

DOI: 10.7652/xjtuxb201704021

直接接触式膜蒸馏脱盐过程的建模及多指标优化

程冬建^{1,2}, 李娜^{1,2}, 龚伟^{1,2}

(1. 陕西省能源化工过程强化重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安)

摘要: 为了在较低能耗下获得较高的产水率, 采用响应曲面法和满意度函数法对直接接触式膜蒸馏脱盐过程进行了建模和多指标优化, 考察指标为产水率和热效率, 考察因素包括操作参数料液入口温度、透过侧入口温度、膜面流速和组件参数装填系数、长径比等。通过方差分析对预测模型进行了验证。研究分析了各参数对指标的交互作用, 发现各参数对考察指标影响显著。利用满意度函数法对膜蒸馏过程进行了多指标优化, 获得最优条件为料液入口温度 70℃、透过侧入口温度 40℃、膜面流速 60 m/min、装填系数 50% 和长径比 20。在最优条件下进行实验, 获得的产水率为 1.697 kg·h⁻¹, 热效率为 88.2%。研究结果可为膜蒸馏过程的优化以及放大设计提供参考。

关键词: 直接接触式膜蒸馏; 脱盐; 产水率; 热效率; 多指标优化

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0135-07

Modeling and Multi-Response Optimization of Direct Contact Membrane Distillation for Water Desalination

CHENG Dongjian^{1,2}, LI Na^{1,2}, GONG Wei^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Energy Chemical Process Intensification, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Modelling and multi-response optimization of direct contact membrane distillation for water desalination are studied to search for a balance between high water productivity and low energy consumption and to maximize water productivity and thermal efficiency simultaneously. Response surface methodology and desirability function approach are applied for modeling and multi-response optimization, in which the investigated objectives are water productivity and thermal efficiency. The effects of both operating parameters and configuration parameters of membrane module are investigated. These parameters include inlet temperatures of feed and permeate, flow velocity of feed, module packing density, and length-diameter ratio of module on the objectives. Models for predicting the objectives are developed and statistically validated by analysis of variance. It is found that both objectives are significantly influenced by the interaction effects of these variables. The different binary interaction effects of the variables on the objectives are illustrated. Multi-objective optimization is conducted using the desirability function approach. The optimal conditions are obtained as follows: 70℃ in feed inlet temperature, 40℃ in permeate inlet temperature, 60 m/min in flow velocity of feed, 50% in module packing density, and 20 in

收稿日期: 2016-09-04。 作者简介: 程冬建(1989—), 男, 博士生; 李娜(通信作者), 女, 教授, 博士生导师。 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(xjj2013075)。

网络出版时间: 2017-02-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170220.1617.010.html>

length-diameter ratio of module. Experiments under the optimal conditions obtain water productivity $1.697 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ and thermal efficiency 88.2% . This study may provide reference for optimization and scale-up design of membrane distillation process.

Keywords: direct contact membrane distillation; desalination; water production; thermal efficiency; multi-response optimization

膜蒸馏过程是热驱动膜分离过程,以多孔疏水膜为介质实现相变热蒸馏^[1-3]。与其他常用膜分离过程相比,膜蒸馏过程操作条件温和,截留率较高,可用于处理含盐分较高的水溶液^[4-6]。目前,在膜蒸馏过程商业化之前,必须克服一些技术上的挑战,如热能消耗过大和产水率较低等现象。膜蒸馏作为一个相变分离过程,需要大量的能耗(包括加热和冷却)来实现相转化。

为了提高膜蒸馏过程的综合性能,正交实验法^[7]、人工神经网络法^[8]和响应曲面法^[9-16]等优化方法已经被用于膜蒸馏过程的优化。正交实验法考察组合实验中的正交实验点,人工神经网络法需要较多的实验点进行学习和训练过程。响应曲面法不仅考察正交实验点,还考察极值点和中心点,同时实验工作量少于人工神经网络法。但是,利用响应曲面法针对膜蒸馏过程进行优化的研究多以考察操作参数为主,例如,Khayet 等利用中心组合实验设计对直接接触式(DCMD)和气扫式(SGMD)膜蒸馏过程进行了建模和优化^[9-10],在 DCMD 过程中,料液温度和搅拌速度之间的交互作用促进了渗透通量的增加,而搅拌速度和料液浓度之间的交互作用阻碍了渗透通量的增加;在 SGMD 过程中,气体温度和气体流速之间,料液温度和气体流速之间,以及料液流速和气体流速之间的交互作用较为显著。在膜蒸馏实际应用和放大过程中,操作参数和组件参数的优化对膜性能的提升均起到非常重要的作用^[16]。然而,目前利用响应曲面法对膜蒸馏操作参数和组件参数同时优化的研究较少。

