

文章编号:0253 - 4339(2017) 06 - 0020 - 07
doi:10.3969/j.issn.0253 - 4339.2017.06.020

低雷诺数下溴化锂溶液降膜吸收热质传递的数值研究

张联英 李杨 王远 杨肖虎 金立文 孟祥兆

(西安交通大学人居环境与建筑工程学院 西安 710049)

摘要 溴化锂溶液降膜吸收是吸收式空调系统中常见的热质传递形式之一。本文对溶液降膜吸收过程的热质耦合传递分析,建立了溴化锂溶液垂直降膜吸收热质传递的二维数学物理模型,采用 CFD-Fluent 对模型进行求解。计算得到不同 Re 下的液膜界面温度、液膜内浓度分布、传热传质通量及传热传质系数等。分析了 Re 对降膜吸收过程中热质传递的影响。结果表明:当液膜 $Re < 150$ 时,液膜界面平均温度与平均传质系数随着 Re 的增大而增大,而平均传热系数随着 Re 的增大而减少;平均传热传质通量均是随着 Re 的增大而先增大后减小,存在一个最佳液膜 Re 使降膜吸收过程的传热传质通量达到最大,即 $Re = 50$ 时,平均传热和传质通量分别达到最大值 7.2 kW/m^2 与 $2.9 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

关键词 传热传质;溴化锂溶液;降膜吸收;雷诺数

中图分类号:TB61⁺6;TK124

文献标识码:A

Numerical Study on the Heat and Mass Transfer of LiBr/H₂O Falling Film Absorption with Low Reynolds Number

Zhang Lianying Li Yang Wang Yuan Yang Xiaohu Jin Liwen Meng Xiangzhao

(School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract LiBr/H₂O falling-film absorption is a common heat-and mass-transfer process in an absorption air-conditioning system. By analyzing the coupled heat and mass transfer of the falling-film absorption process, two-dimensional physical and mathematical models of the falling-film absorption along a vertical wall were established. The model was solved using the Fluent computational-fluid-dynamics software. The interfacial temperature, the concentration profile across the falling film, and the average heat-and mass-transfer fluxes and coefficients were obtained. The effect of the Reynolds number on the heat and mass transfer of the falling film was investigated. The results show that, when the film Reynolds number is less than 150, the average interfacial temperature increases with the increasing Reynolds number; however, the rising trend of the average interfacial temperature is more and more gentle. The average mass-transfer coefficient increases with the increasing Reynolds number, while the average heat-transfer coefficient decreases. Simultaneously, with the increasing Reynolds number, the average heat-and mass-transfer fluxes first increase and then decrease. An optimal Reynolds number exists that leads to the maximum heat- and mass-transfer fluxes. The average heat-and mass-transfer fluxes reach their maximums, 7.2 kW/m^2 and $2.9 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, respectively, when the Reynolds number is 50.

Keywords heat and mass transfer; lithium bromide solution; falling film absorption; Reynolds number

相比于蒸气压缩式空调系统,吸收式空调系统能够利用太阳能与工业余热等低品位能源^[1-3],缓解环境污染与能源短缺等问题。吸收器是吸收式空调系统的重要部件之一,其吸收效果直接影响着整个系统的性能。强化吸收器的传热传质性能,对提高机组能效有着十分重要的作用。溴化锂溶液降膜吸收是吸收器中常见的热质传递形式,具有高传热传质系数、低流动能耗的特点,能够大大提高吸收器性能^[4-6]。

降膜吸收过程热质耦合传递的复杂特性,吸引了许多学者针对降膜吸收过程的传热传质特性展开大

量数值研究。N. I. Grigor'eva 等^[7]最先获得了降膜吸收传热传质过程的数值解,数值模型中的很多假设沿用至今:气液界面处于相平衡状态;忽略流动方向的热质传递;溶液组分满足 Fick 扩散定律等。随后的学者不断改进模型及假设条件, G. Grossman 等^[8-9]假设溶液沿降膜方向的流速呈抛物线状分布,液膜入口速度符合 Nusselt 解,并考虑了界面处吸收热对液膜传热传质的影响。A. T. Conlisk^[10]认为传质主要发生在靠近气液界面的薄层,传热主要机制是液膜导热,数值结果表明传热系数随液膜厚度增大而

