

研究论文

# 膜过程中热质耦合传递分析

苏 铭, 闵敬春

(清华大学航天航空学院, 北京 100084)

**摘要:** 研究了透过致密无孔膜的传热传质过程, 考察了传热传质的相互作用, 建立了膜过程中热质耦合传递的数学模型, 并以湿空气透过薄膜分离过程为例, 分析了温差及浓度差的变化对传热传质过程的影响, 发现温差及浓度差的变化会引起热阻及湿阻的变化, 从而进一步影响热流量和传质通量, 所以对传热传质过程有加成作用。

**关键词:** 膜过程; 传热传质; 热质耦合; 湿空气

**中图分类号:** TK 124

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (2008) 04-0825-05

## Analysis of coupled heat and mass transfer in membrane process

SU Ming, MIN Jingchun

(School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A study was conducted to investigate the coupling effects of simultaneous heat and mass transfer through a membrane. A mathematic model was established to simulate the combined heat and mass transfer in the membrane separation process. With taking the membrane separation process of moist air as an example, the effects of temperature difference and moisture concentration difference on the heat and mass (moisture) transfer process were analyzed. It was found that the variations of the heat and mass transfer driving forces could cause the variations of both the thermal and moisture resistances of the membrane, which further affected the heat and mass transfer rates across the membrane, generating an additive effect.

**Key words:** membrane process; heat and mass transfer; heat and mass coupling; moist air

### 引 言

膜科学技术是一门新兴的高效分离、浓缩、提纯及净化技术, 膜和膜过程已进入各类科学研究和工业应用领域, 成为各相关领域的研究前沿与应用热点。目前膜分离已广泛应用于溶液及气体分离、废水处理、湿法冶金、石油化工、轻工纺织、食品加工等众多工业领域<sup>[1-3]</sup>, 其间传质与传热现象紧密联系<sup>[4-5]</sup>, 传热和传质过程相互耦合、相互影响,

已经引起许多学者的关注。

Phattaranawik 等<sup>[6-8]</sup>研究了直接膜蒸馏过程 (DCMD) 的传热传质特性, 分析了传质过程对传热系数及传热速率的影响, 同时在传热方程中考虑了传质所携带的能量, 建立了热量传递及总能量传递的模型, 并进行了数值模拟。Gryta 等<sup>[9-10]</sup>研究了膜蒸馏过程 (MD) 的传热传质特性, 建立了膜蒸馏的传热方程以及传热传质阻力的表达式, 并进行了实验验证, 讨论了传热传质各环节对传热传质

2007-08-29 收到初稿, 2007-11-19 收到修改稿。

**联系人:** 闵敬春。第一作者: 苏铭 (1980—), 男, 硕士研究生。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50576040)。

**Received date:** 2007-08-29.

**Corresponding author:** MIN Jingchun. E-mail: minjc@tsinghua.edu.cn

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (50576040).

阻力的影响。Karlsson 等<sup>[11]</sup>研究了薄膜蒸发渗透过程的传热传质特性,对蒸发渗透过程所消耗的热量及同时存在的热量传递和热阻进行了理论分析和实验研究,结果表明蒸发渗透过程中所耗热量等于汽化潜热与热扩散之和,并观察到流动边界层内存在温差极化现象。上述研究工作大多只考虑了传质过程对传热的影响或传热过程对传质的影响,且主要侧重于传质分离,研究膜分离中的传热过程也多为传质过程服务,而目前在空气换热除湿<sup>[12]</sup>等对传热传质有同等需求的领域,膜分离技术也逐步得以应用,薄膜传热传质过程的相互作用有待进一步研究。Zhang 等<sup>[13-16]</sup>研究了膜分离技术在空气换热除湿领域内的应用,对薄膜式全热换热器(即在室内外气体交换时可以对热量和水蒸气同时进行回收的设备)的性能进行了理论分析、数值模拟及实验研究,其中对湿空气透过薄膜的传热传质过程进行了分析,但更多地侧重于全热换热器的整体建模及应用层面。因此,本文针对透过致密无孔膜的传热传质过程,考察传热传质过程的相互耦合、相互作用,建立热质耦合传递的数学模型,并以湿空气的传热传质为例,分析温度及水蒸气浓度对传热传质过程的影响。

