

研究论文

中空纤维空气隙式膜蒸馏海水淡化过程的性能模拟与优化

李卜义¹, 王建友¹, 王济虎², 刘红斌²

(¹南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; ²军事医学科学院卫生装备研究所, 天津 300161)

摘要: 利用响应曲面法(RSM), 以模拟标准海水(质量分数 3.5%)为进水对中空纤维空气隙式膜蒸馏(AGMD-HF)海水淡化过程的影响因子和膜通量指标进行了模拟优化。通过面向中心复合设计法(CCD)实现了基于热料液进水温度、冷凝液进水温度和料液流量的实验优化设计, 并建立了响应值与影响因子之间的二次多项式回归模型。方差分析(ANOVA)、RSM 分析及实验响应值与预测值的对比验证了该模型对影响因子和膜通量模拟优化的可信度。进一步地, 通过期望函数的引入确定了各影响因子最佳水平, 并利用太阳能加热驱动过程实验进行验证。结果表明, ANOVA 的决定系数 R^2 达到 0.986, p 值则低于 0.0001; 实验膜通量与预测值平均误差仅为 6.95%, 产水电导率始终保持在 $10 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下, 脱盐率稳定在 99.99% 以上; 最佳影响因子水平分别为 83.5°C 、 13.2°C 和 $60.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 在此条件下太阳能加热驱动过程膜通量达到 $6.47 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。该实验不仅为潜在可行的规模放大过程提供了可参照的操作参数, 而且表明将太阳能引入 AGMD-HF 海水淡化过程具有很强的实际应用潜力。

关键词: 响应曲面; 中空纤维空气隙式膜蒸馏; 模拟; 优化; 蒸馏; 脱盐; 设计

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20141164

中图分类号: TQ 028.3

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2015) 02—0597—08

Modeling and optimization of hollow fiber air gap membrane distillation for seawater desalination

LI Boyi¹, WANG Jianyou¹, WANG Jihu², LIU Hongbin²

(¹School of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China;

²Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China)

Abstract: Response surface methodology (RSM) was used for modeling and optimization of operating parameters and permeate flux for hollow fiber air gap membrane distillation (AGMD-HF) desalination process with simulated 3.5% (mass) seawater as feed solution. Hot feed-in temperature, cold feed-in temperature and fluid flow rate were chosen for experiment optimization based on central composite design (CCD). A quadratic polynomial regression model for permeate flux and operating parameters was developed. Accuracy of the model was validated by analysis of variance (ANOVA), RSM and comparison of predicted and experimental permeate flux response. Furthermore, the best optimal level of operating parameters and solar-powered verification were performed. During the experiments, permeate conductivity was constantly kept below $10 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$, and relative ion rejection rate was above 99.99%. A R^2 of 0.986, p -value smaller than 0.0001 for ANOVA were obtained, and average error of predicted and experimental permeate flux was 6.95%. Moreover, the best optimal operating parameters of 83.5°C , 13.2°C and $60.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ based on desirability function and solar-powered process permeate flux of $6.47 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ were presented. Consequently, modeling and optimization of operating parameters for permeate flux

2014-08-01 收到初稿, 2014-10-09 收到修改稿。

联系人: 王建友。第一作者: 李卜义 (1990—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 天津市科技兴海专项资金项目 (KJXH2013-02)。

Received date: 2014-08-01.

Corresponding author: Prof. WANG Jianyou, wangjy72@nankai.edu.cn

Foundation item: supported by the Marine Science and Technology Foundation of Tianjin, China (KJXH2013-02).

response could be helpful for scaling up AGMD-HF desalination process, and introduction of solar power as an alternative of conventional electric heat source could have better application prospect for AGMD-HF desalination.

Key words: response surface methodology; hollow fiber air gap membrane distillation; modeling; optimization; distillation; desalination; design

引 言

膜蒸馏 (MD) 技术是一种新型热驱动膜分离过程^[1], 主要依据汽液平衡原理, 热料液中的挥发性组分在疏水微孔膜内侧发生蒸发相变, 生成的蒸气在膜两侧蒸气压差作用下透过膜孔并迁移至膜外, 而后进一步得到冷凝和收集。与其他膜分离技术相比, MD 技术具有操作压力低、非挥发性物质截留率高、可利用低品位热源或可再生能源等优势^[2], 用于海水淡化过程有望实现经济、高效和环保三重目标。

