

膜换湿过程吸附热对传热过程的影响分析

胡腾, 闵敬春*, 宋耀祖

清华大学航空航天学院工程力学系, 北京 100084

* E-mail: minjc@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2008-06-26; 接受日期: 2008-09-04

国家自然科学基金(批准号: 50576040)资助项目

摘要 对膜换湿过程中吸附热对传热过程的影响进行了理论研究, 建立了考虑吸附热的传热过程的数学物理模型. 通过分析得到了一个控制吸附热对膜过程中传热影响的无量纲数 $\Psi = JL\lambda / \delta(T_{10} - T_{20})$, 并分析了 Ψ 对换热过程的影响. 结果表明: 温度梯度与传质方向相同时, 有效热流方向会在 $\Psi=1$ 时发生变化. $\Psi < 1$ 时, 热量将由高温侧向低温侧传递, 此时传质通量越大或两侧温差越小, 总热阻就越大; 而 $\Psi > 1$ 时, 热质传递的综合效果是有效热流由低温侧向高温侧传递, 此时传质通量越大或两侧温差越小, 总热阻就越小. 而传热方向与传质方向相反时, 吸附热的存在会强化热量由高温侧向低温侧的传递, 使得总热阻减小. 传质通量 J 越大或温差越小, 总热阻也就越小.

关键词

膜换湿
吸附热
传热过程

膜技术作为一种新兴的技术, 已经在膜蒸馏、反渗透、膜除湿以及新风空调等多方面获得了广泛的应用. 膜换湿过程中, 传质和传热过程同时存在, 因此, 膜换湿中的传热过程必然会受到传质过程的影响.

许多研究者已经对膜换湿过程中的传质和传热过程进行了研究. Phattaranawik 等人^[1,2]对直接接触膜蒸馏过程中的传热过程进行了研究, 提出了存在质量传递时的传热模型, 并研究了膜内温度分布和透膜通量对传热的影响. Alklaibi 和 Lior^[3]对直接接触膜蒸馏的传热和传质过程进行了阻力分析, 提出了一个六阻力串联的模型, 并研究了各部分阻力对整体过程的影响. Gryta 和 Tomaszewska^[4]研究了膜蒸馏过程中的热传递现象, 采用不同的对流换热关联式对传热过程进行了数值模拟, 并通过与所做实验的比较找到了适合于膜蒸馏过程的对流换热关联式. Mengual 等人^[5]则研究了真空膜蒸馏中的传热过程,

并分析了传质对对流传热系数的影响. Karlsson 和 Tragardh^[6]对全蒸发过程中的传热现象进行了实验研究, 结果表明全蒸发过程热传递同时会影响到质量传递, 同时热边界层中的温度极化现象也会对质量传递造成影响. Alves 和 Coelho^[7]对渗透蒸发中的传热过程进行了研究, 提出了相应的传热传质模型, 并得到了与实验结果吻合较好的数值模拟结果. Niu 和 Zhang^[8]则研究了全热交换器中的传质传热过程, 考虑了潜热和显热在全热交换器效率中占的比重.

在膜换湿过程中除了透膜传质外还存在着吸附和脱附现象, 因此需要考虑吸附热对传热过程的影响. 然而, 大部分的研究者主要考虑的是透膜的质量流对传热过程的影响, 忽略了吸附热对传热过程的影响. 本文从理论方面对存在吸附热的传热过程进行了分析, 建立了相应的物理数学模型, 并研究了各种参数对传热过程的影响.

引用格式: 胡腾, 闵敬春, 宋耀祖. 膜换湿过程吸附热对传热过程的影响分析. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(10): 1725—1729

Hu T, Min J C, Song Y Z. Analysis of the effects of the heat of sorption on the process of heat transfer in moisture exchange across a membrane. Sci China Ser E-Tech Sci, 2008, 51(12): 2120—2127, doi: 10.1007/s11431-008-0308-1

