

文章编号:0253-4339(2015)01-0097-04

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.01.097

蒸发温度对强化换热管管外核态池沸腾换热性能的影响

欧阳新萍 包琳琳 邱雪松

(上海理工大学制冷与低温工程研究所 上海 200093)

摘要 对 R134a 在水平强化管($\Phi 25$ mm)外核态池沸腾进行了实验研究。通过 Wilson 图解法求得管内换热准则关系式,通过改变蒸发温度($5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$)和热流密度($4\sim 55\text{ kW/m}^2$),得到了管外沸腾换热系数随热流密度和蒸发温度变化的规律。实验表明,管外沸腾换热系数随着热流密度和蒸发温度的升高而增加。结合实验数据,提出了一个新的管外池沸腾换热关联式,该关联式与实验数据点的偏差显示,95%的数据点的相对误差在 $\pm 20\%$ 以内。

关键词 关联式;威尔逊图解法;强化管;核态池沸腾

中图分类号:TB657.5;TB61⁺1

文献标识码:A

Effects of Evaporation Temperature on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Characteristics outside the Enhanced Tube

Ouyang Xinping Bao Linlin Qiu Xuesong

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract Nucleate pool boiling outside the horizontal enhanced tube ($\Phi 25$ mm) with the refrigerant R134a was experimentally investigated. The inner heat transfer correlation has been obtained by using Wilson graphic method. Experiments were performed at evaporation temperatures of $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$, heat fluxes from 4 kW/m^2 to 55 kW/m^2 . Experimental results show that the pool boiling heat transfer coefficient outside the tube increases with the increase of heat flux and evaporation temperature. A new heat transfer correlation of pool boiling has been put forward. By comparison with test data, the relative deviation of 95% of the correlation value is within $\pm 20\%$.

Keywords correlation; Wilson graphic method; enhanced tube; nucleate pool boiling

核态池沸腾是对流传热现象中影响因素最多、最复杂的传热过程。在制冷、化工等行业有广泛的应用。但是,实验关联式与所依据的实验数据间的离散度以及不同关联式间的分歧仍然很严重^[1]。多年来,很多学者对核态池沸腾传热进行了大量的实验和理论研究。

蒸发温度是水平强化管外核态池沸腾换热性能影响因素之一,李芳明等^[2]讨论了沸腾换热系数随不同蒸发压力(蒸发温度)的变化,结果表明蒸发压力升高时,沸腾换热系数有所增加,给出了强化管外沸腾换热系数关联式。Sun Zhaohu 等^[3]也研究了蒸发温度对换热性能的影响,认为蒸发压力(蒸发温度)对池沸腾换热的影响可以看作对制冷剂物性的影响。HFC134a, HC290, HC600a 三种制冷剂的沸腾换热系数均随蒸发压力增大而增大, HFC134a, HC290 在低热流密度时蒸发压力对换热影响很小,

随着热流密度增大,蒸发压力对换热系数影响逐渐增大。闫秋辉等^[4]研究了蒸发压力、热流密度对管外沸腾换热系数的影响,得出了蒸发压力、热流密度对管外沸腾换热系数影响的综合实验关联式。刘文毅等^[5]也得到了相似的结论。A Sathyabhama 等^[6]认为随着蒸发压力升高,沸腾换热系数增加;Gherhardt Ribatski 等^[7]则认为蒸发压力对沸腾换热系数的影响可以忽略。

本文针对 R134a 在水平强化管外核态池沸腾的换热特性进行了实验研究,得到了水平强化管外沸腾换热系数和蒸发压力(蒸发温度)之间的关系,并结合实验数据,提出了一个新的管外池沸腾换热关联式,该关联式和实验数据吻合良好。

1 实验设备及方法

本课题研究的蒸发温度会低于零度,所以管内加

热流体采用体积浓度为 30% 乙二醇水溶液。辅助用冷凝管管内采用体积浓度为 45% 的乙二醇水溶液作为冷却介质。

实验系统主要包括:乙二醇水溶液循环回路和制

冷剂 R134a 循环回路。实验系统图如图 1 所示。实验系统包含 2 个连通的蒸发桶和冷凝桶。被测试的蒸发管安放在蒸发桶内,两根串联;实验辅助用冷凝管安放在冷凝桶内,4 根串联。

