膜换湿传质过程对传热过程影响分析

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

* 联系人, E-mail: minjc@tsinghua.edu.cn

2009-01-24 收稿, 2009-04-08 接受

国家自然科学基金资助项目(批准号: 50576040)

摘要 对膜换湿过程中传质过程对传热过程的影响进行了理论分析, 并建立了相应的物理数学模型. 通过理论分析, 提出了一个表示传质过程影响传热过程程度的无量纲量— ψ_i . 通过计算这个无量纲因子, 即可以简单地将伴有传质的传热过程转化成常规的传热过程, 使得传热计算更简单更容易理解. 在理论分析的基础上, 数值研究了质量流量对传热过程的影响. 结果表明, 当传质方向与传热方向相同时, ψ_i 大于 1, 传质过程对传热过程有促进作用; 而当传质方向与传热方向相反时, ψ_i 小于 1, 传质过程对传热过程有阻碍作用. 当质量流量 J 的值较小时, 质量流携带的热流对热流影响较小, 而当质量流量 J 的值较大时, 质量流携带的热流对总热流影响很大, ψ_i 可能偏离 1 很远.

关键词
膜
换湿
传质
传热

与传统分离工艺相比, 新兴的膜分离技术具有驱动力低分离效果好、设备简单以及环保等诸多优点, 已经广泛应用于各类科学研究和工业应用领域^[1]. 随着生活水平的提高, 人们对室内空气质量提出了更高的要求, 高效节能的新风空调已经成为空调行业发展的重要课题. 而薄膜除湿增湿技术为解决这一问题提供了一条可行的途径.

膜换湿过程中, 同时存在着传质和传热过程, 因此, 膜换湿中的传热过程会受到传质过程的影响, 在研究膜换湿过程的传热问题时, 必须要考虑到传质过程对传热过程的影响. 目前, 国内外已经有一些研究者对膜传递过程中的传质和传热过程进行了研究. Phattaranawik等人^[2,3]对直接接触膜蒸馏过程中的传热过程进行了分析, 提出了存在质量传递时的传热模型, 研究了膜内温度分布和透膜通量对传热的影响. Alves等人^[4]则研究了反渗透中的传热过程, 考察了相变换热对传热传质过程的影响. Gostoli^[5]分析了温度以及相变换热对渗透蒸馏的影响, 同时通过推导得到了流量随温度的变化系数. Gryta等人^[6]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^[7]则研究了真空膜蒸馏中的传热过程, 并分析了传质对对流换热系数的影响. Niu等人^[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.

目前, 针对膜换湿过程中传质过程对传热过程影响的研究还比较少, 缺乏较为系统的理论模型. 本文主要采用理论分析和数值模拟的方法对膜换湿中的传热过程进行了研究, 建立了传质过程影响传热过程的物理数学模型, 并研究了各参数对传热过程的影响.

1 理论分析

如图 1, 温度为 T_{10} 的流体流过壁面, 其中某种组分透过膜进行质量传递, 到达另一侧温度为 T_{20} 的主流区, 传质通量为 J . 假设 $T_{10} > T_{20}$, 定义传质方向与传热方向相同时, J 值为正数; 传质方向与传热方向相反时, J 值为负数. 为了方便推导, 本文采用简化的

引用格式: 胡腾, 闵敬春, 宋耀祖. 膜换湿传质过程对传热过程影响分析. 科学通报, 2009, 54: 1922~1926

Hu T, Min J C, Song Y Z. Analyses of the effects of mass transfer on heat transfer in the process of moisture exchange across a membrane. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0361-6

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-13-1922>

图1 膜加湿过程示意图

对流传热模型^[9,10], 假设温度梯度都集中在靠近膜表面处的温度边界层内, 在温度边界层内认为流动是停滞的. 这个模型将整个对流传热过程视为此层内的导热过程, 边界层厚度 δ 由流体的流动特征所决定, 在边界层外温度为主流区温度. 那么边界层内的传热过程由两部分组成:

() 导热热量: $q_c = -\lambda \frac{dT}{dx}$;