### 1 理论模型

考虑透过致密无孔膜的传热传质过程,两股气体在薄膜两侧流动,温度不同,待分离气体组分的分压力也不同,透过薄膜进行热质交换,物理模型如图 1 所示。传热和传质过程相互影响,因此在分析时应应对二者进行联合考察,从而对传热传质过程中的耦合影响加以描述。

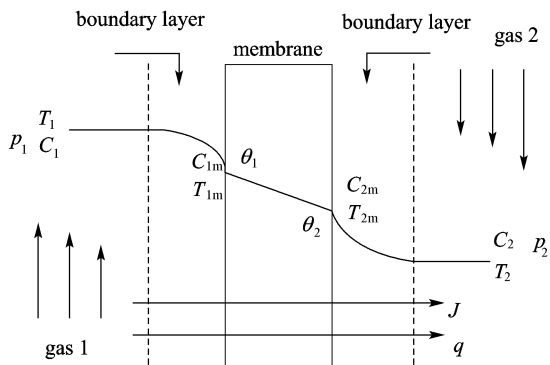


图 1 透过薄膜的传热传质

Fig. 1 Heat and mass transfer through a membrane

#### 1.1 传质过程

气体透过薄膜的驱动力为浓度梯度,传质分离

可以分为 3 个过程:气体 1 侧对流传质过程、分离气体在薄膜内的溶解扩散传递过程和气体 2 侧对流传质过程。假设气体可作为理想气体来处理,由理想气体状态方程得

$$p_1 = C_1 RT_1, p_2 = C_2 RT_2 \quad (1)$$

对于薄膜两侧气体对流传质过程,传质通量  $J$  可表示为

$$J = k_1(C_1 - C_{1m}) = k_2(C_{2m} - C_2) \quad (2)$$

根据薄膜传质的溶解扩散原理,薄膜表面吸附量与薄膜侧气体组分的浓度关系可以用 Henry 定律描述,气体组分在薄膜内部的扩散则可通过 Fick 定律描述。考虑温度对溶解度及扩散系数的影响,则溶解度  $S$  及扩散系数  $D$  可分别表示为

$$S = S_0 e^{-\Delta H_s/RT}, D = D_0 e^{-E_d/RT} \quad (3)$$

透过薄膜的传质通量  $J$  为

$$J = -D \frac{\partial \theta}{\partial x} = D \frac{S_1 C_{1m} - S_2 C_{2m}}{\delta} = D_0 S_0 e^{-E_d/RT_0} \frac{C_{1m} e^{-\Delta H_s/RT_{1m}} - C_{2m} e^{-\Delta H_s/RT_{2m}}}{\delta} \quad (4)$$

式中  $\Delta H_s$  为溶解热;  $E_d$  为扩散活化能;  $S_0$ 、 $D_0$  分别为溶解度与扩散常数,均与温度无关;  $\theta$  为薄膜表面吸附量;  $\delta$  为薄膜厚度;  $T_0$  取为  $T_{1m}$  和  $T_{2m}$  的算术平均值;  $x$  为传递方向。

为建立膜两侧对流传质与膜内传质的对应关系,设参数  $\xi$  为

$$\xi = \frac{C_{1m} e^{-\Delta H_s/RT_{1m}} - C_{2m} e^{-\Delta H_s/RT_{2m}}}{C_{1m} - C_{2m}} = \frac{(C_{1m}/C_{2m}) e^{\Delta H_s(T_{1m} - T_{2m})/RT_{1m} T_{2m}} - 1}{C_{1m}/C_{2m} - 1} e^{-\Delta H_s/RT_{2m}} \quad (5)$$

由式 (2)、式 (4) 和式 (5) 知,薄膜传质过程中传质阻力可表示为

$$R_L = \frac{1}{k_1} + \frac{\delta}{\xi D_0 S_0 e^{-E_d/RT_0}} + \frac{1}{k_2} \quad (6)$$

