

井下煤矿采出水回用陶瓷膜集成工艺研究

童裕佳^{1,2}, 刘桂娟¹, 李佳尧², 季红军², 呼志平³,
白利军³, 麻瑞军³, 李卫星^{1*}

(1. 南京工业大学 化工学院, 南京 211816; 2. 南京工大膜应用技术研究所有限公司, 南京 211800;
3. 陕西煤业化工集团孙家岔龙华矿业有限公司, 榆林 719314)

摘要: 水资源是矿区经营发展不可或缺的重要组成部分, 高效处理矿井水可以在一定程度上缓解矿区缺水等问题。本项目首次提出了井下百米陶瓷膜处理煤矿矿井水工艺, 其装置设计结构紧凑, 占地面积为传统工艺的 1/10。对比了“混凝沉淀+砂滤+有机超滤+反渗透”工艺及“陶瓷膜+反渗透”工艺。结果显示: “陶瓷膜+反渗透”集成工艺处理矿井水的出水化学需氧量(COD_{Cr})质量浓度为 7.2 mg/L, NH₃-N 质量浓度为 0.12 mg/L, 对固体悬浮物(SS)和浊度具有 100% 的去除效果, 陶瓷膜集成工艺在矿井水处理领域展现出了广阔的应用前景。

关键词: 矿井水; 水处理; 中水回用

中图分类号: TQ028; X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2024)04-0096-09

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2024.04.011

我国矿井水文地质条件复杂, 矿井水害严重^[1]。矿井水是矿区在井下开采煤炭作业时, 周边的地下水涌入开采煤层, 有时会掺入部分地表水所形成的一种特殊水质^[2]。由于受到各种水文地质条件、矿床地质构造、开采方法及人类活动等因素的综合影响, 大量轻质的煤粉、岩粉等细小颗粒污染物伴随着煤炭资源的开采会混入水中, 使矿井水水质具有显著的煤炭行业特征^[3], 其含有较高的化学元素(如重金属)和悬浮固体(Suspended Solid, SS)^[4-6]。矿井水经处理后, 可作为煤矿工业、煤化工、煤-电联合等产业回用水。加强对矿井水的处理利用, 不仅可以大幅提高矿区运营效率、减少污染物排放、实现水循环利用, 而且取得了良好的经济效益和社会效益, 同时也响应了国家“节能减排”的政策^[7]。

矿井水污水处理可以选择的方式有很多, 在国

内外均有工程案例, 山西榆林某矿井水原水水质恶劣, 静置一周仍不能沉降, 属于难沉降的泥化废水, 其悬浮物质量浓度可达 2 000~4 000 mg/L, 高岭土质量浓度为 150 mg/L。魏姗姗等^[8]对矿井水采用井下提升水→平流沉淀池→水力旋流澄清池→过滤处理工艺后, 悬浮物去除效率大于 99%。混凝工艺适用范围广泛, 在煤矿矿井水处理中应用成熟。多位学者通过研究煤种与开采的矿井水水质特性的关系, 分析混凝剂对矿井水的作用机制, 优化混凝剂种类及水力条件, 取得了良好的矿井水悬浮物去除效果^[9]。但是, 一般矿井水含煤泥和颗粒物较多, 处理工艺采用平流沉淀池, 其负荷较低, 沉淀池后选择砂滤池作为后续处理, 占地面积大, 而井下空间狭小, 不利于井下污水的直接处理。

膜分离技术具有高效、节能、操作简单和占地面

收稿日期: 2024-01-19; 修改稿收到日期: 2024-04-11

第一作者简介: 童裕佳(1994-), 江苏苏州人, 博士研究生, 研究方向为水处理膜材料开发及工艺应用。* 通讯作者, E-mail: wxli@njtech.edu.cn

引用本文: 童裕佳, 刘桂娟, 李佳尧, 等. 井下煤矿采出水回用陶瓷膜集成工艺研究[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(4): 96-104.

Citation: Tong Y J, Liu G J, Li J Y, et al. Research on integrated ceramic membrane technology for recycling of mined water in underground coal mine[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2024, 44(4): 96-104.

积小等优点,被认为是处理煤矿矿井水的有效手段之一,已广泛应用于食品医药、工业水处理、电子化工等领域。陶瓷膜基于孔径筛分机制将悬浮液中的小分子物质透过,实现物质的纯化^[10]。相较于聚合物膜,陶瓷膜更有利于处理含有悬浮颗粒的料液,使用寿命更长。刘浩^[11]采用 37 通道孔径 800 nm 陶瓷膜对煤矿矿井水进行提标改造。目前过滤精度更高的陶瓷膜在矿井水应用鲜有报道。反渗透膜能够有效去除水中各种无机离子、胶体物质和大分子溶质,已广泛应用于海水淡化以及生物医药、食品化工等行业的分离纯化^[12]。朱泽民等^[13]将超滤-反渗透技术应用在矿井水处理中,实现了矿井分质供水和富余矿井水达标排放。膜集成工艺装备占地面积远小于平流沉淀池工艺,且处理后的废水中化学需氧量 (Chemical Oxygen Demand, COD_{Cr}) 显著降低,既能减轻环保压力,又能缩小占地面积,最大可能的减小了传统工艺中废水排放量大的缺点。

