

DOI: 10.7652/xjtuxb201704018

多通道烘缸水平矩形管内冷凝换热特性及流型

严彦¹, 董继先¹, 高秀峰²

(1. 陕西科技大学机电工程学院, 710021, 西安; 2. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710048, 西安)

摘要: 为研究多通道烘缸内蒸汽的冷凝换热特性, 提高烘缸干燥效率, 降低造纸工业能耗, 采用可视化方法对多通道烘缸中的单边换热水平矩形管内蒸汽冷凝现象进行了观测实验。实验观察到了环状流、波状流、弹状流以及塞状流4种流型。实验结果表明: 当质量流率较小时, 小干度下流型主要为塞状流和弹状流, 随着干度的增大, 流型转变为波状流; 当质量流率较大时, 即使小干度下流型仍主要为波状流和环状流, 冷凝过程无塞状流和弹状流出现。经比较, Tandon 流型图可较好地预测实验观察到的流型。此外, 当质量流率较小 ($G < 35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 时, 换热系数受质量流率和干度影响较小; 随着质量流率增大, 换热系数受质量流率和干度的影响变大, 且随着质量流率和干度的增大而增大。最后, 将实验值与传统经验关联式计算值进行了对比, 发现 Cavallini 的关联式能较好地预测该实验结果。

关键词: 可视化; 流型; 冷凝; 换热; 多通道烘缸

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0116-06

Heat Transfer Characteristics of Condensation and Flow Regime in Horizontal Rectangle Channel of Multi-Channel Cylinder Dryer

YAN Yan¹, DONG Jixian¹, GAO Xiufeng²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, China)

Abstract: The phenomenon of steam condensation within a horizontal rectangle channel with one-side cooling in multi-channel cylinder dryer is experimentally studied to investigate the characteristics of steam condensing in the multi-channel cylinder dryer, to improve the efficiency and to reduce the energy consumption of paper industry. Experiments are conducted via the visualization method under the quality of 0.2-0.8 and mass flux of 20-50 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Four flow patterns, including annular, wave, slug and plug flows, are observed. The slug flow, plug flow and wave flow are observed at low mass flux, the wave flow and annular flow are observed at high mass flux with a low steam quality, while the slug and plug flows are not found during the entire condensation process. It is found that the observed flow patterns agree well with Tandon's flow pattern map. The effects of quality and mass flux on condensing heat transfer are analyzed. The experimental results show that the effect of low mass flux ($G < 35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) on condensing heat transfer coefficient can be ignored, and the condensing heat transfer coefficient increases obviously with increasing quality and high mass flux. Four kinds of correlations are employed to predict the coefficients of condensing heat transfer, and the result

收稿日期: 2016-08-28。 作者简介: 严彦(1988—), 女, 博士生; 董继先(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375286)。

网络出版时间: 2017-03-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170303.0925.004.html>

reveals that Cavallini's correlation agrees with the experimental results relatively well.

Keywords: visualization; flow regime; condensation; heat transfer; multi-channel cylinder dryer

减小热阻提高烘缸的干燥效率是降低造纸工业能耗的主要任务^[1-3]。在传统烘缸中,若蒸汽在烘缸内冷凝放热形成的冷凝水不能及时排出,则随着烘缸的高速旋转就会在内壁形成一层冷凝水环,极大地增加烘缸内蒸汽到烘缸内壁的热阻,因此研究人员采取了许多方法,例如采用虹吸管排水来减小冷凝水环的厚度^[2,4],或使用扰流板使冷凝水环产生湍动^[5]以此来降低热阻。尽管这些措施对提高换热效率有一定的作用,但是并没有取得突破性的进展。

Choi 等提出了一种多通道烘缸结构^[3],在烘缸内壁沿轴向加工了许多细小的矩形通道,蒸汽从通道中流过并冷凝,冷凝水被限制在通道内,由烘缸旋转产生的离心力及后续蒸汽压力推动排出,烘缸内不再积水,从根本上解决了传统烘缸的弊端。