收稿日期:2017 年 1 月 9 日

减小,传质系数随液膜厚度的增大而增大。程文龙等^[11]建立了风冷垂直降膜吸收过程的数学模型,结果显示在小 Re 下,吸收器的传热传质性能受 Re 影响显著。崔晓钰等^[12]建立了一种板式膜反转降膜吸收过程的数学模型,发现在 Re 为 30 的条件下存在一个最佳的反转位置。S. Karami 等^[13]研究了低 Re 下降膜吸收的热力学参数变化趋势,并给出了降膜吸收过程 Nu 和 Sh 的准则方程。李相鹏等^[14]采用 CFD-Fluent 软件对液膜随时间和空间的演化分布特征、速度场分布和液相流量影响进行了模拟分析,结果表明液相流量增大,液膜平均厚度和速度均有所增大。陈小砖等^[15]基于气液传质双膜模型数值研究了氨水沿横纹管表面降膜吸收过程,得到了氨水溶液中氨质量分数沿降膜管高度的变化曲线,计算值与测量值能够很好吻合。张强等^[16]基于水平降膜流动为变速圆周运动的假设,建立了一维氨水降膜吸收传热模型,很好的描述了液膜厚度与流速等参数对传热系数的影响。

Re 是表征流体流动状态的重要准则数,关于液膜 Re 对于降膜吸收传热传质特性的影响分析却鲜有报道。本文采用模拟软件 CFD-Fluent 对溴化锂溶液垂直降膜吸收过程进行数值模拟。通过 Fluent 自带的 UDF (user defined functions) 编写溴化锂溶液的物性及吸收热方程。采用 UDS (user defined scalars) 表示溴化锂溶液的浓度,给出传质扩散系数,并考虑了分子扩散和对流扩散。通过 UDM (user defined mem-

ory) 获得每个变量的变化。计算并分析 Re 对界面温度和液膜内部的浓度分布、传热传质通量及热质传递系数、 Nu 及 Sh 数的影响。

1 物理数学模型

溴化锂溶液降膜吸收过程如图 1(a) 所示,竖直壁面一侧为降膜溴化锂溶液,另一侧为冷却水,溶液侧通道内充满了水蒸气,竖直壁面的长度 $L = 500$ mm。溴化锂溶液进入充满水蒸气的吸收器,在冷却壁面形成液膜向下流动。由于气液两相存在水蒸气压力差,水蒸气在气液界面处被液膜吸收,溶液浓度下降,并在吸收过程中释放出热量。壁面另一侧冷却水连续不断的带走溶液中的热量,从而保证吸收过程的持续进行。溶液温度和浓度的变化影响到蒸气分压力,改变了相界面间的传质阻力,最终又影响到质量和热量传递,因此,降膜吸收是一个传热传质相互耦合的复杂过程。

为了简化数值研究过程,建立了溴化锂溶液降膜吸收过程的二维物理模型,如图 1(b) 所示, x 为液膜流动方向, y 为液膜厚度方向。该模型采用了以下假设:1) 溴化锂溶液为不可压缩牛顿流体,降膜流动属于充分发展的无波动层流;2) 气相传热被忽略,吸收热完全被溶液吸收,在能量方程中以源项表示;3) 吸收的水蒸气量相对于溶液流量非常小,液膜厚度与流量被认为是定值;4) 忽略气液相之间的传质阻力,气液界面处于相平衡状态。

