

煤矿矿井水资源化绿色短流程关键技术与装备

何绪文, 王绍州, 张学伟, 季晓晴

(中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要:煤炭是我国重要的工业原料, 与我国经济发展关系密切。煤炭开采过程中会产生大量矿井水, 是重要的非常规水资源, 需妥善处理。然而现有矿井水处理技术普遍存在占地大、流程长、需加药、运行维护复杂和出水水质不稳定等问题, 为缩短处理流程、提高处理效率和保证出水水质, 亟需研发新的关键技术与装备。采用聚瓷膜直滤技术处理矿井水, 通过对膜通量、膜比通量、运行压力和循环流量等条件的对比分析, 确定最佳运行参数为: 运行压力 0.2 MPa, 循环流量 18 m³/h, 处理过程无需加药, 出水悬浮物质量浓度稳定 < 1 mg/L, 浊度稳定 < 1 NTU。采用广泛应用的膜堵塞模型来探讨膜污染机制, 膜污染分析结果表明, 膜污堵主要以滤饼层污堵为主, 并伴随中间污堵, 具体表现为膜的表面污染和膜孔的堵塞。通过水力反洗及时清除膜表面污染, 最佳反洗时间为 60 s, 通量恢复率为 85.12%; 通过定时化学清洗清除膜孔污堵, 用复配制剂清洗 3 h, 通量恢复率可达 95% 以上。工程案例表明, 聚瓷膜直滤可直接取代“混凝沉淀-过滤-超滤”(一代三), 且已连续稳定运行 2 a, 满足设计产水量要求, 系统回收率均在 90% 以上, 处理后水质达到 GB 3838—2002 地表水环境质量 III 类 24 种标准限值要求, 且自动化程度高, 可无人值守, 实现了矿井水资源化利用绿色短流程、节能高效和智能化新要求, 可为该技术大规模推广应用提供技术参考。

关键词:煤矿矿井水; 聚瓷膜; 直滤; 膜污染; 资源化

中图分类号: X752 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0958-09

Key technologies and equipment for green short process of coal mine drainage resource utilization

HE Xuwen, WANG Shaozhou, ZHANG Xuewei, JI Xiaoqing

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

Abstract: Coal is an important industrial raw material in China, closely related to its economic development. During coal mining, a large amount of coal mine drainage is generated, which is an important unconventional water resource that needs to be properly treated. However, the existing coal mine drainage treatment technology generally has problems such as large land occupation, long process, dosing requirement, complex operation and maintenance, and unstable effluent quality. In order to shorten the treatment process, improve treatment efficiency, and ensure effluent quality, it is urgent to develop new key technologies and equipment. This study adopts the PolyCera membrane direct filtration technology to treat coal mine drainage. By comparing and analyzing the conditions of membrane flux, membrane specific flux, operating pressure, and circulating flow rate, the optimal operating parameters are determined as follows: operating pressure of

收稿日期: 2023-10-07 修回日期: 2023-12-20 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.YH23.1248

基金项目: 黄河流域生态保护和高质量发展联合研究一期资助项目 (2022-YRUC-01-0203); 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

引用格式: 何绪文, 王绍州, 张学伟, 等. 煤矿矿井水资源化绿色短流程关键技术与装备[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 958-966.

HE Xuwen, WANG Shaozhou, ZHANG Xuewei, et al. Key technologies and equipment for green short process of coal mine drainage resource utilization[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 958-966.



移动阅读

0.2 MPa, circulating flow rate of $18 \text{ m}^3/\text{h}$. The treatment process does not require dosing, and the stable concentration of suspended solids in the effluent is less than 1 mg/L , and the stable turbidity is less than 1 NTU. Using the most widely used membrane fouling model to explore the mechanism of membrane fouling, the analysis results of membrane fouling indicate that membrane fouling is mainly caused by cake layer fouling, accompanied by intermediate fouling, specifically manifested as surface fouling of the membrane and blockage of membrane pores. The membrane surface pollution is timely removed through hydraulic backwashing, with an optimal backwashing time of 60 s and a flux recovery rate of 85.12%. By regularly cleaning the membrane pores with chemical cleaning, and with a composite formulation for 3 hours cleaning, the flux recovery rate can reach over 95%. Engineering cases have shown that the PolyCera membrane direct filtration can directly replace the "coagulating sedimentation -filtration-ultrafiltration" (one process replaces three), and has been continuously and stably operating for 2 years, meeting the design water production requirements. The system recovery rate is above 90%, and the water quality meets the requirements of 24 standard limits for Class III surface water environmental quality in GB 3838—2002. Also, it has a high degree of automation and can be unmanned, achieving some new requirements of resource utilization of coal mine drainage, green and short process, energy conservation, efficiency, and intelligence. It can provide a technical reference for the large-scale promotion and application of the technology.

Key words: coal mine drainage; PolyCera membrane; direct filtration; membrane fouling; resource utilization

煤炭能源是我国的主导能源,是重要的工业原料^[1]。我国是煤炭能源使用大国,煤炭能源的开发和利用与我国经济发展始终保持着依赖的关系,2022年我国煤炭生产总量为45.57亿t,煤炭支撑了国内生产总值的增长。煤炭在开采期间,由于地下水渗入、岩层裂隙渗入、生产废水排放等途径会产生并涌出大量的矿井水,即煤矿矿井水^[2]。2022年我国煤矿矿井水涌水量约为70亿t,是重要的非常规水资源,其中主要的污染物是以岩粉和煤粉为主要成分的悬浮物、无机离子、部分有机物和细菌等,若不妥善处理会对环境造成极大的危害,如造成水体恶化、土壤盐渍化等一系列环境污染问题。国家相关部门多次发布相关政策,要求矿井水处理达标后才可排放,并鼓励多途径利用矿井水,尤其是回用于生产中。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]。