矩形通道四周换热研究很多^[6-9],但对于单侧壁面冷凝换热研究较少,可见的只有 Choi 等公开的实验,结果表明冷凝换热系数与蒸汽质量流率及干度无关,基本为一常数。此结果与常规冷凝换热结果相差甚大,例如 Kosky 和 Staub 等研究了蒸汽在冷凝管内的凝结现象,结果显示冷凝换热系数随着干度的增大显著增大^[10];Boyko 和 Kruzhilin 等实验表明冷凝换热系数均随蒸汽质量流率的增大而增大^[11]。对于各种制冷剂的研究结果也显示,冷凝换热系数均随着质量流率和干度的变化而变化^[12-14]。

本文搭建了单侧换热的水平矩形通道实验装置,对蒸汽冷凝现象进行了实验研究,拍摄了冷凝流型,分析了蒸汽干度和质量流率对冷凝换热系数的影响,并将实验结果与 4 种已有实验关联式计算值进行了对比。

1 实验系统

如图 1 所示,实验装置共包括蒸汽回路、冷却剂回路及冷却水回路 3 个回路。通过变频隔膜泵将去离子水泵入电加热蒸汽发生器,隔膜泵流量由蒸汽回路出口的流量计控制。蒸汽发生器产生的饱和蒸汽经电加热器后进入实验段蒸汽通道,在其中被冷却剂通道中循环流动的冷却水冷凝。未冷凝的蒸汽和高温的冷凝水通过后冷器降温后再次返回水箱。蒸汽通道压力由调节阀手动控制。

去离子水流经实验段的冷却剂侧通道,带走蒸汽侧通道产生的冷凝热量。冷却剂侧管道上的氮气

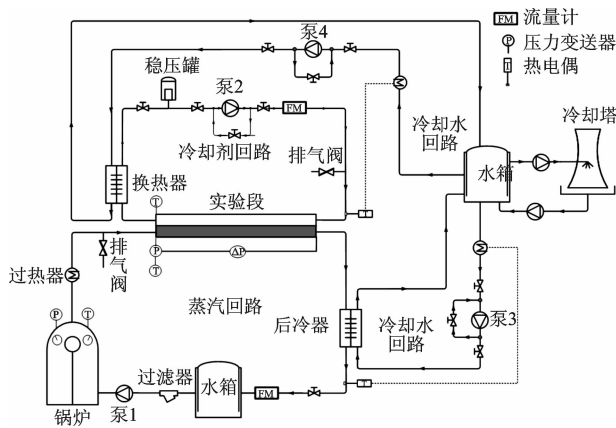


图 1 实验装置流程图

稳压罐可使管路压力始终维持在 0.5 MPa 左右,防止冷却剂在回路中产生局部气化。冷却剂进入实验段前的温度由流经热交换器的冷却水流量调节。

实验段主体为一矩形铝板,两侧分别刻有蒸汽通道和冷却剂通道。铝板一侧覆盖有耐高温的聚碳酸酯有机玻璃板以实现可视化,另一侧为不锈钢板。除可视通道拍摄范围外,所有板子外侧表面均紧密贴有两层厚度为 30 mm 的橡塑保温棉,热损失小于蒸汽释放总热量的 0.5%,可忽略不计。

蒸汽通道长、宽、高分别为 1 020、13.5、4.5 mm,冷却剂通道长、宽、高分别为 960、13.5、15.5 mm,蒸汽和冷却剂逆向流动,如图 2 所示。铝板上设置用于测量蒸汽的温度、压力、压差以及冷却剂沿程温度变化的测点。图 2 中 $C_0 \sim C_8$ 为冷却剂温度测点,其中 $C_1 \sim C_7$ 布置在实验段上,热电偶插入至冷却剂通道中心位置, C_8 和 C_0 分别布置在冷却剂通道的进出口管道上,而 $W_1 \sim W_6$ 为壁面温度测点。

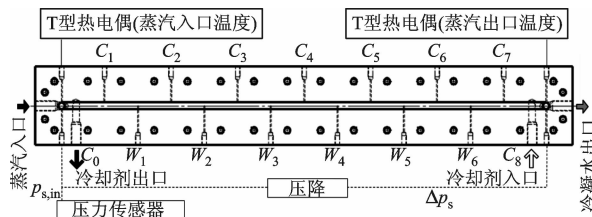


图 2 实验通道细节图

电加热蒸汽发生器的功率可通过调压器实现 0 ~ 12 kW 无极调节,温度由 T 型热电偶测量,压力传感器为 Omega PX409C,流量计为 Omega FTB1312、FLR1009 涡轮流量计,高速摄像机型号为 PCO. dimax S4。

