

基于聚烯烃膜的海水淡化-污水处理联动工艺

靳顺龙*, 任晓芳, 孙亚军, 况 武, 王 振, 曹 阳

(北京碧水源膜科技有限公司, 北京 101407)

摘要: 海水淡化和污水处理是目前解决水资源危机的重要手段,然而两种技术都面临运行成本较高的问题.通过构建基于聚烯烃膜(PE)的正渗透(FO)海水稀释耦合反渗透(RO)的海水淡化工艺(PEFO-RO),同步实现污水减量化.研究发现,PEFO膜依靠其薄的特性,在海水为汲取液、生活污水为原液时,可以实现高达 $32\text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的渗透通量,是目前常规膜渗透通量的 2 倍以上.此外,汲取液的流速或浓度越高,膜的渗透通量越大.通过该工艺,海水可以被稀释 1.6 倍,盐的质量分数由 2.5% 降至 1.3%,同时污水被浓缩 1.9 倍,大幅实现减量化处理.此外,PEFO 对污水中的 TDS、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、TN、TP 和 COD 的截留率分别达到了 95.1%、98.1%、87.7%、61.2%、99.7%、96.8%、73.9%、88.6% 和 86.9%,实现了对污染物的有效截留.此外,相较于传统 RO,PEFO-RO 工艺有望大幅降低高压泵投资,并且每年降低 70% 的电费.

关键词: FO; 聚烯烃; 海水淡化; 污水

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2025)01-0146-10

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2025.01.016

随着全球范围内水资源的持续紧缺和环境污染问题的日益突出,水处理技术的创新和发展变得尤为迫切.反渗透膜法海水淡化技术(图 1^[1])经过数十年的发展,已成为海水淡化及苦咸水脱盐的主要手段之一,约占全球海水淡化市场份额的 65%^[2].尽管膜法海水淡化技术所用的海水淡化膜、高压泵和能量回收系统在技术上取得了快速进步,但能耗成本仍是阻碍海水淡化系统发展的主要因素,其中电耗成本占总成本的 44%,占运行成本(除建设成本外的其他成本)的 70%^[3].

为了解决上述问题,有些研究者利用正渗透技术将市政污水作为供给液,海水作为汲取液,回收污水中淡水资源的同时,稀释海水或后期产生的浓盐

水,降低海水淡化能耗.据相关文献报道,废水做为正渗透供给液处理海水及系统产生的浓盐水,可降低海水淡化能耗约 25%,如图 2 所示^[4].此外,利用正渗透过程还能反洗反渗透膜,以恢复其分离性能,延长使用寿命,降低造水成本.这表明正渗透-反渗透耦合技术在解决海水淡化能耗及系统产生的浓盐水方面有双重功效,具有良好的发展及应用前景.

目前,基于海水驱动正渗透技术处理市政污水回用的研究基本以实验室规模为主.张壹超等^[5]以天然海水作为正渗透汲取液,对比研究 CTA-ES 和 TFC-ESFO 在不同膜朝向和错流速度下的清水通量和截留污染物效果.该研究中,两种 FO 对 COD、

收稿日期: 2024-09-02; 修改稿收到日期: 2024-12-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3810904)

第一作者简介: 靳顺龙(1990-),男,山东泰安人,博士,工程师,主要研究方向为有价值物料回收、反渗透膜元件开发、膜法水处理技术、家用净水等领域. * 通讯作者, E-mail: 946026112@qq.com

引用本文: 靳顺龙,任晓芳,孙亚军,等.基于聚烯烃膜的海水淡化-污水处理联动工艺[J].膜科学与技术,2025,45(1): 146—155.

Citation: Jin S L, Ren X F, Sun Y J, *et al.* Combined process of seawater desalination-sewage treatment based on polyolefin membrane[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2025, 45(1): 146—155.

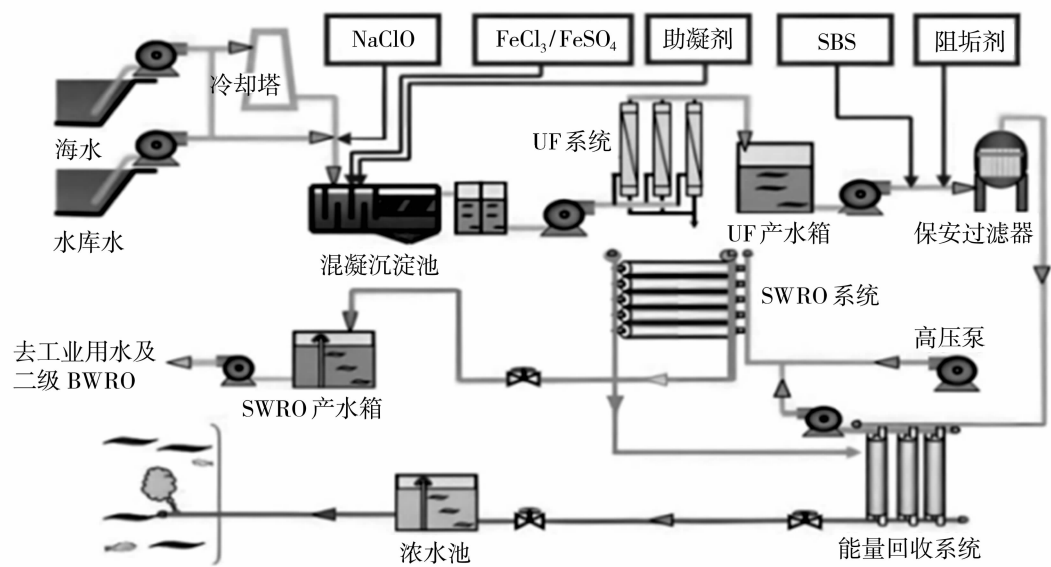


图 1 海水淡化工艺流程^[1]

Fig. 1 Seawater desalination process^[1]