我国对矿井水的处理始于20世纪70年代,经过长期发展至今处理技术已较为成熟,对于高悬浮物矿井水,传统处理技术有混凝—沉淀—过滤工艺,以及改进后的瓷砂混凝、磁混凝、高效旋流和超磁分离等技术^[4]。针对高矿化度矿井水,在传统除悬浮物基础上增加了超滤+反渗透^[5]。以上技术均在煤矿矿井水处理过程中取得了良好的效果,但普遍存在处理流程长、占地面积大、成本高、系统复杂、需要投加大量混凝药剂等不足^[6-7]。现有的直滤技术、采空区多级沉淀+过滤技术等,也存在进水要求严格、多级过滤流程长、出水水质波动大和系统稳定性差等问题^[8-10]。近

年来,柔性陶瓷膜和无机陶瓷膜等超滤技术已应用到井下和地面矿井水处理^[11],但由于矿井水中除含有煤粉、岩粉需要进行预处理外,还含有油类和新发现的纤维类悬浮物等污染物质,会对该类超滤膜造成严重污堵,导致清洗困难、通量无法恢复。因此亟需研发耐油、耐高悬浮物浓度和耐纤维污堵的可实现真正直滤功能的新型膜材料及关键技术装备,达到煤矿矿井水资源化利用绿色环保、系统高效、稳定运行的目的。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置为自行设计的超滤机,装置示意如图1所示。该装置由进水泵、循环泵、反洗泵、超滤膜组件、进水箱、产水箱等组成,运行过程中通过调节各泵的频率改变运行参数,可实现恒定流量产水,系统采用比例积分微分(PID)控制,可通过系统自动调节进水泵频率,达到产水流量恒定,随着运行时间的延长,运行压力不断上升,反冲洗后压力恢复,循环往复。此外,原水箱设有温度传感器、液位传感器,可实时监测原水箱中的温度和水位。该装置设有连锁控制,低液位不启动、中低液位报警、低液位连锁停机等,以保护装置安全运行。该装置可自动记录运行数据,每隔固定时间自动记录流量、压力、液位等指标;还可通过设置运行和反洗时间来实现自动反冲洗,且系统调试完成后可实现无人值守^[12-13]。

1.2 材料及分析方法

试验用超滤膜为卷式可反洗膜,膜孔径为20 nm,

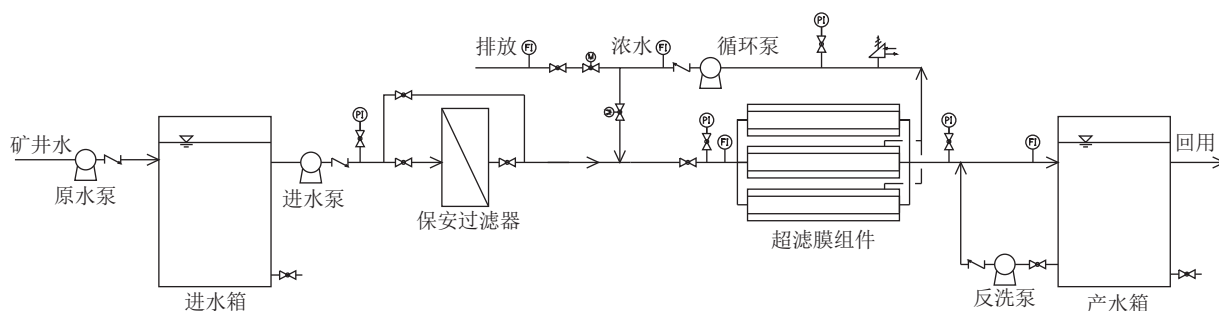


图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the test device

截留分子量为 100 kDa(10^5 g/mol), 具有强度高、通量大、孔径分布集中、超亲水疏油、耐受高悬浮物、耐高温、耐酸碱等特点, 优势明显^[14]。膜组件采用波纹状流道, 相比传统流道可耐受更高浓度悬浮物, 且卷式膜运行方式多样。

采用重量法(全玻璃微孔滤膜过滤器)测定水中悬浮物和纤维含量; 采用红外分光光度法(红外分光测油仪, OIL-9)测定油含量; 由激光粒度仪(MALVERN, Masterizer-2000)测定粒度分布; 由便携式数字分析仪(哈希-HQ11D)测定 pH; 由 Zeta 电位测试仪(Nanolink SZ900)测定 Zeta 电位; 采用无柄滴注法, 由接触角测量仪(KRUSS DSA100)测定悬浮物润湿接触角。

1.3 膜清洗方法

(1) 物理清洗。借助水力反冲洗去除膜表面可逆污染物^[15-16], 系统运行 60 min, 进行一次反冲洗(30~60 s)。

(2) 化学清洗(化洗)。当系统跨膜压差达到一定值时, 需进行一次化洗, 运行时间一般为 1~3 个月, 化洗时长 2~3 h, 清洗药剂主要为自主研发的 3 类药剂: 酸性清洗剂、碱性清洗剂和复配制剂。

1.4 膜有关的参数计算

(1) 膜通量。膜通量是膜过滤性能的重要指标, 计算公式为

$$J = V/(At) \quad (1)$$

式中, J 为过滤的瞬时通量, LMH; V 为一定时间内过滤水样的体积, L; A 为膜面积, m^2 ; t 为过滤时间, h。

(2) 膜比通量。膜比通量可直观反映膜通量下降的比率, 计算公式为

$$J_R = J/J_0 \quad (2)$$

式中, J_R 为膜比通量; J_0 为初始时过滤清水的膜通量, LMH。

(3) 膜恢复率 F_{RR} 。

$$F_{RR} = \frac{J_W}{J_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中, J_W 为清洗后过滤清水的膜通量, LMH; J_0 为初始过滤清水的膜通量, LMH。