1 理论模型与分析

对于膜换湿过程, 按照溶解扩散模型, 水蒸气首先吸附在一侧膜表面上, 然后通过扩散由一侧扩散到另一侧, 最后在另一侧表面上解吸. 在吸附的过程中会产生吸附热而放出热量, 在解吸的过程中则需要吸收热量. 由于吸附热的存在, 膜的吸附侧和解吸侧会形成热源和热汇, 从而影响到整个换热过程. 为了分析吸附热对传热过程的影响, 本文对模型进行两点假设: 1) 膜表面上由于吸附而产生的吸附热相当于冷凝热; 2) 膜内温度分布呈线性. 根据文献[1]中的推导, 在存在质量传递的情况下, 膜内温度分布为 $t = \frac{t_2 - t_1}{e^A - 1} e^{\frac{Ax}{\delta}} + \frac{t_1 e^A - t_2}{e^A - 1}$, 其中 $A = \frac{c_p J \delta}{\lambda}$ 为无量纲参数, J 为传质通量, δ 为膜厚, λ 为导热系数. 当 $A \ll 1$ 时, $e^A - 1 \approx A$, 此时膜内温度分布为 $t = t_1 + \frac{x}{\delta}(t_2 - t_1)$, 即温度分布为线性. 对于本文所研究的膜换湿过程, 无量纲参数 A 远小于 1, 因此假设 2 是合理的.

首先讨论温度梯度与传质方向相同的情况. 假设吸附侧主流温度为 T_{10} , 脱附侧主流温度为 T_{20} , 且有 $T_{10} > T_{20}$, 即传热与传质的方向相同, 对吸附侧膜表面的一个微元体进行分析, 如图 1 所示.

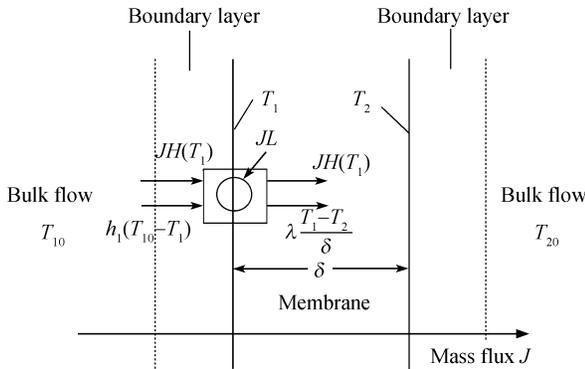


图 1 吸附侧膜表面能量守恒示意图

根据能量守恒原理, 在此界面有

$$h_1(T_{10} - T_1) + JH(T_1) + JL = \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} + JH(T_1), \quad (1)$$

同样对脱附侧膜表面进行分析可以得到

$$h_2(T_2 - T_{20}) + JH(T_2) + JL = \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} + JH(T_2), \quad (2)$$

其中 h_1, h_2 为两侧的对流传热系数, J 为传质通量, L 为吸附热, λ 为膜的热导率, $H(T)$ 为温度 T 下的焓值. 求解上面两个方程可得

$$T_1 = \frac{\left(\frac{h_1 \delta}{\lambda} + \frac{h_1}{h_2}\right) T_{10} + T_{20} + B}{\frac{h_1 \delta}{\lambda} + \frac{h_1}{h_2} + 1},$$

$$T_2 = \frac{\frac{h_1}{h_2} T_{10} + \left(\frac{h_1 \delta}{\lambda} + 1\right) T_{20} - \frac{h_1}{h_2} B}{\frac{h_1 \delta}{\lambda} + \frac{h_1}{h_2} + 1}, \quad (3)$$

其中 $B = \frac{JL\delta}{\lambda}$. 因为 JL 表示吸附热引起的热流, 而 $\frac{\delta}{\lambda}$ 表示薄膜的导热热阻, 因此 $B = \frac{JL\delta}{\lambda}$ 可以认为是吸附热在膜两侧所引起的附加温差.

在考虑了吸附热影响之后, 因为在界面上存在吸热和放热的过程, 整个流场内热流将不再相同. 在实际过程中, 关心的是高温侧主流区向低温侧主流区传递了多少热量, 这个热量的大小代表了整个系统换热能力的大小, 因此有效热流应该是由高温侧主流区传至低温侧主流区的热流, 因此整个系统的有效热流应该为膜两侧对流换热的热流, 即

$$q = h_1(T_{10} - T_1) = h_2(T_2 - T_{20}), \quad (4)$$

联立(3)和(4)式可解得

$$q = \frac{(T_{10} - T_{20}) - B}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}, \quad (5)$$

另外总热阻可以定义为总温差与系统有效热流之比, 即

$$R = \frac{T_{10} - T_{20}}{q} = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}\right) \left(1 + \frac{B}{T_{10} - T_{20} - B}\right), \quad (6)$$

而在不考虑吸附热的情况下, 热阻为

$$R = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}, \quad (7)$$

对比(6)和(7)式, 可以看出吸附热的存在使得总热阻增加了

$$\Delta R = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}\right) \frac{B}{T_{10} - T_{20} - B}, \quad (8)$$

将(6)和(8)式改写一下得到

$$R = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right) \left(\frac{1}{1-\Psi} \right), \Delta R = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right) \frac{\Psi}{1-\Psi}, \quad (9)$$

将(5)式改写可得到

$$q = \frac{(T_{10} - T_{20})(1-\Psi)}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}, \quad (10)$$

其中 $\Psi = \frac{B}{T_{10} - T_{20}} = \frac{JL\lambda}{\delta(T_{10} - T_{20})}$ 为无量纲量, 其物理意义是吸附热所引起的膜两侧附加温差和两侧主流区温差之比, 其大小决定了吸附热对传热过程的影响程度.

