



煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

矿井水防治学科基本架构及内涵

尹尚先 徐斌 尹慧超 曹敏 丁莹莹 梁满玉

引用本文:

尹尚先, 徐斌, 尹慧超, 等. 矿井水防治学科基本架构及内涵[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 24–35.

YIN Shangxian, XU Bin, YIN Huichao. Basic structure and connotation of mine water prevention and control discipline[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 24–35.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0477>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

闭坑矿井积水对相邻生产矿井防治水的影响

Influence of closed mine water accumulation on water prevention and control in adjacent production mines

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 96–101 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/852ed16e-a4d1-4b95-9280-c68f147d7331>

复杂水文地质条件下矿井水害综合防治技术研究

Study on technology of mine water disaster prevention and control in underground mine under complex hydrogeological conditions

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 167–174 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.023>

西部矿区高矿化度矿井水膜蒸馏处理技术

Technology of membrane distillation treatment for highly-mineralized mine water in western mining area

煤炭科学技术. 2022, 50(3): 295–300 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6dd899b8-faf6-4aeb-9d5a-fc1deac01489>

穿越富水煤层段井巷防治水技术研究

Research on water prevention and control technology for mine roadway engineering crossing water-rich coal seam

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 252–260 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d6e5dbad-3fb8-46fc-83cc-55706dad85d9>

高矿化度矿井水纳滤膜适度脱盐技术研究

Research on technology and process for moderate desalination of high-salinity mine water by nanofiltration

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 208–214 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.029>

我国煤矿矿井水处理技术现状与展望

Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 11–18 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

尹尚先, 徐 斌, 尹慧超, 等. 矿井水防治学科基本架构及内涵[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 24–35.

YIN Shangxian, XU Bin, YIN Huichao, *et al.* Basic structure and connotation of mine water prevention and control discipline[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 24–35.

矿井水防治学科基本架构及内涵

尹尚先¹, 徐 斌¹, 尹慧超², 曹 敏¹, 丁莹莹¹, 梁满玉¹

(1. 华北科技学院 河北省矿井灾害防治重点实验室, 北京 101601; 2. 防灾科技学院 信息工程学院, 河北 廊坊 065201)

摘 要:我国矿井水防治学科整体经历了 20 世纪的起步发展期和 21 世纪的成长成熟期 2 个大的发展历程, 其基本架构及内涵已然成熟。按照系统论, 拓展了矿井水广义内涵, 规范了矿井水防治术语及科学范畴, 提出了矿井水系统, 即从水源补给到涌水排泄所涉及范围为边界且内部介质结构时变的高度复杂系统, 水源输入和涌水输出齐备, 采矿扰动激发而系统及时响应; 构建了矿井水防治基本架构, 即理论技术体系及技术管理体系等两大核心体系; 理论技术体系涵盖理论基础、技术依托及工程支撑, 致灾机理、条件评价、预测预报为理论基础, 条件探查、预防治理、地质保障为技术依托, 探水、防水、堵水、疏水、排水、截水、监水等七类为工程支撑; 技术管理体系包括先进理念、总体思路和工作体系, 按照“预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采”十六字总体思路, 以源头预防区域治理井上下结合工程治理治保结合先进理念为引导, 建设理念先进, 基础扎实, 勘探清楚, 科技攻关, 综合治理, 效果评价及应急救援“七位一体”水害防治工作体系, 实现减少矿井水影响、防止水害事故、减轻环境影响的总体目标。展望未来, 水灾变物理机制, 数据驱动的灾变规律, 或者二者融合, 是基础理论突破的重点方向, 将带动技术及工程全面突围。

关键词: 矿井水; 矿井水系统; 矿井水防治架构; 矿井防治水; 矿井突水

中图分类号: TD754

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)07-0024-12

Basic structure and connotation of mine water prevention and control discipline

YIN Shangxian¹, XU Bin¹, YIN Huichao², CAO Min¹, DING Yingying¹, LIANG Manyu¹

(1. Hebei State Key Laboratory of Mine Disaster Prevention, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. School of Information Engineering, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, China)

Abstract: The discipline of mine water prevention and control in China as a whole has undergone two major development processes: the initial development period in the 20th century and the growth and maturity period in the 21st century, with its basic structure and connotation already mature. According to the system theory, the generalized connotation of mine water has been expanded, the terminology and scientific scope of mine water prevention and control have been standardized, and a mine water system has been proposed, that is, a highly complex system involving a boundary from water supply to water inflow discharge and time-varying internal media structure. The water input and water inflow output are complete, and the system responds in a timely manner when mining disturbances are triggered; The basic framework of mine water prevention and control has been constructed, including two core systems: theoretical and technical systems and technical management systems; The theoretical and technical system covers theoretical basis, technical support, and engineering support, with disaster mechanism, condition evaluation, and prediction as the theoretical basis, condition exploration, prevention and treatment, and geological support as the technical support, and seven types of projects such as water exploration, waterproofing, water blocking, drainage, drainage, water interception, and water regime monitoring as the measure support; The technical management system includes advanced concepts, overall ideas, and working systems. Guided by the overall idea of “predicting and forecasting, exploring if there is any doubt, exploring before excavating, and treating before mining”, and guided by the advanced concept of combining prevention at the source, regional governance, engineering governance, and protection, the construction concept is advanced, the foundation is solid, explor-

收稿日期: 2023-06-30

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0477

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974126, 42202291); 教育部“创新团队发展计划”滚动支持资助项目(IRT_17R37)

作者简介: 尹尚先(1964—), 男, 山西朔州人, 教授, 博士生导师。E-mail: yinshx03@126.com

通讯作者: 尹慧超(1990—), 男, 山西朔州人, 博士, 讲师。E-mail: yhc@cidp.edu.cn

ation is clear, scientific and technological breakthroughs are tackled, and comprehensive governance is conducted, The “seven in one” water disaster prevention and control work system for effect evaluation and emergency rescue achieves the overall goal of reducing the impact of mine water, preventing water disaster accidents, and mitigating environmental impact. Looking forward to the future, the physical mechanism of flood disasters, the law of data driven disasters, or the integration of the two are key directions for fundamental theoretical breakthroughs, which will drive comprehensive breakthroughs in technology and engineering.

Key words: mine water; mine water system; basic architecture of mine water prevention and control; water prevention and control in mines; mine water intrush

0 引言

水具有两面性,既能载舟,也能覆舟。相对于矿井水害,应有矿井水利。在采矿的过程中,由于矿井水给安全开采带来威胁,因此,受到了格外的重视。而在保障正常开采活动中,发挥水资源的自然属性方面^[1],水还具有有利的一面,却往往被忽视。所以在矿产开发领域,重点关注矿井水害,兼顾矿井水利。这与地面水文水资源领域常常所谓的水利形成了鲜明的对照。同样是趋利避害,但在采矿和水文水资源两个领域,关注点不同,同样是水,一个为“害”另一个却是“利”。事实上,矿井水的两面性完全可以统一起来^[2]。比如,矿井水综合利用^[3]、疏排供(疏水-排水-供水)一体化^[4-5]、矿井水回灌^[6]、绿色开采^[7]、保水采煤^[8]、地下水库^[9]、煤水共采^[10]等。

矿井水防治是一门注重实践和效果的学科。采矿需要应对各种水害的挑战,促进了水害防治技术的进步和发展。技术进步反过来推动理论的完善。目前,矿井水防治学科基础薄弱,架构尚未建立,体系尚未完善,内涵并不清晰,亟待发展与创新。未来,完善的矿井水防治学科,为矿井水对采矿工程的威