2 结果与讨论

2.1 矿井水水质特性、直滤膜材料理化特性

试验用水取自某矿矿井水, 水质波动大, 污染物以煤粉和岩粉等悬浮物为主, 粒度小, 同时含有油类和纤维类悬浮物等污染物, 具体水质见表 1。矿井水粒度分布和纤维形貌分别如图 2、3 所示。

表 1 矿井水水质

Table 1 Coal mine drainage quality

pH	悬浮物含量/ ($mg \cdot L^{-1}$)	纤维含量/ ($mg \cdot L^{-1}$)	油含量/ ($mg \cdot L^{-1}$)	Zeta 电位/ mV	接触角/ ($^{\circ}$)
7~8	200~1 000	40~200	5~20	-12~-16	76.5

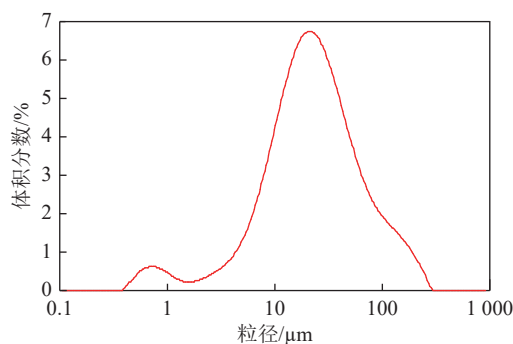


图 2 矿井水粒度分布

Fig.2 Particle size distribution of coal mine drainage

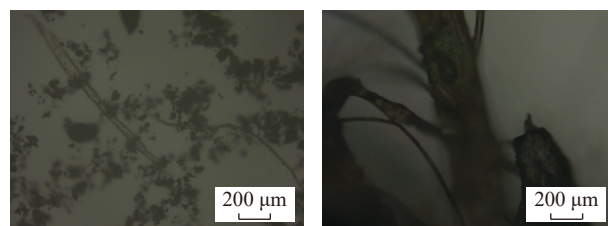


图 3 纤维形貌

Fig.3 Morphology of the fibers

试验用膜为聚瓷膜,膜孔径为 20 nm,由图 4~6 可知,聚瓷膜接触角 $\theta=20^\circ$,亲水疏油、抗污堵;与传统 PVDF 膜相比,聚瓷膜孔径分布集中,精度高,通量是传统高分子膜的 2~3 倍;膜组件采用直流通道设计,与传统网格通道相比,可承受更高浓度的悬浮物。此外,聚瓷膜耐温可达 90°C ,耐 pH 为 1.0~13.5,均超过大部分有机膜^[10]。

