	12
2.1.4 岩石拉伸试验 .....	13
2.1.5 岩石单轴压缩试验 .....	17
2.1.6 岩石三轴压缩试验 .....	20
2.1.7 顶板冲击倾向性分析 .....	24
2.1.8 试验结果分析 .....	30
2.2 断层物质蠕变试验 .....	32
2.2.1 试验目的及试验内容 .....	32
2.2.2 断层物质蠕变试验结果 .....	34
2.2.3 $F_0$ 断层物质蠕变试验成果分析 .....	53
2.3 小结 .....	64
参考文献 .....	65
<b>第 3 章 深部原岩应力及采动应力场特征</b> .....	67
3.1 地应力概述 .....	67
3.1.1 地应力的成因 .....	67
3.1.2 地应力的影响因素 .....	68
3.2 地应力实测方法 .....	69

3.2.1	地应力测量原理及方法	69
3.2.2	应力解除法实测的主要过程	70
3.2.3	钻孔应力解除法的应力计算	72
3.3	华泰公司深部地应力实测	75
3.3.1	原岩应力测点布置及测试	75
3.3.2	原岩应力实测结果分析	78
3.4	范各庄矿地应力实测	81
3.4.1	范各庄矿地应力	81
3.4.2	地应力测量结果分析	82
3.5	采动应力场特征	83
3.5.1	围岩应力分布规律	83
3.5.2	采动支承压力分布规律	85
3.5.3	煤层底板应力状态分布规律	87
3.6	小结	88
	参考文献	89
<b>第4章</b>	<b>深部巷道断裂滞后突水机制</b>	<b>90</b>
4.1	巷道时效突水类型	90
4.2	巷道断裂突水	91
4.3	断裂构造发育特征	92
4.3.1	断裂构造的主要成因类型	92
4.3.2	断层形成机制及力学解释	93
4.3.3	矿井断裂构造展布的基本规律	95
4.3.4	褶皱构造与断裂构造的关系	96
4.3.5	断裂构造对突水的影响	96
4.3.6	断裂构造区内的突水原理	97
4.3.7	断层水文地质类型	98
4.4	断裂破碎带物质的岩体结构力学效应	99
4.4.1	断裂破碎带物质的岩体结构效应	99
4.4.2	断裂破碎带的力学效应	103
4.5	断裂活化滞后突水机制	104
4.5.1	采场断裂活化机理分析	105
4.5.2	断裂微结构面扩展机制	107
4.5.3	断层活化分析	108
4.6	承压水导升机理	114
4.6.1	承压水底板损伤破坏模型	114

4.6.2 承压水的力学效应分析 .....	116
4.6.3 承压水导升的溶蚀机理 .....	118
4.6.4 承压水在断裂突水中的作用 .....	120
4.7 小结 .....	126
参考文献 .....	126
<b>第5章 优化支护参数预防巷道滞后突水机理</b> .....	<b>127</b>
5.1 差异流动变形破坏 .....	127
5.1.1 差异流动破坏 .....	127
5.1.2 原位蠕变试验中差异流动变形破坏现象 .....	127
5.1.3 差异流动变形类型划分 .....	132
5.2 差异流动变形与巷道围岩变形 .....	133
5.3 巷道围岩变形与突水的关系 .....	134
5.4 深部巷道支护与巷道围岩变形 .....	135
5.5 优化支护参数预防巷道滞后突水机理 .....	136
5.5.1 巷道支护与突水时间效应分析 .....	136
5.5.2 防突措施 .....	138
5.5.3 优化支护参数预防滞后突水机理 .....	139
5.6 小结 .....	141
参考文献 .....	141
<b>第6章 深部巷道锚杆支护参数设计</b> .....	<b>142</b>
6.1 深部采区开采地质条件 .....	142
6.1.1 煤层特征 .....	142
6.1.2 矿井水文地质 .....	143
6.2 深部巷道掘进与支护技术 .....	148
6.2.1 巷道掘进与支护方法 .....	148
6.2.2 巷道支护方案 .....	149
6.3 锚杆支护参数设计理论 .....	152
6.3.1 锚杆支护设计的基础资料 .....	152
6.3.2 锚杆支护形式与主要参数选择 .....	156
6.3.3 辅助支护 .....	166
6.4 扩大区三采区锚杆支护参数设计 .....	168
6.4.1 设计所需基本参数 .....	168
6.4.2 计算结果及巷道支护施工图 .....	173
6.5 锚杆支护参数优化数值模拟 .....	177
6.5.1 支护优化设计 .....	178



