

GAX 循环中垂直管内降膜吸收的数值模拟

许 峰 郑丹星* 田 涛

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘 要: 基于氨水吸收式 GAX 循环中垂直管内降膜吸收过程中热质、传递现象的研究, 以及对该过程传热和传质的分析, 建立了吸收过程热质、传递的数学模型。以单级氨水吸收式制冷装置实验数据为计算初值, 对垂直管内降膜氨水吸收过程进行数值计算, 计算结果与实验吻合良好。选取吸收管内径、稀氨水的喷淋密度和冷却水流量 3 个变量, 考察液膜主流的平均温度和液膜主流浓度随变量的变化关系, 结果表明喷淋密度的影响较显著。

关键词: 传热传质; 降膜吸收; 数值计算; GAX

中图分类号: TQ028

引 言

在氨水吸收 GAX 循环中, 吸收器是最重要的能量耦合单元设备之一。吸收器的性能对整个系统的制冷系数 COP 起关键作用。由于降膜式吸收具有传热效率高、传热温差损失小、无静压头引起的沸点升高及物料停留时间短等特点, 因此, 研究降膜式吸收的规律, 可以给 GAX 循环的吸收单元的设计提供指导, 对 GAX 循环的实现并达到具有较高制冷系数 COP 的目标有十分重要的作用。

文献中降膜吸收传热传质多采用微分式数学模型^[1-3], 在理论分析的基础上进行实验研究, 并且关联出一定范围内适用的半经验、半理论公式。这些模型都偏重于对降膜表面波形进行数学模拟, 计算起来需要经过复杂的数学推导, 并且不考虑降膜吸收过程中溶液物性的变化, 因此模型的适用性和精确性并不能令人满意, 也缺乏对采用换热强化管以强化竖直管外降膜吸收传热传质过程的研究。本文则采用对降膜吸收过程划分微元的分析方法, 充分考虑到降膜吸收过程中工质的物性变化, 建立了降膜吸收过程热-质耦合数值积分模型, 对氨水溶液在竖直光滑管管内降膜吸收的传热传质情况进行模拟分析。

1 降膜吸收过程传热传质问题的物理模型

垂直管内氨水降膜吸收物理模型如图 1 所示。在重力作用下, 稀溶液呈层流状态沿管壁内表面向下流动, 与自下而上的氨蒸汽充分接触。由于氨蒸汽主体压力高于溶液温度和浓度所对应的蒸汽分压, 氨蒸汽不断地由气相转移到液相, 溶液浓度发生变化, 形成浓度梯度, 导致质量传递。同时, 溶液吸收氨蒸汽产生大量吸收热, 使溶液温度升高, 为保证吸收溶液不会立即饱和, 利用逆向流动的冷却水将该吸收热及时带走。吸收和冷却热将引起液相的温度变化并形成温度梯度, 导致热量传递。溶液温度和浓度变化影响到其所对应的蒸汽分压, 改变相间传质推动力, 最终又影响到传质传热。总之, 降膜吸收过程的热量、质量和动量传递同时进行, 互相耦合, 互相影响, 是一个相当复杂的过程。

为了推导出既反映实际吸收过程, 且便于分析比较的物理模型, 作如下假定:

(1) 液膜在吸收管内壁的流动是层流流动, 并且液膜边界光滑; (2) 微元的氨水浓度及密度与液相氨水主流的浓度及密度相等; (3) 气液界面无传质阻力, 处于平衡状态; (4) 氨蒸汽在管道内部时, 由于阻力作用产生的压力降可以忽略不计; (5) 氨蒸汽在气液界面处被吸收时, 立即放出全部吸收热, 并立即传入液膜内部; (6) 液膜中液体的对流可以忽略不计, 液膜中液体温度沿液膜厚度方向的变化关系可以看作是线性的。

收稿日期: 2007-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(90210032/50576001)