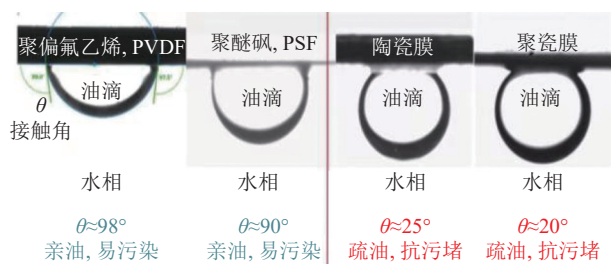


图 4 不同膜材料接触角对比

Fig.4 Comparison of contact angles between different membrane materials

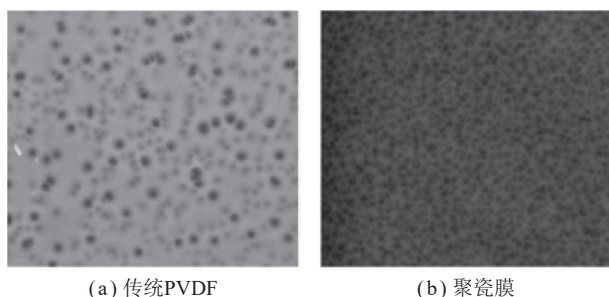


图 5 传统 PVDF 与聚瓷膜孔径分布

Fig.5 Pore size distribution of traditional PVDF and PolyCera membrane film

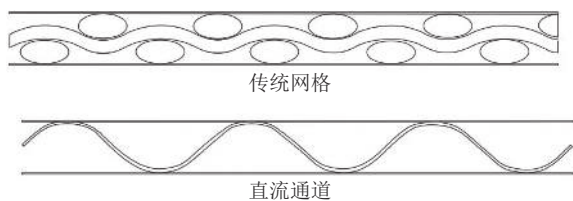


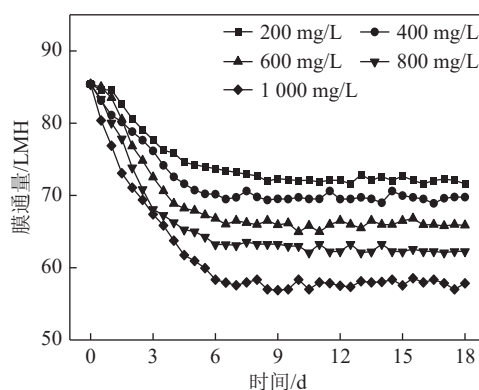
图 6 传统网格流道与直流通道对比

Fig.6 Comparison between traditional grid flow channel and DC channel

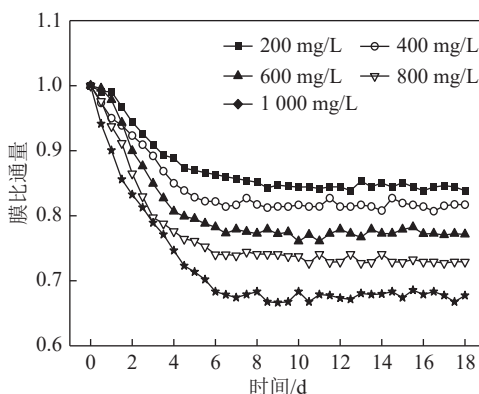
2.2 进水悬浮物浓度的影响

膜通量是膜系统运行重要参数,其大小可反映系统运行状态和膜污染程度,但为避免膜本身性质的影响,采用膜比通量更为精确,膜比通量的变化反映了膜在过滤过程的污阻变化,即膜的过滤能力,其变化程度间接反映膜的污染情况^[17]。膜比通量越大,膜阻力越大,膜污染越严重。进水 SS 浓度的不同,会影响膜系统最终稳定后的膜通量和膜比通量,分别控制进水 SS 质量浓度为 200、400、600、800、1 000 mg/L,

0.2 MPa 条件下连续运行 18 d,膜通量和膜比通量的变化如图 7 所示。由图 7 可知,随着进水 SS 质量浓度的增加,膜初始通量不变,但稳定后的膜通量和膜比通量逐渐减小,膜污染程度逐渐加重。这是因为进水 SS 质量浓度越高,沉积在膜表面和膜孔内的微粒越多,污染阻力越大,使得滤饼层厚度增加,进而使通量和膜比通量下降。SS 质量浓度增加虽会影响膜通量变化,但对系统运行稳定性和产水水质基本无影响。



(a) 悬浮物质量浓度对膜通量的影响



(b) 悬浮物质量浓度对膜比通量的影响

图 7 不同悬浮物浓度下的膜通量和膜比通量变化

Fig.7 Changes of membrane flux and membrane specific flux under different concentrations of suspended solids

2.3 运行压力的影响

运行压力为膜装置进水侧压力,是决定膜是否需要化洗的重要参数。运行压力的增大引起膜通量增高,同时也会加剧膜污染速度,增加化洗频率,因此确定合理的运行压力十分重要。为探究不同运行压力对运行的影响情况,控制进水 SS 质量浓度 1 000 mg/L,分别在 0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 MPa 条件下连续运行 18 d,膜通量和膜比通量的变化如图 8 所示。由图 8 可知,随着运行压力增大,膜初始通量和稳定后通量均依次增大,随着运行时间的增加膜通量虽趋于稳定,但有逐渐下降的趋势。而随着运行压力增大,膜比通量逐渐降低,稳定后膜比通量分别为 0.714、

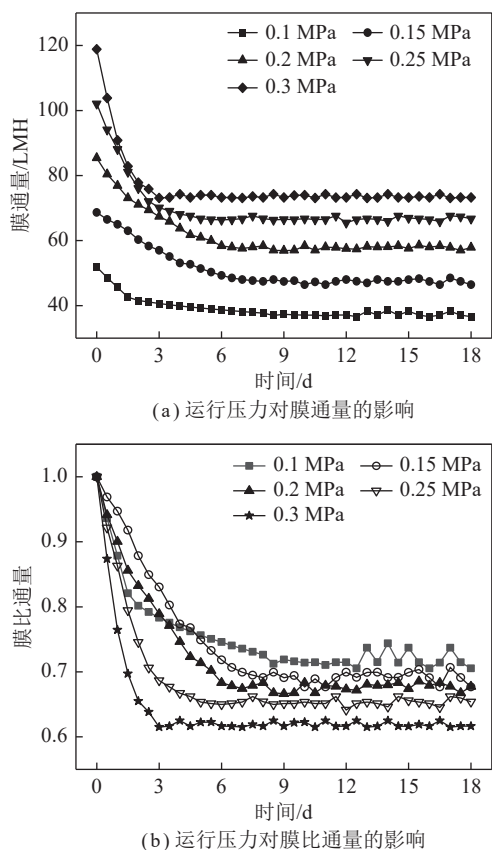


图 8 不同压力下的膜通量和膜比通量变化

Fig.8 Changes in membrane flux and membrane specific flux under different pressures

0.691、0.677、0.653、0.615。这是因为运行压力较低时膜通量低,膜面污染物沉降速度较慢,水中的污染物与超滤膜发生接触,形成的膜污染较轻,可经物理清洗去除。随着运行压力增大,其初始膜通量相对更高,使膜面污染物质沉降速度加快,水中污染物质在较短时间内造成滤饼层的产生或膜孔污堵,造成更严重的膜污染,无法通过物理清洗有效去除,尤其是运行后期比通量进一步降低,将限制产水效率,增加清洗频率。同时压力超过 0.20 MPa 后膜比通量下降速率有所增加,综合考虑 0.20 MPa 为最佳运行压力。

2.4 循环流量的影响

由于进水 SS 质量浓度波动较大,系统采用错流过滤方式,循环流量会增大错流速度,可加强膜表面水力擦洗程度,但随着循环流量的增大,运行压力也将进一步提升,会加重膜污染,因此选择适宜的循环流量十分必要。产水流量为 3 m³,循环量分别在 6、12、18、24、30 m³/h 条件下进行试验,连续运行 18 d,运行压力变化如图 9 所示。由图 9 可知,循环流量较小时,随着运行时间的推移运行压力显著提升,继续增大循环流量,运行压力无明显上升趋势,这是因为循环流量较小时,流速较小,未能起到有效的擦洗作