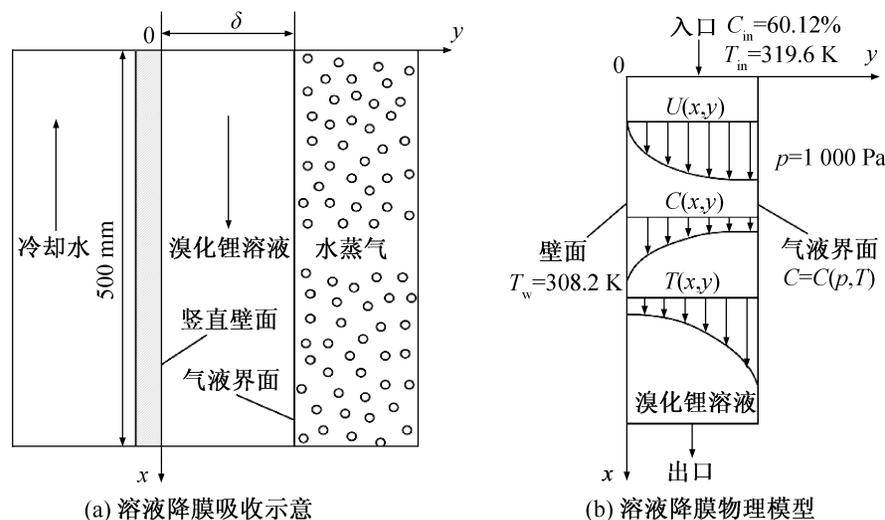


图 1 溴化锂溶液降膜吸收过程的二维模型

Fig. 1 Two-dimension model of LiBr solution falling film absorption process

1.1 控制方程

基于以上二维模型与假设,描述降膜吸收过程的连续方程、动量方程、能量方程以及传质扩散方

程如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (m h_{\text{abs}}) \quad (4)$$

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

式中: u 为 x 轴方向速度, m/s ; v 为 y 轴方向速度, m/s ; t 为时间, s ; ρ 为溶液密度, kg/m^3 ; μ 为动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; p 为压力, Pa ; g 为重力加速度, m/s^2 ; c_p 为溶液定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度, K ; k 为溶液导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; m 为局部传质通量, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; h_{abs} 为吸收热, kJ/kg ; C 为溶液浓度, $\%$; D 为传质扩散系数, m^2/s 。

液膜雷诺数的形式为^[17]:

$$Re = \frac{4.0\Gamma}{\mu} \quad (6)$$

式中: Re 为液膜雷诺数; Γ 为单位润湿周边的液膜流量, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

低 Re ($Re \ll 1600$) 的降膜流动可以归为层流, 液膜表面无波动, 厚度为定值。液膜厚度可由 Nusselt 解^[17] 获得:

$$\delta = \left(\frac{3\Gamma\mu}{\rho^2 g} \right)^{1/3} \quad (7)$$

式中: δ 为液膜厚度, m 。

根据 Nusselt 理论^[17], 液膜流动方向的速度分布符合关于 y 的函数并呈现抛物线分布:

$$u(y) = \frac{3}{2} u_{\text{avg}} \left(2 \left(\frac{y}{\delta} \right) - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right) \quad (8)$$

式中: u_{avg} 为液膜平均流速, m/s , 计算公式如下:

$$u_{\text{avg}} = \frac{\Gamma}{\rho\delta} \quad (9)$$

1.2 边界条件

根据溴化锂溶液降膜吸收过程的理论分析及建立数学模型的假设条件, 控制方程边界条件如下:

1) 壁面无滑移无渗透, 温度恒定:

$$y=0; u=0; v=0; \frac{\partial C}{\partial y} = 0; T=T_w \quad (10)$$

2) 入口处溶液浓度处于给定的温度及压力下的饱和状态:

$$x=0; T=T_{\text{in}}; C=C_{\text{in}} \quad (11)$$

3) 气液界面处于相平衡状态, 界面处的传质通

量可通过 Fick 扩散定律求得:

$$y = \delta;$$

$$C_i = C_i(p, T); D\rho \frac{\partial C_i}{\partial y} = m \quad (12)$$

4) 出口处于充分发展阶段:

$$x=L; \frac{\partial C}{\partial x} = 0; \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

1.3 数值求解

采用数值模拟软件 CFD-Fluent 对模型进行求解。数值模型采用了与计算区域相适应的结构化四边形网格, 对计算区域分别划分网格为 $3\,000 \times 20$ 、 $5\,000 \times 20$ 与 $6\,000 \times 20$, 计算得到的平均传质通量在 $3\,000 \times 20$ 与 $5\,000 \times 20$ 间差别为 3%, 在 $5\,000 \times 20$ 与 $6\,000 \times 20$ 间差别为 0.5%, 即经网格独立性检验后, 确定 x 方向的网格数为 5 000, y 方向的网格数为 20。液膜入口处的速度分布、界面处的浓度分布及传质传热通量、溴化锂水溶液的物性采用 Fluent 中的 UDF 编程。基于压力基求解器进行求解, 采用 PISO 方法求解压力-速度耦合方程。压力项采用 PRESTO! 差值算法。动量、能量和传质方程采用二阶迎风格式进行离散。

