

水平管内高沸点有机工质凝结换热的实验研究

杨冬, 李斌, 陈听宽

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 对水平管内高沸点有机工质(异丙苯)的凝结换热过程进行了实验研究, 获得了换热系数与摩擦压降沿凝结方向的变化情况. 随着凝结过程的进行, 压降逐渐增加, 而换热系数则不断降低. 实验过程中质量流速范围为 $104 \sim 375 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 出口干度范围为 $0.05 \sim 0.19$, 凝结饱和温度约为 195°C . 流型计算表明, 凝结过程中气液两相流型以环状流为主. 利用前人模型的计算结果表明, Haraguchi 等人的模型计算值与凝结压降测量值的平均误差为 -21.7% , Traviss 等人的模型计算值与换热系数测量值的误差在 -20% 以内.

关键词: 高沸点有机工质; 凝结; 换热系数; 摩擦压降

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2004)01-0010-05

Experimental Investigation on Condensation Heat Transfer and Pressure Drop of High Saturation Temperature Organic Fluid in a Horizontal Smooth Tube

Yang Dong, Li Bin, Chen Tingkuan

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: An experimental study of heat transfer and pressure drop during condensation of high saturation temperature organic fluid (cumene) in a horizontal smooth tube was conducted. The experiments were carried out at a saturation temperature about 195°C , mass velocities varying from 104 to $375 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and exit vapor quality between 0.05 and 0.19 . The experimental results indicate that the pressure drop increases with increasing vapor quality, and the heat transfer coefficient decreases with increasing vapor quality. The prediction indicates that the flow pattern of gas-liquid two-phase flow during condensation is mainly annular flow. The predictions from other two models obtained from the experiments with low saturation temperature fluids (refrigerants) show that the Haraguchi model predicts the experimental pressure drops with an average deviation of -21.7% , and the Traviss model predicts the experimental heat transfer coefficients within a deviation of -20% . The obtained results provide new data for the condensing database, and can be applied in the design of heat exchanger in petrochemical industry.

Key words: high saturation temperature organic fluid; condensation; heat transfer coefficient; pressure drop

水平管内凝结换热是一种广泛存在于石油炼制、化工、制冷与空调等工业过程和领域中的重要传热方式. 虽然目前关于凝结换热的研究文献很多, 但大多是关于特定流体在一定实验条件下的实验结果, 缺乏普遍应用意义. 在某些情况下, 不同研究者得到的凝结换热系数之间的差别高达 $2 \sim 3$ 倍.

Haraguchi 等人对 3 种制冷剂在水平光管内凝结换热与流动进行了实验研究^[1]. Kaushik 等人自身实验结果和他人数据分析的基础上, 得到了水平管内凝结压降关联式^[2]. Traviss 等人根据动量与热量传递比理论建立了环状流条件下的凝结换热模型^[3]. Moser 等人提出用一种称为当量 Reynolds 数

收稿日期: 2003-06-03. 作者简介: 杨冬(1967~), 男, 博士生; 陈听宽(联系人), 男, 教授, 博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助重大项目(59995460).

模型的方法来预测管内凝结换热系数^[4]。

目前关于水平管内凝结换热的研究大多数是针对空调、制冷领域中广泛应用的低沸点制冷剂,而对于石油、化工生产和工艺中常用的高沸点有机工质,如二甲苯、异丙苯、乙二醇等的实验数据,则非常少见。针对这些工质所具有的沸点高、气化潜热大、气液密度比较高等特点,本文建立了带有两级气液分离器的高沸点有机工质凝结换热实验台,对异丙苯蒸气在水平光管内的凝结换热与阻力特性进行了实验研究,并与其他研究者的预测模型进行了比较。

1 实验系统与方法

异丙苯是一种重要的有机化工原料,其压力为 0.1 MPa 时所对应的饱和温度约为 152 °C。另外,考虑到其气化潜热和气液密度差较大,不适宜采用低沸点制冷剂实验时常用的系统。为此,在实验段进口和出口各布置了一个体积约为 0.33 m³ 的气液分离器。由于它们具有较大热量蓄积和工质蓄积能力,因此能够缓冲工质气化时造成的流量和压力的大幅波动,以确保实验系统的安全和实验的顺利进行。

