

# 煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新

何绪文<sup>1</sup>, 张晓航<sup>1</sup>, 李福勤<sup>2</sup>, 张春晖<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:**为了更好地指导煤矿矿井水处理的工程实践,以“两山论”、“生命共同体”、“治水十六字方针”等新理念为指导,总结了分质供水梯级利用、井下处理就地复用、高品质按需供水以及零排放 4 种矿井水资源化利用的新模式;介绍了矿井水资源化生态化利用技术体系、酸性矿井水处理技术、相互冲洗滤池、溶解性总固体 TDS 处理工艺中反渗透 RO 浓水利用技术以及人工湿地与生态塘等矿井水资源化利用的新技术;指出了现有矿井水处理技术中存在涌水量预测不精准、井下高效处理设备参数与“三化”研发不足,以及含特殊污染物矿井水处理领域成套可行性技术较少等短板,并提出涌水量要从开发准确有效,具有动态性、综合性的预测方法来考虑;井下高效处理设备要注重相关工艺设备参数、运行参数与工艺控制条件等基础数据的积累,并加强矿井水处理设备的“三化”研发与相关标准的订立;含特殊污染物矿井水处理要协调好不同矿区、不同矿井及时间尺度上的共性与个性的统一问题,在相关领域加强研究与应用,以形成最佳可行技术。

**关键词:** 矿井水;分质利用;水资源;涌水量预测

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2018)09-0004-08



## Comprehensive utilization system and technical innovation of coal mine water resources

HE Xuwen<sup>1</sup>, ZHANG Xiaohang<sup>1</sup>, LI Fuqin<sup>2</sup>, ZHANG Chunhui<sup>1</sup>

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, China;

2. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** In order to better guide the engineering practice of coal mine water treatment, guided by new concepts, such as “Two Mountains Theory”, “Life Community” and “Sixteen-character Principle of Water Control”, the paper summarizes four new modes of mine water resources utilization, namely, the use of quality water supply cascades, in-situ reuse of underground treatment, high quality water supply and zero emissions. The paper introduces the mine water resources and ecological utilization technology system, acid mine water treatment technology, mutual flushing filter, RO concentrated water utilization technology in TDS treatment process, and new technology of water resources utilization of mines, such as constructed wetlands and ecological ponds. It proposes the short-plate that the existing mine water treatment technology has inaccurate prediction of water inflow, underground high-efficiency processing equipment parameters and three research and development inadequate, and fewer feasible technologies in the field of mine water treatment with special pollutants. It is pointed out that water inflow must be considered from the development of accurate, effective, dynamic and comprehensive prediction methods. The underground high-efficiency treatment equipment should pay attention to the accumulation of basic data, such as relevant process equipment parameters, operating parameters and process control conditions, and strengthen the three research and development of mine water treatment equipment and the establishment of relevant standards. The mine water treatment with special pollutants should be well coordinated with the uniformity of commonality and individuality in time scales in different mines and different mining areas, strengthen research and application in related fields to form the best feasible technology.

**Key words:** mine water; separate utilization; water resources; prediction of water inflow

收稿日期: 2018-06-08; 责任编辑: 代艳玲 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2018.09.002

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0406403)

作者简介: 何绪文(1964—), 男, 湖南涟源人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: hexuwen@sina.com.cn

引用格式: 何绪文, 张晓航, 李福勤, 等. 煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 4-11.

HE Xuwen, ZHANG Xiaohang, LI Fuqin, et al. Comprehensive utilization system and technical innovation of coal mine water resources[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 4-11.

## 0 引言

近年来,生态环境保护受到了国家、企业及社会的广泛关注,新一届政府提出了“两山论”、“山水林田湖是一个生命共同体”、“治水十六字方针”等新发展、新理念,对促进生态文明与美丽中国建设提供理论支撑。水作为生态环境保护中的重要一环,我国却长期为水所困,作为全球最缺水的国家之一,2016年人均水资源量不足 $2\,350\text{ m}^3$ ,水资源形势极为严峻<sup>[1]</sup>。我国煤炭资源分布具有西多东少、北多南少和东深西旱特征<sup>[2]</sup>。水资源却与煤炭资源呈逆向分布,中西部富煤地区多处于干旱和半干旱的生态脆弱区,水资源短缺且地表生态脆弱<sup>[3]</sup>,矿区建设往往面临找水、水资源综合利用和水权配置难题<sup>[4]</sup>。我国煤炭以井工开采为主,约占整个煤炭产量的97%<sup>[5]</sup>,在煤炭开采的过程中,采煤层及开拓巷道附近的地下水及少部分地表水经岩层裂隙渗入巷道从而形成矿井水,由于受到水文地质条件、水动力学、地质化学、矿床地质构造、开采方法及人类活动等因素的综合影响<sup>[6]</sup>,使矿井水水质与地表水质有明显差异,从而具有显著的煤炭行业特征<sup>[7]</sup>。矿井水的直接排放,不仅污染环境,还会造成水资源的巨大浪费<sup>[8]</sup>。据统计,我国开采1 t煤炭约产生2.1 t矿井水,每年产生矿井水约70亿t,矿井水利用率60%左右。当前煤炭仍是我国的主体能源,长期占我国一次能源生产和消费的70%左右,而且这种局势短期内不会有根本变化<sup>[3,9-10]</sup>。在煤炭企业经济发展中,需要摒弃以往粗放式的发展观,努力追求“绿水青山就是金山银山”的矿区生态发展观,树立“矿区与周边环境是一个生命共同体”理念,对矿井水进行无害化处理及资源化利用,激发矿井水所蕴含的巨大环境和社会效益<sup>[6,11-13]</sup>。