目前, 国内外关于膜蒸馏海水淡化过程的研究仍处于实验室阶段, 而且其中大部分研究采用传统的单因素分析实验方法。这不仅增加了实验运行次数、实验时间和操作成本, 更重要的是无法考察各操作参数之间的交互影响。近年来, 研究者开始将实验设计 (design of experiments, DoE) 和响应曲面法 (response surface methodology, RSM) 引入膜蒸馏海水淡化过程。该方法由 Box 和 Wilson 设计开发, 主要运用数学统计技术模拟并分析基于多因子影响的性能指标, 以达到优化过程性能的目的^[3]。目前, 关于 RSM 法用于直接接触式膜蒸馏 (DCMD)、吹扫气式膜蒸馏 (SGMD) 和渗透蒸馏 (OD) 过程的性能模拟优化已有报道^[4-7], 而将其引入中空纤维空气隙式膜蒸馏 (AGMD-HF) 海水淡化过程的研究还较少。Chang 等^[8]引入 RSM 法对 AGMD 和 DCMD 两种海水淡化过程的多种性能参数进行优化, 并基于 Aspen Plus 平台实现了上述过程的数值模拟。Khayet 等^[9]利用人工神经网络模型 (ANN) 模拟 AGMD 海水淡化过程的性能, 并与实验结果进行对比, 发现相关系数达到 0.992, 此外他们还利用 RSM 法考察了该过程的性能参数与各影响因子之间的函数关系^[10]。Guillén-Burrieza 等^[11]则设计了一种太阳能空气隙膜蒸馏海水淡化流程, 并运用 RSM 法建立了关于该过程性能参数、操作变量与盐水浓度之间的函数模型。Yao 等^[12]利用 RSM 法探讨了基于 AGMD 的连续多效膜蒸馏过程中各操作参数之间的交互影响。

本研究利用 RSM 法, 以模拟标准海水 (质量

分数 3.5%) 为进水, 对基于自主设计的具有螺旋缠绕填充结构的新型 AGMD-HF 膜组件的海水淡化过程影响因子和膜通量指标进行了模拟优化, 建立了膜通量与热料液进水温度、冷凝液进水温度、料液流量之间的函数关系, 考察了多因子对膜通量的交互影响, 并将实验结果与拟合值进行对比以验证回归模型的准确性, 从而为以清洁能源 (如太阳能) 替代传统电加热热源时的规模放大过程提供可靠的操作参数。

1 实验部分

1.1 螺旋缠绕式膜组件的设计

螺旋缠绕式中空纤维空气隙式膜组件 (spiral-wound hollow fiber air-gap membrane distillation, SW-AGMD-HF) 由聚四氟乙烯 (PTFE) 中空纤维膜和中空纤维冷凝管呈立体交错结构填充, 并在每根中空纤维膜外添加一层 PTFE 隔热管状隔网, 以保证空气隙的稳定存在和较小的直接传热损失。图 1 为 SW-AGMD-HF 膜组件的基本原理示意图。热料液与冷凝液以错流方式进入膜组件, 其中热料液相变产生的蒸气在中空纤维膜两侧蒸气压差推动下透过膜孔进入设置有隔热管状隔网的空气隙, 而后迁移至中空纤维冷凝管外壁的冷凝边界层, 与管中冷凝液进行热交换并重新液化, 最终在自身重力作用下于膜组件底部汇聚, 所得渗透液 (淡水) 则被导出并收集。

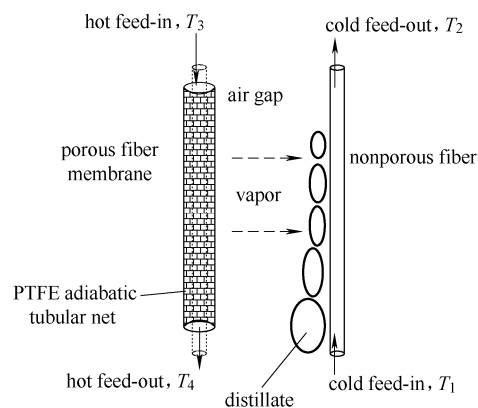


图 1 SW-AGMD-HF 膜组件基本原理

Fig.1 Schematic presentation of SW-AGMD-HF module

膜组件的结构布置形式如图 2 所示。螺旋缠绕结构为料液提供了一种错流流动方式。与并流和逆流方式相比，错流形式产生了额外的流体径向剪切力，从而降低了料液主体与中空纤维膜壁/冷凝管壁形成的边界层厚度，增加了蒸汽跨膜传质、传热系数，最终使浓度极化和温度极化效应得到有效削弱。

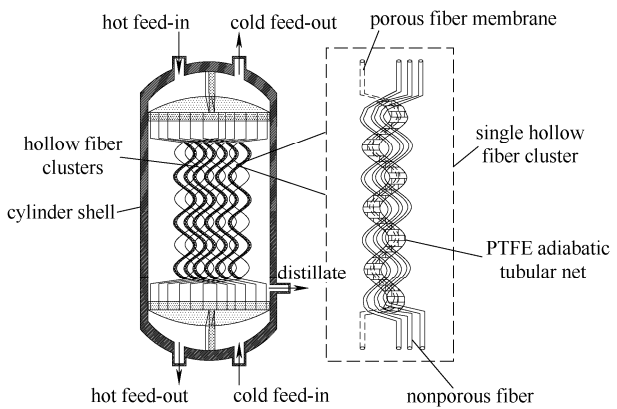


图 2 SW-AGMD-HF 膜组件结构布置

Fig.2 Configuration of SW-AGMD-HF module

1.2 实验材料与仪器

表 1 为 SW-AGMD-HF 海水淡化实验过程中膜组件的膜壳和中空纤维参数。其中，PTFE 中空纤维膜、中空纤维冷凝管及实验过程中额外添加的换热器均由浙江东大水业有限公司提供。