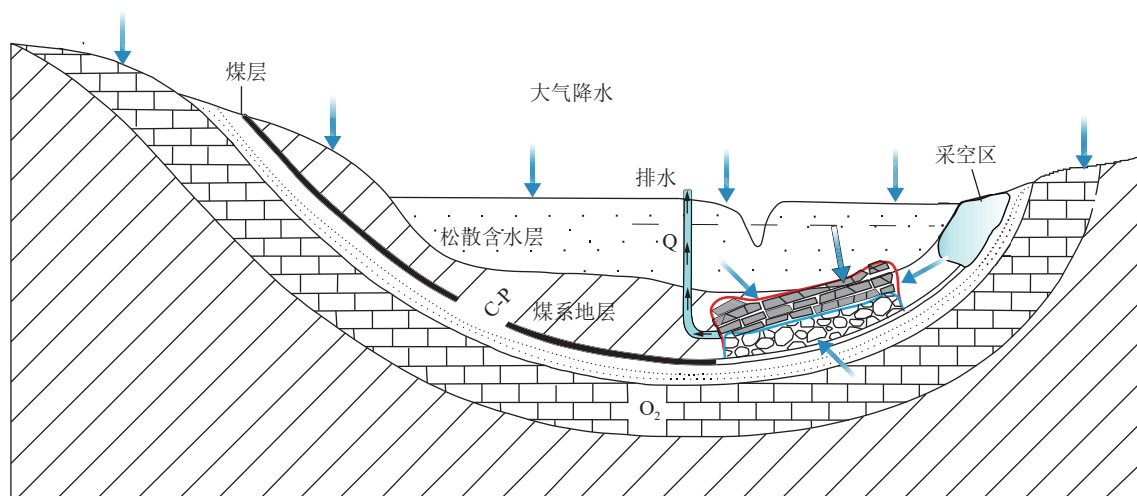
胁与水资源自然属性的协调一致提供支撑,造福人类。

1 基本概念

1.1 矿井水及矿井水系统

对煤炭资源开发有影响的水资源统称为矿井水。影响包括直接影响和间接影响。大多数教材或者文献将矿井水定义为:采矿过程中涌入矿井巷道的水称为矿井水^[11],或因采掘活动影响而汇入矿井的水。事实上,仅把汇入或涌入矿井的水视为矿井水是一种狭义理解。广义理解,矿井水不仅指为采矿而汇入矿井的水,而受采掘活动影响且与矿井涌入关联的各种水(体),大气降水、地表水、地下水以及采空区水,作为矿井水的源,均可称之为矿井水,这对于理解掌握矿井水的演化及行为特征更为重要。由此看来,矿井水可能涉及一个或者数个地表水流域及地下水泉域(系统)。

若将矿井水视为一个完整系统^[12],那么它应该是与采矿活动相互互动耦合的那部分水文系统,可以与水文系统(大气降水、地表水和地下水系统)并行或交叉,为复杂系统(图1)。该系统的输出,以涌水形式表现;系统输入统一源于大气降水或地表水



(大气降水或转化为地下水甚至采空区水,作为系统输入,经过系统内部采动扰动区域,以突水、涌水、溃水、透水等形式输出,排出地表,形成水循环)

图1 矿井水系统示意

Fig.1 Schematic of mine water system

补给;从水源补给到涌水排泄,系统完全可以跨越几个水文系统或地下水系统;系统内部结构,是瞬态流体穿越静态地质体的复杂耦合体;系统的运行,是采矿活动对系统的动态激发,系统以涌水形式表现出来的响应。所以,只有以系统观点广义看待矿井水,才能深层次掌握理解其运行规律。

矿井水系统不同于自然状态下的水文系统^[12]。由于受到采矿扰动,岩体介质和渗流场发生了重大变化,系统的内涵外延、特征与运行机制,与天然系统完全不同。虽然部分仍可勉强沿用渗流基本理论,比如大井法预测矿井涌水量,通常宏观地将垮落带及裂隙带的地下水渗流视为达西流态,事实上,其渗流规律已远远超出达西定律的范畴,是否可以用本构关系来描述其规律都值得商榷。由此看出,水文系统是内部结构保持天然状态的系统,而矿井水系统则不同,内部结构由原岩状态转变为采矿扰动破坏状态,为内部介质结构时变系统,比自然系统复杂得多。

1.2 矿井充水和矿井水害及类型

1) 矿井充水条件。来自不同水源的水经过一定通道向采掘空间运移的过程称之为充水;充水水源与导水通道、充水程度(数量)三者有机结合构成矿井充水条件,称为充水三要素^[13]。

存在一定储量的水(体)为充水的必要条件,而适当的岩体结构(地质环境)为充水的充分条件。

2) 突水、透水、溃水、涌水。①适当的地质环境条件,在一定时间内溃入地下构筑物内一定水量并对矿井生产造成一定影响的突发事件(过程),称之为突水;一定时间内一定量以下的,对生产、生命、财产等不造成重大损失的出水过程,称之为涌水。根据《煤矿防治水细则》^[14],水量小于 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 的为涌水,大于等于 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 即为突水;突水还可以细分为小、中等、大和特大突水点。②一般情况下,突水、透水及溃水的区别^[15],突水是指含水层水的突然涌出;透水是指老空水的突然涌出;溃水是指具有一定静储量的水体在水压作用下煤岩壁溃决形成大量水的突然涌出。

3) 矿井水害及类型。凡影响生产、威胁采掘工作面或矿井安全,增加吨煤成本,造成人员伤亡或财产损失的矿井水,均称为矿井水害。

关于水害类型,不论是《煤矿防治水细则》^[14]附录三的10种类型,还是“三区”管理办法^[16]中的5类重点水害类型,是混合分类,并未按照分类方法进行规范,规范的分类型应按照不同的影响因素或者表

现特征等进行分类^[17]。比如,按照构造影响来分,断层水,陷落柱水;按照含水层性质分,可分为孔隙水、裂隙水和岩溶水;按照涌水部位分,可分为顶板水、底板水;按照水源来分,分为大气降水、地表水、地下水、老空水;按照涌水通道分,有构造水、裂隙带水、钻孔水;按照涌水量大小分,小、中、大、特大突(涌)水。当然也可以按照涌水特征划分为瞬间爆发、冲高回落、多峰周期、滞后型等;还可以将上述分类组合,形成复合类型,如底板陷落柱水,顶板砂岩裂隙水,特大型构造水,等等。

从实用角度,5类重点水害类型划分较为合理,分别为地表水、顶板水(包含离层水)、底板水、老空水及构造水^[16]。当然简化为顶板水、底板水和老空水,更简单明了。

1.3 矿井水防治

矿井防治水(Mine Water Management, prevention of Mine Water),为防止和治理地表水和地下水流入矿井、巷道、采区危害采矿工作所采取的措施,是1996年公布的煤炭科学技术名词^[18],属于应用学科,细分煤炭科技(一级学科)中煤矿安全(二级学科)的矿山灾害(三级学科)。

矿井防治水虽为规范用语,但笔者认为并不科学,有口语或俗语之嫌。“矿井”作为主语,并不具备主体行为能力,它不能“防治”(谓语)“水”(宾语);而如果用“矿井水防治”替代“矿井防治水”,可能更科学合理,“矿井水”为名词,其“防治”,不论从意思还是语言结构,更容易为大同行或外行接受。所以,本文采用“矿井水防治”,或者“矿井水害防治”,可以简称“防治水”。

从学科分类来看,矿井水防治属于学科方向。在国家基金委的学科体系中^[19],从矿业工程中的安全问题来理解,将防治水领域的研究放在了煤矿安全,防灭火(突水),以突水代替了矿井水防治;如果从地质学大类申报,就要选择水文地质和水化学。从研究生培养体系即学科体系来看^[20],属于地质资源与地质工程一级学科的矿井水害防治方向,或者矿业工程一级学科中煤矿安全的“三下一上”采煤等方向;从本科的理工科专业来看^[21],水文地质或者矿床水文地质最为接近,现行的地质工程专业涵盖了防治水方向;但在煤矿的专业分工中,防治水与“一通三防”并列为安全技术,作为煤矿重大灾害中的一类灾害类型进行管理。

