

近临界压力下 R410A 在水平螺纹管内的冷凝 换热研究

丁永洁, 柳建华, 张 良, 聂 飞

(上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘 要:为研究近临界压力下 R410A 在水平螺纹管内的冷凝换热特性,在质量流率为 $200 \sim 800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、干度为 $0.1 \sim 0.9$ 、冷凝压力比为 0.8 和 0.9 时,对 3 种不同管径的内螺纹铜管($5, 7$ 和 9.52 mm)进行单管冷凝换热实验。结果表明:冷凝换热系数随着质量流率和干度的增加而增加,冷凝压力越接近临界压力,换热系数越小;利用已有的近临界压力下的换热关联式对波状流进行预测, Garimella 关联式结果较好,有 87% 的数据在 $\pm 25\%$ 的预估偏差率以内;对环状流进行预测, Sunil 关联式的预测效果比较好,有 79% 的数据在 $\pm 25\%$ 的预估偏差率以内。

关 键 词: 传热系数; 近临界压力; 内螺纹管; R410A

中图分类号: TK124 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.06.015

[引用本文格式] 丁永洁, 柳建华, 张 良, 等. 近临界压力下 R410A 在水平螺纹管内的冷凝换热研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(6): 100-106. DING Yong-jie, LIU Jian-hua, ZHANG Liang, et al. Heat transfer of R410A in horizontal inner-threaded tubes at near-critical pressure[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(6): 100-106.

Heat Transfer of R410A in Horizontal Inner-Threaded Tubes at Near-Critical pressure

DING Yong-jie, LIU Jian-hua, ZHANG Liang, NIE Fei

(Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer of Power Engineering, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: In order to study the condensation heat transfer performance of R410A in a horizontally inner-threaded tube at near-critical pressure, This article performs the condensation heat transfer experiment for internal threaded copper pipes of 3 different diameters at a mass flow rate of 200 to 800 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, a dryness of 0.1 to 0.9, and a condensation pressure drop of 0.8 and 0.9. The results show that the condensation heat transfer coefficient increases with increasing mass flow rate and dryness. The closer the condensation pressure approaches the critical pressure, the smaller the heat transfer coefficient. By comparing existing heat transfer correlations at near critical pressures, Garimella's predictions for wavy flow are good, with 87% of the data within $\pm 25\%$ of the estimated deviation rate. For the prediction of annular flow, the prediction effect of Sunil correlation is better, with 79% of the data within $\pm 25\%$.

Key words: heat transfer coefficient, near-critical pressure, inner-threaded tubes, R410A

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2020-03-10

基金项目: 上海市部分院校能力建设专项计划(16060502600)

Fund-supported Project: This study was supported by the Capacity Building Plan for some Non-military Universities and Colleges of Shanghai Scientific Committee(16060502600)

作者简介: 丁永洁(1993-), 男, 河南周口人, 上海理工大学硕士研究生.

通讯作者: 柳建华(1956-), 男, 上海人, 上海理工大学教授.

引言

随着热工行业的发展,用于冷却或加热的换热器变得不可或缺。目前,换热器结构逐渐趋于紧凑化^[1],小管径化、表面粗糙化是常见的研究方向,其中内螺纹管换热器比光管具有更好的换热性能^[2]。而在高温环境和水加热应用中,冷凝压力较为接近临界压力,在这种工况下,水平螺纹管内冷凝换热特性方面的研究还很少。

目前,有部分文献讨论了关于亚临界压力下的冷凝换热研究。Jiang Y^[3]研究了 R404A 在亚临界和超临界压力下 9.4 mm 光管中的冷凝换热和压降特性,并提出了修正关联式。Garimella^[4]研究了亚临界压力下 R410A 在 0.76~9.4 mm 水平管中的冷凝压降特性,同时在文献[5]中分析了冷凝传热特性。Basim A R^[6]研究了高温环境中 R410A 在水力直径为 0.52 和 1.26 mm 的水平多端口微细通道中的冷凝换热特性,在质量流率为 200~800 kg/(m²·s)的条件下进行冷凝实验,冷凝传热系数与单位面积制冷剂质量流量以及制冷剂干度呈正相关关系。亚临界压力下的凝结特性研究主要针对微通道和普通管。内螺纹管具有良好的换热强化效果^[7-12],小管径具有换热增强效果^[13-15]。

对 R410A 分别在 9.52、7 和 5 mm 的内螺纹铜管内进行临界压力比为 0.8、0.9 的冷凝实验,分析 R410A 在不同管径下的换热特性,并验证现有关联式的适配性。