实验试剂：所配模拟标准海水中 NaCl、CaCl₂、MgCl₂·6H₂O、KCl 和 MgSO₄·7H₂O（浓度分别为 27.257、1.14、5.19、0.762、7 g·L⁻¹），天津江天化工技术有限公司，分析纯。仪器设备：管道流量计，无锡市昌林自动化科技有限公司，LZS-15；智能数显调节仪，余姚市长江温度仪表厂，XMTA-818

表 1 SW-AGMD-HF 膜组件的膜壳和中空纤维参数
Table 1 Details of hollow fibers and module for SW-AGMD-HF desalination process

SW-AGMD-HF module	PTFE
support porous fiber type	DDPT-S1608
effective length of module /m	1.15
shell inside diameter /m	0.033
number of porous fibers N_p	150
porosity/%	60
average pore size/ μm	0.4
tortuosity	3.27
contact angle/($^\circ$)	120
inner diameter of porous fibers/mm	0.8
outside diameter of porous fibers/mm	1.1
effective evaporation surface area/ m^2	0.39
support nonporous fiber type	DDPT-0610
number of nonporous fibers N_n	450
inner diameter of nonporous fibers/mm	0.6
outside diameter of nonporous fibers/mm	1.0
N_n/N_p	3:1
thickness of air gap/mm	0.5
packing density	0.6

(J)；氟塑料合金自吸泵，靖江市泰达泵阀厂，FSB-18L；电导率仪，上海精密科学仪器有限公司雷磁仪器厂，DDSJ-308F；pH 计，上海精密科学仪器有限公司雷磁仪器厂，PHS-3C 型。

1.3 实验装置与流程

如图 3 所示。

1.4 AGMD-HF 海水淡化过程主要性能参数

对于膜蒸馏海水淡化过程的规模放大甚至工

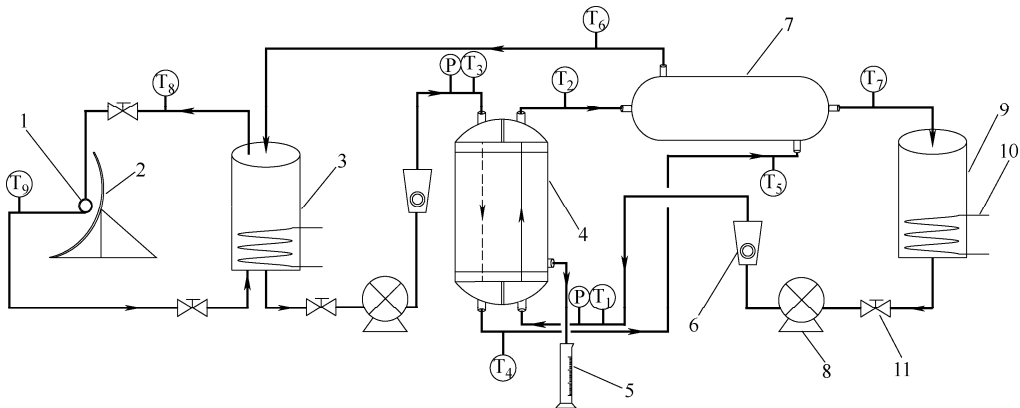


图 3 基于 SW-AGMD-HF 膜组件的海水淡化实验流程

Fig.3 Schematic diagram of SW-AGMD-HF desalination process

1—vacuum tube; 2—collector plate; 3—hot feed tank; 4—membrane distillation module; 5—volumetric cylinder; 6—flow meter; 7—heat exchanger; 8—circulation pump; 9—cold feed tank; 10—heater strip; 11—valves

业化实施而言,膜通量(J_w)是最重要的性能评价指标,其表示单位时间单位有效膜面积上得到的渗透液质量。

$$J_w = \frac{\Delta V}{St} \quad (1)$$

式中, S 为中空纤维膜有效蒸发面积, m^2 ; t 为实验持续时间, h ; ΔV 为 t 时间内从膜组件收集的渗透液体积, L 。

1.5 面向中心复合实验设计

本研究引入面向中心复合设计(central composite design, CCD)进行 SW-AGMD-HF 海水淡化过程的实验优化设计。该方法的二次模型(立方体模型)不仅有助于在最少实验运行次数情况下对有效性能参数进行准确模拟优化,而且可分析多因子对性能参数的交互影响^[13]。CCD 二次模型中的每条边代表改变单一因子时膜通量变化的极端情形,相同因子的叠加影响为+1 或-1,平行直线表示研究因子之间存在交互影响,交叉直线表示不存在交互影响,不同因子之间的交互影响介于上述两种情形之间。

