



煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

煤矿矿井水资源化利用技术创新

何绪文 王绍州 张学伟 李福勤

引用本文:

何绪文, 王绍州, 张学伟, 等. 煤矿矿井水资源化利用技术创新[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 523–530.

HE Xuwen, WANG Shaozhou, ZHANG Xuwei. Coal mine drainage resources utilization technology innovation[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 523–530.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1641>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

矿井水水化学特征及资源化利用研究

Study on chemical characteristics and resource utilization of mine water: taking Zhangji Coal Mine as an example
煤炭科学技术. 2023, 51(4): 254–263 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0927>

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>

闭坑煤矿井下空间资源开发利用评价

Development and utilization evaluation of underground space resources in closed pit coal mine
煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/51259a33-4c01-47d3-9c75-ced68ba0825c>

新疆煤矿区瓦斯抽采利用技术现状及展望

Status and prospect of coal mine gas drainage and utilization technology in Xinjiang Coal Mining Area
煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/220becf1-8bab-44ec-8a76-de11b513eea4>

新疆煤基固体废弃物处置与资源化利用研究

Prospect of resource utilization and disposal of coal-based solid wastes in Xinjiang
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 319–330 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.030>

煤矸石资源化利用现状与进展

Current situation and progress of coal gangue resource utilization
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 380–390 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1917>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

何绪文,王绍州,张学伟,等. 煤矿矿井水资源化利用技术创新[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 523–530.

HE Xuwen, WANG Shaozhou, ZHANG Xuewei, *et al.* Coal mine drainage resources utilization technology innovation[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 523–530.

煤矿矿井水资源化利用技术创新

何绪文¹,王绍州¹,张学伟¹,李福勤²

(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:国家对煤矿矿井水资源化利用高度重视,排放标准的不断提高和智慧矿山概念的不断深化,给矿井水处理技术提出了新的挑战。通过对矿井水地面处理技术与井下多级过滤处理技术的分析和比较,在总结了现有技术存在问题的基础上,提出了聚瓷膜超滤高效处理矿井水新技术。新技术相比于传统处理技术的多流程而言,因处理过程无需加药,可省去整个加药系统,故处理过程仅包括高压预处理与常压过滤处理 2 个主要单元,解决了矿井水传统处理方法必须加混凝剂的难题,可真正做到矿井水处理全过程无人值守,符合智慧矿山的要求。新技术具有流程短、占地小、无需加药、出水水质稳定、可自动运行等特点,同时还可实现模块化、智能化,可适用于不同场景下含高悬浮物矿井水的直接过滤,或作为矿井水苦咸水的预处理单元,其中特别适合用于矿井水的井下处理就地复用。其核心组件聚瓷膜更是具有强度高、通量大、超亲水疏油、耐受悬浮物(SS)质量浓度可达 10 000 mg/L 等优势。通过实验室试验和矿井水地面处理改造工程案例可知,在进水 SS 质量浓度为 0~10 000 mg/L,聚瓷膜直滤后出水 SS 均能稳定达到 1 mg/L 以下,浊度稳定达到 1 NTU 以下,该技术在煤矿矿井水资源化利用方面有明显优势,可为将来的大规模工程化推广应用提供技术参考。

关键词: 矿井水; 悬浮物; 聚瓷膜; 资源化利用; 煤矿

中图分类号: X752

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0523-08

Coal mine drainage resources utilization technology innovation

HE Xuwen¹, WANG Shaozhou¹, ZHANG Xuewei¹, LI Fuqin²

(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: The resource utilization of coal mine drainage has been attracting growing attention. The increasingly stringent discharge standards and the deepening of the concept of intelligent mine have posed new challenges to mine water treatment technology. This paper discussed the traditional treatment processes and the multi-stage filtration underground treatment technology. In addition, a new high-efficiency technology-Polycera membrane ultrafiltration-was proposed to treat coal mine drainage on the basis of summarizing the existing technology problems. Compared with the multi-process of the traditional treatment technology, the new technology only includes two main units, high pressure pretreatment and atmospheric filtration treatment, because the treatment process does not need dosing and the whole dosing system can be omitted, which solves the problem that the traditional coal mine drainage treatment method must add coagulant, and can truly make the whole process of coal mine drainage treatment unattended and meet the requirements of the intelligent mine. The new technology offers the advantage of a shorter process flow and a smaller footprint and could ensure the stability of effluent water quality. Besides, the new technology could be operated automatically without chemical additions. At the same time, it can realize modularization and intellectualization, and can be applied to the direct filtration of coal mine drainage containing high suspended solids in different scenarios, or as the pretreatment unit of coal mine drainage brackish water, especially suitable for the in-situ reuse of coal mine drainage underground treatment. The core component of the new technology is the Polycera membrane with high strength and high-water flux. It is a super hydrophilic and oleophobic material that can withstand suspended solids (SS) of high concentrations up to 10 000 mg/L. By analyzing