用,随着循环流量的增大,膜组件中流速增大,表面擦洗作用增强。但更高的循环流量,对应更高的运行压力,意味着更高的膜污染,同时循环流量过大也会使能耗更高,综合考虑,最佳循环流量为 18 m³/h。

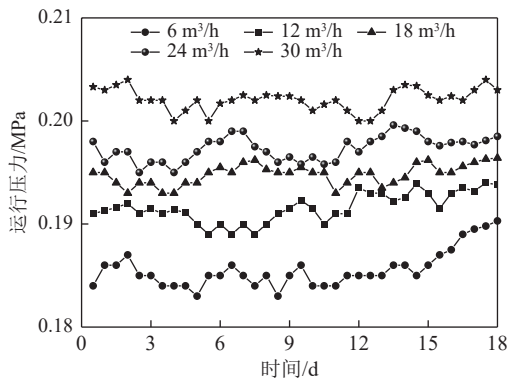


图 9 循环流量对运行压力的影响

Fig.9 Effect of circulating flow rate on operating pressure

3 膜污染机理与清洗方法

3.1 膜污染机理

采用应用最为广泛的膜堵塞模型来探讨膜污染机制,该模型适用于恒压过滤下的非牛顿流体^[18],计算公式为

$$-\frac{dJ_s}{dV_s} = K_v J_s^{2-n} \quad (4)$$

其中, J_s 为膜通量,LMH; V_s 为过滤液体积,m³; K_v 为膜污染系数; n 为特征模型常数, n 取不同值时的堵塞模型见表 2。

表 2 膜堵塞模型

Table 2 Membrane blockage model

n	膜堵塞模型	线性公式
0	滤饼层堵塞	$\frac{1}{J_s} = 1 + K_v V_s$
1.0	中间堵塞	$(\ln J_s)^{1/2} = -K_v V_s$
1.5	标准堵塞	$J_s^{0.5} = 1 + \frac{K_v}{2V_s}$
2.0	完全堵塞	$J_s = 1 - K_v V_s$

为探究膜污染机理,利用 4 种污堵模型对数据进行拟合分析,拟合系数 R^2 越接近 1,模型越适用^[18]。在 0.2 MPa 条件下,对膜堵塞模型进行拟合,将直滤时的过滤液体积 V_s 和对应的膜通量 J_s 代入膜堵塞模型进行拟合,结果如图 10 所示。由图 10 可知,滤饼层污堵模型 ($R^2=0.946\ 5$)>中间污堵模型 ($R^2=0.928\ 2$)>完全污堵模型 ($R^2=0.890\ 2$)>标准污堵模型 ($R^2=0.757\ 3$),滤饼层污堵模型和中间污堵模型的 R^2 均在 0.9 以上,且滤饼层污堵模型的拟合系数更高,说明膜污染主要

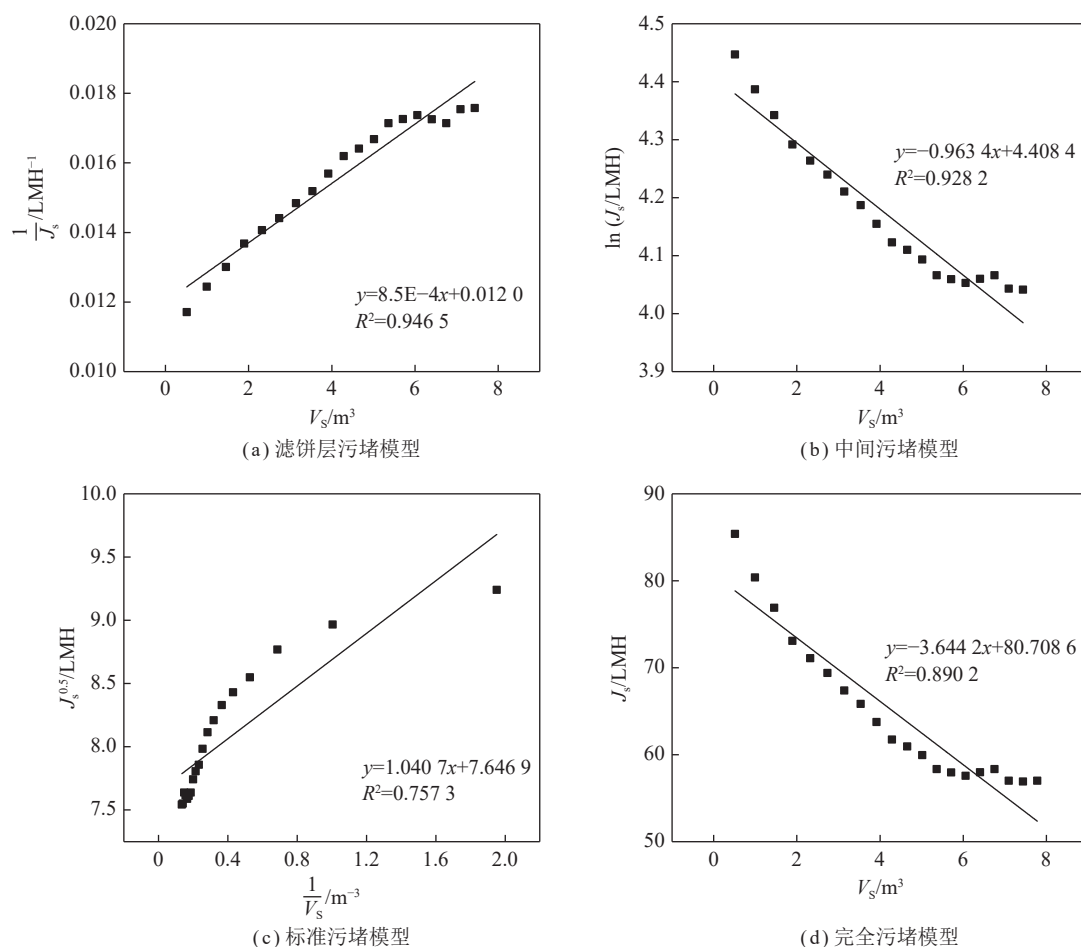
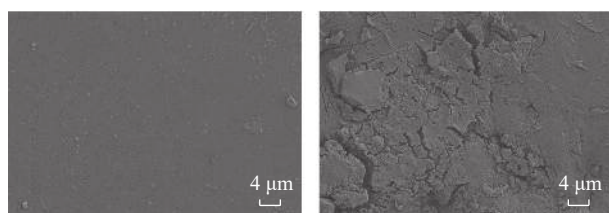


