

疏水 α - Al_2O_3 陶瓷膜特性表征及温差驱动能力研究

王海博¹, 郭 泉², 史志国³, 田 瑞^{4*}

(1. 内蒙古工业大学 土木工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050; 3. 内蒙古工业大学 机械工程学院, 呼和浩特 010051; 4. 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051)

摘要: 疏水陶瓷膜在膜蒸馏领域具有突出优势, 可拓宽膜蒸馏应用场景. 采用新方法制备疏水 α - Al_2O_3 陶瓷膜, 表征形貌特征、疏水性能、接枝有效性及宽温域热稳定性, 揭示温差对单位温差驱动能力的影响规律, 测定疏水陶瓷膜蒸馏过程的离子截留率. 研究表明: 疏水陶瓷膜表面形成了较规律的粗糙结构, 疏水性能优异; 疏水陶瓷膜表面的 1H, 1H, 2H, 2H-全氟癸基三乙氧基硅烷发挥了疏水作用, 且具有较好的高温热稳定性; 基于原水温度的单位温差驱动能力(e_c)随温差(ΔT)按 -0.7356 次幂函数规律负相关变化, 而基于冷却水温度的单位温差驱动能力(e_r)随 ΔT 按 1.74589 次幂函数规律正相关变化; 疏水陶瓷膜蒸馏过程对所有被测离子的截留率均大于 99.96%. 该研究对指导制定疏水陶瓷膜蒸馏运行策略具有重要意义.

关键词: 疏水陶瓷膜; 特性表征; 温差; 驱动能力; 截留率

中图分类号: TQ174; TK513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-8924(2024)03-0082-08

doi: 10.16159/j.cnki.issn1007-8924.2024.03.010

淡水资源缺乏已成为全人类关注的焦点问题. 全球大部分苦咸水和海岛区的淡水储量尤其匮乏, 严重影响着该类区域的经济发展和居民生活质量^[1-2]. 膜蒸馏是一种将膜分离技术与蒸馏相结合的新型淡化水技术^[3-5], 利用疏水性微孔膜两侧的蒸汽压差驱动产水^[6-8], 具有操作温度低、脱盐率高等优点^[9]. 疏水性有机膜(聚丙烯、聚四氟乙烯、偏二氟乙烯等)大多存在机械强度低、耐久性差、耐腐蚀性差及工作温度范围窄等应用局限性, 而疏水改性后的陶瓷膜恰好能弥补上述缺陷^[10-11]. 相比直接接触式膜蒸馏, 温差驱动的气隙式膜蒸馏具有较高的膜通量和热效率^[12-13]. 将疏水陶瓷膜应用于气隙式

膜蒸馏过程, 可扩展膜蒸馏装置的应用范围. 单位温差驱动能力是反映疏水陶瓷膜应用可行性的关键参数之一, 探明单位温差驱动能力的变化规律, 对指导制定疏水陶瓷膜蒸馏运行策略具有重要意义.

已有疏水陶瓷膜用于膜蒸馏方面的研究, 重点考察了膜蒸馏系统的膜通量及截留率, 所用膜蒸馏形式有直接接触式、气隙式及减压膜蒸馏, 大多仅研究了特定冷热工质温度、浓度及渗透侧压力对膜通量的影响, 少见疏水陶瓷膜蒸馏系统单位温差驱动能力的研究. Larbot 等^[14]最先将利用氟硅烷(不同链长)改性后的疏水 Al_2O_3 陶瓷膜(孔径为 $0.2\ \mu\text{m}$)应用于膜蒸馏过程, 当原液(NaCl 溶液)质量分数为

收稿日期: 2024-01-23; 修改稿收到日期: 2024-03-10

基金项目: 内蒙古自治区直属高校基本科研业务项目(JY20220131); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY21334)

第一作者简介: 王海博(1987-), 女, 陕西西安人, 讲师, 博士, 从事膜分离与水处理技术研究. * 通讯作者, E-mail: tianr@imut.edu.cn

引用本文: 王海博, 郭 泉, 史志国, 等. 疏水 α - Al_2O_3 陶瓷膜特性表征及温差驱动能力研究[J]. 膜科学与技术, 2024, 44(3): 82-88.

Citation: Wang H B, Guo X, Shi Z G, et al. Characteristic and research on temperature difference driving ability of hydrophobic α - Al_2O_3 ceramic membrane[J]. Membrane Science and Technology(Chinese), 2024, 44(3): 82-88.