本文以膜蒸馏过程产水率和热效率为响应指标,对直接接触式膜蒸馏进行建模和优化。优化参数包括操作参数和组件参数。操作参数为料液入口温度、透过侧入口温度和膜面流速,组件参数为组件装填系数和长径比。利用响应曲面法得到了回归方程,依据响应曲面分析了不同参数对指标的交互作用。利用满意度函数法和遗传算法进行了产水率和热效率的双指标优化,以期在较小的能耗下获得较高的产水率。

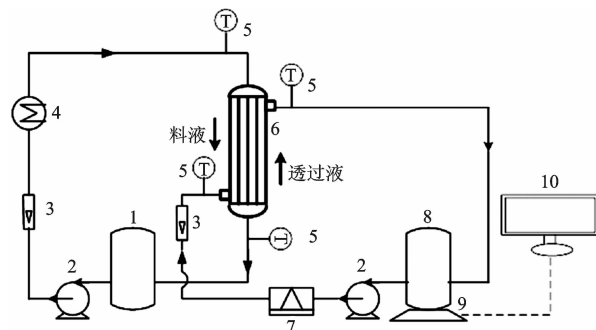
1 实验部分

1.1 实验材料

实验所用膜为天津工业大学制聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维膜,膜孔径为 $0.16 \mu\text{m}$,孔隙率为 85% ,膜丝内径为 0.8 mm ,外径为 1.1 mm 。膜组件外壳为有机玻璃管,内径为 1.5 cm ,外径为 2.2 cm 。实验用水为反渗透纯水,氯化钠为分析纯氯化钠。

1.2 实验装置和运行

直接接触式膜蒸馏(DCMD)的实验装置如图 1 所示,氯化钠溶液和透过侧纯水逆向流过膜组件,原料由料液槽流经高温恒温水箱被加热,进入膜组件流经膜丝中空腔,经蒸发浓缩后流回料液罐。透过侧纯水流经低温恒温水箱,降温后进入膜组件的壳程,然后回到透过液罐,固定透过侧循环冷却液流量为 $35 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,由电子天平在线记录透过液罐中的得水质量,由数据采集器在线记录温度。料液采用质量分数为 3.5% 的氯化钠溶液,恒浓操作,浓度波动在 5% 以内。当系统运行稳定后开始采集数据,采集时间为 0.5 h ,在实验范围内膜通量波动小于 4.2% ,取其平均值。



1: 料液储罐; 2: 蠕动泵; 3: 转子流量计; 4: 高温恒温水箱; 5: 热电阻; 6: 膜组件; 7: 低温恒温水箱; 8: 透过液储罐; 9: 电子天平; 10: 计算机

图 1 直接接触式膜蒸馏装置示意图

1.3 实验变量与指标

以料液入口温度($T_{\text{wf},\text{in}}$)、透过侧入口温度($T_{\text{wp},\text{in}}$)、膜面流速(V_f)、膜组件的装填系数(D)及长径比(R_{id}) 5 个因素作为控制变量,其中膜面流速指

料液流过膜组件的平均流速,膜组件的装填系数指所装填的膜丝总截面积和组件管内截面积之比,膜组件长径比指膜组件有效长度和组件管内径之比。

表 1 直接接触式膜蒸馏过程影响因素的设计水平及编码表

变量	编码	变量变化设计水平				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
料液入口温度 $T_{wf,in}/^{\circ}\text{C}$	X_1	40	50	60	70	80
透过侧冷却液入口温度 $T_{wp,in}/^{\circ}\text{C}$	X_2	15	20	25	30	35
膜面流速 $V_f/\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	X_3	6	18	30	42	54
装填系数 $D/\%$	X_4	5	15	25	35	45
长径比 R_{ld}	X_5	3.3	6.7	10	13.3	16.7

