文章编号：0253-4339(2013)01-0073-08
doi：10.3969/j.issn. 0253-4339. 2013. 01. 073

一种氨水水平降膜吸收传热模型

张 强 杨永平

（陕西理工学院机械工程学院 汉中 723000）

摘 要 在Navier-Stokes方程的基础上，提出一种新的氨水降膜吸收传热模型，通过对降膜过程中的液膜流动特性进行了一维变换，采用Grank-Nicholson方法对降膜特性进行求解，然后根据实验验证了理论模型的仿真结果，实验数据和仿真数据的误差在17%以内，并根据实验数据拟合出了传热系数公式，确定了不同管径下液膜的最大体积流量。

关键词 降膜吸收；传热模型；水平光管；数值解

中图分类号：TB61+1; TP391.9 **文献标识码**：A

A Heat Transfer Model of Ammonia Horizontal Falling-film Absorption

Zhang Qiang Yang Yongping

(Mechanical Engineering College, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, 723000, China)

Abstract A new heat and mass transfer model was presented on the basis of Navier-Stokes equation. One-dimensional transformation was conducted on the function of liquid film flow in the process of falling-film, and the Grank-Nicholson Method was used to solve falling-film characteristics. The simulation result of theoretical model was validated with the experiment, and its error is within 17%. Heat and mass transfer coefficient formula was fitted based on the experimental data, and the biggest flow volume of liquid film was obtained in different diameters.

Keywords falling-film absorption; heat and mass transfer; horizontal bare tube; numerical simulation

吸收式制冷系统的吸收器是直接影响系统效率的换热器，对其进行强化传热传质的研究已成为吸收式制冷研究的热点之一[1]。降膜吸收是一个复杂多变的传热传质过程，针对水平光管的水平降膜吸收的传热传质系数是随膜厚和流速的变化而变化的，而后者又是随着圆周角的变化而改变。目前对降膜吸收特性研究的方法主要有实验法[2-15]和数值模拟[16-27]：

实验法主要是建立降膜吸收的实验台，然后通过分析实测数据来描述降膜吸收的特性，文献[2-15]主要通过改变溶液进出口温度、浓度、流量以及冷却水进出口温度、流量的同时，通过改变各种加强换热管的几何外形，通过实测数据描述出降膜吸收过程的特性，例如文献[15]通过大量的实验数据最终确定了传热系数关联式：

$$h = 14009.87 q_w^{0.0764} Re^{-0.5391}$$

但是，通过实验法来描述降膜吸收过程，首先也要有相对准确的理论模型，这样才能有的放矢的进行实验数据的采集、整理工作。

文献[16-27]主要集中在溴化锂吸收式制冷系统的分析，基于Navier-Stokes方程，根据假设：建立了连续性方程、动量方程、能量方程等，运用各种算法求解出流体的速度场、温度场等降膜吸收过程的特性，以徐士鸣[16]等提出的传质数学模型，以及牛晓峰[21]提出的新的传质模型，很好的描述了降膜吸收的传质过程。

这里主要是在前人研究的基础上，基于水平降膜流动为变速圆周运动的假设，建立了一种新的一维氨水水平降膜吸收传热模型，根据氨水热物性并对边界条件进行合理的简化，利用具有高效率和恒稳定性的Grank-Nicholson方法对所建立的数学模型进行离散化处理得到氨水降膜吸收特性的速度场及温度场等，并且分析了膜厚、流速等参数对传热系数的影响，通过实验验证了所建模型能够较为精确的描述了氨水水平降膜吸收的传热特性，且模型简单便于求解。

1 数学模型

氨水降膜吸收单管吸收过程模型如图1所示。取传热管外切方向为x轴方向，半径方向为y轴方

基金项目：国家科技计划项目(2009GJG00015)资助。(The project was supported by National S&T Plans (No.2009GJG 00015).)

收稿日期：2012年1月8日

向，则管壁上任意点的半径方向与垂直方向的夹角为θ，由于氨液在光管外的流动具有对称性，故只取模型的一半研究即可。如图(1)所示：

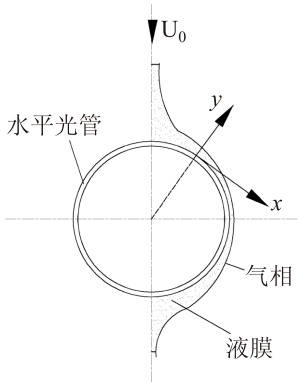


图1 光管降膜吸收过程示意图

Fig.1 The falling-film absorption schemes of the bare tube

首先，文献[28]对氨水的降膜吸收过程做出假设得到一类传统的数学模型。

此类数学模型并不能非常准确的描述水平光管降膜吸收过程，没有考虑到流速将会影响到液膜的形成好坏，而液膜沿圆周的润湿度直接影响传热系数的高低，文献[16-28]普遍采用图2(a)中x轴、y轴组成的坐标系，在数值模拟过程中：在x,y坐标系中对液膜划分网格以求解出沿x向速度u、沿y向速度v。由此可见，想要准确的描述降膜吸收过程，需要对传统的二维模型进行修正。