5.80%、原水温度为 63.00 °C、冷却水温度为 5.00 °C 时,膜通量为 0.76 kg/(m² · h),截留率接近 100.00%。Krajewski 等^[15]将使用氟硅烷改性后的疏水陶瓷膜用于气隙式膜蒸馏装置,研究发现:膜通量随膜两侧温差按指数函数规律正相关增大,膜通量随原液浓度的增加而减小,疏水陶瓷膜蒸馏过程对 NaCl 溶液的截留率接近 100.00%。Gazagnes 等^[16]利用氟硅烷对不同孔径的氧化铝陶瓷膜进行疏水改性后用于气隙式膜蒸馏,离子截留率接近 100.00%。Fang 等^[17]将利用氟硅烷改性后的疏水陶瓷膜应用于减压膜蒸馏,研究发现:当原液温度为 80.00 °C、渗透侧压力为 40.00 kPa 时,减压膜蒸馏过程的膜通量最大,疏水陶瓷膜蒸馏过程的截留率大于 99.59%。Khenmakhem 等^[18]开发了一种利用全氟硅烷改性的新型疏水多孔陶瓷膜,并将其成功应用于膜蒸馏系统,系统脱盐率大于 99.00%。

综上分析,该研究拟制备疏水陶瓷膜,表征形貌特征、疏水性能、接枝有效性及宽温域热稳定性,提出单位温差驱动能力概念及计算方法,分析温差对单位温差驱动能力的影响规律,评估疏水陶瓷膜蒸馏过程的离子截留能力,对指导制定疏水陶瓷膜蒸馏运行策略具有重要意义。

1 实验

1.1 疏水陶瓷膜制备与表征

(1) 疏水化流程

采用物理打磨联合化学接枝的疏水改性方法^[19]制备片式疏水 α - Al_2O_3 陶瓷膜。首先,使用 400 目(约 38 μm)砂纸对原膜(厚 3 mm、直径 48 mm、孔径 0.2 μm 、孔隙率 40.00%~45.00%)表面均匀打磨 3 min;其次,使用购自福晨(中国天津)化学试剂有限公司的乙醇和丙酮体积比为 3:2 的清洗液,在 50.00 °C 环境下对打磨后的原膜超声清洗 30 min;再次,取 2.563 6 g 1H,1H,2H,2H-全氟癸基三乙氧基硅烷(上海阿拉丁生化科技股份有限公司, $\text{C}_{16}\text{H}_{19}\text{F}_{17}\text{O}_3\text{Si}$,质量分数 96.00%)及适量无水乙醇,配置 210 mL 浓度为 0.019 mol/L 的接枝液,并将清洗后的原膜浸入接枝液后静置 30 min;然后,依次用丙酮、无水乙醇和蒸馏水将接枝膜冲洗 3 min;最后,250.00 °C 环境下,将完成接枝的 α - Al_2O_3 陶瓷膜干燥 65.5 min,进而得到疏水陶瓷膜。

(2) 特性表征

场发射扫描电镜(Phenom-World 有限公司,

Phenom ProX)表征膜面形貌;静滴接触角/表面张力测试仪(上海中晨数字技术设备有限公司, JC2000C1)表征膜面接触角;FTIR(Thermo Fisher Scientific(中国)有限公司, Nicolet iS50)测定膜界面处的红外光谱吸收曲线(4 000~400 cm^{-1});热重分析仪(美国 TA Instruments, TGA5500)测定疏水陶瓷膜的失重情况。

1.2 单位温差驱动能力

当冷却水温度恒定时,提高原水温度可增加膜两侧温差,进而提升疏水 α - Al_2O_3 陶瓷膜蒸馏系统的淡化水能力。当原水温度恒定时,降低冷却水温度可增加膜两侧温差,进而提升疏水 α - Al_2O_3 陶瓷膜蒸馏系统的淡化水能力。进而提出基于原水温度的单位温差驱动能力(e_r)和基于冷却水温度的单位温差驱动能力(e_c),均可表述为式(1)。