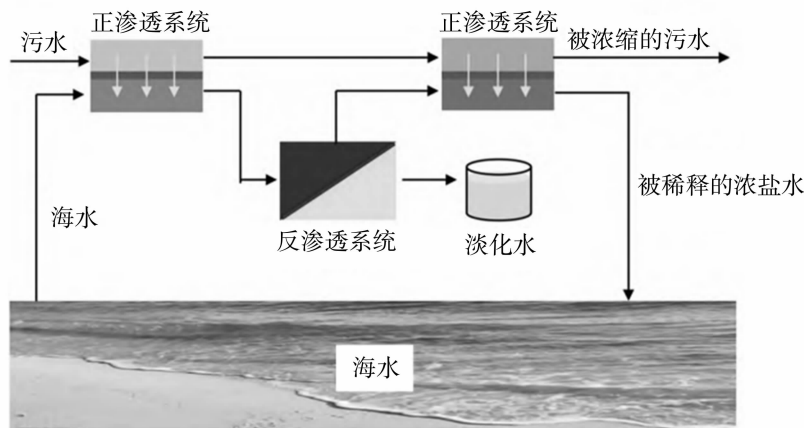


图 2 正渗透-反渗透耦合工艺进行海水淡化示意图^[4]

Fig. 2 Schematic diagram of seawater desalination by forward osmosis-reverse osmosis coupling process^[4]

氨氮的截留率均在 92% 以上,对 TN 的截留率约为 83%,对 TP 的截留率高达 99%,但渗透通量较低,均小于 $14 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。郭文萱等^[6]构建“市政污水-高盐废水-海水”的串联式正渗透污水同步浓缩工艺,探索了膜朝向、错流速率等对 PA-TFC 膜渗透性能的影响,研究发现该类型膜对 COD、TN、TP、 NH_4^+ 的截留率分别达到了 97.08%、71.07%、98.16% 和 68.17%,膜的渗透通量大约在 $4 \sim 24 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

鉴于 FO 膜的性能受多种因素的制约,包括材料本身的特性、厚度、孔隙率、表面电荷、弯曲度以及粗糙度等,故不同类型的膜性能(特征)各异^[7]。近年来,随着技术的不断进步,以聚烯烃膜为基底,聚酰

胺为脱盐层的反渗透膜制造技术日益成熟,其市场占比也随之扩大。聚烯烃膜凭借其 $20 \mu\text{m}$ 的超薄厚度及优异的透水性能,在正渗透领域具备得天独厚的优势。

然而在具体应用中,聚烯烃膜的性能不仅由其物理属性决定,还受操作条件的影响,诸如汲取液与原料液的流速及浓度等。通过合理调整这些操作参数,可进一步提升膜的渗透通量及污染物截留效率。此外,聚烯烃膜的抗污染性能亦是其工程应用的重要考量因素。然而,目前尚未开展基于聚烯烃膜(PE)的正渗透(FO)海水稀释耦合反渗透(RO)的海水淡化工艺(PEFO-RO)研究,缺乏对其运行工艺参数及操作流程的认知。此外,鉴于生活污水中含

有的污染物种类较多,其对海水淡化后水质可能产生的影响尚需科学验证.同时,与传统海水淡化技术相比,PEFO-RO 工艺的经济性也是其工程应用的核心指标.综上所述,本研究旨在通过构建 PEFO-RO 工艺,探究其运行条件、污染物截留情况,并进行详尽的成本分析,从而为 PEFO-RO 工艺的实施提供坚实的理论依据.

1 材料与装置

1.1 原料液和汲取液

实验分两个阶段进行,阶段 1 采用模拟海水做

汲取液(DS),模拟生活污水做原液(FS1),探索 DS 的浓度和流速对渗透通量和透盐率的影响,其中 DS 使用氯化钠配置,TDS 分别为 20 000 和 30 000 mg/L,FS1 使用氯化钠和葡萄糖配制,TDS 约为 1 000 mg/L,COD 约为 500 mg/L.阶段 2,DS 同样使用氯化钠模拟,质量浓度约为 30 000 mg/L,原液使用实际污水(FS2).在阶段 2,FS2 首先使用 MBR 产水,运行水量约 12 t 后,为了观察膜被污染后的性能变化,将絮凝沉淀处理后的生活污水作为进水.MBR 产水、处理后的生活污水和模拟海水组成成分见表 1.

表 1 实验用水水质成分

Table 1 Water quality composition of experimental water

水样	TDS/ (mg · L ⁻¹)	电导率/ (μS · cm ⁻¹)	pH	COD/ (mg · L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg · L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg · L ⁻¹)	K ⁺ / (mg · L ⁻¹)
MBR 产水	1 252.0	2 586.0	7.9	17.9	21.5	39.3	12.2
处理后生活污水	912.5	1 788	8.7	102.3	23.4	36.3	22.0
模拟海水	25 680.0	50 490.0	7.7	<1	3.5	11.4	57.1

水样	Na ⁺ / (mg · L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg · L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg · L ⁻¹)	浊度/NTU	SS/ (mg · L ⁻¹)	TN/ (mg · L ⁻¹)	TP/ (mg · L ⁻¹)
MBR 产水	471.6	204.5	212.4	5.1	8.6	15.9	0.2
处理后生活污水	648.2	240.3	156.7	28.8	34.29	41.1	2.1
模拟海水	12 132.1	18 669.1	57.2	1	<1	<1	<1

1.2 实验装置

实验装置主要包括:膜系统、集水系统和电控系统,其中,膜系统由 3 支 4040 正渗透元件串联组成,集水系统由 4 个储水量为 1 t 的塑料桶组成,电控系统包括泵启停、流量计和压力表数据显示与传输系统.此外,为了测试海水经正渗透预处理后再进行海水淡化的可行性,在 DS 产水后增加 RO 系统,观察运行压力和产水水质.整套系统实物图如图 3 所示.