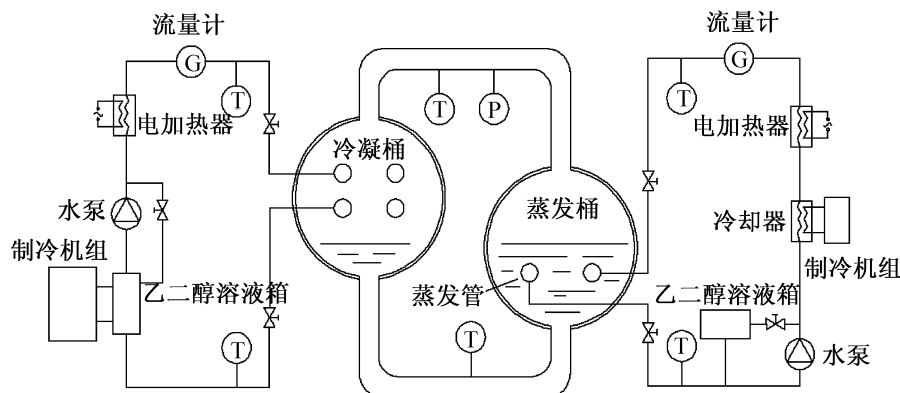


图 1 实验系统图

Fig. 1 Experimental system

实验所用测试管管长为 1.55 m,管径为 25 mm,两根串联,换热面积 0.243 m²。管外为制冷剂 R134a 的沸腾换热,管内为 30% 浓度的乙二醇水溶液的对流换热。管子的微观表面结构如图 2 所示。

本实验采用的蒸发温度分别为:5.6 °C, 0 °C, -2 °C, -4 °C, -6 °C, -8 °C。同时,在每一个蒸发温度下,管内乙二醇水溶液的进口温度也不相同,主要在 12 °C 到 -6 °C 之间。实验的管内流速分别为:1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s, 2.5 m/s, 3.0 m/s。

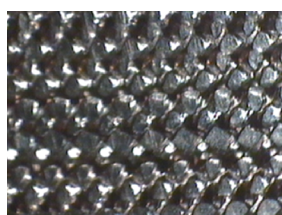


图 2 管外微观表面结构

Fig. 2 Surface microstructure

2 数据处理方法

2.1 换热量计算

通过测量蒸发、冷凝管管内乙二醇水溶液的进出口温度和体积流量,可以计算出蒸发管内乙二醇水溶液的放热量 Q_1 和冷凝管内乙二醇水溶液的吸热量 Q_2 ,两者的相对误差小于 5% 为合格的实验工况点。将 Q_1 和 Q_2 的平均值作为蒸发换热量 Q 的值,即:

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (1)$$

2.2 总传热系数和管内、管外表面传热系数的计算

总传热系数 K 的计算为:

$$K = \frac{Q}{\Delta T_{LMTD} \times A_o} \quad (2)$$

式中: A_o 为换热管外名义表面积(按光滑面计算),m²; ΔT_{LMTD} 为对数平均温差。

管内外传热各部分热阻与总热阻之间关系如下:

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_i} \frac{A_o}{A_i} + \frac{1}{h_o} + R_w + R_f \quad (3)$$

式中: h_i 、 h_o 为管内、管外表面传热系数; A_i 、 A_o 为管壁内、外表面积; R_w 为换热管管壁热阻; R_f 表示污垢热阻。

根据式(3),在一组实验工况中,保持管外的表面传热系数不变(恒定蒸发温度和热流密度),改变管内流体的流速,即可根据 Wilson 图解法^[8-10]获得管内的表面传热系数,通过式(3)进行热阻分离,求得管外表面传热系数。

管内表面传热系数关联式通常整理成齐德-泰特(Sieder-Tate)准则式形式^[11]:

$$Nu = c Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\eta_l}{\eta_w} \right)^{0.14} \quad (4)$$

式中: Nu 为努塞尔数; c 为不同表面的经验数值; Re 为流体的雷诺数; Pr 为流体普朗特数; η_l 为流体动力粘度,Pa·s; η_w 为壁温度下的流体动力粘度,Pa·s。对于光滑管, $c=0.027$,对于强化管, c 通过实验及相应的数据处理方法求出。

3 实验结果与分析

实验时,先定蒸发温度和热流密度、变管内流速,通过 Wilson 图解法求得管内表面传热系数及其关联式,再进行大量的变蒸发温度和热流密度的实验。

通过 Wilson 图解法得到如下管内表面传热系数的准则式:

$$Nu = 0.085 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\eta_f}{\eta_w} \right)^{0.14} \quad (5)$$

式中的系数 0.085 与光滑管的系数 0.027 相比,可知管内的换热系数的强化倍率为 3.15。

蒸发温度 T_s 分别取: $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 6 个值。固定某一蒸发温度,且固定管内乙二醇水溶液进口温度,变化管内流体流速(热流密度也相应变化),可得到一组工况。本实验共做了 16 组工况数据,如图 3 所示。图 3 显示了总传热系数随管内流体流速(热流密度)、蒸发温度等参数的关系。

根据图 3 中的实验数据,采用前述的数据处理方法,可求得各个工况点的管外表面传热系数(沸腾换热系数) h_o 。 h_o 与热流密度 q 的关系图如图 4 所示。