$$e = \frac{E}{\Delta T} \quad (1)$$

式中: E 为膜通量[kg/(m² · h)],由式(2)计算得出; ΔT 为温差(°C),由式(3)计算得出。

$$E = \frac{60m}{At} \quad (2)$$

式中: m 为产水质量,kg; A 为有效膜面积,m²,由式(4)计算得出; t 为运行时长,min。

$$\Delta T = T_r - T_c \quad (3)$$

式中: T_r 为原水温度,°C; T_c 为冷却水温度,°C。

$$A = N \frac{\pi d^2}{4} \quad (4)$$

式中: N 为疏水陶瓷膜数量; d 为膜直径,m。

2 试验系统与流程

2.1 膜蒸馏装置

如图 1 所示,膜蒸馏装置由疏水陶瓷膜阵列、原水池及冷却池组成,并由温差驱动膜蒸馏装置运行。其中,疏水陶瓷膜阵列由均布于原水池和冷却池公共壁面处的 6 块疏水陶瓷膜组成,有效膜面积为 0.009 12 m²。原水池为 0.130 m×0.155 m×0.210 m 的大空间体,其竖直向横截面积远大于原水进/出口面积。此外,原水进口最高点低于疏水陶瓷膜阵列的最低点,且原水流入/流出方向均平行于膜表面。因此,可忽略“原水流动过程”对疏水陶瓷膜热侧膜面附近传热传质效率的影响。冷却池内部设置了贴近疏水陶瓷膜冷侧膜面的 U 型不锈钢珠状冷凝管(外径:15.00 mm,壁厚:0.40 mm),用于冷凝蒸汽,以

获取液态淡水。

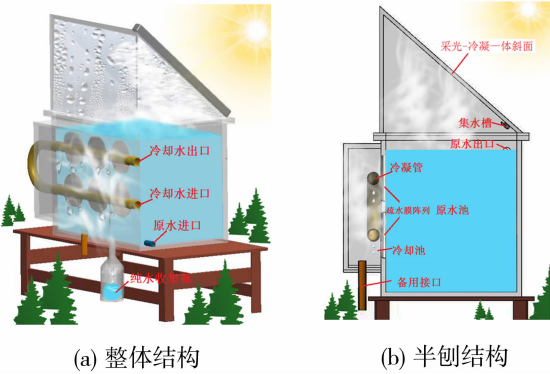


图 1 膜蒸馏装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of membrane distillation device

2.2 试验系统

如图 2 所示,测试系统包括膜蒸馏装置、原水恒温模块、冷却水恒温模块及数据采集模块。其中,原水恒温模块包括超级数显恒温水浴(型号:HH-601,恒温范围:室温~100.00℃,精度:0.01℃)、原水流量计(测量范围:0.00~160.00 L/h)、节流阀、原水循环泵及连接管道,节流阀控制原水池出口处于自然溢流(最大原水流量为 160.00 L/h),进而使原水池内处于恒温及自然对流状态。冷却水恒温模块包括冷却水循环机(型号:SLAC-600A,恒温范围:室温~100.00℃)、冷却水流量计(测量范围:0.00~660.00 L/h)、节流阀、冷却水循环泵及连接

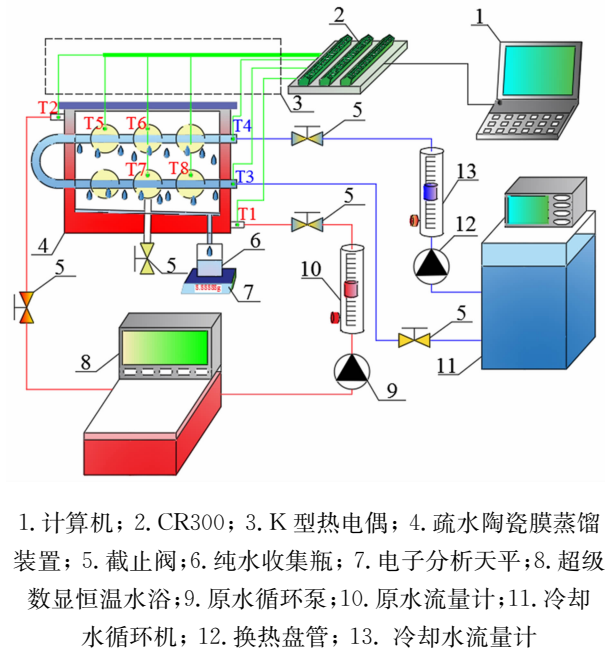


图 2 试验系统

Fig. 2 Test system

管道。数据采集系统包括温度和质量数据采集装置,温度数据采集装置包括 K 型点状热电偶(测温范围:0.00~150.00℃,精度:0.01℃)、CR300 数据采集存储器(供应商:Campbellsci)及计算机组成。共布置 8 支 K 型点状热电偶,T1 和 T2 测量原水进口和出口温度,以获得原水平均温度;T3 和 T4 测量冷却水进口和出口温度,以获得冷却水平均温度;T5、T6、T7 和 T8 分别布置于热侧膜面,用于实时监测热侧膜面温度。质量数据采集装置包括纯水收集瓶及电子分析天平(型号:ES1035B,精度:0.01 mg),可实时获取产水量数据。