收稿日期: 2022-10-08

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1641

基金项目: 河北省自然科学基金智慧矿山联合基金资助项目(E2021402015)

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

the laboratory-scale test results and the reconstruction engineering case of coal mine drainage treatment on the ground, it can be seen that in the range of inlet SS of 0-10 000 mg/L, the SS of the filtered effluent after direct filtration with Polycera membrane can be stably below 1 mg/L, and the turbidity can be stably below 1NTU, it is shown that the new technology presents apparent advantages in the resource utilization of coal mine drainage. This technology could provide a technical reference for large-scale engineering applications in the future.

Key words: coal mine drainage; suspended solids; Polycera membrane; resource utilization; coal mine

0 引 言

国家对煤矿矿井水资源化利用高度重视^[1-2], 2020 年 11 月生态环境部、国家发展和改革委员会、国家能源局联合发表的《关于进一步加强煤炭资源开发环境影响评价管理的通知》中指出, 矿井水应优先用于项目建设生产, 并鼓励多途径利用多余矿井水。根据煤炭工业“十四五”高质量发展指导意见, 到 2025 年我国煤矿矿井水利用与达标排放率需达到 100%。可以说这些政策的提出均对矿井水的处理提出了更高的要求。此外, 智慧矿山的提出也使得煤矿智能化成为了煤炭工业发展的重点, 其中要求矿井水处理做到“有人巡检, 无人值守”^[3]。

由于我国水资源分布现状与煤炭资源分布现状截然相反呈逆向分布^[1], 东、南部地区水资源充沛而煤炭资源分布较少, 西、北部水资源匮乏而煤炭资源分布较多, 储量丰富。而煤炭资源的开采又需要一定量水资源作为支撑^[2], 因此西北地区缺水这一现状严重影响该地区煤炭事业的发展^[4]。随着小矿井的关停和煤矿开集中向西北偏移, 吨煤产水量将略有下降但依旧稳定, 我国吨煤产矿井水量约为 1.5 m³, 2020 年产煤量约为 40 亿 t, 将产生 60 亿 m³ 矿井水, 是一种长期稳定的非常规水资源^[5]。煤炭开采过程中产生的大量矿井水一定程度上均已被污染无法直接排放或利用, 若不妥善处理会对环境造成极大的危害。如矿井水直接排至地面, 一方面会破坏地下水资源自然系统格局, 并造成地表水体、浅层土壤、

地下潜水受到二次污染; 另一方面外排矿井水经岩层缝隙渗透进地下水, 改变地下水中矿物质平衡, 加快地下岩层的侵蚀, 增加地下水中有毒成分。因此必须处理达标后才能排放, 若能做到“煤水共采”即在煤矿开采过程中, 不仅要保护矿井水不被破坏浪费, 更要充分利用矿井水, 会对我国煤炭行业的环境保护起到极大的推动作用。

通过对矿井水地面处理技术与井下多级过滤处理技术比较, 提出了聚瓷膜超滤高效处理矿井水新技术。该技术由高压条件下预处理单元和低压条件下过滤单元组成, 具有占地少、成本低、无需加药、出水水质水量稳定、可自动运行等优点。通过实验室试验和矿井水地面处理改造工程案例, 表明该技术在煤矿矿井水资源化利用方面有明显优势, 可为将来的大规模工程化推广应用提供技术参考。

1 煤矿矿井水处理方法

1.1 混凝—沉淀—过滤工艺

针对高悬浮物矿井水最传统的工艺流程为: 混凝—沉淀—过滤工艺, 该工艺可有效去除矿井水中的悬浮物和胶体物质^[6]。工艺流程如图 1 所示, 该工艺虽简单, 但设备占地面积大、基建投资高、水力停留时间长、处理效率低。另外, 随着机械化采煤程度的不断提高, 使矿井水中的煤粉和岩粉的比例大幅增加, SS 也相应提高。处理过程中由于煤粉易沉降、岩粉不易沉降, 只有在二次加药(预沉池一次加药混凝和反应池二次加药混凝)改造后才能处理达标^[7]。