2 新的建模理论

2.1 理论分析

液膜在管外流动过程示意图见图2(a)，图中黑实线表示x轴速度u和y轴速度v的合速度场。对建立水平光管降膜模型可做如下假设：

1)可以把管外流体看作沿灰线方向流动，可以推得液膜外层速度达到最大，因此速度可看作一维流动。

2)加速度不只是重力引起的，从液膜绕光管做变速圆周运动切入分析，液膜的加速度可以看作是向心加速度。

3)图2(a)中的一组灰色曲线可看作是基于x、y平面内的矢量场U，方向为Z。

4)方向Z可认为一束流体的方向。

2.2 数学模型的修正

根据假设3)，可得到水平光管降膜的一维矢量场$Z=Z(x,y)$：

$$\bar{Z}=x\hat{i}+y\hat{j} \tag{1}$$

对公式(1)取微分：

$$\mathrm{d}\bar{Z}=\mathrm{d}x\hat{i}+\mathrm{d}y\hat{j} \tag{2}$$

依据矢量场平行条件可得：

$$\frac{\mathrm{d}x}{x}=\frac{\mathrm{d}y}{y} \tag{3}$$

x、y转换到极坐标可得：

$$\begin{cases} x=r\cos\varphi \\ y=r\sin\varphi \end{cases} \tag{4}$$

根据假设(4)，可得到Z在极坐标下的模型：

$$Z=\int_0^{180}(r\cos\varphi+r\sin\varphi)\,\mathrm{d}\varphi \tag{5}$$

式中：x、y为横纵坐标，r、φ为极坐标。

结合假设1、2、3以及图2(b)可得到修正后的数学模型如下：

连续方程：

$$\frac{\partial U}{\partial Z}+\frac{\partial U}{\partial\theta}=0 \tag{6}$$

动量方程：

$$\rho U\frac{\partial U}{\partial\theta}=\rho a+\mu\frac{\partial^2 U}{\partial^2 Z} \tag{7}$$

能量方程：

$$U\frac{\partial T}{\partial\theta}=a\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \tag{8}$$

质量方程：

$$U\frac{\partial\zeta}{\partial\theta}=a\frac{\partial^2\zeta}{\partial Z^2} \tag{9}$$

修正后的边界条件为：

$$Z=0;U=\sqrt{2gs};T=T_{\mathrm{in}};\zeta=\zeta_{\mathrm{in}} \tag{10}$$

$$\theta=0;U=0;\frac{\partial\zeta}{\partial Z}=0; \tag{11}$$

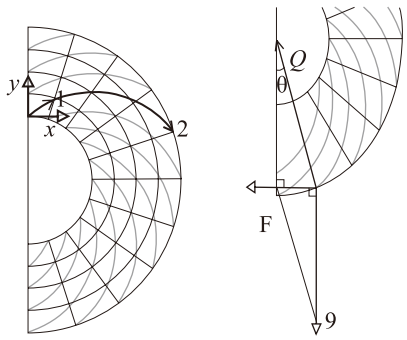
$$\lambda\frac{\partial T}{\partial Z}=\frac{T-T_{\mathrm{h}}}{R_{\mathrm{t}}-R_{\mathrm{h}}} \tag{12}$$

$$Z=\frac{\delta}{\sin\theta};\frac{\partial U}{\partial Z}=0;f\left(T_{\mathrm{e}},\zeta_{\mathrm{e}},p_{\mathrm{a}}=0\right) \tag{13}$$

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial Z}=-\Delta Z\frac{\rho D_{\mathrm{m}}}{\zeta}\frac{\partial\zeta}{\partial Z} \tag{14}$$

式中：U为基于假设(3)提出的x、y平面内的速度矢量场，Z为矢量场的方向，T、ζ分别为溶液的温度和浓度，R_{t}、R_{h}分别为单位管长的管壁导热热阻和管内热源的放热热阻，ρ为溶液密度，g为重力加速度，a为向心加速度，λ为溶液的导热系数，T_{in}、ξ_{in}分别为溶液的初始温度和浓度，θ为圆周角，a为导温系数，D_{m}=3.1×10^{-9}为扩散率，ξ为

溶液浓度，δ为液膜厚度，ΔZ为变换后的步长，s为布液器到水平管顶部的距离，p_a为吸收压力，μ为动力粘度，T_h为水平光管外壁温度，λ为导热系数，T_e、ξ_e分别为溶液饱和温度和饱和浓度。



(a) (b)

图2 液膜在管外流动过程示意图

Fig.2 The flow schemes of the liquid film outsid the tube

2.3 数值求解

采用Grank-Nicholson方法对修正的数学模型进行离散化处理后的方程如下：

动量方程：

$$\rho U_i^k \frac{u_i^k - u_i^{k-1}}{\delta\theta} = \rho a + \mu \frac{u_{i+1}^k - 2u_i^k + u_{i-1}^k}{\delta Z^2} \tag{15}$$