2.3 试验流程

将原水流量、冷却水流量和原水质量分数分别恒定为 160.00、402.25 L/h 及 3.50%。恒定 T_c 增大 T_r 或恒定 T_r 减小 T_c ,以获取 e_r 和 e_c ,并分析疏水陶瓷膜蒸馏过程的离子截留率。每组试验至少复测 3 次,持续 2 h。试验过程实时记录产水质量和各测点温度,数据分析过程剔除异常数据,以下为主要流程:

- (1) 温度数据采集装置标定:室温~80.00℃区间,利用一等标准水银温度计标定温度数据采集装置。标定间隔为 5.00℃,单组标定时长为 10 min。
- (2) 原水配制:将 770 g 海水晶(产地:日本,主要成分见表 1)加入 21.23 kg 自来水中,按搅拌 10 min、静止 2 h(室温)的流程循环操作 72 h,可获得 22.00 kg 质量分数为 3.50% 的人造海水。

表 1 海水晶主要成分的含量分布表

Table 1 Content distribution table of main components of marine crystal

名称	质量分数/%	名称	质量分数/%
Ca	1.2	K	0.9
Mg	3.6	Cl	53.5

- (3) e_r 测定:将 T_r 保持为 60.75℃,当 T_c 分别为 46.40、50.78、55.72、60.96、65.73、69.98 及 74.47℃时,各进行 1 组试验。

- (4) e_c 测定:将 T_c 保持为 6.78℃,当 T_r 分别为 37.32、33.49、29.91、22.18、14.39、及 6.94℃时,各进行 1 组试验。

- (5) 离子截留率测试:分别取产水样品、蒸馏前原水(质量分数 3.50%)样品和蒸馏后原水样品,采用离子色谱仪(CIC-D100,信号输出量程 0~35 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$,分辨率 $\leq 0.005 \text{ ns}/\text{cm}$)测定主要盐离子的浓度。

3 结果与讨论

3.1 特性表征

(1) 形貌及疏水性

如图3所示,疏水陶瓷膜表面出现了滤饼群,形成了较规律的粗糙结构,疏水陶瓷膜表面静态水接触角为 145.00° ,远大于原膜接触角(50.05°).因此,疏水陶瓷膜呈现出了优异的疏水性能,可应用于膜蒸馏过程.

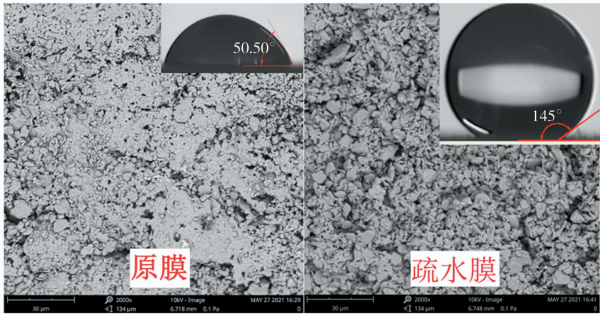


图3 形貌及膜面接触角

Fig. 3 Morphology and contact angle of membrane surface

(2) 红外分析

如图4所示, $1\,092\text{ cm}^{-1}$ 附近为Si—O键的伸缩振动峰^[20], $1\,146\text{ cm}^{-1}$ 附近为—CF₃键的振动峰^[21–22], $1\,383\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,638\text{ cm}^{-1}$ 附近分别为—CH₃键的弯曲振动峰^[23]和C=C键的伸缩振动峰^[24].而Si—O键、—CF₃键、C=C键均为1H,1H,2H,2H-全氟癸基三乙氧基硅烷的特征基团^[20].因此,疏水陶瓷膜表面有效接枝了1H,1H,2H,2H-全氟癸基三乙氧基硅烷,并发挥疏水作用.

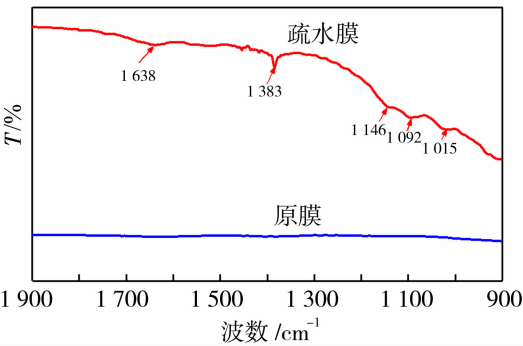


图4 红外光谱曲线

Fig. 4 Infrared spectrum curves

(3) 热稳定性分析

如图5所示,室温 $\sim 100.00\text{ }^\circ\text{C}$ 区间,样品主要失去吸附水.原膜和疏水陶瓷膜分别失重 $0.026\,0\%$