2 误差分析及数据处理

2.1 误差分析

假设目标函数与被测物理量存在如下关系

$$N=f(x_1,x_2,x_3) \tag{1}$$

则目标函数的不确定度为

$$\frac{\delta_N}{N}=\left[\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_1}\right)^2\delta_{x_1}^2+\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_2}\right)^2\delta_{x_2}^2+\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_3}\right)^2\delta_{x_3}^2\right]^{1/2} \tag{2}$$

利用误差传递式(2),对换热系数可靠性进行了分析,结果见表 1,认为测试的换热系数是可靠的。

表 1 实验可靠性分析

参数	数值
冷却水侧温度测量误差/℃	±0.1
壁温处温度测量误差/℃	±0.1
冷却水流量测量精度/%	±1
蒸汽流量测量精度/%	±1
满量程的压力测量精度/%	0.1
冷却水换热量不确定度/%	4.12
冷凝换热系数不确定度/%	±5.3

2.2 局部冷凝换热系数

如图 2 所示,根据冷却剂温度测点将实验段分为 6 段,其中 $C_1\sim C_2$ 之间为第 1 段, $C_6\sim C_7$ 之间为第 6 段,每段均满足能量守恒关系,即

$$Q_{s,i}=Q_{c,i} \tag{3}$$

式中: $Q_{s,i}$ 为第 i 段蒸汽释放的热量; $Q_{c,i}$ 为第 i 段冷却剂吸收的热量。

蒸汽通道在第 i 段释放的热量为

$$Q_{s,i}=A_ih_i(t_{s,i}-t_{w,i}) \tag{4}$$

式中: h_i 为第 i 段冷凝换热系数; A_i 为第 i 段蒸汽通道换热面积; $t_{w,i}$ 为 W_i 测点测得的壁面温度; $t_{s,i}$ 为第 i 段蒸汽的温度,由于在实际测量中仅测量了蒸汽通道入口压力 $p_{s,in}$ 和进出口压差 Δp_s ,考虑到蒸汽通道沿程压降很小,故假设在实验段范围内蒸汽压力呈线性变化,故 $p_{s,i}$ 满足

$$p_{s,i}=p_{s,in}-L_i\Delta p/L \tag{5}$$

式中: L 为蒸汽通道长度; L_i 为蒸汽通道入口到第 i 段中心的距离。

冷却剂通道在第 i 段吸收的热量为

$$Q_{c,i}=c_p m_c(t_{c,i+1}-t_{c,i}) \tag{6}$$

式中: c_p 是冷却剂的比定压热容; m_c 是冷却剂的质量流量; $t_{c,i}$ 是 C_i 测点测得的冷却剂温度。

显然,只要知道蒸汽通道的压力和压差、冷却剂

通道和壁面各测点的温度就可以得到任意一段的局部冷凝换热系数。

调节电加热器功率,使入口蒸汽具有一定过热 度,其焓值 $i_{s,in}$ 可根据 $t_{s,in}$ 和 $p_{s,in}$ 计算得到。蒸汽通道第 1 段入口焓值,即图 2 中 C_1 截面蒸汽焓值为

$$i_{1,in}=i_{s,in}-c_p(t_{c,1}-t_{c,0}) \tag{7}$$

$$i_{i,in}=i_{i-1,in}+Q_{c,i}/m_s \tag{8}$$

根据该焓值可得到第 1 段蒸汽干度 $x_{1,in}$,然后根据式(8)可顺次得到第 i 段蒸汽干度 $x_{i,in}$ 。

3 实验结果及分析

各参数范围与冷却剂温度见表 2。

表 2 实验参数范围与冷却剂温度

实验参数	数值
$t_{s,in}/\text{℃}$	111~136
$p_{s,in}/\text{kPa}$	140~330
$x_{1,in}$	0.2~0.8
$G/\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	20~70
$t_c/\text{℃}$	25