能量方程：

$$U_i^k \frac{T_i^k - T_i^{k-1}}{\delta\theta} = a \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{\delta Z^2} \tag{16}$$

质量方程：

$$U_i^k \frac{\zeta_i^k - \zeta_i^{k-1}}{\delta\theta} = D \frac{\zeta_{i+1}^k - 2\zeta_i^k + \zeta_{i-1}^k}{\delta Z^2} \tag{17}$$

其右边的差分估计在时间点k进行；如果把右边的差分估计看作是时间步长$\Delta t/2$的中心差分，则估计在点k和k-1的中点进行。等式左右的估计点不在同一个时刻。为了消除这个不一致性，需要将等式左右的估计放在同一个时间点进行。在时间点k和k+1对等式两边进行差分估计，可以得到：

$$\frac{\mu}{2}\left(\frac{U_{i+1}^{k+1} - 2U_i^{k+1} + U_{i-1}^{k+1}}{\Delta Z^2} + \frac{U_{i+1}^k - 2U_i^k + U_{i-1}^k}{\Delta Z^2}\right) = \rho U_i^k \frac{U_i^{k+1} - U_i^k}{\Delta\theta} - \rho a \tag{18}$$

对上式进行变换就得到Grank-Nicholson迭代方法：

$$rU_{i+1}^{k+1} - (2r + 2\rho U_i^k)U_i^{k+1} + rU_{i-1}^{k+1} = -rU_{i+1}^k + (2r - 2\rho U_i^k)U_i^k - rU_{i-1}^k - \rho a \tag{19}$$

其中：

$$r = \mu \frac{\delta t}{\delta Z^2} \tag{20}$$

如果方程在x_0/x_m处具有牛顿边值条件，则可把迭代式写成三对角矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} 2+2r & -r & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -r & 2+2r & -r & & 0 & 0 \\ 0 & -r & 2+2r & & 0 & 0 \\ & & \cdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2+2r & -r \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 2+2r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^k \\ U_2^k \\ U_3^k \\ \cdots \\ U_{m-1}^k \\ U_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2+2r & -r & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -r & 2+2r & -r & & 0 & 0 \\ 0 & -r & 2+2r & & 0 & 0 \\ & & \cdots & & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2+2r & -r \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 2+2r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^k \\ U_2^k \\ U_3^k \\ \cdots \\ U_{m-1}^k \\ U_m^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r(U_0^{k+1} - U_0^k) \\ 0 \\ 0 \\ \cdots \\ 0 \\ 2r(b_m(k+1) + b_m(k)) \end{bmatrix} \tag{21}$$

该算法具有高效率和恒稳定性，即对于任意r，算法均收敛。网格的划分如图2(a)所示。基于matlab编制程序对上述模型进行求解，并编制相应的氨水热物性参数子程序，以备主程序调用。

3 仿真结果及实验验证

3.1 仿真结果分析

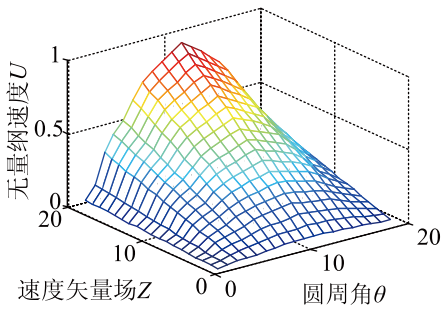


图3 半圆周无量纲速度U分布

Fig.3 The distribution of dimensionless belocity in semicircumferentialflow

图3描述了换热管外液膜无量纲速度U的三维分布示意图，图3表明了水平光管降膜传热的无量纲速度分布是从管壁到液膜最外侧由小到大变化的，同时也验证了采用Grank-Nicholson方法对公式(6)~(9)进行数值计算时，结果是收敛的；图4中的j为离散后的网格层，图4描述了降膜吸收过程的