和 $0.010\,0\%$,即原膜质量损失率远大于疏水陶瓷膜.因此,静置环境中,原膜吸潮能力远大于疏水陶瓷膜,表明疏水陶瓷膜具备优良的疏水性能; $100.00\sim 265.00\text{ }^\circ\text{C}$ 区间,样品主要失去结晶水,原膜和疏水陶瓷膜分别失重 $0.139\,0\%$ 和 $0.079\,9\%$.因此,原膜所含结晶水量大于疏水陶瓷膜,表明疏水陶瓷膜在接枝干燥阶段已失去了大量结晶水; $265.00\sim 850.00\text{ }^\circ\text{C}$ 区间,样品进一步失去结晶水,硅烷发生微量热解,原膜和疏水陶瓷膜分别失重约 $0.135\,8\%$ 和 $0.139\,2\%$.因此,原膜质量损失率与疏水陶瓷膜质量损失率接近,硅烷在 $265.00\sim 850.00\text{ }^\circ\text{C}$ 区间仅发生了微量热解,表明疏水陶瓷膜具有较好的高温热稳定性.

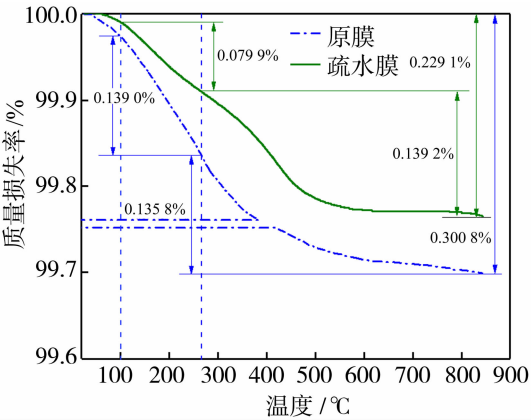


图5 TGA曲线

Fig. 5 TGA curves

3.2 单位温差驱动能力分析

将测试数据代入式(1)~(4),可得图6.利用SPSS软件对图6中的曲线进行非线性回归分析,进而得到表2~表4.表2中, e_c 和 e_r 模型的决定系数

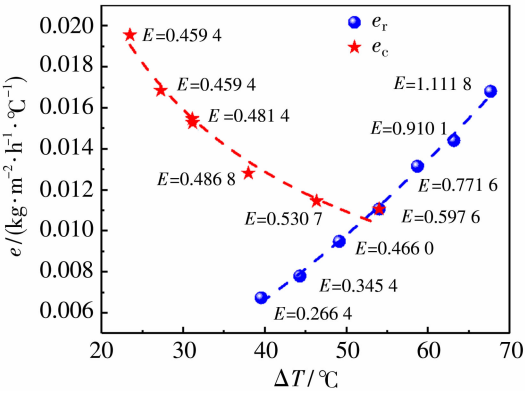


图6 单位温差驱动能力随温差的变化曲线

Fig. 6 Curves of per unit temperature difference driving ability changing with temperature difference

R^2 均接近于 1,故 2 个模型中的单位温差驱动能力与温差间存在密切相关性,总体回归效果良好.

由表 3 可知,当统计量 F 分别为 3 190. 353 3 和 9 145. 301 3 时, e_c 和 e_r 模型的 $sig.$ 均小于 0. 001,通过了 F 检验,具有统计学意义.

表 3 方差分析
Table 3 Analysis of variance

项目	模型	平方和	自由度	均方	F 值	显著性($sig.$)
回归	e_c	0. 001 6	2	7. 772 9E-4	3 190. 353 3	3. 290 4E-8
	e_r	9. 808 3E-4	2	4. 904 2E-4	9 145. 301 3	2. 370 3E-9
残差	e_c	1. 218 2E-6	5	2. 436 4E-7	—	—
	e_r	2. 681 2E-7	5	5. 362 5E-8	—	—
总计	e_c	0. 001 6	7	—	—	—
	e_r	9. 811 0E-4	7	—	—	—

由表 4 可知, e_c 和 e_r 模型中各回归系数的 $sig.$ 均小于剔除因子的标准值(0. 1),通过了 t 检验,具有统计学意义. 因此, e_c 和 e_r 的回归模型分别为式(5)和式(6).

$$e_c=0. 194\ 39\ \Delta T^{-0. 735\ 6}\tag{5}$$

$$e_r=0. 000\ 010\ 577\ 9\Delta T^{1. 745\ 89}\tag{6}$$

综上可知, e_c 随 ΔT 按-0. 735 6 次幂函数规律负相关变化. 换言之,当 T_r 保持在 60. 75 ℃附近时,疏水陶瓷膜两侧温差越大,单位温差驱动能力越小. e_r 随 ΔT 按 1. 745 89 次幂函数规律正相关变化. 换