当 $\Psi < 1$ 时, 热阻的增量 ΔR 为正值, 即热阻增大, 说明吸附热的存在阻碍了热量的传导. 当 $\Psi = 1$ 时, 有效热流为 0, 热阻为无穷大, 说明此时吸附热的存在使得热量不能由高温侧传至低温侧. 当 $\Psi > 1$ 时, 有效热流方向将发生改变, 热量将从低温侧主流区传至高温侧主流区. 同时可以注意到的是, 随着 Ψ 的变化, 膜内热流的方向不会发生改变. Ψ 不同时, 温度的分布如图 2 所示.

当温度梯度与传质方向相反时, 则脱附侧为高

温区, 吸附侧为低温区. 仍然假设 $T_{10} > T_{20}$, 那么两个界面上的能量平衡方程为

$$h_1(T_{10} - T_1) - JH(T_1) - JL = \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} - JH(T_1), \quad (11)$$

$$h_2(T_2 - T_{20}) - JH(T_2) - JL = \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} - JH(T_2), \quad (12)$$

可以求得

$$T_1 = \frac{\left(\frac{h_1\delta}{\lambda} + \frac{h_1}{h_2} \right) T_{10} + T_{20} - B}{\frac{h_1\delta}{\lambda} + \frac{h_1}{h_2} + 1}, \quad (13a)$$

$$T_2 = \frac{\frac{h_1}{h_2} T_{10} + \left(\frac{h_1\delta}{\lambda} + 1 \right) T_{20} + \frac{h_1}{h_2} B}{\frac{h_1\delta}{\lambda} + \frac{h_1}{h_2} + 1}, \quad (13b)$$

$$R = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \right) \left(\frac{1}{1+\Psi} \right), \quad (14)$$

$$q = \frac{(T_{10} - T_{20})(1+\Psi)}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}}, \quad (15)$$

由(14)式可以看出温度梯度与传质方向相反时, 热阻

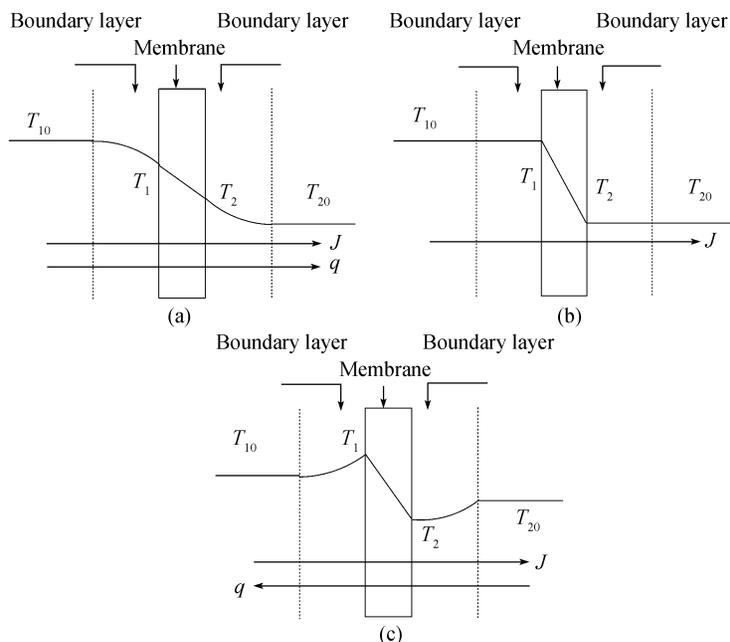


图 2 温度梯度与传质方向相同时膜过程温度分布示意图

与不考虑吸附热时相比减小了, 即吸附热的存在促进了热量的传导. 与温度梯度和传质方向相同的情况不同, 随着 Ψ 的变化, 有效热流并不会产生方向的变化, 而膜内热流的方向会发生改变. 随着 Ψ 的增大, 膜表面吸附侧温度会越来越高, 脱附侧温度会越来越低, 当 $\Psi = \frac{\delta}{\lambda} \left/ \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right) \right.$ 时, 吸附侧膜表面温度将等于脱附侧膜表面温度, Ψ 进一步增大时膜内热流的方向将发生改变. Ψ 不同时, 温度的分布如图 3 所示.

