

文章编号: 1000-8608(2014)02-0171-05

切应力作用下降膜吸收过程特性研究

薄守石*, 杨朝合

(中国石油大学(华东)化学工程学院, 山东青岛 266580)

摘要: 利用CFD软件Fluent,通过数值模拟方法研究了溴化锂溶液降膜吸收过程。模型中考虑了界面切应力对于降膜吸收特性的影响,给出了不同界面切应力下主体温度、浓度随着下降距离的变化及热量、质量通量随着下降距离的变化。模拟结果表明:切应力对降膜吸收过程有一定的影响。与无切应力相比,正向切应力对降膜吸收过程不利,而逆向切应力对降膜吸收过程有利。这主要是由于切应力的存在改变了液膜内的速度分布及液膜在吸收器内的停留时间。

关键词: Fluent; 降膜; 传热传质; 界面切应力

中图分类号:TQ026

文献标识码:A

doi:10.7511/dllgxb201402003

0 引言

溴化锂吸收式热泵是一种非常有效的回收低品位热能的设备。而无论对于循环性能还是系统投资,吸收器被公认为热泵系统中最关键的部分。吸收器多采用降膜形式,由于降膜吸收传递现象的复杂性和耦合性,建立数学模型是非常困难的。当吸收发生时,热量和质量通过液相和气相传递,传递推动力随着过程进行发生变化。这主要是由局部温度梯度、局部浓度梯度的变化和气液界面平衡条件的变化引起的,控制方程也相应需要耦合。各国学者建立了各种模型研究溴化锂溶液的吸收过程。

Killion等^[1]全面详细地总结了前人为降膜吸收过程建立的各种传热传质模型,包括控制方程、边界条件、假设条件、求解方法和模型结果等。Nakoryakov等^[2]在模拟过程中迈出了非常重要的一步,他们考虑的是垂直等温平板上光滑层流液膜的稳态吸收过程。利用假设条件,Nakoryakov等使用Fourier变量分离方法求解,给出了整个液膜温度和浓度表达式、壁面和界面的传热传质通量及液膜平均温度和平均浓度表达式。Nakoryakov等假设液膜内速度为常数,这与真实降膜流动中的流体动力学是不相符的。Grossman^[3]使用了与

Nakoryakov等相同的假设条件,求解了等膜厚、等温或绝热壁面降膜吸收过程。主要的差别就是对速度场进行了改进,假设充分发展层流Nusselt抛物形速度分布。但是他与Nakoryakov等同样忽略了膜内横向对流的作用。Andberg等^[4]通过有限差分方法求解了垂直等温壁面降膜吸收过程,在模型中考虑了横向对流,使用的假设条件与其他研究者类似,不同之处在于考虑了内部扩散引起的能量扩散,以及由于吸收引起的膜厚增加。Yang等^[5]虽然仅仅考虑了等温情况,但是对Grossman模型进行了改进,允许入口溶液温度偏离壁温。Yoon等^[6]考虑冷却水侧温度变化,但是忽略了冷却水侧的传热热阻。Karami等^[7-8]则研究了倾斜角对于吸收过程的影响。Bo等^[9]考虑了物性对于吸收过程的影响。Goulet等^[10]研究了溴化锂溶液静态池吸收过程。除了最简单的层流吸收模型,研究者对波动和湍动条件下的溴化锂溶液降膜吸收进行了模拟^[11-13]。叶学民等^[14]研究了切应力对蒸发降膜传热特性的影响,但切应力对于吸收过程的影响均被忽略。对于实际过程,由于气相顺流或逆流流动,在气液界面处将产生切应力,因此有必要研究切应力对降膜吸收过程特性的影响。

本文建立平板型溴化锂溶液吸收传热传质耦

收稿日期: 2013-10-19; 修回日期: 2014-01-15。

基金项目: “九七三”国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB215006); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(27R1204008A); 教育部博士学科点专项科研基金资助项目(20120133120004)。

作者简介: 薄守石*(1980-),男,讲师,E-mail:shoushibo@upc.edu.cn。

合模型,利用 CFD 软件 Fluent 进行数值求解。模型中考虑了切应力影响因素,给出液膜主体温度、浓度随着下降距离的变化,同时给出热量、质量通量的变化关系,进而对切应力影响降膜吸收过程的机理进行分析。