根据矿井水所含污染物特征,一般将其分为洁净矿井水、含悬浮物矿井水、高矿化度矿井水、酸性矿井水和含特殊污染物的矿井水<sup>[14]</sup>。近年来,国内外学者在矿井水处理方面开展大量研究工作。李福勤等<sup>[15]</sup>介绍了矿井水井下复用的方向、水质要求、新技术以及工程问题。何绪文等<sup>[6]</sup>对矿井水水质进行了分析,介绍了矿井水处理新技术,总结了井下处理就地复用关键技术,并探讨了矿井水处理的新模式。周如禄等<sup>[16]</sup>对煤矿井下采空区采用曝气氧化池和压力式气水相互冲洗滤池结合工艺,将处理后矿井水作为防尘洒水和设备冷却用水就地复用,

取得了良好的效果,具有自动化程度高、流程简单、运行稳定、处理成本低等优点。毛维东等<sup>[17]</sup>对高矿化度矿井水零排放处理工艺路线进行了总结,并介绍了实际工程案例。笔者从矿井水资源化利用的新模式及新技术2个方面对较成熟的矿井水综合利用体系进行总结,并详细阐述矿井水的无害化处理及资源化利用的方式方法,以期对矿井水的资源化利用提供技术参考。

## 1 矿井水资源化利用的新模式

### 1.1 分质供水、梯级利用工艺

矿井水含有大量的悬浮物,主要由煤粉、岩粉和黏土组成。悬浮物的去除是矿井水处理的首要亦是最关键的一步,悬浮物的去除效率对后续工艺的处理效果将产生直接影响,从而影响最终的出水水质与复用途径。分质供水、梯级利用模式典型工艺流程如图1所示,此工艺为各矿区矿井水处理与资源化利用的常规工艺,适用于以去除悬浮物为主要对象的矿井水。井下水仓中矿井水经加压泵送至地面,经各种构筑物处理,达到复用水质要求后,部分地面利用,部分再返回井下利用。其中,澄清池出水可以作为选煤厂选煤用水;滤池出水井上利用可作为地面降尘、农用、生态、锅炉用水,井下利用可作为乳液配制、防尘与冷却用水。由于我国现有矿井中约60%的矿井水需解决水中悬浮物的污染问题,而此工艺具有流程简单、配置灵活、易于管理、运行成本较低等优点,并经过多年不断发展,相关理论与技术均较成熟,实际应用中具有相当的普适性,是矿井水处理中的经典工艺。

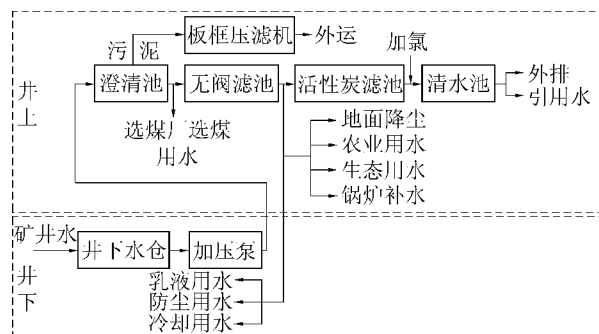


图1 分质供水、梯级利用典型工艺流程

Fig.1 Typical process flow of separate water supply and cascade utilization

### 1.2 井下处理、就地复用工艺

目前,我国大部分煤矿井工开采深度在数十米

至数百米之间,若将矿井水加压至地面处理,存在耗电量过大、加压泵泵壳易损、上水管道压力过高、下水管道减压难度大的问题。另外,由于神东煤炭集团、中煤平朔集团等千万吨级矿井的建设,矿井宽阔的巷道也为井下水处理设备的运输与吊装提供可能性。同时,综采设备的冷却与液压支架用水对水质、水量均提出较高要求,若将矿井水直接用于冷却液压支柱将会堵塞、腐蚀管道和设备<sup>[18]</sup>。在此情况下,井下处理、就地复用就是必然选择。此模式典型工艺流程如图 2 所示。矿井水经废弃巷道预沉淀后,混凝沉淀去除悬浮物,最后经过滤后进入清水池。处理后的水可用于井下的乳液配制、防尘与冷却用水。混凝沉淀所产生的泥浆经板框压滤机脱水后可与煤一起抬升至地面外运。此模式是将处理流程放置于井下巷道中,与地面处理相比,不仅节省管网投资与用电费用,也不存在上述各种问题<sup>[15,19-20]</sup>。但井下巷道空间有限,处理工艺的高效与高集成度就极为重要,故具有高负荷快速沉降性能的磁砂<sup>[21]</sup>和瓷砂<sup>[22]</sup>高效处理工艺就具较大优势。同时,井下对机械设备有极高的防爆要求,因此要求井下水处理设备亦要具有安全等级高,智能化水平强,鲁棒性好等特点。随着大数据、人工智能等技术的发展,井下处理、就地复用工艺的“自动处理,无人值守”将彻底实现。