高沸点有机工质凝结换热实验台建于动力工程多相流国家重点实验室,其系统如图 1 所示,包括实验工质循环回路和冷却水循环回路两个部分。储箱中的异丙苯经过预热段后,被加热为气液两相混合物。该混合物随后切向进入一级分离器。经过离心和重力分离后,饱和液体由底部流出,被冷却后返回储箱;饱和气体被加热为微过热蒸气后进入实验段管侧。蒸气由于受到壳侧低温水的冷却而产生凝结,至

出口时成为有一定干度的气液两相混合物,并切向进入二级分离器。经分离后的饱和液体与饱和气体被冷却后分别回到储箱。工质循环回路用玻璃纤维包敷以进行良好绝热。

实验段为水平双套管式换热器,内管为 $\varnothing 19 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的碳钢管,外管是内径为 55 mm 的镀锌管。工质在内管中流动,冷却水在内管与外管之间的环形空间内流动,二者流动方向相反。实验段分为 4 个子段,每一子段的有效换热长度为 400 mm,实验段总长度为 1 750 mm。将每个子段按长度平均划分出 2 个截面,在每个截面的顶部、侧面、底部分别焊有 NiCr-NiSi 热电偶共 6 对,以测量壁温。工质和冷却水的流量由孔板测量,实验段每一子段中的压降由 Honeywell 差压变送器测量。流经两个分离器的饱和液体流量由液位计和秒表测量。本实验中热电偶与差压变送器所产生的电信号全部接入由工业控制计算机和 Solartron IMP3595 数据采集板共同组成的数据采集系统。

实验开始时,工质循环回路处于室温状态,因此如何在两个分离器中建立起稳定的液位就成为实验的关键。为此,首先关闭两个分离器的底部阀门,然后启动预热段的电加热系统,使气液两相混合物进入分离器。由于气液密度差的作用,气体逐渐汇聚在分离器的上部空间,液体则沉积在下部。当在液位计中观察到分离器已建立起稳定的液位后,即可打开两个底部阀门,调节预定的实验工况。

实验过程中异丙苯的质量流速范围为 104 ~ 375 kg/(m²·s),出口干度范围为 0.05 ~ 0.19,实验压力约为 0.27 MPa。

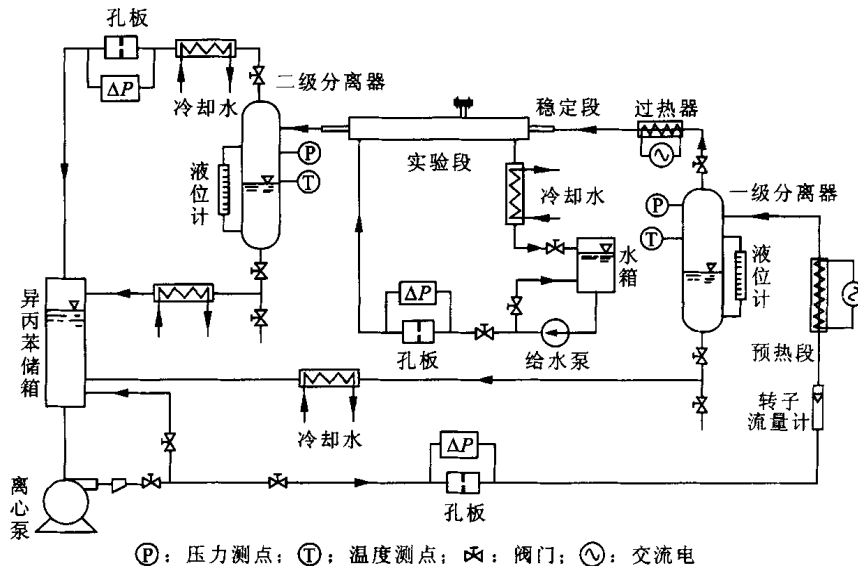


图 1 高沸点工质凝结换热实验系统

2 实验数据处理

由于系统中布置有分离器,因此为了保证实验结果的可靠性,对每一个实验工况,不仅要保证热量平衡误差在规定的范围内,而且还必须保证物料平衡满足相应的误差要求.热量平衡误差指实验段工质放热量与冷却水吸热量之间的相对误差,物料平衡误差指离心泵出口异丙苯流量与一级分离器出口液相、二级分离器出口气相和液相三者流量之和的误差.实验结果表明,对大多数实验工况来说,实验段热量平衡误差在 $\pm 5\%$ 以内,系统物料平衡误差在 $\pm 7\%$ 以内.