1 数学模型及边界条件

在吸收式热泵中,吸收器进行的是溴化锂溶液吸收水蒸气的传热传质耦合过程。再生器再生出来的浓 LiBr 溶液经过溶液泵泵送到吸收器顶部的积液空间,经过布膜器在重力牵引下沿平板流下,吸收由蒸发器产生的蒸汽。吸收过程中放出的热量被管内逆流流动的循环冷却水带走。稀释后的 LiBr 溶液泵送回再生器进行再生过程。吸收器内热量、质量、动量传递同时进行,相互影响,相互耦合,形成吸收器内复杂的降膜吸收过程。

为简化模型,便于问题求解,使用以下假设条件:

- (1) 液膜处于光滑层流状态,充分发展。
- (2) 溴化锂溶液物性为常数,不随温度和浓度的改变而改变。
- (3) 气相中压力处处相等,无传质阻力;忽略气液界面的传质阻力。
- (4) 界面为气液平衡状态^[15]。
- (5) 气体在界面被吸收时放出的吸收热在界面放出,全部用来加热液膜。
- (6) 冷却水与液膜为逆流,忽略冷却水侧热阻,壁面温度线性变化。

1.1 物理模型

降膜吸收过程如图 1 所示, x 方向为降膜流动方向, y 方向为液膜厚度方向。在上述假设下,可以得到用于描述吸收过程的控制方程及边界条件。

热量守恒方程:

$$\alpha_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum_{i=1}^2 \rho D_i \frac{\partial C_i}{\partial y} H_i \right) \quad (1)$$

其中方程右侧最后一项为内部扩散引起的能量扩散。

质量守恒方程:

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

式中: ρ 为密度; c_p 为比定压热容; u 、 v 为 x 、 y 方向的速度; T 为温度; k 为导热系数; D 为扩散系数;

C 为浓度; H 为吸收热。

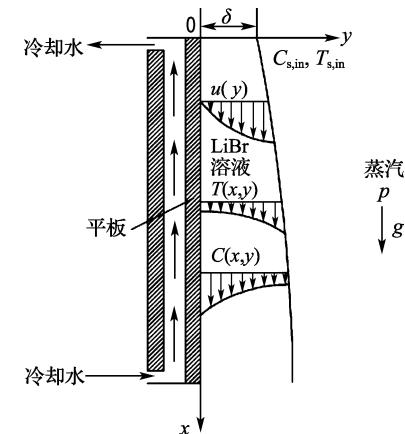


图 1 降膜吸收过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of falling film absorption process

1.2 边界条件

液膜雷诺数定义为

$$Re_f = \frac{4\Gamma}{\mu}$$

当 $Re_f < 20$ 时,液膜表面是光滑的,膜厚为常数。

液膜内速度充分发展,当界面切应力为 τ_i 时,液膜内速度分布为

$$u = \frac{\rho g \delta^2}{\mu} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \right) + \frac{\tau_i}{\mu} y \quad (3)$$

入口边界溶液温度、浓度为平衡状态:

当 $x = 0$ 时, $T = T_{s,in}$, $C = C_{s,in}$

出口为充分发展边界:

当 $x = L$ 时, $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial C}{\partial x} = 0$

壁面边界为无滑移、无渗透条件:

当 $y = 0$ 时, $u = v = 0$, $T = T_w$, $\frac{\partial C}{\partial y} = 0$

界面($y = \delta$)处于热力学平衡状态:

$$C_{surf} = C(T_{surf}, p)$$

$$M_{surf} = -\rho D \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right)_{y=\delta}$$

$$q_{surf} = H_{abs} M_{surf}$$

其中 g 为重力加速度, m/s^2 ; μ 为溶液的动力黏度, $Pa \cdot s$; δ 为液膜的厚度, m ; H_{abs} 为吸收热, kJ/kg ; M_{surf} 为界面质量通量, $kg/(m^2 \cdot s)$; q_{surf} 为界面热量通量, W/m^2 。