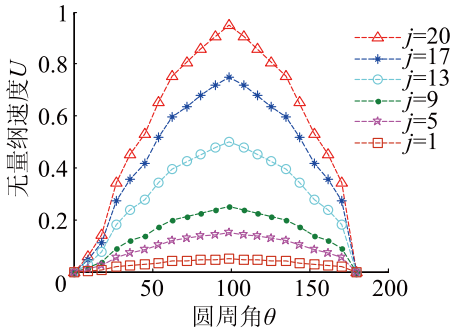


图4 不同网格层无量纲速度U的分布

Fig.4 The distribution of dimensionless belocity in different grid

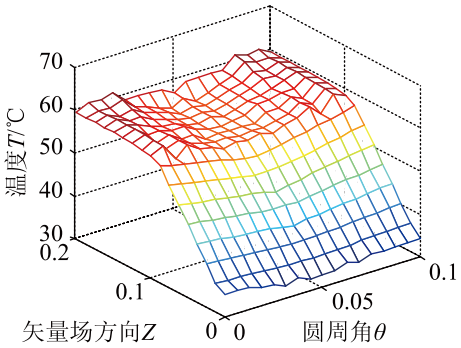


图5 半圆周液膜温度分布

Fig.5 The distribution of tempareture in semicircumferentialflow

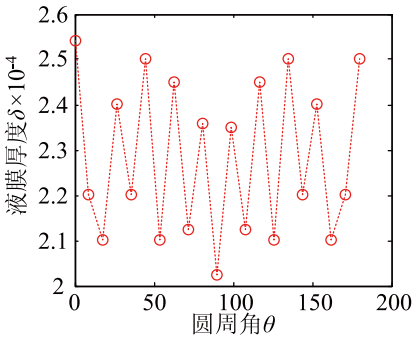


图6 半圆周液膜厚度变化

Fig.6 The change of liquid film thickness semicircumferentialflow

液膜无量纲速度U在换热管外的流速和方向是不断改变的，随着划分的网格层的增大，速度也随之增大。在管外流动的初始阶段，速度快速增加，当圆周角θ等于90°时，速度达到最大；当圆周角继续增大，速度逐渐减小，并且验证了图2(b)的分析。图5描述了水平光管外液膜内的三维温度分布。由于氨蒸气放出大量的潜热，所以液膜最外层的温度最高，热量通过壁面传给管程冷却水后，液膜温度从外层向换热管壁面温度逐渐降低。由图5可知：初始阶段液膜内各层的温度变化较剧烈。图6显示了液膜厚度呈现非周期性的震荡，在管外流动的初始阶段，液膜厚度呈现非周期性震荡且液膜厚度趋于减小，在θ=90°时，液膜厚度达到最小，在90°~180°之间，液膜厚度趋于非周期性增大，此现象是由于水平光管降膜过程中的液膜速度波动引起的。

3.2 最大初速度的确定

根据图2(b)，降膜吸收过程可以认为是液膜围绕光管外壁流动，在流体粘度的作用下做变速圆周运动，降膜吸收过程完成的好坏，要充分考虑基于变速圆周运动的液膜在光管外壁的润湿程度，要想达到图1的液膜运动情况，由图2(b)可知：依据圆周运动规律，可推出速度与向心加速度的关系：

$$m\frac{U^2}{R}\sin\theta = mg\tan\theta \tag{22}$$

经变换后得：

$$U=\sqrt{\frac{gR}{\cos\theta}} \tag{23}$$

上式中的速度U，随着圆周角的增加而逐渐减小，利用BP神经网络预测出如图1示意过程的最大末速度，u=0.35355339m/s，如果液膜流速过大，超过这个速度值，必然会产生液膜的飞溅，不能很好的润湿光管圆周，影响换热效率。

u=0.35355339m/s这个速度是基于上述算法的光管外液膜流速层的末速度，根据数值仿真结果，结合图3、图4，采用最小二乘法分段对流速U与圆周角θ的对应关系进行拟合：

当θ=0~90°时：

$$U_1=-0.000000120323221\theta^3-0.00006148766 87\theta^2+0.016547618492 62\theta+0.04043268531469 \tag{24}$$

当θ=90~180°时：

$$U_2=0.000000120323221\theta^3-0.000093974934 53\theta^2-0.002555984200 98\theta+0.9439526153847 \tag{25}$$

根据采用不同的换热管直径依据公式(23)求出液膜的末速度，然后利用公式(24)、(25)预测出液膜不产生飞溅的最大初始速度。

当速度u=0.35355339m/s，则当θ=90°时，u_{max}=5.992m/s，则初始速度u_1=0.2m/s。利用平均速度，描述出速度对传热系数的影响，见图7。