图 3 PEFO-RO 联动装置图

Fig. 3 Diagram of PEFO-RO linkage device

1.3 PEFO 膜片及元件

1.3.1 PEFO 膜片

PEFO 膜片是由北京碧水源膜科技有限公司自主研发及生产,该膜以聚乙烯为基膜,通过界面聚合制作而成.与常规正渗透膜相比,该膜具有以下优势:(1) 厚度薄:厚度仅有 20 μm,是常规膜片厚度的 1/7,可大幅提高渗透通量;(2) 抗拉强度大:抗拉强度达到 120~140 MPa,是常规无纺布膜片的 1.5~2 倍;(3) 耐受较高的正向压力及背向压力:PEFO 可耐受 5~6 MPa 的正向压力和 0.7 MPa 的背向压力,其中背向压力耐受度是常规无纺布膜的 3 倍以上;(4) 制作工艺简单且环保:无需铸膜,工艺流程较短,生产可控性强,且可以大幅减少有机物的使用,工艺更加环保.

1.3.2 PEFO 元件

PEFO 元件具有特殊的流道结构,其中中心管的中间部位被堵住,汲取液从中心管一端进入,然后在膜袋内流动,最后从中心管的后端流出;原液在膜面流动,流动过程中实现汲取液的稀释和原液的浓缩.膜元件结构如图 4 所示.

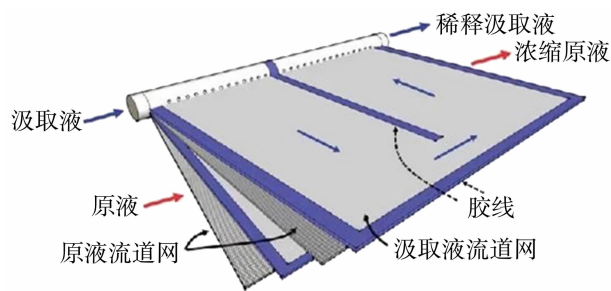


图 4 PEFO 元件结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PEFO element structure

1.4 计算方法

1.4.1 水通量

$$J_w = \frac{V_1 - V_0}{S} \quad (1)$$

式中: J_w 为渗透通量, $L/(m^2 \cdot h)$; V_1 、 V_0 分别为 DS 的产水和进水流量, L/h ; S 为 PEFO 元件的面积, 这里单支面积为 $2.87 m^2$ 。

1.4.2 汲取液测污染物透过率 R_{DS}

$$R_{DS} = \frac{C_{F0}V_{F0} - (C_{Dt}V_{Dt} - C_{D0}V_{D0})}{C_{F0}V_{F0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: C_{F0} 、 C_{D0} 分别为原液和汲取液初始污染物浓度, mg/L ; C_{Dt} 为运行 t h 时汲取液污染物浓度, mg/L ; V_{F0} 和 V_{D0} 分别为原液和汲取液初始流量, L/h ; V_{Dt} 为运行 t h 时汲取液流量, L/h 。

1.4.3 单位产水能耗 $SEC^{[8]}$

(1) FO 过程的 SEC

$$SEC_{FO} = \frac{\Delta p_{FO}}{\eta_{pump}} (F_{draw} + \frac{F_p}{r_{FO}}) \quad (3)$$

式中: Δp_{FO} 为 FO 过程的压降, 本研究假设为 $0.01 MPa$; η_{pump} 为泵的效率, 本研究假设为 0.85 ; F_{draw} 为汲取液进水流量, m^3/s ; F_p 为汲取液产水流量, m^3/s ; r_{FO} 为 FO 过程中生活污水的回收率, %。

(2) RO 过程的 SEC(有能量回收装置)

$$SEC_{RO} = \frac{p_{RO} - p_0 - \eta_{EDR}(1 - r_{RO})(p_{RO} - \Delta p_{RO} - p_0)}{\eta_{pump}} \frac{F_p}{r_{RO}} \quad (4)$$

式中: p_{RO} 为 RO 过程的运行压力, MPa ; p_0 为大气压, Pa ; r_{RO} 为 RO 过程的水回收率, %; η_{EDR} 为能量回收装置的效率, 本研究为 0.95 ; Δp_{RO} 为 RO 过程的压降, 本研究为 $0.02 MPa$ 。

1.5 分析方法

实验过程中各水质指标的分析方法如下: COD 采用重铬酸钾法; TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; TP 采用钼酸铵分光光度法; K^+ , Na^+ ,

Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- 均采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)(Optima 8000)。SS 采用重量法测定; TDS 测试采用美国麦隆 6P 便携式电导率仪; 浊度采用 YC-9200 多参数水质检测仪。

2 结果与讨论

2.1 单一氯化钠条件下的性能研究

2.1.1 流速对渗透通量和汲取液产水盐浓度的影响

根据文献报道, 通过提高错流速度可以在膜面层形成湍流, 但并不能完全消除浓差极化对水通量的影响, 且速度越大装置运行能耗越大, 水通量下降趋势也会越快, 也会造成系统稳定性变差^[8]。因此, 本研究通过探索错流速度对系统运行的影响, 为后续工程化应用提供理论支持。

图 5 显示了在模拟海水流量分别为 300 和 500 L/h 时, 随着 FS1 流量从 400 增加至 900 L/h 时, 渗透通量的变化情况。从图 5 中可以看出, 模拟海水流量越大, 渗透通量越高。此外, 随着 FS1 流量的增加, 渗透通量分别从 25 $L/(m^2 \cdot h)$ 增加至 28.7 $L/(m^2 \cdot h)$ 和从 28.5 $L/(m^2 \cdot h)$ 增加至 32.2 $L/(m^2 \cdot h)$ 左右, 通量分别提高了 14.8% 和 13.0%。在 FO 过程中, 由于脱盐层与生活污水接触, 会产生外浓缩型的浓差极化(ECP)现象, 通过增加错流速度会减小渗透压差^[9]。因此, 生活污水流量的增加的确缓解了浓差极化带来的通量损失现象, 使得渗透通量有所提升。

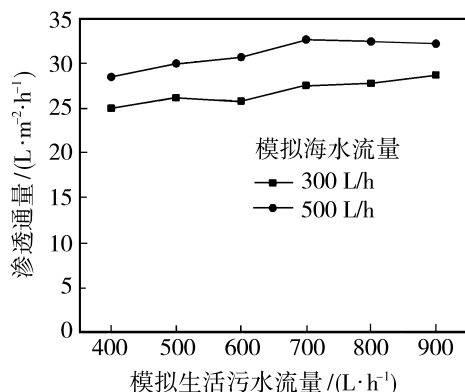


图 5 不同海水流量下生活污水流量对渗透通量的影响

Fig. 5 Influence of domestic sewage flow rate on permeation flux under different seawater flow rates