2 结果与讨论

2.1 模型验证

在相同的运行参数下, 计算的界面温度和浓度模拟值与 N. Kawae 等^[18] 获得的解析解能够很好吻合, 如图 2 所示。

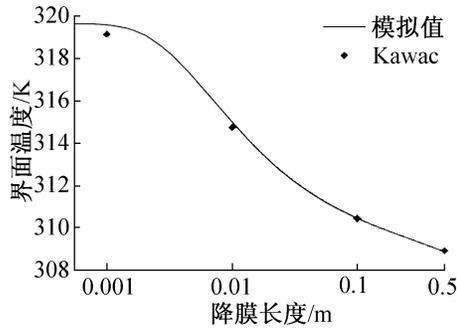
2.2 运行参数

Re 是表征流体流动状态的重要准则数, 与液膜的流动参数有关。 Re 越大, 液膜流速越大, 液膜越厚。当 $Re > 1600$ 时, 流动的状态将会由层流过渡到湍流状态。在实际的吸收器中, 降膜流动多属于低 Re 的层流或近似层流。S. Karami 等^[13] 研究了 Re 为 5~150 的降膜流动, 并假设流动状态为层流, 模拟结果与实验值能够很好地吻合。本文针对 $Re < 150$ 时, 不同 Re 下的层流降膜吸收过程传热传质进行了研究。表 1 和表 2 分别给出了不同 Re 下的运行参数和溴化锂溶液的物性参数。

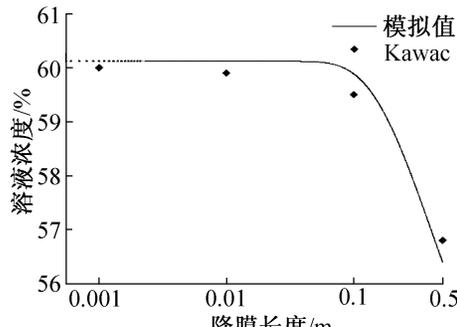
2.3 Re 对界面平均温度的影响

图 3 所示为不同 Re 下的界面平均温度随液膜 Re 的变化。 Re 越大, 界面平均温度越高。一方面 Re 越大, 液膜流速越大, 界面处溶液更新的越快, 溶液吸收水蒸气的能力越强进而吸收更多的水蒸气并释放出更多的吸收热; 界面平均温度越高。另一方面, 液膜 Re 越大, 液膜越厚, 液膜内的传热热阻越大, 液膜

的热容量也越大,导致界面平均温度也会越高。



(a) 界面温度



(b) 界面浓度

图 2 模拟结果与 Kawac 解析解的对比

Fig. 2 Comparison between present work with kawac's analytical results

表 1 不同 Re 下的运行参数

Tab.1 Operation parameters with different Reynolds number

运行参数	数值				
Re	10.6	20.0	50.0	100.0	150.0
液膜厚度/mm	0.20	0.25	0.34	0.42	0.48
液膜流速/(m/s)	0.042	0.063	0.116	0.187	0.246
液膜流量/(kg/(m·s))	0.014	0.027	0.067	0.134	0.201
入口浓度/%	60.12	60.12	60.12	60.12	60.12
入口温度/K	319.6	319.6	319.6	319.6	319.6
壁面温度/K	308.2	308.2	308.2	308.2	308.2

表 2 溴化锂溶液物性参数

Tab.2 Physical properties of LiBr solution

物性参数	数值
密度/(kg/m ³)	1 699.7
扩散系数/(m ² /s)	1.72 × 10 ⁻⁹
定压比热容/(J/(kg·K))	1 567.5
吸收热/(kJ/kg)	2 772.7
动力黏度/(Pa·s)	5.35 × 10 ⁻³
导热系数/(W/(m·K))	0.431