但是,目前报道的煤矿矿井水的膜法处理均采用泵将需要处理的矿井水从井下百米打到地面进行预处理后进入膜系统。泵将地下矿井水提升至地面,

此过程需要大量能耗。陕西龙华某矿井涌水量 200 m³/h,与井下生产用水水量相比,矿井涌水量较小,大部分时间仅能满足矿井井下生产用水,笔者采用某矿井水井下百米膜法处理以满足矿井井下生产用水的需要,经过系统分析膜过滤矿井水的效果,评估其技术可行性和优势,为陶瓷膜集成工艺井下百米处理矿井水的应用提供参考。

1 实验及工程应用

1.1 实验设备及材料

实验室用的矿井水均是陕西龙华某矿井中取水的样品,使用南京工业大学膜应用公司提供的定制设备进行膜元件性能测试,并设计 750 m³/h 的工程应用。陶瓷膜组件如图 1(a)所示,包含陶瓷膜膜元件,料液罐、管道、阀门、泵等部件。本项目使用的 19 通道陶瓷膜材质为氧化铝,孔径 50 nm,由南京工业大学提供。反渗透膜组件如图 1(b)所示,包含 4040 反渗透膜元件,料液罐、管道、阀门、泵等部件。反渗透膜采用沃顿科技股份有限公司的 FR 系列抗污染反渗透膜元件。



(a) 陶瓷膜膜组件设备图



(b) 反渗透膜膜组件图

图 1 膜组件设备图

Fig. 1 Membrane module equipment diagram

1.2 陕西某矿井水原水水质及设计出水水质

煤矿矿井水是主要源自采煤层及开拓巷道附近的地下水,同时伴随煤炭开采过程中产生的大量井下涌水^[14]。以陕西龙华某矿井水为例,进水水质呈灰黑色,存在粒径较小的煤粒、煤粉和岩粉等悬浮物。矿井水进水水质情况主要为悬浮物 (SS) 和化学需氧量 (COD_{Cr}) 等污染物。设计出水水质主要考虑矿井井下水等,因此设计出水水质主要以《煤矿井下消防、洒水设计规范》(GB50383—2016)、《城市污水再生利用工业用水水质》(GBT19923—2005) 为目标,进水和出水水质如表 1 所示。

设计出水对悬浮物的含量要求较高,出水 SS 质量浓度 < 1 mg/L,故需过滤处理以去除水中的悬浮物和胶态杂质。过滤的形式有很多种,针对本项目井下处理的特点,井下空间狭小,陶瓷膜具有占地面积小、处理效果好的优点,因此考察了传统的“混凝沉淀+砂滤+超滤+反渗透”工艺和“陶瓷膜+反渗透”工艺对比^[15]。

1.3 井下处理矿井水工艺对比

1.3.1 混凝沉淀+砂滤+超滤+反渗透工艺

对于矿井水中的悬浮物 (SS),常经过平流沉淀池后采用混凝沉淀、隔油或气浮、过滤、消毒等常规

处理工艺,这在国内广泛使用且技术成熟^[16]. 混凝过程是指在污水处理过程中通过投加药剂使得污水与药剂混合,进而水中的胶体物质产生凝聚或絮凝,如图 2 所示.

砂滤^[17]是以天然石英砂(通常还有锰砂和无烟煤)作为滤料的水过滤处理工艺过程,主要用于截留

水中的大分子固体颗粒和胶体,使水澄清. 所采用的石英砂粒径为 0.5~1.2 mm,不均匀系数为 2,滤层厚度和过滤速率由原水和出水水质而定. 砂滤可分为重力式和压力式 2 种,常用于经澄清处理后的污水处理、经二级处理后污水处理以及废水回用中的深度处理.

表 1 原水水质成分

Table 1 Water quality components of raw water

项目	pH 值	SS 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD_{Cr} 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	石油类质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	大肠杆菌/ ($\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$)
地表水Ⅲ类水质标准	6~9	—	≤ 20	≤ 0.05	$\leq 10\,000$
进水水质	7.4	600~3 000	564	0.05	88
设计出水水质	6~9	≤ 30	≤ 20	≤ 1	$\leq 2\,000$

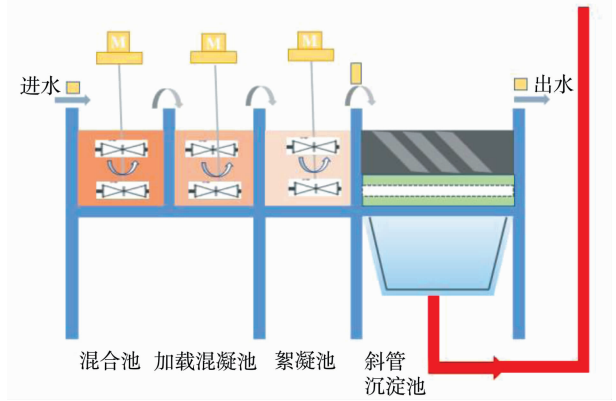


图 2 混凝沉淀示意图

Fig. 2 Schematic diagram of coagulation and precipitation

超滤的膜孔径范围在 0.02~0.10 μm ,常采用 PVDF 材质,运行压力通常为 0.02~0.30 MPa,截留分子量约为 1000~500 000 Da,是一种常用的膜分离技术^[18]. 以膜两侧的压力差为驱动力,以超滤膜为过滤介质. 超滤膜可有效去除水中细小的悬浮物、胶体微粒、细菌等. 超滤系统运行的自动化程度高,运行维护工作量小,设备集成化设置,占地面积小,出水浊度 $<0.2\text{NTU}$,淤泥密度指数(Silt

Density Index, SDI) <3 ,可以达到反渗透系统进水水质要求.

