

杨鑫, 刘旭阳, 杨兴涛, 等. 国产陶瓷超滤膜在低温海水淡化中的应用[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 50-55, 129.

YANG X, LIU X Y, YANG X T, et al. Application of domestic ceramic UF membranes in low-temperature seawater desalination [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 50-55, 129.

国产陶瓷超滤膜在低温海水淡化中的应用

杨鑫^{1,2,*}, 刘旭阳^{1,3}, 杨兴涛², 王钧², 刘长青¹, 王智美⁴

(1. 青岛百发海水淡化有限公司, 山东青岛 266041; 2. 青岛海水淡化有限公司, 山东青岛 266071; 3. 中国海洋大学, 山东青岛 266003; 4. 青岛水务集团有限公司, 山东青岛 266071)

摘要 【目的】超滤(UF)作为海水淡化的预处理单元,是保障核心脱盐单元反渗透膜稳定运行的重要屏障。然而,在我国北方冬季低温条件下,传统有机UF膜存在产水量显著下降、膜丝断裂率升高等问题。该研究以课题组自主研发的机械强度高、热稳定性好的国产无机陶瓷UF膜为替代对象,开展了低温条件下海水淡化预处理示范应用中试研究。【方法】分别在常温(16.7~20.9℃)和低温(2.2~5.0℃)条件下,采用恒压与恒流2种运行模式,评估并对比了陶瓷膜与有机膜的产水通量、跨膜压差(TMP)及产水量变化规律。【结果】恒压运行模式下,陶瓷膜在常温条件下的产水通量显著高于有机膜;在低温条件下,尽管陶瓷膜的产水通量较有机膜下降幅度更大,但仍优于有机膜。在恒流运行模式下,陶瓷膜可通过提高TMP来增加过滤推动力,从而维持稳定的产水量;相比之下,低温条件对有机膜的影响更为显著,其产水量仅为常温条件下的37%~41%。【结论】文章介绍了自主研发的国产陶瓷膜在低温海水淡化中试试验中表现出优于有机膜产水稳定性,研究成果可为陶瓷膜应用于低温海水淡化预处理过程提供技术参考和运行参数指导。

关键词 国产陶瓷超滤膜 有机超滤膜 低温 海水淡化 产水性能 跨膜压差(TMP)

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0050-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.006

Application of Domestic Ceramic UF Membranes in Low-Temperature Seawater Desalination

YANG Xin^{1,2,*}, LIU Xuyang^{1,3}, YANG Xingtao², WANG Jun², LIU Changqing¹, WANG Zhimei⁴

(1. Qingdao Baifa Seawater Desalination Co., Ltd., Qingdao 266041, China;

2. Qingdao Seawater Desalination Co., Ltd., Qingdao 266071, China;

3. Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

4. Qingdao Water Group Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

Abstract [Objective] As a pretreatment unit in seawater desalination, ultrafiltration(UF) serves as a critical barrier to ensure the stable operation of the core desalination reverse osmosis membrane. However, under low winter temperatures in northern China, traditional organic UF membranes face significant challenges, including reduced water production capacity and increased membrane filament breakage rates. To address these issues, this study conducts pilot-scale demonstrations of low-temperature seawater desalination pretreatment using domestically developed inorganic ceramic UF membranes, which exhibit high mechanical strength and thermal stability. [Methods] Under both ambient (from 16.7 to 20.9℃) and low-temperature (from 2.2℃ to 5.0℃) conditions, constant-pressure and constant-flow operational modes were employed to evaluate and compare the permeate flux, transmembrane pressure difference (TMP), and water production variations of ceramic and organic membranes. [Results] Under constant-pressure operation, ceramic membranes demonstrated significantly higher permeate flux than organic membranes at ambient temperatures. Although the permeate flux of ceramic membranes declined more markedly than that of organic membranes under low-temperature conditions, they still outperformed organic membranes. Under constant-flow operational mode, ceramic membranes could enhance filtration driving force by increasing the TMP, thereby maintaining stable water production. In contrast, low-temperature conditions exerted a more pronounced

[收稿日期] 2025-02-19

[基金项目] 青岛市海洋科技创新专项海洋产业关键技术攻关项目(23-1-3-hygg-17-hy)

[通信作者] 杨鑫(1986—),女,研究方向为海水淡化, E-mail:18669858903@163.com。

adverse effect on organic membranes, with their water yield dropping to merely from 37% to 41% of that observed under ambient temperatures. [Conclusion] The domestically developed ceramic membranes exhibit superior water production stability compared to organic membranes in low-temperature pilot-scale trials. These findings provide technical references and operational parameter guidelines for the practical application of ceramic membranes in low-temperature seawater desalination pretreatment processes.