表 4 回归系数及显著性检验

Table 4 Regression coefficient and significance test

模型项目	非标准化系数		t 检验	显著性($sig.$)
	回归系数 B	标准误差($Std.$)		
a	e_c	0. 194 4	0. 034 1	0. 002 3
	e_r	1. 057 8E-5	2. 126 6E-6	0. 004 2
b	e_c	-0. 735 6	0. 050 8	2. 823 6E-5
	e_r	1. 745 89	0. 049 4	35. 339 6

3. 3 离子截留率分析

质量分数为 3. 50 %人造海水经疏水陶瓷膜蒸馏系统淡化后,将表 5 中的离子浓度数据代入式(7),计算疏水陶瓷膜蒸馏系统对主要离子的截留率,进而可得图 7. 由图 7 可知,疏水陶瓷膜蒸馏过程对 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 Fe 离子、 F^- 的截留率均大于 99. 96%. 其中,疏水陶瓷膜对 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Fe 离子、 F^- 的截留率均为 100. 00%. 因此,疏水陶瓷膜蒸馏过程具有优异的离子截留能力.

表 2 模型摘要

Table 2 Model summary

模型	R^2	调整后的 R^2
e_c	0. 978 40	0. 974 08
e_r	0. 996 64	0. 995 97

言之,当 T_c 保持在 6. 78 ℃附近时,疏水陶瓷膜两侧温差越大,单位温差驱动能力越大.

出现以上结果的主要原因如下: T_r 对膜通量具有决定性影响,而 T_c 对膜通量的影响远小于 T_r . 当 ΔT 随 T_c 的降低而不断增大时, T_r 所决定的膜通量会出现小幅增大. 当 ΔT 随 T_r 的升高而不断增大时, T_r 所决定的膜通量将随 T_r 以相对较大幅度增大. T_r 所决定的膜通量被均分到 1. 00 ℃时, T_c 降低将从整体上拉低 e_c , T_r 的升高将从整体上拉高 e_r .

表 5 蒸馏前后各样品中主要盐离子的质量浓度

Table 5 Concentration of main ions in the samples before and after distillation (mg/L)

离子类型	C_{pure}	C_{feed-A}	C_{feed-B}
K^+	0. 374	801	116 0
Na^+	0. 924	201 70	289 20
Ca^{2+}	0. 341	795	954
Mg^{2+}	0. 126	243 6	341 9
NH_4^+	0. 224	137 3	709
Fe 离子	未检出	未检出	0. 71
Cl^-	28. 2	920 00	120 000
F^-	未检出	1. 42	1. 13

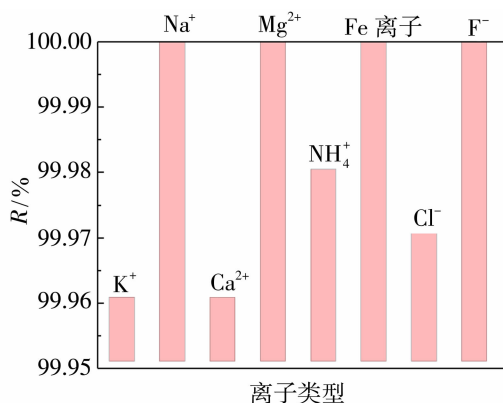


图7 离子截留率分布

Fig. 7 Ion retention rate distribution diagram

$$R = \left(1 - \frac{2C_{\text{pure}}}{C_{\text{feed-A}} + C_{\text{feed-B}}}\right) \times 100\% \quad (7)$$

式中: C_{pure} 为产水中各离子的质量浓度, mg/L; $C_{\text{feed-A}}$ 为原水中各离子的质量浓度, mg/L; $C_{\text{feed-B}}$ 为蒸馏后原水中各离子的质量浓度, mg/L.

4 结论

该研究制备了疏水陶瓷膜,表征了膜面特性,分析了温差对单位温差驱动能力的影响规律,评估了疏水陶瓷膜蒸馏过程的离子截留能力,主要得到以下结论:

1) 疏水陶瓷膜表面形成了较规律的粗糙结构,展示了优异的疏水性能,可应用于膜蒸馏过程.

2) 疏水陶瓷膜表面有效接枝了 1H, 1H, 2H, 2H-全氟癸基三乙氧基硅烷,且具有较好的高温热稳定性.