求解器选用 Fluent 流体力学软件包,基本思想是采用有限体积法对控制方程离散。界面处边界条件采用 UDF 宏命令编写。计算网格选用四边形结构化网格,离散时,对流项采用二阶迎风格

式; 压力项选用 Standard 算法; 压力-速度耦合方程选用 SIMPLE 方法。动量输运方程计算精度为 10^{-4} , 能量方程计算精度为 10^{-7} 。模型及网格无关性验证见文献[9]。表 1 为操作条件。溶液的物理数据见文献[9]。

表 1 操作条件

Tab. 1 Operation conditions

操作参数	数值
$T_{s,in}/K$	319.5
$C_{s,in}/\%$	60.38
$T_{w,in}/K$	305
$T_{w,out}/K$	309
$\tau_i/(Pa \cdot s)$	-1, 0, 1
L/m	1
p/kPa	1
δ/mm	0.2

2 模拟结果

2.1 切应力作用下的液膜内速度分布

图 2 给出了 3 种切应力作用下液膜内的速度分布。在无切应力作用情况下, 液膜内的速度分布满足 Nusselt 形式。界面切应力的存在改变了液膜内的速度分布。与无切应力存在情况相比, 当存在正向切应力时, 液膜的整体速度增加, 当存在逆向切应力时, 液膜的整体速度降低, 并且液膜内速度的最大值出现在液膜内近界面处某一位置, 这与文献实验测量的结果一致^[16]。切应力的存在可以使液膜内速度增大或减小。

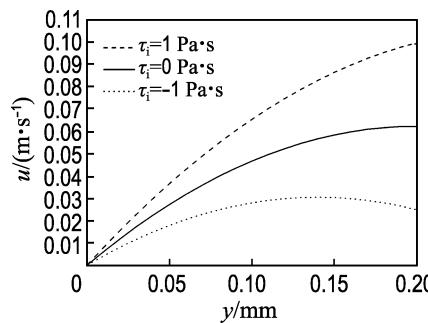


图 2 不同切应力作用下液膜的速度分布

Fig. 2 Velocity profiles of liquid film under different shear stresses

2.2 切应力对主体温度和浓度的影响

图 3 给出了 3 种切应力作用下液膜主体平均温度随着下降距离的变化。从图中可以看出, 对于液膜主体平均温度, 正向切应力最高, 无切应力次之, 逆向切应力最低。这主要是因为切应力改变了液膜内的速度分布, 从而改变了液膜在吸收器内的停留时间。当停留时间增加时, 壁面对液膜的冷却时间增加, 冷却效果较好, 因此液膜平均温度较低。

液膜内的速度分布, 从而改变了液膜在吸收器内的停留时间。当停留时间增加时, 壁面对液膜的冷却时间增加, 冷却效果较好, 因此液膜平均温度较低。

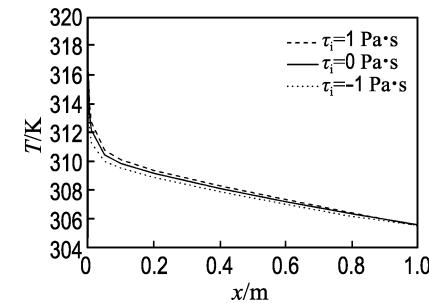


图 3 不同切应力作用下主体温度随下降距离的变化

Fig. 3 Variation of bulk temperature with downstream distance under different shear stresses

图 4 给出了 3 种切应力作用下液膜主体平均浓度随着下降距离的变化。从图中可以看出, 对于液膜主体平均浓度, 正向切应力最高, 无切应力次之, 逆向切应力最低。此结果说明在逆向切应力作用下吸收效果更好。这主要是因为切应力改变了液膜内的速度分布, 从而改变了液膜在吸收器内的停留时间。当停留时间增加时, 壁面对液膜的冷却时间增加, 冷却效果较好, 因此液膜平均温度较低, 对应的溴化锂溶液饱和蒸气压较小。溴化锂溶液降膜吸收传质推动力为水蒸气压力与溴化锂溶液对应的平衡压力之差, 因此传质推动力较大。