1.3.2 陶瓷膜+反渗透工艺

设计出水对悬浮物的含量要求较高,首次设计陶瓷膜地下处理工艺以满足井下处理矿井水的要求. 陶瓷膜是以 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 TiO_2 等材料制成的不对称分离膜. 在操作压差的作用下,料液在陶瓷膜管内错流流动. 基于孔径筛分机制,小于膜孔径的物质透过陶瓷膜膜孔进入渗透侧成为滤液,而大于孔径的物质则被截留而成为浓缩液,从而达到物料的分离、浓缩和提纯的目的^[19]. 陶瓷膜具有孔径分布窄、空隙率高、分离层薄、过滤阻力小、单位膜表面积处理量高、使用寿命长、配套装置少、操作运转简便等优点.

根据现状污水处理工艺、现状厂区占地情况及上述工艺分析^[20],提出 2 种能够实现设计标准的组合式处理工艺路线方案. 方案一:矿井水经平流沉淀池后进入混凝沉淀和砂滤^[21],而后进入超滤和反渗透系统进行回用(图 3). 方案二:矿井水经陶瓷膜处理后反渗透系统进行回用(图 4). 2 种方案对比的情况如表 2 所示.

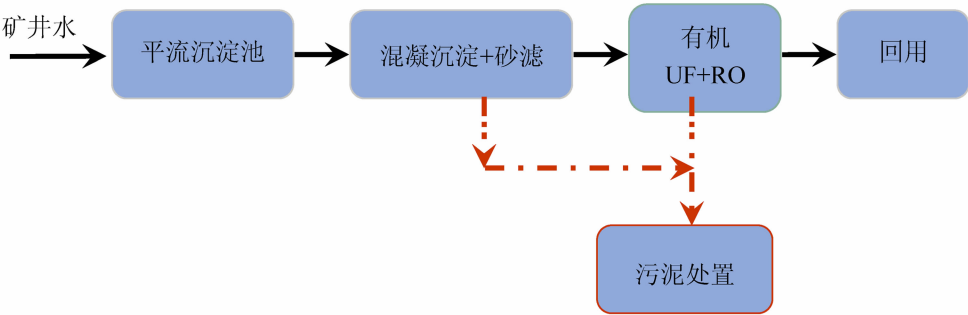


图 3 方案一“混凝沉淀+砂滤+超滤+反渗透”工艺流程

Fig. 3 Traditional processing process flow of Scheme 1

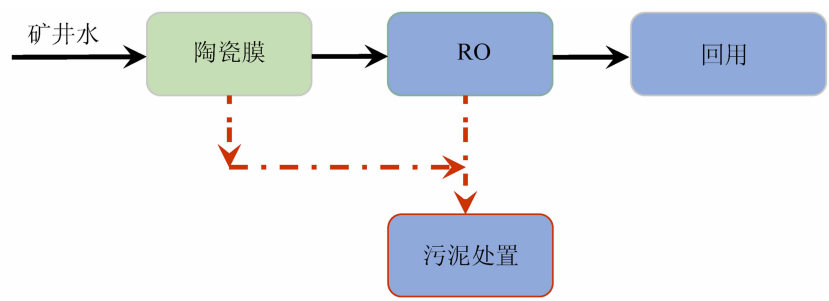


图 4 方案二“陶瓷膜+反渗透”工艺流程

Fig. 4 Process flow of integrated treatment of ceramic membrane in Scheme 2

表 2 工艺比选表

Table 2 Comparison table of process flow

项目	方案一	方案二
处理规模	大中规模	中小规模
出水 SS 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	<1.0	<0.5
出水浊度/NTU	<0.3	<0.1
产水率/%	<90	85~90
抗污染能力	较高	高
使用寿命/a	5~8	5~8
自动化程度	较低	高
抗高负荷能力	较低	较高
占地面积	较大	小
吨水投资	较高(大水量 优势明显)	较高(小水量 优势明显)
运行成本	较高	低

方案一的主要优点是出水水质稳定,缺点是工艺环节复杂,占地面积大,自动化程度低,砂滤滤料容易流失且需定时补充更换,膜反冲洗需要水量大、冲洗频繁,且超滤膜膜丝容易断裂,需经常检修,运行费用高,在井下不易实施^[22]。

方案二主要优点是陶瓷膜分离精度高,处理效果显著,整个系统抗水质、水量冲击负荷能力较强,系统集成度高,透过液澄清透明,出水水质稳定,工艺环节简单,占地面积小,选择陶瓷膜系统替代“混凝沉淀+砂滤+超滤”方案,占地面积为其工艺的 1/10。缺点是井下空间狭小,不易操作和维护^[23]。

过滤装置直接置于井下较地上处理效率高,空间紧凑。方案一占地大、使用寿命短;方案二整个系统抗污染、水量冲击负荷能力较强,系统集成度高,出水水质稳定,工艺环节简单,陶瓷膜过滤系统产生的污泥可经过污泥池浓缩后送入污泥脱水机,脱水后送出巷道,不造成其他污染。故方案二“陶瓷膜+反渗透”方案将是井下处理矿井水优选方案。