6.5.2	锚杆支护参数优化	179
6.5.3	支护方案确定	192
6.6	巷道矿压观测方案及分析	194
6.6.1	巷道矿压观测内容	194
6.6.2	观测方案	195
6.6.3	315 轨道下山矿压数据分析	197
6.6.4	31511 东上巷离层观测	204
6.7	小结	206
	参考文献	206
<b>第 7 章</b>	<b>断层破碎带富水性探测与注浆加固技术</b>	<b>208</b>
7.1	工程背景	208
7.1.1	含水层及隔水层	208
7.1.2	断层导水性	210
7.1.3	地下水动态特征	210
7.2	岩层富水性探测技术与方法	211
7.2.1	高密度直流电阻率探测法	211
7.2.2	工作面直流电透视法	212
7.2.3	矿井瞬变电磁法	213
7.3	瞬变电磁法探测技术	214
7.3.1	瞬变电磁法技术简介	214
7.3.2	矿井瞬变电磁探测方法	220
7.3.3	探测方案设计	221
7.3.4	资料处理解释与探测成果	224
7.4	钻探注浆加固方案设计	229
7.4.1	钻探注浆加固位置	229
7.4.2	注浆施工方法	230
7.5	小结	231
	参考文献	232
<b>第 8 章</b>	<b>巷道矸石充填技术与实践</b>	<b>233</b>
8.1	阳城煤矿矸石充填背景	233
8.2	矸石充填置换方案的设计与选择	233
8.2.1	矸石充填方案	233
8.2.2	充填方案设计	235
8.2.3	设计方案比较	235
8.3	贮矸空间尺寸设计	237

8.3.1	方案设计总体思路	237
8.3.2	贮矸空间尺寸设计	237
8.4	护巷煤柱宽度理论设计	238
8.5	护巷煤柱宽度数值模拟	241
8.5.1	数值模型的建立	241
8.5.2	数值计算结果	242
8.6	充填巷合理开掘顺序优化设计	245
8.6.1	充填区域充填巷的布置原则	245
8.6.2	充填巷两侧煤柱支承压力分布	245
8.6.3	充填巷开掘顺序优化	248
8.7	矸石充填工艺和巷采系统布置	249
8.7.1	矸石充填机设计	249
8.7.2	矸石充填工艺	250
8.8	充填巷支护设计	251
8.8.1	充填巷道支护设计	251
8.8.2	支护工艺	254
8.9	现场应用效果数值模拟	255
8.9.1	应力分布及影响范围	255
8.9.2	塑性区分布	256
8.9.3	位移变化量	257
8.9.4	应力变化量	259
8.10	小结	261
	参考文献	261

彩图

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 巷道滞后突水研究的意义

### 1.1.1 研究目的与意义

煤炭是我国最主要的能源和化工原料,在我国一次性能源生产和消费比例中均占 65%以上,是我国能源的基石和安全保障。随着国际能源危机的加剧和我国石油对外依存度的不断提高,煤炭在我国国民经济发展和能源安全中必将起到越来越重要的支撑作用。国民经济快速发展需要能源保障,预计到 2020 年,我国对煤炭的需求将达到或超过 40 亿 t,煤炭作为我国主要能源的状况短时间内不会改变。“十一五”期间,我国重点建设了 13 个大型煤炭基地,分别为神东、晋北、晋东、蒙东(东北)、云贵、河南、鲁西、晋中、两淮、黄陇、冀中、宁东和陕北等,含 98 个矿区,分布在全国 14 个省(区),规划总面积 28.71 万 km<sup>2</sup>,含煤面积 20.45 万 km<sup>2</sup>。“十二五”期间,我国将有序推进 14 个大型煤炭基地的建设,新疆基地正式成为我国的第 14 个大型煤炭基地。这些煤炭基地中,分布在中东部地区的矿井普遍受到华北石炭一二叠纪煤田的岩溶-裂隙水、华南晚二叠纪煤田的岩溶水及东北侏罗纪煤田的裂隙水的水害威胁。近年来,随着技术水平的不断提高和开采装备的不断改善,煤炭的开发力度也在逐年加大,矿井的开采深度也在逐年加深,一些老矿区开采深度已达上千米,来自掘进工作面瞬时突水和巷道滞后突水的危害日趋严重,突水概率大大增加,严重影响了深部资源的安全高效开采。