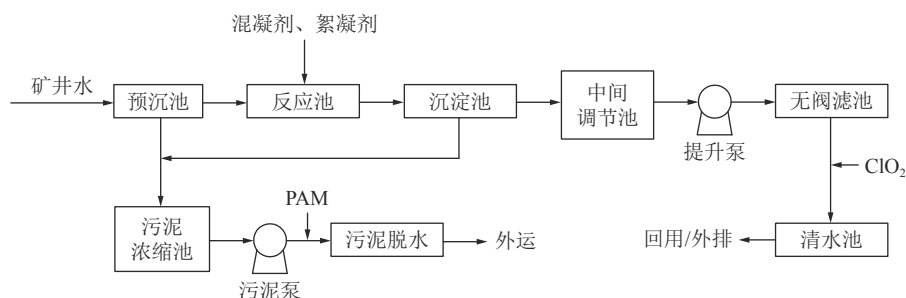


图 1 混凝-沉淀-过滤典型工艺流程

Fig.1 Typical process flow of coagulation-precipitation-filtration

此外, 该工艺在后续深度处理过程中会面临因加药造成的膜污染问题, 这是因为在混凝-沉淀过程

中混凝、絮凝剂(PAC+PAM)往往需过量投加, 未反应的药剂就会附在超滤膜表面污染超滤膜, 使超滤膜

通量急剧下降,增加反洗频率,影响膜寿命,有时甚至还会出现脱壳现象,影响出水水质^[8]。或者未聚合的PAM单体会透过超滤膜,成为微生物食料促进微生物在反渗透膜表面生长繁殖,对反渗透膜表面造成严重污染,影响膜通量^[9]。

1.2 加重介质混凝改进工艺

1.2.1 瓷砂混凝

在传统混凝-沉淀工艺基础上引入重介质瓷砂再结合高效旋流器,组合成了现有的瓷砂混凝工艺。其核心技术为重介质瓷砂加速絮体形成和沉降,高效旋流器回收再利用瓷砂^[10],其工艺流程如图2所示。该方法引入高效旋流器改进了矿井水处理工艺,具有投资低、运行成本低、占地面积小、自动化程度高等优点。最大的问题是旋流出水效果不稳定,导致沉淀池跑黑水,故一般只能作为预处理。

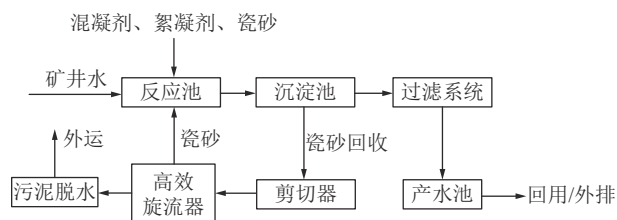


图2 瓷砂混凝典型工艺流程

Fig.2 Typical process flow of porcelain sand coagulation

1.2.2 磁混凝

磁混凝原理为通过投加混、絮凝剂和重介质磁种使水中的胶体、悬浮物等进行反应,其中磁种作为凝核加速絮体形成和沉降,然后通过磁鼓回收再利用磁种^[11],工艺流程如图3所示。该工艺由于 Fe_3O_4 密度大,具有净化速度快、耐冲击负荷能力强、吨水成本低、加药量少等优点。但由于加药系统复杂、需不定期补充磁种等问题,如果在井下处理不能做到无人值守。

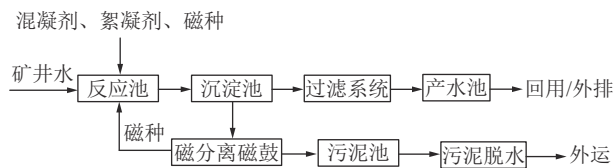


图3 磁混凝典型工艺流程

Fig.3 Typical process flow of magnetic coagulation

1.2.3 超磁分离技术

超磁分离技术与磁混凝原理相似,只是分离过程利用高强度磁场干预,在强磁场力的作用下对絮团进行快速捕获去除,图4为超磁分离工艺流程。该工艺最大特点是省去了斜板(管)沉淀池,缩短了工艺流程,但出水水质不稳定^[12]。

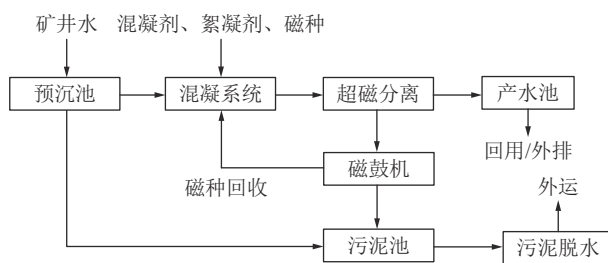


图4 超磁分离典型工艺流程

Fig.4 Typical process flow of super-magnetic separation

1.3 常规处理技术对比分析

对1.1节和1.2节所述常规处理工艺,从加药量、占地面积和吨水处理费用等方面进行对比分析^[10-12],结果见表1(水量处理规模按 $10\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 计算)。

由表1可知,无论是常规混凝-沉淀-过滤处理方法还是改进后的重介质混凝处理方法和超磁分离技术,都存在需要投加混、絮凝剂的问题。另外,处理流程较长、占地大、处理效率相对较低,可基本满足含悬浮物矿井水地面处理目标^[13],但不能满足矿井水井下处理无人值守的智慧矿山要求。