图 6 展示了在模拟海水流量分别为 300 和 500 L/h 时, 随着 FS1 流量从 400 增加至 900 L/h 时, 汲取液产水 TDS 的变化情况。可以看到, 随着模

拟海水流量由 300 L/h 增加至 500 L/h, 汲取液产水 TDS 由 11 200~12 950 mg/L 增高至 14 670~15 490 mg/L, 这主要是由于仅增加模拟海水流量的情况下, 从原水中渗透过膜的水量变化不大, 导致海水流量越高, 稀释倍数越小. 在本研究中, 模拟海水流量分别为 300 和 500 L/h 时, 稀释倍数分别约为 2.5 和 2. 然而, 对于模拟海水流量一定时, FS1 流量的变化对汲取液产水 TDS 的影响较小.

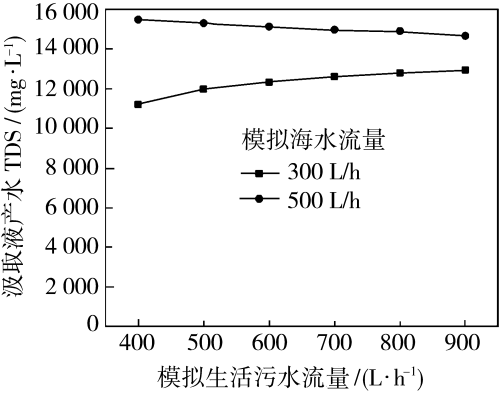


图 6 不同生活污水流量下 DS 流量对渗透通量的影响

Fig. 6 Influence of seawater flow rate on permeation flux under different domestic sewage flow rate

2.1.2 通量和汲取液产水 TDS 的影响

DS 浓度的高低决定渗透压的高低, 进一步决定渗透通量的大小. 在本研究中, DS 质量浓度分别为 28 500 和 20 000 mg/L 时的渗透压分别为 2.4 和 1.7 MPa, 预示着在 DS 质量浓度为 28 500 mg/L 时系统有更高的渗透通量.

从图 7 可以看出, 随着 FS1 流量由 400 增加至 900 L/h, 在汲取液盐质量浓度分别为 28 500 和 20 000 mg/L 时对应的渗透通量分别在 25~29 L/(m²·h) 和 22~26 L/(m²·h). 因此, 即便在海水浓度较低的地区使用, PEFO 元件也可保持较高的渗透通量. 此外, 与其他类型的 FO 相比, PEFO 元件在渗透通量上也具有明显优势. 如与刘舒悦^[10]的研究相比, 在汲取液质量浓度为 65 550 mg/L 时, 三醋酸纤维(CTA)膜的最高渗透通量仅为 12.94 L/(m²·h). TFC 膜(多孔聚砜)在海水电导率为 30.5~38.0 mS/cm 时, 最高渗透通量为 13.27 L/(m²·h)^[5]. PEFO 相较于 CTA 和 TFC 膜, 渗透通量大约可以提高 2 倍以上, 显示出其优异的渗透特性.

图 8 展示了在 DS 质量浓度分别为 28 500 和 20 000 mg/L 时汲取液产水 TDS 的变化. 从图 8 中可以看出, 在 DS 质量浓度为 28 500 mg/L 时, 产水

TDS 在 11 200~12 950 mg/L, 而 DS 质量浓度为 20 000 mg/L 时, 产水 TDS 在 11 340~11 730 mg/L. 在海水盐浓度存在变化时, 产水 TDS 可能存在小范围的波动, 但通过控制污水流速, 这种波动不会对后续反渗透系统的运行带来明显影响.

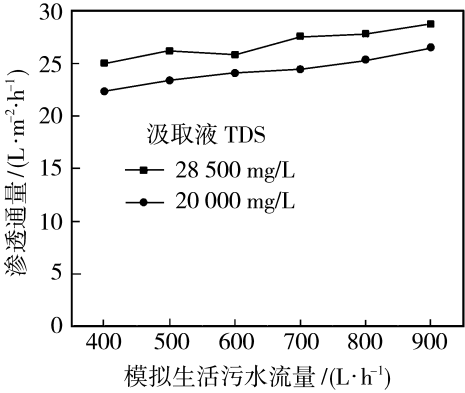


图 7 在汲取液流量为 300 L/h 时不同盐浓度下生活污水流量对渗透通量的影响

Fig. 7 Effect of domestic sewage flow rate on permeation flux under different salt concentrations when the flow rate of the extraction liquid is 300 L/h

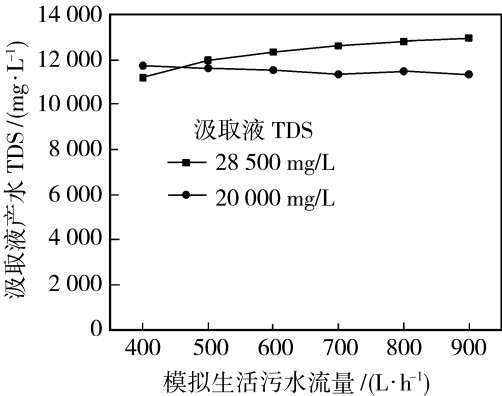


图 8 在汲取液流量为 300 L/h 时不同盐浓度下生活污水流量对汲取液产水 TDS 的影响

Fig. 8 The influence of domestic sewage flow rate on TDS of extracted liquid under different salt concentrations when the extracted liquid flow rate is 300 L/h

2.2 实际污水条件下的性能研究

根据阶段 1 的探索, 由于汲取液和 FS1 流量均会对通量和汲取液产水 TDS 带来影响. 当汲取液流量恒定时, 生活污水流量的变化对海水产水 TDS 的变化影响较小, 而当生活污水流量恒定时, 增大汲取液流量, 产水 TDS 呈增加趋势. 由于汲取液产水 TDS 值会影响后续反渗透系统的运行压力, 因此本研究希望在渗透通量较高的情况下, 汲取液产水

