

# 升膜蒸发器管内传热性能的实验研究

张琳\*, 刘瑞利, 许一帆, 胡泽训, 赵利群, 姜晓, 赵枫, 纪加超, 崔腾飞

(常州大学机械工程学院, 江苏常州 213016)

**摘要:**为了探究热流密度、真空度和流量对升膜蒸发器传热性能的影响,建立了升膜蒸发系统传热实验平台,实验所用升膜管管长2 800 mm,升膜管采用TP2紫铜管,工作介质为纯水,升膜管采用电加热方式加热;研究了热流密度( $4.20 \text{ kW/m}^2 \leq q \leq 16.81 \text{ kW/m}^2$ )、流量( $40 \text{ L/h} \leq M \leq 200 \text{ L/h}$ )和真空度( $20 \text{ kPa} \leq P \leq 40 \text{ kPa}$ )对升膜管传热特性的影响。结果表明,升膜管沿轴线方向内壁温度是先急速增大到最大值然后再逐渐减小。当热流密度为 $6.05 \text{ kW/m}^2$ ,流量为 $80 \text{ L/h}$ 时,相对应的管内换热系数最大。流量为 $40 \sim 80 \text{ L/h}$ 时,流量越大相对应的管内换热系数越大。真空度越大,升膜管的内壁温度越低。

**关键词:**升膜蒸发器;紫铜管;换热系数;热流密度

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)02-0148-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2016.02.038

## Experimental study of heat transfer and flow visualization in climbing film evaporation pipe

ZHANG Lin\*, LIU Rui-li, XU Yi-fan, HU Ze-xun, ZHAO Li-qun, JIANG Xiao,

ZHAO Feng, JI Jia-chao, CUI Teng-fei

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** In order to explore the effect of heat flux, vacuum degree and flow rate on the heat transfer of climbing film evaporator, the heat transfer experimental platform of climbing film evaporation system is established. The length of the climbing film pipe is 2800 mm. The climbing film pipe is TP2 copper tube. The working medium is water. Electric heating is employed in the climbing film evaporation pipe. The effect of heat flux ( $4.20 \text{ kW/m}^2 \leq q \leq 16.81 \text{ kW/m}^2$ ), flow rate ( $40 \text{ L/h} \leq M \leq 200 \text{ L/h}$ ) and vacuum degree ( $20 \text{ kPa} \leq P \leq 40 \text{ kPa}$ ) on fluid flow pattern and heat transfer of the climbing film pipe are studied. The results show that the inner wall temperature along axis direction of copper climbing film tube firstly increases rapidly to a maximum and then decreases gradually. When the heat flux density is  $6.05 \text{ kW/m}^2$  and flow rate is  $80 \text{ L/h}$ , the corresponding tube heat transfer coefficient is the largest. When the flow rate is  $40 \text{ L/h}$  to  $80 \text{ L/h}$ , a greater flow rate leads to a larger tube heat transfer coefficient. But higher vacuum degree results in a lower inner surface temperature of copper climbing film tube.

**Key words:** climbing film evaporator; copper tube; heat transfer coefficient; heat flux

升膜蒸发器在食品工业、制药工业和废水处理工业中应用非常普遍。具有换热系数高,蒸发强度大和接触时间短等特点,非常适用于热敏性和容易发泡料液的蒸发浓缩,但不适用于处理黏度大于 $0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、易结晶和结垢的溶液。对于料液的动力黏度低于 $0.05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 且蒸发量相对较大的蒸发浓缩过程,结构简单、紧凑和制造成本相对较低的升膜式蒸发器经常被企业所使用。

张琳等<sup>[1]</sup>对升膜蒸发器管内流型和传热特性开展了实验研究,结果发现,通过电加热的方式可以实现石英管内溶液的升膜蒸发,并能观测到泡状流、块状流、弹状流、柱塞流、环状流和雾状流。Yang等<sup>[2]</sup>对升膜蒸发器的传热性能进行了实验研究,认