随着资源开采不断地在向深部发展,浅部矿井开采条件下的理论、方法、技术及经验必须进行必要的修正和探讨新的理论、方法和技术。2001 年 11 月,中国科学院在北京香山召开了以“深部高应力下的资源开采与地下工程”为主题的香山科学会议第 175 次学术讨论会。与会专家结合我国的客观实际和未来的发展趋势,认为中国煤矿深部资源开采的深度可界定为 800~1500m。会议就深部开采所出现的矿井灾害进行了概括和定义,矿井灾害主要表现为:①巷道变形速度快、巷道围岩变形范围大,巷道持续变形、流变成为深部巷道变形的主要特征;②采场矿压显现剧烈,采场失稳,易发生破坏性的冲击地压;③随着开采深度的增加,岩爆的发生次数及强度会随之上升,巷道中岩爆危险性增加;④瓦斯聚积、诱发安全事故;⑤深部开采条件下,岩层温度将增加;⑥矿山深部开采诱发突水的概率增大,突水

事故趋于严重;⑦井筒破裂加剧;⑧煤自燃发火、矿井火灾及瓦斯、煤尘爆炸危险<sup>[1]</sup>。

何满潮总结分析了深部开采与浅部开采岩体工程力学特性的主要区别。主要表现在:①“三高一扰动”的恶劣环境,高地应力、高低温、高承压水以及采矿扰动;②5个力学特性转化特点,围岩应力场的复杂性、围岩的大变形和强流变性特性、动力响应的突变性、深部岩体的脆-延性转化、深部岩体开挖岩溶突水的瞬时性;③4个方面的矿井转型,硬岩矿井向软岩矿井的转化、低瓦斯矿井向高瓦斯矿井的转变、非突矿井向突出矿井的转变、非冲矿井向冲击矿井的转变。针对深部工程所处的特殊地质力学环境,通过对深部工程岩体非线性力学特点的深入研究,指出进入深部的工程岩体所属的力学系统不再是浅部工程围岩所属的线性力学系统,而是非线性力学系统,传统理论、方法与技术已经部分或相当大部分失效,进行深部工程岩体的基础理论研究已势在必行<sup>[2,3]</sup>。

根据目前矿井开采的情况及已有矿井深部开采的经验,在高地应力和水压力长期作用下,深部巷道变形速度快,巷道支护难度增加,由此导致巷道围岩变形破坏严重,围岩有效隔水层厚度降低,因此,在裂隙发育及断层破碎带处,导致巷道滞后突水事故发生。巷道滞后突水问题已经严重影响和制约了深部矿井高产高效的建设,如果不及时采取相应的防治对策,不仅突水事故将继续增加,还会使一大批受水害威胁的矿井提前报废,制约国民经济的发展。认清煤矿巷道滞后水害问题的现状,研究巷道水害防治对策,采取有效的防治措施,打破限制煤炭产量的瓶颈,对于确保煤矿安全生产,解放受水害威胁的储量,保障国民经济持续、稳定发展,具有现实和深远的意义。

### 1.1.2 巷道滞后突水分析

近年来发生巷道滞后突水的案例很多,很大一部分原因是巷道掘进很长时间后,忽略了巷道的长期强度,使得围岩在水压及围岩应力长期作用下,发生流动破坏,造成滞后突水。因此,分析这些突水案例对开展预防巷道滞后突水工作的研究具有十分重要的指导意义。

#### 1. 彭庄煤矿3号交岔点滞后突水事故

彭庄煤矿井田位于巨野向斜的东部,赋存可采煤层4层,主采煤层为下二叠系山西组 $3_F$ 煤。 $3$ 号交岔点揭露地层为二叠系山西组地层,自上而下为互层状粉细砂岩(层厚17.4m)、细砂岩(层厚1.26m)、 $3_F$ 煤(层厚1.60m)、粉砂质砂岩(层厚1.50m)。山西组 $3_F$ 煤层顶、底板砂岩及太原组三灰是开采 $3_F$ 煤的直接充水含水层,厚度分别为45.58m、12.26m、6.1m。2005年2月25日,主井井筒落底至-440m水平后,在主井井筒开始掘井底车场,2005年5月10日, $3$ 号交岔点处发生滞后突水,最大突水量为 $182\text{m}^3/\text{h}$ (图1-1)。