可以看到,  $\xi$  是薄膜两侧浓度以及温度的函数,这使得传质阻力不仅是物性的函数,而且也受工况及传热过程的影响。

#### 1.2 传热过程

同传质过程类似,传热也可以分为 3 个串联过程:气体 1 侧对流换热过程、薄膜内导热过程和气体 2 侧对流换热过程。

对于薄膜两侧气体对流换热过程,热流量  $q_1$  为

$$q_1 = h_1(T_1 - T_{1m}) = h_2(T_{2m} - T_2) \quad (7)$$

薄膜传质过程中,气体组分的吸附、脱附作用发生在薄膜表面,吸附将产生吸附热,而脱附则需

要吸收热量，因此相应的吸附热量应从薄膜一侧传递到另一侧，使得透过薄膜的热量要大于薄膜两侧的对流换热热量。

气体组分在薄膜两侧吸附、脱附过程所产生的热量称为潜热传递量  $q_2$ ，可表示为

$$q_2 = JL \quad (8)$$

此时，薄膜传递的总热量  $q$  为

$$q = q_1 + q_2 = -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_m \frac{T_{1m} - T_{2m}}{\delta} \quad (9)$$

式中  $\lambda_m$  为薄膜热导率； $L$  为吸附热，相当于吸附气体的液化热。

由式 (7) 和式 (9) 知，薄膜换热过程中热阻可表示为

$$R_h = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta(1+k_q)}{\lambda_m} + \frac{1}{h_2} \quad (10)$$

其中  $k_q$  为潜热显热比

$$k_q = \frac{q_2}{q_1} \quad (11)$$

对流传热与传质具有相似性，存在简单关联关系

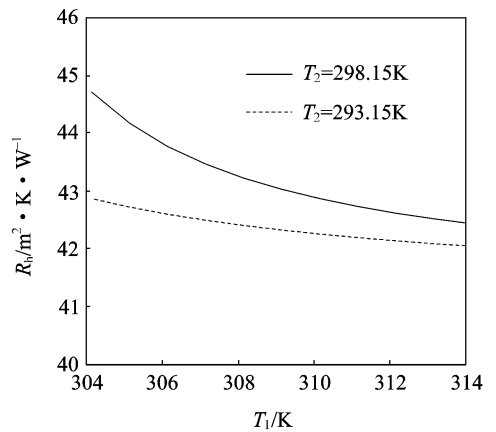
$$k = \frac{h}{\rho c_p} \quad (12)$$

## 2 计算结果及分析

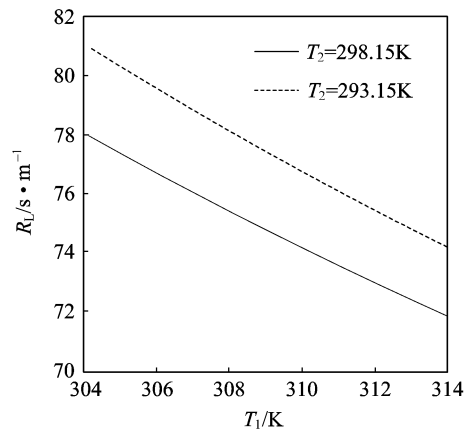
本文以湿空气的传热传质<sup>[5]</sup>为例，探讨薄膜传热换湿过程中热质传递的相互作用，主要分析薄膜两侧温度以及水蒸气浓度对传热传质过程的影响。根据平板换热性质<sup>[13-15]</sup>以及薄膜的特性<sup>[1]</sup>，相关参数分别取  $h_1 = h_2 = 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ， $\lambda_m = 0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ， $\delta = 0.1 \text{ mm}$ ， $D_0 S_0 = 0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ， $\Delta H_s + E_d = 30 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

### 2.1 薄膜两侧温度对热质传递过程的影响

薄膜传热换湿过程中热阻和湿阻（即传质阻力）随薄膜两侧温度的变化示于图 2。可以看出，随着气体 1 侧温度的升高，薄膜两侧温差增加，热阻和湿阻均随之减小；随着气体 2 侧温度的降低，薄膜两侧温差增加，热阻随之减小而湿阻随之增大。这是由于温差的增加直接导致热流量  $q_1$  的增加，使得潜热显热比  $k_q$  不断减小，由式 (10) 知，薄膜导热热阻比重降低，热阻随之减小，而热阻的减小又进一步促进  $q_1$  的增加；另一方面，气体 1 侧温度的升高使得薄膜温度随之增加，气体 2 侧温度的降低使得薄膜温度随之降低，而导热热阻比重的降低又使得薄膜两侧温差减小，由式 (5) 知薄