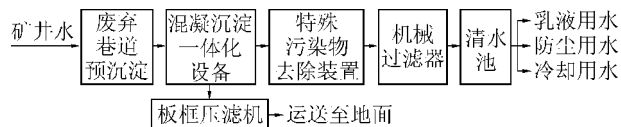


图 2 井下处理、就地复用典型工艺流程

Fig.2 Typical process flow of underground treatment and local reuse

### 1.3 高品质按需供水工艺

高品质按需供水典型工艺流程如图 3 所示。矿井水经地面处理工艺或井下处理工艺去除悬浮物和特殊污染物后,经过反渗透装置去除水中大部分的阴阳离子,达到除盐的效果,以供对水中离子含量控制严格的用户使用。以微滤装置或超滤装置作为反渗透装置的预处理工艺,进一步去除水中的微小悬浮物,以减轻反渗透装置的膜污染。此模式需要重点解决反渗透浓水的处理问题。与前 2 种模式相比,此模式是上述 2 种模式的深度处理,出水中悬浮物浓度、含盐量、金属离子浓度等大幅度下降,出水品质极高。该模式适用于矿井附近依托于煤炭的煤电、煤化工产业园等上下游产业链聚集区。由于工业

园内往往包含不同产业的多经营主体,对用水水质、水量具有阶梯化、多样化要求,且不乏电厂、煤化工工厂等对水质要求较高的用户,故此模式对煤电、煤化工产业园的节水、节能、降耗、降成本具有积极作用。以上是从需求端分析高品质按需供水的必要性,另外,从供给端考虑,部分分布于内蒙古、新疆等草原地区的煤矿,由于当地特有的自然环境结构,使得矿井水完全禁止排放,故需将矿井水处理至较高品质,以供矿区生产、生活使用。

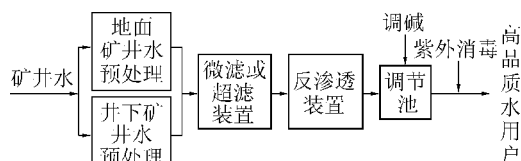


图 3 高品质按需供水典型工艺流程

Fig.3 Typical process flow of high quality water supply on demand

### 1.4 矿井废水零排放工艺

高矿化度矿井水经过去除悬浮物和脱盐浓缩后,以及第 1.3 节高品质按需供水处理后均会形成一部分高含盐量浓水。随着环保要求日益严格,废水零排放已经在内蒙古、宁夏等煤矿主产地开始实施,因此,这些高含盐量浓水的去除也需要重点考虑。废水零排放典型工艺流程如图 4 所示,反渗透浓水经浓缩、纯化与蒸发结晶后得到回用水。浓缩过程包括化学软化、过滤+超滤和反渗透(RO)+深度软化+SRO,化学软化可去除水中硬度、重金属和  $\text{SiO}_2$ ,过滤+超滤可进一步去除悬浮物 SS 和胶体物质,RO+深度软化+SRO 可进一步去除硬度以确保反渗透及蒸发器稳定运行,高倍浓缩可浓缩减量,降低整体投资和运行费用。纯化过程包括化学除杂、浓缩分离、深度除杂以及氧化吸附,纯化的目的是去除杂盐中的有机物和钙、镁、重金属等杂质,以进一步提高盐的白度。目前常用蒸发结晶技术有多效蒸发(MEE)、压汽蒸发(MVR)和自然蒸发<sup>[23]</sup>。3 种蒸发方式各有特点,实际工程中使用较多的为多效蒸发与压汽蒸发。蒸发结晶的过程中采用结晶分盐技术可实现氯化钠和硫酸钠的分离,从而实现矿井水处理中的“零排放”。此模式更适用于环境容量低、生态承载力差的生态脆弱地区以及环保要求高的无排放地区,可通过综合考虑煤电煤化工产业链用水耦合与蒸发结晶来达到零排放的目的<sup>[24]</sup>。目前此技术仍需建设更多示范工程,并进行更详细的技术经济评估。