表1 常规矿井水处理技术对比

Table 1 Comparison of conventional coal mine drainage treatment technology

项目	混凝-沉淀-过滤工艺	瓷砂混凝	磁混凝	超磁分离技术
加药量/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	PAC: 60~80 PAM: 约5	PAC: ≤ 40 PAM: ≤ 2	PAC: ≤ 40 PAM: ≤ 2	PAC: ≤ 40 PAM: ≤ 2
水力停留时间/min	反应: 15~30 沉淀: 90~120	反应: 4~6 沉淀: 6~10	反应: 4~6 沉淀: 6~10	反应: 4~6 沉淀: 4~6
占地面积/ m^2	约250	约170	约120	约40
自动化程度	低	较高	较高	较高
SS去除率	97%以上	90%以上	95%以上	90%以上
耐冲击负荷能力	较强	较强	较强	一般
处理流程	长	较长	较长	短
吨水处理费用/元	0.5~0.8	约0.8	≤ 0.5	约0.3
日常维护	复杂	复杂	简单	简单

2 煤矿矿井水井下处理方法

2.1 井下采空区处理技术

传统的混凝-沉淀-过滤、重介质混凝、超磁分离等工艺在满足防爆、防潮、防静电等井下安全要求且井下空间允许的情况下均可应用到井下。但在处理矿井水的过程中都必须投加混、助凝剂,使整个处理流程变长,需要专门硐室,加大了基建费用,日常维护复杂,需专人操作做不到无人值守。

采空区处理矿井水技术是有一些利用煤矿采空区预沉间或以地下水库等形式先预沉矿井水,然后通过矸石等填充物进行过滤或者采用多级过滤形式对矿井水进行过滤^[14],笔者多年前在国家能源集团某煤矿利用该方法首次实现矿井水无药剂投加多级过滤规模化井下处理就地复用且连续稳定运行^[15],但该方法受水文地质条件、巷道空间、硐室与占地等诸多条件限制,不具有普适性,十多年来推广应用受到限制,受该技术的成功示范,利用井下空间多级沉淀,将悬浮物等沉淀至 300~50 mg/L 甚至以下,再采用有机或无机膜不加药直滤工艺普遍增多,为矿井水井下处理就地利用提供了新的技术选择。

2.2 井下柔性陶瓷膜处理技术

柔性陶瓷膜为聚氯乙烯 (Polyvinyl chloride, PVC)、聚四氟乙烯 (Poly tetra fluoroethylene, PTFE) 材质的丝状纤维有机膜,具有亲水性好、通量高、耐有机溶剂等优点,且已被用于井下来处理矿井水,典型的工艺流程如图 5 所示。虽然柔性陶瓷膜处理技术在一定程度上简化了过滤系统,使得出水水质水量更加优质稳定,但该技术需要多级沉淀系统,进水 SS 甚至需要达到 50 mg/L 以下,而且还有断丝脱壳风险,进而影响出水水质。此外,遇油易污堵,通量难恢复且操作过程繁琐,很难达到设计规模。

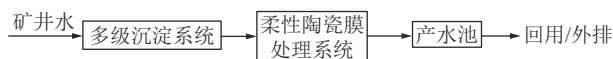


图 5 柔性陶瓷膜井下处理典型工艺流程

Fig.5 Typical process flow for underground treatment of flexible ceramic membrane

2.3 井下无机陶瓷膜处理技术

无机陶瓷膜是由 Al_2O_3 、 Zr_2O_3 、 SiC 等材质烧制而成的无机膜,具有化学稳定性好、机械强度高、耐高温、耐油、可反向冲洗等优点,可用于井下处理矿井水,典型的工艺流程如图 6 所示。该工艺需要离线强酸 (一般用硝酸) 清洗,清洗时间长至少 24 h 以

上,有时需要强酸浸泡达 10 d 才能恢复膜通量,清洗费用高,不能连续产水,甚至使整个系统崩溃。

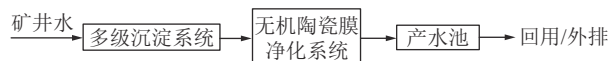


图 6 无机陶瓷膜井下处理典型工艺流程

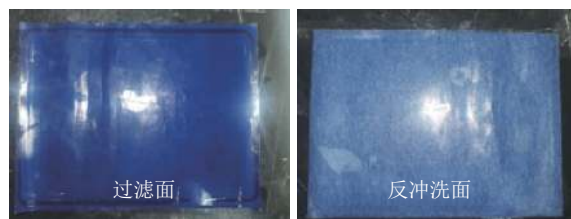
Fig.6 Typical process flow of inorganic ceramic membrane downhole treatment