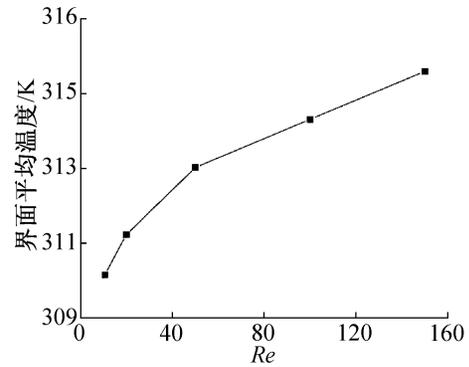


图 3 界面平均温度随液膜 Re 的变化

Fig. 3 Variation of average interfacial temperature with Reynolds number

2.4 Re 对液膜浓度分布的影响

沿降膜方向 $x = 30.0 \text{ mm}$, $x = 180.0 \text{ mm}$, $x = 330.0 \text{ mm}$ 和 $x = 480.0 \text{ mm}$ 处液膜内的横向浓度分布如图 4 所示。无量纲参数 y/δ 为横坐标,表示所处的液膜截面内位置, $y/\delta = 0$ 为壁面, $y/\delta = 1$ 为气液界面。水蒸气被气液界面吸收凝结为水,水分子从界面向主体溶液扩散,靠近壁面侧溶液浓度梯度较小,靠近界面侧溶液梯度很大,表明质量扩散过程主要发生在界面侧。随着降膜长度增加,更多水蒸气被吸收,液膜浓度逐渐减小。 Re 越小,液膜浓度也越小,液膜浓度分布曲线也更加平缓,吸收器的放气范围增大。因为 Re 减小,液膜厚度与流速也减小。低流速创造了更充足的气液接触时间,相对而言单位质量溶液吸收较多的水蒸气,液膜浓度下降,传质边界层的厚度增加。同时由于液膜厚度的减少,传质阻力减小,水分子更容易扩散至液膜内部,在液膜内形成更均匀的浓度分布。但这并不意味着较低的 Re 有益于提高传质通量,因为低 Re 伴随着低流量,限制了溶液的吸收容量。

2.5 Re 对平均传热传质通量的影响

界面上局部传质通量与平均传质通量定义如下:

$$m(x) = -\rho D \left. \frac{\partial C(x)}{\partial y} \right|_{y=\delta} \quad (14)$$

$$m_{\text{avg}} = \frac{1}{L} \int_0^L m(x) dx \quad (15)$$

壁面上局部传热通量与平均传热通量定义如下:

$$q(x) = -k \left. \frac{\partial T(x)}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (16)$$