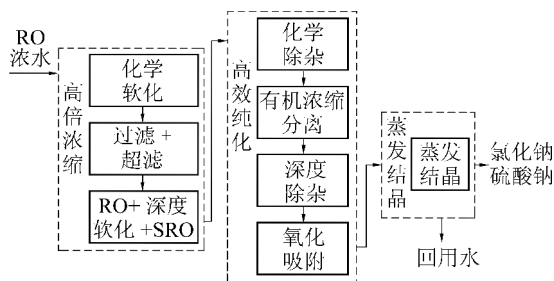


图4 高矿化度矿井水零排放工艺流程

Fig.4 Zero emission process flow of highly-mineralized mine water

## 2 矿井水资源化利用新技术

### 2.1 矿井水资源化、生态化利用技术体系

矿井水资源化、生态化利用技术体系如图5所示。根据水的使用方向,可将矿井水复用于工业、生活、农业与生态。工业用水分为井下用水与地面用水,井下用水部分已在第1.1节阐述,地面用水的重点与难点在于协调各用水单位的用水诉求,满足各单位对水质、水量的要求,提出客观可行的水循环利用方案,并求出矿井水处理成本、地面用水成本和生态成本3方面的最优解。因此需要做统一的供、排水规划,要根据煤矿矿区本身以及周边产业结构的实际情况进行合理配置。生活用水包括居民家庭用水、公共服务用水、生产运营用水以及消防及其他用水,矿井水回用作为居民家庭用水和公共服务用水除了需要满足必要的水质、水量、水压要求外,不仅要在价格上有足够优势,还要加强相关宣传,以破除居民心中矿井水“脏水,差水”的认识,使居民“喜欢用,愿意用”,以促进矿井水生活回用的良性发展。农业用水包括灌溉用水、农业设施用水、水库补水、水产养殖以及动物饮用。未处理的矿井水一般会含有大量的悬浮物以及盐分,有的还含有一定量的重金属和放射性物质。若不经处理直接用于农业,则会造成土壤板结、粮食减产、水库水质变差、水产减产以及动物死亡等严重后果,因此,回用于农业的矿井水必须经处理符合相应的水质标准。生态用水包括公园用水、景观用水、湿地补水、绿化用水、地面补水与地下补水。由于过往城市景观绿化类回用水往往采用城市市政污水,对于矿井水用于生态补水的实例较少,故在此领域尚未见相关标准,可以参考GB/T 18920—2002《城市污水再生利用 城市杂用水水质》和GB/T 18921—2002《城市污水再生利用 景观环境用水水质》等相关标准进行矿井水处理工艺设计与运营。对于地下补水,可以参考GB 19772—

2005《城市污水再生利用 地下水回灌水质》标准。对我国宁夏、山西等部分允许排放但无环境容量地区,当地要求外排水需满足《地表水环境质量标准》三类水体要求,事实上大部分矿井水经处理可达到并优于饮用水标准,但考虑到技术经济等各项因素,在矿井水预处理将悬浮物、Fe、Mn及特殊污染物基本去除前提下,重点考虑去除矿井水中的石油类、表面活性剂等污染物质,再利用人工湿地和生态塘相结合的深度处理工艺,最后达到地表水三类标准在技术上是可行的。该体系基本囊括了矿井水回用的所有可能途径,可满足不同单位的用水需求。但在现有的矿井水回用报道和实际工程中,I分质供水、梯级利用和Ⅲ农业供水均已取得了较为广泛的应用,Ⅱ安全、卫生供水和Ⅳ生态供水和超净排放应用较为薄弱,仍需加强相关研发与实践。

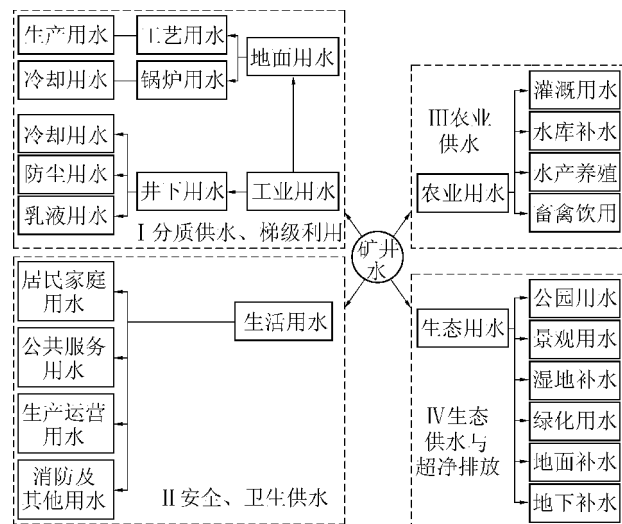


图5 矿井水资源化、生态化利用技术体系

Fig.5 Technical system of mine water resource utilization and ecological utilization

### 2.2 酸性矿井水处理技术

#### 2.2.1 轻烧镁粉中和法

传统酸性矿井水处理采用石灰中和法,此方法缓冲性能差,不易控制投加量,易造成中和过度。同时会形成 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{CaCO}_3$ 等沉淀物,不仅造成二次污染,还会造成管路的堵塞,提高运行成本。轻烧镁粉来源于菱镁矿尾矿,菱镁矿主要化学成分为碳酸镁,工业上主要用来制备各种耐火材料和镁盐。与其他碱类物质相比,由于轻烧镁粉来源于尾矿,故其具有相当大的成本优势。轻烧镁粉的主要成分是活化氧化镁,氧化镁在与矿井水中酸性物质反应的过程中,即使投加量过大,溶液的pH值也不会超过9。若中