Keywords domestic ceramic UF membrane organic UF membrane low temperature seawater desalination water production performance transmembrane pressure difference (TMP)

在全球水资源危机加剧的背景下,海水淡化已成为缓解沿海地区水资源短缺的重要战略手段。目前,全球海水淡化产能已突破 1 亿 m^3/d ,其中反渗透海水淡化技术的应用占比已超过 65%^[1]。超滤作为海水淡化的预处理单元,是保障核心脱盐单元反渗透膜稳定运行的重要屏障。然而,有机超滤膜存在机械强度低和热稳定性差等问题^[2]。在冬季低温(水温 $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境下,有机膜材料特性易发生变化,导致膜孔道收缩、水分子透过阻力增加^[3],产水量衰减 15%~30%^[4],对北方沿海地区冬季供水保障造成严重影响^[5]。

陶瓷超滤膜具有机械强度高、热稳定性强和化学稳定性好的优点^[6],在低温环境中能保持稳定的材料性能^[7]。得益于 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷膜稳定的材料结构^[8],其物理化学性质在低温条件下仍不会发生明显改变^[9]。经过改良后的陶瓷膜,其耐污染性能也得到大幅提升。梁恒等^[10]制备的 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2/\text{PAC}$ 光催化氧化预涂层陶瓷膜,在低温条件下能有效降解藻源有机物,缓解膜污染问题;通过溶胶-凝胶法制备的陶瓷膜具有孔径均匀、低温条件下渗透系数稳定的特点^[11]。然而,目前对于陶瓷膜的研究大多关注膜材料自身的性能,对陶瓷膜在实际低温运行条件下的运行特性、污堵机制及工艺适配性等方面缺乏系统性研

究^[12]。此外,陶瓷膜作为一种新兴的海水淡化预处理技术,国内相关企业数量尚少,高端应用领域仍主要依赖进口。因此,亟需建设国产陶瓷膜的实际应用示范平台,以进一步推动国产陶瓷膜制造工艺和应用水平的提升。

因此,本研究选取具有自主知识产权的国产陶瓷超滤膜作为中试试验对象^[13],系统对比分析低温与常温条件下陶瓷膜和有机膜在产水通量、跨膜压差等性能指标上的差异,评估国产陶瓷超滤膜在低温运行条件下的优势。所得研究成果可为寒冷地区海水淡化预处理工艺优化提供理论依据,并为国产陶瓷膜的实际应用提供运行参数参考。

1 试验材料和方法

1.1 海水淡化厂简介

本试验在青岛某设计规模为 $2.0\times 10^5\text{ m}^3/\text{d}$ 海水淡化厂的超滤中试装置中进行,该海水淡化厂的工艺流程如图 1 所示。试验采用的海水取自海水淡化厂的进水管。鉴于该海水淡化厂在夏季高温($21\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$)时期取水海域出现水母暴发现象,水母胶体进入海水淡化系统会影响工艺正常运行,导致无法准确评估超滤系统实际的运行性能。因此,本试验选择在常温($16.7\sim 20.9\text{ }^{\circ}\text{C}$)和低温($2.2\sim 5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)的条件下开展对比研究。试验期间中试装置进水水质如表 1 所示。