3) 当 T_r 保持在 60.75 °C 附近时,疏水陶瓷膜两侧温差越大,单位温差驱动能力越小. 当 T_c 保持在 6.78 °C 附近时,疏水陶瓷膜两侧温差越大,单位温差驱动能力越大.

4) 疏水陶瓷膜蒸馏过程对所有被测离子的截留率均大于 99.96%.

参考文献:

[1] Zheng X, Zhang Z, Yu D, *et al.* Overview of membrane technology applications for industrial wastewater treatment in China to increase water supply[J]. *Resour Conserv Recy*, 2015, 105: 1–10.

[2] 李 璟. 聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜在水处理中的应用[J]. *纺织科技进展*, 2005, (1): 39–41.

[3] Li T, Liu H, Zhao X, *et al.* Scalable and highly effi-

cient mesoporous wood-based solar steam generation device: Localized Heat, Rapid Water Transport [J]. *Adv Funct Mater*. 2018, 28: 1707134.

[4] Liu H, Chen C, Chen G, *et al.* High-performance solar steam device with layered channels: Artificial tree with a reversed design [J]. *Adv Funct Mater*, 2018, 8(8): 1701616.

[5] 徐浩然, 张 娜, 张娇娇, 等. 疏水微孔膜蒸馏膜的应用进展[J]. *膜科学与技术*, 2024, 44(1): 137–146.

[6] Moore S E, Mirchandani S D, Karanikola V, *et al.* Process modeling for economic optimization of a solar driven sweeping gas membrane distillation desalination system[J]. *Desalination*, 2018, 437: 108–120.

[7] Zarzoum K, Zhani K, Bacha H B, *et al.* Experimental parametric study of membrane distillation unit using solar energy[J]. *Sol Energy*, 2019, 188: 1274–1282.

[8] Kim J, Hong S. Recovery of water and minerals from shale gas produced water by membrane distillation crystallization[J]. *Water Res*, 2018, 129: 447–459.

[9] Lawson K W, Lloyd D R. Review membrane distillation [J]. *J Membrane Sci*, 1997, 124: 1–25.

[10] Li D, Yao J, Liu B, *et al.* Preparation and characterization of surface grafting polymer of ZrO_2 membrane and ZrO_2 powder[J]. *Appl Surf Sci*, 2019, 471: 394–402.

[11] Yang Y, Liu Q, Wang H, *et al.* Superhydrophobic modification of ceramic membranes for vacuum membrane distillation[J]. *Chin J Chem Eng*, 2017, 25: 1395–1401.

[12] Eykens L, Hitsov I, Sitter K D, *et al.* Direct contact and air gap membrane distillation: Differences and similarities between lab and pilot scale[J]. *Desalination*, 2017, 422: 91–100.

[13] Janajreh I, Kadi K E, Hashaikh R, *et al.* Numerical investigation of air gap membrane distillation (AGMD): Seeking optimal performance[J]. *Desalination*, 2017, 424: 122–130.

[14] Larbot A, Gazagnes L, Krajewski S, *et al.* Water desalination using ceramic membrane distillation[J]. *Desalination*, 2004, 168: 367–372.

[15] Krajewski S R, Kujawski W, Bukowska M, *et al.* Application of fluoroalkylsilanes (FAS) grafted ceramic membranes in membrane distillation process of NaCl solutions[J]. *J Membrane Sci*, 2006, 281: 253–259.

[16] Gazagnes L, Cerneaux S, Persin M, *et al.* Desalination of sodium chloride solutions and seawater with hydrophobic ceramic membranes [J]. *Desalination*,

2007, 217: 260—266.

- [17] Fang H, Gao J F, Wang H T, *et al.* Hydrophobic porous alumina hollow fiber for water desalination via membrane distillation process[J]. J Membrane Sci, 2012, 403: 41—46.
- [18] Khemakhem S, Amar R B. Modification of Tunisian clay membrane surface by silane grafting: Application for desalination with Air Gap Membrane Distillation process[J]. Colloid Surface A, 2011, 387: 79—85.
- [19] Guo X, Wang H B, Tian R, *et al.* Optimization of preparation process and characterization for hydrophobic α - Al_2O_3 ceramic membrane[J]. Mater Chem Phys, 2022, 276: 125280.
- [20] Kujawa J, Cerneaux S, Kujawski W. Investigation of the stability of metal oxide powders and ceramic membranes grafted by perfluoroalkylsilanes [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem, Eng. Aspects, 2014, 443(2): 109—117.
- [21] Saleema N, Sarkar D K, Gallant D, *et al.* Chemical nature of superhydrophobic aluminum alloy surfaces produced via a one-step process using fluoroalkyl—silane in a base medium[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2011, 3(11): 4775—4781.
- [22] Jeong H J, Kim D K, Lee S B, *et al.* Preparation of water-repellent glass ba sol-gel process using perfluoroalkylsilane and tetraethoxysilane[J]. J Colloid Interf Sci, 2001, 235(3): 130—134.
- [23] Xue J Z, Luo Z H, Li P, *et al.* A residue-free green synergistic antifungal nanotechnology for pesticide thiram by ZnO nanoparticles[J]. Sci Rep-UK, 2014, 54(7): 1—8.
- [24] Pinchas S, Gil-av E, Shabtai J, *et al.* Splitting of the C=C stretching vibration of 3-substituted cyclenes[J]. Spectrochimica Acta, 1965, 21(4): 783—789.