$$q_{\text{avg}} = \frac{1}{L} \int_0^L q(x) dx \quad (17)$$

随着液膜 Re 的增大,液膜质量流量增大,液膜表面流体更新快,传质推动力增大,传质传热通量增大;随着液膜 Re 的进一步增大,液膜流速和液膜厚度进

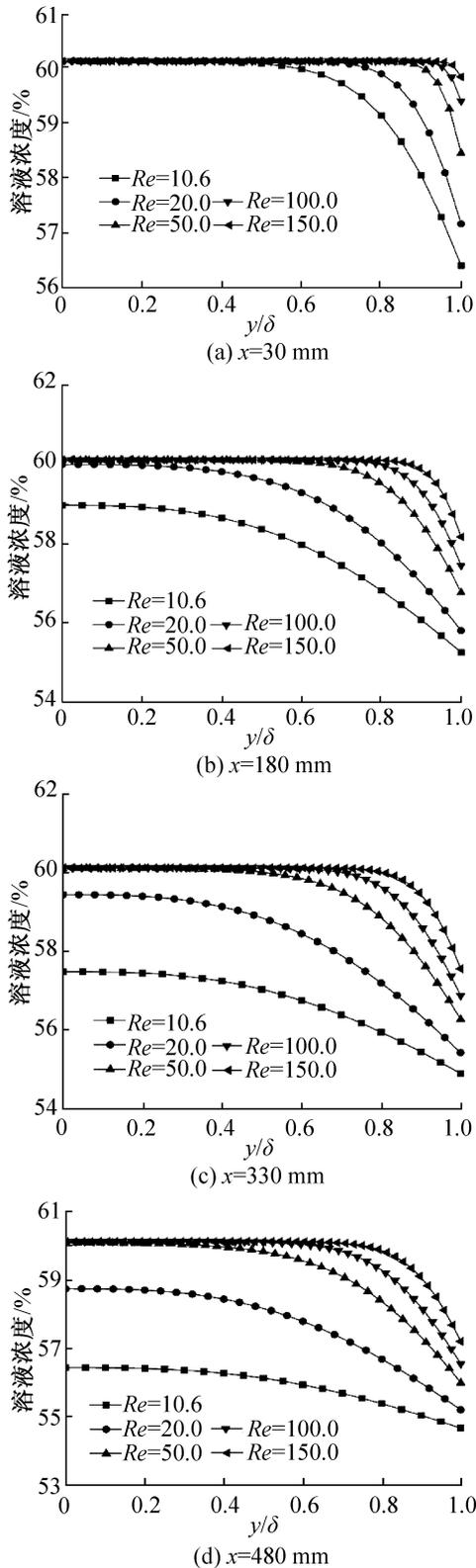


图 4 液膜内横向浓度分布

Fig. 4 Concentration profiles across the falling film

一步增大,液膜和水蒸气的接触时间缩短,导致单位质量溶液吸收的水蒸气减少,传质传热通量减小。所以平均传热传质通量随 Re 的变化趋势是一致的,均是随着 Re 的增大先增大后减小,如图 5 所示。当 Re

$= 50$ 时,平均传热传质通量分别达到最大值 7.2 kW/m^2 与 $2.9 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$;当 $Re = 10.6$ 时,平均传热传质通量分别达到最小值 5.5 kW/m^2 与 $2.21 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。因此,当运行参数一定时,平均传热传质通量并不是随着 Re 增大而一直增大,而是存在一个最佳液膜 Re 使降膜吸收过程的传热传质通量达到最大值。

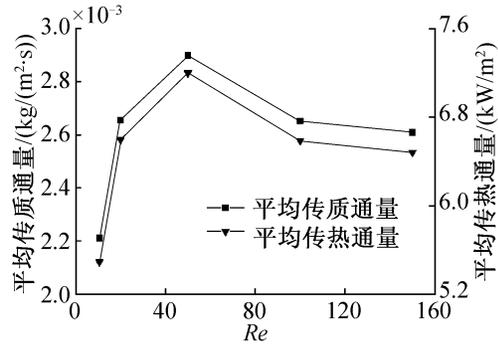


图 5 平均传热传质通量随 Re 的变化

Fig. 5 Variation of average heat and mass transfer fluxes with Reynolds number

2.6 Re 对平均传质传热系数的影响

界面上局部传质系数与平均传质系数定义为:

$$h_m(x) = \frac{m(x)}{\rho(C_w(x) - C_i(x))} \quad (18)$$

$$h_{m,avg} = \frac{1}{L} \int_0^L h_m(x) dx \quad (19)$$

界面上局部传热系数与平均传热系数定义如下:

$$h_t(x) = \frac{q(x)}{T_i(x) - T_w} \quad (20)$$

$$h_{t,avg} = \frac{1}{L} \int_0^L h_t(x) dx \quad (21)$$

由图 6 可知,随着 Re 的增大,平均传质系数增大,而平均传热系数减小。因为 Re 越大,液膜流速越快,溴化锂溶液与水蒸气接触时间越短,单位时间内更少的水蒸气被液膜吸收。同时液膜流量也随着 Re 的增大而增大,液膜浓度被吸收的水蒸气稀释不明显,液膜内具有更高的浓度梯度,从而越有利于后面的水蒸气被溶液吸收,传质系数增大;而 Re 越大,液膜越厚,液膜与壁面间的传热热阻就越大,壁面的冷却效果越差。虽然较高的流速能提高传热系数,但在本文所研究的低 Re 层流区,流速引起的流体扰动很微弱,可忽略不计,从而平均传热系数减小。

2.7 Re 对平均 Nu 和 Sh 的影响

Nusselt 和 Sherwood 数经常用来表征热质传递现象,其平均值定义如下:

$$Nu_{avg} = \frac{h_{t,avg} \delta}{k} \quad (22)$$

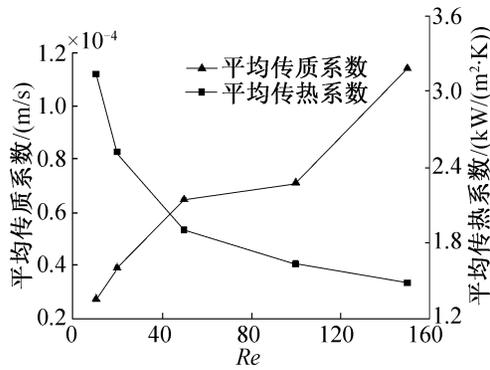


图 6 平均传质传热系数随 Re 的变化

Fig. 6 Variation of average mass and heat transfer coefficients with Reynolds number