2 结果与讨论

2.1 陶瓷膜分离矿井水浓缩效果

对陶瓷膜过滤井下矿井水的工艺进行实验探究。考察了陶瓷膜浓缩矿井水情况下通量随时间的变化,如图 5 所示,加入原料液 2 000 L,实验结束后获得清液 1 960 L。实验压力控制在 0.25 MPa,实验温度 28 ℃。实验开始后通量逐渐升高至 290 L/(m²·h)平稳后,在产出 1 800 L 清液即料液浓缩 10 倍后通量开始下降,在产出 1 960 L 清液即料液浓缩 50 倍后通量下降至 116 L/(m²·h)。陶瓷膜的通量运行曲线表明,随着浓缩过程的进行,整个膜通量呈现一个先平稳运行后缓慢下降的过程,出现明显的拐点。这是由于随着浓缩过程的进行,被截留大分子物质在不断的累加导致泵作用于膜的压力效果越来越小,所以通量不断下降。基于孔径筛分的原理,陶瓷膜处理前后的效果图如图 6 所示。考察了“混凝沉淀+砂滤+超滤”工艺及“陶瓷膜”工艺处理矿井水的水质结果,2 种工艺的出水水质如表 3 所示,陶瓷膜处理后对 COD_{Cr}、SS、浊度的去除率分别为 50%、99%、99%,陶

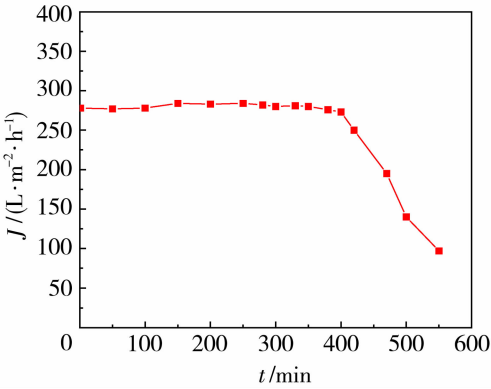


图 5 陶瓷膜浓缩矿井水通量随时间的变化

Fig. 5 Variation of the flux of ceramic membrane for concentrating minel water with time

瓷膜处理结果均优于混凝沉淀+砂滤工艺.

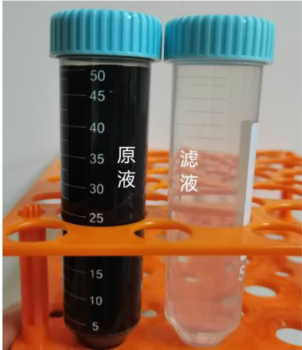


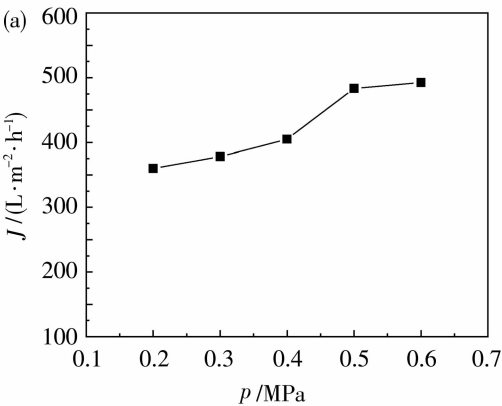
图 6 煤矿井水陶瓷膜分离前后对比

Fig. 6 Comparison of coal mine water quality before and after ceramic membrane separation

表 3 “混凝沉淀+砂滤+超滤”工艺及“陶瓷膜”工艺实验对比结果

Table 3 Experimental comparison results of “coagulation sedimentation + sand filtration + ultrafiltration + reverse osmosis” process and “ceramic membrane direct filtration + reverse osmosis” process

项目名称	进水	混凝沉淀+砂滤出水	陶瓷膜出水
COD _{Cr} 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	564	425	288
NH ₃ -N 质量浓度/ (mg · L ⁻¹)	27	0.31	0.24
SS 质量浓度/(mg · L ⁻¹)	31	18	0.1
pH 值	7.4	7.1	6.9
浊度/NTU	790	33	1.3
电导率	1 618	1 609	1 612
总硬度/(mg · L ⁻¹)	240	240	240
大肠杆菌/(个 · L ⁻¹)	88	20	4
石油类质量浓度/(mg · L ⁻¹)	0.05	0.05	0.01



2.2 陶瓷膜分离矿井水反冲条件考察

高压瞬时反冲可以延迟膜的污染,提高膜的运行周期. 实验考察了反冲条件对反冲效果的影响. 操作压力 0.5 MPa,温度 28 ℃. 图 7 显示了不同反冲时间下膜渗透通量随时间的变化. 可以看出,反冲时间对陶瓷膜通量恢复率及其随时间的通量衰减影响比较接近,因此反冲 1 s 较为合适.

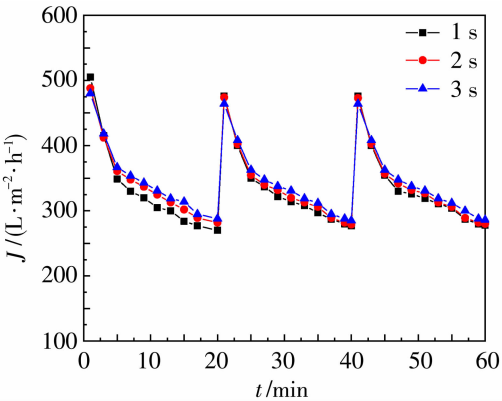


图 7 不同反冲时间下渗透通量随时间的变化
Fig. 7 Changes of osmotic flux with time under different recoil time

