

文章编号:1671-6833(2014)02-0088-05

垂直管外降膜的液膜流动特性研究

方书起¹, 武晓伟²

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 中国船舶重工集团公司 725 研究所, 河南 洛阳 471000)

摘 要: 液体在重力作用下沿换热管外呈膜状流动, 其成膜效果的好坏决定着换热管热质传递的优劣. 在实验的基础上得出布膜环隙的尺寸应该在 1.3~2.0 mm 之间. 对垂直管外降膜的液膜流动特性进行理论分析, 和不同浓度的溴化锂溶液的降膜实验进行了对比, 验证了理论分析的正确性. 最后利用实验数据回归得到了管外降膜时溴化锂溶液流量系数和雷诺数的关联式.

关键词: 管外降膜; 环隙; 液膜流动; 流量系数

中图分类号: TQ022.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.02.020

0 引言

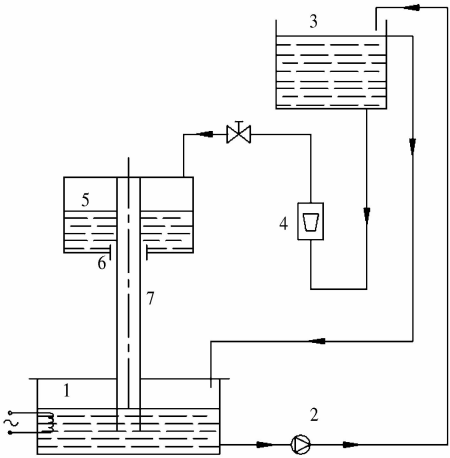
在石油、化工、电力、材料加工等工业领域通常存在着大量的低温余热, 在回收工业余热方面, 吸收式热泵机组有着环保和电耗低等诸多优势. 吸收式热泵机组中的关键组成部分—吸收器一般是管式结构的喷淋式热交换器, 将溶液喷淋到管子表面上, 进行传热传质^[1-2]. 吸收器中常采用浅水槽的淋激式喷淋方法, 目前使用较多的是靠布液腔内的溶液自身重力来喷淋. 它具有喷淋压力低、喷射角度小、结构简单、泵耗功率小等优点, 应用十分普遍^[3-4]. 这种液体在重力作用下以薄层形式沿垂直管壁向下流动叫垂直降膜流动, 热质传递的强弱取决于通过分布器实现喷淋的液体在管外分布的优劣, 而与液膜相接触的另一相多是气体, 这样的膜式两相流流动, 在工业中应用颇广, 如垂直冷凝器、填料塔、膜式气液反应器等^[5-8]. 了解液膜流动的特性, 对热质传递有重要的意义.

笔者就垂直管外降膜吸收器中溶液在重力作用下沿管壁作降膜流动的相关问题从理论和实验进行了研究, 如布膜中最重要参数的分配环间隙的选择, 液膜流动情形的理论推导, 不同浓度时的溴化锂溶液降膜实验和经验公式总结等为其工程应用提供一些理论指导.

1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 实验时恒温槽装有液

体工质, 液体工质的温度由恒温槽内的电加热装置来维持. 开启液体循环泵, 通过输送工质管路和溢流管路使高位槽中的液位保持恒定, 并维持在溢流口高度, 高度恒定后布液槽中的管件降膜视为稳态流动. 调节阀门开度, 使受液槽中的液位稳定在不同的高度. 液体通过分配环在实验管外表面呈薄膜状流下.



1—恒温槽; 2—溶液循环泵; 3—高位槽; 4—转子流量计; 5—受液槽; 6—分配环; 7—降膜管

图 1 实验流程

Fig. 1 Flow diagram of experimental

液体流量通过玻璃转子流量计来测量, 型号为 LZB10; 液体温度由数显温度仪表来测量, 型号为 TET-RB10; 液体比重由比重瓶法测定; 而受液槽中液位的高度由刻度标尺读取. 待系统运行

收稿日期:2013-11-20; 修订日期:2013-12-30

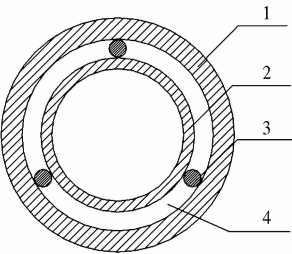
作者简介:方书起(1964-), 男, 山东冠县人, 郑州大学教授, 硕士, 主要研究方向为过程设备的强化, E-mail: fangsq@zzu.edu.cn.