根据气液两相流动量方程,可得水平管内的压力梯度为

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right) = -\left(\frac{dP}{dz}\right)_f - \left(\frac{dP}{dz}\right)_a \quad (1)$$

式中: $-\left(dP/dz\right)_f$ 为摩擦压降梯度; $-\left(dP/dz\right)_a$ 为加速压降梯度.

$-\left(dP/dz\right)_a$ 可按下式计算

$$-\left(\frac{dP}{dz}\right)_a = G^2 \frac{d}{dz} \left\{ \frac{x^2}{v} + \frac{(1-x)^2}{1(1-x)} \right\} \quad (2)$$

式中: G 为质量流速; v 、 1 分别为气相、液相密度; 为截面含气率,按 Smith 公式^[5]计算.

每一个子段中凝结换热系数需根据该子段上的热流密度和工质温度与内壁温度差确定

$$h = \frac{q_n}{T_s - T_{iw}} \quad (3)$$

式中: q_n 为子段中的换热热流密度,根据冷却水吸热量与换热面积确定; T_s 为饱和温度; T_{iw} 为内壁温度,由外壁平均温度的测量值通过一维圆筒壁导热方程计算.

3 实验结果与分析

Tandon 等人在其他研究者的实验数据基础上,提出了水平管内凝结流动的流型图及转换预测准则^[6].图2为根据其流型图得到的4个质量流速下的实验管内异丙苯蒸气凝结流动流型,图中纵坐标为 Froude 数 ($Fr = Gx / (\nu(1-x)d_i g)^{1/2}$).可以看出,凝结流动过程中的流型主要有环状流、波状流与雾状流.质量流速较高时,高干度区域的流型以雾状流为主,随着凝结过程的进行,流动逐渐进入环状流与半环状流区域.此时,流动受切应力控制,重力影响可以忽略,而蒸气凝结所放出的潜热以强制对流方式传给壳侧的冷却水.对于质量流速较低的工

况,凝结初始段流型为环状流与半环状流,随着凝结过程的进行,流型可能转变为波状流.

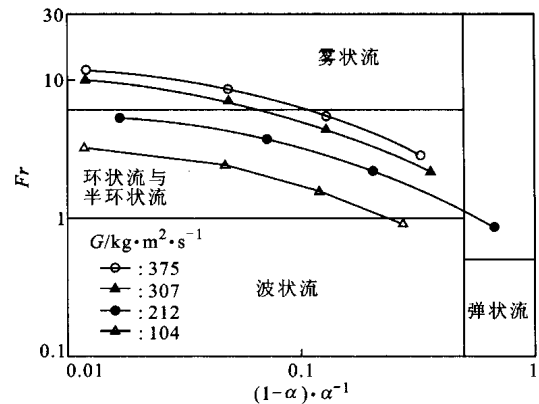


图2 异丙苯蒸气凝结流型图

图3示出了 G 分别为 285、328、375 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时实验获得的压降沿流动方向的变化情况.图中纵坐标为测点处工质压力 P 与进口压力 P_1 之差.可以看出,随着凝结过程的进行,压降是逐渐增加的,并且在相同的干度下,压降随着质量流速的增大而增大.

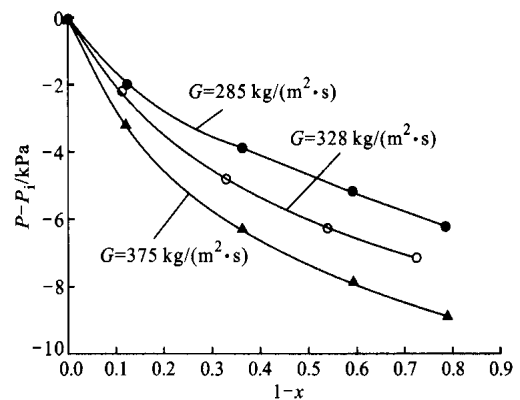


图3 压降实验值沿流动方向的变化

图4示出了实验测得的3个质量流速下的凝结换热系数沿凝结方向的变化情况.可以看出,对同一个质量流速的工况来说,随着干度的降低,凝结换热系数是逐步降低的.其原因在于随着凝结过程的进行,凝结液流量和液膜厚度逐渐增加,导致液膜内温降增大,从而使换热系数下降.实验结果还表明,在相同的干度下,凝结换热系数则随着质量流速的增大而增大,这是因为凝结过程中流型以环状流为主,其换热机理为强制对流,而液膜的对流换热系数与流速成正比.