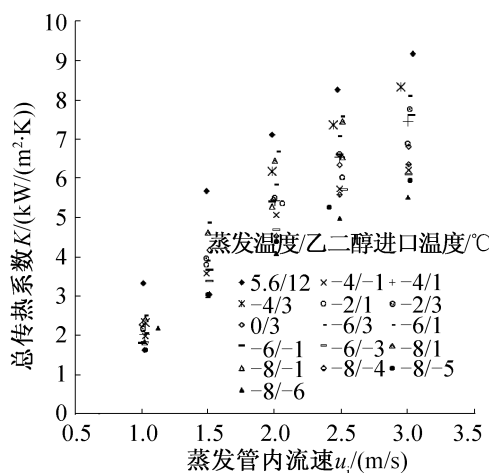


图 3 总传热系数实验工况点

Fig. 3 The test point of total heat transfer coefficient

一般认为,对于同种制冷剂和加热表面,核态沸腾换热系数(管外表面传热系数) h_o 可表达为热流密度 q 和饱和压力 p_s (p_s 与蒸发温度对应) 的函数^[12-13],因此管外核态沸腾换热系数 h_o 可表示为:

$$h_o = X_1 q^{X_2} p_s^{X_3} \quad (6)$$

式中: X_1, X_2, X_3 为常数。

根据图 4 所示的工况点,采用最小二乘法,通过多元线性回归得到管外沸腾换热系数计算关联式:

$$h_o = 0.87 q^{0.57} p_s^{0.33} \quad (7)$$

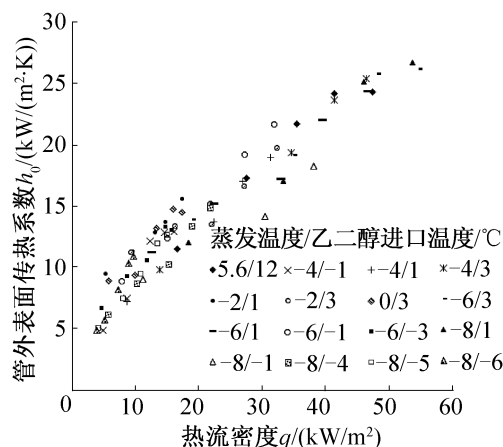


图 4 管外沸腾换热系数图

Fig. 4 Graph of pool boiling heat transfer coefficient outside the tube

式中: h_o 为管内外沸腾换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; q 为热流密度, W/m^2 ; p_s 为饱和压力, Pa 。

实验中数据范围: 热流密度值: $4\text{ kW}/\text{m}^2 < q < 55\text{ kW}/\text{m}^2$, 饱和压力: $216\text{ kPa} < p_s < 358\text{ kPa}$ 。

图 5 是该关联式的计算值与图 4 中的工况点值的偏差示意图。关联式平均偏差为 9.5%, 出现的最大偏差为 29.6%。从图中可以看出, 计算数据和实验数据之间的误差: 95% 的数据点的误差在 $\pm 20\%$ 以内, 关联式有较好的置信度。

为了更好地观察蒸发温度和热流密度对管外沸腾换热系数的影响, 在一定的热流密度范围内采用式 (7) 进行计算, 将计算值示于图 6。图 6 中的蒸发温度对应 p_s 的饱和温度。

由图可 6 以看出, 管外换热系数随着热流密度增大而增大, 这是因为随着热流密度的增大, 壁面过热度增加, 强化管外越来越多的汽化核心得到活化, 使得更多的气泡产生与脱离, 这对管壁附近制冷剂的扰

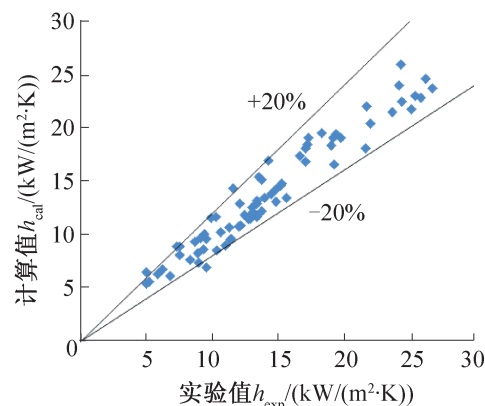


图 5 实验值与拟合关联式计算值的偏差

Fig. 5 The relationship between experimental data and calculated data

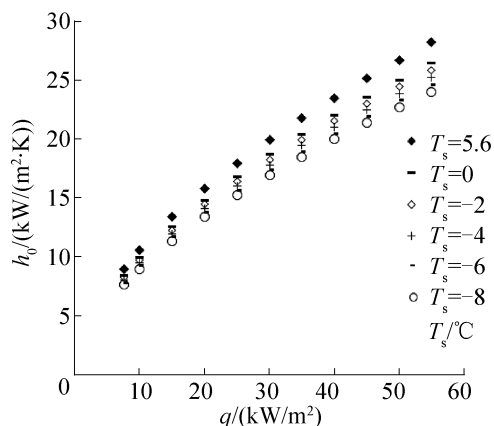


图6 蒸发温度和热流密度对管外沸腾换热系数的影响

Fig.6 Effects of evaporation temperature and heat flux on heat transfer coefficient