2 计算结果与讨论

本文以湿空气透过膜的传热传质过程为例, 对吸附热对薄膜换热能力的影响进行了探讨, 主要分析薄膜两侧温差和透膜传质通量对薄膜传热过程的影响. 参数取值如下 $h_1=h_2=50 \text{ W/m}^2\text{K}$; $\delta/\lambda=1 \times 10^{-3} \text{ Km}^2/\text{W}$ ($\lambda=0.1 \text{ W/mK}$ 时, $\delta=0.1 \text{ mm}$).

2.1 温度梯度与传质方向相同的情况

由于温度梯度与传质方向相同时, 随着无量纲量 Ψ 的变化, 有效热流方向会发生转变, 因此对 $\Psi < 1$ 和 $\Psi > 1$ 的情况分别进行计算.

在实际工程中, 一般来说 Ψ 会远小于 1. 图 4 表示了这种情况下透膜通量 J 和两侧温差 $\Delta T (=T_{10}-T_{20})$ 对热阻的影响, 可以看出, 在三种温差下, 热阻均随着 J 的增大而增大, 而 J 相同时, 温差越大热阻越小. 原因是传质通量 J 越大, 由吸附热造成的附加温差就越大, 对传热的阻碍也越大, 热阻因此随之增大.

但在某些温差较小传质通量比较大的特殊情况下, Ψ 将会大于 1, 此时热量将由低温测主流区传至高温侧主流区, 有效热流方向与 $\Psi < 1$ 的情况相反. 图 5 表示了这种情况下透膜通量 J 和两侧温差对热阻的影响, 可以看出, 在三种温差下, 热阻均随着 J 的增大而迅速降低, 而 J 相同时, 温差越大热阻就越大.

2.2 温度梯度与传质方向相反时的情况

与温度梯度与传质方向相同的情况不同, 温度梯度与传质方向相反时, Ψ 的变化不会导致有效热流方向的变化, 因此可归纳成一种类型. 图 6 示出在传热传质方向相反时不同温差下透膜通量 J 对热阻的影响. 可以看出, 在三种温差下, 热阻均随着 J 的增大而减小, J 相同时温差越大热阻越大. 原因是传质通量 J 越大, 由吸附热造成的热流就越大, 对传热的