3.1 实验流型分析

通道内蒸汽冷凝的流型,主要有环状流、波状流、弹状流和塞状流。当干度较小时,流型为塞状流或弹状流;随着干度增大,表面张力作用增强,气泡逐渐合并,液体向管壁聚集形成液膜覆盖在管壁上,受切应力影响气液分界面产生波动,流型发展为波状流;随着干度进一步增大,气液两相的速度差增大,切应力和表面张力都增强,使得液膜变得更薄、更光滑,此时流型变为环状流。随着蒸汽质量流率增大,切应力和表面张力的作用更强,使得流型在干度较小的情况下仍能维持波状流或环状流。

图 3 给出了当 $G=25,35,45\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,不同干度下的流型变化情况。由图 3 可以看出,当 $G=25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 且干度较小时的流型为塞状流和弹状流,随着干度的增大,流型变为波状流;当 $G=45\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 且干度较小时的流型仍为波状流和环状流。实验结果与理论分析基本吻合。

图 4 为本文实验结果与 Mandhane 流型图^[16]的对比。Mandhane 流型图以气相表面速度 j_g 为横坐标,液相表面速度 j_l 为纵坐标,在管径为 12.7~165.1 mm 的管子中,用 6 000 多个实验点绘制出来的。由图 4 可以看出,实验所测得环状流和波状流与 Mandhane 流型图较吻合,但是弹状流和塞状流不太吻合。这是由于绘制 Mandhane 流型图选用的

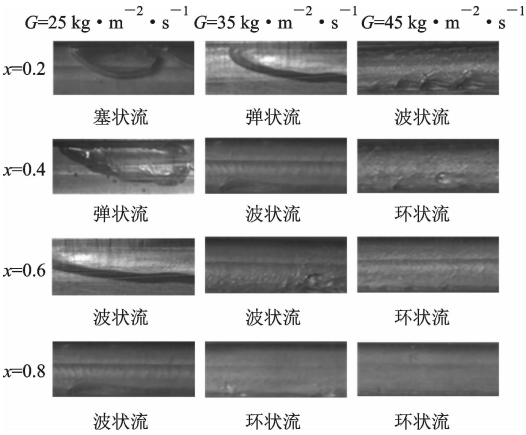


图 3 不同质量流率下单边换热水平矩形通道流型图

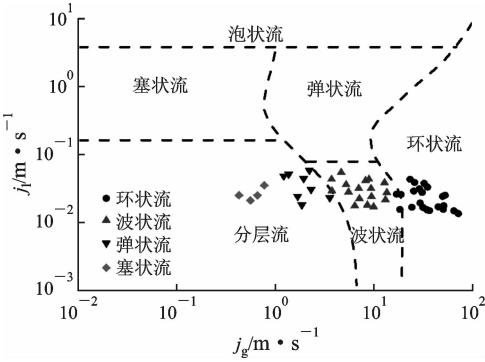


图 4 本文实验值与 Mandhane 流型图对比

实验管径远大于本次实验所使用的管径,所以本实验在液相速度较小时就会出现弹状流和塞状流。

图 5 为本文实验结果与 Tandon 流型图^[16]的对比。Tandon 流型图是以 $(1-\alpha)/\alpha$ 和气相表面速度为坐标,以管径为 4.8~15.9 mm 的水平管中的 600 多个实验点所绘制的。其中

$$\alpha = \{1 + [\rho_g(1-x)/(\rho_l x)]\{0.4 + 0.6\{[(\rho_l/\rho_g) + 0.4(1-x)/x]/[1 + 0.4(1-x)/x]\}^{1/2}\}\}^{-1} \quad (9)$$