稳定后,记录液体体积流率和受液槽中的静液柱高度.

2 实验及理论分析

2.1 布膜环隙的确定

布液板上的布膜装置如图 2 所示,分配环和降膜管件组成布膜环隙,分配环内壁上分布有 3 个等距的定位卡丝,来保证管件的居中性.为了保证合适的降液量和液膜厚度,必须寻找一个合适的环隙间距.



1—分配环;2—布膜管;3—居中卡丝;4—布膜环隙

图 2 布膜结构

Fig. 2 Falling film structure

实验选取的布膜管是 $\phi 25 \times 2$ mm 的普通无缝钢管和 4 种不同内径的分配环,其尺寸规格见表 1.

表 1 分配环尺寸规格

Tab. 1 Geometrical-parameters of allocation ring				
编号	1	2	3	4
内径/mm	26.0	26.3	26.5	27
环隙间距 C/mm	1.0	1.3	1.5	2.0

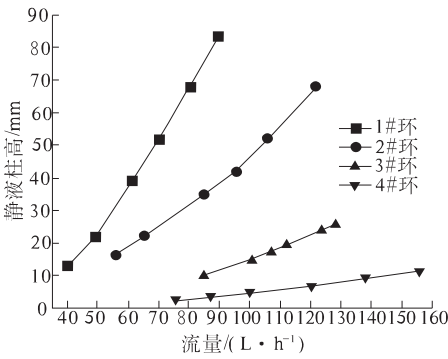


图 3 液体流量与静液柱高度的关系

Fig. 3 Relationship of liquid flow rate with height of static fluid column

对 4 种规格的分配环做喷淋实验,其中 H 是指受液槽中的液面高度,液体体积流量与受液槽中静液柱高度的关系曲线如图 3 所示.

可以看出当管子外径确定后,环隙间距微小的变化也会使液体流量发生显著的变化.分配环与实验管垂直同轴时,液体通过分配环和管件形成的环隙受到环内壁和管外壁的约束,以及壁面对液膜的阻滞作用.使液膜在下降时伴随着周向流动,分布变得均匀.实验时发现对于 2 号、3 号、4 号分配环,布膜环隙间距合适,液膜表面稳定,布膜情况良好;对于 1 号分配环,降膜时发现液膜不稳定,表面有干区存在.说明合适的环隙间距是 1.3 ~ 2.0 mm.

为了验证布膜环隙是否与布膜管直径有关系,另外选取直径为 20、30 mm 的布膜管件来进行喷淋实验,发现这两种管径的合适布膜环隙区间也是 1.3 ~ 2.0 mm.综合以上实验结果提出布膜管件的布膜环隙区间选择为 1.3 ~ 2.0 mm,此时液膜周向分布均匀,无偏流现象.环隙间距大于 2.0 mm 时,管外壁液体呈股状下降,不能均匀润湿管壁;小于 1.3 mm 时,降膜管外壁会有干壁现象.

2.2 理论分析和实验对比

液体垂直管外降膜的流动情况是液体在受液腔维持一定液位后,受重力向下流动,流动情形分为两个部分:一个是在布膜环隙段的流动,一个是在液体脱离环隙后在垂直管外壁的自由降膜流动.

液体在环隙中向下流动,受到环内壁和管外壁的双重约束,对于此种情形的液体层流流动的条件是雷诺数 $Re \leq 2\,000$.而实验中不同浓度的溴化锂溶液的雷诺数变化范围 300 ~ 1 600.因此可以作为层流流动来处理.图 4 为液体在环隙内的向下流动状态.