为如果管内壁没有出现干斑,降低进料水高度有助于增大换热系数。当温差低于 $5^\circ\text{C}$ 时,所产生的蒸气不足以拖动液膜到管的顶部,会导致换热系数急剧减小。

Lecturer<sup>[3]</sup>通过不同的雷诺数、温差、溶液入口温度和再循环率对升膜蒸发器总换热系数的影响进行了实验研究。结果表明,雷诺数、溶液入口温度和再循环率越高,总换热系数也越高。薛惠芳<sup>[4]</sup>以蒸馏水为原料对升膜蒸发器内最理想的环状流进行了换热膜系数的回归分析,推导出传热膜系数的经验公式。

张林茂<sup>[5]</sup>通过增设预热器与提高稳定真空度等措施,提高了升膜蒸发器的传热性能。杨国忠

收稿日期:2015-07-09

基金项目:江苏省科技厅计划项目(BY2012102);江苏省环保厅科研课题(2012003)

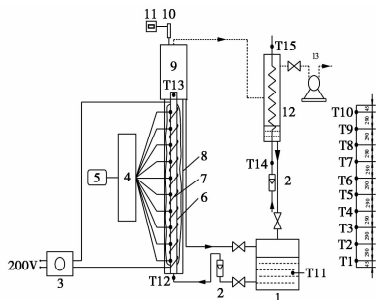
作者简介:张琳(1969-),博士,教授,研究方向为过程强化与节能环保装备技术、过程装备状态监测技术,通讯联系人,0519-81169812, z3281315@yeah.net。

等<sup>[6]</sup>通过实验的方法,将不同参数下对升膜蒸发器传热特性的影响进行了研究,认为真空度和温差等因素对升膜蒸发器传热特性有着显著的影响。Sait等<sup>[7]</sup>通过实验研究了薄膜轮廓、界面温度和薄膜平衡对热通量的影响,结果显示,由于热通量的增加,在平衡薄膜区域的膜厚有所减少。Demsy等<sup>[8]</sup>研究了表面上的薄液膜沸腾蒸发特性,认为壁面温度过高会导致液膜厚度与最大热通量显著提高。

本文中建立了升膜蒸发系统传热实验平台,实验研究了热流密度( $4.20 \text{ kW/m}^2 \leq q \leq 16.81 \text{ kW/m}^2$ )、流量( $40 \text{ L/h} \leq M \leq 200 \text{ L/h}$ )和真空度( $20 \text{ kPa} \leq P \leq 40 \text{ kPa}$ )对升膜蒸发器传热性能的影响,获得不同工况下的管内换热系数,为工业应用奠定基础。

## 1 实验装置与实验方法

升膜蒸发传热实验系统如图1所示。



1—原料水箱;2—玻璃转子流量计;3—隔离调压器;  
4—多路温度巡检仪;5—PC机;6—升膜管;7—电炉丝;  
8—保温层;9—气液分离器;10—压力变送器;  
11—智能数显仪;12—冷凝器;13—真空泵

图1 升膜管实验装置简图

升膜管尺寸为 $\phi 22 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ,长径比为135,升膜管的材质是TP2(磷脱氧铜)紫铜管,紫铜管外壁焊接有10组K型热电偶。

数据测量系统主要包括K型热电偶、真空压力传感器、玻璃转子流量计和隔离调压器,采集系统主要包括多路温度巡检仪、智能数显仪和PC机。K型热电偶测量精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ,真空压力传感器测量精度为 $\pm 0.1 \text{ kPa}$ ,玻璃转子流量计测量精度 $\pm 2.25 \text{ L/h}$ ,隔离调压器的测量精度为 $\pm 1 \text{ V}$ 。在5 min内,热流密度的变化小于 $\pm 10 \text{ W/m}^2$ ,溶液入口流量的变化小于 $\pm 4 \text{ L/h}$ ,真空度的变化小于 $\pm 0.5 \text{ kPa}$ 时,则认为升膜蒸发器达到了稳定工作状态,这时可以导出温度、压力与流量等实验数据,并进行数据处理和分析。