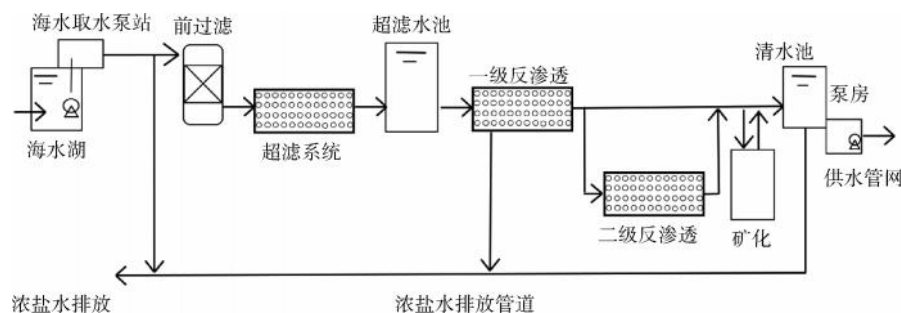


图 1 青岛某海水淡化厂一期项目工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Phase I Project of a Seawater Desalination Plant in Qingdao

表 1 试验期间中试装置进水水质

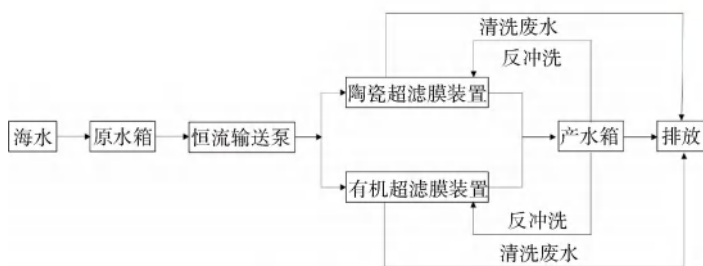
Tab. 1 Raw Seawater Quality Characteristics during the Experiment

水质指标	常温进水水质	低温进水水质	检测方法	检测仪器
电导率	42 940~45 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$	43 720~44 680 $\mu\text{S}/\text{cm}$	仪器测定	HACH 1000 多参数水质检测仪
温度	16. 7~20. 9 $^{\circ}\text{C}$	2. 2~5. 0 $^{\circ}\text{C}$	仪器测定	HACH 1000 多参数水质检测仪
pH 值	7. 72~8. 11	7. 51~8. 12	仪器测定	HACH 1000 多参数水质检测仪
浑浊度	5. 12~7. 96 NTU	0. 76~1. 90 NTU	仪器测定	HACH 2100P 浊度仪
高锰酸盐指数	1. 04~1. 88 mg/L	0. 35~0. 61 mg/L	高锰酸盐指数法	滴定装置
氨氮	0. 73~1. 16 mg/L	0. 30~0. 53 mg/L	纳氏试剂分光光度法	UV-1000 紫外可见分光光度计
TP	18~25 mg/L	7~14 mg/L	钼钼铵分光光度法	UV-1000 紫外可见分光光度计

1.2 试验中试装置

本试验在处理规模为 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 海水淡化超滤中试示范装置中开展,装置示意图和现场图如图 2 所示。超滤中试示范装置包括贮存海水的原水箱、去除海水杂质的过滤器、超滤膜系统。试验时,使用

恒流输送泵将海水输送至超滤膜中;试验结束后,在水流流向的后方设置反洗组件用于超滤膜结构的自动清洗。该装置设计流量可达到 $200 \text{ m}^3/\text{d}$,可实时监测超滤膜的产水量或产水通量变化情况,并可进行膜清洗。



(a) 装置工艺流程



(b) 陶瓷膜和有机膜实物

图 2 200 m³/d 超滤中试示范装置示意图和现场图

Fig. 2 Schematic Diagram and Scene Drawing of 200 m³/d Pilot-Scale UF Demonstration Unit

1.3 超滤膜种类和参数

本试验选用的无机陶瓷超滤膜由课题组基于一种高精度低成本双层陶瓷基中空纤维超滤膜的制备工艺自主研发^[14]。该国产陶瓷超滤膜以氧化铝(Al_2O_3)、氧化硅(SiO_2)、氧化锆(ZrO_2)、氧化钛(TiO_2)等无机陶瓷材料作为支撑体、经表面涂膜、高温烧制而成。外层为粒径均匀的纳米级氧化铝粉体,确保分离精度和耐久性;内层膜则采用微米级天然矿物或化工废弃物,降低制膜成本,同时解决了双层陶瓷膜烧结温度不匹配的问题,实现陶瓷膜在机械强度和分离精度方面的协同提升。检测结果显示其亲水性良好(表面水接触角 $<20^\circ$)。有机超滤膜选用某国外品牌的聚醚砜(PES)材质海水淡化超滤膜。进口有机超滤膜与国产无机陶瓷超滤膜的参数对比如表2所示,实物图如图3所示。