图7显示了液膜的传热系数随着液膜流速的增大而增大，但是要控制好流速，防止液膜流动过程中过早脱离壁面，影响换热效率。

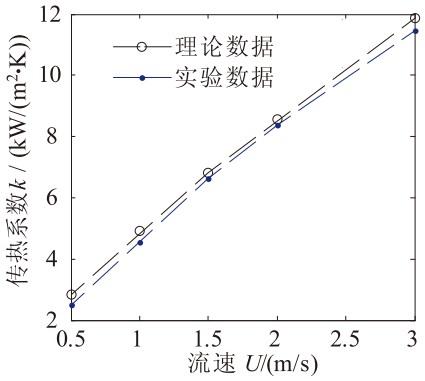


图7 流速对传热系数的影响

Fig.7 The flow rate effect on heat transfer coefficient

依据初始实验条件，测得实际传热系数，见图7，结合数值模拟分析，推得满足在使用不同直径的换热管的初始流速公式，限于篇幅，仅给出最终公式：

$$U_0 = 0.3\sqrt{\frac{gR}{\cos\theta}} \tag{26}$$

3.3 确定最大理论流量

由于换热系数关联式是以雷诺数Re为自变量的函数，考虑到实验过程中无法精确的控制Re的变化，所以首先要推导出体积流量与Re之间的关系，推导过程如下：

$$q = \overline{U}\frac{\pi(0.042\delta - \delta^2)}{4} \tag{27}$$

$$Re = \frac{\overline{U}\delta}{\upsilon} \tag{28}$$

式中：δ为平均液膜厚度，液膜很薄，根据文献[15]可推得：0.042δ远大于δ^2，因此δ^2可被忽略，公式(27)可化简为：

$$q = 0.010\overline{U}\pi\delta \tag{29}$$

把公式(28)代入公式(27)可得Re与体积流量之间的关系：

$$Re = \frac{95.238q}{\pi\upsilon} \tag{30}$$

根据平均速度公式，可求出最大理论体积流量：q=19.6×10^{-6}m^3/s；而与最大体积流量对应的Re为1067.6。

3.4 实验验证

基于文献[2-15]的实验方法，建立了长1000 mm、外径25mm的光管降膜吸收实验装置。基于吸收式制冷系统的蒸发器、发生器分别产生的氨蒸气和高温水进入水平降膜吸收的实验装置，冷却水通过循环泵在实验装置的管程流动，采用安捷伦表连接的热电偶来对实验装置的1~5的测温点进行测温，利用皮托管来观察装置的压力变化，在开机初期，安捷伦表设定每5s记录一次数据，目的是为了更加精确的记录降膜实验装置开机时的动态运行特性，待压力稳定后，每1min记录一次。各个管道安装了流量计来测量流速，并通过节流阀来调节流速。实验系统示意图见图8。

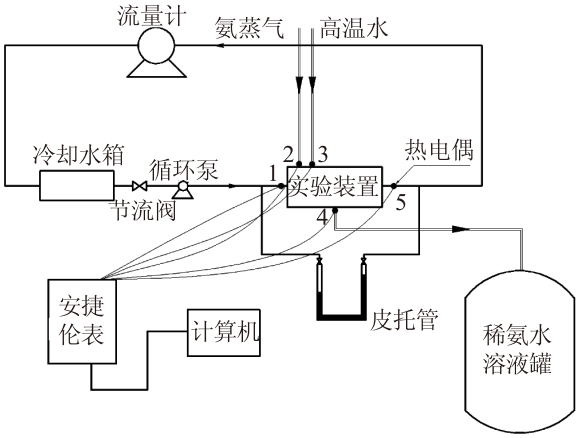


图8 降膜吸收实验系统示意图

Fig.8 Schematic of the falling-film test systems

基于最大理论体积流量设计降膜吸收的实验初始值，见表1，实验利用表1的各个参数值按照由小到大的顺序进行。

表1 实验初始参数

Tab.1 The initial parameters of experiment

实验参数	符号	实验范围
初始浓度	ξ	0.5%
实验温度	T_v	110~160 ℃
压强	p	95.6kPa
热流密度	Q	5000~30000W/m^2
流量	q_w	14~20mL/s(115℃)

3.4.1 热流密度和体积流量对传热系数的影响

由表1的实验初始数据通过实验测得热流密度和体积流量结合公式31对传热系数影响，如图9所示，图中的上部为模拟数据，下部为实验值。

3.4.2 确定换热系数关联式

根据本次实验测得的200组数据，基于matlab的多元线性回归算法，拟合出降膜吸收传热系数的实验关联式：

$$h = 13046q_w^{0.2109}Re^{-0.2370} \tag{31}$$

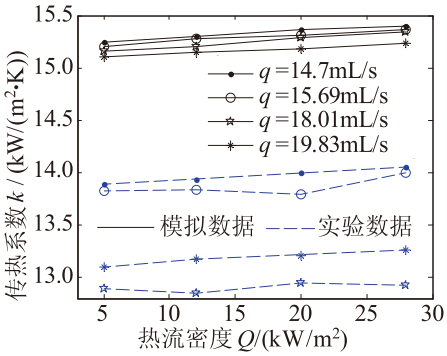


图9 实验值、模拟值与传热系数关系

Fig.9 The relationship between heat transfer coefficient and the experimental value and the simulation value

由图3可知：液膜速度在最外层及圆周角θ=90°时达到最大，并由公式(31)和图9可知：换热系数取决于流体的热流密度和体积流量：降膜吸收的传热系数随着液膜的热流密度和体积流量的增大而增大。实验过程中，当把体积流量加大到25mL/s时，液膜出现飞溅，不能很好的润湿管壁。

在热流密度为5~30kW范围内，公式(31)与实测数据比较，见图9。图9表明基于公式(31)模拟值与实测数据之间的最大误差为17%，并且得到公式(31)适用于Re小于1201.1范围内的传热系数的求解。