升膜管加热装置由隔离调压器、连接电线和电炉丝等组成,电炉丝的电阻为 $14 \Omega$ ,直径为 $1.2 \text{ mm}$ ,长度为 $13 \text{ m}$ ,电炉丝套有磁环并缠绕在紫铜管外壁。为防止漏电,紫铜管外壁还包有一层耐高温绝缘布。

对实验系统进行了保温处理,升膜管的保温效果直接影响到测量数据的准确性,因此对其进行了双层保温,厚度达 $55 \text{ mm}$ ,使其热损失尽可能地减小,由于保温层很厚,热损失可以忽略,实验误差主要来自测量误差。

升膜管加热侧热流密度可由以下公式计算:

$$Q_z = U^2/R \quad (1)$$

$$q = Q_z/\pi d_o L \quad (2)$$

式中, $Q_z$ 为升膜管加热侧的热流量,W; $U$ 为隔离调压器的输出电压,V; $R$ 为电炉丝的电阻, $\Omega$ ; $q$ 为升膜管加热侧热流密度, $\text{W/m}^2$ ; $d_o$ 为升膜管的外径,m。

升膜管管内换热系数可由下式计算:

$$h_i = Q/F_i \Delta t \quad (3)$$

式中, $h_i$ 为升膜管管内换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; $F_i$ 为升膜管传热内表面积, $\text{m}^2$ ; $\Delta t$ 为升膜管内壁温度与管内中心温度之差, $^\circ\text{C}$ 。

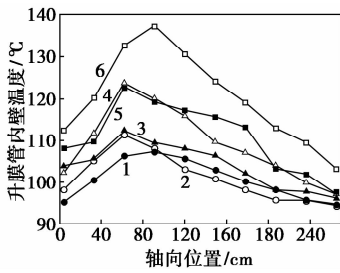
## 2 实验结果及分析

### 2.1 升膜管管壁轴向温度分布

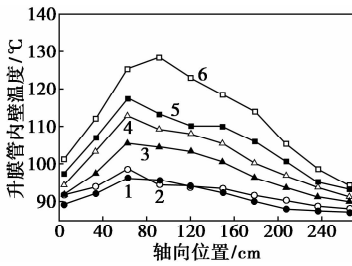
升膜管管壁轴向温度分布曲线如图2所示。

当热流密度增大时,升膜管内壁温度也跟着增大,随着真空度的增大,对应的升膜管内壁温度跟着降低,沿轴线方向升膜管内壁温度先急速增大到最大值然后再逐渐减小,这是因为热流密度的增大导致加给升膜管的热量也跟着增大,从而使管内壁温度也跟着增大,但是当升膜管内壁温度达到最大值时,管内料液被不断加热沸腾蒸发,使料液向上不断减少,产生的蒸气沿着管壁向上不断增大,越来越多的蒸气拖动料液呈膜状向上流动,液膜厚度不断减小,并且越往上管内的蒸气量越大,相应的蒸气速度也越快,传热速率越大,致使内壁的热量更容易传递到管子中心,从而使升膜管内壁温度降低。

并且真空度越大,对升膜管产生的压降越大,随着升膜管内压降的增大,使料液和蒸气的流动速率也跟着增大,从而增强了料液带走管子内壁热量的能力。



(a) 80 L/h, 20 kPa



(b) 80 L/h, 40 kPa

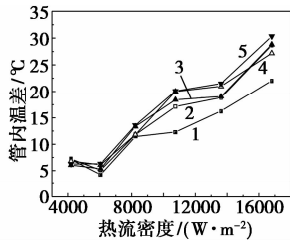
1—4. 20 kW/m<sup>2</sup>; 2—6. 05 kW/m<sup>2</sup>; 3—8. 24 kW/m<sup>2</sup>; 4—10. 76 kW/m<sup>2</sup>; 5—13. 61 kW/m<sup>2</sup>; 6—16. 81 kW/m<sup>2</sup>