矿井水防治是以地学为基础,研究开采过程中水文及水文地质问题的一门学问,地质学是基础,采

矿是目的, 解决水文地质问题是目标。地质学关注的是相对静态的地质体; 水文地质学所研究的, 是流体在地质体当中的运动规律, 其关注的是瞬态时变的流体在相对静态的地质介质当中的运移规律; 而矿井水防治关注的不仅是静态的地质体和瞬态的流体, 而且还要考虑动态的采矿活动对地质体和流体的影响。由于复杂地质环境、流体瞬态不均一以及开采动态扰动的多因素非线性不确定性耦合作用, 使其具有偶发性、突发性及时变性等特点。

综上所述, 矿井水防治虽然主要依托水文地质学, 但它不同于传统的地质科学, 是以地质学、水文地质学、水文学和采矿技术等为基础的交叉科学。

2 矿井水防治学科发展简史

新旧世纪交替之际, 煤炭行业发生了深刻变化, 强劲的能源需求以及科技进步的强力支撑, 催生了煤炭开采技术的变革性突破, 以综采及综采放顶煤为代表的整套技术, 促进了煤炭产能的释放, 迎来了新世纪煤炭黄金十年高速发展期。因此, 以 2000 年为界, 煤炭科技发展分为两个大的阶段。

在此大背景下, 矿井水防治学科发展也相应经历了这两大阶段。20 世纪, 煤炭开发集中在华北和华南石炭二叠纪煤田以及东北侏罗白垩纪煤田, 且以浅部开采为主, 主要水害类型为老空水、地表水, 以及底板灰岩承压水; 进入 21 世纪, 随着煤炭开发战略向西部转移以及向深部转移, 水害类型转变为顶板水和高承压底板水, 同时, 大量出现离层水。

2.1 起步发展期

20 世纪的防治水学科, 又可以分为 3 个阶段: 起步阶段、停滞阶段、基本技术初步形成及推广应用阶段。

1) 起步阶段。新中国成立初期, “一五” “二五” 是我国煤炭工业的起步期, 煤炭部和地矿部相继成立专业研究机构, 高校院系调整, 煤炭及地质等行业院校独立办学, 为煤炭开发奠定了人才及科技支撑基础。这一阶段, 初步涉及了老空水、地表水防治的研究, 催生了中国固体矿床水文地质分类^[22]等一批标志性成果。此时煤矿水害事故低位频发期, 特重大水害事故时有发生。

2) 停滞阶段。20 世纪六七十年代, 前期发展势头良好, 标志性事件, 如 1964 年焦作矿区水文地质会战^[23], 提出了“突水系数”法, 水文物探化探方法丰富了勘探手段; 1962 年, 地质部与煤炭工业部制定了《矿区水文地质工作规范》(暂行)(第一分册 煤及

油页岩)。后期受大跃进和文革影响, 刚有起色的煤炭工业受到冲击, 煤矿管理混乱、乱采滥挖、设备失修, 煤炭科技事业受到重创, 法规形同虚设, 管理混乱, 事故多发频发。

3) 基本体系初步形成及推广应用阶段。20 世纪八九十年代以来, 改革开放, 煤炭工业重新步入正轨, 重新确立“安全第一”的方针, 科技日新月异, 《矿井水文地质规程》《煤矿防治水条例》《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程》等法规^[15]相继出台, 底板加固、顶板和采空疏放水开始示范应用, 丰富完善了防治水技术手段, 基本体系初步成型。后期受“有水快流”政策影响, 小煤矿大量涌现, 监管薄弱, 煤矿事故高位波动。国有煤矿水害安全形势稳步好转。

2.2 成长成熟期

进入新世纪, 经济快速发展对能源需求强劲, 迎来了煤炭工业黄金十年的高速发展期, 煤炭生产格局及安全保障发生了深刻变化。长期高强度开采, 导致东北地区资源逐步枯竭, 华北区域浅部资源消耗殆尽, 煤炭开发战略不得不向西部、向深部转移, 西部开发, 防治水主要面临顶板水(突水溃砂以及离层水)的威胁和地下水资源保护^[24-25], 深部转移, 则主要面对深部带压开采的问题^[26]。

1) 黄金十年成长阶段。强劲的能源需求, 促进了煤炭产能的不断攀升, 促成了综采或综采放顶煤开采工艺的广泛应用, 而高强度开采强烈扰动带来了系列安全问题^[27], 顶板覆岩垂向剧烈岩移沟通地表或第四系松散层富水带, 以及顶板巨厚砂岩含水层, 导致瞬时涌水突增甚至突水溃沙, 给防治水工作带来新的挑战^[28], 如神东矿区浅埋薄基岩突水溃沙, 威胁高产高效工作面; 探放水等防治水工作滞后于快速掘进, 成为高产高效的瓶颈环节; 深部带压开采, 从形成机制到表现形式完全区别于浅部^[26], 高承压突水威胁深部和下组煤的开发。总结战略转移中水害防治的重大理论进展和实践经验, 以《矿井水文地质规程》《煤矿防治水条例》为基础, 2009 年出台《煤矿防治水规定》^[29], 确立了“预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采”防治水十六字方针, 新理论及部分行之有效的新技术新工艺新方法得到法规层面上的规范和确认^[15]。

为应对深部带压开采出现的新情况, 解决井下超前探放水制约采掘衔接, 消除井下探放高承压水带来的人为风险, 提出了地面区域探查治理的新理念^[30], 定向钻进技术的引进, 使该构想迅速落地生根,

地面超前区域探查治理技术开始示范应用^[31],效果良好。

西部矿区顶板巨厚洛河组、直罗组等含水层扰动,导致单一工作面伴随涌水量超过 2 000 m³/h,严重影响采掘作业,给高产高效工作面带来重大挑战^[32]。

2)稳定成熟期。2010 年以来,随着煤炭战略转移向纵深发展,西部开发战略的实施以及深部煤炭资源的开发利用,推动了理论探索和针对部分关键安全问题,开展了卓有成效的研究,取得了部分成果,为防治水工作奠定了良好的基础。实践过程中,一些新情况,新问题带动了理论探索和工程实践的进步,也催生了一些新的技术,新的方法和新的理论,促进了顶板水防治以及深部带压开采理论及技术的成熟。一批示范成果在生产中得以推广应用,防治

水工作体系逐步成熟,并写入《煤矿防治水细则》^[14]。

3 基本构架及内涵

以减少矿井水影响、防止水害事故、减轻环境影响为目标,以源头预防、区域治理、井上下结合工程治理、治保结合先进理念为引导,以致灾机理、条件评价、预测预报为理论基础,以条件探查、预防治理、地质保障为技术依托,以探水、防水、堵水、疏水、排水、截水、水情监测等 7 类工程为措施支撑,按照“预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采”十六字总体思路,建设理念先进,基础扎实,勘探清楚,科技攻关,综合治理,效果评价及应急救援“七位一体”水害防治工作体系^[14],逐步构建由理论技术体系及技术管理体系等两大核心体系构成的矿井水防治基本架构(图 2)。