柔性陶瓷膜和无机陶瓷膜由于受进水 SS 限制,在井下运行时均需进行井下多级过滤后才能进入超滤膜,一般要求进水 SS 质量浓度小于 300 mg/L。井下多级过滤的过程一般需要经过大、中、小三级格栅和四级水仓自然沉淀,才可满足超滤膜进水 SS 要求。此外,运行过程中膜通量的下降幅度也较快,如通量为 $100 \text{ L}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 的超滤膜,运行不到 1 a,通量甚至会降到 $50 \text{ L}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 以下,远无法达到设计要求。

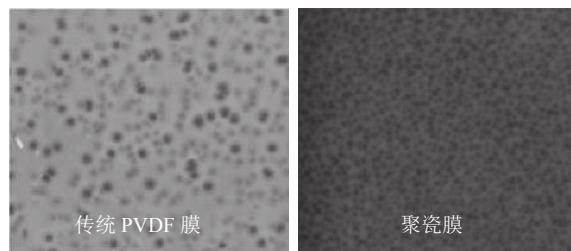
3 煤矿矿井水处理新技术工艺

3.1 聚瓷膜理化性能

聚瓷膜是一种基于 2000 年诺贝尔化学奖的有机金属材料制成的,相比于传统的中空纤维膜和无机陶瓷膜具有明显优势。聚瓷膜是一种既有无机膜强度、又有有机膜通量的有机金属膜,膜表面形貌如图 7a 所示。聚瓷膜具有高通量的特点,膜孔径分布均匀,平均孔径 $0.02 \mu\text{m}$,膜 (100 kDa) 表面扫描电子显微镜如图 7b 所示,可以看出该膜相比于传统的聚偏氟乙烯膜 (PVDF),膜孔径分布更加均匀,密度也更高,经测定相同孔径膜产水通量比传统高分子膜高 2~3 倍,且过滤过程属表层过滤,膜污染为表面污染,非深层污染,因此污堵小,通量易于快速恢复。



(a) 膜过滤面和反冲洗面表面形貌



(b) 膜表面 SEM 对比

图 7 膜表面形貌

Fig.7 Surface topography of membrane

聚瓷膜可耐受达 10 000 mg/L 的矿井水,除了其特殊的膜材料外,该膜特殊的直流通道设计也起着关键作用,如图 8 所示,相比于传统的网格通道,其进水通道为“波纹”状,无死角,更易清洗,在不加药条件下即可满足矿井中各种工况矿井水直接过滤需求。聚瓷膜具有亲水疏油的特性,当膜表面被污染时可直接用清水或配加一定的清洗剂反洗清洗即可恢复膜通量^[16]。此外,聚瓷膜还具有耐高温、耐 pH 的特性,耐温可达 90 ℃,耐 pH 为 1.0~13.5^[17-18],均超过大部分有机膜。

3.2 聚瓷膜超滤高效处理工艺

传统的处理技术虽然取得了一些进展,但或多或少存在占地面积大、处理流程长、处理效果不稳定等问题。因此笔者提出了一种以聚瓷膜为核心

的煤矿矿井水短流程高效快速处理技术^[19-20]。如图 9 所示,该处理系统相比于传统处理过程的多流程而言,因处理过程无需加药,因此可省去整个加药系统,处理过程仅包括高压预处理与常压过滤处理 2 个主要单元。其中高压预处理单元可由 1 个或多个串联但过滤网格尺寸大小不同的过滤器组成,常压过滤单元由一组或多组聚瓷膜组件组成。处理水量可根据处理矿井水规模配置聚瓷膜处理数量及单元。