() 由传质过程所带来的热量: $q_m = c_p J (T - T_0)$, 其中 c_p 为水蒸气的比热, T_0 是计算焓值时对于系统的基准温度. 那么总的热流为

$$q = c_p J (T - T_0) - \lambda \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

因此在此薄层内有控制方程

$$\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - c_p J \frac{dT}{dx} = 0. \quad (2)$$

在膜内, 热量同样由导热热量和质量传递所携带的热量组成, 于是膜内热量传递的控制方程为

$$\lambda_m \frac{d^2 T}{dx^2} - c_p J \frac{dT}{dx} = 0. \quad (3)$$

可以看出, 薄层内和膜内的控制方程和边界条件的形式是相同的. 那么, 这个问题就可以看成是一个多层膜串联的伴有传质的传热问题. 对于其中的一层, 边界条件为

$$\begin{aligned} x=0, T &= T_1; \\ x=\delta_m, T &= T_2; \end{aligned}$$

那么可解得

$$q_m = \frac{e^{A_m} T_1 - T_2}{e^{A_m} - 1} c_p J - c_p J T_0$$

其中 $A_m = c_p J \delta_m / \lambda_m$, 其物理意义为质量传递携带热量与导热热量的比值, T_0 为计算流体焓的基准温度.

现在考虑一个有 n 层串联膜的情况, 伴随着 J 的质量流量, 其中膜参数为 $\lambda_1 / \delta_1, \lambda_2 / \delta_2 \dots \lambda_n / \delta_n$, 界面的温度分别为: $T_1, T_2 \dots T_n, T_{n+1}$, 对于其中的任一层, 比如第 i 层膜来说, 假设基准温度取为 T_{i+1} , 那么:

$$\begin{aligned} q_{i+1} &= \frac{e^{A_i} T_i - T_{i+1}}{e^{A_i} - 1} c_p J - c_p J T_{i+1} = \frac{e^{A_i} (T_i - T_{i+1})}{e^{A_i} - 1} c_p J \\ &= \frac{A_i e^{A_i}}{e^{A_i} - 1} \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_i - T_{i+1}), \end{aligned} \quad (4)$$

其中 q_{i+1} 的下标表示基准温度为 T_{i+1} , 那么在第 i 层膜中, 伴有质量流的传热过程的等效导热系数相当于 $\psi_{i,i+1} \lambda_i$, 其中 $\psi_{i,i+1} = \frac{A_i e^{A_i}}{e^{A_i} - 1}$. 我们将 $\psi_{i,i+1}$ 命名为导热系数修正因子, 其下标表示第 i 层膜, 基准温度为 T_{i+1} .

对于整个系统来讲, 基准温度需要取一个统一的值, 一般来讲取为 T_{n+1} 是比较合适的, 于是, 对于第 i 层膜来讲, 导热系数修正因子形式将发生变化, 为了推导 $\psi_{i,n+1}$ 的形式, 我们假设第 i 层膜的传热过程基准温度取为 T_m 时, 导热系数修正因子为 $\psi_{i,m}$, 那么当基准温度取为 T_{m+1} 时, 有

$$q_m = \psi_{i,m} \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_i - T_{i+1}), \quad (5)$$

其中 q_m 表示基准温度为 T_m 时的热流. 同时根据(1)式可知:

$$q_{m+1} = q_m + c_p J (T_m - T_{m+1}), \quad (6)$$

而根据(4)式, 则有

$$q_{m+1} = \frac{A_m e^{A_m}}{e^{A_m} - 1} \frac{\lambda_m}{\delta_m} (T_m - T_{m+1}) = \frac{e^{A_m}}{e^{A_m} - 1} c_p J (T_m - T_{m+1}), \quad (7)$$

由(7)式和(6)式可得

$$q_{m+1} = e^{A_m} q_m, \quad (8)$$

(5)式代入(8)式有

$$q_{m+1} = e^{A_m} \psi_{i,m} \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_i - T_{i+1}), \quad (9)$$