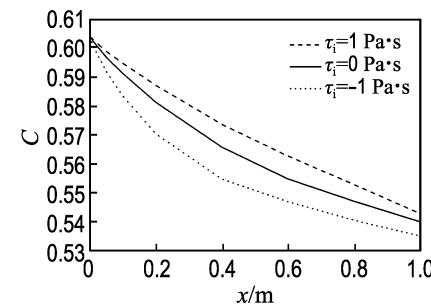


图 4 不同切应力作用下主体浓度随下降距离的变化

Fig. 4 Variation of bulk concentration with downstream distance under different shear stresses

吸收系数是表征吸收程度的一个物理量, 其定义为

$$\epsilon = (C_{in} - C_{out}) / (C_{in} - C_{min}) \times 100\% \quad (4)$$

式中: C_{out} 为出口处溶液的主体浓度; C_{min} 为出口

处的最低浓度,是与吸收压力和冷却水入口温度相平衡的浓度。在本文模拟条件下,正向切应力、无切应力和逆向切应力作用下对应的吸收系数分别为 79.54%、83.19% 和 89.60%。

2.3 热量通量和质量通量随着下降距离的变化

图 5 中给出了 3 种切应力作用下界面热量通量随下降距离的变化。从图中可以看出,总体趋势为正向切应力的最高,无切应力的次之,逆向切应力的最低。界面处的热量通量主要和温度梯度有关,在逆向切应力作用下,液膜在吸收器内的停留时间增加,因此界面处的热量更多地向液膜内部传递,引起界面处温度梯度和热量通量的降低。

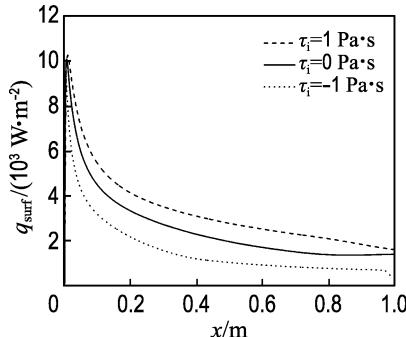


图 5 界面热量通量随下降距离的变化

Fig. 5 Variation of interfacial heat flux with downstream distance

图 6 中给出了 3 种切应力作用下壁面热量通量随下降距离的变化。从图中可以看出,总体趋势为正向切应力的最高,无切应力的次之,逆向切应力的最低。壁面处的热量通量主要和温度梯度有关,在逆向切应力作用下,液膜在吸收器内的停留时间增加,壁面的冷却作用增加,因此液膜内温度梯度降低,壁面热量通量降低。

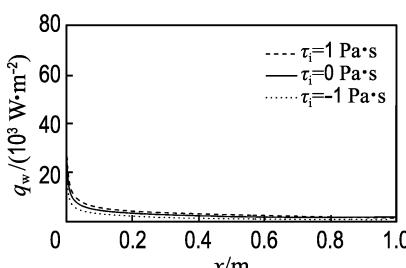


图 6 壁面热量通量随下降距离的变化

Fig. 6 Variation of wall heat flux with downstream distance

随下降距离的变化。从图中可以看出,总体趋势为正向切应力的最高,无切应力的次之,逆向切应力的最低。界面处的质量通量与浓度梯度有关,在逆向切应力作用下,液膜在吸收器内的停留时间增加,因此界面处被吸收的水蒸气更多地向液膜内部传递,引起界面处浓度梯度和质量通量的降低。溴化锂溶液降膜吸收过程是典型的传热传质耦合过程,因此图 5 和 7 表现出了相同的趋势。

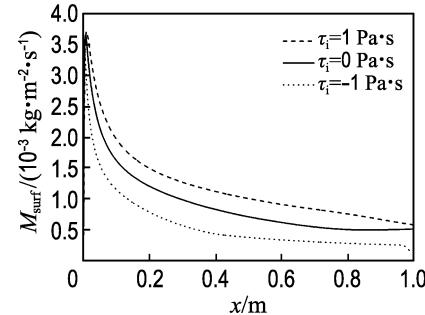


图 7 界面质量通量随下降距离的变化

Fig. 7 Variation of interfacial mass flux with downstream distance

3 结 论

(1) 切应力的存在对液膜内的速度分布有一定影响。正向切应力使液膜加速,而逆向切应力使液膜减速,对于逆向切应力,液膜速度最大值出现在近界面处某一位置。

(2) 逆向切应力可以强化吸收过程,正向切应力对吸收过程有一定的弱化。

(3) 在本文模拟条件下,正向切应力、无切应力和逆向切应力作用下对应的吸收系数分别为 79.54%、83.19% 和 89.60%。

参 考 文 献:

- [1] Killion J D, Garimella S. A critical review of models of coupled heat and mass transfer in falling-film absorption [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2001, 24(8):755-797.
- [2] Nakoryakov V E, Grigor'eva N I. Combined heat and mass transfer during absorption in drops and films [J]. *Journal of Engineering Physics*, 1977, 32(3):243-247.
- [3] 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.

图 7 给出了 3 种切应力作用下界面质量通量

- [4] Andberg J W, Vliet G C. Nonisothermal absorption of gases into falling liquid films [C] // ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference Proceedings. New York: ASME, 1983: 423-431.
- [5] Yang R, Wood B D. A numerical modeling of an absorption process on a liquid falling film [J]. *Solar Energy*, 1992, **48**(3): 195-198.
- [6] Yoon Jung-in, Phan Thanh-tong, Moon Choon-geun, *et al.* Numerical study on heat and mass transfer characteristic of plate absorber [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, **25**(14-15): 2219-2235.
- [7] Karami S, Farhaneh 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.
- [8] Karami S, Farhaneh B. Numerical modeling of incline plate LiBr absorber [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2011, **47**(3): 259-267.
- [9] BO Shou-shi, MA Xue-hu, LAN Zhong, *et al.* Numerical simulation on the falling film absorption process in a counter-flow absorber [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **156**(3): 607-612.
- [10] Goulet R, Knikker R, Boudard E, *et al.* A numerical and experimental analysis of the process of water vapour absorption by a static lithium bromide solution [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2014, **50**(2): 285-300.
- [11] Sabir H, Suen K O, Vinnicombe G A. Investigation of effects of wave motion on the performance of a falling film absorber [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, **39**(12): 2463-2472.
- [12] Patnaik V, Perez-Blanco H. A study of absorption enhancement by wavy film flows [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1996, **17**(1): 71-77.
- [13] Grossman G, Heath M T. Simultaneous heat and mass transfer in absorption of gases in turbulent liquid films [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1984, **27**(12): 2365-2376.
- [14] 叶学民, 阎维平. 切应力作用下层流饱和蒸发降膜的传热特性 [J]. 中国电机工程学报, 2007, **27**(11): 68-72.
- YE Xue-min, YAN Wei-ping. Heat transfer of laminar saturated falling films under interfacial shear [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, **27**(11): 68-72. (in Chinese)
- [15] McNeely L A. Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide [J]. *ASHRAE Transactions*, 1979, **85**(pt1): 413-434.
- [16] 余黎明, 曾爱武, 余国琮. 气液降膜流动中液相速度波动及其传质研究 [J]. 高校化学工程学报, 2006, **20**(5): 696-701.
- YU Li-ming, ZENG Ai-wu, YU Guo-cong. The study on the liquid velocity fluctuation and the mass transfer in the gas-liquid falling film [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2006, **20**(5): 696-701. (in Chinese)

Research on effect of shear stress on performance of falling film absorption process

BO Shou-shi*, YANG Chao-he

(College of Chemical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: Using CFD (computational fluid dynamics) software Fluent, numerical simulation of aqueous lithium bromide falling film absorption is conducted. In the present model, effect of interfacial shear stress on the performance of falling film absorption is considered. Profiles of bulk temperature and concentration against downstream position are presented. So are heat flux and mass flux. The experimental results indicate that shear stress has some effects on absorption process. Compared to that without shear stress, positive shear stress deteriorates the absorption process while negative shear stress enhances the absorption process, which can be explained that shear stress changes the velocity profiles in the falling film and resident time of liquid film in the absorber.

Key words: Fluent; falling film; heat and mass transfer; interfacial shear stress