表2 有机超滤膜、无机陶瓷超滤膜参数对比

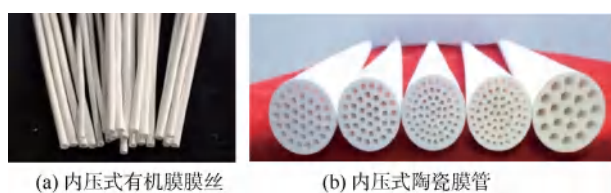
Tab. 2 Comparison of Parameters of Organic UF and Inorganic Ceramic UF Membranes

参数	进口有机超滤膜	国产陶瓷超滤膜
孔径/nm	25	30
长度/mm	1 537.5	1 810.0
外径/mm	220	250
膜面积/m ²	55	28
价格/(元·m ⁻²)	200	1 000~1 800
运行温度/℃	0~35	0~45

1.4 中试装置运行操作步骤

1.4.1 恒压模式运行

在恒压模式下,陶瓷超滤膜低温时无需添加絮凝剂;常温条件下需投加 5 mg/L 聚合氯化铝(PAC)。启动进水泵混合海水与絮凝剂,有机超滤膜装置均不添加絮凝剂。启动进水泵混合海水与絮



(a) 内压式有机膜膜丝

(b) 内压式陶瓷膜管

图3 内压式有机膜丝和陶瓷膜管实物图

Fig. 3 Photographs of Inside-Out Organic Membrane Fibers and Ceramic Membrane Tubes

凝剂(如需),调节进水压力预设值,陶瓷膜为 0.05、0.10 MPa 或 0.15 MPa,有机膜为 0.02、0.03 MPa 或 0.04 MPa,启动超滤膜系统并监测产水通量。对于有机超滤膜装置,进水中不添加絮凝剂,进水压力设置为 0.02、0.03 MPa 或 0.04 MPa 的预设值,随后启动系统并监测产水通量,试验中每 5 min 记录产水量,每 20 min 检测产水的淤泥密度指数(SDI)值和浑浊度。若产水 SDI>3、浑浊度>0.2 NTU,或陶瓷膜系统运行达 240 min、有机膜系统运行 60 min 后且产水通量低于 $91 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (即产水量为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$)时,试验终止。

1.4.2 恒流模式运行

在恒流模式下,陶瓷超滤膜系统低温运行不加絮凝剂,常温投加 $5 \text{ mg}/\text{L}$ PAC;有机超滤膜装置仍不投加絮凝剂。启动进水泵混合海水与絮凝剂(如需),调节进水流量至 5 、 $6 \text{ m}^3/\text{h}$ 或 $7 \text{ m}^3/\text{h}$ 的预设值,启动系统后并监测跨膜压差和产水量。试验期间每 5 min 记录产水量,每 20 min 检测 SDI 值和浑浊度。当产水 SDI 值>3、浑浊度>0.2 NTU,或跨膜压差提高 25%,试验终止。

2 结果和讨论

2.1 恒压运行下陶瓷膜和有机膜产水通量比较

图 4 展示了恒压运行模式下陶瓷膜与有机膜在不同温度条件下的产水通量变化。如图 4(a)和图 4(b)所示,在常温($16.7 \sim 20.9 \text{ }^\circ\text{C}$)条件下,2 种膜在运行初期均因“压实现象”导致通量快速衰减,随后保持较稳定的通量。在较低运行压力下,膜的单周期运行时间显著延长。当陶瓷膜在 0.15 MPa 压力下运行时,其产水通量从初始的 $483 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 在 60 min 内骤降至 $204 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而相同压力下有机膜的通量下降速率更快;在 0.05 MPa 压力下,陶瓷膜则需 180 min 才降至相同通量水平。

如图 4(c)和图 4(d)所示,低温($2.2 \sim 5.0 \text{ }^\circ\text{C}$)