图 8 膜通道示意

Fig.8 Membrane channel diagram

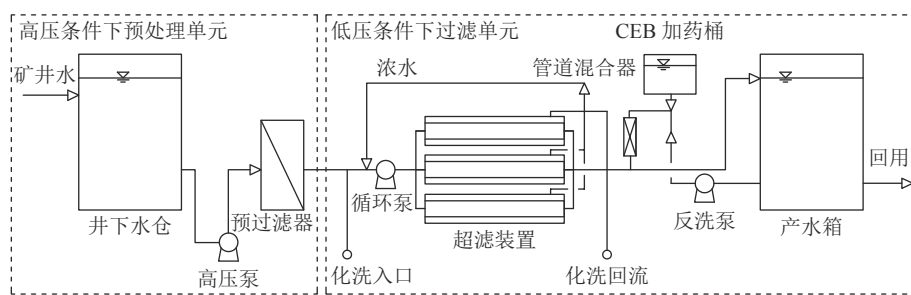


图 9 聚瓷膜井下短程高效处理流程

Fig.9 Short-range and efficient downhole treatment of Polycera membrane

经测试该系统在不加药剂的条件下可处理进水 SS 的质量浓度为 0~10 000 mg/L,出水 SS 一般小于 1 mg/L,出水悬浮物颗粒粒径小于 0.1 μm。为了满足煤矿井下供排水压力,本系统中的高压预处理过滤单元最大压力设为 6.4 MPa,必要时可省去井下水仓和高压泵环节,直接将整个处理系统安装到井下与井下供排水系统快速联接,不仅进一步减少了能耗而且还可随开采面快速移动。如果井下条件适宜,矿井水在井下经过采空区预沉间预沉、地下水库预沉、混凝处理等单元处理,就可省去高压条件下预处理过滤单元,直接向聚瓷膜单元供水。该系统可满足井下防爆要求且占地面积小、结构紧凑亦可满足井下安装要求。

3.3 膜处理矿井水技术对比分析

通过对上述柔性陶瓷膜、无机陶瓷膜和聚瓷膜工艺进行对比分析,结果见表 2。

3.4 聚瓷膜处理矿井水试验效果

用聚瓷膜分别处理高悬浮物和高氟矿井水,悬浮物取自某矿矿井原水泥浆, F⁻来自氟化钠,均烘干后称重再溶解,模拟实际矿井水配制 SS 质量浓度

分别为 1 000、1 500、2 000、5 000、7 500、10 000 mg/L,在压力 0.2 MPa 条件下错流过滤,运行时间和膜通量的关系如图 10 所示。高悬浮物矿井水经聚瓷膜直接过滤后,出水 SS 稳定达到 1 mg/L 以下,同时出水浊度稳定达到 1 NTU 以下;高悬浮物高氟矿井水通过加入本课题组发明的新除氟剂(质量浓度为 3 mg/L)后直接过滤,可将 SS、F⁻(质量浓度为 10 mg/L 以下)一步法同时去除,出水 SS 和 F⁻均稳定达到 1 mg/L 以下,与传统的混凝沉淀去悬浮物再混凝过滤羟基磷灰石吸附除氟工艺比较,大大缩短了工艺流程。试验结束后将膜进行化学清洗,通量均可恢复到初始水平。

3.5 内蒙古某典型煤矿工程示范

煤矿矿井水处理量原设计 400 m³/h,现新建至 600 m³/h,净增加 200 m³/h,矿井水中悬浮物高、TDS 高,且无用地扩大规模,只有在原系统进行改造,在利旧的基础上,新增了 2 套聚瓷膜超滤装置(型号为 Hydro-100-40-8040)和 2 套反渗透装置,改造后工艺流程如图 11 所示。

表 2 膜处理技术对比分析
Table 2 Comparative analysis of membrane treatment technology

膜类型	柔性陶瓷膜	无机陶瓷膜	聚瓷膜
结构	中空纤维结构	盘片/管式结构	卷式结构
强度	有断丝风险	强度高、无断丝风险	强度高、无断丝风险
过滤精度/ μm	0.1	0.8	0.02
安装方式	只能竖装	横放或竖放均可	横放或竖放均可
空间及占地	高度一般不能低于 2 m	对高度有一定要求	对高度没有严格要求、占地小
运行模式	中空纤维结构，外压过滤，不允许大错流且错流速度无法控制，容易挂泥	易堵、结垢、清洗复杂、膜通量下降快	直流大孔通道，允许大错流，没有污泥堵塞通道的风险
预处理要求	加药混凝预处理	加药混凝预处理	自清洗过滤器，去除机械杂质
产品水质	产水浊度高	产水浊度一般	产水浊度低
耐受悬浮物浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	100	1 000	10 000
抗有机污染能力	材料经改性亲水，抗有机污堵能力差	抗有机污堵能力一般	超亲水材料，抗有机污堵能力强
耐油性	耐油性能差，遇油易污堵，难恢复	易污堵难恢复	亲水疏油
工艺特点	需要加药混凝预处理，流程长、环节多，用药量大，产生污泥多，操作繁琐，不易实现无人值守	耐油性差易污堵、易结垢、清洗频繁、清洗时间长，需要离线清洗，难达到设计要求	直接过滤矿井水，无需加药混凝预处理，流程短、操作简单，容易实现无人值守及远传操作
维护量	操作相对复杂，维护量大	操作复杂，维护量大	运行稳定，远程控制，维护量小
运行成本	高	较高	低