图5示出了水平光滑管内异丙苯蒸气凝结流动

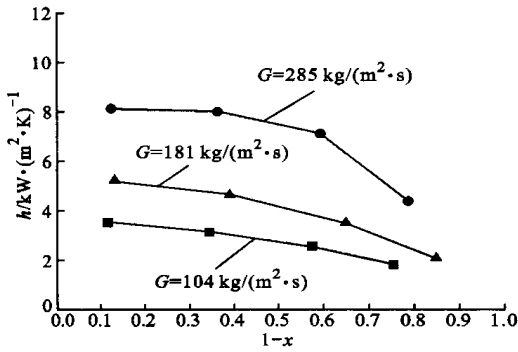


图 4 凝结换热系数沿流动方向的变化

的摩擦压降计算值与测量值的比值 R_p 沿凝结方向的变化。Haraguchi 等人模型的计算值均小于实验值,约有一半工况的计算值与测量值误差在 -20% ~ 0 之间,其余的误差在 -20% 以下,计算值与测量值的平均误差为 -21.7% 。可以看出,Haraguchi 等人的模型具有一定的精度。Kahushik 等人的模型则严重低估了实验结果,所有工况的计算值与测量值之间的误差都大于 -20% ,二者的平均误差为 -46.2% 。Kahushik 等人的计算式中只包含参数 X_{tt} ,与 Fr 无关。图 2 表明, Fr 与流型密切相关,而流型对凝结流动阻力有着重要的影响。另外, Kahushik 等人的模型是根据绝热条件下的空气-水实验结果得到的,这两个因素使得该模型在预测异丙苯蒸气凝结阻力时产生了较大的误差。Haraguchi 等人的模型是根据制冷剂 HCHC22、HFC134a、HCFC123 的实验数据拟合的,而且反映了流型的影响,因此有较好的精度。

图 6 示出了 G 分别为 104、181、285 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时根据 Traviss 等人模型、Moser 等人模型得到的凝结换热系数的计算值与测量值之比 R_h 沿凝结方向的变化情况。Traviss 等人的模型低估了异丙苯蒸气在水平光管内的凝结换热,几乎所有工况的计算

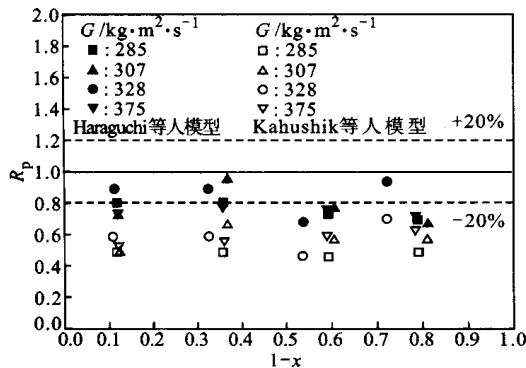


图 5 摩擦压降实验值与计算值的比较

值都比测量值小,但二者误差都在 -20% 以内。Moser 等人的当量 Reynolds 数模型严重高估了异丙苯蒸气的凝结换热系数,所有工况的计算值与测量值误差都超过了 20% ,二者误差范围为 30% ~ 60% 。其原因可能在于该模型使用由不同研究者实验数据拟合的关联式来计算当量 Reynolds 数。Traviss 等人的模型是以环状流为研究对象,根据热量-动量传递比拟理论经严格推导得到的,它准确把握了凝结换热机理,因此将异丙苯物性参数带入该模型计算式后,能够较好地预测凝结换热系数。Moser 等人的模型中应用了根据绝热实验数据得到的 Friedel 气液两相摩擦压降计算式,由此带来了较大误差^[7]。