TDS 尽可能小,因此,选择了汲取液流量为 300 L/h,原水流量为 400 L/h 作为阶段 2 的运行条件。

2.2.1 运行时间对渗透通量的影响

在汲取液质量浓度为 30 000 mg/L 时,随着运行时间的增加,渗透通量逐渐下降,并且在前 10 min 下降较为明显,由 17.9 降至 16.4 L/(m²·h),之后呈缓慢下降趋势,在运行 90 min 时降至 15.8 L/(m²·h)。相较于使用 FS1 进行的实验,使用实际生活污水后,渗透通量有明显的下降。相同进水速率和汲取液盐浓度下,实际生活污水条件的渗透通量比模拟条件约低 44%。实际生活污水较高的浊度(约 29 NTU)和 SS 含量(约 35 mg/L),会加快膜表面的污堵。具体表现为,一方面,沉积的污染物会给水分子的跨膜扩散增加额外的阻力,导致水通量发生衰减;另一方面,沉积的污染物会引发更严重的浓差极化,有效渗透压差降低,水通量下降^[11]。因此,为了保证系统稳定运行,进水水质需要进行严格处理,降低污染物对 FO 系统的影响。

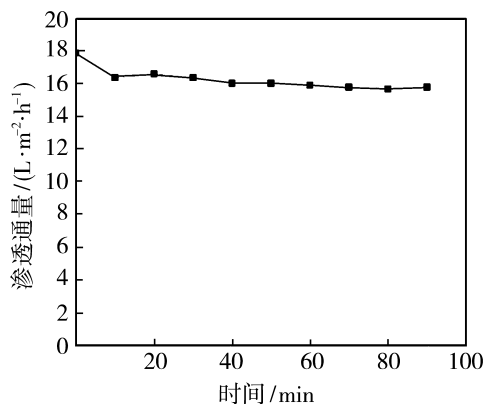


图 9 FS2 条件下运行时间对渗透通量的影响

Fig. 9 Effect of running time on permeation flux under actual sewage conditions

2.2.2 实际生活污水下的运行性能

正渗透技术是一种利用渗透压差将水通过半透膜而溶质无法通过半透膜,从而实现水和溶质分离的水处理技术。水质对正渗透技术的运行效果具有重要影响。水质中的杂质和污染物如果过多,容易堵塞半透膜,影响水的正常流动,从而降低正渗透的效率。在本研究中,考察了两种不同的进水水质对 PEFO 的性能影响,以进一步明确水质对正渗透渗透通量的影响。

当 MBR 产水作为进水时,水中的 SS(约 8.6 mg/L)和浊度(5.1 NTU)等污染物水平较低,系统处理生活污水 14.4 t 后,渗透通量仍维持在

18.4~21.2 L/(m²·h),性能较稳定。然而,当进水切换为经絮凝沉淀处理后的生活污水时,由于絮凝效果达不到 MBR 的预处理能力,在系统运行了 17 t 左右时,渗透通量开始不断下降,运行到 30 t 时,渗透通量降至 8.7 L/(m²·h)。因此,为了维持正渗透系统的稳定运行,需要配套过滤精度较高的前处理设施。

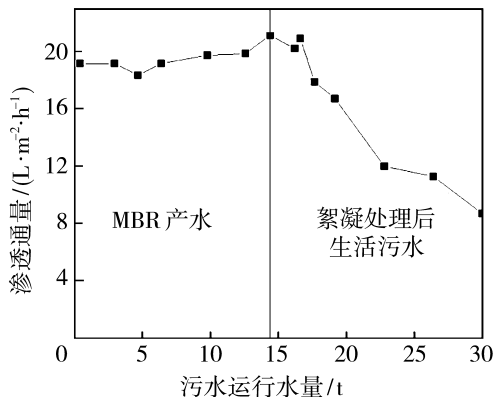


图 10 实际生活污水条件下渗透通量的变化

Fig. 10 Changes of permeation flux under actual domestic sewage conditions

2.2.3 PEFO 的截留性能分析

表 2 给出了 PEFO 的截留性能。从表 2 可以看出,PEFO 对 TDS、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Na⁺、SO₄²⁻、TN、TP 和 COD 的截留率分别达到 95.1%、98.1%、87.7%、61.2%、99.7%、96.8%、73.9%、88.6% 和 86.9%。PEFO 对 TDS、Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、TP 和 COD 的截留率较高,而 K⁺ 截留率偏低,主要是由于 PEFO 对离子的去除受离子的大小和离子半径、污染物相对分子质量大小等影响较大,因此对二价及以上离子、大分子有机物的截留率较高,而对一价离子的截留率较低。此外,由于 TN 主要包括 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 等一价离子,所以 PEFO 对 TN 的截留率也相对偏低。然而,PEFO 表现出了对 Na⁺ 较高的截留率,达到了 99.7%,这主要因为模拟海水 Na⁺ 浓度较高,导致 Na⁺ 反向扩散。

此外,从浓缩倍数来看,TDS、Mg²⁺、Ca²⁺、K⁺、Na⁺、SO₄²⁻、TN、TP 和 COD 浓缩倍数为 1.7~1.9,与水量浓缩倍数相匹配,而 K⁺ 和 TN 的浓缩倍数仅为 1.2 和 1.4,可能存在部分离子进入海水侧的现象。

2.3 技术及经济性分析

2.3.1 技术分析

正渗透技术的应用不仅可以使生活污水减量化,而且可以通过稀释海水的方式将海水盐浓度降

低,中压条件即可实现海水淡化.通过表 3 可以看出,正渗透工艺处理后的海水盐浓度降低约 50%,同时因为生活污水中的有机物很难透过膜进入海水产水侧,这降低了后续采用 BW 或 SW 膜进一步脱盐时,系统对压力的要求和膜污染的风险.