式中: ρ_g 为饱和蒸汽的密度; ρ_l 为液体的密度。由图 5 可以看出,本文实验结果与 Tandon 流型图的吻合度较好。

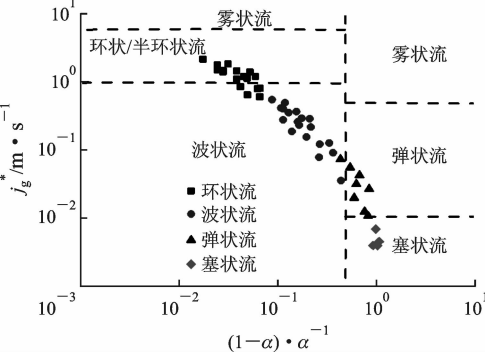


图 5 本文实验值与 Tandon 流型图的对比

3.2 蒸汽质量流率对换热系数的影响

图 6 给出了蒸汽流率对局部冷凝换热系数的影响。由图 6 可以看出:当质量流率较小时,换热系数 h 增加趋势较为平缓;当质量流率较大时,换热系数则随着质量流率的增大而急剧增加。由图 3 可以看出,当质量流率 G 较大时,管内流型为环状流,随着 G 的增大,蒸汽对液膜的剪切力越大,覆盖在通道内壁的冷凝液膜的湍流度增加,换热效果增强,这一趋势也与以往的研究结果相符^[16-17]。当 G 较小时,流型为波状流,由于重力作用冷凝液在通道底部聚集成液池,此时冷凝液的厚度成为通道换热主要热阻。在 G 较小的情况下,蒸汽对液膜的剪切能力有限,故在整个实验范围内液膜厚度变化较小,所以在 G 较小的范围内,换热系数虽有增加但趋势较为平缓。

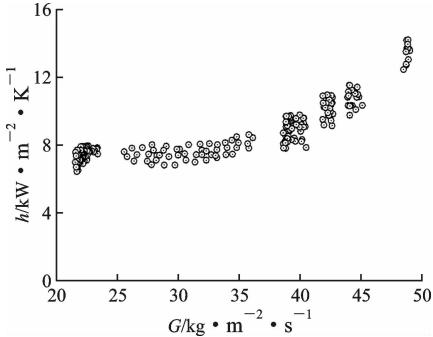


图 6 蒸汽质量流率 G 对局部冷凝换热系数的影响

3.3 蒸汽干度对换热系数的影响

图 7 给出了蒸汽干度对局部冷凝换热系数的影响。由图 7 可以看出,在整个干度范围内干度对换热系数有明显影响,随着干度的增大,换热系数增大。结合图 3 可以看出:在高干度区,两相流流型以环状流为主,凝结液沿通道内壁周向均匀分布;随着凝结过程的进行,蒸汽干度减小,流型变化为波状流,凝结液液膜增厚,使得换热热阻增加,换热系数减小。

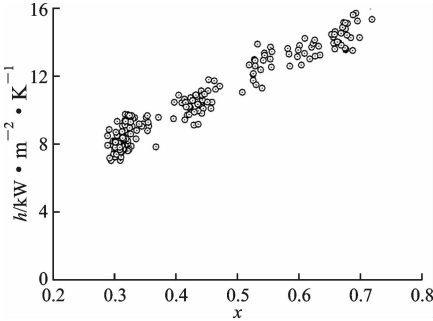


图 7 蒸汽干度对局部冷凝换热系数的影响

3.4 换热系数实验值与关联式计算值对比

现有文献大多数集中于冷却剂的关联式研究,

对于水蒸气冷凝,尤其是通道内蒸汽冷凝方面的关联式研究很少。本文选取了4个实验关联式,分别为文献[18-21]中 Shah、Dobson、Jung 和 Cavallini 等所提出的实验关联式。这4组实验关联式的建立均包含了对水的实验,所以本文选取关联式计算值与换热系数实验值进行比较有一定的依据。

图8为实验换热系数与应用 Shah 的实验关联式计算的换热系数的对比。文献[18]的关联式是基于环状流流型建立的。由图8可以看出,当实验流型处于环状流区域时,实验值与关联式预测值的误差较小,基本在20%以内,而在其他流型范围内,误差则较大,达到了40%,且主要集中在负偏差,说明该公式偏于保守。