第一作者: 男, 1981 年生, 硕士生

* 通讯联系人

E-mail: dxzh@mail.buct.edu.cn

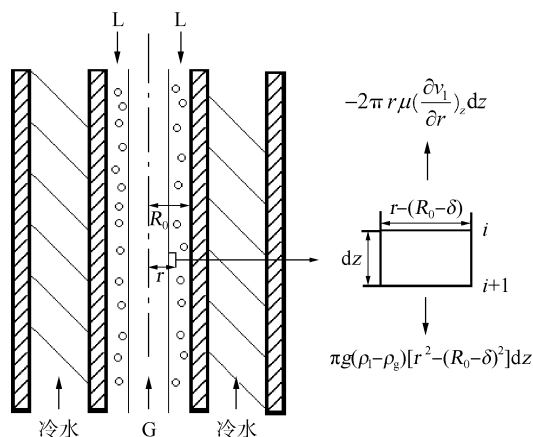


图 1 传质传热物理模型

Fig. 1 Model of heat and mass transfer

2 溶液降膜吸收过程的数学模型

如图 1 所示,在垂直管内沿管长任意位置 z 处取一个微元,根据前述假定,作用在距管轴中心 r 处微元上的力平衡方程为:

$$\pi g(\rho_1 - \rho_g)[r^2 - (R_0 - \delta)^2] dz = -2\pi r \mu \left(\frac{\partial v_1}{\partial r}\right)_z dz \quad (1)$$

其中, ρ_1, ρ_g 为液膜和水蒸汽的密度, kg/m^3 ; δ 为液膜厚度, m ; v_1 为液膜在距管轴中心 r 处的速度, m/s ; μ 为粘性系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。由于液膜速度 v_1 是 z 和 r 的函数,在微元中, z 已被确定下来,代入边界条件 $r = R_0, v_1 = 0$,得到液膜在垂直降膜管 z , 半径 r 处的速度方程为:

$$v_1 = \frac{g(\rho_1 - \rho_g)}{2\mu} \left[\frac{R_0^2 - r^2}{2} - (R_0 - \delta)^2 \ln\left(\frac{R_0}{r}\right) \right] \quad (2)$$

从而可以得到液膜在 z 处的质量流量为:

$$q_m = \frac{\pi g \rho_1 (\rho_1 - \rho_g)}{2\mu} \left[-R_0^3 \delta + \frac{7}{2} R_0^2 \delta^2 - 3R_0 \delta^3 \right] + \frac{3}{4} \delta^4 + (R_0 - \delta)^4 \ln \frac{R_0}{R_0 - \delta} \quad (3)$$

微元中,液膜的质量流量增量 dq_m 是由在微元气液两相界面上,气相向液相的传质而产生的。按照传质方程认为,气液两相界面上的传质是由某一组分的气相浓度 y 与液相界面饱和浓度 y_i 之差所形成的传质推动力而产生的^[4]。因此该微元中 dq_m 可按传质方程写成:

$$dq_m = \frac{M}{R_m T_g} [kp(y - y_i) \cdot 2\pi(R_0 - \delta)] dz \quad (4)$$

式中, M 为被吸收气体的摩尔分子质量, kg/mol ;

R_m 为通用气体常数, $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$; T_g 为被吸收气体的热力学温度, K ; k 为传质系数, $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; p 为吸收压力, Pa 。

由文献[5]可知,在所研究的微元内气相传质系数为:

$$k_i = 0.023 \frac{D_g}{2R_0} Re^{0.83} Sc^{1/3} \quad (5)$$

在氨水溶液吸收氨蒸汽过程中,要放出一些吸收热。吸收热包括两部分:一部分为氨气被吸收时所放出的凝结热,另一部分为凝结后的氨液与溶液混合时的混合热。如果忽略管内液膜和被吸收气体之间的热交换,在图 1 中所研究的微元内存在能量平衡为:

$$c_p q_m dt_m = \gamma_a dq_m + [q_m h_i - (q_m + dq_m) h_{i+1}] - dQ_c \quad (6)$$

式中, h_i 和 h_{i+1} 为吸收溶液进出微元时的比焓, kJ , t_m 为液膜的平均温度, K ; c_p 为氨水溶液的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; γ_a 为氨的凝结热, J/kg 。水溶液的焓值是摩尔分率 x 和温度 t 的函数,由文献[6]可知,焓可表示为:

$$h(t, x) = 100 \sum_{i=1}^{16} a_i \left(\frac{t}{273.16} - 1 \right)^{m_i} x^{n_i} \quad (7)$$

其中 a_i, m_i 和 n_i 均为经验回归系数,具体数值详见文献[6]。 dQ_c 为垂直管外冷却水带走的热量, J ; 可表示为:

$$dQ_c = K(t_m - t_c) 2\pi R_c dz \quad (8)$$

其中, K 为总换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; t_c 为冷却水的平均温度, K ; R_c 为内管外径, m 。氨水垂直管内降膜吸收过程传热、传质问题的数值求解步骤:

(1) 垂直管入口的流量

$$q_{m0} = 2\pi R_0 \Gamma \quad (9)$$

其中, Γ 为喷淋密度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

(2) 管外冷却水带走的热量

$$\Delta Q_{c,i} = K(t_{m,i} - t_{c,i}) 2\pi R_c \Delta z \quad (10)$$

(3) 微元内液膜吸收氨气后的放热量

$$\Delta Q_{x,i} = \gamma_a \Delta q_{m,i} + q_{m,i} h_i - (q_{m,i} + \Delta q_{m,i}) h_{i+1} \quad (11)$$

(4) 控制面 $i+1$ 处参数计算式

$$q_{m,g,i+1} = q_{m,g,i} - \Delta q_{m,g,i} \quad (12)$$

$$t_{m,i+1} = t_{m,i} + (\Delta Q_{x,i} - \Delta Q_{c,i}) / c_{p,i+1} q_{m,i+1} \quad (13)$$

$$x_{i+1} = (x_i q_{m,i} + \Delta q_{m,i}) / q_{m,i+1} \quad (14)$$

根据模型,编写 Fortran 计算机程序进行计算时,第一个微元参数可以用液膜入口参数代替,液膜厚度 δ 可由方程(3)迭代求得,氨水溶液的物理性质可由文献[7]得到,垂直管内降膜吸收过程的传热传质特性可通过上述步骤逐次求解微元得到。

3 降膜吸收实验与模拟比较

根据单级氨水吸收式制冷装置实验数据^[8]确定计算初值,气体与溶液的流动方式是顺流。竖直降膜管规格为 $\Phi 20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,管长 1500 mm,共 7 根,外管内径 80 mm,总传热面积约为 0.44 m^2 。各个物流状态参数见表 1,吸收器吸收过程具体流程见图 2。

表 1 吸收实验数据
Table 1 Experimental absorption data

物流	T/K	p/kPa	$\varphi/\%$	$\tau w/\%$		$q_m/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
				NH_3	H_2O	
NH_3 入口	258.1	200	100	100	0	3
浓 $\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}$	293	200	0	38.8	61.2	27.16
稀 $\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}$	329.7	200	0	31.2	68.8	24.16
冷却水出口	295.1	300	0	0	100	293.4
冷却水入口	288	300	0	0	100	293.4

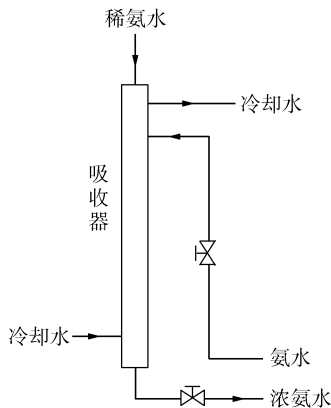


图 2 吸收器吸收过程示意图

Fig. 2 Flow diagram for absorption process

表 2 给出垂直管内降膜吸收实验值和模型计算值的比较。由实验值与模型计算值的对比发现,吸收器底部出口氨溶液浓度和吸收器总传热系数的实验值略高于计算值,这两个数值可以充分说明吸收器的传质、传热效果,其原因是吸收器的数学模型是建立在许多假设之上,如假设液膜在吸收管内壁的流动是层流流动,液膜边界光滑等。而在实际的降

膜过程中,液膜表面存在着波动,甚至产生漩涡,导致了理想的浓度场被破坏,整个浓度场内的传质阻力减小,从而强化了传质,传热。

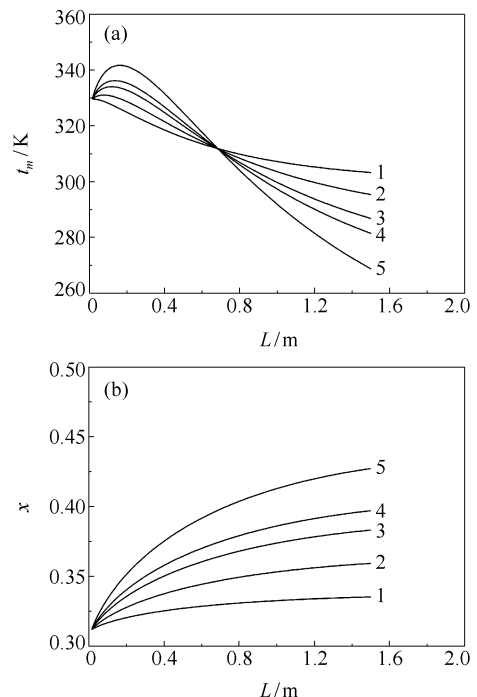
表 2 验证实验值与模拟计算值比较

Table 2 Comparison between the calculated values and the experimental values

项目	浓 $\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}$			$K/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
	$q_m/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	T/K	$\tau w/\%$	
实验值	27.16	293.0	38.8	1279
计算值	26.95	286.8	38.3	1257
偏差/ $\%$	-0.8	-2.2	-1.3	-1.8