为了表示膜通量与各独立因子之间的函数关系,本研究还引入二次多项式回归方程

$$Y = a_0 + \sum_i a_i X_i + \sum_{ii} a_{ii} X_i^2 + \sum_{ij} a_{ij} X_i X_j \quad (2)$$

式中, Y 为响应指标, a_0 为常数, a_i 为一次系数, a_{ii} 为二次系数, a_{ij} 为两种因子之间的交互影响系数, X 为未编码的影响因子。

该模型的显著程度由置信度为 95% 的方差分析(ANOVA)进行验证,模型的拟合度通过残差判断,各因子的最优值由 RSM 优化过程中设计的拟合目标确定。

本实验选取热料液进水温度 T_3 、冷凝液进水温度 T_1 和料液流量 F 3 种影响因子用于 SW-AGMD-HF 海水淡化过程的 CCD 实验设计和三因子三水平的 RSM 分析。表 2 为各因子编码水平表。表 3 为 CCD 实验设计及结果。

如表 3 所示,CCD 实验设计共有 20 组运行序,1~8 组为立方点设计,9~14 组为轴点设计,15~

表 2 RSM 影响因子编码水平表

Table 2 Real factor values based on coded levels of RSM

Factor	Real values of coded levels		
	-1	0	1
A: hot feed-in temperature, $T_3/^\circ\text{C}$	70	80	90
B: cold feed-in temperature, $T_1/^\circ\text{C}$	20	30	40
C: fluid flow rate, $F/L \cdot h^{-1}$	20	35	50

表 3 CCD 实验设计及结果

Table 3 Experimental design and results of CCD

Run	Factor			Actual response	Predicted response
	A: $T_3/^\circ\text{C}$	B: $T_1/^\circ\text{C}$	C: $F/L \cdot h^{-1}$	$J_w/L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$	$J_w/L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$
1	90.0	20.0	20.0	4.36	4.63
2	80.0	30.0	35.0	3.69	3.72
3	80.0	30.0	9.77	2.59	2.42
4	90.0	20.0	50.0	7.01	7.13
5	80.0	13.2	35.0	4.47	4.41
6	80.0	30.0	35.0	3.76	3.72
7	70.0	40.0	50.0	2.50	2.35
8	80.0	30.0	35.0	3.65	3.72
9	96.8	30.0	35.0	6.88	6.45
10	80.0	30.0	60.2	4.86	4.84
11	80.0	30.0	35.0	3.69	3.72
12	70.0	20.0	50.0	3.56	3.44
13	80.0	46.8	35.0	2.69	2.58
14	90.0	40.0	50.0	4.91	5.13
15	80.0	30.0	35.0	3.71	3.72
16	90.0	40.0	20.0	3.34	3.56
17	63.2	30.0	35.0	1.76	2.02
18	70.0	40.0	20.0	1.95	1.97
19	80.0	30.0	35.0	3.78	3.72
20	70.0	20.0	20.0	2.24	2.15

表 4 二次多项式回归模型方差分析

Table 4 ANOVA of quadratic polynomial regression model

Source	SS ^①	DF ^②	MS ^③	F-value	p-value	R ²	R ² _{pred}	R ² _{Adj}	AP ^④
model	37.0	9	4.11	77.3	<0.0001	0.986	0.894	0.973	31.7
A: T ₃	23.6	1	23.6	444	<0.0001				
B: T ₁	4.06	1	4.06	76.2	<0.0001				
C: F	7.16	1	7.16	134	<0.0001				
AB	0.401	1	0.401	7.52	0.0207				
AC	0.702	1	0.702	13.2	0.00460				
BC	0.437	1	0.437	8.21	0.0168				
A ²	0.483	1	0.483	9.08	0.0130				
B ²	0.0888	1	0.0888	1.67	0.226				
C ²	0.0107	1	0.0107	0.201	0.664				
residual	0.532	10	0.0532						
lack of fit	0.521	5	0.104	44.4	0.000382				
pure error	0	5	0						

① sum of squares; ② degree of freedom; ③ mean square; ④ adequate precision.

20 组为中心点设计。各因子的取值范围为： $63.2^{\circ}\text{C} \leq T_3 \leq 96.8^{\circ}\text{C}$ ， $13.2^{\circ}\text{C} \leq T_1 \leq 46.8^{\circ}\text{C}$ ， $9.77 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \leq F \leq 60.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。实验所得膜通量响应指标范围为： $1.76 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \leq J_W \leq 7.01 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2 结果与讨论

2.1 二次多项式回归模型的建立

对表 3 中的实验数据进行多元回归拟合，得到基于各因子编码水平的二次多项式回归方程

$$J_W = 3.72 + 1.32A - 0.545B + 0.724C - 0.224AB + 0.296AC - 0.234BC + 0.183A^2 - 0.0785B^2 - 0.0272C^2 \quad (3)$$