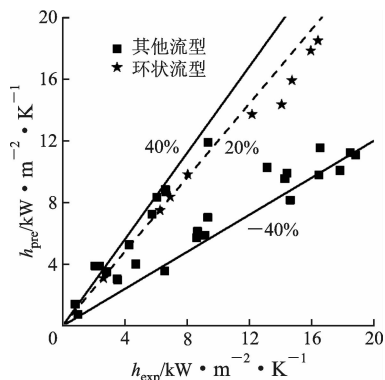


图8 换热系数的实验值与 Shah 关联式计算值的对比

图9和图10分别比较了换热系数的实验结果与 Dobson 和 Jung 关联式的计算结果。由图可以看出,实验值与 Dobson 的关联式的对比偏差为60%,而 Jung 因为对 Dobson 的关联式进行了优化,所以其与实验值的偏差范围比 Dobson 的偏差范围小,为40%。但是,因为这两个关联式的适用范围较广,没有一定的针对性,所以对于水蒸气冷凝来说预测值高于实验值。

换热系数的 Cavallini 关联式计算值与实验值

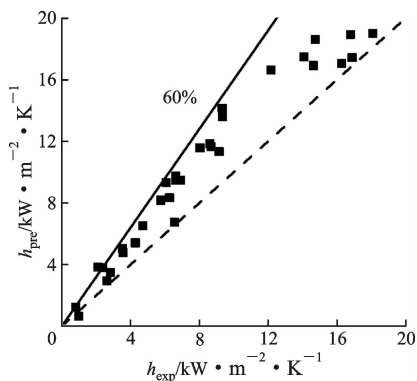


图9 换热系数的实验值与 Dobson 关联式计算值的对比

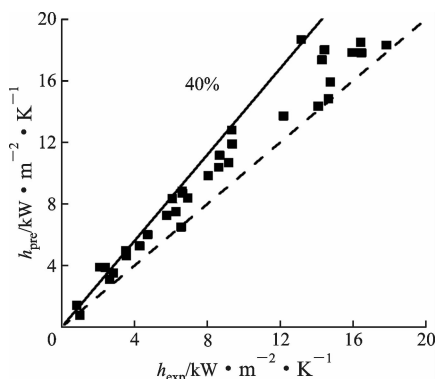


图10 换热系数的实验值与 Jung 关联式计算值的对比

比较如图11所示。Cavallini 给出了管径大于3 mm 的水平光滑管中冷凝的实验关联式,该关联式适用范围较广。由图11可以看出,实验值与关联式计算值的偏差在±20%内,且偏差正负分布较均匀,说明关联式准确度较好,能较好地模拟水平矩形管内冷凝换热系数。

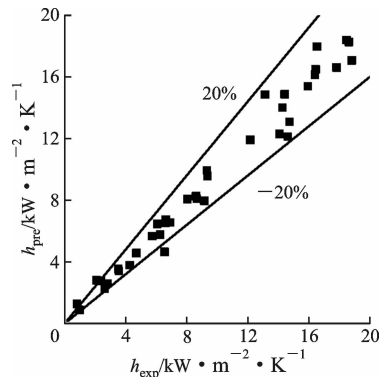


图11 换热系数的实验值与 Cavallini 关联式计算值的对比

4 结论

本文对蒸汽在水平矩形管内单面换热的蒸汽冷凝现象进行了实验研究,并将实验结果与现有实验关联式计算值进行了对比,得出以下结论。

(1)在多通道烘缸通道,即矩形单边换热通道内,观察到了环状流、波状流、弹状流及塞状流这4种流型;当干度较小时,流型为塞状流或弹状流,随着干度的增大,流型转变为波状流、环状流;当蒸汽质量流率较大时,流型在干度较小的时候也能维持波状流或环状流。

(2)将本次实验观察到的流型与 Mandhane 流型图和 Tandon 流型图进行了比较,发现实验流型与 Tandon 流型图较为吻合。

(3)较小的蒸汽质量流率($G < 35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)对换热系数几乎没有影响,当 G 较大时,换热系数受质量流率的影响变大。

(4)干度对换热系数的影响较直接,在整个干度范围内,随着干度的增大换热系数增大。

(5)对现在应用较广的 Shah、Dobson 和 Chato、Jung 和 Cavallini 等的实验关联式进行了评价,发现 Shah 的关联式偏差较大且偏于保守;Dobson、Chato、Jung 的关联式适用范围较广,没有一定的针对性,所以对本实验的模拟偏差较大,其预测值普遍高于实验值;Cavallini 的关联式预测值与实验值的偏差在 $\pm 20\%$ 内,且偏差的正负分布比较均匀。所以,建议选择 Cavallini 的关联式作为单边换热的水平矩形管内冷凝换热的计算关联式。