为了达到在较小能耗下获得较大产水率的目的,以产水率(P)和热效率(η)作为实验设计的评价指标。产水率指单位时间由膜组件获得的产水量,用于衡量膜蒸馏过程中膜装置的总处理能力,通过电子天平记录的质量增加量获得,其计算公式为

$$P = \frac{m_d}{t} \tag{1}$$

式中: m_d 为 t 时间内透过液增加的质量,kg。热效率可通过下式计算得出

$$\eta = \frac{m_d \Delta H_v}{t Q_{feed,in}} \tag{2}$$

$$Q_{feed,in} = c_p m_f (T_{wf,in} - T_{wf,out}) \tag{3}$$

式中: ΔH_v 为水蒸气的汽化潜热, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; $Q_{feed,in}$ 为系统输入热量, $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$; c_p 为料液比热容, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$; m_f 为料液质量流率, $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$; $T_{wf,in}$ 和 $T_{wf,out}$ 分别为料液在膜组件入口和出口的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与讨论

2.1 回归模型的建立

利用 SPSS 的线性回归分析建立产水率和热效率与各因素间的二次回归模型,如式(4)、式(5)所示

$$\begin{aligned} P = & 0.008\ 4T_{wf,in} + 0.004\ 7T_{wp,in} - 0.022\ 4R_{ld} - \\ & 0.025\ 7D - 0.007\ 5V_f + 0.000\ 3T_{wf,in}\ T_{wp,in} - \\ & 0.001T_{wf,in}R_{ld} + 0.000\ 4T_{wf,in}D + \\ & 0.000\ 051\ 4T_{wf,in}V_f + 0.000\ 9T_{wp,in}R_{ld} - \\ & 0.000\ 3T_{wp,in}D - 0.000\ 001\ 8T_{wp,in}V_f + \\ & 0.000\ 6R_{ld}D + 0.000\ 5R_{ld}V_f + 0.000\ 2DV_f - \\ & 0.000\ 069T_{wf,in}^2 - 0.000\ 5T_{wp,in}^2 + 0.002\ 4R_{ld}^2 + \\ & 0.000\ 2D^2 - 0.000\ 035V_f^2 \tag{4} \\ \eta = & 2.782\ 2T_{wf,in} - 0.718\ 8T_{wp,in} - 0.606\ 4R_{ld} - \\ & 2.770\ 1D - 1.731V_f - 0.002\ 6T_{wf,in}\ T_{wp,in} - \\ & 0.178\ 1T_{wf,in}R_{ld} + 0.031\ 1T_{wf,in}D - \end{aligned}$$

用五元二次回归正交旋转组合设计安排实验点。直接接触式膜蒸馏过程控制变量的设计水平及编码如表 1 所示。

$$\begin{aligned} & 0.014\ 7T_{wf,in}V_f + 0.115\ 6T_{wp,in}R_{ld} - \\ & 0.002\ 1T_{wp,in}D + 0.046\ 4T_{wp,in}V_f - \\ & 0.022\ 9R_{ld}D + 0.034R_{ld}V_f - 0.015\ 2DV_f - \\ & 0.009\ 2T_{wf,in}^2 - 0.023\ 7T_{wp,in}^2 + 0.383\ 8R_{ld}^2 + \\ & 0.030\ 4D^2 + 0.020\ 9V_f^2 \tag{5} \end{aligned}$$

通过方差分析来检测回归模型的有效性,一般而言,模型的拟合系数大于 0.9,说明拟合方程可以较为准确地预测实验值。利用方差分析中的统计量 F 值和 P 值来确定模型的显著性。 F 值越高、 P 值越小(小于 0.05),说明模型的统计显著性越高。对式(4)、式(5)进行方差分析可知,其拟合系数分别为 0.99 和 0.987,拟合系数较高,并且与调整后的拟合系数吻合性较好。另外,回归模型的 F 值较高,分别为 75.7 和 60.4, P 值较小,接近于 0,以上结果说明,产水率和热效率的回归方程可以很好地预测实验值,模型有效。

2.2 因素间交互作用分析

利用 Matlab 软件绘制了不同参数对产水率和热效率的响应曲面,当分析其中某 2 个参数之间的交互作用时,其他 3 个参数均取 0 水平值。响应曲面图中的平行线表示研究的 2 个参数之间没有交互作用,反之,若出现非平行线,则说明所研究的 2 个参数之间存在交互作用。