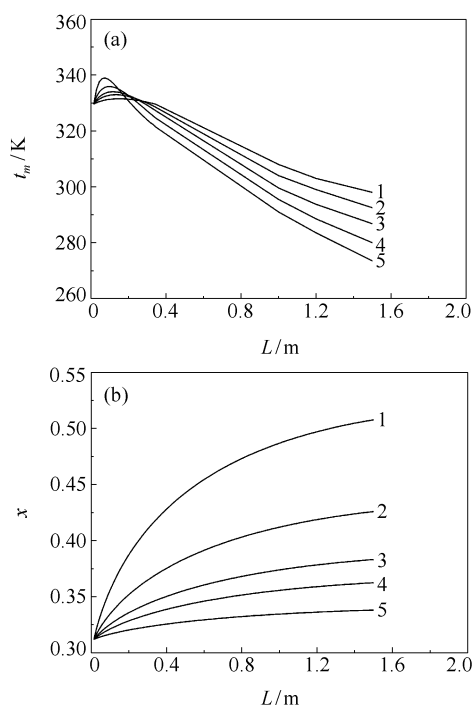
4 降膜吸收过程模拟结果分析

选取吸收管内径、稀氨水的喷淋密度和冷却水流量三个变量,考察变量对液膜主流的平均温度和液膜主流浓度的影响情况,如图 3~5。从这些图中可以看出,液膜主流的温度随着管长是一条先升后降,带有峰值的曲线,温度峰值出现在局部吸收放热量与局部冷却换热量相等时的管段长度处。这是因为,当吸收过程刚开始发生时,溶液浓度较低,吸收能力较强,局部吸收放热量大于局部冷却换热量,导



1—5 mm; 2—8 mm; 3—16 mm; 4—24 mm; 5—32 mm
图 3 不同管径下液膜温度(a)和浓度(b)的变化

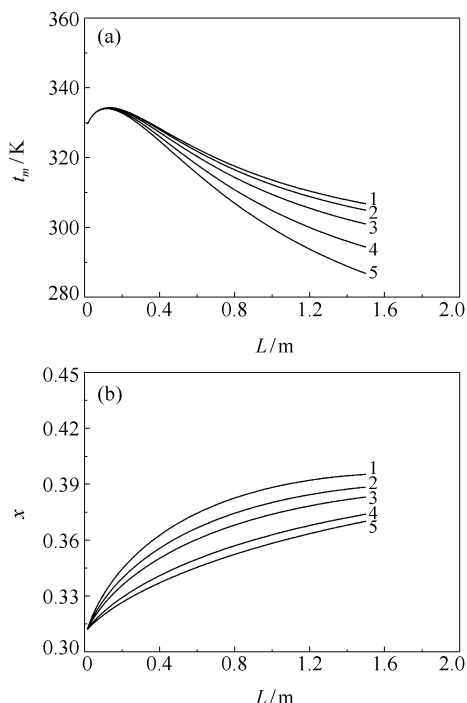
Fig. 3 Relationship between t_m , x vs L at different values of R_0



1—11.5 kg/(m·h); 2—17.2 kg/(m·h); 3—34.4 kg/(m·h);
4—51.6 kg/(m·h); 5—68.8 kg/(m·h)

图4 不同喷淋密度下液膜温度(a)和浓度(b)的变化

Fig. 4 Relationship between t_m, x vs L at different values of Γ



1—293.4 kg/h; 2—352.0 kg/h; 3—440.1 kg/h;
4—528.1 kg/h; 5—586.8 kg/h

图5 不同冷却水流量下液膜温度(a)和浓度(b)的变化

Fig. 5 Relationship between t_m, x vs L at different values of $q_{m,c}$

致吸收过程中产生的吸收热不能及时导出,因此在垂直管入口段,溶液温度升高。一方面,溶液平均温度的升高将导致溶液饱和蒸气压的升高;另一方面,溶液浓度也随着吸收过程的进行而逐渐升高,这些因素都会导致溶液吸收能力下降,吸收热也随之减少,因此,溶液温度经过一个峰值后逐渐降低。浓度图上,由于气体与溶液的流动方式是顺流,使得溶液浓度沿管长方向逐渐增大。同时,随着溶液饱和蒸气压的升高,致使氨的气相浓度与液相界面饱和浓度之差减小,即气液相间的传质推动力减小,浓度曲线趋于平缓。