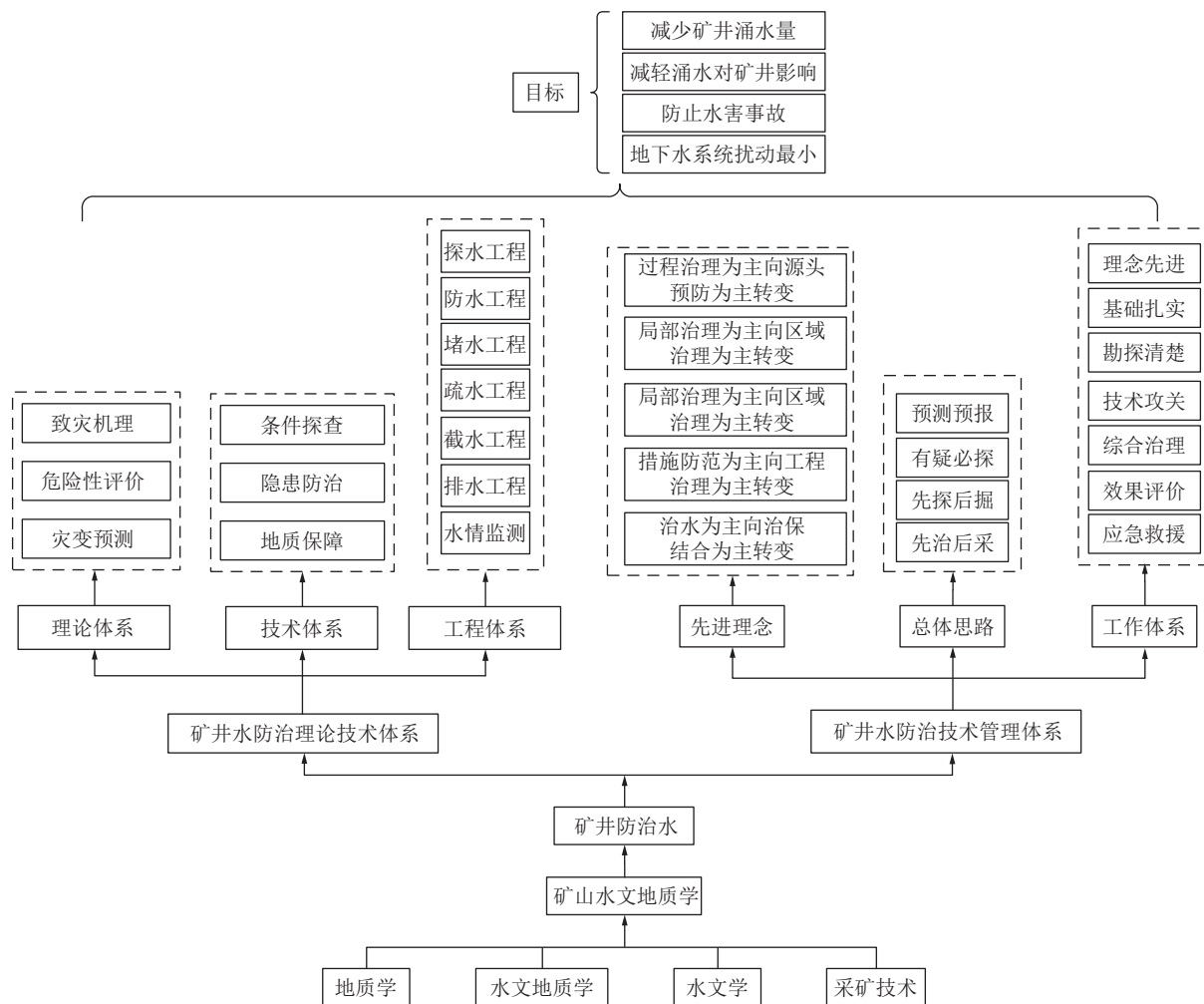


图 2 矿井水防治学科基本架构

Fig.2 Basic structure of mine water prevention and control

3.1 理论技术体系

矿井水致灾机理(机理)、危险性评价(评价)、灾

变预测(预测),构成矿井水防治理论体系;矿井充水条件探查(探查)、水害隐患预防治理(防治)、地质保

障(保障),即构成了矿井水防治技术体系;探水、防水、堵水、疏水、排水、截水、监水等 7 类工程,组成了矿井水防治工程体系;3 项理论、3 项技术和 7 类工程直接为采矿服务,构成了矿井水防治理论技术体系。

3.1.1 理论体系

1)致灾机理。描述矿井水灾害形成成因。不均质各向异性地质体及流动水的耦合,由于采矿动态扰动而致灾,其千差万别的成因用统一机理是不现实的^[31]。但不论何种情形突(涌)水,采矿的扰动以及水动力的作用,甚至二者耦合,是致灾的基本面,而在复杂地质体中探索流固耦合的具体作用机制是描述致灾机理的途径。

2)危险性评价。分析矿井各要素受水害威胁程度,从防治水角度判断是否具备安全生产条件。可以评价的对象非常广泛^[33],如,防治水基本管理保障评价,基本资料评价,基本地质工作评价,工程评价,防排水系统及地质保障评价,应急保障评价,回采工作面评价,掘进工作面评价,结果或者效果评价,等。但不管是何种评价,针对何种对象评价,均涉及到评价方法。如果致灾机制清晰,可以用精确方法描述水灾的形成过程,建立本构方程,给定水灾发生与否的判别临界值(式)。但不幸的是,由于开采和水的双重动态因素叠加,而地质体又非均质各向异性,导致获得确定性评价结果绝非易事。目前定量评价方法较少,多数为半定量的统计方法^[34]。

目前,常用的评价方法有:①查阅资料评估和现场调查相结合的方法^[35],如老空隐蔽致灾因素的评价;②标准对比评价方法^[36],如矿井排水系统评价,按照规程规范给定的水泵、管路、水仓及电源标准进行评价;③统计学评价方法^[37],依据大量实践经验,采用统计方法设置阈值开展评价,如带压开采的突水系数法;④模拟评价方法^[38],采用物理模拟或数值模拟进行评价,如围岩运移规律的相似材料模拟,复杂围岩环境下矿井水运移规律的数值模拟;⑤理论分析评价方法^[39],采用渗流的理论,获得矿井水预测结果进行评价,如大井法评价矿井涌水量,作为排水系统的设计依据;⑥现场实践评价方法^[40],工程质量如何,现场实施物探、钻探等工程,评价检验工程质量和效果。

3)灾变预测。包括水灾范围、位置、时间及水量的预测,回答在哪里、何时突水,水量大小。就目前的理论技术水平,其精确预测尚不太可能^[41],理论上,复杂介质地质体和水流的复合体,尚无精确本构模型,无解析解或解的精度很难满足生产需要。

3.1.2 技术体系

1)探查技术。包括井田条件勘查和采场条件探查(探水)。井田条件探查,即地质勘探以及水文地质(补充)勘探,应查明系统(单元)条件;采场条件探查,即探水,包括掘进阶段的探水以及回采阶段的探查,达成查“疑”明晰隐患之目标。

2)防治技术。包括预防和治理技术。预防技术,在采掘前对可预见的隐患进行必要处置,达成消“疑”解除后患之目标,防止采掘过程中出现危险,主动预防包括疏(放)水降压技术、注浆加固或注浆改造技术,疏(放)水降压技术可分为采空区放水、顶板疏放水以及底板疏水降压;注浆加固或注浆改造技术包含底板加固、含水层改造、构造加固改造;被动预防主要从采矿技术角度,如分层开采、限高开采、充填开采等;治理技术,如隐患治理、隐患活化治理、涌水治理、闭坑治理,分为排水及堵水技术。

3)保障技术。即回采过程的安全保障,包括技术保障和管理保障。技术保障如防排水系统、监测预警系统等;管理保障如机构人员、设备、物资等条件,责任制等规章制度,应急预案和逃生路线及演练等^[42]。

3.1.3 工程体系

按照“十六字”方针“七项”措施,煤矿防治水工程可分为探水、防水、堵水、疏水、排水、截水、监水等七类。应按照设计、施工、检验、评价、验收进行流程管理,应满足工程施工及管理有关规定。“探水”包括勘探工程和探放水工程;“防水”包含煤岩柱、防水闸门或防水墙工程;“堵水”涵盖帷幕截流、注浆加固或注浆改造工程;“疏水”意指疏水降压及疏放水工程;“排水”即输排水系统工程;“截水”指地表截流改道及填埋防渗工程;“水情监测”为监测保障工程。