3.4.3 误差分析

在热流密度为5~30kW范围内的200组实测数据运用误差评判原理[30]求出平均误差及标准差对公式(31)进行误差分析，见表2。

表2 不同工况下的误差对比

Tab.2 Comparison with error in different conditions

体积流量q_w/(mL/s)	误差	结果
14.70	E_1(f)/(K)	−2265
	E_2(f)/(K)	2265.4
15.69	E_1(f)/(K)	−2307.3
	E_2(f)/(K)	2307.7
18.01	E_1(f)/(K)	−2407.3
	E_2(f)/(K)	2407.7
19.83	E_1(f)/(K)	−2424.8
	E_2(f)/(K)	2425.1

表2中，E_1(f)/(K)、E_2(f)/(K)分别为平均误差和标准差，表(2)表明，随着体积流量的加大，E_1(f)/(K)、E_2(f)/(K)均增大，验证了文中3.3提出的最大理论体积流量公式，公式(28)提出的最大理论体积流量q=19.6×10^{-6}m^3/s，经实验验证并不是最佳的流量值，但为研究水平光管降膜的特性提供了理论依据。

图9和表2都表明实验值与理论值之间存在误差，这是由于实验操作的误差积累以及实验中的管外降膜侧流体并不能实时足量供应，实际的初始速度是有波动的。

4 结论

1）在Navier-Stokes方程的基础上，将水平光管外壁降膜吸收的二维流动变换为一维流动，建立了新的传热模型，利用新模型预测氨水在水平光管外壁的降膜吸收过程的特性，通过实验验证和误差评价，验证了所建模型能较好的描述水平光管降膜传热特性；

2）确定了不同管径下的最大液膜初速度公式，液膜的最大体积流量得到了很好的预测：当液膜体积流量超过理论最大流量时，液膜产生飞溅，当液膜体积流量继续增大时，光管外壁不能全部润湿，影响了换热效率；

3）建立了长1000mm、外径25mm的光管降膜吸收实验装置，验证了模型预测值与实验值的最大误差在17%以内，并分析了误差产生的原因，公式(6)~(9)能较为精确的描述水平光管降膜的传热特性，较之传统模型简单，便于求解；

4）只对水平光管降膜的传热特性进行了对比分析，得到了较满意的结果，同时得出此种数值解法同样适用于水平光管降膜的温度分布以及传质特性的求解。

本文受陕西省教育厅(09JS046)项目资助。(The project was supported by Shaanxi Provincial committee of Education Project (No.09JS046).)

参考文献

[1] 武润宇, 武卫东, 陈盛祥, 等.氨水降膜吸收传热传质强化的研究进展[J].低温与超导,2010,38(12):49-53.(Wu Runyu,Wu Weidong, Chen Shengxiang. Research progress in heat and mass transfer enhancement of the ammonia falling film absorption[J].CRYOGENICS AND SUPERCONDUCTIVITY，2010,38(12)：49-53.)

[2] 薄守石, 马学虎, 陈嘉宾,等.场协同原理强化管外降膜吸收传热特性实验研究[J].大连理工大学学报, 2008, 48(1):18-21.(Bo Shoushi, Ma Xuehu, Chen Jiabin,et al.Experimental investigation of falling film absorption heat transfer performance for field synergy principle enhanced tubes[J]. Journal of Dalian University of

Technology, 2008,48(1):18-21.)

[3] 李正良, 叶锦义, 孟沪生,等.LiBr溶液高温竖管降膜吸收过程的实验研究[J].广西大学学报(自然科学版),2008(03):270-274.(Li Zhengliang, Ye Jinyi, Meng Husheng,et al.Experimental study on the high temperature vertical tube falling film absortion Proeess of LiBr solution[J]. Journal of Guangxi University, 2008(03): 270-274.)

[4] 牛晓峰, 杜垲, 胡智慧,等.磁场影响氨水吸收的实验研究[J].工程热物理学报,2008,29(6):919-922.(Niu Xiaofeng, Du Kai, Hu Zhihui,et al. EXPERIMENT ANALYSIS ON THE EFFECT OF MAGNETIC FIELD ON AMMONIA-WATER FALLING-FILM ABSORPTION[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(6): 919-922.)

[5] 郑飞,陈光明.溴化锂水溶液绝热吸收过程实验研究[J].太阳能学报, 2002,23(2):165-170.(Zheng Fei, Chen Guangming. EXPERIMENTAL STUDY ON LITHIUM-BROMIDE AQUEOUS SOLUTION ADIABATIC ABSORPTION PROCESS[J]. ACTA ENERCIAE SOLARIS SINICA, 2002, 23(2):165-170.)

[6] 刘艳丽, 徐士鸣, 韩巍,等.摇摆状态下TFE/NMP降膜吸收试验研究[J].大连理工大学学报, 2004,44(1): 65-69.(Liu Yanli, Xu Shiming, Han Wei, et al. Experimental study of falling-film absorption in a swayingtube using TFE/NMP as working fluid[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2004, 44(1):65-69.)