和对象为硫酸,通常无沉淀物生成,故不会发生结垢问题。中和产物是硫酸镁,还可以作为一种含硫酸镁肥料加以回用。用氧化镁中和酸性矿井水,废水中某些金属离子亦会形成沉淀。与石灰、烧碱中和处理法比较,轻烧镁粉法所生成的沉淀大而密实,很容易沉淀、澄清和过滤,可以有效减少泥浆体积,降低处理成本<sup>[25]</sup>。SEUNG 等<sup>[26]</sup>用氢氧化镁结合光气法处理酸性废水,不仅起到降低废水酸度,脱除重金属离子,还减少了泥浆产量,更利于过滤分离。文献[27]对轻烧镁粉处理酸性矿物排放液做了详细研究。试验表明,用轻烧镁粉作处理剂,酸性矿井水中的酸度和所溶解的金属离子均可脱除,pH 值最高不超过 9.5,且沉淀物体积密实,远优于消石灰和烧碱。

### 2.2.2 高浓度泥浆法

与传统的石灰中和法工艺相比,高浓度泥浆法(HDS)将浓密池中沉积的部分底浆返回反应池,提高了石灰的利用效率,降低了石灰的消耗量。同时,由于泥浆中固体颗粒物浓度较大,可提高颗粒物之间的碰撞概率,加快了沉降和分离的速度。与常规石灰法(LDS)相比,此工艺可减少 5%~10% 石灰用量;处理能力提高 1~2 倍;污泥含固率达到 20%~30%,可有效节省污泥输送费用。此工艺出水中钙离子浓度显著降低,有效延缓设备、管道的结垢现象,保证处理设施的正常运行<sup>[28]</sup>。杨晓松等<sup>[29]</sup>采用此法处理德兴铜矿矿山酸性废水和碱性废水混合液,认为随污泥不断回流,可以使 LDS 工艺沉淀底泥中有效钙得到充分利用;确定了 HDS 处理酸性废水为酸碱中和、金属离子沉淀以及  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  和  $\text{Al}(\text{OH})_3$  絮凝沉淀共同作用的结果。

### 2.3 相互冲洗滤池

过滤可有效保证水中悬浮物的去除效果,矿井水处理中常用滤池有普通快滤池和无阀滤池。普通快滤池需设置专门的反冲洗装置;无阀滤池可依靠水力自动反冲洗,但反洗效果无保证,会造成出水水质不稳定。据此中国煤炭科工集团杭州研究院设计研发了一种新型相互冲洗滤池,该滤池一般由多个密闭的滤格组成,采用压力式进出水,保证了过滤和反冲洗时所需要的水压。与快滤池相比,相互冲洗滤池节省了快滤池进行水反冲洗时所需的冲洗水泵或高位冲洗水塔和管路系统;和无阀滤池相比,该滤池不需要上部体积很大的冲洗水箱。相互冲洗滤池内外部结构简单,检修维护工作量小,特别适合于中、小处理规模且空间狭小的场所,尤其适合煤矿井

下巷道断面尺寸和工作环境<sup>[30]</sup>。荣伟国<sup>[31]</sup>使用相互冲洗滤池处理济宁三号煤矿矿井水,出水可满足 MT 76—2002《煤矿企业矿山支护标准—液压支架(柱)用乳化油、浓缩物及其高含水液压液》中,配置乳化液用水水质要求,同时满足防尘洒水和设备冷却用水要求。

### 2.4 TDS 处理工艺中 RO 浓水利用技术

高矿化度矿井水除盐 RO 浓水利用技术如图 6 所示。RO 浓水去除  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等硬度离子后可作为选煤用水。RO 浓水还可调制水煤浆,水煤浆作为气化原料,既可用于生产化工产品,如合成氨、二甲醚等,还可用于煤制油、煤制气、联合循环发电(IGCC)及以煤气化为基础的多联产等领域<sup>[32]</sup>。RO 浓水经蒸发结晶与分盐结晶后还可产出工业盐。RO 浓水还可排入自然盐湖和人工盐湖中,排入自然盐湖中可与湖中现有盐化工以及氯碱产品链融合,从而实现环境效益和经济效益的双重提升。人工盐湖的设置应注意克服蒸发塘所具有的缺点,通过加强管理、生态结合等手段提高人造盐湖周边的环境适宜度,并可采用机械雾化和蒸发等手段控制池容,以实现工业与环境的协调发展。