图 10 直滤模型拟合

Fig.10 Fitting curves of direct filtration model

以滤饼层污堵为主,并伴随着中间污堵,具体表现在膜的表面污染和膜孔的堵塞,为水力反洗及时清除膜表面污染和化学清洗定时清除膜孔污堵提供了指导。

采用扫描电镜对膜表面形貌进行表征,如图 11 所示。原膜表面平整,无明显污染迹象,而污染后膜表面有大量层状物质,一方面是因为在膜滤过程中矿井水中小颗粒物质可能进入膜孔内部,吸附在膜孔内壁造成传质通道减小;另一方面颗粒物较大的污染物(如煤粉、岩粉和纤维等)均为疏水性物质,被截流沉积在膜表面后,在水压作用下不断被压缩形成密实的滤饼层,造成膜污染。



(a) 原膜

(b) 污染膜

图 11 原膜和污染膜的扫描电镜

Fig.11 SEM images of virgin membrane and fouled membrane

3.2 膜清洗方法

进行清洗实验时,为保证膜污染程度一致,参数优化期间保持膜初始通量和清洗前通量基本相同。

3.2.1 物理清洗

用产水对污染后膜进行反冲洗 15、30、45、60、75 s 后稳定运行,分析清洗前后膜通量变化,并计算膜通量恢复率,如图 12 所示。由图 12 可知,反冲洗后

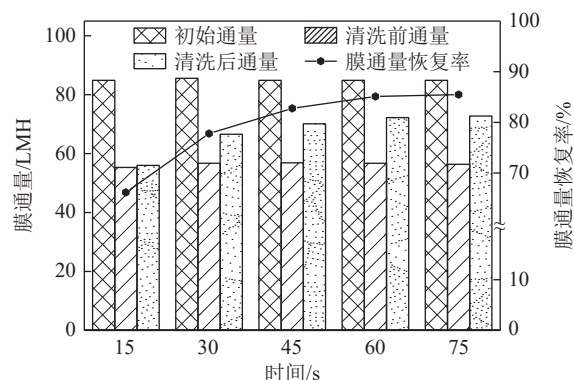


图 12 直滤下物理清洗后的膜通量及恢复率

Fig.12 Membrane flux and recovery rate after physical cleaning under direct filtration

膜通量有所恢复,且随着反冲洗时间的延长,膜通量恢复率逐渐升高,60 s后上升幅度很小。这是因为反冲洗只能冲洗去除膜表面可逆污染物,无法去除不可逆污染物(如油污、结垢等),故物理清洗对膜通量的恢复效果有限。综合考虑,最佳反冲洗时长为60 s,此时膜通量恢复率为85.12%。

3.2.2 化学清洗(化洗)

随着不可逆污染物逐渐积累,当膜通量持续降低至无法满足产水要求时,则需进行化洗。化洗可有效去除膜表面不可逆污染物^[19-20],对膜系统长期稳定运行和生命周期至关重要。分别采用不同药剂配方:酸性清洗剂、碱性清洗剂和复配制剂进行化洗,时长为3 h,化洗后通量和膜通量恢复率变化(取3次平均值)如图13所示。由图13可知,化洗后膜通量都有所恢复,化洗效果:复配制剂>酸性清洗剂>碱性清洗剂,仅用酸性清洗剂或碱性清洗剂清洗效果不佳,这是因为碱主要去除膜表面有机污染物,而酸则是主要去除无机污染物,有机污染物会吸附在无机污染物表面进而影响无机污染物去除的程度,而复配制剂由于其配方中含有除油、除硬和除微生物等药剂,可与不同种类污染物充分反应或使其溶解,同时在表面活性剂作用下还可在清洗过程中生成大量泡沫,使得清洗效果更加彻底,故最佳化洗配方为复配制剂,此时膜通量恢复率可达95%以上。

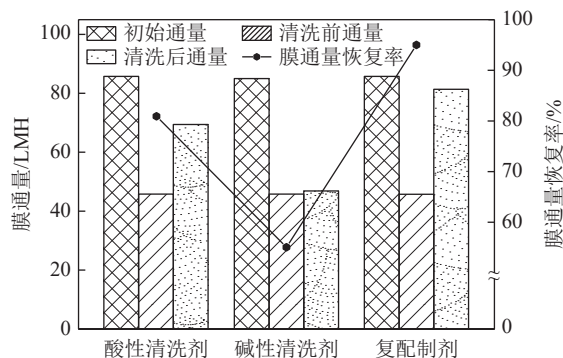


图13 直滤下不同药剂清洗后的膜通量及恢复率

Fig.13 Membrane flux and recovery rate after cleaning with different agents under direct filtration