分配环进口的压力为 $P_0 + \Delta P$,出口压力为 P_0 ,其中 P_0 为大气压力, ΔP 为 $\rho g H$.在环隙内取微元体,列微元体的动量方程和牛顿切应力方程组合可以导出在环隙内的速度分布式

$$u_1 = \frac{\Delta P R_1^2}{4\mu B} \left[1 - \left(\frac{r}{R_1} \right)^2 + \frac{1 - k^2}{\ln(1/k)} \ln \left(\frac{R_1}{r} \right) \right], \tag{1}$$

对其积分得到平均速度

$$u_{m1} = \frac{1}{\pi R_1^2 (1 - k^2)} \int_{R_2}^{R_1} u \cdot 2\pi r dr = \frac{\rho g H R_1^2}{8B\mu} \left[1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 - \frac{1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2}{\ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)} \right]. \tag{2}$$

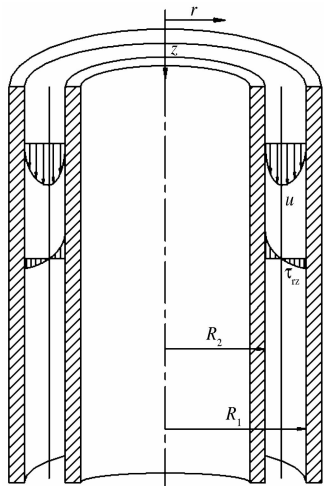


图 4 液体在环隙内的流动

Fig.4 Liquid film flow in annulus gap

薄层流体在重力作用下沿倾斜或垂直面运动时,在开始的一段时间内运动是加速的,速度沿流动方向发展着.经历这一段后,速度分布恒定,沿流动方向,流动特性不再变化.所以液体在降膜段可以看做滞留膜,处于平衡状态,在液膜内截取微元体.降膜流动状态如图 5 所示.

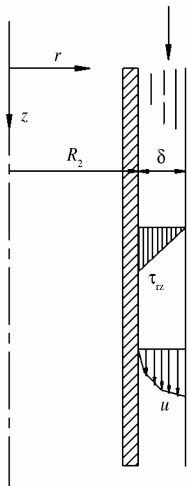


图 5 自由降膜段流动

Fig.5 The free falling film flow

液膜厚度 δ 远小于管的横向尺度,将流动视为充分发展的液膜表面与大气接触,压力 P 沿流动方向不变,解微元体的动量方程和牛顿切应力方程组合导出降膜段的速度分布式

$$u_2 = \frac{\rho g \delta^2}{2\mu} \left[2 \frac{r}{\delta} - \left(\frac{r}{\delta} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

对其积分得到平均速度

$$u_{m2} = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta u_2 dr = \frac{\rho g}{3\mu} \left(\frac{3\mu Q}{2\rho g \pi R_2} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (4)$$

由于液体不可压缩,液体流动在同一时刻体积流量相等

$$u_{m1} \pi (R_1 + R_2) (R_1 - R_2) = 2 u_{m2} \pi R_2 \delta. \quad (5)$$

最后得出液体的物性参数 ρ 、 μ 和体积流量 Q 的关系式:

$$\frac{3HR_1^2}{8B} \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^{\frac{2}{3}} \left[1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2 - \frac{1 - \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^2}{\ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)} \right] = \alpha \left(\frac{3Q}{2g\pi R_2} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

式中: $\alpha = \frac{\delta}{R_1 - R_2}$.

以水和不同浓度的溴化锂溶液作为实验工质,进行了降膜实验,测定了液体温度、密度、黏度和液体流率对静液柱高度的影响.图 6 显示了不同温度下,同一流量时水的液位变化情况.

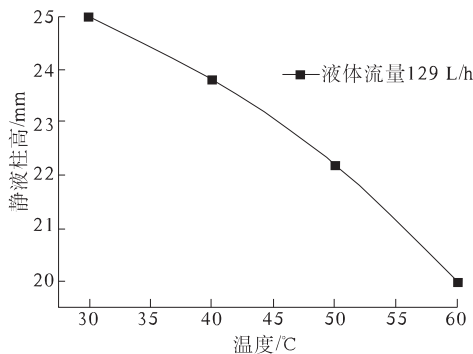


图 6 静液柱高度与温度的关系

Fig.6 Relationship of height of static fluid column with temperature

在相同的液体流量下,静液柱高度随温度升高而下降.这是由于温度升高,水的黏度减小,而密度几乎没有变化,从而液体通过布膜环隙时所受的阻力减小,用来克服阻力的液体静压能亦减小的缘故.从公式中可以看出,流量 Q 不变, ρ/μ 的比值增大,则静液柱高度 H 减小.图 7 显示的是浓度为 52% 的溴化锂溶液在不同温度时液体流量和液位高度的变化规律.