考察了反冲压力对陶瓷膜渗透通量恢复的影响,结果如图 8 所示. 当反冲压力从 0.2 MPa 升高至 0.6 MPa 时,陶瓷膜通量恢复率也逐渐增大[图 8 (a)]. 当反冲压力达到 0.5 MPa 后,陶瓷膜渗透通量不再增大. 过分增高反冲压力不仅对陶瓷膜最高恢复通量的增高不显著,而且对设备的耐压要求也增高,进而导致投资增加. 另外从图 8(b)可见,不同反冲压力下的通量衰减情况不同,特别是在小于 0.4 MPa 的反冲压力下,每个循环的最高通量衰减很明显. 在 0.5 MPa 下,最高恢复通量基本没有变

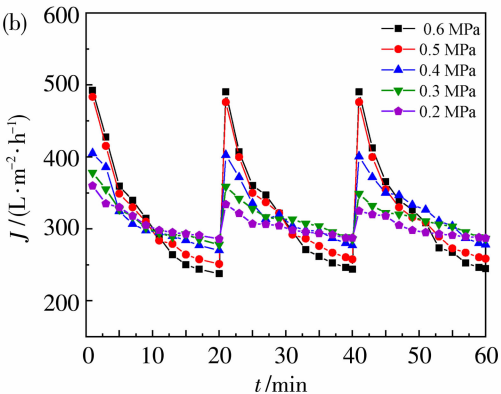


图 8 (a)反冲压力对最高恢复通量的影响和(b)不同反冲压力下渗透通量随时间的变化

Fig. 8 (a) Influence of recoil pressure on maximum recovery flux, (b) Changes of osmotic flux with time under different recoil pressures

化. 因此,对于矿井水体系,反冲压力在 0.5 MPa 为宜.

图 9 显示了反冲周期对陶瓷膜渗透通量恢复的影响. 随着反冲周期从 5 min 延长至 70 min,反冲后最高恢复通量从 690 L/(m² · h)逐步下降至 426 L/(m² · h). 反冲周期越长,每个周期内膜污染逐渐严重. 当采用相同的反冲压力进行反冲时,反冲周期长的反冲效果会变差,最高恢复通量下降. 在实际生产过程中,过于频繁的反冲对反冲装置的要求增大,运行费用增加,因此反冲周期设定 1 h. 进行了反冲连续实验来考察反冲效果的重复性,结果见图 10. 采用反冲可以显著提高通量,而且在较长的时间内能保持稳定的反冲效果. 反冲压力 0.5 MPa 反冲周期 60 min,反冲时间 1 s.

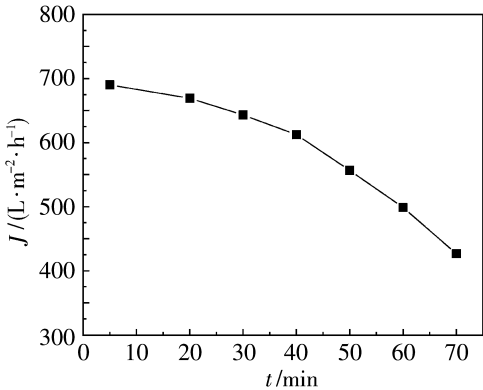


图 9 反冲周期对最高恢复通量的影响
Fig. 9 Effect of recoil period on maximum recovery flux

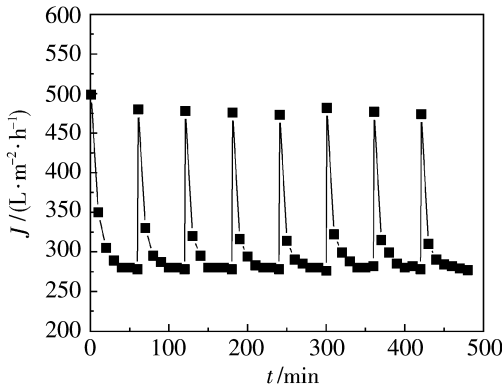


图 10 反冲连续实验结果

Fig. 10 Results of continuous recoil experiment

2.3 陶瓷膜分离矿井水长期稳定性考察

采用陶瓷膜对煤矿井水进行连续化通量考察实验,如图 11 所示,将 0.25 MPa 压力、水温 25 ℃ 作为考察膜性能的条件,进而探究陶瓷膜的水渗透通

量随操作时间的变化规律. 连续使用 60d 以后,水通量基本稳定在 280 L/(m² · h). 考察了 60 d 运行情况下 COD_{Cr} 的去除情况,如图 12 所示. 在陶瓷膜连续过滤过程中,进水中 COD_{Cr} 质量浓度在 564 mg/L,出水 COD_{Cr} 质量浓度在 288 mg/L 左右. 陶瓷膜过滤装置长期运行可靠,出水 COD_{Cr} 稳定.