1)“探”水工程。“探水”包括勘探工程和探放水工程。①勘探工程。根据有关规程规范要求,当勘探工程量不足,隐患未查清,开采条件变化时,应进行矿井水文地质补充勘探。工程设计、施工、评价、验收应符合相关规程标准^[43]要求。②探放水工程。探放水,是指包括探水和放水的总称。探水是指采矿过程中用超前勘探方法,查明采掘工作面顶底板、侧帮和前方等水体的具体空间位置和状况等情况。放水是指为了预防水害事故,在探明情况后采用施工钻孔等安全方法将水体放出。

工程实施可分为 6 个步骤^[44]:

第一步,查疑。开展水害预测预报和隐患排查

工作,查找“疑问”点。针对“疑问”点或区域,实施“有‘疑’必探”。

第二部,设计。针对“疑问”,编制探放水设计及施工安全技术措施。

第三步,施工。按照施工组织设计,探放水施工前的准备工作,钻机安装,套管及闸阀安装固结,施工过程管控,遇异常情况的特殊管控,工程验收等,可参考有关规程规范或标准。严格执行井下探放水“三专”“两探”要求。

第四步,评价。探水工作完成后,地测部门应当提出水文地质情况分析报告和水害防治措施,确认探放水效果。

第五步,疏放。疏放水工程应当由防治水机构编制专项设计,按规定审批后施工。疏放水应坚持“放净”原则。工程完成后应开展放水效果评价。

第六步,验证。疏放效果验证应坚持“验准”原则。应采用物探、钻探、巷探、化探等方法进行放水效果验证。经验证没有达到疏放要求时,必须采取补充措施和工程,并再次验证,直到疏干放净。

2)“防”水工程。“防水”包含煤岩柱、防水闸门或防水墙工程。①煤岩柱留设工程。防隔水煤(岩)柱,是指为确保近水体安全采煤而留设的煤层开采上(下)限至水体底(顶)界面之间的煤岩层区段。在需要分区的地方,根据有关要求设置防隔水煤(岩)柱。应当由矿井地测部门组织编制专门设计,防隔水煤(岩)柱的尺寸要求见《煤矿防治水细则》附录六^[14],最小尺寸不得小于20 m。一旦设定不能随意变动;经煤炭企业总工程师组织有关单位审批后实施。②防水闸门及防水闸墙。在需要分区的区域,根据实际情况设置防水闸门防水闸墙。建筑防水闸门的设计、施工、试验、验收,日常维护管理,关闭和开启(参见《煤矿防治水细则》第98条)^[14]。

3)“堵”水工程。“堵水”涵盖帷幕截流,注浆加固或注浆改造工程,局部注浆工程。①帷幕截流工程。可选择地下连续墙、帷幕注浆段等方案,隔离控制水源对采掘场所稳定补给。②注浆加固或注浆改造工程。井下施工条件差,水压较高时存在风险,地面施工投资大,受环境制约。根据矿井实际,采取地面区域治理、井下注浆加固底板或者改造含水层或者井上下相结合的治理工程,消除水害威胁。③局部注浆工程。通道封堵工程,导水断层、裂隙密集带和岩溶陷落柱等导水通道封堵工程;具体目标体封堵工程,井筒预注浆工程、突水点封堵工程及巷道超前预注浆工程(参见《煤矿防治水细则》第101条、

102条及103条)^[14]。

4)“疏”水工程。“疏水”意指疏水降压及疏放水工程。①疏水降压工程。针对煤层底板承压含水层,将水头值降到安全水头值以下,实现带压开采。具备疏水降压条件,可采用钻孔、专用疏水巷或泄水巷进行疏水。②疏放水工程。按照查全、探清、放净、验准流程实施老空水疏放工程;顶板水疏放工程,疏放水前,开展可疏性评价,编制区域疏放水方案,做到过程可控,效果验证。

5)“排”水工程。矿井建设生产应优先建立排水系统。排水系统建设应重视水泵、排水管路、水仓、配电设备、电源等设施相互匹配,各设施应满足相关规程规范要求^[14]。

6)“截”水工程。“截水”指地表截流改道及填埋防渗工程。①地表防排水工程。建立地面疏水、防水和排水系统。对坡面汇水应修挖防洪沟截住山洪,防止内侵或通过露头渗入矿井,封堵地面水渗入井下的塌陷裂缝和塌陷洞等通道;漏水的沟渠和河流应整铺河底或改道;加强地面在用钻孔及封闭不良钻孔的管理。②填埋防渗工程。地面裂缝和塌陷地点应当及时填塞。存在滑坡等地质灾害危险地段,必须采取除险加固措施。

7)“监”水工程。“水情监测”为监测保障工程。

矿井应当建立地下水动态监测系统,对井田范围内主要充水含水层的水位、水温、水质等进行长期动态观测,对矿井涌水量进行动态监测。受底板承压水威胁的水文地质类型复杂、极复杂矿井,应当采用微震、微震与电法耦合等科学有效的监测技术,建立突水监测预警系统,探测水体及导水通道,评估注浆等工程治理效果,监测导水通道受采动影响变化情况^[45]。

应开展采掘工程的实时动态监测,应用现代采集传输及数据分析手段,实现水文动态的预测预报,保障采掘安全^[46]。

3.2 技术管理体系

贯彻执行防治水十六字基本原则、七项防治水综合配套措施、五大防治水转变理念、七位一体水害防治工作体系和八项强化防治水工作,完善防治水技术管理体系^[14]。

3.2.1 总体思想

防治水十六字基本原则科学地阐述了水害防治工作的总体思想和具体操作程序。“预测预报”,运用预测预报理论和方法,科学分析判断和评价水害风险和隐患,查找“疑”点;“有疑必探”,针对“疑”

点,采用综合探测技术手段,查明或排除水害隐患;“先探后掘”,先探清查明,再掘进施工;“先治后采”,先治理水害隐患,再安排回采作业。总体思想科学,逻辑关系清晰,具体操作程序流畅,环环相扣,相得益彰。部分地区执行“有掘必探”,一字之差,导致总体思想混乱,如果“有掘必探”,那“预测预报”就失去了必要性;“有掘必探”必然导致盲目探查,重复探查,探查量扩大化,在生产衔接紧张时容易出现造假,还可能造成探放水疲劳症,大多数正常情况长期处于紧张状态,忽视了真正异常时的重点关注,反而易引发事故。

3.2.2 先进理念

采用先进理念,以取代传统的防治水方式^[27],从而提高防治水的效率和质量,引领防治水工作上水平上台阶。

1)水害防治逐渐由过程治理为主向源头预防为主转变。从已发生水害过程的治理,如排水、封堵突(涌)水等措施,转变为注重从源头上预防水害的发生,如加强煤矿地质勘探、合理开采、区域治理、科学排水等措施,以减少或避免水害的发生。过去的过程治理虽然能够解决当前的水害问题,但是难以根本解决水害的根源,而且治理成本高、效果难以保证。而源头预防则能够从根本上减少水害的发生,降低治理成本,提高防治效果。因此,由过程治理向源头预防的转变,是矿井水防治的一种重要进步。

2)由局部治理为主向区域治理为主转变。过去井下局部治理存在缺陷,如煤层底板注浆加固,突水点封堵等,与生产交叉,影响采掘接续,效率低,危险性高,高承压水难以施工;区域治理具有显著优势,不影响井下作业,治理与全面探查水文地质条件同时推进,可以加固隔水层也可以改造含水层,堵源治本,效率高危险程度低;此转变将扭转只治标不治本的不利局面。

3)由井下治理为主向井上、下结合治理为主转变。传统的井下治理,缺点明显,井上下结合,灵活多样,如地面区域治理与井下验证结合,实现了取长补短,规避了风险提高了效率。