4 工程案例

4.1 工艺对比

内蒙古鄂尔多斯某典型煤矿,矿井水水质波动大,进水中主要含煤粉,有时含油或悬浮物。由于增产扩容,新增2套聚瓷膜直滤装置,主要用于反渗透膜前预处理,并下水抽取到地上不加药,直接取代“混凝沉淀-过滤-超滤”(一代三),直接过滤,与现有工艺流程对比如图14所示。由于聚瓷膜过滤精度较传统超滤膜高,且出水水质好,同时聚瓷膜可耐悬浮物浓度达10 000 mg/L,可直接作为反渗透膜预处理单元,因此处理工艺仅为聚瓷膜超滤-反渗透,且聚瓷膜超滤处理过程无需加药,可避免药剂对反渗透膜的污染。

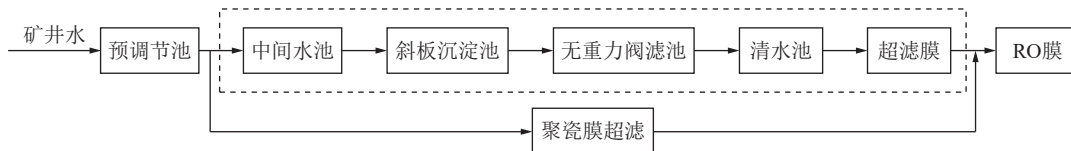


图14 工艺流程对比

Fig.14 Comparison of process flow diagrams

4.2 设计参数

共设计2套聚瓷膜系统,每套产水量100 m³/h,并联运行,膜孔径为20 nm,制水回收率90%,聚瓷膜设计参数见表3。

4.3 运行情况

在最佳运行参数下将聚瓷膜超滤装置进行长时间连续运行(已运行2 a),期间不加药直滤,每半年进行一次化洗,观察进水压力、膜通量和回收率变化情况,考察系统运行稳定性,如图15所示。由图15可知,系统连续运行期间,基本可实现无人值守,系统回收率始终保持90%以上,膜通量基本稳定,进水压力稳中有升,期间数据有集体上下波动时为进水水质变化所致。3次化洗结果表明,采用上述配方可有效恢复膜通量,且通量恢复率均可达到95%以上。整个运行期间,产

水量可满足设计要求(每套100 m³/h),产水水质较为稳定。由表4可知,处理后的矿井水可达到GB 3838—

表3 聚瓷膜设计参数

Table 3 Design parameters of PolyCera membrane

参数	数值
膜材质	聚合陶瓷
运行压力/kPa	200
最高进水温度/℃	60
pH	1~13.5
工作形式	进水TSS≤50 mg/L, 死端内压过滤; 进水TSS>50 mg/L, 错流循环过滤
过滤周期/min	60
反洗压力/kPa	≤170
反洗总历时/s	60
气洗强度	无气洗
化学清洗(CIP)周期	1~3个月

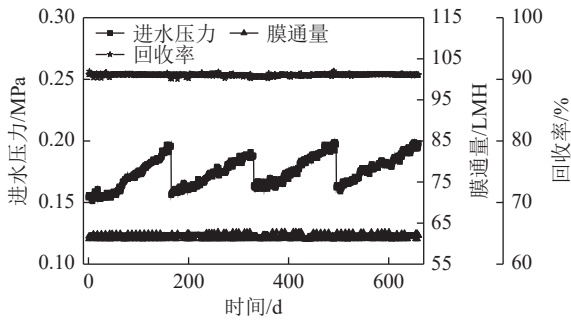


图 15 系统运行稳定性

Fig.15 System operating stability

2002 地表水环境质量 III 类 24 种标准限值要求,证明

该工艺切实可行,且化学清洗所需药剂量很少。

以增产扩容、占地少、周期短等为设计原则,选用合理可靠、先进高效的设备,并最大限度利用原有设备,达到矿井水分流分质利用,同时兼顾矿方大坝蓄水池水质综合处理,实现了矿井水的资源化利用。改进后新工艺,可节省占地面积 90% 以上,可节省药剂费用 0.2~0.3 元/t(水),还可节省提升费用,处理成本约为 0.5 元/t(水)(传统工艺 2 元/t(水)),若应用到井下,还可节约升井能耗约 0.8 kW·h/hm,该工艺自动化程度高,耐冲击负荷能力强,系统回收率高,污泥产量和外排废水少,可实现无人值守。

表 4 处理前后水质对比

Table 4 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	200~800	<1	镉	0.005~0.025	≤0.005
pH	7.4~8.6	6~9	高锰酸盐指数	3.2~9.3	≤6
COD	11~42	≤20	铬(六价)	<0.007	≤0.05
BOD ₅	2.8~9.5	≤4	铅	0.006~0.130	≤0.05
氨氮	0.452~1.371	≤1.0	氰化物	<0.005	≤0.004
总磷	0.05~0.18	≤0.16	挥发酚	<0.004	≤0.003
总氮	1.2~2.27	≤1.0	硫化物	<0.005	≤0.005
氟化物	0.9~2.92	≤1.0	阴离子表面活性剂	<0.07	≤0.05
石油类	5-20	≤0.05	硒	0.003~0.001 5	≤0.01
粪大肠菌群	76~499	≤490	砷	0.000 9~0.094 0	≤0.05
溶解氧	5.1~10.5	≥5	汞	0.000 35~0.000 72	≤0.000 1
铜	0.03~0.097	≤0.1	—	—	—
锌	0.02~0.593	≤0.6			

注:粪大肠菌群单位为个/L;除pH、高锰酸盐指数外,单位均为mg/L。

5 结 论

(1) 得出了该新工艺最佳运行参数:运行压力为 0.2 MPa,循环流量为 18 m³/h。进水 SS 质量浓度为 200~1 000 mg/L、回收率>90% 条件下,产水 SS 质量浓度 < 1 mg/L,浊度始终 < 1 NTU。