图 11 展示了基于正渗透的生活污水减量化与海水淡化联动工艺过程.生活污水经过生化处理、超微滤或二沉池处理后,污水中的 SS、浊度等污染物被大量去除,这可以最大程度减缓膜系统污染.此外,海水经过超微滤处理,可使水体中污染物含量减

少.处理后的生活污水和海水分别以 400 和 300 L/h 流量进入膜系统,通过正渗透系统,生活污水产水流量降为 210 L/h,成功实现了生活污水减量化处理.但由于污染物浓度增加,为了避免浓缩污水回流带来的系统紊乱,建议系统设计时考虑生活污水来水量和浓缩污水回流量的比例.此外,通过正渗透,海水产水流量由 300 L/h 增至为 490 L/h,实现了海水含盐量的减少,TDS 由 25 000 mg/L 降至 13 000 mg/L 左右.较低盐浓度的海水降低了后续海水淡化过程的操作要求.

表 2 PEFO 的截留性能

Table 2 Interception performance of PE-based forward osmosis membrane

水样	TDS/ (mg•L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg•L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg•L ⁻¹)	K ⁺ / (mg•L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg•L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg•L ⁻¹)	TN/ (mg•L ⁻¹)	TP/ (mg•L ⁻¹)	COD/ (mg•L ⁻¹)	速率/ (L•h ⁻¹)
生活污水进水	1 636.0	23.4	36.3	22.0	648.2	156.7	41.1	2.1	102.3	400.0
生活污水产水	2 962.0	43.8	60.6	25.6	1 230.5	289.1	57.8	3.5	169.3	210.0
截留率/%	95.1	98.1	87.7	61.2	99.7	96.8	73.9	88.6	86.9	
浓缩倍数	1.8	1.9	1.7	1.2	1.9	1.8	1.4	1.7	1.7	1.9

表 3 海水进出水水质分析

Table 3 Analysis of seawater inlet and outlet water quality

水样	TDS/ (mg•L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg•L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg•L ⁻¹)	K ⁺ / (mg•L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg•L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg•L ⁻¹)	TN/ (mg•L ⁻¹)	TP/ (mg•L ⁻¹)	COD/ (mg•L ⁻¹)	速率/ (L•h ⁻¹)
模拟海水进水	25 680	3.5	11.4	57.1	9 859.3	57.2	0.3	0.1	<1	300
模拟海水产水	12 940	11.0	35.7	39.3	5 012.3	42.2	3.8	0.1	<1	490

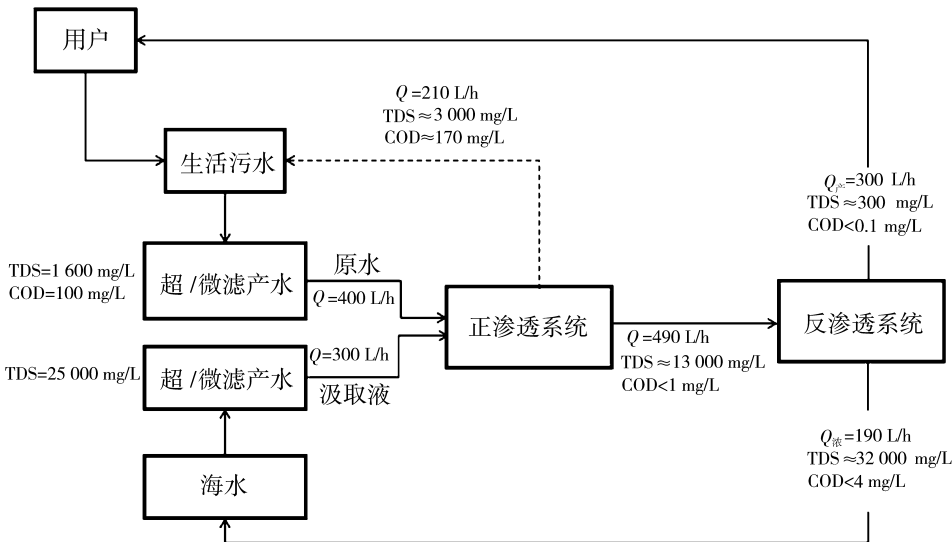


图 11 基于正渗透工艺的海水淡化工艺流程

Fig. 11 Seawater desalination process based on forward osmosis process

此外,生活污水中含有较高的 COD、TN、TP 等污染物,这是否会影响海水淡化后的产水水质,也是

需要关注的.通过表 1 可知,在使用 MBR 产水作为 PEFO 的进水时,COD、TN 和 TP 浓度分别达到了

17.9、15.9 和 0.2 mg/L,但依靠 PEFO 较高的截留率,渗透进入海水产水侧的 COD、TN 和 TP 较低(表 3, $COD < 1\text{ mg/L}$, $TN = 3.8\text{ mg/L}$, $TP = 0.1\text{ mg/L}$).此外,由于 PEFO 预处理后的海水需要进入海水淡化系统进一步处理,依靠海水淡化膜较高的截留率($>99\%$),所得淡水的 COD、TN、TP 含量均会小于 0.04 mg/L ,满足生活饮用水卫生标准(GB 5749-2022)要求.

2.3.2 经济分析

为了更直观地比较常规 RO 法海水淡化工艺与 PEFO+RO 工艺的经济成本,以 $50\,000\text{ m}^3/\text{d}$ 产水量为例进行相关设计和成本计算.假设传统 RO 工艺的回收率为 45% ,则日处理水量为 $111\,111\text{ m}^3/\text{d}$.在 PEFO+RO 工艺,基于图 11 的流程,RO 系统

的日处理水量为 $81\,667\text{ m}^3/\text{d}$.相应地,FO 系统的海水进水量为 $50\,000\text{ m}^3/\text{d}$,生活污水进水量为 $66\,667\text{ m}^3/\text{d}$.

根据式(3)和式(4)计算得出,在 PEFO+RO 工艺中, SEC_{FO} 为 $0.007\text{ (kW}\cdot\text{h)}/\text{m}^3$, SEC_{RO} 为 $0.48\text{ (kW}\cdot\text{h)}/\text{m}^3$;而在传统 RO 工艺中, SEC_{RO} 为 $1.19\text{ (kW}\cdot\text{h)}/\text{m}^3$.从计算结果来看,PEFO+RO 工艺比传统 RO 工艺具有更低的吨水能耗.