4)由措施防范为主向工程治理为主转变。传统理念主要是通过采取一系列的防范措施来防范水害事故,如加强巡查、加强排水、加强监测等,主要针对水灾的后果进行治理,而未从根本上解决问题;工程手段,可以治理源头,切断通道,是根治水灾的有效办法,如探放水工程、注浆封堵工程、疏放水工程等。措施治标工程治本。

5)由治水为主向治保结合为主转变。传统理念主要着眼水害防治,而现代理念转变则强调了治理水害和保水开采的结合,即在保障安全生产的同时,有效地控制和利用煤矿水资源,实现水资源的可持续利用。这种理念转变不仅可以提高煤矿生产的效率和经济效益,还可以保护环境和生态,实现可持续发展。

3.2.3 工作体系

以先进理念为引导,打牢防治水基础,查清水文地质条件,攻克重大难题,强化水害综合治理及效果评价,加强水害应急救援管理,构建“七位一体”水害防治工作体系。

1)理念先进。防治水理念五大转变确立了理念引领作用。

2)基础扎实。地质调查、观测、探测及地质预报等水文地质基础工作扎实,基础资料可靠完整,责任制和制度完善,机构人员装备齐全。

3)勘探清楚。勘探过程阶段完整,工程量充足,满足规范要求,结论可靠明确,隐患已查清。“勘探清楚”用词并不准确,从其意思来看,修改为“条件清楚”为好。

4)科技攻关。科技创新驱动,攻克企业重大技术难题。

5)综合治理。综合考虑各类水灾甚至各种灾害,多种措施综合防治,代替单一类型水灾防治,体现综合治理协同防控理念。

6)效果评价。分析矿井各要素受水害威胁程度,从防治水角度判断是否具备安全生产条件。由于评价的对象非常广泛,这里所述的效果评价,主要是指工程技术方案或措施实施效果如何,是否达到安全采掘的目标。

7)应急救援。编制水害事故应急预案,雨季前进行演练。当暴雨、洪水等极端天气,或滑坡泥石流等地质灾害,威胁矿井时,启动预案,紧急撤人;当井下出现突水征兆,或监测预警系统报警时,应停止作业,撤离人员,启动预案,及时处置。发生事故时,应第一时间启动应急预案,按照流程开展事故处置及救援工作。

“七位一体”水害防治工作体系虽初步建立,但在防治水工作全流程、内容全覆盖、逻辑关系更清晰等方面仍有提升空间^[47]。

3.2.4 工程案例

山东黄河北煤田某矿,计划开发 7 采区下组煤 11 和 13 煤。平面上,该采区附近无大构造,可视为

无穷远边界;剖面上(图 3), 11 煤直接顶为四五灰岩, 13 煤下伏有徐灰和奥灰, 经评价, 如果疏放四五灰岩, 放水量约 $1\,300\text{ m}^3/\text{h}$, 11 和 13 煤徐灰突水系数分别

为 0.13 和 0.16 MPa/m, 奥灰突水系数分别为 0.084 和 0.096 MPa/m; 11 和 13 煤开采受到顶板和底板灰岩水的双重夹击, 下组煤开发水害威胁严重。

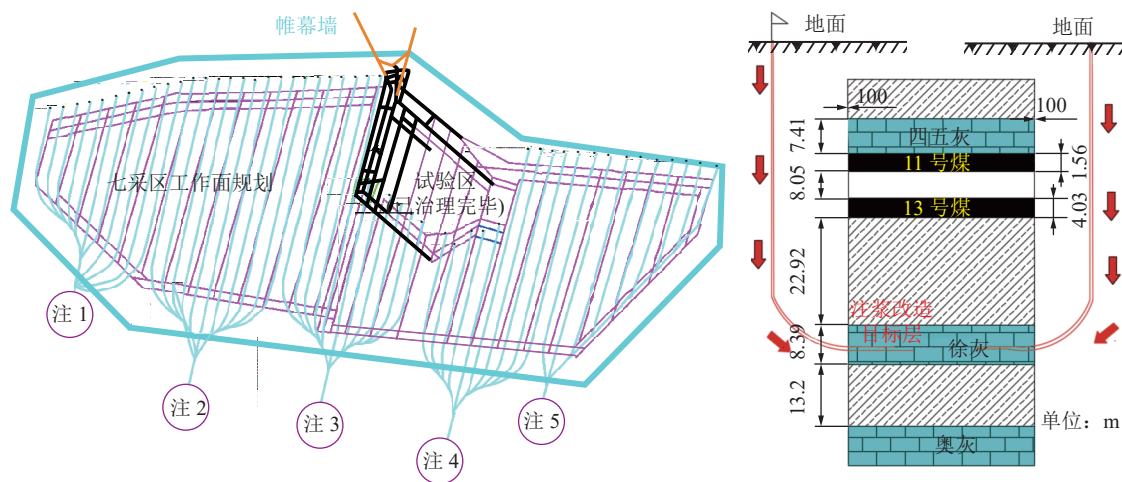


图 3 某矿采区下组煤开采探治工程布置示意

Fig.3 Schematic of the exploration and treatment project for the mining area

四、五灰平均间距 4.09 m, 总厚度一般 10 m 左右, 可视为一个含水层, 富水性中等。作为 11 煤直接顶板, 其动静储量直接威胁采掘活动, 必须采取措施。如果直接疏放, 四五灰涌水量达 $1\,300\text{ m}^3/\text{h}$, 技术可行但经济上不合理。为此, 采取“截流堵源”的治理思路, 在开采范围周边, 采用帷幕注浆方法, 截断四五灰水的横向(顺层)补给来源; 采取徐灰改造的方法, 截断奥灰垂向补给通道, 薄层灰岩静储量很快即可疏干。

在徐灰中开展地面区域治理, 全面布置顺层水平定向孔, 水平分支孔间距 50 m, 构造探查和注浆治理一体化操作。

协调水资源保护和煤矿安全, 制定了“四五灰水以疏为主, 辅以治理; 徐灰水以治为主, 辅以疏降; 奥灰水以防为主, 辅以查治”的水害防治总体思路, 开展综合治理。

按照总体防治水思路, 采取帷幕截流与底板注浆改造相结合, 注浆改造与疏水降压相结合, 生产管理与落实各项防治水措施相结合, 探查与治理相结合的综合探查治理措施, 实施含水层注浆改造与隔水层注浆加固、帷幕注浆截流、疏水降压、排水系统增建扩容、建立隔离设施、留设煤柱以及建立地质保障系统等工程, 解放了下组煤资源, 达成了安全开采与保水开采的目标, 为华北煤田解放下组煤创出了一条新路。

4 展 望

我国水害事故发生的原因, 由两方面因素决定^[47], 一是客观条件, 整体上煤田地质及水文地质条件复杂, 叠加老空区破坏, 条件更趋复杂化; 二是主观因素, 主要表现为思想认识上重视程度不够, 导致投入不足, 专门专业技术人才匮乏。

当技术不再“卡脖子”, 管理不再容错, 水害事故可防可控将不再是遥不可及的梦想。未来管理措施仍是预防水害事故的重要手段, 夯实企业主体责任、政府监管责任及行业监察责任, 建立健全防治水管理体系, 照章办事, 杜绝违章, 才能保障技术措施充分发挥作用。

4.1 未来理论发展趋势

基础理论的进展是技术突破的根基。未来防治水理论在两个方向上发力, 寻求突破: 一是沿传统确定性理论方向继续攻关, 攻克水害发生机制的传统理论基础^[48], 进而实现以灾害发生机理为主线的 평가方法、预测预报理论研究的全面开花; 二是另辟蹊径, 避开内在机理的难点, 借鉴深度学习机器学习等非确定性方法^[49], 提取多维多模态输入和输出表象信息的特征, 探寻二者之间非线性逼近, 建立可靠的映射关系。同样可以解决评价和预测的理论问题。