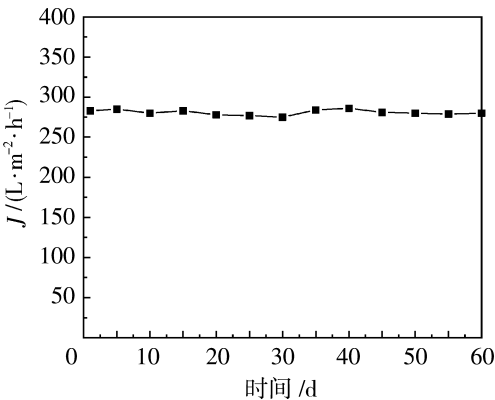


图 11 通量与连续运行天数的关系
Fig. 11 Relationship between flux and continuous operating days

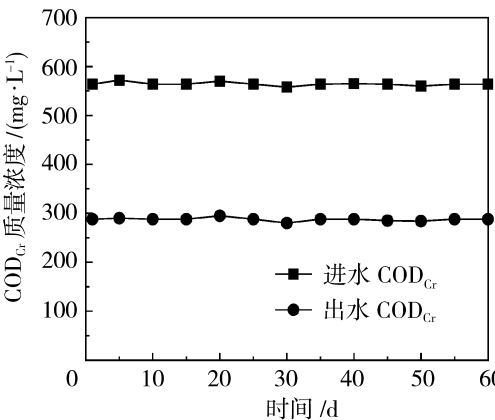


图 12 陶瓷膜过滤矿井水 COD_{Cr} 随运行天数的变化情况
Fig. 12 Changes of mine water COD_{Cr} by ceramic membrane filtration with operating days

考察了 60 d 运行情况下 SS 的去除情况,如图 13 所示. 进水中 SS 质量浓度在 31 mg/L,出水 SS 质量浓度在 0.1 mg/L 左右. 陶瓷膜过滤装置长期运行可靠,出水 SS 稳定. 考察了 60 d 运行情况下浊度的去除情况,如图 14 所示. 在陶瓷膜连续过滤过程中,进水中浊度值在 790 NTU,出水浊度值在 1.3 NTU 左右. 陶瓷膜过滤装置长期运行可靠,出水浊度稳定.

2.4 反渗透膜分离矿井水效果

考察了陶瓷膜出水进反渗透的处理效果,探究

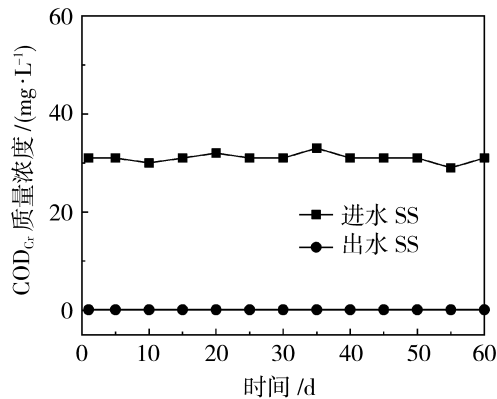


图 13 陶瓷膜过滤矿井水 SS 随运行天数的变化情况

Fig. 13 Changes of mine water SS with ceramic membrane filtration with operating days

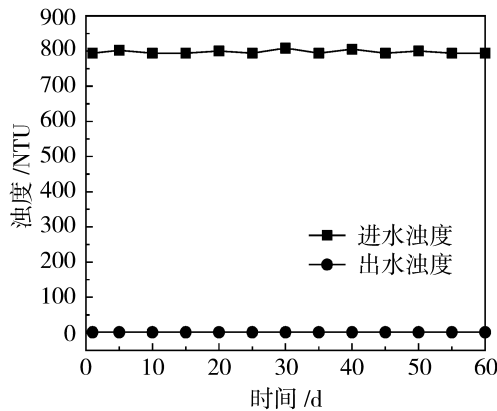


图 14 陶瓷膜过滤矿井水浊度随运行天数的变化情况

Fig. 14 Changes of mine water turbidity by ceramic membrane filtration with operating days

了煤矿井水通量随压力变化关系,如图 15 和图 16 所示. 在 1 MPa 压力、水温 25 ℃下考察膜性能,进而探究水渗透通量随操作时间的变化规律. 随着使用时间的延长,初始水通量 20.51 L/(m²·h),连续使用 1 h 以后水通量变得比较平稳,1 h 后的水通量在 20.37 L/(m²·h).

进料压力的增加导致渗透通量逐渐升高,但过大的压力会导致设备及膜组件的损坏,因此最终选择 3.5 MPa 的进料压力为操作的标准条件.

考察反渗透膜运行时间对通量和反渗透产水电导率的影响,由图 16 可以看出,随着运行时间的增加,反渗透膜的水渗透通量变化不大. 经过 48 h 的运行,水渗透通量最终稳定在初始水通量的 100%,再生性能相对稳定. 由图 17 可知,反渗透产水电导率在 48 h 内在 50 μS/cm 左右上下波动. 运行 48 h 期间电导率没有出现大幅度变化,表明反渗透膜具有较好的长期稳定性,反渗透装置可靠性强.