参考文献:

- [1] CHOI S U S, YU W, FRANCE D M. A novel multi-port cylinder dryer [J]. TAPPI Journal, 2001, 84(2): 1-15.
- [2] HALL D B, MONROE J F, TIMM G L. Application of stationary and rotary siphons [J]. TAPPI Journal, 1993, 76(8): 97-105.
- [3] WANG J C Y, QIU L J, WANG S F. Enhanced condensation inside a horizontal rotating drum-drier [J]. Drying Technology, 1990, 8(4): 829-843.
- [4] HALL D B, MONROE J F, TIMM G L. Application of stationary and rotary siphons [J]. TAPPI Journal, 1993, 76(8): 97-105.
- [5] APPEL D W, HONG S H. Optimizing heat-transfer using bars in dryers [J]. Paper Technology and Industry, 1975, 16(4): 264-269.
- [6] CHINNOV E A, RONSHIN F V, KABOV O A. Two-phase flow patterns in short horizontal rectangular microchannels [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 80(4): 57-68.
- [7] JEONG S S, MOO H K. An experimental study of flow condensation heat transfer inside circular and rectangular mini-channels [J]. Heat Transfer Engineering, 2005, 26(3): 36-44.
- [8] SONG Weiming, MENG Jian, ZHI Xin. Optimization of flue gas convective heat transfer with condensation in a rectangular channel [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(3): 263-268.
- [9] GUO Zhongyu, ANAND N K. Condensation of R-410A in a rectangular channel [J]. Hvac & R Research, 2000, 5(5): 97-122.
- [10] KOSKY P G, STAUB F W. Local condensing heat transfer coefficients in the annular flow regime [J]. Aiche Journal, 1971, 17(5): 1037-1043.
- [11] BOYKO L D, KRUSHILIN G N. Heat transfer and hydraulic resistance during condensation of steam in a horizontal tube and in a bundle of tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1967, 10(3): 361-373.
- [12] JUNG P K, YOUNG L K, DONGSOO J. Flow condensation heat transfer coefficients of R22, R410A and propane in aluminum multi-channel tube [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2005, 17(7): 628-635.
- [13] 杨英英, 李敏霞, 马一太. 水平光滑细管内 R32 冷凝换热的流型特性 [J]. 化工学报, 2014, 65(2): 445-452.
- [14] YANG Yingying, LI Minxia, MA Yitai. Characteristics of flow pattern for condensation heat transfer of R32 in horizontal small tube [J]. CIESC Journal, 2014, 65(2): 445-452.
- [15] SON C H, LEE H S. Condensation heat transfer characteristics of R-22, R-134a and R-410A in small diameter tubes [J]. Heat and Mass Transfer, 2009, 45(9): 1153-1166.
- [16] MANDHANE J M, GREGORY G A, AZIZ K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1974, 1(4): 537-553.
- [17] TANDON T N, VARMA H K, GUOTA C P. Prediction of flow patterns during condensation of binary mixtures in a horizontal tube [J]. Journal of Heat Transfer, 1985, 107(2): 424-430.
- [18] TANDON T N, VARMA H K, GUPTA C P. Heat transfer during forced convection condensing inside horizontal tube [J]. International Journal of Refrigeration, 1995, 18(3): 210-214.
- [19] SHAH M M. A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1979, 22(4): 547-556.
- [20] DOBSON M K, CHATO J C. Condensation in smooth horizontal tubes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1998, 120(1): 193-213.
- [21] JUNG D, SONG K H, CHOI Y. Flow condensation heat transfer coefficients of pure refrigerants [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(1): 4-11.
- [22] CAVALLINI A, DAVIDE D C, DORETTI L. Condensation in horizontal smooth tubes: a new heat transfer model for heat exchanger design [J]. Heat Transfer Engineering, 2006, 27(8): 31-38.

(编辑 武红江 荆树蓉)