2.2.1 各因素对产水率的交互作用分析 图 2 表示料液入口温度与装填系数对组件产水率的影响。由图 2 可知:增大料液入口温度和装填系数对提高产水率均起到了促进作用;料液入口温度和装填系数对产水率的交互作用比较显著,说明其中一个参数的变化对另一个参数会有较大的影响;当装填系数较小时,产水率随料液入口温度的升高增加幅度较小,而装填系数较大时,产水率随料液入口温度升高有显著的增加;当料液入口温度较低时,产水率随

装填系数的增加而增大的幅度较小,而当料液入口温度较高时,产水率随装填系数的增加,呈现出一个比较明显的增大。这说明当料液入口温度和装填系数均取较大值时,可以获得一个相对较高的产水率。

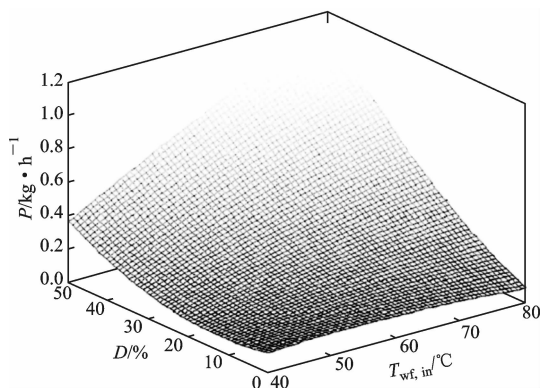


图2 料液入口温度与装填系数对产水率的响应曲面

图3表示装填系数与组件长径比对产水率的影响。由图3可见:产水率随长径比的增大而呈线性增大;装填系数对产水率的促进作用随着长径比的增大而逐渐明显。Cheng等研究了装填系数与膜丝长度对产水率的影响,发现产水率随着装填系数和膜丝长度的增加而增加^[17]。他们认为,雷诺数与装填系数之间存在函数关系,在壳程进口流体流速不变的情况下,随着装填系数的增加,壳侧膜面流速逐渐增加,从而使得壳侧传质系数不断增加。因此,产水率随着装填系数的增加而增加。耿洪鑫等报道了气隙式膜蒸馏过程中能量回收式膜组件的设计和性能,发现产水率随着组件长度的增加而逐渐增加,在料液入口温度 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、流量 $10\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ 、组件长度 1.1 m 的条件下,产水率约为 $0.65\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ ^[18]。Kim等同样研究了装填系数与膜丝长度对产水率的影响情况,发现产水率随着装填系数和膜丝长度的增加而增加,并且在装填系数和膜丝长度均取较大值时,产水率的增加幅度越来越小^[19]。

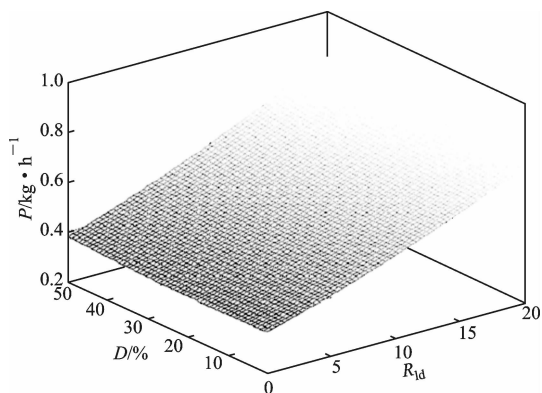


图3 装填系数与长径比对产水率的响应曲面

图4表示装填系数与膜面流速对产水率的影响。由图4可见:膜面流速和装填系数存在明显交互作用;产水率随着装填系数的增加而增加,尤其当膜面流速较大时,产水率的增加幅度更明显;当装填系数较低时,产水率随膜面流速的增加变化较小,而当装填系数较高时,产水率随膜面流速的增加而快速增加。这说明当装填系数与膜面流速均取得较大值时,产水率的增加会更加显著。