[7] 刘艳丽,徐士鸣,张利嵩.垂直管内TFE/NMP降膜吸收过程中热质传递试验研究[J].低温工程, 2002(1): 414-419.(Liu Yanli, Xu Shiming,Zhang Lisong. EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON HEAT AND MASS TRANSFER OF FALLING FILM ABSORPTION IN A VERTICAL TUBE WITH TFE/NMP SOLUTION[J]. Gryogenics, 2002(1): 414-419.)

[8] 王明华,郑丹星.LiCl水溶液垂直降膜吸收过程的实验与模拟[J].北京化工大学学报(自然科学版), 2005, 32(1):5-9. (Wang Minghua, Zheng Danxing.Experiment and simulation of vertical falling-film absorption process of LiCl solution[J]. JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY (NATURAL SCIENCE EDITION), 2005, 32(1):5-9.)

[9] 蒋桂忠,郭韵,蔡祖恢,等.溴化锂水溶液降膜吸收强化技术的实验研究[J].上海理工大学学报,2002,24(1):1-7.(Jiang Guizhong,Guo Yun,Cai Zuhui,et al. Experimental investigation on enhancing technology of falling film absorption for LiBr aqueous solution[J]. JOURNAL OF UNIVERSITY OF SHANGHAI FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2002, 24(1):1-7.)

[10] 李洪亮, 柳坤.横纹管强化吸收器的传热传质实验研究[J]. 化学工程, 2011,39(1):14-18.(Li Hongliang,Liu Kun. Experimental study on heat and mass transfer enhancement by grooved tube of absorber[J]. CHEMICAL ENGINEERING,2011, 39(1):14-18.)

[11] 汪磊磊,由世俊,王书中,等.水平管间溴化锂溶液滴状降膜流动分析[J].天津大学学报,2010,43(1):37-42.(Wang Leilei,You Shijun,Wang Shuzhong,et al. Analysis of LiBr Solution Droplet Falling Film Flow Between Horizontal Tubes[J]. JOURNAL OF TIANJIN UNIVERSITY, 2010, 43(1):37-42.)

[12] 王群昌,马学虎,薄守石,等.管内降膜式第二类吸收热泵性能实验研究[J].化学工程,2010,38(3):1-4.(Wang Qunchang,Ma Xuehu,Bo Shoushi,et al. Experimental study of absorption heat-transformer for falling film inside vertical spiral tube[J]. CHEMICAL ENGINEERING, 2010, 38(3):1-4.)

[13] 申江,高文全,孙欢,等.传热传质分离的绝热吸收过程实验研究[J].低温与超导,2009,37(9):55-59.(Shen Jiang,Gao Wenquan,Sun Huan,et al.Experimental investigation on heat and mass transfer separation adiabatic absorption process[J]. CRYOGENICS AND SUPERCONDUCTIVITY, 2009, 37(9):55-59.)

[14] 王长庆,陆震.降膜式发生器的传热传质研究[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(8):907-913.(Wang Changqing,Lu Zhen. Research on Heat and Mass Transfer of Falling Film Generator[J].JOURNAL OF TONGJI UNIVERSITY, 2001, 29(8):907-913.)

[15] 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.)

[16] 许峰,郑丹星,田涛.GAX循环中垂直管内降膜吸收的数值模拟[J].北京化工大学学报(自然科学版), 2008, 35(4):1-5.(Xu Feng,Zheng Danxing,Tian Tao. Numerical simulation of falling film absorption in vertical tubes in a generator absorber heat-exchanger (GAX) cycle[J]. JOURNAL OF BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY (NATURAL SCIENCE EDITION), 2008, 35(4):1-5.)

[17] 魏瑶,肖云汉,张士杰.开式吸收式热泵降膜吸收器热质传输研究[J].太阳能学报,2009,30(5):591-595.(Wei Yao,Xiao Yunhan,Zhang Shijie. ANALYSIS OF HEAT AND MASS TRANSFER OF THE FALLING FILM ABSORBER IN THE OPEN CYCLE ABSORPTION HEAT PUMP[J]. ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA, 2009, 30(5): 591-595.)

[18] 王林,马爱华,陈光明,等.规整填料绝热吸收器传热传质特性模拟算法[J].河南科技大学学报(自然科学版), 2010, 31(5):65-68.(Wang Lin,Ma Aihua,Chen Guangming,et al. Simulation of Heat and Mass Transfer

in Adiabatic Absorber with Structured Packings[J]. JOURNAL OF HENAN UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY(NATURAL SCIENCE), 2010, 31(5): 65-68.)

[19] 程文龙,贾磊,陈则韶,等.风冷垂直管降膜吸收器及其传热传质问题的研究[J].太阳能学报,2002, 23(2): 175-179.(Cheng Wenlong, Jia Lei,Chen Zeshao,et al. STUDY ON HEAT AND MASS TRANSFER OF AN AIR COOLED VERTICAL FALLING LIQUID FILM ABSORPTION[J]. ACTA ENERGIAE SOLARIS SINICA, 2002, 23(2):175-179.)