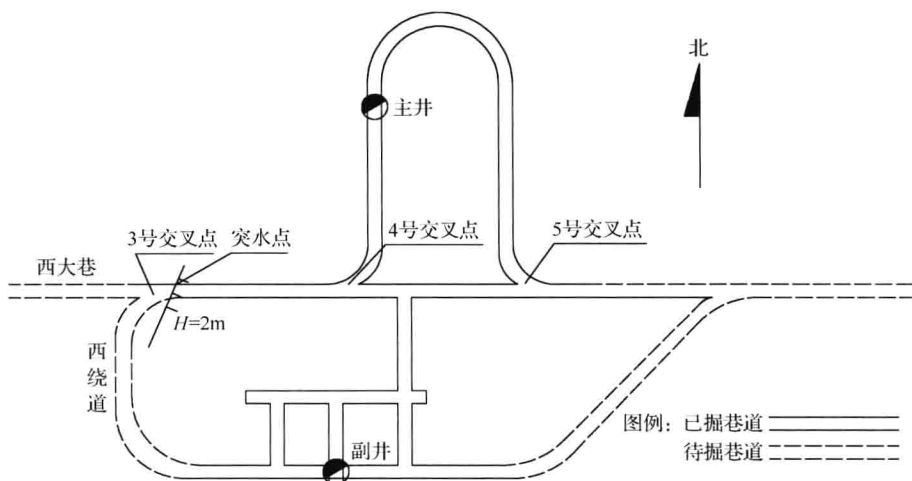


图 1-1 彭庄煤矿井底车场

该交岔点位于井底车场 4 号交岔点西侧,于 4 月 17 日从 4 号交岔点处自东向西开始掘进,在掘至 3 号交岔点前 8m 处巷道底板揭露  $3_F$  煤层,在 3 号交岔点掘进 3m 时揭露一落差 2m 的正断层,又施工 4m 后完全穿过  $3_F$  煤层。揭露断层后,将断层前后 12m 段原锚网喷支护形式改为锚网喷、架 16 号槽钢棚、补打长度 6m ( $\phi 15.4\text{mm}$ ) 的预应力点锚索继续施工,至 5 月 3 日 3 号交岔点施工完毕。5 月 10 日,3 号交岔点西绕道已施工 15m,西大巷已施工 6.8m。下午 3 点时,检查人员突然发现 3 号交岔点基本轨起点拱顶处有两根锚索出现异常淋水,观察 10min 后,出水点水量不断加大,顶板处喷层开裂,即发生滞后突水。至下午 5 时,该 6m 段塌落 0.5m,实测涌水量为  $182\text{m}^3/\text{h}$ ,水温为  $31^\circ\text{C}$ 。至 5 月 13 日,冒落区以西约 10m 段再次塌落,塌落处巷道顶板变形严重,顶板距底板 1.5m,塌落高度平均为  $1.7\text{m}^{[1]}$ 。

## 2. 李雅庄煤矿 F33 断层滞后突水

李雅庄煤矿井田位于霍州矿区的北部,面积  $30.4\text{km}^2$ ,生产能力 150 万 t/a。该矿井属带压开采矿井,目前开采  $2^\#$  煤层,带压值  $3.1\text{MPa}$ 。井田地质条件复杂,已开采区域揭露断层密度为  $96\text{条}/\text{km}^2$ ,陷落柱密度为  $58\text{个}/\text{km}^2$ 。自投产以来,共计出现断层突水 9 次,突水量为  $30\sim 400\text{m}^3/\text{h}$ 。本次 F33 断层突水,水量达到  $400\text{m}^3/\text{h}$ 。李雅庄矿六采区末端水仓于 2010 年 10 月施工完毕,2011 年 3 月 23 日 4 时 29 分,水仓  $1^\#$ 、 $4^\#$  吸水小井掉渣片帮, $2^\#$  小井井壁出水,并有水从  $2^\#$  与  $3^\#$  小井间配水巷流出,伴有硫化氢气味。出水点为内外两仓靠近小井的通道,该点巷道底板标高为  $+233\text{m}$ ,所处层位为  $2^\#$  煤层底板下 4m 的泥岩层,距底板下太原组  $k_4$  灰岩含水层约 34m,距  $\text{O}_2$  灰岩 106m。据 LK9 钻孔观测资料,太原组灰岩含水层