相应的各因子真实水平的回归方程为

$$J_W = 2.53 - 0.164T_3 + 0.226T_1 - 0.0545F - 0.00224T_3T_1 + 0.00197T_3F - 0.00156T_1F + 0.00183T_3^2 - 0.000785T_1^2 - 0.000121F^2 \quad (4)$$

由式(3)可知，热料液进水温度 T_3 对膜通量的影响程度高于料液流量 F ，而且二者对膜通量具有协同作用，而冷凝液进水温度 T_1 则对膜通量具有相反作用。各因子之间的交互影响顺序为： $T_3F > T_3^2 > F^2 > T_1^2 > T_3T_1 > T_1F$ 。同时，CCD 实验结果显示 J_W 具有较大的变化范围，这表明所选影响因子与膜通量响应指标之间存在较强的相关性。

2.2 方差分析 (ANOVA)

对二次多项式回归模型利用 ANOVA 进行检验，所得结果见表 4。

$p < 0.01$ 表示影响非常显著， $0.01 \leq p \leq 0.05$ 为显著， $p > 0.05$ 表示不显著。该回归模型的 p 低于

0.0001 而 F 达到 77.3，表明各因子影响非常显著。决定系数 R^2 达到 0.986，表明有 98.6% 的响应值变化可以由该回归模型解释。校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0.973 表明响应值的实验结果与预测值之间具有很强的相关度。当信噪比大于 4 时模型是合适的，而本回归模型信噪比达到 31.7，说明模型的可信度很高。对回归模型的方差分析表明该模型拟合程度良好，对于预测和分析膜通量响应值的准确度较高。

图 4 为模型预测膜通量响应值与实验结果的对比。从图中可以看出，二次多项式回归模型的预测膜通量、不同操作条件下的实际膜通量与拟合后的响应值相差很小，误差控制在 1.02%~12.87% 范围内，平均误差仅为 6.95%，最大误差点出现在 $T_3 = 63.2^{\circ}\text{C}$ 、 $T_1 = 30^{\circ}\text{C}$ 、 $F = 35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这可能是由

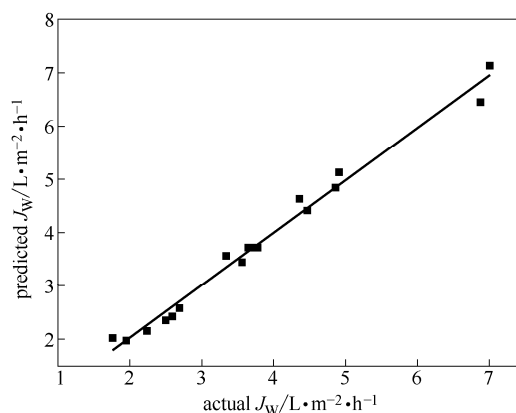


图 4 模型预测膜通量与实际膜通量对比

Fig.4 Comparison of actual and predicted J_W

于 T_3 对膜通量的影响较 T_1 和 F 更大, 在膜组件热效率一定的情况下热料液温度的减小意味着用于热传导损失的热量相对增加, 而膜蒸馏过程的蒸发热量相对下降。根据安东尼方程可知这一趋势呈指数性变化, 最终结果是实验误差放大的可能性增加。

方差分析和膜通量响应值对比结果验证了二次多项式回归模型对于全部实验设计范围内的膜通量的拟合具有很高的可信度。

2.3 响应曲面 (RSM) 分析

响应曲面用于考察各因子之间的交互影响及确定各因子对于响应值最大化的优化程度^[14]。基于 Minitab®16 软件的回归模型响应曲面图及等值线图如图 5~图 7 所示。选取一种影响因子为常量, 膜通量响应值可与其他两种影响因子建立确定的函数关系, 而同种因子对膜通量的叠加影响不在考察范

围内。

从图 5 可以看出, 在 $F=35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 条件下, 膜通量 J_W 随热料液进水温度 T_3 的增加及冷凝液进水温度 T_1 的减小而增加, 两种影响因子对膜通量具有相反作用, 而且 T_3 ($a_1=1.32$) 较 T_1 ($|a_2|=0.545$) 的作用更显著, 导致 J_W 由 $2.19 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 上升至 $5.90 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。根据安东尼方程可知水蒸气的饱和蒸汽压随温度的上升呈指数性变化, 增加 T_3 虽然造成整个中空纤维膜轴向上各处温度均增加, 进而引起中空纤维冷凝管轴向平均温度的增加, 但中空纤维膜两侧的蒸汽压差仍是随之增大的, 即膜蒸馏过程的传质推动力增加, 膜通量随之提高。增加 T_3 的同时减小 T_1 则使得上述趋势进一步得到增强。