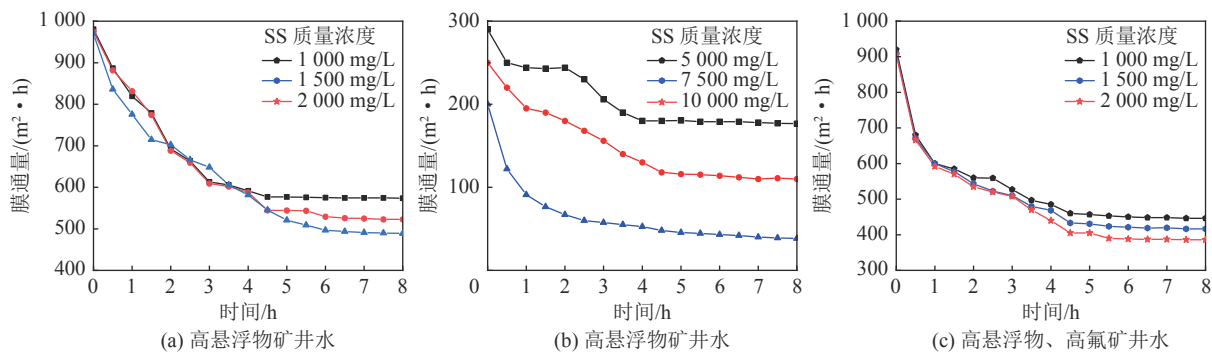


图 10 聚瓷膜处理模拟矿井水
Fig.10 Treatment of simulated coal mine drainage with Polycera membrane

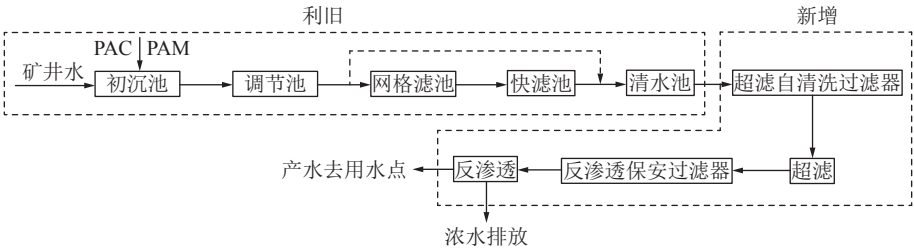


图 11 内蒙某典型煤矿矿井水处理工艺流程
Fig.11 Coal mine drainage treatment process of a typical coal mine in Inner Mongolia

由于只是改造工程,为减少实际运行中的膜反洗次数,将初沉池的加药量减少,使之形成微絮凝来减缓过滤过程中的膜污染,实际运行过程中也可微絮凝后直接接聚瓷膜超滤单元进行过滤。据统计,改进后新工艺与原工艺相比可节省占地面积 50%,土建投资费用减半,运行过程吨水还可节省药剂费

用 0.2~0.3 元。改进后新工艺具有运行操作灵活,抗冲击负荷能力强,系统回收率高,污泥产量少和外排废水少等特点,同时自动化控制和手动操作相结合,易于日常运行管理,便于检修维护。处理前后水质见表 3,处理后的矿井水可达到 GB3838—2002 地表水环境质量 III 类 24 种标准限值要求。

表 3 处理前后水质对比

Table 3 Comparison of water quality before and after treatment

项目	处理前	处理后	项目	处理前	处理后
SS	85~1 380	<1	锌	0.023~0.582	≤0.6
pH	7.7~8.4	6~9	镉	0.005~0.024	≤0.005
COD	16~38	≤20	高锰酸盐指数	3.5~9.2	≤6
BOD ₅	3.0~9.3	≤4	铬(六价)	<0.004	≤0.05
氨氮	0.475~1.2	≤1.0	铅	0.007~0.11	≤0.05
总磷	0.06~0.16	≤0.16	氰化物	<0.004	≤0.004
总氮	1.4~2.19	≤1.0	挥发酚	<0.003	≤0.003
氟化物	0.96~2.83	≤1.0	硫化物	<0.005	≤0.005
石油类	0.37~1.07	≤0.05	阴离子表面活性剂	<0.05	≤0.05
粪大肠菌群	80~490	≤490个/L	硒	0.004~0.001 5	≤0.01
溶解氧	5.4~10.2	≥5	砷	0.000 91~0.093	≤0.05
铜	0.04~0.095	≤0.1	汞	0.000 37~0.000 69	≤0.000 1

注：项目中除pH外，其余单位均为mg/L。

4 结论与建议

1)实验室研究中,采用聚瓷膜直接过滤处理工艺处理 SS 为 0~10 000 mg/L 模拟矿井水以及在示范工程案例中,采用聚瓷膜过滤处理工艺处理 SS 质量浓度为 85~1 380 mg/L 实际矿井水,出水 SS 质量浓度均能稳定达到 1 mg/L 以下,浊度稳定达到 1 NTU 以下,该工艺在含高悬浮物矿井水资源化方面具有普适性。

2)聚瓷膜直接过滤处理工艺无论是应用于悬浮物矿井水的直接过滤,还是应用于矿井水苦咸水的预处理,都解决了矿井水传统方法必须加混凝剂的难题,可真正做到矿井水处理全过程无人值守,同时该工艺还可模块化、智能化,特别适合矿井水的井下处理就地复用,是智慧矿山建设的一种矿井水资源化新技术工艺。

3)建议加快产学研用合作,在不同水质、不同水文地质条件及不同开采条件下示范与推广应用,以期为煤矿矿井水资源化利用发挥出应有的作用。

参考文献(References):

[1] 高 亮. 我国煤矿矿井水处理技术现状及其发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2007(9): 1-5.