于是可以看出, 基准温度取为 T_{m+1} 时导热系数修正因子为:

$$\psi_{i,m+1} = e^{A_m} \psi_{i,m}. \quad (10)$$

根据(4)式, 我们知道:

$$\psi_{i,i+1} = \frac{A_i e^{A_i}}{e^{A_i} - 1},$$

那么根据(9)式, 我们即可推得基准温度取为 T_{n+1} 时, 对于第 i 层膜:

$$q = \prod_{k=i}^n e^{A_k} \frac{A_i}{e^{A_i} - 1} \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_i - T_{i+1}). \quad (11)$$

即对于第 i 层膜, 其导热系数修正因子为

$$\psi_{i,n+1} = \prod_{k=i}^n e^{A_k} \frac{A_i}{e^{A_i} - 1}. \quad (12)$$

我们简记 $\psi_{i,n+1}$ 为 ψ_i . 那么膜传递中, 质量流对传热过程的影响即可用导热系数修正因子 ψ_i 来表示. 当修正因子接近 1 时, 说明质量流对传热过程的影响很小, 而当修正因子偏离 1 很多时, 说明质量流对传热过程的影响较大. 此外, 当 J 为正时, $\psi_i > 1$, 说明传质对传热过程有促进作用, 当 J 为负时, $\psi_i < 1$, 说明传质对传热过程有阻碍作用.

对于膜换湿过程, 可以将流入侧停滞层、膜以及流出侧停滞层视为 3 层串联起来的膜. 由于膜两侧边界层厚度难以获得, 我们采用对流换热公式来得到其厚度, 在没有传质的情况下, $q = h_1(T_{10} - T_1)$, 而在停滞层中, 没有传质的情况下 $q = \frac{\lambda_1}{\delta_1}(T_{10} - T_1)$, 对比

上面两式可以近似得到 $\delta_1 = \frac{h_1}{\lambda_1}$, 同样可得到 $\delta_2 = \frac{h_2}{\lambda_2}$.

那么 A_1, A_2, A_3 可表示为:

$$A_1 = \frac{c_p J}{h_1}, \quad A_2 = \frac{c_p J \delta_m}{\lambda_m}, \quad A_3 = \frac{c_p J}{h_2},$$

其中 h_1, h_2 的值可以由经验关联式得到.

那么根据(12)式, 易得:

$$\psi_1 = e^{A_1} e^{A_2} e^{A_3} \frac{A_1}{e^{A_1} - 1}, \quad \psi_2 = e^{A_2} e^{A_3} \frac{A_2}{e^{A_2} - 1}, \quad \psi_3 = e^{A_3} \frac{A_3}{e^{A_3} - 1}$$

于是总湿阻即可求得为:

$$R_{\text{tot}} = \frac{\delta_1}{\psi_1 \lambda_1} + \frac{\delta_2}{\psi_2 \lambda_2} + \frac{\delta_3}{\psi_3 \lambda_3}, \quad (13)$$

因为 $\lambda_1 / \delta_1 = h_1, \lambda_2 / \delta_2 = \lambda_m / \delta_m, \lambda_3 / \delta_3 = h_2$, 于是:

$$R_{\text{tot}} = \frac{1}{\psi_1 h_1} + \frac{\delta_m}{\psi_2 \lambda_m} + \frac{1}{\psi_3 h_2} = R_1 + R_m + R_2, \quad (14)$$

$$q = \frac{T_{10} - T_{20}}{R_{\text{tot}}}. \quad (15)$$

根据(14)和(15)式即可求得膜换湿过程中的热流密度及热阻. 与相关文献 [2,3] 中的推导结果相比较, 可以看出在形式上更为简洁, 且具有明确的物理意义.

2 数值计算

以湿空气透过膜的传热传质过程为例, 对质量传递对换热过程的影响进行了探讨, 主要研究了质

流量的大小对热阻和导热系数修正因子的影响. 参数取值如下: $h_1 = h_2 = 30 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$; $\lambda_m / \delta = 50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ($\lambda_m = 0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 时, $\delta = 0.2 \text{ mm}$).