条件下,水的黏度升高导致 2 种膜的初始通量均下降。与常温相比,在 0.05、0.10、0.15 MPa 压力下,陶瓷膜的初始通量分别降低 15.9%、27.9%、34.4%,而有机膜的降幅则较小分别为 11.5%、8.8%、1.9%。值得注意的是,低温进水水质(表 1)显著优于常温条件,尤其浑浊度由 7.96 NTU 降至 0.76 NTU,表明水质改善并未显著缓解低温对膜通量的抑制作用。

结构差异进一步解释了陶瓷膜的性能表现:内压式陶瓷膜的流体需通过多孔支撑层排出[图 3(b)],高黏度水导致长距离流道的过滤阻力增大。然而,即使在低温 0.05 MPa 压力下,陶瓷膜仍能维持 $179 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的通量,满足设计产水量($\geq 5 \text{ m}^3/\text{h}$);相比之下,有机膜在 0.02 MPa 压力下产水量低于 $5 \text{ m}^3/\text{h}$,需将跨膜压差提升至 0.03 MPa 以上才能稳定达到设计标准。

2.2 恒流运行下陶瓷膜和有机膜的运行性能比较

图 5 展示了恒流运行模式下常温和低温时陶瓷膜与有机膜的跨膜压差变化规律。如图 5(a)和图 5(b)所示,在常温条件下,陶瓷膜的跨膜压差随流量增加显著上升且波动幅度较大;当流量为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,跨膜压差为 0.06~0.08 MPa,而当流量增加至 $7 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,跨膜压差峰值超过 0.1 MPa。相比之下,有机膜在相同条件下的跨膜压差波动较小且相对平稳,仅在运行约 120 min 后出现快速上升趋势。

如图 5(c)和图 5(d)所示,在低温条件下,2 种膜的跨膜压差均呈现“初期平稳-后期增长”趋势。尽管低温进水浑浊度(1.9 NTU)低于常温(5.12 NTU),但高于恒压模式下的进水浑浊度(0.76 NTU),导致跨膜压差增长速率较常温试验减缓。然而,在相同产水量条件下(如 $5 \text{ m}^3/\text{h}$),低温时的跨膜压差显著高于常温。

得益于陶瓷膜的机械强度优势,使得其在低温下可通过提升跨膜压差增强过滤推动力,确保了陶瓷膜在低温工况下仍能保障反渗透单元的进水水量及水质稳定性。

2.3 恒流运行模式下陶瓷膜和有机膜产水量比较

图 6 展示了恒流运行模式下常温($16.7 \sim 20.9 \text{ }^\circ\text{C}$)和低温($2.2 \sim 5.0 \text{ }^\circ\text{C}$)时陶瓷膜和有机膜的产水量比较结果。在不同进水温度试验条件下,陶瓷膜的产水量随着跨膜压差的增大而增加。在 0.05、0.1 MPa 和 0.15 MPa 3 个跨膜压差下,常温