$$Sh_{avg} = \frac{h_{m,avg} \delta}{D} \quad (23)$$

液膜 Re 对平均 Nu 和 Sh 的影响如图 7 所示。可以看出 Nu 和 Sh 均随着 Re 的增大而增大,即对流传热传质随着 Re 的增大而增强。因为随着 Re 的增大,液膜厚度的增大超过了平均传热系数的减小,根据式(21)可知平均 Nu 增大;同时,随着 Re 的增大,平均传质系数也增加,根据式(22)可知平均 Sh 也增大。

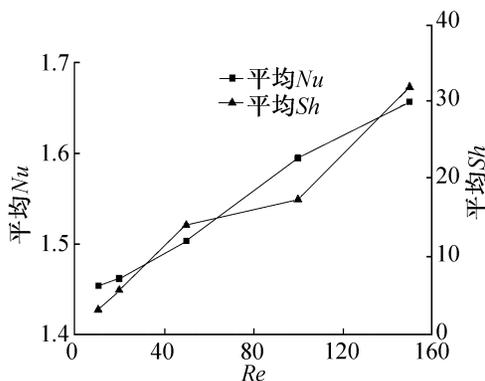


图 7 平均 Nu 和 Sh 随 Re 的变化

Fig. 7 Variation of average Nu and Sh with Re

3 结论

通过分析溴化锂溶液降膜吸收过程的热质耦合传递,对溴化锂溶液降膜吸收过程进行了数值模拟。基于低 Re 工况下,分析了 Re 对界面平均温度、液膜浓度分布、平均传热传质通量和平均传热传质系数,以及平均 Nu 和 Sh 的影响。得到如下主要结论:

1) 液膜 Re 越大,液膜界面平均温度越高;靠近气液界面的浓度梯度越大,液膜内的浓度越高,放气范围越小。

2) 平均传热传质通量均是随着 Re 的增大先增大后减小。当运行参数一定时,存在一个最佳液膜

Re 使降膜吸收过程的传热传质通量达到最大值。在本文的模拟工况下,当 $Re = 50$ 时,平均传热传质通量分别达到最大值 7.2 kW/m^2 与 $2.9 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$; 当 $Re = 10.6$ 时,平均传热传质通量分别达到最小值 5.5 kW/m^2 与 $2.21 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。

3) 平均传热系数随 Re 的增大而减少,而平均传质系数随 Re 的增大而增大;平均 Nu 和 Sh 均随着 Re 的增大而增大。

本文受陕西省自然科学基金研究计划(2017JZ016)项目资助。(The project was supported by the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (No. 2017JZ016).)

参考文献

- [1] 肖尤明,徐烈,李志伟,等. 汽车空调余热溴化锂吸收式制冷装置的研究[J]. 制冷学报,2004,25(1): 22-26. (XIAO Youming, XU Lie, LI Zhiwei, et al. Study on automobile air-conditioning exhaust heat absorption refrigeration system[J]. Journal of Refrigeration, 2004, 25(1): 22-26.)
- [2] 孟玲燕,徐士鸣. 太阳能与常规能源复合空调/热泵系统在别墅建筑中的应用研究[J]. 制冷学报,2006,27(1): 15-22. (MENG Lingyan, XU Shiming. Research on application of integrated refrigeration/heat pump system-combined solar and traditional energy in houses[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(1): 15-22.)
- [3] 张丽娜,徐士鸣,李见波. 燃气轮机排气废热驱动的吸收式制冷循环特性研究[J]. 制冷学报,2014,35(5): 88-93. (ZHANG Lina, XU Shiming, LI Jianbo. Study on cycle characteristics of absorption refrigeration driven by waste heat from gas turbine[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(5): 88-93.)
- [4] 薄守石,马学虎,兰忠,等. 溴化锂溶液垂直降膜过程中流动与传热的数值模拟[J]. 化学反应工程与工艺,2011,27(11): 114-120. (BO Shoushi, MA Xuehu, LAN Zhong, et al. Numerical simulation on flow and heat transfer of libr solution along the vertical wall[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2011, 27(11): 114-120.)
- [5] 石程名,宫世吉,徐灿君,等. 竖管内溴化锂溶液降膜发生实验研究[J]. 制冷学报,2008,29(3): 43-46. (SHI Chengming, GONG Shiji, XU Canjun, et al. Experiment research on lithium bromide solution falling film generation in vertical tube[J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(3): 43-46.)
- [6] 吉鸽,吴嘉峰,陈亚平,等. 溴化锂溶液在亲水水平圆管表面降膜流动的数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版),2016,46(4): 751-756. (JI Ge, WU Jiafeng,