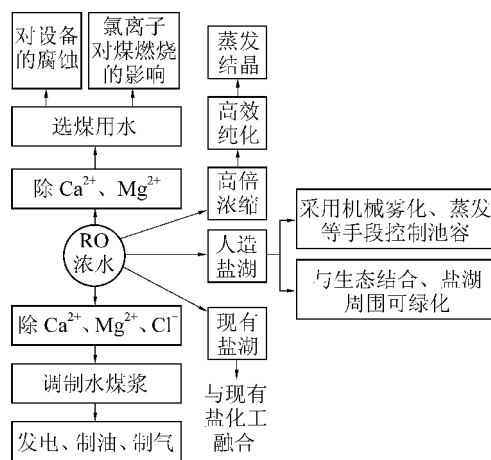


图 6 TDS 处理工艺中 RO 浓水利用

Fig.6 Utilization of RO concentrated water in TDS process

## 3 现有矿井水处理技术短板

### 3.1 涌水量预测

从煤炭开采的角度来看,矿井涌水是一种水患,矿井涌水量的准确预测可保证矿井的安全生产,并降低矿井水害的可能性。但矿井水也是一种资源,从矿井水资源化复用的角度来思考,涌水量的准确预测对于后续处理工艺条件的优化以及抗冲击负荷调节均具有积极意义。现常用涌水量预测方法有:

水均衡法、解析法、数值法、水文地质比拟法<sup>[33]</sup>。这些方法都只是或多或少的强调了影响矿井涌水的单一因素,而在多要素协同作用下的矿井涌水量分析方面仍有欠缺,往往过多考虑影响矿井涌水量的水动力条件和求解方法的精确性,却很少考虑过水通道结构、性质、形成条件、出现的位置和时间等<sup>[34-35]</sup>重要因素,也没有将矿井涌水发生的时间、地点与采掘工程的进展有机的结合起来,从而导致所预测出来的涌水量是静态量,而非随工程进度而变化的动态量,大幅减弱了预测结果对实际生产的指导性。同时,我国陕甘宁晋蒙疆等主要大型煤炭基地矿井涌水除断裂带水外还有大量的孔隙水(过去未考虑)致使矿井涌水比预测量大很多。因此,继续深入研究并开发准确有效,具有动态性的、综合性的涌水量预测方法十分重要。

### 3.2 高效分离设备与井下处理技术的“三化”研发

传统矿井水井上处理具有投资与运行成本高、占地面积大等缺点,而井下处理则具有相当的优势。但由于巷道空间有限,故充分掌握井下空间特征,最大效能利用废弃巷道就显得十分重要<sup>[32]</sup>。与传统混凝+沉淀相比,磁砂与瓷砂分离工艺由于将磁种或瓷砂作为絮体的凝结核,可使絮体沉淀速度显著提升,有效提高设备负荷,显著降低设备的占地面积与体积,更适用于井下的特殊环境。但相关工艺设计参数、运行参数与工艺控制条件等基础数据依旧不足,大部分实际工程均处于试点阶段,距离大规模的应用还需做更多工作。与此同时,随着千万吨级矿井的出现,对井下综采设备的模块化、智能化、标准化的“三化”要求越来越高,使得对井下矿井水水质要求有大跨度的提高,因此,对矿井水处理设备的“三化”研发与相关标准的订立对于实现井下矿井水处理工艺精细化与无人值守化具有显著意义。

### 3.3 含特殊污染物矿井水的处理

由于特殊的水文地质条件,使一些微量元素或放射性元素等有毒有害物质进入矿井水中,形成含特殊污染物矿井水,如放射性矿井水、含铁锰矿井水、高氟矿井水和含重金属矿井水。由于含特殊污染物矿井水的形成过程各异,就导致对于此种矿井水的处理缺乏普适性的工艺方案,不同污染物需要完全不同的工艺流程与设计,而各个矿区的实际情况又不甚相同,同时也会涉及到井上、下处理以及不同回用途径等问题。此相关领域研究还鲜有报道,故仍需加强相关领域的研究与应用,以形成最佳可

行技术。

## 4 展 望

1)在矿井水零排放模式中,要加强高效纯化、蒸发结晶等新技术、新设备方面的研发工作,并加强工程实践探讨,使得企业在保证绿色环保的同时,达到兼顾提升纯度、提高产率、降低处理成本的目的,并深入挖掘结晶盐所蕴含的潜在经济价值和社会价值。

2)加强矿井水资源化、生态化利用技术体系的建设,特别是在生活供水和生态供水方面。生活供水方面除了满足用水点的水质、水量、水压要求外,还需根据不同矿井水水源水质类型建立完备的围绕规划、设计、施工的“一揽子”技术方案方法;生态供水方面应根据矿区周边生态环境的实际情况确立切实可行的补水途径,并需加强相关排放标准的制定。

3)涌水量的准确预测对建立矿井水的前馈处理、应急处理机制具有重要意义。需从空间和时间2个维度,综合考虑过水通道结构、性质、条件、位置以及采掘计划等因素对涌水量的影响,并建立相关数学模型以及求解方法。

4)随着开采深度的增加以及千万吨级矿井的出现,使得矿井水的井下处理具有明显优势,但影响井下处理工艺广泛应用的掣肘亦非常显著,故需对各高效工艺通过小试、中试装置对处理机理作深入研究,并对相关工艺的设计、运行参数和工艺控制条件作深入总结。同时,亦要加强相关设备的“三化”研发和相关标准的订立。

### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国水利部.2016年中国水资源公报[Z].2016-07-11.
- [2] 田山岗,尚冠雄,唐辛.中国煤炭资源的“井”字型分布格局:地域分异性与资源经济地理区划[J].中国煤田地质,2006,18(3):1-5.  
TIAN Shangang, SHANG Guanxiong, TANG Xin. Chinese coal resource octothorpe shaped distributing pattern: regional differentiation and resources economic geographical division[J]. Coal Geology of China, 2006, 18(3): 1-5.
- [3] 顾大钊,张勇,曹志国.我国煤炭开采水资源保护利用技术研究进展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):1-7.  
GU Dazhao, ZHANG Yong, CAO Zhiguo. Technical progress of water resource protection and utilization by coal mining in China [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 1-7.
- [4] 彭苏萍.煤炭资源与水资源:中国煤炭清洁高效可持续开发利



- 用战略研究[M].北京:科学出版社,2014.
- [5] 郭雷,张 砾,胡婵娟,等.我国矿井水管理现状分析及对策[J].煤炭学报,2014,39(12):484-489.
- GUO Lei, ZHANG Luo, HU Chanjuan, *et al.* Status analysis and measures taken for mine water management in China [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 484-489.
- [6] 何绪文,李福勤.煤矿矿井水处理新技术及发展趋势[J].煤炭科学与技术,2010,38(11):17-22.
- HE Xuwen, LI Fuqin. New technology and development tendency of mine water treatment [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11): 17-22.
- [7] 高 亮,周如禄,徐楚良,等.煤种与煤矿矿井水水质特性之间的相关性探讨[J].能源环境保护,2004,18(6):46-48.
- GAO Liang, ZHOU Rulu, XU Chuliang, *et al.* Discussion on the relation between coal species and the characteristics of quality of mine drainage [J]. Energy Environmental Protection, 2004, 18(6): 46-48.
- [8] 何绪文,杨 静,邵立南,等.我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J].煤炭学报,2008,33(1):63-66.
- HE Xuwen, YANG Jing, SHAO Linan, *et al.* Problem and counter measure of mine water resource regeneration in China [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 63-66.
- [9] 郇建强,王建生,颜 勇.我国水资源安全现状与主要存在问题分析[J].中国水利,2011(23):42-51.
- LI Jianqiang, WANG Jiansheng, YAN Yong. Current situation of water security and analysis of major problem in China [J]. China Water Resources, 2011(23): 42-51.
- [10] 李井峰,熊日华.煤炭开发利用水资源需求及应对策略研究[J].煤炭工程,2016,48(7):115-117,121.
- LI Jingfeng, XIONG Rihua. Research on water resource demand of coal-based industries and the solution strategy [J]. Coal Engineering, 2016, 48(7): 115-117, 121.
- [11] 陈佩佩.西北矿区供水现状及矿井水综合利用研究[J].煤矿开采,2017,22(5):60-63.
- CHEN Peipei. Study of mine water comprehensive utilization and current situation of northwest mining area water supply [J]. Coal Mining Technology, 2017, 22(5): 60-63.
- [12] 戚 鹏,武 强,李晓翔,等.矿井水处理工艺及治理效益分析[J].水处理技术,2010,36(4):125-126.
- QI Peng, WU Qiang, LI Xiaoxiang, *et al.* Analysis of wastewater disposal and disposal economy on coal mining wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(4): 125-126.
- [13] 袁 航,石 辉.矿井水资源利用的研究进展与展望[J].水资源与水工程学报,2008,19(5):50-57.
- YUAN Hang, SHI Hui. Research progress and prospect of coal mine water resource utilization [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2008, 19(5): 50-57.
- [14] 李福勤,李 硕,何绪文,等.煤矿矿井水处理工程存在的问题及对策[J].中国给水排水,2012,28(2):18-20.
- LI Fuqin, LI Shuo, HE Xuwen, *et al.* Problems and solutions for mine water treatment works [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(2): 18-20.
- [15] 李福勤,何绪文,吕晓龙,等.煤矿矿井水井下处理新技术及工程应用[J].煤炭科学技术,2014,42(1):117-120.
- LI Fuqin, HE Xuwen, LYU Xiaolong, *et al.* Engineering application and new technology of underground mine water treatment [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(1): 117-120.
- [16] 周如禄,高 亮,郭中权,等.煤矿矿井水井下直接处理及循环利用[J].中国给水排水,2013,29(4):71-74.
- ZHOU Rulu, GAO liang, GUO Zhongquan, *et al.* Underground direct treatment and recycle of coal mine water [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4): 71-74.
- [17] 毛维东,周如禄,郭中权.煤矿矿井水零排放处理技术与应用[J].煤炭科学技术,2017,45(11):205-210.
- MAO Weidong, ZHOU Rulu, GUO Zhongquan. Zero liquid discharge treatment technology and application for coal mine drainage water [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(11): 205-210.
- [18] 刘秀云,牛曙光.单体液压支柱防腐蚀研究[J].煤矿机械,2004(8):36-37.
- LIU Xiuyun, NIU Shuguang. Study on corrosion protection of single hydraulic prop [J]. Coal Mine Machinery, 2004(8): 36-37.
- [19] 张 猛,宋恩民.唐口矿井井下排水及供水系统方案的设计优化[J].给水排水,2009,35(9):72-74.
- ZHANG Meng, SONG Enmin. Design optimization of underground drainage and water supply system in Tangkou Coal Mine [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(9): 72-74.
- [20] 何广东,邵立南,蒋先锋,等.神东矿区矿井水井下处理工艺研究[J].煤炭工程,2007(8):79-81.
- HE Guangdong, SHAO Linan, JIANG Xianfeng, *et al.* Underground mine water treatment in Shendong Mining Area [J]. Coal Engineering, 2007(8): 79-81.
- [21] 张晓航,何绪文,王 浩,等.磁絮凝工艺对含悬浮物矿井水处理效果的研究[J].水处理技术,2018,44(4):122-126.
- ZHANG Xiaohang, HE Xuwen, WANG Hao, *et al.* Mine water treatment effect with magnetic flocculation technology and flocs fractal characteristics [J]. Technology of Water Treatment, 2018, 44(4): 122-126.
- [22] 王 浩,张晓航,何绪文,等.神经网络对微砂加重絮凝处理矿井水效果预测[J].煤炭技术,2018,37(3):188-191.
- WANG Hao, ZHANG Xiaohang, HE Xuwen, *et al.* Treatment effect prediction of mine water with micro-sand loading flocculation by neural network [J]. Coal Technology, 2018, 37(3): 188-191.
- [23] 王 璐.煤制天然气固定床气化废水零排放技术进展[J].煤炭加工与综合利用,2017(2):34-38.
- WANG Lu. Technical progress of fixed bed gasification wastewater zerodischarge in coal based synthetic natural gas [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2017(2): 34-38.
- [24] HAN D, HE W, YUE C, *et al.* Study on desalination of zero-emission system based on mechanical vapor compression [J]. Applied Energy, 2017, 185(2): 1490-1496.