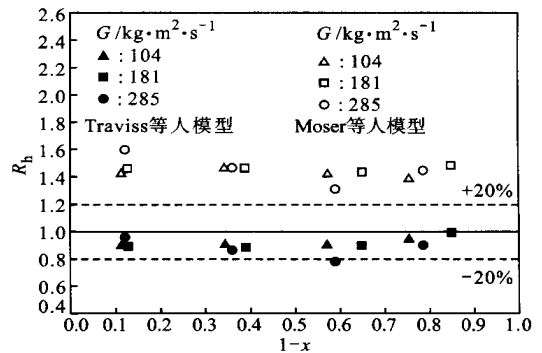


图 6 凝结换热系数实验值与计算值的比较

4 结 论

(1) 建立了带有二级分离器系统的高沸点有机工质凝结换热实验台,获得了水平管内异丙苯蒸气凝结换热系数与摩擦压降的实验数据。流型计算表明,异丙苯蒸气凝结过程气液两相流型以环状流为主。

(2) 实验结果表明,随着凝结过程的进行,压降是逐渐增加的,并且在相同的干度下,压降随着质量流速的增大而增大。对同一个质量流速下的工况来说,凝结换热系数随着干度的降低而减小。在相同的干度下,凝结换热系数则随着质量流速的增大而增大。

(3) Haraguchi 等人的模型在预测异丙苯蒸气凝结的摩擦压降时,其计算值与测量值的平均误差为 -21.7% 。Traviss 等人的模型所计算出的换热系数比实验结果低,但二者误差在 -20% 以内。

参考文献:

[1] Haraguchi H, Koyama S, Fujii T. Condensation of re-

- frigerants HCFC22, HFC134a and HCFC123 in a horizontal smooth tube [J]. *Trans JSME*, 1994, 60 (574): 2 111 ~ 2 116.
- [2] Kaushik N, Azer N Z. A general pressure drop correlation for condensation inside internally finned tubes [J]. *ASHRAE Trans*, 1990, 96(2): 242 ~ 248.
- [3] Traviss D P, Rohsenow W M, Baron A B. Forced convective condensation in tubes: a heat transfer correlation for condenser design [J]. *ASHRAE Trans*, 1973, 79 (1): 157 ~ 165.
- [4] Moser K W, Webb R L, Na B. A new equivalent Reynolds number model for condensation in smooth tubes [J]. *ASME J Heat Transfer*, 1998, 120(2): 410 ~ 417.
- [5] 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热[M]. 西安:西安交通大学出版社,1987.
- [6] Tandon T N, Varma H K, Gupta C P. A new flow regimes map for condensation inside horizontal tubes [J]. *ASME J Heat Transfer*, 1982, 104(4): 763 ~ 768.
- [7] 杨冬,毕勤成,李斌,等. 水平管内高沸点工质凝结换热的当量 Reynolds 数模型[A]. 中国工程热物理学会多相流年会,昆明,2003.

(编辑 荆树蓉)

智能维护国际学术会议在西安交通大学召开

2003年10月29日至11月1日,智能维护国际学术会议 IMS2003 在西安交通大学南洋大酒店召开,本次会议由西安交通大学、美国威斯康星大学、美国密西根大学、国防科技大学、武汉理工大学、上海交通大学和清华大学共同主办,西安交通大学承办,得到了中国自然科学基金委的支持.大会共收到来自世界各地的学术论文174篇.与会人员有来自中国、美国、英国、德国、法国、日本、加拿大、澳大利亚、韩国等国家和地区的150余名著名专家和学者,有10名世界著名专家在大会上做主题报告.本次会议的主题旨在推广IMS的理念,促进维护技术的科学化、信息化和智能化,为学术界和工业界的学者和技术人员共享正在涌现的新技术和新观点提供场所和机会,以提高我国设备维护技术的水平.

本次会议的召开,对智能化诊断和维护,无疑会起到推动和促进作用.未来的制造企业必须能够在全世界范围内提供产品的全生命周期服务支持,这使得制造理论与技术都要做相应的改变和发展.人们常说的信息,其中有一类就是关于产品各种特征随时间变化的信息.过去,产品的性能是以出厂时检测合格为目标,而现在则需要控制产品在整个生命周期中性能的变化和衰退.在今天充满挑战和竞争的市场环境下,智能维护正在成为企业在全世界竞争中取胜的关键因素之一,是实现少维护、免维护和状态维护、降低企业成本、提高竞争力的重要途径.智能维护系统已经被美国《财富》杂志列为未来新产品创新的三大技术之一,在国际上得到了高度重视.

西安交通大学润滑理论及轴承研究所