动增大,从而使换热增强。

在同一热流密度下,就总的趋势而言,蒸发温度越高,管外沸腾换热系数越高,这是因为蒸发温度变化会导致流体物性的改变。蒸发温度升高时,流体的表面张力变小,对于一定尺寸的表面空穴来说,使之活化所需的壁面过热度将减小,同时气泡脱离时的直径也变小,尺寸更小的空穴被活化,从而使得换热系数提高;而且随着热流密度的增大,不同蒸发温度下的管外换热系数之间的差别越来越大,即在高热流密度下,蒸发温度对管外换热系数的影响更大。

4 结论

1) 同一蒸发温度下,管外沸腾换热系数随着热流密度增大而增大。在同一热流密度下,蒸发温度越高,管外换热系数越高;而且随着热流密度的增大,不同蒸发温度下的管外换热系数之间的差别越来越大,即在高热流密度下,蒸发温度对管外换热系数的影响更大。

2) 依据实验数据提出了管内换热准则式和管外池沸腾换热关联式。池沸腾换热关联式表示了管外沸腾换热系数与蒸发温度和热流密度的关系。池沸腾换热关联式的计算数据和实验数据之间的误差显示,95%的数据点的误差在 $\pm 20\%$ 以内,该关联式有较好的置信度。

参考文献

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2006:327-331.
- [2] 李芳明,李沛文,李旻,等. 新工质 R134a 在水平强化管外的池沸腾换热[J]. 西安交通大学学报,1998,32(3):60-63. (Li Fangming, Li Peiwen, Li Wu, et al. Pool boiling of R134a outside a horizontal enhanced tube

[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(3): 60-63.)

- [3] Sun Zhaohu, Gong Maoqiong, Li Zhijian, et al. Nucleate pool boiling heat transfer coefficients of pure HFC134a, HC290, HC600a and their binary and ternary mixtures [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(1/2): 94-104.
- [4] 闫秋辉,马一太,田华,等. 水平管管外强化核态池沸腾换热研究[J]. 工程热物理论,2012,33(10):1763-1766. (Yan Qiuhui, Ma Yitai, Tian Hua, et al. Research on heat transfer of nucleation pool boiling outside the horizontal enhanced tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(10): 1763-1766.)
- [5] 刘文毅,李旻,陶文铨,等. R123 水平强化单管外池沸腾换热实验研究[J]. 制冷学报,2005,26(4):30-34. (Liu Wenyi, Li Wu, Tao Wenquan, et al. Experimental investigation on the pool boiling heat transfer characteristics of R123 outside single horizontal tubes[J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(4): 30-34.)
- [6] A Sathyabhama, T P Ashok Babu. Experimental investigation in pool boiling heat transfer of ammonia/water mixture and heat transfer correlations[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32(3): 719-729.
- [7] Gherhardt Ribatski, John R Thome. Nucleate boiling heat transfer of R134a on enhanced tubes[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(10): 1018-1031.
- [8] Cheng W Y, Wang C C, Robert H Y Z. Film condensation of HCFC-22 on horizontal enhanced tubes [J]. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 1996, 23(1): 79-90.
- [9] Briggs D E, Young E H. Modified Wilson plot techniques for obtaining heat transfer correlations for shell and tube heat exchangers[J]. Chemical Engineering Progress Symposium Series, 1969, 92 (65): 35-45.
- [10] Wilson E E. A basis for rational design of heat transfer apparatus[J]. Transactions of ASME, 1915, 37: 546-668.
- [11] Sieder E N, Tate G E. Heat transfer and pressure drop of liquid in tubes [J]. Ind. Eng. Chem. Res. 1936, 28 (12): 1429-1435.
- [12] Kim N H, Choi K K. Nucleate pool boiling on structured enhanced tubes having pores with connecting gaps[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44 (1): 17-28.
- [13] Cooper M G. Saturation nucleate pool boiling—a simple correlation[J]. First U. K. National Conference on Heat Transfer, 1984, 86(2): 785-792.

通信作者简介

包琳琳,女,硕士研究生,上海理工大学制冷与低温工程研究所,(021)55273428,E-mail:baolinlinxh@126.com。研究方向:强化传热,满液蒸发换热,降膜蒸发换热。

About the corresponding author

Bao Linlin, female, master, Institute of Refrigeration& Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, +86 21-55273428, E-mail: baolinlinxh@126.com. Research fields: heat transfer enhancement, nucleate pool boiling heat transfer, falling film evaporation.