图 2 和 3 表示了各部分热阻随 J 的变化, 从图中可以看出, J 为正, 即传质方向与温度梯度方向相同时, 随着 J 的增大, 总热阻以及各部分热阻均减小. 在三部分热阻中, 流入侧热阻随 J 的增加减小速度较快, 而流出侧热阻随 J 的增加减小速度较慢, 其原因是流入侧平均温度较高, 质量流携带的热量相对较大, 而流出侧平均温度较低, 质量流携带的热量相对较小. 而当 J 为负, 即传质方向与温度梯度相反时, 随着 J 的增大, 总热阻以及各部分热阻均增大, 流入侧热阻随 J 增加的速度较快, 而流出侧热阻随 J 而增加的速度较慢, 膜自身热阻所占比例较小.

图 2 J 为正时各部分热阻随 J 的变化

图 3 J 为负时各部分热阻随 J 的变化

图 4 和 5 表示了 J 为正时和为负时总热流随 J 的变化. 从图中可以看出, 当 J 为正时, 质量传递对传

热过程有促进作用,随着 J 的增大,总热流的大小基本成线性增大,而 J 为负时,质量流携带的热流方向与总热流方向相反,质量传递对传热过程有阻碍作用,随着 J 的增大,总热流不断减小.

图4 J 为正值总热流随 J 的变化

图5 J 为负时总热流随 J 的变化

图6和7表示了 J 为正值和为负时导热系数修正因子随质量流量 J 的变化.从图中可以看出,当 J 为正值,修正因子大于1,随着 J 的增大,修正因子的大小随之增大,而 J 为负时,修正因子小于1,随着 J 的增大,修正因子的大小随之减小.同时可以看出的是,温度较高的一侧修正因子偏离1更多,而温度低的一侧修正因子较为接近于1.当 J 较小时,质量流携带的热流对热流影响较小,如 J 小于 10^{-4} kg/(m²·s)时,对总热流的影响在3%以内.当 J 较大时,质量流携带的热流对热流产生了比较明显的影响,如当 $J=5 \times 10^{-4}$ kg/(m²·s)时,修正因子偏离1的程度将超过10%.而在一些极端情况下,如当 J 大于 10^{-3} kg/(m²·s)时,修正因子会迅速增大或减小,偏离程度可以超过100%.

图6 J 为正值修正系数随 J 的变化

图7 J 为负时修正系数随 J 的变化

3 结论

(1) 建立了膜换湿过程中传质过程影响传热过程的物理数学模型并进行了理论分析,提出了一个表示传质过程影响传热过程程度的无量纲量:修正因子 ψ_i .通过计算这个修正因子,可以简单地将伴有传质的传热过程转化成常规的传热过程,使得传热计算更简单更容易理解.

(2) 在理论分析的基础上,通过数值计算研究了质量流量对传热过程的影响.结果表明,当传质方向与传热方向相同时,传质过程对传热过程有促进作用,热阻随质量流量增大而减小,热流随质量流量增大而增大.当传质方向与传热方向相反时,传质过程对传热过程有阻碍作用,热阻随质量流量增大而增大,热流随质量流量增大而减小.

(3) 当质量流量 J 为正值,修正因子大于1,随着 J 的增大,修正因子随之增大;而 J 为负时,修正因子

小于 1, 随着 J 的增大, 修正因子随之减小. 当 J 较小时, 质量流携带的热流影响较小, 如 J 小于 10^{-4} kg/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 时, 对总热流的影响在 3% 以内. 当 J 较大时, 质量流携带的热流对热流有比较明显的影响, 如当

$J=5 \times 10^{-4}$ kg/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 时, 修正因子偏离 1 的程度将超过 10%. 而在一些极端情况下, 如当 J 大于 10^{-3} kg/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 时, 修正因子会迅速增大或减小, 偏离程度可以超过 100%.