- [25] 何绪文,贾建丽.矿井水处理及资源化的理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [26] SEUNG Jun Kyung, KIM Hyum Su, KIM Joo Yong. Method for treating acidic wastewater for effectively treating metals included in the acidic wastewater while minimizing generation of sludge [J]. Chemical Abstracts, 2008, 148(6):127-155.
- [27] SHAND M A. The chemistry and technology of mahgnesia [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006:155-254.
- [28] 宋文涛.高浓度泥浆法(HDS):铁盐处理工业污水废水半工业试验[J].有色金属(冶炼部分),2011(11):51-54.  
SONG Wentao. Pilot-plant test of acid waste water treatment by high density slurry (HDS) ferrous salt process [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2011(11):51-54.
- [29] 杨晓松,邵立南,刘峰彪,等.高浓度泥浆法处理矿山酸性废水机理[J].中国有色金属学报,2012,22(4):1177-1183.  
YANG Xiaosong, SHAO Linan, LIU Fengbiao, *et al.* Mechanism of mine acidic waste water treated by high density sludge [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(4):1177-1183.
- [30] 周如禄,张广文,郭中权,等.压力式气水相互冲洗滤池的开发与应用[J].煤炭科学技术,2013,41(2):113-120.  
ZHOU Rulu, ZHANG Guangwen, GUO Zhongquan, *et al.* Development and application of pressurized gas and water interacted flushing filter [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(2):113-120.
- [31] 荣伟国.矿井水井下处理用互冲洗过滤装置开发[J].能源环境保护,2017,31(4):49-52.  
RONG Weiguo. Development of the interflush filter device under the mine well [J]. Energy Environmental Protection, 2017, 31(4):49-52.
- [32] 王金华.我国煤炭高效洁净利用新技术[J].煤炭科学技术,2012,40(1):1-4.  
WANG Jinhua. New technology of coal high efficient and cleaning utilization in China [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(1):1-4.
- [33] 虎维岳,闫丽.对矿井涌水量预测问题的分析与思考[J].煤炭科学技术,2016,44(1):13-17.  
HU Weiyue, YAN Li. Analysis and consideration on prediction problems of mine water inflow volume [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1):13-17.
- [34] 周如禄,戴振学,李颖.矿井涌水量预测的理论与实践[J].煤炭科学技术,1998,26(6):47-49.  
ZHOU Rulu, DAI Zhenxue, LI Ying. Theory and practice of mine water inflow prediction [J]. Coal Science and Technology, 1998, 26(6):47-49.
- [35] 管恩太,武强.矿井涌水量预测评述[J].中州煤炭,2005(1):7-8.  
GUAN Entai, WU Qiang. Review on prediction of mine water inflow [J]. Zhongzhou Coal, 2005(1):7-8.