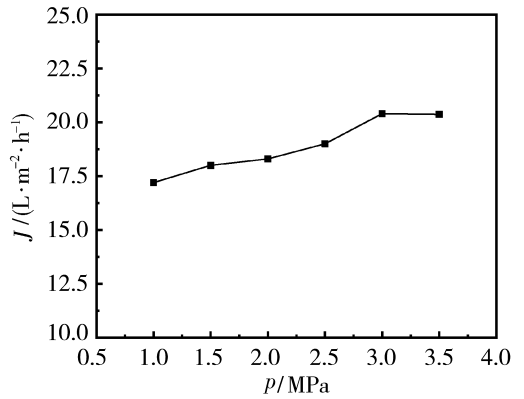


图 15 煤矿井水通量随压力变化关系

Fig. 15 Relationship of coal mine water flux with pressure

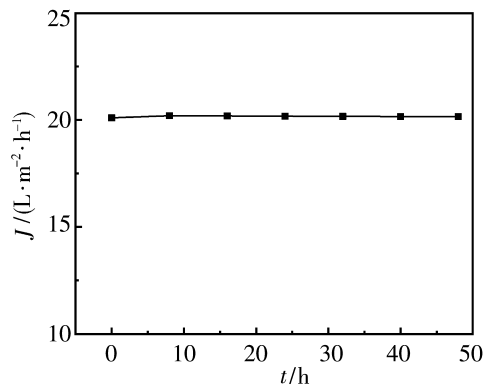


图 16 通量与运行时间关系

Fig. 16 The relationship between reverse osmosis flux and running time

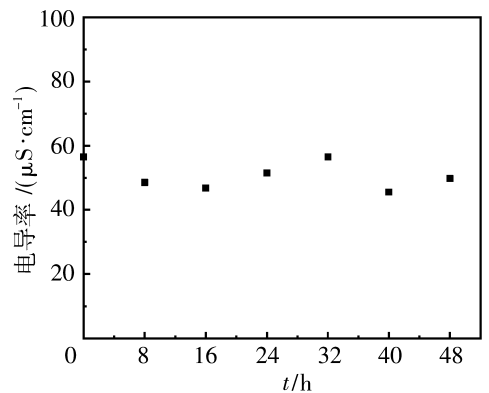


图 17 反渗透产水电导与运行时间关系

Fig. 17 The relationship between the conductivity of the water produced by reverse osmosis and the running time

考察了 60 d 反渗透进出水 COD_{Cr} 的变化,如图 18 所示,反渗过程中,进水中 COD_{Cr} 质量浓度在 288 mg/L,出水 COD_{Cr} 质量浓度在 7 mg/L 左右,浓

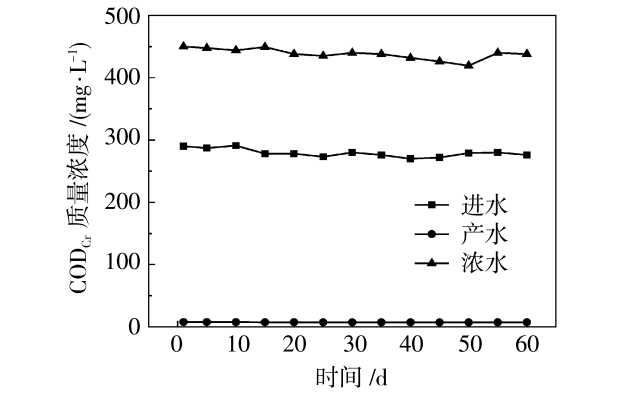


图 18 反渗透 COD_{Cr}变化情况

Fig. 18 Change of COD_{Cr} in reverse osmosis with time

表 4 “陶瓷膜+反渗透”工艺出水水质

Table 4 Effluent quality of “ceramic membrane direct filtration + reverse osmosis” process

项目名称	进水水质	陶瓷膜出水水质	反渗透膜出水水质
COD _{Cr} 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	564	288	7.2
NH ₃ -N 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	27	0.24	0.12
SS 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	31	0.1	0.00
pH 值	7.4	6.9	6.7
浊度/NTU	790	1.3	0.0
电导率/(μS·cm ⁻¹)	1 618	1 612	50.2
总硬度/(mg·L ⁻¹)	240	240	2.3
大肠杆菌/(个·L ⁻¹)	88	0	0
石油类质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.05	0.01	0

3 结论与展望

矿井水处理工艺的重要性毋庸置疑,其关系着环保效益与经济效益.利用煤炭开采时生成的采空区搭建地下矿井水陶瓷膜集成设备,可以大幅降低净水成本而且绿色环保.整个膜系统抗水质、水量冲击负荷能力较强,系统集成度高,占地面积为传统工艺的 1/10,出水水质稳定.通过陶瓷膜处理系统处理后的矿井水悬浮物质量浓度由 31 mg/L 降至 0.1 mg/L 以下,浊度从 790 NTU 降低为 1.3 NTU,处理后的矿井水可满足矿井回用水需要,可用于井下消防、喷淋降尘、黄泥注浆等.此工程案例有效节约水资源,节省供水成本,创造了经济效益.为未来采用陶瓷膜在矿井下直接处理采出水提供了很好的指导.

参考文献:

[1] Wang T, Yang J, Jin D, *et al.* The hydrogeochemical characteristics and formation mechanism of high-fluoride mine water[J]. J Clean Prod, 2023, 430: 139671.

水 COD_{Cr} 质量浓度在 430 mg/L 左右.反渗透装置长期运行可靠,出水 COD_{Cr} 稳定.

2.5 “陶瓷膜+反渗透”工艺出水结果

考察了“陶瓷膜”工艺处理后出水进入反渗透工艺进行回用的水质考察,结果如表 4 所示.可以看出,陶瓷膜处理实验过程稳定,取得较好的实验效果,SS 出水质量浓度 < 20 mg/L, COD_{Cr} 出水质量浓度 < 300 mg/L, 将其作为超滤膜的进水,回收率达到 95%, 具有较好的处理效果.整个系统抗水质、水量冲击负荷能力较强,系统集成度高,出水水质稳定,工艺环节简单.

[2] 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.

[3] 刘德民, 顾爱民, 闫凯迪. 基于水力学与水化学耦合的矿井涌(突)水水源识别方法研究 [J]. 煤炭工程, 2023, 55(1): 87—93.