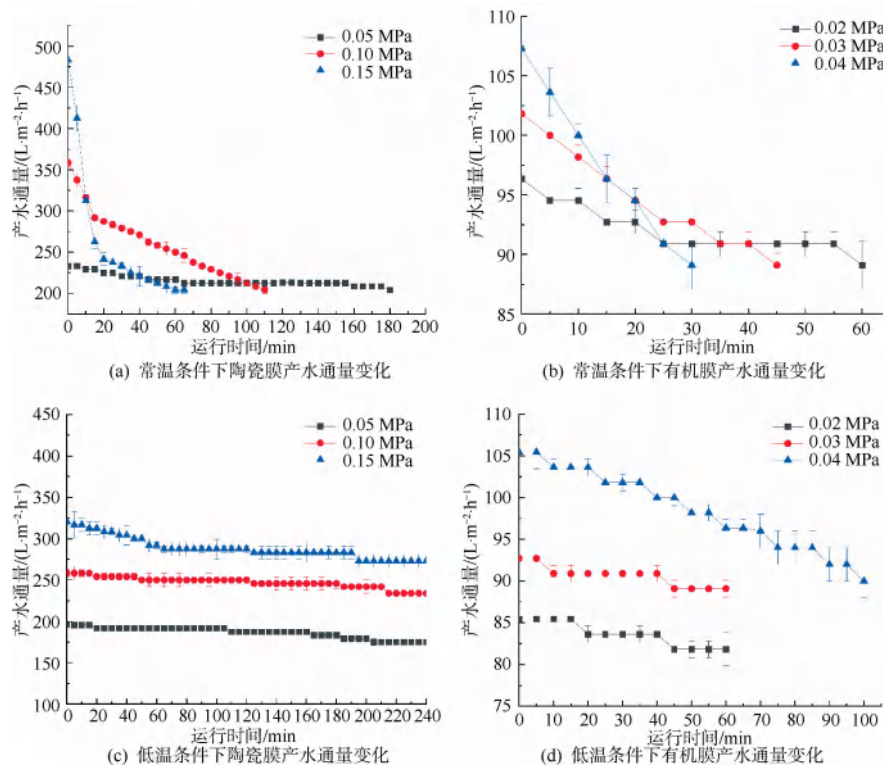


图 4 恒压运行模式常温和低温条件下陶瓷膜和有机膜产水通量变化

Fig. 4 Changes in Water Flux of Ceramic Membranes and Organic Membranes under Normal Temperature and Low Temperature Conditions in Constant Pressure Operation Mode

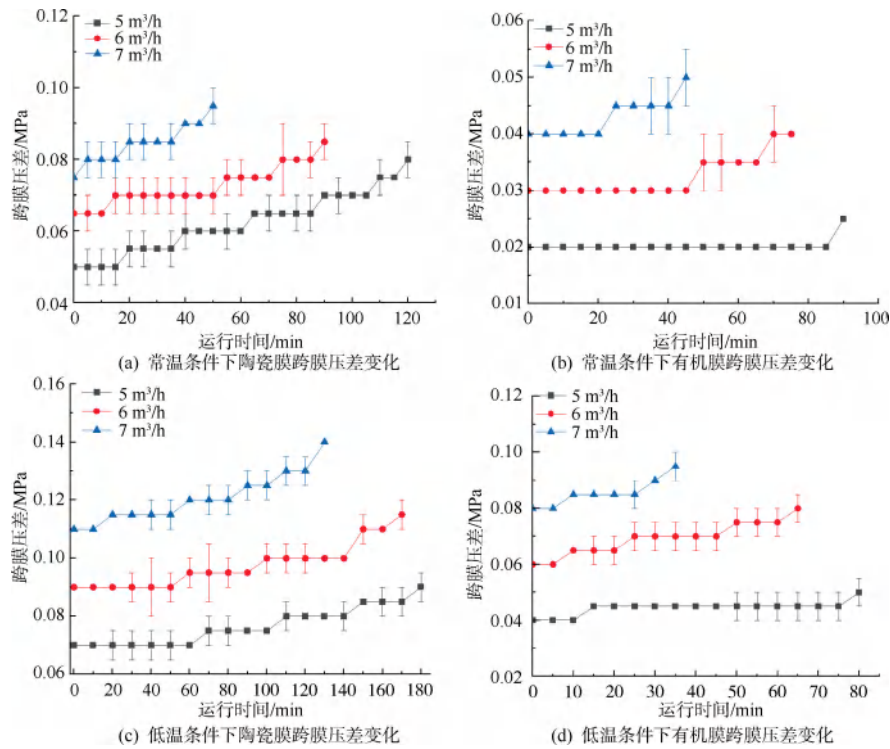


图 5 恒流运行模式常温和低温条件下陶瓷膜和有机膜跨膜压差变化

Fig. 5 TMP Changes of Ceramic and Organic Membranes under Normal and Low Temperature Conditions in Constant Flow Operation Mode