图 6 显示了热料液进水温度 T_3 和料液流量 F 对膜通量 J_W 的交互影响。 T_3 和 F 对 J_W 具有协同作用,

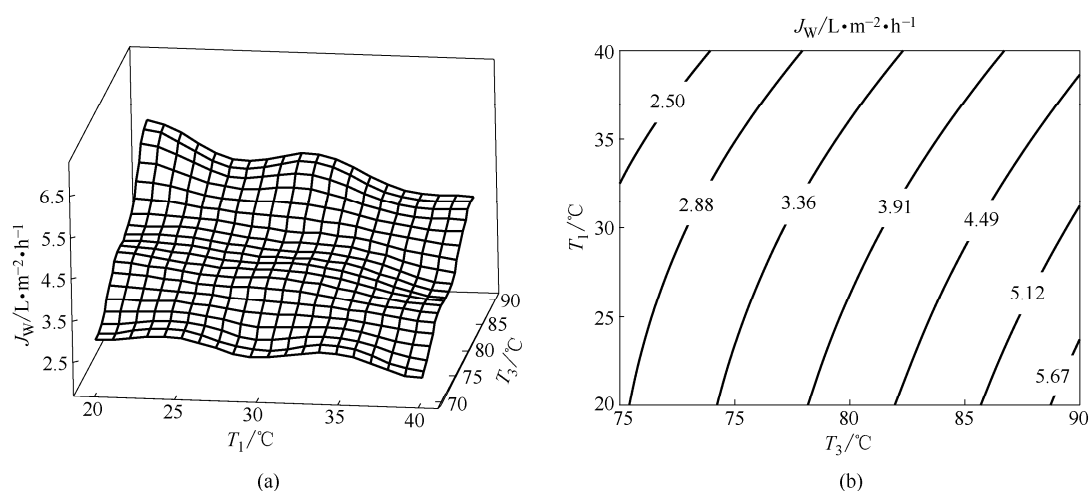


图 5 膜通量关于 T_3 和 T_1 的响应曲面与等值线图 ($F=35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig.5 Response surface plot and contour-lines for J_W as a function of T_3 and T_1 at actual $F=35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$

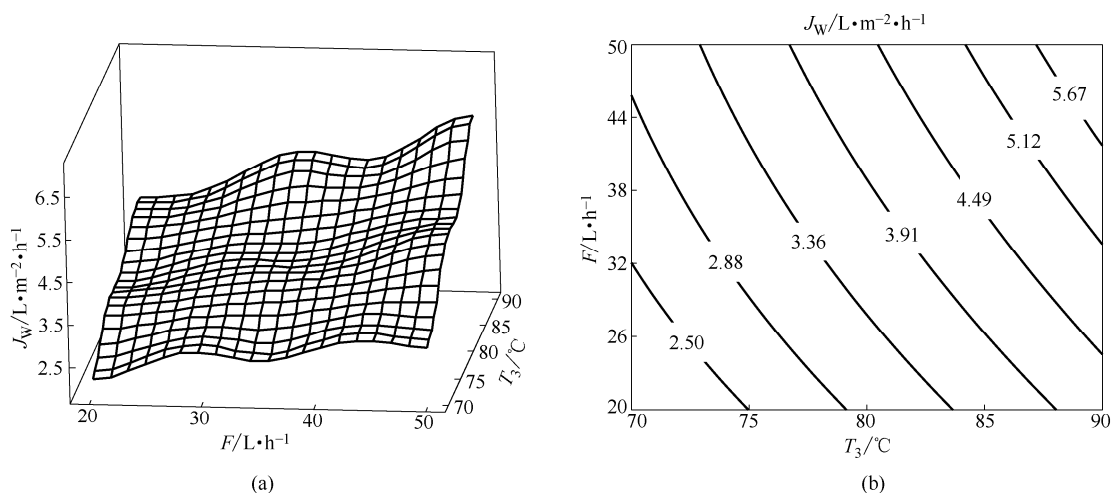
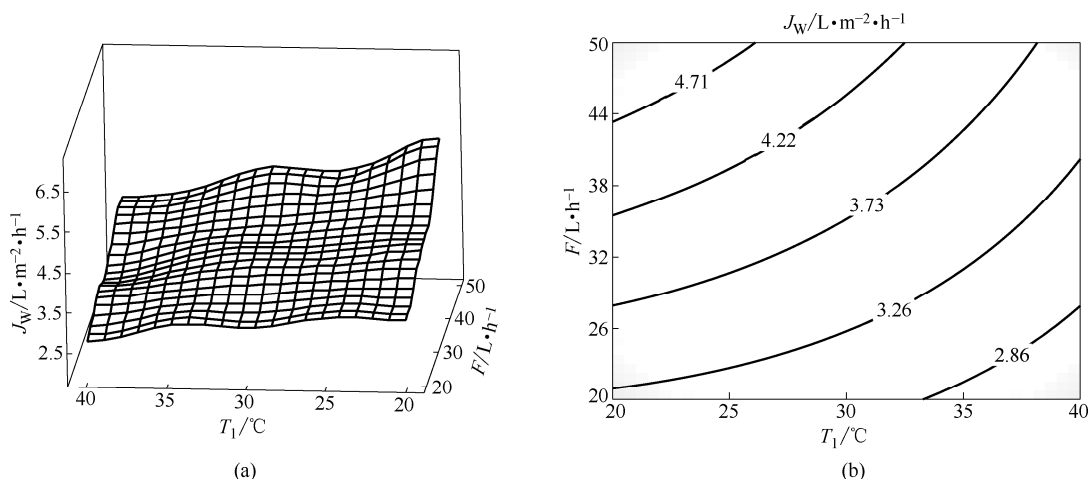