1) 致灾机理。①总结突水模式, 分析致灾机理, 建立数学动力学模型, 评价突水危险性, 提出突水判据, 预测突水行为^[48]。②由于地质体的复杂性, 流体

的瞬态性, 开采的动态性, 提出确定性理论模式非常困难, 采用输入输出黑匣子或黄匣子, 机器学习或深度学习^[49], 不再拘泥灾变物理机理, 而采用大量案例经验统计获得结果。物联网万物互联是解决获取数据信息的有效方法^[50]。

2) 危险性评价。无论采用何种评价方法, 由定性评价到定量评价是发展的大趋势; 各种评价方法中, 大数据、机器学习及人工智能等方法的应用, 是未来发展趋势。

3) 灾变预测。现阶段, 采用确定性理论解决水害事故灾变预测, 被认为可行性较小^[49]。因此, 灾变预测应寻求新理论的突破。人工智能分析大量水灾案例, 总结规律, 预测各种实际采掘工况的灾变可能性。

4.2 未来技术突破

技术上, 对地质体(介质加流体)的探查技术依然是解决矿井水害问题的瓶颈。研发清晰表达“三维透明地质体”及其属性(应力场、流场、温度场等多属性)的探测技术装备, 是未来攻关重点。未来应大力发展定向钻探的随钻物探、化探技术, 充分发挥三者耦合、近探、交互校验的优势, 实现三维精细动态勘探; 在现有防控治理技术的基础上, 完善全时空立体超前区域探查治理深部底板水(包括构造水)技术及帷幕截流技术, 发展顶板巨厚砂岩水精准超前疏放技术, 开发定向钻探精准探查治理离层及顶板水技术, 推广应用定向钻探探查治理老空水技术。

1) 探查技术。野外测绘及调查将大量采用遥测技术; 物探技术, 围绕多解性、分辨率、降噪, 地质体及其属性精细解释等攻关; 钻探技术, 改进定向和随钻测试; 化探技术, 注重新的测试技术的应用, 特殊元素或组合对特定条件的辨识, 人工智能和深度学习等新的辨识方法; 试验技术, 开展原位试验, 模拟, 微观与宏观多尺度测试及尺度关联等新方法新技术的应用; 发展井下随钻探测测试, 随掘随采探测测试。

2) 防治技术。隐患排查技术, 疏(放)水降压技术, 注浆加固或注浆改造技术, 排水及堵水技术等, 为未来重点攻关技术方向。

3) 保障技术。智能监测预警技术与智慧应急专家辅助决策技术等为重点发展方向。

4.3 未来工程措施攻关方向

1) 探水工程主攻方向, 地面定向钻探, 配合随钻物探、化探; 井下随钻物探化探技术, 随掘随采探测技术及快速智能成像技术, 动态三维展示。

2) 防水工程主攻方向, 可移动快速隔离技术及装备, 快速隔离建造技术及材料。

3) 堵水工程主攻方向, 快速钻进技术, 适合不同工况的堵水材料及注浆工艺。

4) 疏水工程主攻方向, 基于三维透明地质的采煤扰动自适应精准疏放水技术。

5) 排水工程主攻方向, 大流量高扬程排水系统; 快速抢险排水泵及管路。

6) 截水工程主攻方向, 地面塌陷回填, 裂缝充填平整, 地表水体隔离。

7) 监测工程主攻方向, 矿井作业物联网建设, 采集动态数据, 实现矿井互联互通, 大数据人工智能辨识异常, 实现灾害提前预警。

4.4 未来愿景

未来, 人的感观定性感知识别向机器智能精准感知辨识过渡, 万物互联, 海量信息通过大数据甄别, 人工智能助推水害智慧预警及应急; 精确表达地质体及其属性的三维透明地质模型将成为信息集成展示以及智能化矿井的基础平台; 以三维透明地质模型为基础的模拟技术高度发达, 各种工况均可实现精确模拟预测; 大口径快速定向钻探装备、排水设备、救援机器人等成熟可靠; 遥感技术、水化学技术、新型物探及测井技术、水源识别技术、野外试验技术、监测监控技术、注浆技术以及矿井综合利用技术等, 空前发达, 助力矿井水可防可控目标的达成。

架构已确立, 理念已明晰, 体系已建立, 加强科学技术攻关, 其成果支撑从防治水理论、技术、工程措施以及技术管理等各环节的各个击破, 推动矿井水防治学科体系的整体进步。

参考文献(References):

- [1] 张人权, 梁 杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- [2] 武 强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795–805.
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and utilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795–805.
- [3] 尹尚先, 韩 永, 常浩宇, 等. 邯邢矿区岩溶水资源优化配置研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 29–34.
YIN Shangxian, HAN Yong, CHANG Haoyu, et al. Study on optimal allocation of karst water resources in Hanxing Mining Area[J]. 2016, 44(8): 29–34.
- [4] 孙文洁, 任顺利, 武 强, 等. 新常态下我国煤矿废弃矿井水污染防治与资源化综合利用[J]. 煤炭学报, 2017, 47(1): 27–35.
SUN Wenjie, REN Shunli, WU Qiang, et al. Water pollution's prevention and comprehensive utilization of abandoned coalmines in