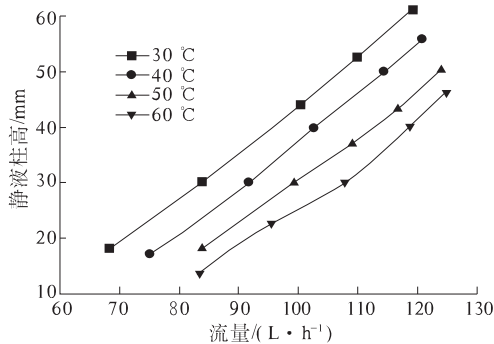


图 7 溴化锂溶液的流量与静液柱高度的关系

Fig.7 Relationship of lithium bromide solution liquid flow rate with height of static fluid column

可以得出同一物性条件下静液柱高度均随液体体流量的增加而增大,这是由于液体流率增加,通过液体分布器的阻力加大,从而要求克服阻力的静压能亦加大的缘故. 在同一液位高度 H 时,随着温度的升高,其所需的液体流量 Q 也逐渐增大. 同一浓度溴化锂溶液,温度升高时溶液密度和黏度的比值(ρ/μ)也增大,而 H 保持不变,所需的液体流量 Q 也逐渐增大,与实验数据相符. 浓度为 52% 的溴化锂溶液,在液位高度稳定为 30 mm 时,随着温度从 30、40、50、60 °C 依次增大,此时的液体流量分别为 83.8、91.9、99.2、107.7 L/h;而此时的 ρ/μ 分别为 453、543、640、743,将参数带入公式(6)得出理论计算的液体流量为 80.2、86.8、101.7、118.3 L/h. 对比实验值和理论值发现误差比较小,且随温度的变化趋势保持一致.

图 8 中显示的是温度为 30 °C 时的溴化锂溶液在不同浓度时的液体流量和液位高度的变化规律.

在温度恒定时,不同浓度的溴化锂溶液随着浓度的增大,其对应的 ρ/μ 值逐渐减小. 则可由公式知道在同一液位高度 H 时,随着浓度的增大,所需的液体流量逐渐减小,与实验结果相符.

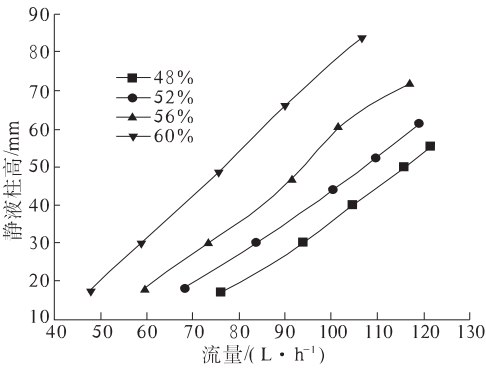


图 8 溴化锂溶液的流量与静液柱高度的关系
Fig.8 Relationship of lithium bromide solution liquid flow rate with height of static fluid column

2.3 物性对布膜的影响分析

对采用垂直管外降膜的吸收式热泵机组通入介质为溴化锂溶液进行喷淋实验. 找出此降膜形式下的流量系数和雷诺数之间关系式,来方便工程设计参考.

流量系数定义为

$$C_0 = \frac{V}{S \sqrt{2gH}}, \tag{7}$$

其中: $S = \pi(R_1^2 - R_2^2)$.

将流量系数与雷诺数,溴化锂溶液的温度,浓度进行关联,其中雷诺数为: $Re = \frac{d_e u \rho}{\mu}$.