突水前静止水位标高为+478m,带压2.45MPa;奥陶系灰岩含水层突水前静止水位标高为+520m,带压2.87MPa。巷道突水点处于3.5m断层破碎带。3月23日4时29分开始渗水,水量约 $10\text{m}^3/\text{h}$ ,至8时涌水量增至 $80\text{m}^3/\text{h}$ ,12时增至 $255\text{m}^3/\text{h}$ ,22时涌水量达到峰值 $400\text{m}^3/\text{h}$ ,之后趋于稳定。

本次突水点位于内、外水仓靠近吸水小井的通道,正处于落差3.5m断层的断裂破碎带上(破碎带宽度0.3m),小井及配水巷紧邻断层,泵房通道距断层面距离为7m,且与断层走向平行。泵房通道开凿于断层上盘的煤岩层中,巷道断面较大(宽6m)。六采区水仓位于全井田最低处,巷道底板标高+233m,上覆基岩厚度大,地应力大,该范围内巷道变形严重。大断面的泵房通道、密集的巷道开挖、开挖空间与断层特殊的位置关系、巷道围岩地应力显著、底板含水层较高的水头压力等一系列内外因素导致断层滞后突水,突水通道为断层破碎带<sup>[5]</sup>。

### 3. 单侯煤矿巷道滞后突水事故

单侯煤矿隶属于开滦(集团)蔚州矿业有限责任公司,矿井位于张家口市蔚县涌泉庄乡和南留庄乡之间,地处蔚县矿区的南部。单侯矿井西翼回风巷、轨道巷与皮带巷为+650m水平三条互相平行的大巷,巷道断面为 $4.0\text{m}\times 3.2\text{m}$ ,轨道巷在中间位置,与其他两条巷道相距30m。出水位置为皮带巷起坡点以上30m处,出水时间为2006年6月1日凌晨1点,出水层位为6煤层底板,上距6煤层5m,下距奥灰含水层35m,出水位置底板标高+667m,出水量为 $194\text{m}^3/\text{h}$ 。

西翼皮带巷于2006年5月21掘进至本次滞后突水位置,见 $F_{10}$ 正断层,断层产状 $100^\circ/75^\circ$ ,落差1.2m。巷道右帮上部发生局部淋水。在采取超前钻探措施后,巷道继续施工,至5月26日又施工了14m,由于受6101工作面进风巷贯通距离的要求而停止施工,后于6月1日凌晨1点发生突水。在皮带巷工作面迎头退后14m处巷道底部距离左帮1.5m位置的 $1\sim 2\text{m}^2$ 范围底臃 $0.2\sim 0.3\text{m}$ ,随即在底臃中间部位出现一直径200mm圆形出水通道。巷道掘进过程中采取了超前钻探的防治水措施,但钻孔没有出水,巷道掘到突水位置,仅有少量淋水。巷道迎头超前突水位置14m,突水时间滞后11天<sup>[6]</sup>。

### 4. 郭村煤矿巷道滞后突水事故

郭村煤矿位于豫西伏牛山脉北麓,偃龙煤田中部,井田面积 $16.667\text{km}^2$ ,生产规模0.6Mt/a,设计服务年限为31年,主要开采二叠系下统山西组二<sub>1</sub>煤层。-236m大巷为矿井阶段水平煤层底板大巷,2010年6月至11月施工的0~110m段,设计层位为二<sub>1</sub>煤层底板石炭系太原组上段L7石灰岩,但是该区域地质条件相对复杂,L7石灰岩相变缺失,在掘进至50m处遇 $F_{215}$ 正断层( $0^\circ\angle 35^\circ$ , $H=3.5\text{m}$ )。揭露断层前巷道为泥岩、砂质泥岩夹薄层煤;揭露断层后,变为灰岩,断层面附近上下盘岩石破碎,且垂向节理裂隙发育。支护形式为U36型钢马蹄形棚。施工结束3个月后,巷道南帮底板位置涌水,约 $30\text{m}^3/\text{h}$ ,水色时黄时黑,之后涌水量增大至

110m<sup>3</sup>/h,稳定在90m<sup>3</sup>/h左右。冲出物为大量泥岩与煤,据统计达20t。随着导水裂隙不断通畅,突水点涌水量极有可能进一步增大,后果将非常严重,有淹井的可能<sup>[7]</sup>。

通过对以上滞后突水事故案例的分析,我们认为滞后突水事故具有以下特点:

(1) 突水点处一般遇断层破碎带,且揭露断层时无淋水现象,断层面处岩石破碎、松软、胶结性差,裂隙层理较发育。

(2) 在原始地质条件下,断层与含水层直接沟通,绝大多数是在原始地质条件下的非导水断层,在开挖扰动引起断层变形活化下发生突水。

(3) 巷道支护强度低,未进行围岩加固,巷道围岩受矿压影响易变形。对于巷道揭露断层处,未加强支护或者围岩注浆加固。

(4) 对承压水危害分析不足,隔水层偏薄,断层区安全隔水层厚度计算不合理。

(5) 巷道在距含水层较近处掘进时,现场没有实际探测断层导水情况,揭露断层后未注意检查巷道的渗水、滴水情况及巷道顶板是否来压、开裂,没有进行巷道围岩变形监测。

### 1.1.3 巷道滞后突水原因分析

众所周知,煤矿水害已成为影响煤炭产量和企业安全生产的主要制约因素,从目前已有的各矿区突水的统计资料来看,大部分突水事故都是由于构造引起的,而由于断裂构造导致的突水事故更是占到了各类突水事故的80%之多。因此,解决巷道滞后突水应以断裂为主要研究对象。

近几年来,随着矿井向深部的不断延伸,开采煤层所承受的含水层水压越来越大,巷道突水的威胁更加严重。因此,对巷道突水机理及预防技术的研究仍是我国煤矿安全生产所面临的十分迫切的问题。实践证明,巷道突水不只是单纯的水文学问题,也不是单纯的岩体力学问题,而是在人为采掘活动的诱发下,顶底板岩性、结构(断层和裂隙)和采矿地质环境(区域构造场、渗流场、温度场、水理作用场等)综合作用的结果。采掘活动引起原岩应力的变化,打破原地应力场的平衡状态,从而形成新条件下的平衡状态,这样岩层、含水层等介质的应力状态发生变化,相应引起流体介质的赋存和运移状态发生变化,以至影响到渗流场的变化;反过来渗流引起动静水压力和水的渗透作用,又影响着岩石介质的应力状态,介质因此而产生断裂扩张又反过来影响渗流特征。在此过程中,应力变化对水的运移起到了促进作用,使介质中断裂、裂隙进一步扩容,也可使断裂面、破碎带物质发生“软化”,产生弱化效应,降低岩石间的摩擦系数,为断裂扩展、岩石透水性增大创造了有利条件。

## 1.2 国内外研究现状

为消除水害威胁,按“有疑必探,先探后掘”的防治水原则,在掘进之前通过超前物探以及物探、钻探相结合等手段查清巷道周围区段的水文、工程地质条件,加强对水文地质条件的研究,对充水条件,补给关系,含水层、隔水层关系及地质构造的影响进行深入分析研究,这是预防巷道突水的传统措施。目前对巷道水害防治的研究主要侧重于对水源的堵和疏。堵是通过注浆加固的方法将隔水岩层裂隙进行填充,封堵导水通道,或改造含水层为隔水层,从而达到对破碎岩层的加固和地下水流动的改变或流速的弱化,进而减少巷道涌水量;疏则是通过打放水泄压孔对含水层的水位进行疏降,从而为巷道延伸工程的安全施工打好地质基础。

在巷道滞后突水机理方面,刘仁武等在对矿井滞后突水的具体实例进行分析后认为,断裂带长期在承压水的作用下,过水裂隙不断软化、冲蚀延扩、通道连通,形成较大的过水通道,便会发生滞后突水<sup>[8]</sup>。

倪宏革等提出了优势面的控水机制,建立了相应的优势评价指标和评价准则,认为优势断裂具有明显的屏蔽效应,它是造成滞后突水的主要原因<sup>[9]</sup>。

童有德、叶贵钧认为,厚达百余米的岩体在切穿中奥陶统灰岩断裂带两侧,并长时间承受石灰岩高压水作用下,岩体软化,以剪切形式发生塑性变形,导致破裂结构面扩张,岩体剪切强度极大降低,并受到底板岩体地应力场和底板采动效应共同作用,认为岩体工程地质力学性质是影响底板突水的基本因素<sup>[10]</sup>。