图 6 膜通量关于 T_3 和 F 的响应曲面与等值线图 ($T_1=30^\circ\text{C}$)

Fig.6 Response surface plot and contour-lines for J_W as a function of T_3 and F at actual $T_1=30^\circ\text{C}$

图7 膜通量关于 T_1 和 F 的响应曲面与等值线图 ($T_3 = 80^\circ\text{C}$)Fig.7 Response surface plot and contour-lines for J_w as a function of T_1 and F at actual $T_3 = 80^\circ\text{C}$

而且随着二者的增加 J_w 呈上升趋势。由式(3)可知 T_3 ($a_1 = 1.32$) 对 J_w 的影响较 F ($a_3 = 0.724$) 高 1.82 倍。这是由于 F 的增加使得料液轴向雷诺数及径向剪切力得到增强, 导致热料液主体与中空纤维膜壁之间形成的热边界层厚度减小, 温度极化效应削弱, 膜壁内侧温度更接近热料液主体热力学温度, 热侧与冷凝侧之间的温差变大, 从而 J_w 上升。但由 T_3 对 J_w 的作用机理可知, F 主要靠削弱边界层实现的 J_w 增加幅度实际远远小于因料液热量增加 (T_3 升高) 导致的 J_w 增加幅度。

如图7所示, 增加 F 的同时降低 T_1 使得 J_w 由 $2.58 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 上升至 $5.11 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 而且 F ($a_3 = 0.724$) 较 T_1 ($|a_2| = 0.545$) 影响更显著。这可能是由于 SW-AGMD-HF 膜组件热侧和冷侧的温度极化效应明显存在, 使得减小 T_1 导致的热、冷侧温差的增加幅度与实际相比受到削弱, 从而导致降低 T_1 对 J_w 的贡献小于增加 F 对 J_w 的贡献。

图5~图7拟合结果显示 $T_3 T_1$ ($|a_1 a_2| = 0.224$)、 $T_3 F$ ($a_1 a_3 = 0.296$) 和 $T_1 F$ ($|a_2 a_3| = 0.234$) 对 J_w 的交互影响呈近似线性趋势, 这可能是由于3种影响因素之间对应关系较弱, 一种因子的变化不会对其其他因子产生决定性影响。

2.4 过程操作条件优化

为获得实验过程的最佳操作条件, 从而为以清洁能源 (如太阳能) 替代传统电加热热源实现规模放大提供可靠的操作参数, 本研究引入期望函数 (desirability function) 进行响应曲面的最优化分析^[15]。如图8所示, J_w 的上、下限分别为 $2.02 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $7.13 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, J_w 的预测目标值

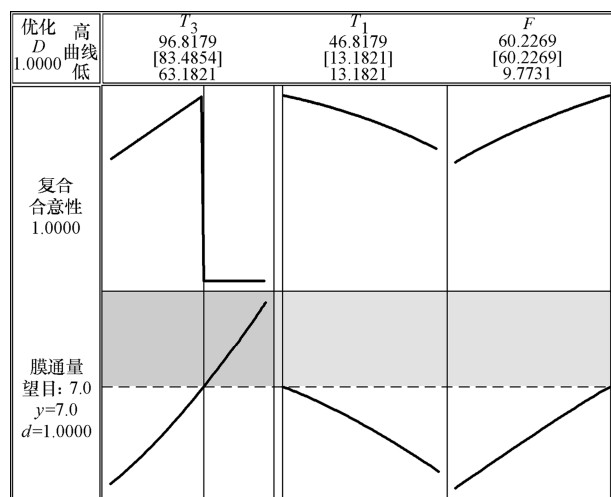


图8 影响因子的优化曲线

Fig.8 Optimization plot of operating variables for permeate flux

表5 太阳能加热驱动 AGMD-HF 海水淡化过程验证实验结果

Table 5 Experimental permeate flux of solar-powered AGMD-HF process at optimum conditions

T_3 / $^\circ\text{C}$	T_1 / $^\circ\text{C}$	F / $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$	$J_w / \text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$		Error/%
			Experimental value	Predicted value	
83.5	13.2	60.2	6.47	7.00	7.57%

设为 $7.00 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 利用 Minitab[®] 16 软件响应曲面优化器得到了各影响因子的最佳水平: $T_3 = 83.5^\circ\text{C}$, $T_1 = 13.2^\circ\text{C}$, $F = 60.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表5表示实验室规模下以普通平板式太阳能集热装置 (集热面积 2.25 m^2) 替代电加热热源时基于各因子最佳水平的验证实验。结果显示, 太阳能加热驱动过程的实际膜通量达到 $6.47 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,