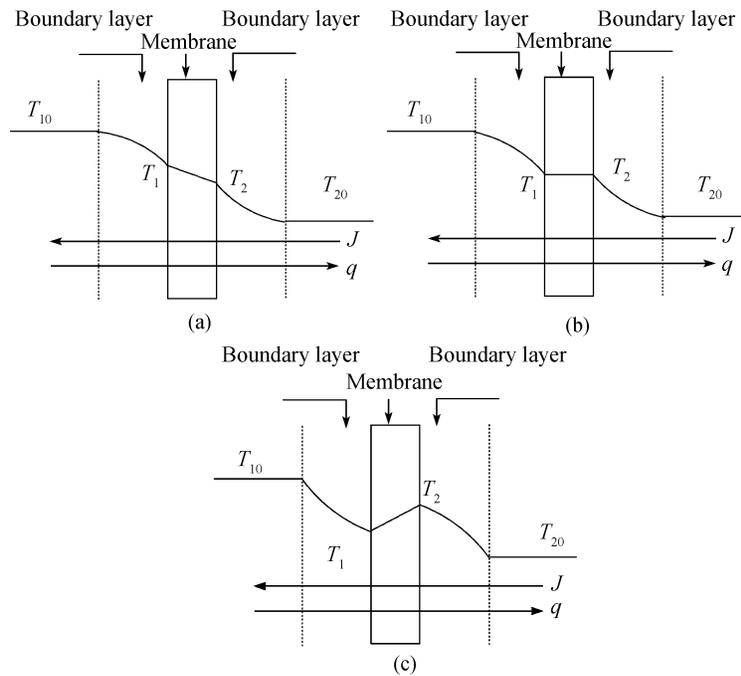


图 3 温度梯度与传质方向相反时膜过程温度分布示意图

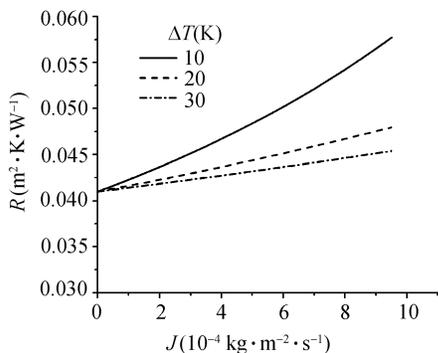


图 4 传热传质方向相同且 $\Psi < 1$ 时热阻的变化

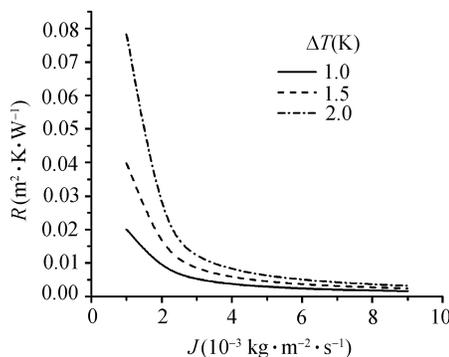


图 5 传热传质方向相同且 $\Psi > 1$ 时热阻的变化

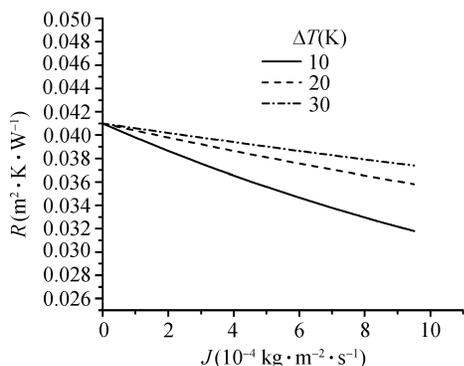


图 6 传热传质方向相反时热阻的变化

促进也越大, 热流因此随之增大, 热阻随之减小。

3 结论

(i) 建立了膜换湿过程中吸附热影响传热过程的物

理数学模型并进行了理论分析, 指出吸附热对膜过程中传热的影响主要受无量纲数 $\Psi = JL\lambda / \delta(T_{10} - T_{20})$ 的控制, 其物理意义为吸附热所引起的附加温差与实际温差之比, 其大小决定了吸附热对传热过程的影响程度。

(ii) 温度梯度与传质方向相同时, 有效热流方向会在 $\Psi = 1$ 时发生变化。 $\Psi < 1$ 时, 热量将由高温侧向低温侧传递, 此时传质通量 J 越大或温差越小, 总热阻就越大; 而 $\Psi > 1$ 时, 热量将由低温侧向高温侧传递, 此时传质通量 J 越大或温差越小, 总热阻就越小。

(iii) 传热方向与传质方向相反时, 吸附热的存在会强化热量由高温侧向低温侧的传递, 使得总热阻减小。此时传质通量 J 越大或温差越小, 吸附热对传热过程的促进作用就越强, 总热阻也就越小。

参考文献

- 1 Phattaranawik J, Jiraratananon R. Direct contact membrane distillation: Effect of mass transfer on heat transfer. *J Membr Sci*, 2001, 188(1): 137—143 [\[DOI\]](#)
- 2 Phattaranawik J, Jiraratananon R, Fane A G. Heat transport and membrane distillation coefficients in direct contact membrane distillation. *J Membr Sci*, 2003, 212(2): 177—193 [\[DOI\]](#)
- 3 Alklaibi A M, Lior N. Heat and mass transfer resistance analysis of membrane distillation. *J Membr Sci*, 2006, 282(3): 362—369 [\[DOI\]](#)
- 4 Gryta M, Tomaszewska M. Heat transport in the membrane distillation process. *J Membr Sci*, 1998, 144(2): 211—222 [\[DOI\]](#)
- 5 Mengual J I, Khayet M, Godino M P. Heat and mass transfer in vacuum membrane distillation. *Int J Heat Mass Transfer*, 2004, 47(7): 865—875 [\[DOI\]](#)
- 6 Karlsson H O E, Tragardh G. Heat transfer in pervaporation. *J Membr Sci*, 1996, 119(2): 295—306 [\[DOI\]](#)
- 7 Alves V D, Coelho I M. Study of mass and heat transfer in the osmotic evaporation process using hollow fibre membrane contactors. *J Membr Sci*, 2007, 289(2): 249—257 [\[DOI\]](#)
- 8 Niu J L, Zhang L Z. Membrane-based Enthalpy Exchanger: Material considerations and clarification of moisture resistance. *J Membr Sci*, 2001, 189(2): 179—191 [\[DOI\]](#)