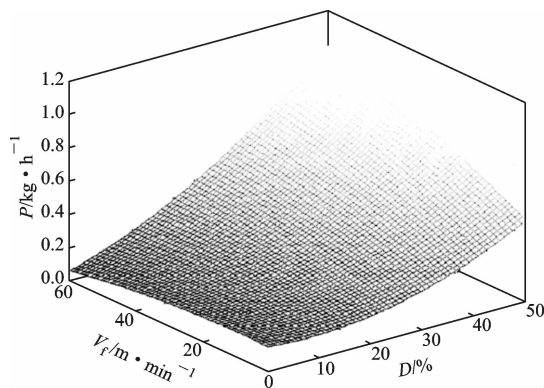


图4 膜面流速与装填系数对产水率的响应曲面

2.2.2 各因素对热效率的交互作用分析 图5表示料液入口温度与长径比对热效率的影响。由图5可见:料液入口温度和长径比存在明显交互作用,分别在料液入口温度最大而长径比最小的时候以及在料液入口温度最小而长径比最大的时候,存在2个最大值;当长径比在较低水平时,热效率随料液入口温度的增加而增加,而当长径比较大时,热效率随料液入口温度的增加而减小。由此可知,组件长径比对膜过程热效率的影响较为复杂。热效率随着料液入口温度的增加而减少,其原因可能是当长径比较大时,随着进料侧温度的升高,通过热传导而损失的热量越来越大,所以导致了热效率的降低。文献研究发现,在不改变膜组件结构参数的情况下,热效率随着料液入口温度的升高而增大。例如,Cheng等

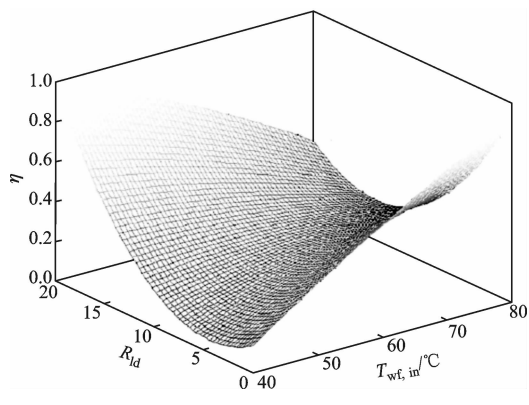


图5 料液入口温度与长径比对热效率的响应曲面

利用膜组件(膜丝长度为0.34 m,装填系数为60%)进行实验,发现热效率随着料液入口温度的升高而逐渐增加^[17];Fan等利用平板膜进行了DCMD和VMD实验,发现热效率均随着料液入口温度的升高而逐渐增加^[20];Duong等指出,当料液入口温度从45℃升高到50℃时,热效率增加了30%^[21]。由此可见,通过优化实验,可以更全面地考察组件结构参数和操作参数对膜组件性能的影响规律。

图6表示料液入口温度与装填系数对热效率的影响。由图6可知:料液入口温度与装填系数也存在明显的交互作用,造成料液入口温度与装填系数对热效率的影响比较复杂;当料液入口温度较低时,热效率随装填系数的增加而减少,而当料液入口温度较高时,热效率随着装填系数的增加而增加。其原因是,当料液入口温度较高时,热量主要以蒸汽潜热的形式穿过膜到达透过侧,使得热效率随着装填系数的增加而增加,而当料液入口温度较低时,膜两侧的推动力变小,蒸汽产量降低。相比而言,以热传导形式传递的热量所占比例增大,所以在料液入口温度较低时,热效率随着装填系数的增加而降低。这与Cheng等的研究结果^[17]一致,热效率随着装填系数的增加而降低,是由于用于水汽蒸发的热量低于因热传导而损失的热量所致。

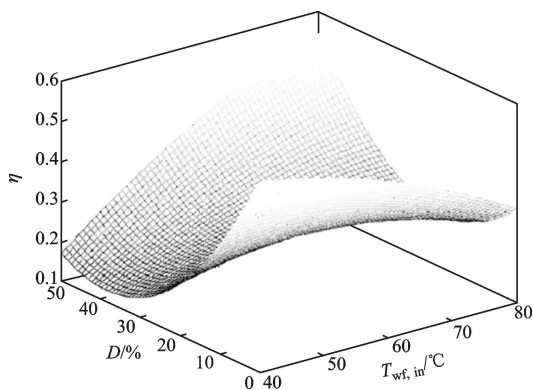


图6 料液入口温度与装填系数对热效率的响应曲面

图7表示透过侧温度与膜面流速对热效率的影响。由图7可见:透过侧温度与膜面流速的交互作用比较明显,只有当料液流速和透过侧温度同时较小或较大时,才可以获得较高的热效率;当流速较高时,热效率随着透过侧温度的升高而显著增大,而当流速较小时,随透过侧温度升高,热效率有略微下降。这可能是由于当流速较高时,料液在膜丝中的停留时间减少,随着透过侧温度的升高,膜两侧温差减小,使得流体的热传导损失变少,热效率增加;当流速较低时,料液在膜丝内停留时间较长,可能使热