为了更加直观地对比两种工艺的投资和运行费用,表 4 列出了详细的设计说明和计算方法.需要说明的是,在此设计中不考虑原水进入 PEFO/RO 之前的预处理投资和运行问题,也不考虑 PEFO 工艺同步减量化生活污水带来的后续投资问题.

表 4 详细的设计说明及计算方法
Table 4 Detailed design description and calculation method

项目	说明
回收率/%	传统 RO:45;PEFO+RO 工艺中 RO 段:60
设计运行时间、工作天数、每天运行时间、利率、装机功率	参考相关文献[12-13]
电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	工业用电平时段价格,0.725 元/(kW·h)
运行能耗 SEC/(kW·h·m ⁻³)	根据式(3)计算
固定成本	
膜元件价格/(万元·支 ⁻¹)	FO:0.4;RO:0.3
管路/万元	根据公式 $C_{\text{vessel}}=0.1\times N_{\text{memb,p}}^{[14]}$ 计算,其中 $N_{\text{memb,p}}$ 为 FO 和 RO 膜组件数
海水提取及预处理/万元	$C_{\text{SWIP}}=0.8\times 996\times F_{\text{feed}}^{0.8[14]}$,其中, F_{feed} 是海水流入 FO/RO 组件的流量(m^3/d)
高压泵/万元	$C_p=A\times F_{\text{RO}}\times p_{\text{RO}}$,其中, A 为 $34.5\text{ 元}/(\text{m}^3\text{ MPa}\cdot\text{h}^{-1})^{[15]}$, F_{RO} 为进入 RO 组件的流量, p_{RO} 为 RO 过程的操作压力(MPa)
操作成本	
能量回收装置 ERD/万元	$C_{\text{ERD}}=3\,134.7\times F_{\text{EDR}}^{0.58[14]}$,其中 F_{EDR} 为 RO 过程进入 EDR 的总流量(m^3/d)
电费/(万元·a ⁻¹)	$C_E=SEC\times F_{\text{RO}}\times 300\times L_f/10\,000$, L_f 为负荷系数,为 0.9
膜更换/(万元·a ⁻¹)	$C_{\text{repl}}=0.1\times C_{\text{memb,FO}}+0.2\times C_{\text{memb,RO}}^{[8]}$,其中 $C_{\text{memb,FO}}$ 、 $C_{\text{memb,RO}}$ 分别为 FO 和 RO 的固定成本
化学药剂/(万元·a ⁻¹)	$C_c=0.022\,5\times 300\times F_{\text{feed}}\times L_f^{[14]}$
维护及人力/(万元·a ⁻¹)	$C_L=0.02\times 300\times F_p\times L_f^{[14]}$,其中 F_p 为产水量(m^3/d)
总操作成本/(万元·a ⁻¹)	$C_{\text{TO}}=C_E+C_{\text{repl}}+C_c+C_L$
总年化成本/(万元·a ⁻¹)	$C_{\text{TA}}=\frac{i\times(i+1)^n}{(i+1)^n-1}\times(C_{\text{DS}}+C_{\text{memb}}+C_{\text{vessel}}+C_{\text{SWIP}}+C_p+C_{\text{EDR}})+C_{\text{TO}}$,其中, i 是利率, n 是设计周期(年)
单位产水成本 SWC/(元·m ⁻³)	$SWC=\frac{C_{\text{TA}}}{50\,000\times 300}$

结合图 11 中的流量及盐浓度情况,根据表 4 的计算方法,详细梳理了传统 RO 和 PEFO+RO 的固定成本和操作成本,结果见表 5.

表 5 传统 RO 和 PEFO+RO 的固定成本和操作成本

Table 5 Fixed cost and operating cost of traditional RO and PEFO+RO

项目	RO	FO+RO	
		FO	RO
所用膜元件面积/m ²	37.2	16.5	37.2
膜壳内元件数		7	
RO 系统水回收率/%	45	53	60
设计运行时间/a	20	20	
工作天数/(d·a ⁻¹)	300	300	
每天运行时间/h	24	24	
利率/%	6	6	
装机容量/(m ³ ·d ⁻¹)	111 111	50 000 (海水计)	81 667
系统产水量/(m ³ ·d ⁻¹)	50 000	81 667	50 000
运行压力/MPa	4.5	0.4~0.5	3.0
最终产水 TDS/(mg·L ⁻¹)	60	13 000	124
电价/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.725	0.725	0.725
SEC/(kW·h·m ⁻³)	1.188	0.007	0.482
固定成本			
膜元件数/支	4 170	4 510	4 170
膜元件价格/(元·支 ⁻¹)	2 000	3 000	2 000
膜元件/万元	596	1 353	596
管路/万元	24.8	11.9	24.8
高压泵/万元	7 187	0	3 522
EDR/万元	265	0	221
固定总成本/万元	9 021	1 364.9	4 363.8
操作成本			
电费/(万元·a ⁻¹)	3 564.0	22.1	1 062.8
膜更换/(万元·a ⁻¹)	119.2	135.3	119.2
化学药剂/(万元·a ⁻¹)	67.5	30.4	49.6
人力和维护/(万元·a ⁻¹)	27.0	44.1	27.0
总操作成本/(万元·a ⁻¹)	3 777.7	231.8	1 258.6
总年化成本/(万元·a ⁻¹)	4 482	351	1 639
单位产水成本 SWC/ (元·m ⁻³)	3.0	0.2	1.1
合计	3.0	1.3	

从计算结果可以看出,传统 RO 工艺面临高压泵投资大,每年的运行电耗高等问题.引入 PEFO 工艺后,尽管 PEFO 膜元件的一次性投资成本较高,但是可以大幅降低对高压泵的投资,并且电费可以降低 70%.