图 2 升膜管管壁轴向温度分布曲线

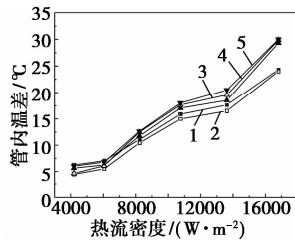
度,从而加速带走管内壁的热量,导致管内温差产生大幅度的变化。

不同热流密度下管内换热系数如图 4 所示。

升膜管中不同热流密度下的管内温差如图 3 所示。



(a) 20 kPa



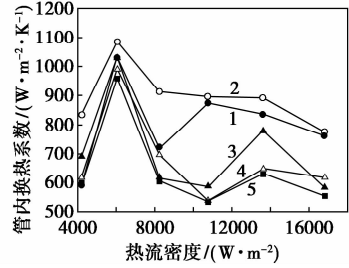
(b) 40 kPa

1—40 L/h; 2—80 L/h; 3—120 L/h; 4—160 L/h; 5—200 L/h

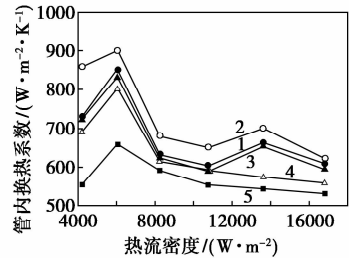
图 3 不同热流密度下的温差

当热流密度增大时,管内温差也跟着增大,流量越大相对应的温差也越大;当其他条件不变时,在 200 L/h 时相应的温差最大,而 80 L/h 时的温差相对最小。当热流密度大于 17. 36 kW/m<sup>2</sup> 时,相应的温差急速增大。这是由于热流密度的增大会使升膜管的热量增大,当热量没有被料液及时带走时,就会使温差急速增大。

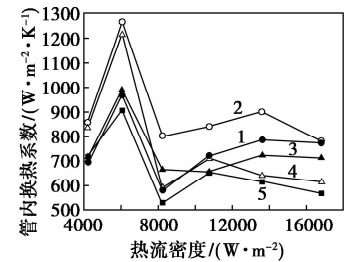
随着热流密度的增大,流量对温差的影响也越来越明显,这是由于热流密度越大,管子内壁温度就会越高,所需要带走的热量就会越大,管内产生的蒸气拖动料液的能力不足以带走足够的热量,从而使温差的变化更明显。而真空度越大,温差变化的幅度越大。这是由于大的真空度会加速管内料液的流动速



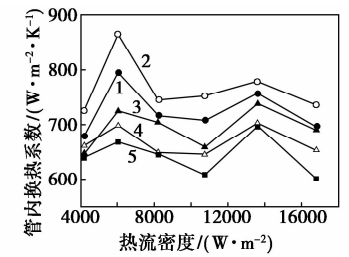
(a) 20 kPa



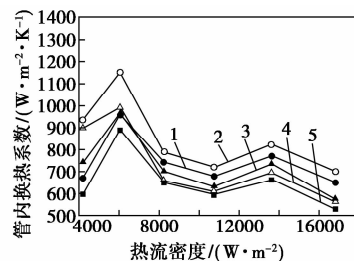
(b) 25 kPa



(c) 30 kPa



(d) 35 kPa



(e) 40 kPa

1—40 L/h; 2—80 L/h; 3—120 L/h; 4—160 L/h; 5—200 L/h

图 4 不同热流密度下管内换热系数

## 2.2 热流密度对管内换热系数的影响

如图4所示,当热流密度为 $6.05 \text{ kW/m}^2$ 时,相对应的管内换热系数最大,热流密度在 $4.20 \sim 6.05 \text{ kW/m}^2$ ,随着热流密度的增大,管内换热系数也随着增大,热流密度在 $6.05 \sim 13.61 \text{ kW/m}^2$ ,随着热流密度的增大,管内换热系数会出现一些震荡,总体趋势是先变小再逐渐变大,而当热流密度大于 $16.81 \text{ kW/m}^2$ 时,随着热流密度的增大管内换热系数急剧地减小。