从图3可以发现,随着管径越大,吸收器的出口温度越低,浓度越大,吸收过程的传热、传质效果越好。虽然本文没有考虑管中的压力降,但在实际过程中,过小的管径会使氨气在管中的压降增大,不利于吸收。所以,在不影响垂直管内成膜的情况下,可以适当增加降膜管的直径,可以获得相对较高的吸收率。

从图4中可以发现,当溶液喷淋密度增加时,温度的峰值越平坦。这是由于液膜增厚,热容增大,导致液膜温度增加缓慢。同时由于液膜厚度增厚,其传热、传质效果较差,吸收过程也会减弱。从浓度图中可以看出,液膜浓度随管内喷淋密度减小而迅速增加,增加量明显高于对流传热系数和管径变化对其影响,这说明管内溶液的喷淋密度是制约吸收过程液膜主要因素。

图5给出了液膜温度和浓度在不同的冷却水流量下随管长的变化关系,当冷却水流量越大时,峰值也越平缓。当然冷却水流量增大,则对流传热系数大,吸收过程的温度也越低,从而导致吸收加强。当对冷却水流量过小时,不仅使得吸收过程进行不完全,而且容易导致氨溶液出口的温度过高,浓度过低,冷却水带走的总热量减少,不利于吸收。

由此推断,在垂直管内降膜吸收的传质、传热过程中,管内喷淋密度改变的影响大于吸收管内径变化的影响,大于冷却水流量改变的影响。

5 结论

采用对降膜吸收过程划分微元的分析方法,充分考虑到降膜吸收过程中工质的物性变化,建立降膜吸收过程热-质耦合数值积分模型,对氨水溶液在竖直光滑管管内降膜吸收的传热传质情况进行数值模拟分析。浓氨水出口浓度偏差为1.3%,浓氨水

出口温度偏差为 2.2%, 浓氨水的出口流量偏差为 0.8%, 总换热系数偏差为 1.8%, 该模型计算出的模拟值与文献中所叙述的实验值吻合程度良好。在垂直管内降膜吸收的传质过程中, 管内喷淋密度改变对液膜温度和浓度的影响大于吸收管内径变化的影响, 大于冷却水流量改变的影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Reindert H W, Segal G. Numerical results of falling film absorption with water-ammonia[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 1999, 38(11): 960-964.
- [3] 王建平, 朱天复, 谢仲华. 溴化锂水溶液在小雷诺数下降膜吸收的传热和传质[J]. *浙江大学学报*, 1985, 19(4): 76-86.
- [4] 化学工程手册编写委员会编. 化学工程手册: 气体吸收[M]. 北京: 化学工业出版社, 1982.
- [5] 尹铭, 陈嘉宾, 陈沛, 等. 垂直管外降膜吸收传质过程强化的研究[J]. *高校化学工程学报*, 2002, 16(6): 602-608.
- [6] Sun D W. Comparison of the performances of $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ and $\text{NH}_3\text{-NaSCN}$ absorption refrigeration systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 1998, 39(5-6): 357-368.
- [7] 郭庆堂, 吴进发. 实用制冷工程设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [8] 包天舒. 氨水吸收式制冷系统的实验研究和热经济分析[D]. 北京: 北京化工大学化学工程学院, 2005.

Numerical simulation of falling film absorption in vertical tubes in a generator absorber heat-exchanger (GAX) cycle

XU Feng ZHENG DanXing TIAN Tao

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The heat transfer and mass transfer phenomena occurring during falling film absorption of ammonia in vertical tubes in a GAX cycle have been studied and a model for the transfer phenomena has been derived. The experimental data collected from a single-stage ammonia absorption refrigeration apparatus were set as the initial value and numerical data for the ammonia absorption process in the vertical pipe falling film were calculated. The results obtained agreed very well with experimental data. In addition, the changes in average temperature and concentration of the main fluid with the value of three variables, the tube diameter, dilute spray density and mass flow of the cool water were also studied. It is shown that the average temperature and concentration of the main fluid is sensible with the changing of dilute spray density.

Key words: Heat and mass transfer; falling film absorption; numerical computation; GAX