(2) 揭示了膜污染机制:聚瓷膜直滤过程中主要发生滤饼层堵塞污染,并伴随着中间堵塞污染,依据膜污染机制得出膜清洗方法为水洗和化洗相结合。膜污染主要为表层污染,可通过反冲洗有效恢复膜通量,最佳反洗时长为 60 s,膜通量恢复率为 85.12%。膜污染到达一定程度,无法满足产水量要求时,则需进行化洗,最佳化洗药剂为复配制剂,化洗 3 h 后通量恢复率可达 95% 以上。

(3) 连续运行 2 a 的工程案例结果表明:聚瓷膜直滤(不加混凝剂)可直接取代“混凝沉淀-过滤-超滤”

(一代三),且系统运行稳定、出水水质好、可满足矿井水资源化利用绿色短流程、节能高效、模块化和智能化新要求,是矿井水处理技术的重大突破,是一种迭代升级工艺,具有非常广阔的应用前景。建议加快推进应用,为矿井水资源化利用发挥出更大的作用。

参考文献(References):

- [1] 钱鸣高,许家林,王家臣.再论煤炭的科学开采[J].煤炭学报,2018,43(1):1-13.
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiachen. Further on the sustainable mining of coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 1-13.
- [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.
H. E. 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] 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.
- [5] 孙亚军, 陈歌, 徐智敏, 等. 我国煤矿区水环境现状及矿井水处理利用研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 304–316.
- SUN Yajun, CHEN Ge, XU Zhimin, et al. Research progress of water environment, treatment and utilization in coal mining areas of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 304–316.
- [6] 刘遵义, 李小亮. 高矿化度矿井水处理技术应用现状[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(S2): 436–441.
- LIU Zunyi, LI Xiaoliang. Application status of mine water treatment technology with high salinity[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S2): 436–441.
- [7] 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.
- [8] 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.
- LEI Zhaowu, SUN Jingmin, JIN Nisha, et al. Treatment experiment and process for underground utilization of high salinity mine water[J]. Coal Engineering, 2023, 55(8): 78–83.
- [9] 顾大钊, 李庭, 李井峰, 等. 我国煤矿矿井水处理技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(1): 11–18.
- GU Dazhao, LI Ting, LI Jingfeng, et al. Current status and prospects of coal mine water treatment technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 11–18.
- [10] 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, et al. Coal mine drainage resources utilization technology innovation[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 523–530.
- [11] 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 cycle of coal mine water[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4): 71–74, 79.
- [12] 何绪文. 一种煤矿矿井水处理系统: CN11555752A[P]. 2022–09–23.
- [13] 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: CN114506934A[P]. 2022–05–17.
- [14] LIM Ying Pei, JASIMIN Afifah, NG Law Yong, et al. Performance evaluation on ultrafiltration as tertiary treatment for rubber glove wastewater: Materials today-proceedings[C]//2nd International Conference on Chemical Engineering and Applied Sciences (ICChEAS). 2022: S267–S272.
- [15] 申静, 毛鑫, 张冰, 等. 膜蒸馏过程中膜污染问题及其缓解策略研究[J/OL]. 中国给水排水: 1–15[2023–09–27]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vdPasdvfHvvcmbB3gdZPDQ-M5G_Fg2StLe8twS-2RNR9GEN3DfXoERWxsLIImuL2ZkB_-3WcK-mxvZSAaMGNgSLjsYvsdMp4b1RcRcO56qW19tbPkGdax-DOaDG6EYUeuyusvttCuil2ZeU=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- SHEN Jing, MAO Xin, ZHANG Bing, et al. Study on membrane fouling in membrane distillation process and its mitigation strategy[J/OL]. China Water & Wastewater, 1–15[2023–09–27]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=vdPasdvfHvvcmbB3gdZPDQ-M5G_Fg2StLe8twS-2RNR9GEN3DfXoERWxsLIImuL2ZkB_-3WcK-mxvZSAaMGNgSLjsYvsdMp4b1RcRcO56qW19tbPkGdax-DOaDG6EYUeuyusvttCuil2ZeU=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [16] 鞠伟澎, 焦文海, 刘玉田, 等. 陶瓷膜处理油田采出水的膜清洗方法研究[J]. 水处理技术, 2023, 49(5): 101–105.
- JU Weipeng, JIAO Wenhai, LIU Yutian, et al. Study on membrane cleaning method for treating oilfield produced water with ceramic membrane[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(5): 101–105.
- [17] 郇玉楠, 王信之, 宗子翔, 等. 混凝–超滤短流程工艺膜污染特性及防治研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(3): 78–81.
- GAO Yunan, WANG Xinzhi, ZONG Zixiang, et al. Study on membrane fouling characteristics and prevention of coagulation ultrafiltration short process[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(3): 78–81.
- [18] 刘崎峰, 王琦. 关于恒流状态下膜堵塞定律与神经网络模型比较研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 551–560.
- LIU Qifeng, WANG Qi. Comparative study on membrane blockage law and neural network model under constant current state[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2012, 43(5): 551–560.
- [19] TEO Y Yeit Haan, OOI Boon Seng, AHMAD Abdul Latif, et al. Investigation of anti-fouling and UV-cleaning properties of PVDF/TiO₂ mixed-matrix membrane for humic acid removal[J]. Membranes, 2021, 11(1): 987–994.
- [20] LEE Yong-Gu, RHO Hojung, KIM Sangwon, et al. Consecutive chemical cleanings of hollow fiber ultrafiltration membranes from a pilot-scale surface water treatment plant[J]. Membrane and Water Treatment, 2021, 12(4): 139–147.