- China under new normal life[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 47(1): 27-35.
- [5] 武强, 王志强, 郭周克, 等. 矿井水控制、处理、利用、回灌与生态环保五位一体优化结合研究[J]. *中国煤炭*, 2010, 36(2): 109-112.
- WU Qiang, WANG Zhiqiang, GUO Zhouke, *et al.* A research on an optimized five-in-one combination of mine water control, treatment, utilization, back-filling and environment friendly treatment[J]. *China Coal*, 2010, 36(2): 109-112.
- [6] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 538-550.
- ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, *et al.* Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 538-550.
- [7] DONG Shuning, XU Bin, YIN Shangxian, *et al.* Water Resources Utilization and Protection in the Coal Mining Area of Northern China. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1214.
- [8] 范立民, 孙强, 马立强, 等. 论保水采煤技术体系[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 196-204.
- FAN Limin, SUN Qiang, MA Liqiang, *et al.* Technological system of water-conserving coal mining[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 196-204.
- [9] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(2): 239-246.
- GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(2): 239-246.
- [10] 武强, 申建军, 王洋. “煤-水”双资源型矿井开采技术方法与工程应用[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(1): 8-16.
- WU Qiang, SHEN Jianjun, WANG Yang. Mining techniques and engineering application for "Coal-Water" dual-resources mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 8-16.
- [11] 袁亮. 煤矿安全规程解读: 2022[M]. 北京: 应急管理出版社, 2022.
- [12] 尹尚先. 煤矿水害防治基础科学发展思考[J]. *煤炭工程*, 2016, 48(S2): 96-100.
- YIN Shangxian. Thoughts of basic science development on mine water control and prevention[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(S2): 96-100.
- [13] 武强, 赵苏启, 董书宁, 等. 煤矿防治水手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.
- [14] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
- [15] 武强. 煤矿防治水细则解读[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
- [16] 国家矿山安全监察局. 煤矿防治水“三区”管理办法[EB/OL]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/xw/zl/2019zt/mkfszt/gcsy/202206/t20220624_416673.shtml, 2023-06-30.
- [17] 武强, 崔芳鹏, 赵苏启, 等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J]. *煤炭学报*, 2013(4): 5.
- WU Qiang, CUI Fangpeng, ZHAO Suqi, *et al.* Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. *Journal of China Coal Society*, 2013(4): 5.
- [18] 煤炭科技名词审定委员会. 煤炭科学技术名词[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [19] 国家自然科学基金委员会. 国家自然科学基金学科分类目录[EB/OL]. <https://www.nsf.gov.cn/>, 2023-06-30.
- [20] 房正宏, 李本友. 构建学科交叉为核心的研究生培养体系[J]. *国家教育行政学院学报*, 2017(3): 56-61.
- FANG Zhenghong, LI Benyou. On Establishing the Graduate Cultivate System around the Core idea of Disciplines-Crossing[J]. *Journal of National Academy of Education Administration*, 2017(3): 56-61.
- [21] 教育部. 普通高等学校本科专业目录 2023[EB/OL]. <https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/20/5752327/files/7256143e8b94465d9263f5fcfae1ecb1.pdf>, 2023-06-30.
- [22] 地质部水文地质工程地质局. 中国固体矿产水文地质分类[M]. 地质出版社, 1959.
- [23] 管恩太. 突水系数与煤矿水害防治[J]. *煤炭工程*, 2011(1): 46-48.
- GUAN Entai. Water inrush coefficient and prevention of water disasters in coal mines[J]. *Coal Engineering*, 2011(1): 46-48.
- [24] 丁湘, 申斌学, 郑忠友, 等. 深部侏罗系矿井充水强度评价与水害风险管控[M]. 北京: 应急管理出版社, 2022.
- [25] 张文泉, 王在勇, 吴欣焄, 等. 顶板离层水突涌模式及预防技术模拟研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 217-224, 231.
- ZHANG Wenquan, WANG Zaiyong, WU Xintao, *et al.* Investigation and simulation on the model and prevention technology of water inrush from roof bed separation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 217-224, 231.
- [26] 尹尚先, 连会青, 徐斌, 等. 深部带压开采: 传承与创新[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 170-181.
- YIN Shangxin, LIAN Huiqing, XU Bin, *et al.* Deep mining under safe water pressure of aquifer: Inheritance and innovation[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 170-181.
- [27] 范立民, 迟宝锁, 王宏科, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组含水层研究进展与水害防治建议[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(10): 3535-3546.
- FAN Limin, CHI Baosuo, WANG Hongke, *et al.* Research progress of aquifer of Zhiluo Formation in northern Ordos Basin and suggestions on water hazard prevention[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(10): 3535-3546.
- [28] 杜锋, 李振华, 姜广辉, 等. 西部矿区突水溃沙类型及机理研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(7): 1846-1853.
- DU Feng, LI Zhenhua, JIANG Guanghui, *et al.* Types and mechanism of water-sand inrush disaster in west coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(7): 1846-1853.
- [29] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水规定释义[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009.
- [30] 赵庆彪. 奥灰岩溶水害区域超前治理技术研究及应用[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(6): 1112-1117.
- ZHAO Qingbiao. Ordovician limestone Karst water disaster regional advanced governance technology study and application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1112-1117.
- [31] YIN Huichao, XU Bin, YIN Shangxian, *et al.* Prevention of wa-

- ter intrushes in deep coal mining over the Ordovician aquifer: a case study in the Wutongzhuang coal mine of China[J]. *Geofluids*, 2021(11): 1–13.
- [32] 范立民, 孙 魁, 李 成, 等. 榆神矿区煤矿防治水的几点思考[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 182–188.
- FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, *et al.* Thoughts on mine water control and treatment in Yushen mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 182–188.
- [33] 尹尚先, 徐 维, 尹慧超, 等. 深部开采底板厚隔水层突水危险性评价方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(1): 83–89.
- YIN Shangxian, XU Wei, YIN Huichao, *et al.* Study on risk assessment method of water intrush from thick floor aquifuge in deep mining[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(1): 83–89.
- [34] 尹尚先, 吴志远. 钱家营井田构造复杂程度定量评价[J]. *煤矿安全*, 2019, 50(5): 218–221.
- YIN Shangxian, WU Zhiyuan. Quantitative Evaluation of Structural Complexity of Qianjiaying Mine Field[J]. *Safety in Coal Mine*, 2019, 50(5): 218–221.
- [35] 司马丹琪. 矿山帷幕注浆防治水工程质量评价方法研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
- SIMA Danqi. Research on quality evaluation method of water prevention and control in mine curtain grouting[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018.
- [36] 唐辉明. 工程地质学基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [37] 白先春. 统计综合评价方法与应用[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [38] 武 强, 董东林, 石占华, 等. 可视化地下水模拟评价新型软件系统(Visual Modflow)与矿井防治水[J]. *煤炭科学技术*, 2000, 28(2): 3.
- WU Qiang, DONG Donglin, SHI Zhanhua, *et al.* A new software system for visual groundwater simulation and evaluation (Visual Modflow) and mine water control[J]. *Coal Science and Technology*, 2000, 28(2): 3.
- [39] 李文平, 乔 伟, 李小琴, 等. 深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2437–2448.
- LI Wenping, QIAO Wei, LI Xiaoqin, *et al.* Characteristics of water disaster, evaluation methods and exploration direction for controlling groundwater in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2437–2448.
- [40] YIN Shangxian, ZHANG Jincai, LIU Demin. A study of mine water intrushes by measurements of in situ stress and rock failures[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79: 1961–1979.
- [41] 尹尚先, 连会青, 刘德民, 等. 华北型煤田岩溶陷落柱研究70年: 成因·机理·防治[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(11): 1–29.
- YIN Shangxian, LIAN Huiqing, LIU Demin, *et al.* 70 years of investigation on Karst collapse column in North China Coalfield: cause of origin, mechanism and prevention[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 47(11): 1–29.
- [42] 贾建称, 贾 茜, 桑向阳, 等. 我国煤矿地质保障系统建设30年: 回顾与展望[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 86–106.
- JIA Jiancheng, JIA Qian, SANG Xiangyang, *et al.* Review and prospect of coal mine geological guarantee system in China during 30 years of construction[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 86–106.
- [43] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12719-2021矿区水文地质工程地质勘查规范[M]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [44] 尹尚先, 王 屹, 尹慧超, 等. 深部底板奥灰薄灰突水机理及全时空防治技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1855–1864.
- YIN Shangxian, WANG Yi, YIN Huichao, *et al.* Mechanism and full-time-space prevention and control technology of water intrush from Ordovician and thin limestone in deep mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1855–1864.
- [45] 连会青, 徐 斌, 田振焘, 等. 矿井水情监测与水害风险预警平台设计与实现[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(1): 198–207.
- LIAN Huiqing, XU Bin, TIAN Zhentao, *et al.* Design and implementation of mine water hazard monitoring and early warning platform[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(1): 198–207.
- [46] 范立民, 孙 魁, 李 成, 等. 西北大型煤炭基地地下水监测背景、思路及方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 317–329.
- FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, *et al.* Background, thought and method of groundwater monitoring in large coal base of northwest China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 317–329.
- [47] 尹尚先, 王玉国, 李文生. 矿井水灾害: 原因·对策·出路[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(1): 214–221.
- YIN Shangxian, WANG Yuguang, LI Wensheng. Cause, countermeasures and solutions of water hazards in coal mines in China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 214–221.
- [48] 尹尚先, 武 强. 陷落柱概化模式及突水力学判据[J]. *北京科技大学学报*, 2006, 28(9): 812–817.
- YIN Shangxian, WU Qiang. Generalized model of collapse column and criterion of water intrush[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2006, 28(9): 812–817.
- [49] YIN Huichao, WU Qiang, YIN Shangxian, *et al.* Predicting mine water intrush accidents based on water level anomalies of borehole groups using long short-term memory and isolation forest[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 616: 128813.
- [50] 贺耀宜, 刘丽静, 赵立厂, 等. 基于工业物联网的智能矿山基础信息采集关键技术与平台[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(6): 17–24.
- HE Yaoyi, LIU Lijing, ZHAO Lichang, *et al.* Key technology and platform of intelligent mine basic information acquisition based on industrial Internet of things[J]. *Journal of Mine Automation*, 2021, 47(6): 17–24.