3 结论

通过构建 PEFO-RO 系统初步验证了 PEFO 膜应用于生活污水处理及海水淡化耦合工艺的可行性,并获得以下结论:

- 1) 汲取液盐浓度和流量的增加有利于膜的渗透通量的提高,但需要注意盐浓度的变化,以免影响后续反渗透系统的运行.
- 2) PEFO 膜具有较高的渗透通量,是构建海水预淡化和生活污水减量化的理想产品,但在系统构建时需要做好预处理系统,以减缓膜污染,保障系统稳定.
- 3) PEFO 具有良好的污染物截留能力,可有效减少生活污水侧污染物的反向渗透.
- 4) 通过经济性分析可知,PEFO-RO 工艺可大幅降低一次性投资,并且吨水成本有望降低 57%,为海水淡化的大规模应用提供了可行性.

参考文献:

[1] 张胜梅. 海水淡化技术的分类及成本分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(6):57—59.

[2] 宋瀚文, 宋 达, 张 辉, 等. 国内外海水淡化发展现状[J]. 膜科学与技术, 2021, 41(4): 170—176.

[3] 楚 帅, 葛维春, 李音璇, 等. 含海水淡化负荷的可再生能源消纳技术研究综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(11):14—23.

[4] 丁旭东. 反渗透海水淡化技术的现状与发展[J]. 自动化应用, 2023, 12(A): 29—47.

[5] 张壹超, 丁 玥, 黄秋香, 等. 海水驱动不同 FO 分离性能对比研究[J]. 水处理技术, 2021, 47(9):103—108.

[6] 郭文萱. 正渗透联合膜蒸馏技术处理市政污水及高盐废水的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.

[7] Zheng Y, Huang M H, Chen L, *et al.* Comparison of tetracycline rejection in reclaimed water by three kinds of forward osmosis membranes[J]. Desalination, 2015, 359:113—122.

[8] 王海澜. 正渗透技术在海水淡化中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.

[9] Juan C O B, Gonzalo R F, Andres D B, *et al.* Forward osmosis: Evaluation thin-film-composite membrane for municipal sewage concentration[J]. Chem Eng J, 2016, 306:531—537.

[10] 刘舒悦. 正渗透同步处理城市污水和海水淡化浓水过程中膜污染特性与控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.

[11] 丁 纯. 正渗透应用: 废水处理, 膜污染控制和高性能汲取溶质[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.

[12] Im S J, Jeong S, Jeong S, *et al.* Techno-economic evaluation of an element-scale forward osmosis-reverse osmosis hybrid process for seawater desalination[J]. Desalination, 2020, 476: 114240.

[13] Kim J E, Phuntsho S, Chekli L, *et al.* Environmental and economic assessment of hybrid FO-RO/NF system with selected inorganic draw solutes for the treatment of mine impaired water[J]. Desalination, 2018, 429:96-104.

[14] Park K, Kim D Y, Jang Y H, *et al.* Comprehensive analysis of a hybrid FO/crystallization/RO process for improving its economic feasibility to seawater desalination[J]. Water Res, 2020, 171: 115426.

[15] Bartholomew T V, Siefert N S, Mauter M S. Cost optimization of osmotically assisted reverse osmosis[J]. Environ Sci Technol, 2018, 52(20):11813-11821.

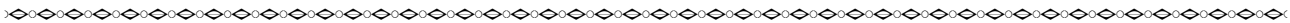
Combined process of seawater desalination-sewage treatment based on polyolefin membrane

JIN Shunlong, REN Xiaofang, SUN Yajun, KUANG Wu, WANG Zhen, CAO Yang

(Beijing OriginWater Membrane Technology Co., Ltd., Beijing 101407, China)

Abstract: Seawater desalination and sewage treatment are important means to solve the water crisis at present. However, both technologies are facing higher operating costs. The forward osmosis (FO)-reverse osmosis (RO) coupling process based on polyolefin membrane (PE) was constructed to pre-desalinate seawater and simultaneously reduce sewage. It is found that PEFO membrane can achieve a permeation flux as high as 32 L/(m² · h), which is more than twice that of conventional membrane, depending on its thin characteristics when seawater is used as the extraction liquid and domestic sewage is used as the stock solution. In addition, the higher the flow rate or concentration of the extract, the higher the permeation flux of the membrane. Through this process, the seawater can be diluted by 1.6 times, the salinity can be reduced from 2.5% to 1.3%, and the sewage can be concentrated by 1.9 times, which greatly realizes the reduction treatment. In addition, the rejection rates of TDS, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, Na⁺, SO₄²⁻, TN, TP and COD reached 95.1%, 98.1%, 87.7%, 61.2%, 99.7%, 96.8%, 73.9%, 88.6% and 86.9%, respectively. In addition, compared with the traditional RO, the PEFO-RO process is expected to greatly reduce the investment of high-pressure pump and reduce the electricity bill by 70% every year.

Key words: forward osmosis; polyolefin; desalination of seawater; sewage



港大团队用蚕丝研制新型纳米过滤膜 滤水速度提升近 10 倍

中新社香港 2025 年 1 月 7 日电(记者 韩星童):香港大学(港大)7 日公布,由港大工程学院土木工程系讲座教授汤初阳领导的研究团队,成功利用天然蚕丝制造了一种新型纳米过滤膜,名为丝基纳米过滤膜,其过滤速度较传统的商用纳米过滤膜快近 10 倍。

据介绍,纳米过滤膜广泛应用于工业废水加工、处理或家居滤水等领域。它们可以去除包括重金属、有机分子和微生物等多种污染物,同时允许水和有益的矿物离子通过。港大研究团队指出,这种净水方法有一个主要缺点,即需要极高的压力,这使得处理过程耗能、昂贵,且需要大型设备。

为了解决这一问题,研究团队开发了一种丝基纳米过滤膜,它可以在极低的压力下利用轻微的真空吸力实现水净化。在测试中,丝基纳米过滤膜不仅让有益矿物质通过,同时能去除水中 99% 以上的有机污染物。

汤初阳表示,丝基纳米过滤膜为水的净化或处理模式带来重大改变,它的滤水速度比传统的商用纳米过滤膜快近 10 倍,同时仍能有效去除有害污染物。他还提到,与传统的纳米过滤系统相比,丝基纳米过滤膜属于可持续发展的滤膜,且可以减少约 80% 的能源消耗,大幅节省成本。