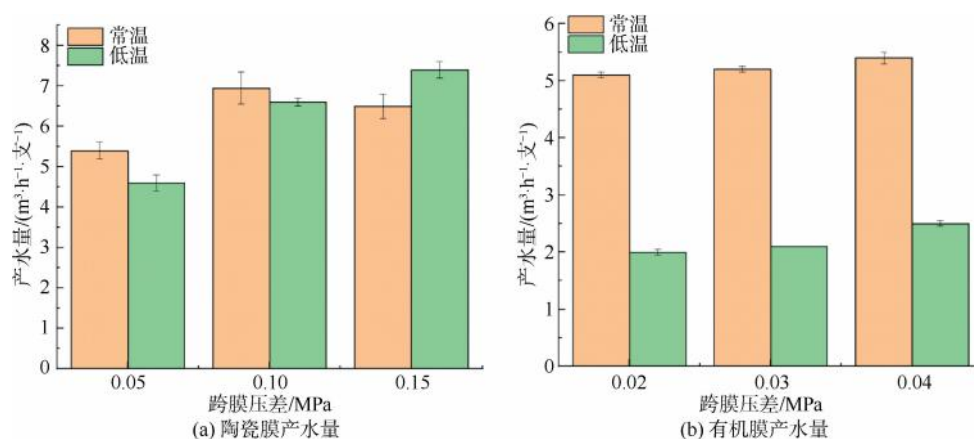


图 6 恒流运行模式下不同进水水温时陶瓷膜和有机膜的产水量比较

Fig. 6 Comparison of Water Production between Ceramic and Organic Membranes under Constant

Flow Operation in Different Inflow Water Temperature

产水量分别约为 5.5、7.0 m³/h 和 6.5 m³/h;低温产水量分别约为 4.5、6.5 m³/h 和 7.5 m³/h。在恒流运行模式下,陶瓷膜可通过提高跨膜压差来增加过滤推动力,从而维持稳定的产水量。

有机膜的产水量同样随跨膜压差升高而增加。在 0.02、0.03 MPa 和 0.04 MPa 3 个跨膜压差下,常温产水量分别约为 5.2、5.4 m³/h 和 5.6 m³/h;低温产水量分别约为 2.0、2.2 m³/h 和 2.5 m³/h。这说明提高跨膜压差对有机膜产水量的提升效果有限,与陶瓷膜相比,低温条件对有机膜的影响更为显著,其产水量仅为常温条件下的 37%~41%。

3 结论

(1) 在恒压运行模式下,2 种膜均因“压实现象”导致初期通量快速衰减,但陶瓷膜在低压力下单周期运行时间显著延长,且陶瓷膜的产水通量始终显著高于有机膜。低温条件下,水黏度升高导致 2 种膜初始通量下降,陶瓷膜降幅更大,而有机膜降幅相对较小;但陶瓷膜仍满足设计产水量,而有机膜需将跨膜压差提升至 0.03 MPa 以上才能达标。尽管低温时期进水浑浊度显著降低,但水质改善未能缓解低温对有机膜产水通量的抑制作用。

(2) 在恒流运行模式下,常温时陶瓷膜的跨膜压差随流量升高显著波动,而有机膜跨膜压差波动较小且更稳定。低温时 2 种膜跨膜压差均呈“初期平稳-后期增长”趋势,但低温跨膜压差增长速率较常温时减缓。陶瓷膜通过提升跨膜压差维持反渗透进水水量及水质稳定;而有机膜跨膜压差提升对产水量的促进作用有限。

(3) 在恒流运行模式下,陶瓷膜可通过提高跨膜压差来增加过滤推动力,从而维持稳定的产水量;相比之下,低温条件对有机膜的影响更为显著,其产水量仅为常温条件下的 37%~41%。

参考文献

- [1] 郝晓地,王邦彦,曹达敏,等. 海水淡化工程全球大规模应用发展趋势[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 18-24.
HAO X D, WANG B Y, CAO D Q, et al. Global trends of desalination towards large-scale engineering applications [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10): 18-24.
- [2] ALENEZI A, ALABAIDLY Y. Emerging technologies in water desalination: A review and future outlook [J]. Energy Nexus, 2025, 17: 100373. DOI: 10.1016/j.nexus.2025.100373.
- [3] 苏慧超,李逢时,徐国荣,等. 反渗透海水淡化系统混合膜设计[J]. 净水技术, 2024, 43(1): 132-139.
SU H C, LI F S, XU G R, et al. Hybrid membrane inter-stage design for RO seawater desalination system [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(1): 132-139.
- [4] 胥建美,任建波,谢春刚,等. 海水淡化耦合技术的发展应用与展望[J]. 净水技术, 2021, 40(s2): 46-50.
XU J M, REN J B, XIE C G, et al. Technical status and prospects of hybrid membrane-thermal seawater desalination [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(s2): 46-50.
- [5] SONI S, JINDAL M K, TEWARI P K, et al. Potential and challenges of desalination technologies for arid and semiarid regions: A comprehensive review[J]. Desalination, 2025, 600: 118458. DOI: 10.1016/j.desal.2024.118458.
- [6] 廖文文. 陶瓷膜过滤去除煤矿矿井水悬浮物[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 100-106.
LIAO Q W. Ceramic membrane for filtration of SS removal in coal mine water [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 100-106.