传导损失增加,如果此时通过降低透过侧温度来提高膜蒸馏传质推动力,则使热效率得到一定提升。流速对热效率的影响取决于透过侧温度,当透过侧温度较低时,热效率随流速的降低而增大。Duong等发现同样的趋势,在料液入口温度50℃、透过侧温度25℃的条件下,热效率随着循环流速的降低而逐渐增大^[21]。由此可见,只有通过匹配合适的料液流速和透过侧温度,才能获得较高的热效率。

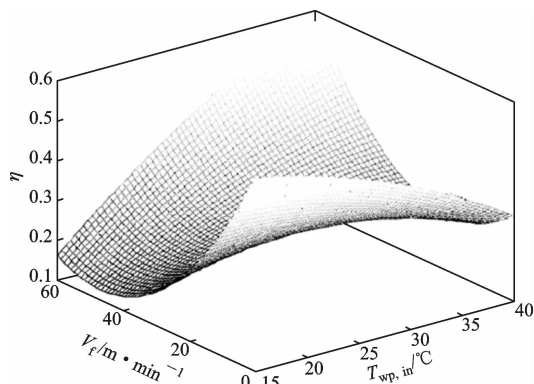


图7 透过侧温度与膜面流速对热效率的响应曲面

3 产水率和热效率的双指标优化

利用满意度函数法对产水率和热效率进行双指标优化,每一个响应值转化为一个单独的满意度函数 d_i ($0 < d_i < 1$),然后,整体的满意度函数(综合指标)由式(6)得出^[13]

$$D_m = (d_1 d_2 \cdots d_i \cdots d_m)^{1/m} = \left(\prod_{i=1}^m d_i \right)^{1/m} \quad (6)$$

式中: m 是响应值的个数。若考察双目标优化,则 $m=2$ 。

如果被优化的目标值要求取最大值,则单个目标值的满意度函数转化公式为

$$d_i = \left(\frac{z_i - z_{i,\min}}{z_{i,\max} - z_{i,\min}} \right)^g \quad (7)$$

式中: z_i 、 $z_{i,\min}$ 和 $z_{i,\max}$ 分别表示响应值的当前值、最小值和最大值; g 是权重系数。当考察双目标优化且具有相同权重时, g 取0.5。

通过式(6)和式(7)转化,即可将多指标优化转化为综合指标优化。对所得的 D_m 值进行回归分析,得到回归模型如下

$$\begin{aligned} D_m = & 0.049\ 59T_{wf,in} - 0.045\ 72T_{wp,in} - \\ & 0.028\ 78R_{ld} - 0.026\ 85D - 0.020\ 25V_f + \\ & 0.000\ 47T_{wf,in}T_{wp,in} - 0.001\ 65T_{wf,in}R_{ld} + \\ & 0.000\ 35T_{wf,in}D - 0.000\ 03T_{wf,in}V_f + \\ & 0.001\ 55T_{wp,in}R_{ld} - 0.000\ 06T_{wp,in}D + \end{aligned}$$

$$0.000\ 42T_{wp,in}V_f + 0.000\ 16R_{ld}D + 0.000\ 46R_{ld}V_f - \\ 0.000\ 02DV_f - 0.000\ 36T_{wf,in}^2 - 0.000\ 17T_{wp,in}^2 + \\ 0.004\ 3R_{ld}^2 + 0.000\ 26D^2 + 0.000\ 14V_f^2 \quad (8)$$

拟合系数为 0.988。同时,模型的预测值与实验值对比见图 8。通过拟合图可以看出, D_m 的实验值与预测值吻合度较高,说明可以利用式(8)准确地预测综合指标。