[20] 刘艳丽,徐士鸣,张利嵩.垂直管内TFE/NMP降膜吸收热质传递数值模拟[J].流体机械,2002,30(1):57-61.(Liu Yanli, Xu Shiming, Zhang Lisong. Numerical Modeling of Heat and Mass Transfer of Falling Film Absorption in a Vertical Tube with TFE/NMP[J]. Fluid Machinery, 2002, 30(1):57-61.)

[21] 牛晓峰,王良虎,杜垲.一种氨水垂直降膜吸收传质模型[J].化工学报, 2006,57(3):503-508.(Niu Xiaofeng, Wang Lianghu,Du Kai. New mass transfer model of ammonia vertical falling-film absorption[J]. JOURNAL OF CHEMICAL INDUSTRY AND ENGINEERING (CHINA), 2006, 57(3):503-508.)

[22] 程文龙.溴化锂风冷垂直降膜吸收过程数值模拟[J].制冷学报, 2001(4):11-15.(Cheng Wenlong.Numerical simulation for air cooling vertical falling film of LiBr solution[J]. JOURNAL OF REFRIGERATION,2001(4): 11-15.)

[23] 姜传胜,王照亮,李华玉,等.空冷/水冷混合冷却竖管内LiBr溶液降膜吸收过程数值解[J].制冷学报,2004,25(2): 59-62.(Jiang Chuansheng, Wang Zhaoliang, Li Huayu,et al. Numerical Simulation of Falling Film Absorption Process in the Vertical Tube withthe Combination of Air and Water Cooling[J]. Journal of Refrigeration, 2004, 25(2): 59-62.)

[24] 司华峰, 郭开华, 舒碧芬,等.湍流降膜吸收过程的数值解[J].化学工程, 2002,30(3):11-15.(Si Huafeng,Guo Kaihua,Shu Bifen. Numeric Simulations of Turbulent Falling Film Vapor Absorption[J]. CHEMICAL ENGINEERING, 2002, 30(3):11-15.)

[25] 陈亚平,李映斌,王克勇,等.波纹板片上降膜吸收过程的传热传质数值仿真[J].工程热物理学报,2004,25(3): 463-465.(Chen Yaping,Li Yingbin,Wang Keyong,et al. NUMERICAL SIMULATION ON HEAT AND MASS TRANSFER DURING AQUEOUS LI-BR SOLUTION FALLING FILM ABSORPTION ON CORRUGATED PLATE SURFACES[J]. JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS, 2004, 25(3):463-465.)

[26] 尹铭, 陈嘉宾,陈沛,等. 竖直管外降膜吸收传热传质过程强化的研究[J].高校化学工程学报,2002,16(6):602-608.(Yin Ming,Chen Jiabin,Chen Pei,et al. Study on the Heat-mass Transfer in Falling Film outside the Vertical Tube for Water Vapor Absorption into Aqueous Lithium Bromide[J]. JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING OF CHINESE UNIVERSITIES, 2002, 16(6):602-608.)

[27] 王美霞,刘存芳,周强泰.光管和斜槽管降膜吸收数学模型及实验研究[J]. 热能动力工程, 2003,18(5): 486-489.(Wang Meixia,Liu Cunfang, Zhou Taiqiang. Mathematical Model for and Experimental Study of the Falling Film Absorption of Bare Tubes and Skewed-slot Low-ribbed Tubes[J]. JOURNAL OF ENGINEERING FOR THERMAL ENERGY AND POWER, 2003, 18(5): 486-489.)

[28] 解国珍,盛国刚,李国栋,等.多管束水平降膜吸收模型在溴化锂吸收式制冷机中的应用[C]//中国制冷学会2007学术年会:713-717.

[29] 郎群英,申江,邹同华.表面活性剂对溴化锂吸收式制冷机吸收过程强化机理的研究概况[J]. 制冷与空调, 2003, 3(3): 20-24.(Lang Qunying, Shen Jiang, Zou Tonghua. THE STUDY REVIEW OF HEAT AND MASS TRANSFER MECHANISM ENHANCEMENT BY ADDITIVE IN ABSORPTION REFRIGERATION ABSORBER[J]. REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING, 2003, 3(3): 20-24.)

[30] 罗亮生,包雪松,王国英,译.数值分析(全美经典学习指导系列)[M].科学出版社, 2002.

通信作者简介

张强, 男(1986–), 研究生, 陕西理工学院(南区)陕西省工业自动化重点实验室，13484992192，E-mail: 95817009@qq.com。研究方向：太阳能空调的优化及仿真, 太阳能空调样机的试制等工作，并参与了太阳能空调系统的检测与控制系统的研发工作。

About the corresponding author

Zhang Qiang (1986–), male, M.E, Shaanxi industrial automation Key Laboratory, Shaanxi University of Technology, 13484992192, E-mail: 95817009@qq.com. Research fields: responsible for solar air conditioning research, optimization, simulation, manufacture, and research and development of detection and control systems for solar air conditioning.