参考文献

- 1 Mulder M. Basic Principles of Membrane Technology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991
- 2 Phattaranawik J, Jiratananon R. Direct contact membrane distillation: Effect of mass transfer on heat transfer. J Membr Sci, 2001, 188: 137–143 [DOI]
- 3 Phattaranawik J, Jiratananon R, Fane A G. Heat transport and membrane distillation coefficients in direct contact membrane distillation. J Membr Sci, 2003, 212: 177–193 [DOI]
- 4 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: 249–257 [DOI]
- 5 Gostoli C. Thermal effects in osmotic distillation. J Membr Sci, 1999, 163: 75–91 [DOI]
- 6 Gryta M, Tomaszewska M. Heat transport in the membrane distillation process. J Membr Sci, 1998, 144: 211–222 [DOI]
- 7 Mengual J I, Khayet M, Godino M P. Heat and mass transfer in vacuum membrane distillation. Int J Heat Mass Transfer, 2004, 47: 865–875 [DOI]
- 8 Niu J L, Zhang L Z. Membrane-based enthalpy exchanger: Material considerations and clarification of moisture resistance. J Membr Sci, 2001, 189: 179–191 [DOI]
- 9 Edwards D K. Transfer processes: An introduction to diffusion, convection, and radiation. Washington: Hemisphere Publishing Co, 1976
- 10 连之伟, 张寅平, 陈宝明. 热质交换原理与设备. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006

· 动态 ·

非洲人遗传结构多样性分析研究取得进展

大约 20 万年前现代人类起源于非洲. 10 万年之后, 他们中的部分群体走出非洲, 随后遍布全球. 可以说现代人类在非洲连续存在的时间比在任何其他地区都要长. 非洲人一直保持着相对大的人口数, 这导致非洲人中遗传多样性的程度较高. 非洲人在居住地和民族方面的种种差异, 还导致了他们在语言、文化和外形等方面的多样性. 在非洲有 2000 个以上说不同语言的群体, 占全世界语种的近三分之一. 除了少数孤立语种, 其余的大多数语种已经被归类为 4 个“主要家族”: 尼日尔-科尔多凡语系; 亚非语系; 尼罗-撒哈拉语系; Khoesan 语系(在南非和东非的某些地区使用, 语言中包含有倒吸气的辅音). 科学家面临的问题是上述两类多样性是否匹配, 又如何关联?

最近, 来自美国马里兰大学的 Sarah A. Tishkoff 及其合作者(总共 25 位, 分别来自美国、非洲和欧洲的 18 个研究机构)在 *Science* 周刊上撰文, 报道了他们对非洲人和非洲裔美国人遗传变异图谱所作出的分析. 有关专家高度评价这一工作, 认为对于重构人类进化史, 弄清非洲人和非洲裔美国人的历史变迁及遗传疾病的研究具有重要意义. 而且新的基因突变、基因漂移以及特定区域的强制性选择, 可能导致与疾病相关的变异具有区域性的特点. 因此, 这项研究还将使生物医学研究受益(特别针对这次研究所关注的人群).

研究小组的基因型样本取自 2432 名非洲人(来自 113 个居住地各异的人群)、98 名非洲裔美国人和 21 名也门人; 另外还取自人类基因组计划的公开数据. 这里所谓遗传多样性是指: 在对 1327 个多态标记(其中包括 848 个染色体随体片段用以观察等位基因的改变, 476 个插入/删除标记和 4 个单核苷酸多态位点)进行基因组测序中, 观察到的个体间的差异. 结果表明, 现代非洲人是从 14 个先祖人群集团进化而来; 遗传多样性随着远离非洲而减弱, 这与现代人类“连续奠基者”(serial founder)的模型相符. 在大约 10 万年前, 有一个离群的非洲人小团体走出非洲(出发地在西南非洲的纳米比亚和安哥拉海岸, 迁徙出口位于东北非的红海中段), 这些人分别在欧洲、亚洲、澳洲和美洲继续繁衍, 其过程形成了一条条顺序的迁徙-殖民链. 无论是当年走出非洲的, 还是未走出非洲的, 他们的后代共同组成了今天 60 亿人口的世界大家庭. 非洲人与中东人群共享了最大数量的等位基因. 研究组还使用基因组宽度的标记, 推断作为研究对象的若干非洲裔美国人群的血缘. 研究表明, 他们主要来自西非的“尼日尔-科尔多凡家族”(人群)(平均占 71%), 也来自“欧洲-中东”(平均占 13%); 此外, 还来自印地安(平均占 5%)、东亚(平均占 1.5%)以及其他的非洲人群.

(戴闻 编译自 *Science*, 2009, (324): 1035–1044)