与预测目标值相比十分接近,二者误差仅为 7.57%。实验也表明将太阳能引入 AGMD-HF 海水淡化过程具有很强的实际应用潜力。

3 结 论

(1) 基于 CCD 法选取热料液进水温度、冷凝液进水温度和料液流量 3 种影响因子对 AGMD-HF 海水淡化过程的膜通量指标进行了实验设计优化,并建立了膜通量与 3 种影响因子相互关系的二次多项式回归模型。

(2) 回归模型的 ANOVA 检验显示其决定系数 R^2 为 0.986, p 值低于 0.0001, F 值和信噪比分别达到 77.3、31.7,表明模型具备较高的预测和分析响应可信度。实验膜通量与预测响应值平均误差仅为 6.95%,实验过程产水电导率始终保持在 $10 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 以下,脱盐率则稳定在 99.99% 以上。

(3) 回归模型的 RSM 分析显示 T_3 和 F 增加而 T_1 减小均会导致 J_w 上升,而且 T_3T_1 、 T_3F 和 T_1F 对 J_w 的交互影响呈近似线性趋势。

(4) 引入期望函数得到各影响因子的最佳操作水平为热料液进水温度 $T_3 = 83.5^\circ\text{C}$, 冷凝液进水温度 $T_1 = 13.2^\circ\text{C}$, 料液流量 $F = 60.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。该条件下的基于太阳能加热驱动的验证实验中膜通量达到 $6.47 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,与预测目标值误差仅为 7.57%,表明将太阳能引入 AGMD-HF 海水淡化过程具有很强的实际应用潜力。

符 号 说 明

F —— 体积流量, $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$

J_w —— 膜通量, $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$

T —— 温度, $^\circ\text{C}$

t —— 时间, h

ΔV —— 一段时间内的淡水体积, L

References

- [1] He K, Hwang H J, Woo M W, Moon I S. Production of drinking water from saline water by direct contact membrane distillation (DCMD) [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2011, **17** (1): 41-48
- [2] Chouikh R, Bouguecha S, Dhahbi M. Modelling of a modified air gap distillation membrane for the desalination of seawater [J]. *Desalination*, 2005, **181**: 257-265
- [3] Khayet M, Cojocar C, García-Payo C. Application of response surface methodology and experimental design in direct contact membrane distillation [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2007, **46** (17): 5673-5685
- [4] Boubakri A, Hafiane A, Bouguecha S A T. Application of response surface methodology for modeling and optimization of membrane distillation desalination process [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, **20**: 3163-3169
- [5] Cojocar C, Khayet M. Sweeping gas membrane distillation of sucrose aqueous solutions: response surface modeling and optimization [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, **81**: 12-24
- [6] Khayet M, Cojocar C. Artificial neural network model for desalination by sweeping gas membrane distillation [J]. *Desalination*, 2013, **308**: 102-110
- [7] Onsekizoglu P, Bahceci K S, Acar J. The use of factorial design for modeling membrane distillation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, **349**: 225-230
- [8] Chang H, Liao J S, Ho C D, Wang W H. Simulation of membrane distillation modules for desalination by developing user's model on Aspen Plus platform [J]. *Desalination*, 2009, **249**: 380-387
- [9] Khayet M, Cojocar C. Artificial neural network modeling and optimization of desalination by air gap membrane distillation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, **86**: 171-182
- [10] Khayet M, Cojocar C. Air gap membrane distillation: desalination, modeling and optimization [J]. *Desalination*, 2012, **287**: 138-145
- [11] Guillén-Burrieza E, Blanco J, Zaragoza G, Alarcón D C, Palenzuela P, Ibarra M, Gernjak W. Experimental analysis of an air gap membrane distillation solar desalination pilot system [J]. *Journal of Membrane Science*, 2011, **379**: 386-396
- [12] Yao K, Qin Y J, Yuan Y J, Liu L Q, He F, Wu Y. A continuous-effect membrane distillation process based on hollow fiber AGMD module with internal latent-heat recovery [J]. *AIChE J.*, 2012, **59**: 1278-1297
- [13] Wu J Y, Huang G T J, He W X, Wang P, Tong Z C, Jia Q, Dong L P, Niu Z Y, Ni L X. Basic fibroblast growth factor enhances stemness of human stem cells from the apical papilla [J]. *Journal of Endodontics*, 2012, **38** (5): 614-622
- [14] Qi B K, Chen X R, Shen F, Su Y, Wan Y H. Optimization of enzymatic hydrolysis of wheat straw pretreated by alkaline peroxide using response surface methodology [J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009, **48** (15): 7346-7353
- [15] García V, Landaburu-Aguirre J, Pongrácz E, Perämäki P, Keiski R L. Dehydration of water/dichloromethane/*n*-butanol mixtures by pervaporation, optimisation and modelling by response surface methodology [J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, **338** (1/2): 111-118