运用 Matlab 软件进行多因素拟合得到流量系数的关系式:

$$C_0 = 1.1373^{(\frac{1}{10})} (6.7896 \times 10^{-7} Re - 6.8119 \times 10^{-8} Re^2 + \frac{0.51}{w} - \frac{0.1036}{w^2} - 0.4827) \tag{8}$$

公式(8)的适用范围是溴化锂溶液的温度为 30 ~ 120 °C,浓度为 48% ~ 62%. 可以发现同一浓度的溴化锂溶液在不同温度时,流量系数随温度的升高而增大;同一温度的溴化锂溶液在不同浓度时,流量系数随浓度的增加而减小.

3 结论

对垂直管外降膜吸收器中的液膜流动特性进行了理论实验研究,讨论了布膜环隙的尺寸,工质物性与液位高度、工质流量的关系等.

(1)分配环和实验管形成的布膜环隙的最佳间隙距为 1.3 ~ 2.0 mm.

(2)讨论了液体垂直管外降膜时的物性参数和静液柱高度、液体流量的关系式为

$$\frac{3HR_1^2}{8B} \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{\frac{2}{3}} \left[1 + \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - \frac{1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}\right] = \alpha \left(\frac{3Q}{2g\pi R_2}\right)^{\frac{2}{3}},$$

并验证实验的正确性.

(3)回归了此垂直管外降膜结构的流量系数和雷诺数的关联式,得出了同一浓度的溴化锂溶液在不同温度时,流量系数随温度的升高而增大;同一温度的溴化锂溶液在不同浓度时,流量系数随浓度的增加而减小.

符号说明:

- H — 静液柱高度, m Re — 雷诺数
- d_0 — 布膜管外直径, m R_1 — 分配环内半径, m
- C — 环隙间距, mm R_2 — 布膜管外半径, m
- u — 流体速度, $m \cdot s^{-1}$ B — 分配环高度, m
- δ — 液膜厚度, m μ — 液体的黏度, $Pa \cdot s$
- u_m — 流体平均速度, $m \cdot s^{-1}$
- ρ — 液体密度, $kg \cdot m^{-3}$
- Q — 液体体积流量, $m^3 \cdot s^{-1}$
- d_e — 当量直径, m

S —环隙横截面积, m^2 τ_{rz} —剪切应力, Pa

C_0 —流量系数 t —温度, $^{\circ}\text{C}$

W —质量浓度, %

k —分配环内径与降膜管内径比值

参考文献:

- [1] 尹铭, 陈嘉宾, 陈沛, 等. 垂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.
- [2] 孙建, 付林, 张世钢. 吸收式热泵中表面活性剂的强化机制研究[J]. 制冷与空调, 2010, 10(3): 16–19.
- [3] ZHANG Feng, WU You-ting, GENG Jiao. An investigation of falling liquid films on a vertical heated/cooled plate[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2008, 34(1): 13–28.
- [4] GOEL N, YOGI G D. Experimental verification of a new heat and mass transfer enhancement concept in a microchannel falling film absorber[J]. Journal of Heat Transfer, 2007, 129(2): 154–161.
- [5] LUO Chao, MA Wei-bin, GONG Yu-lie. Design of single vertical tube falling-film evaporation basing on experiment[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(5): 695–698.
- [6] 戴干策, 陈敏恒. 化工流体力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005, 221–224.
- [7] 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试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(1): 18–21.
- [8] SPIEGEL L. A new method to assess liquid distributor quality[J]. Chemical Engineering and Processing, 2006, 45(11): 1011–1017.

Research on the Flow Characteristics in Falling Film Outside the Vertical Tube for Liquid Film

FANG Shu-qi¹, WU Xiao-wei²

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Luoyang 725 Ship Material Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Luoyang 471000, China)

Abstract: The liquid appears as film flow when spray onto outside of heat exchanger tubes due to gravity. The condition of filming affects the heat and mass transfer of heat exchanger tubes significantly. The film annular gap size should be 1.3 ~ 2.0 mm based on the previous experimental research. The theoretical analysis was conducted on liquid film flow characteristics of the falling film outside the vertical tube, and a comparison was made between the analysis and the experimental research with the different concentration of lithium bromide solution is similar in present work. The relationship of the flow-rate coefficients is correlated in terms of the Reynolds number of lithium bromide solution in vertical tube falling films.

Key words: vertical tube falling film, annulus gap, film flow, flow-rate coefficient