[4] Rey V, Ríos C A, Vargas L Y, *et al.* Use of natural zeolite-rich tuff and siliceous sand for mine water treatment from abandoned gold mine tailings[J]. J Geochem Explor, 2021, 220: 106660.

[5] Dubuc J, Coudert L, Lefebvre O, *et al.* Electro-Fenton treatment of contaminated mine water to decrease thio-salts toxicity to daphnia magna[J]. Sci Total Environ, 2022, 835: 155323.

[6] Tayná D F, Nancucheo I, Santos W C B, *et al.* Comparison of two acidophilic sulfidogenic consortia for the treatment of acidic mine water[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10: 1048412.

[7] Ren J, Zheng L, Su Y, *et al.* Competitive adsorption of Cd(Ⅱ), Pb(Ⅱ) and Cu(Ⅱ) ions from acid mine drainage with zero-valent iron/phosphoric titanium dioxide: XPS qualitative analyses and DFT quantitative calculations[J]. Chem Eng J, 2022, 445: 136778.

- [8] 魏姗姗. 煤矿矿井水处理站改造方案分析及实践[J]. 山西化工, 2023, 43(8): 236—237, 250.
- [9] Olvera-Vargas H, Dubuc J, Wang Z, *et al.* Electro-Fenton beyond the degradation of organics: Treatment of thiosalts in contaminated mine water[J]. *Environ Sci Technol*, 2021, 55: 2564—2574.
- [10] 李福勤, 豆硕超, 高珊珊, 等. 多重混凝沉淀处理高悬浮物矿井水试验及应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(4): 102—106.
- [11] 刘 浩. 无机陶瓷膜在煤矿矿井水处理站提标改造工程中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(S2): 55—59.
- [12] 党 平, 赛世杰, 张 娜, 等. 偏铝酸钠去除高盐废水中二氧化硅的试验研究[J]. 工业水处理, 2019, 39(7): 74—76.
- [13] 朱泽民, 刘 晨. 超滤-反渗透双膜法在甘肃某矿井水处理中的应用[J]. 给水排水, 2019, 55(6): 77—81.
- [14] 梁戈龙, 刘 玲, 焦建军, 等. 基于“源-径-受体”的高盐水灌注对地下水环境影响预测评价[J]. 煤炭工程, 2023, 55(S1): 155—161.
- [15] 郝如杰, 郑纪永, 朱成林, 等. 地下酸性矿井水治理工程设计及应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(4): 98—101.
- [16] 雷兆武, 孙京敏, 金泥沙, 等. 高矿化度矿井水井下利用处理实验与工艺研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(8): 78—83.
- [17] Hoagland, BethMosley, LukeRusso, TessKirby, *et al.* Arsenic sequestration in gold mine wastes under changing pH and experimental rewetting cycles[J]. *Appl Geochemistry*, 2021, 124: 104789.
- [18] Li Z, Wang H, Xi X, *et al.* Estimation of activation energy of desorption of *n*-hexanol from activated carbons by the TPD technique[J]. *Adsorp Sci Technol*, 2003, 21: 125—203.
- [19] 黄晓帆, 王 雷, 朱跃钊. 陶瓷膜水处理技术应用与膜污染缓解研究进展[J]. 现代化工, 2023, 43(7): 55—58.
- [20] 张溪戔, 董书宁, 王 锐, 等. 含悬浮物矿井水微絮凝——多级过滤工艺研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 222—230.
- [21] Su B, Liu S, Deng L, *et al.* Monitoring direct current resistivity during coal mining process for underground water detection: An experimental case study[J]. *Ieee T Geosci Remote.*, 2022, 60: 5915308.
- [22] Xu W, Yang H, Mao Q, *et al.* Removal of heavy metals from acid mine drainage by red mud-based geopolymer pervious concrete: Batch and long-term column studies[J]. *Polymers*, 2022, 14(24): 5355.
- [23] He X, Lei L. Optimizing methane recovery: Techno-economic feasibility analysis of N₂-selective membranes for the enrichment of ventilation air methane[J]. *Sep Purif Technol*, 2021, 259: 118180.

Research on integrated ceramic membrane technology for recycling of mined water in underground coal mine

TONG Yujia^{1,2}, LIU Guijuan¹, LI Jiayao², JI Hongjun², HU Zhiping³,
BAI Lijun³, MA Ruijun³, LI Weixing¹

(1. College of Chemical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. NJTU Membrane Application Institute Co., Ltd, Nanjing 211816, China;

3. Shaanxi Coal and Chemical Industy Group Longhua Mining Co., Ltd, Yulin 719314, China)

Abstract: Water resource is an indispensable part of mine management and development. Efficient treatment of mine water can alleviate the problems of mine water shortage to a certain extent. This project proposes the process of underground ceramic membrane treatment of coal mine water for the first time, and its device design is compact and occupies 1/10 of the traditional process. The process of “coagulation sedimentation + sand filtration + ultrafiltration + reverse osmosis” and the process of “ceramic membrane filtration + reverse osmosis” were compared. The results show that the chemical oxygen demand (COD_{Cr}) concentration and NH₃-N concentration are 7.2 mg/L and 0.12 mg/L respectively in the treatment of mine water by the integrated process of “ceramic membrane + reverse osmosis”, which has a 100% removal effect on suspended solids (SS) and turbidity. Ceramic membrane direct filtration technology has shown a broad application prospect in the field of mine water treatment.

Key words: mine water; water treatment; reclaimed water