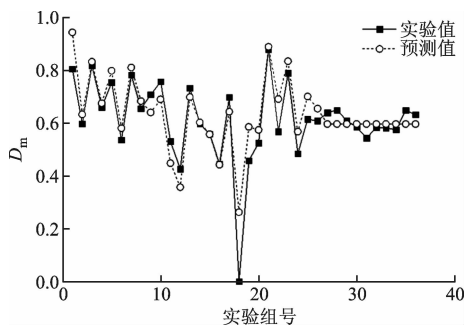


图8 综合指标 D_m 的实验值与预测值比较

利用遗传算法对式(8)进行最优化求解,得到最优条件为料液入口温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、透过侧入口温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、膜面流速 $60\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 、装填系数 50% 和长径比 20。在最优条件下进行实验,获得的产水率为 $1.697\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$,热效率为 88.2%,产水率和热效率的模型拟合值分别为 $1.76\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 82.96%。由此可见,产水率和热效率的实验值与预测值均吻合得较好,相对偏差分别为 3.6% 和 5.9%,说明利用回归模型得到的拟合结果有效。同时,在最优条件下得到的产水率和热效率实验值,均高于本研究其他实验条件下的数值,说明利用响应曲面模型和满意度函数法对 DCMD 过程进行拟合优化是可行的。直接接触式膜蒸馏热效率范围一般为 10%~70%^[22],本研究的热效率可达 88.2%。

4 结 论

采用回归旋转组合设计、响应曲面法和满意度函数法对直接接触式膜蒸馏过程进行了建模和优化,建立了以料液入口温度、透过侧入口温度、膜面流速、组件装填系数和长径比为变量的二次回归方程,预测了直接接触式膜蒸馏过程的产水率和热效率。利用方差分析对回归方程进行了检验。

通过响应曲面图分析了各考察变量对产水率和热效率的交互作用。针对产水率,料液入口温度与组件装填系数以及膜面流速与装填系数之间存在比较显著的交互作用。针对热效率,料液入口温度与装填系数、料液入口温度与长径比,以及透过侧入口

温度与膜面流速之间存在比较显著的交互作用。这对优化操作条件以及膜组件结构设计具有重要的指导意义。

通过遗传算法确定了产水率和热效率最优化时的条件:料液入口温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,透过侧入口温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,长径比为 20,装填系数为 50%,膜面流速为 $60\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 。此时,对应的产水率为 $1.697\text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$,热效率为 88.2%。实验结果表明,本文模型实验值与模型预测值吻合较好,说明本文研究的建模与优化过程是有效的。

参考文献:

- [1] DRIOLI E, ALI A, MACEDONIO F. Membrane distillation: recent developments and perspectives [J]. Desalination, 2015, 356: 56-84.
- [2] 吕晓龙,武春瑞,高启君,等.膜蒸馏海水淡化技术探讨[J].水处理技术,2015,41(10):26-30.
LÜ Xiaolong, WU Chunrui, GAO Qijun, et al. Discuss about membrane distillation for application [J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(10): 26-30.
- [3] CAMACHO LM, DUMEE L, ZHANG J, et al. Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications [J]. Water, 2013, 5(1): 94-96.
- [4] MERICQ J, LABORIE S, CABASSUD C. Vacuum membrane distillation of seawater reverse osmosis brines [J]. Water Research, 2010, 44(18): 5260-5273.
- [5] YANG C, LI X, GILRON J, et al. CF_4 plasma modified super hydrophobic PVDF membranes for direct contact membrane distillation [J]. Journal of Membrane Science, 2014, 456: 155-161.
- [6] 赵晶,武春瑞,吕晓龙.膜蒸馏海水淡化过程研究:三种膜蒸馏过程的比较[J].膜科学与技术,2009,29(1):83-89.
ZHAO Jing, WU Chunrui, LÜ Xiaolong. Seawater desalination by membrane distillation: a comparison of three processes [J]. Membrane Science and Technology, 2009, 29(1): 83-89.
- [7] SONG Z, JIANG L. Optimization of morphology and performance of PVDF hollow fiber for direct contact membrane distillation using experimental design [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 101: 130-143.
- [8] KHAYET M, COJOCARU C. Artificial neural network model for desalination by sweeping gas membrane distillation [J]. Desalination, 2013, 308: 102-