- CHEN Yaping, et al. Numerical simulation of falling film flow of aqueous lithiumbromide solution over hydrophilic horizontal round tube[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(4):751-756.)
- [7] GRIGOR'eva N I, NAKORYAKOV V E. Exact solution of combined heat and mass transfer problem during film absorption[J]. Journal of Engineering Physics, 1977, 33(5): 1349-1353.
- [8] GROSSMAN G. Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under laminar flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1983, 26(3): 357-371.
- [9] GROSSMAN G. Analysis of interdiffusion in film absorption[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30(1): 205-208.
- [10] CONLISK A T. Analytical solutions for the heat and mass transfer in a falling film absorber[J]. Chemical Engineering Science, 1995, 50(4): 651-660.
- [11] 程文龙, 陈则韶. 溴化锂风冷垂直降膜吸收过程数值模拟[J]. 制冷学报, 2001, 22(4): 11-15. (CHENG Wenglong, CHEN Zeshao. Numerical simulation for air cooling vertical falling film absorption of LiBr solution[J]. Journal of Refrigeration, 2001, 22(4): 11-15.)
- [12] 崔晓钰, 唐聪, 李美玲. 板式膜反转降膜吸收器设计与性能研究[J]. 制冷学报, 2005, 26(3): 47-52. (CUI Xiaoyu, TANG Cong, LI Meiling. Design and performance study of plate falling film absorber with a film-inverting configuration[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(3): 47-52.)
- [13] KARAMI S, FARHANIEH B. A numerical study on the absorption of water vapor into a film of aqueous LiBr falling along a vertical plate[J]. Heat and Mass Transfer, 2009, 46(2): 197-207.
- [14] 李相鹏, 陈冰冰, 高增梁. 规整填料表面液膜流动特性的数值模拟[J]. 化工学报, 2013, 64(6): 1925-1933. (LI Xiangpeng, CHEN Bingbing, GAO Zengliang. Numerical simulation on hydraulic characteristics of liquid film on structure packing surface [J]. CIESC Journal, 2013, 64(6): 1925-1933.)
- [15] 陈小砖, 柳建华, 张良, 等. 横纹管氨水降膜吸收温度场与浓度场计算与测量[J]. 制冷学报, 2013, 34(6): 29-34. (CHEN Xiaozhuan, LIU Jianhua, ZHANG Liang, et al. Calculation and measurement of temperature field and mass fraction field about aqua ammonia falling film absorption based on transversally grooved tube[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(6): 29-34.)
- [16] 张强, 杨永平. 一种氨水水平降膜吸收传热模型[J]. 制冷学报, 2013, 34(1): 73-80. (ZHANG Qiang, YANG Yongping. A heat transfer model of ammonia horizontal falling-film absorption[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(1): 73-80.)
- [17] CHANG H C, DEMEKHIN E A. Complex wave dynamics on thin films[M]. Elsevierence, 2002; 5-25.
- [18] KAWAE N, SHIGECHI T, KANEMARU K, et al. Absorption of water vapor into the laminar film flow of a lithium bromide-water solution; Influence of variable properties and inlet film thickness on absorption rate[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1987, 53(494): 3059-3064.

通信作者简介

孟祥兆,男,博士,高级工程师,硕士生导师,西安交通大学人居环境与建筑工程学院, (029) 83395127, E-mail: xzmeng@mail.xjtu.edu.cn。研究方向:小型制冷系统节能技术,室内环境营造技术与系统。

About the corresponding author

Meng Xiangzhao, male, Ph. D., senior engineer, master tutor, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, +86 29-83395127, E-mail: xzmeng@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: energy saving technology of refrigeration system, indoor environment create technology and system.