武强教授等以开滦赵各庄矿为例,提出了煤层底板断裂构造突水时间弱化效应的概念,认为随着采矿活动的延长,煤层底板岩体的断层带物质在高承压水和矿压长期作用下,强度逐渐降低,弱化范围不断扩大,当原始导升高度接近或沟通矿压破坏带时,就会发生底板突水<sup>[11]</sup>。

刘伟韬、武强等运用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟探讨了煤层底板断裂滞后突水机理<sup>[12-14]</sup>。缪协兴等针对煤矿采动破碎岩体高渗透、非 Darcy(达西)流等特性,建立了能够描述采动岩体渗流非线性和随机性特征的渗流理论,以采场底板隔水关键层力学模型为基础,建立了以采动岩体渗流失稳为突水判据的预测预报体系<sup>[15]</sup>。

胡耀青采用固流耦合的原理,分析了巷道滞后突水的机理;采用数值方法计算了巷道滞后突水的发展过程,包括巷道围岩的应力及水压的变化过程,为防治巷道突水提供理论依据<sup>[16]</sup>。

唐德玉分析了巷道滞后突水的发生发展过程,提出改进注浆孔布置及采取防冒措施,使松动圈范围减小,增大有效隔水层厚度,使松动圈张性裂隙不与含水层沟通,是预防事故发生的有效途径。由于松动圈内张性裂隙逐渐发展,突破隔水层的薄弱点与含水层沟通产生导水通道,发生滞后突水。导入的水使通道周围岩石



发生水化、溃落、冲刷,致通道越来越大,连锁地造成松动圈张性裂隙与含水层接触面积增大,使导入的水更多、压力更大、充入更多的松动圈裂隙,造成涌水量增大和岩石膨胀,使支护结构变形破坏。发展过程的显著特点是,随时间延长,涌水量渐次增大,最终突发伴随大量涌水的围岩、支护冒落破坏,造成事故<sup>[17]</sup>。

总之,上述这些理论和方法为我国煤矿滞后突水防治起到了积极的推动作用,而且也在一定程度上减少了突水灾害的发生,但就目前煤炭生产存在的水害问题,仍然存在下面的一些问题:

(1) 对于断裂构造在岩层破坏失稳和巷道突水中所起的作用研究不足,特别是对围岩的流变特性以及围岩破坏失稳对突水的时效性和断裂构造导致滞后突水的时效性研究不够深入。

(2) 随着开采深度的不断加大,地应力也势必随之增大,高地应力条件下底板岩层的变形破坏规律及巷道突水机制研究不足。

(3) 对围岩隔水层破坏的时间效应认识不足。许多突水往往发生在采后一段时间,甚至数年至几十年时间。现有突水理论较好地解释了采掘过程中的突水现象,对滞后型突水机制没有充分认识。实际上,在矿压、水压联合作用下,岩体的破坏有一个渐变的过程,并非在瞬间完成。随着开采空间的移动,岩体内应力状态的变化是很复杂的。岩体性质不同,采场时空条件不同,其破坏规律也不同。只有立足于采动岩体的动态规律,才能从本质上认识突水现象。

(4) 对采动和高压水共同影响下的岩体渗流特征研究不足。地下水在岩体中的渗透能力与岩体中的断层构造、裂隙、孔隙、洞穴等的发育情况有很大关系。而在采动矿压和高压水联合作用下,上述因素是在变化的。过去对天然岩体中的渗流特征、岩体应力对渗透性的影响、岩体水力模型及岩体作为固-液两相介质的耦合分析等方面,都进行了一定程度的研究,取得了一些重要成果。但采矿活动不仅破坏了原始地应力的平衡,使地应力重新分配,而且这种应力重新分配会影响到底板岩体的渗透能力。原裂隙在采动矿压和高压水作用下的扩展,新裂隙的生成,裂隙宽度的变化,裂隙的相互贯穿、连通等,大大影响了岩体渗透性。渗透性增强的地带就有可能成为突水通道,众多的突水资料已经充分说明了这一点。目前对采动矿压和高水压联合作用下的岩体渗透性变化、突水通道的形成过程及形成机理尚缺乏研究,而这方面也是巷道突水机制研究的重要方面。

### 1.3 本书主要内容

进入深部开采后,在承受高地应力的同时,大多数巷道还受含水层承压水威胁,使得原本处于高应力的巷道处于更加恶劣的环境中,围岩破坏特征相对于浅部有明显改变,破坏形式也有所不同,在深部表现出大变形、巷道淋水、难支护的特