- 110.
- [9] KHAYET M, COJOCARU C, GARCIA-PAYO C. Application of response surface methodology and experimental design in direct contact membrane distillation [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(17): 5673-5685.
- [10] KHAYET M, COJOCARU C, BAROUDI A. Modeling and optimization of sweeping gas membrane distillation [J]. *Desalination*, 2012, 287: 159-166.
- [11] CHANG H, LIAU J, HO C, et al. Simulation of membrane distillation modules for desalination by developing user's model on aspen plus platform [J]. *Desalination*, 2009, 249(1): 380-387.
- [12] 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(5): 3163-3169.
- [13] COJOCARU C, KHAYET M. Sweeping gas membrane distillation of sucrose aqueous solutions: response surface modeling and optimization [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 81(1): 12-24.
- [14] HE Q, LI P, GENG H, et al. Modeling and optimization of air gap membrane distillation system for desalination [J]. *Desalination*, 2014, 354: 68-75.
- [15] ZAHERZADEH A, KARIMI-SABET J, MOUSAVI-AN S M A, et al. Optimization of flat sheet hydrophobic membranes synthesis via supercritical CO₂ induced phase inversion for direct contact membrane distillation by using response surface methodology (RSM) [J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2015, 103: 105-114.
- [16] CHENG D, GONG W, LI N. Response surface modeling and optimization of direct contact membrane distillation for water desalination [J]. *Desalination*, 2016, 394: 108-122.
- [17] CHENG L, WU P, CHEN J. Modeling and optimization of hollow fiber DCMD module for desalination [J]. *Journal of Membrane Science*, 2008, 318(1/2): 154-166.
- [18] 耿洪鑫, 徐义明, 李凭力, 等. 能量回收式膜蒸馏组件的设计和性能 [J]. *膜科学与技术*, 2014, 34(2): 85-89.
- GENG Hongxin, XU Yiming, LI Pingli, et al. Design of membrane distillation module with energy recovery and its performance for desalination [J]. *Membrane Science and Technology*, 2014, 34(2): 85-89.
- [19] KIM YD, THU K, GHAFPOUR N, et al. Performance investigation of a solar-assisted direct contact membrane distillation system [J]. *Journal of Membrane Science*, 2013, 427: 345-364.
- [20] FAN H, PENG Y. Application of PVDF membranes in desalination and comparison of the VMD and DCMD processes [J]. *Chemical Engineering Science*, 2012, 79: 94-102.
- [21] DUONG HC, COOPER P, NELEMANS B, et al. Optimising thermal efficiency of direct contact membrane distillation by brine recycling for small-scale seawater desalination [J]. *Desalination*, 2015, 374: 1-9.
- [22] ZHANG Y, PENG Y, JI S, et al. Review of thermal efficiency and heat recycling in membrane distillation processes [J]. *Desalination*, 2015, 367: 223-239.
- [本刊相关文献链接]**
- 齐宝金, 李翔. 微米级余弦槽表面疏水性及冷凝传热实验研究. 2016, 50(5): 32-37. [doi:10.7652/xjtuxb201605005]
- 马源, 曹文瑾, 林梅. 矩形截面螺旋通道内的二次流场特性. 2014, 48(8): 122-127. [doi:10.7652/xjtuxb201408021]
- 李春曦, 裴建军, 叶学民. 壁面微结构对超薄液膜流动特性的影响. 2013, 47(7): 40-46. [doi:10.7652/xjtuxb201307008]
- 叶学民, 沈雷, 李春曦. 分离压对含活性剂液膜流去湿过程的影响. 2013, 47(3): 96-101. [doi:10.7652/xjtuxb201303018]
- 蒋雪冬, 邱鹏, 张海亮, 等. 碳酸乙烯酯合成过程的反应吸收多场协同分析及数值模拟. 2012, 46(12): 92-97. [doi:10.7652/xjtuxb201212016]
- 慕韩锋, 冯霄. 用于化工系统分流结构的能值代数. 2012, 46(12): 98-102. [doi:10.7652/xjtuxb201212017]
- 王玉珍, 王建友, 吴志强, 等. 工艺参数对电去离子技术浓缩分离含镍离子溶液的影响. 2012, 46(5): 114-119. [doi:10.7652/xjtuxb201205020]
- 王赞社, 冯诗愚, 李云, 等. 中空纤维膜换热器传热传质特性的实验和理论研究. 2009, 43(5): 40-45. [doi:10.7652/xjtuxb200905009]
- 王赞社, 冯诗愚, 李云, 等. 中空纤维膜溶液热交换器的传热传质模拟研究. 2009, 43(3): 36-41. [doi:10.7652/xjtuxb200903008]
- 高铁瑜, 章利特, 夏庆峰, 等. 超音速气固两相分离试验研究. 2007, 41(11): 1311-1314. [doi:10.7652/xjtuxb200711014]

(编辑 刘杨 葛赵青)