(a) thermal resistance



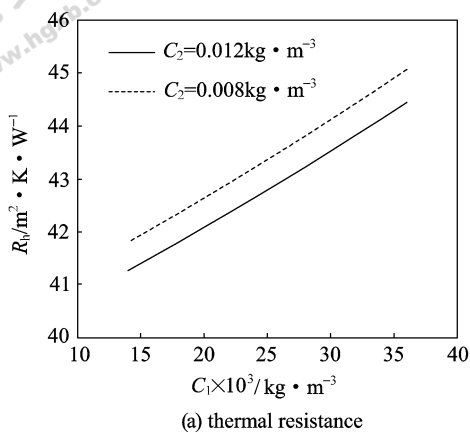
(b) moisture resistance

图 2 薄膜热阻和湿阻随温度的变化  
Fig. 2 Variations of thermal resistance and moisture resistance with temperature  
( $C_1 = 0.025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $C_2 = 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

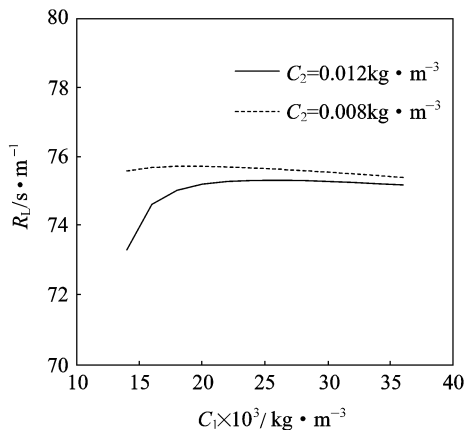
膜温度对  $\xi$  的影响更大，因此随着气体 1 侧温度的升高， $\xi$  随之增加，湿阻随之减小，随着气体 2 侧温度的降低， $\xi$  随之减小，湿阻则随之增大。湿阻减小导致传质通量的增加，这就削弱了  $k_q$  的减小速度，因此热阻的变化速度随气体 1 侧温度的升高而减缓，同理热阻的变化速度则随气体 2 侧温度的降低而增加。

### 2.2 薄膜两侧水蒸气浓度对热质传递过程的影响

薄膜传热换湿过程中热阻和湿阻随薄膜两侧水蒸气浓度的变化示于图 3。可以看出，随着气体 1 侧水蒸气浓度的增加，薄膜两侧水蒸气浓度差增加，热阻随之快速增大，湿阻则先增大后减小，但整体变化较小；随着气体 2 侧水蒸气浓度的降低，薄膜两侧水蒸气浓度差随之增加，热阻随之增大，湿阻也随之增大，但变化很小。



(a) thermal resistance



(b) moisture resistance

图 3 薄膜热阻和湿阻随水蒸气浓度的变化

Fig. 3 Variations of thermal resistance and moisture resistance with moisture concentration

( $T_1 = 313.15 \text{ K}$ ,  $T_2 = 298.15 \text{ K}$ )

这是由于水蒸气浓度差的增加直接导致传质通量  $J$  的增加, 这使得潜热显热比  $k_q$  不断增大, 由式 (10) 知, 薄膜导热热阻比重增加, 热阻随之增大, 从而导致热流量  $q_1$  的减小, 这又进一步促进了  $k_q$  的增加, 最终使得热阻随之快速增大; 另一方面, 导热热阻比重增加使得薄膜两侧温差增大,  $T_{1m}$  增加而  $T_{2m}$  减小, 受上述各种因素的影响, 随着气体 1 侧水蒸气浓度的增加,  $\xi$  先随之减小后逐渐增加, 湿阻则随之先增大后减小, 但整体变化较小。

从以上分析可知, 薄膜的传热传质过程是相互耦合、相互影响的, 温度及浓度梯度的变化将引起热阻及湿阻的变化, 这对热流量和传质通量有加成作用, 并进一步改变热流量和传质通量, 因此温度及浓度梯度的变化对传热传质过程有加成作用。

### 3 结 论

本文研究了透过致密无孔膜的传热传质过程, 考察了传热传质的相互作用, 建立了膜过程中热质耦合传递的数学模型, 并以湿空气的传热传质过程为例, 讨论了传热传质过程的相互影响, 主要结论如下:

(1) 升高高温侧温度和降低低温侧温度使得薄膜温差增加, 潜热显热比减小, 热阻随之减小; 湿阻受温度影响更大, 随高温侧温度的升高而降低, 随低温侧温度的降低而增大;

(2) 增大高浓度侧气体浓度和降低低浓度侧气体浓度使得薄膜两侧气体浓度差增加, 潜热显热比增大, 热阻快速增加; 湿阻受多种因素影响, 先增大后减小, 但整体变化较小;

(3) 温度及浓度梯度的变化将改变热阻和湿阻, 从而影响热流量和传质通量, 对传热传质过程有加成作用。

### 符 号 说 明

- $C$ ——气体组分浓度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- $c_p$ ——比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- $D_0$ ——扩散系数,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- $E_d$ ——活化能,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
- $\Delta H_s$ ——溶解热,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$
- $h$ ——对流传热系数,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- $J$ ——传质通量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- $k$ ——对流传质系数,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $k_q$ ——潜热显热比
- $L$ ——吸附热,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
- $p$ ——气体组分压力,  $\text{Pa}$
- $q$ ——热流量,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
- $R$ ——气体常数,  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- $R_h$ ——热阻,  $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$
- $R_L$ ——传质阻力,  $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
- $S_0$ ——溶解度,  $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
- $T$ ——温度,  $\text{K}$
- $\delta$ ——薄膜厚度,  $\text{m}$
- $\theta$ ——薄膜表面气体吸附量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- $\lambda$ ——热导率,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

### 下角标

- $m$ ——薄膜
- 1——气体 1 侧
- 2——气体 2 侧

## References

- [1] Marcel Mulder. Basic Principle of Membrane Technology (膜技术基本原理). Li Lin (李琳), trans. Beijing: Tsinghua University Press, 1996: 51
- [2] Zhu Changle (朱长乐). Membrane Science and Technology (膜科学技术). Beijing: Higher Education Press, 2003: 12
- [3] Wang Zhan (王湛). Base of Membrane Separation Technology (膜分离技术基础). Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 25
- [4] Alves V D, Coelho I M. Effect of membrane characteristic on heat and mass transfer in the osmotic evaporation process. *Journal of Membrane Science*, 2004, **228**: 159-167
- [5] Johnson D W, Yavuzturk C, Pruis J. Analysis of heat and mass transfer phenomena in hollow fiber membranes used for evaporative cooling. *Journal of Membrane Science*, 2003, **227**: 159-171
- [6] Phattaranawik J, Jiratananon R, Fane A G. Heat transport and membrane distillation coefficient in direct contact membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 2003, **212**: 177-193
- [7] Phattaranawik J, Jiratananon R, Fane A G, Halim C. Mass flux enhancement using spacer-filled channels in direct contact membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 2001, **187**: 193-201
- [8] Phattaranawik J, Jiratananon R. Direct contact membrane distillation: effect of mass transfer on heat transfer. *Journal of Membrane Science*, 2001, **188**: 137-143
- [9] Gryta M, Tomaszewska M. Heat transport in membrane distillation process. *Journal of Membrane Science*, 1998, **144**: 211-222
- [10] Alkhalabi A M, Lior N. Heat and mass transfer resistance analysis of membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 2006, **282**: 362-369
- [11] Karlsson H O E, Tragardh G. Heat transfer in pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 1996, **119**: 295-306
- [12] ASHRAE. 1993 ASHRAE Handbook—Fundamentals. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993: 23.1
- [13] Niu J L, Zhang L Z. Membrane based enthalpy exchanger: material considerations and clarification of moisture resistance. *Journal of Membrane Science*, 2001, **189** (3): 179-191
- [14] Zhang Y P, Jiang Y, Zhang L Z, Deng Y C, Jin Z F. Analysis of thermal performance and energy savings of membrane based heat recovery ventilator. *Energy*, 2000, **25** (2): 515-527
- [15] Zhang L Z, Niu J L. Energy requirements for conditioning fresh air and the long term savings with a membrane-based energy recovery ventilator in Hong Kong. *Energy*, 2001, **26** (2): 119-135
- [16] Zhang L Z, Niu J L. Effectiveness correlations for heat and mass transfer processes in an enthalpy exchanger with membrane cores. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2002, **122** (5): 922-929