GAO Liang. Status of technology for processing mine water and its trend in China[J]. Coal Science and Technology, 2007(9): 1-5.

[2] 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 re-

sources[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(9): 4-11.

[3] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.

WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(1): 1-27.

[4] ZHANG Siyu, WANG Hao, HE Xuwen, et al. Research progress, problems and prospects of mine water treatment technology and resource utilization in China[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2020, 50(4): 331-383.

[5] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079-3089.

GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3079-3089.

[6] 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.

[7] 李福勤, 朱云浩, 焦亚楠. 二次混凝-沉淀工艺处理高岩粉矿井水试验研究[J]. 能源环境保护, 2019, 33(6): 6-8, 46.

LI Fuqin, ZHU Yunhao, JIAO Yanan. Experimental study on treatment of high rock powder mine water by secondary coagulation and precipitation process[J]. Energy Environmental Protection, 2019, 33(6): 6-8, 46.

[8] 郑利祥, 郭中权, 毛维东. 矿井水处理聚合氯化铝残留物对超滤膜污染的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 51-56, 63.

ZHENG Lixiang, GUO Zhongquan, MAO Weidong. Influence of polyaluminium chloride residue on ultrafiltration membrane fouling in mine water treatment[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 51-56, 63.

- [9] 郭中权,毛维东,肖 艳,等. 矿井水处理中聚丙烯酰胺残留物对反渗透膜污染的贡献[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S2): 986–992.
GUO Zhongquan, MAO Weidong, XIAO Yan, *et al.* Impact of polyacrylamide residue on reverse osmosis membrane fouling in mine water treatment[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S2): 986–992.
- [10] 张 超,王宏义,李红伟,等. 含悬浮物矿井水处理技术现状及发展趋势[J]. *煤炭加工与综合利用*, 2019(12): 72–75.
ZHANG Chao, WANG Hongyi, LI Hongwei, *et al.* Present situation and development trend of mine water treatment technology containing suspended solids[J]. *Coal Processing & Comprehensive Utilization*, 2019(12): 72–75.
- [11] 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): 122–125,132.
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): 122–125,132.
- [12] 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, LU Xiaolong, *et al.* Engineering application and new technology of underground mine water treatment[J]. *Coal Science and Technology*, 2014, 42(1): 117–120.
- [13] 郭中权,何绪文,毛维东,等. 矿井水资源化利用和零排放处理技术与工程案例[M]. 北京: 中国石化出版社, 2022: 100–106.
- [14] 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): 71–74,79.
ZHOU Rulu, GAO Liang, GUO Zhongquan, *et al.* Underground direct treatment and recycle of coal mine water[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4): 71–74,79.
- [15] ZHANG Liping, CHEN Aolei, QU Hongbin, *et al.* Fe and Mn removal from mining drainage using goaf filling materials obtained from coal mining process[J]. *Water Science and Technology*, 2015, 72(11): 1940–1947.
- [16] LIM Ying Pei, JASIMIN Afifah, NG Law Yong, *et al.* Performance evaluation on ultrafiltration as tertiary treatment for rubber glove wastewater[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 63(S1): 267–272.
- [17] TEOW Yeit Haan, LOH Wei Chean, ABDUL Wahab Mohammad. Thermo-responsive antifouling study of commercial PolyCera® membranes for POME treatment[J]. *Membrane Water Treatment*, 2020, 11(2): 97–109.
- [18] HURWITZ G, BHATTACHARJEE S, SEO E, *et al.* Field testing of PolyCera®, PES, and PVDF ultrafiltration membranes in municipal tertiary filtration: Impacts of membrane polymer chemistry on fouling, cleaning, energy, and cost[J]. *Desalination and water treatment*, 2018, 111: 39–47.
- [19] 何绪文. 一种煤矿矿井水处理系统[P]. 中国专利: 202211169558.3, 2022-09-23.
- [20] 何绪文,夏 瑜,张春晖. 一种高悬浮物矿井水井下短流程直滤处理装置与方法[P]. 中国专利: CN114506934A, 2022-05-17.