(下转第 129 页)

- LI J X. Preparation and characterization of magnetic biochar based on iron sludge and its application on activation of persulfate for degrade of tetracycline [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023.
- [9] YANG Y, XU W, WANG Y. Progress of CCUS technology in the iron and steel industry and the suggestion of the integrated application schemes for China [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450: 138438. DOI: 10.1016/j.cej.2022.138438.
- [10] 张丽清, 刘新锋, 周华锋, 等. 由工业废料铁泥制备 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的研究[J]. 化学工业与工程, 2011, 28(1): 35-38, 52.
- ZHANG L Q, LIU X F, ZHOU H F, et al. Study on preparation of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ from industrial waste iron slime[J]. Chemical Industry & Engineering, 2011, 28(1): 35-38, 52.
- [11] 杨直渝, 朱科, 许镇浩, 等. 基于过硫酸盐高级氧化技术降解抗生素的研究进展[J]. 能源环境保护, 2023, 37(5): 1-14.
- YANG Z Y, ZHU K, XU Z H, et al. Research progress on antibiotic degradation by advanced oxidation technology based on persulfate [J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2023, 37(5): 1-14.
- [12] HUANG L H, YAO Y F, ZHU K, et al. Activation of peroxymonosulfate by CoFe_2O_4 layered catalyst derived from steel pickling sludge for the decolorization of tartrazine solution[J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 56: 104462. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104462.
- [13] HE X, YANG X, ZHANG C Y, et al. Catalytic degradation of bisphenol A by heterogeneous bimetal composite carbon in the PMS and H_2O_2 systems: Performance and mechanism [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 414: 137571. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137571.
-
- (上接第 55 页)
- [7] 张诗洋, 单历元, 廖松义, 等. 陶瓷膜在废水处理领域中的研究进展 [J]. 工业水处理, 2021, 41(4): 31-36.
- ZHANG S Y, SHAN L Y, LIAO S Y, et al. Research progress of ceramic membrane in wastewater treatment [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(4): 31-36.
- [8] GUO X, WANG H, WU C, et al. Molecular dynamics study on water desalination performance and related mechanism of hydrophobic $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ceramic membrane [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 202: 123739. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123739.
- [9] 张伟, 樊震坤, 杨东亮, 等. Al_2O_3 平板陶瓷膜的工业化制备与应用展望[J]. 净水技术, 2019, 38(s2): 6-10, 59.
- ZHANG W, FAN Z K, YANG D L, et al. Industrial preparation and application prospect of Al_2O_3 flat ceramic membrane [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(s2): 6-10, 59.
- [10] LIANG H, GONG W J, CHEN J, et al. Cleaning of fouled ultrafiltration (UF) membrane by algae during reservoir water treatment [J]. 2008, 220(1/2/3): 267-272. DOI: 10.1016/j.desal.2007.01.033.
- [11] 徐振峰, 陈文松, 黎钱波, 等. 陶瓷膜工艺在浙江省农村饮用水处理中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(3): 39-45.
- XU Z F, CHEN W S, LI Q B, et al. Application of ceramic membrane process in rural drinking water treatment in Zhejiang Province [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 39-45.
- [12] ARUMUGHAM T, KALEEKKAL N J, GOPAL S, et al. Recent developments in porous ceramic membranes for wastewater treatment and desalination: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 293: 112925. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112925.
- [13] SONG X J, ZHANG Y J, ABDEL-GHAFAR H M, et al. Polyamide membrane with an ultrathin GO interlayer on macroporous substrate for minimizing internal concentration polarization in forward osmosis [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 412: 128607. DOI: 10.1016/j.cej.2021.128607.
- [14] SONG X J, ZHANG Y J, WANG Y C, et al. Nanocomposite membranes embedded with dopamine-melanin nanospheres for enhanced interfacial compatibility and nanofiltration performance [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 242: 116816. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116816.