这是由于当热流密度为 $6.05 \text{ kW/m}^2$ 时,产生的热量使管内壁和管子中心的温差达到一个最佳的动态平衡,加速了管内料液的蒸发和料液在管内的环状流动。而当热流密度继续增大时,相应的管内温差会跟着急剧增大,增大的热流密度可以少量弥补温差增大所造成的损失,管内换热系数会出现小幅度的震荡和增大,当热流密度大于 $16.81 \text{ kW/m}^2$ 时,增大的热流密度不足以弥补温差增大所造成的损失,管内换热系数会大幅度地减小。

## 2.3 流量对管内换热系数的影响

流量为 $40 \sim 80 \text{ L/h}$ 内,流量越大相对应的管内换热系数越大,在 $120 \sim 200 \text{ L/h}$ 内,流量越大相对应的管内换热系数越小,这是因为流量过小时,不能产生足够的蒸气拖动料液形成膜状流动,并且也没有足够的液体覆盖升膜管内壁,导致管内产生雾状流或干斑现象,从而恶化了传热。

随着流量的增大管内湍流度增大,从而产生大量的蒸气拖动液体呈膜状流动,随着流量的增大会出现一个最大值,达到动态的平衡,但是当流量继续增大时,由于进入管内的料液过大,无法有效地转化成蒸气,使管内液位不断升高,导致环状流长度不断减小且液膜的厚度不断增大,从而恶化了传热,导致换热系数减小。

## 2.4 真空度对管内换热系数的影响

热流密度为 $4.20 \sim 6.05 \text{ kW/m}^2$ 时,真空度的增大会导致管内换热系数的增大,但是随着热流密度的不断增大这种现象会逐渐消失。热流密度为 $6.05 \sim 16.81 \text{ kW/m}^2$ 时,随着真空度的增大管内换热系数并没有出现明显的增大现象。这是由于真空

度的增大造成管内压降的增大,从而使管内的流速也相应地增大,但是随着热流密度的提高,液膜厚度对换热系数影响的比重增加,从而抵消了真空度的提高,降低管内壁温度对换热系数的影响。真空度越大,流量对换热系数的影响越明显,图形变化的趋势越统一。

## 3 结论

(1)升膜管沿轴线方向上,内壁温度先急速增大到最大值然后再逐渐减小。

(2)当流量为 $80 \text{ L/h}$ ,热流密度为 $6.05 \text{ kW/m}^2$ 时,升膜管内换热系数将会达到最大值。实验中得到的最大管内换热系数为 $1266 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,当热流密度大于 $16.81 \text{ kW/m}^2$ 时,随着热流密度的增大管内换热系数逐渐地减小。流量为 $40 \sim 80 \text{ L/h}$ 时,流量越大相对应的管内换热系数越大,在 $120 \sim 200 \text{ L/h}$ ,流量越大相对应的管内换热系数越小。

(3)真空度越大,升膜管的内壁温度越低,料液的流量对管内换热系数的影响越明显。

## 参考文献

- [1] 张琳,崔腾飞,蒋枫,等.升膜蒸发器内流型可视化及传热性能[J].化工进展,2015,34(5):1259-1263.
- [2] Yang Luopeng, Chen Xue, Shen Shengqiang. Heat-transfer characteristics of climbing film evaporation in a vertical tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(6): 753-759.
- [3] Lecturer. Experimental investigation of heat transfer coefficient in vertical tube rising film evaporator[J]. Mehran University Research Journal of Engineering & Technology, 2011, 30(4): 539-548.
- [4] 薛惠芳.升膜蒸发器内的两相流传热研究—环状流的传热膜系数的相关[J].沈阳化工学院学报,1992,6(1):49-56.
- [5] 张林茂.管式升膜蒸发器在三聚氰胺生产中的应用[J].河南化工,2012,29(2):53-54.
- [6] 杨国忠,王如竹,夏再忠.强化管管外升膜蒸发换热特性实验[J].工程热物理学报,2007,28(2):280-282.
- [7] Sait H H, Ma H B. Analysis of single-effect evaporator desalination systems[J]. Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 2009, 13: 218-227.
- [8] Demsky S M, Ma H B. Thin film evaporation on a curved surface [J]. Microscale Thermophysical Engineering, 2004, 8: 285-299. ■