Characteristic and research on temperature difference driving ability of hydrophobic α - Al_2O_3 ceramic membrane

WANG Haibo¹, GUO Xiao², SHI Zhiguo³, TIAN Rui⁴

- (1. College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;
2. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 4. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: The hydrophobic ceramic membrane has outstanding advantages in the field of membrane distillation, which can expansion of membrane distillation application scenarios. In this paper, hydrophobic α - Al_2O_3 ceramic membrane was prepared by a new method. The morphological characteristics, hydrophobic properties, grafting effectiveness and wide temperature range thermal stability were characterized. The influence of temperature difference on the driving force of per unit temperature difference was revealed, and the ion rejection rate of hydrophobic ceramic membrane distillation process was determined. The results show that the hydrophobic membrane surface forms a coarse structure, and the hydrophobic performance is excellent. The 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecyltriethoxysilane on the surface of the hydrophobic film played a hydrophobic role and had good high temperature thermal stability. The per unit temperature difference driving ability (e_c) based on the raw water temperature changes negatively with the temperature difference (ΔT) according to the -0.7356 power function law, while the per unit temperature difference driving ability (e_r) based on the cooling water temperature changes positively with the ΔT according to the 1.74589 power function law. The retention rate of all tested ions by the hydrophobic ceramic membrane distillation process was greater

(下转第 96 页)

desalination reverse osmosis system, a nuclear power plant in Liaoning, seawater desalination system of the primary reverse osmosis water production decreased, initially determined that the primary reverse osmosis membrane fouling blockage, and the chemical cleaning effect is poor effect. To analyze the main causes of the fouling characteristics, this study selected an RO membrane module at the water production end of the primary reverse osmosis system of the nuclear power plant for autopsy and analyzed it comprehensively from the physicochemical and biological perspectives. FESEM analysis revealed that particles were embedded in the amorphous matrix fouling layer, and microorganisms and biofilm structures were visible on the surface. EDS detected that the main elements in the fouled layer were C, N, and O, in addition to a small amount of Al, Na, and Ca, and analyzed that the fouling was predominantly biological and organic, and that aluminum salts could react with scale inhibitors to form a colloidal precipitate, which was in agreement with the results of colloidal fouling observed by SEM. FTIR analysis was performed to analyze the fouling in the RO membrane module. FTIR further confirmed that the fouling layer was mainly polysaccharides, proteins, and other biological metabolites, which coincided with the biofouling results observed by SEM. Further characterization of the biofouling in combination with culturable techniques identified the dominant bacterial groups as *Bacillus* and *Pseudomonas*, both of which are associated with reverse osmosis membrane fouling. The research can provide reference for biofouling control of seawater desalination system, it is suggested that the sterilization of *Bacillus* and *Pseudomonas* be carried out, and the kinds and dosages of bactericide, flocculant and reductant be adjusted.

Key words: seawater desalination; reverse osmosis membrane fouling; bacteria; membrane autopsy

(上接第 81 页)

microwave, fine defects were eliminated to obtain a dense pure phase FAU membrane. At the same time, the effect of alkali concentration on the carrier was investigated. Through optimization, it was found that the carrier modified in a Na₂O concentration of 2.95% solution can obtain the FAU membrane with the best pervaporation performance. In a mixed ethanol/water (90/10) solution at 60 °C, the average permeation flux of the FAU membrane is 2.19 kg/(m² · h), and the water content on the permeation side is 100%. This indicates that it has high flux and selectivity, demonstrating good industrial application prospects.

Key words: FAU membrane, in-situ growth; pervaporation; growth mechanism

(上接第 88 页)

than 99.96 %. This study is of great significance to guide the formulation of hydrophobic ceramic membrane distillation operation strategy.

Key words: Hydrophobic ceramic membrane; characterization of characteristics; temperature difference; driving ability; retention rate