1 实验装置与数据处理

本文以文献[16]中的单管管内冷凝换热实验台为基础进行改造,使其适用于临界压力下的高温测量。实验系统原理如图 1 所示。为了实现测试段入口干度的控制,在实验段之前增加了前冷却器。为了尽量减小测试段冷却水侧的热阻,使制冷剂侧的热阻成为主要热阻,就要保证冷却水侧雷诺数足够大。这需要较大的冷却水流速,但进出口的温差比较小,测量不确定性变大。因此,增加辅助冷却器,采用低流速的辅助冷却水将主循环冷却水吸收的热量带走,这样可以放大实验中的测量温差,使冷凝换热量的测量值更加精确。

制冷剂仍以电加热方式实现过热,经过前冷却器进行可控冷却。实验过程中干度数据的处理包括入口干度和出口干度处理:

制冷剂在实验测试段的入口干度 x_{in} 计算式为:

$$x_{in} = \frac{h_{in} - h_1}{h_v - h_1} \quad (1)$$

$$h_{in} = h_s - \frac{Q_{pre}}{m_r} \quad (2)$$

式中: h_1 —制冷剂在冷凝压力下饱和液态的焓值, kJ/kg; h_v —制冷剂在冷凝压力下饱和蒸气的焓值, kJ/kg; h_{in} —制冷剂测试段入口处的焓值, kJ/kg; h_s —过热制冷剂的焓值, kJ/kg; Q_{pre} —前冷却器冷负荷, kW; m_r —制冷剂质量流量, kg/s。

实验段制冷剂的出口干度 x_{out} 的计算式为:

$$x_{out} = \frac{h_{out} - h_1}{h_v - h_1} \quad (3)$$

$$h_{out} = h_c + \frac{Q_{post}}{m_r} \quad (4)$$

式中: h_{out} —制冷剂测试段出口处的焓值, kJ/kg; h_c —过冷制冷剂的焓值, kJ/kg; Q_{post} —后冷却器冷负荷, kW。

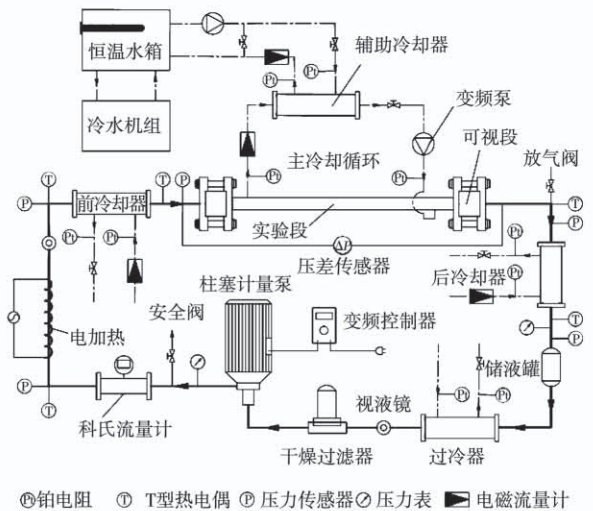


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic of the experimental system

实验段为套管式结构,与文献[16]套管结构一致。外管采用 PVC 管,管外的保温材料内层为聚乙烯泡沫塑料,外层为玻璃棉,内部均匀布置管外壁温测试点。热交换以逆流的方式进行。换热量的计算式为:

制冷剂侧换热量:

$$Q_r = (h_{in} - h_{out}) \cdot m_r \quad (5)$$

水侧换热量:

$$Q_w = Q_{sec} + Q_{ambient} - Q_{pump} \quad (6)$$

式中: Q_r —制冷剂侧换热量, kW; Q_w —水侧换热量, kW; Q_{sec} —辅助冷却器换热量, kW; $Q_{ambient}$ —主冷却水与环境间的热耗散, kW; Q_{pump} —水泵输入功率, kW。

为避免热损失造成的不确定度, 主冷却水路的各部分管路也采用良好的保温材料, 以减少主冷却循环中的热耗散。

传热系数仍以分离热阻法^[17]计算, 需要通过计算水侧努塞尔数 Nu 来计算水侧传热系数 h_w , 总传热系数 K 的计算见文献^[16], 水的对数平均温差参考文献^[18]计算。同样, 使用 Gnielinski^[19]经验关联式得到水侧努塞尔数。制冷剂侧传热系数^[16]为:

$$h_r = A_i \left(\frac{1}{KA_o} - \frac{1}{h_w A_o} - \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2\lambda A_o} \right)^{-1} \quad (7)$$

式中: h_r —制冷剂侧传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; A_i —测试铜管管内表面积, m^2 ; A_o —测试铜管管外侧表面积, m^2 ; λ —测试铜管导热系数, $W/(m \cdot K)$; d_o —测试铜管外径, m ; d_i —测试铜管内径, m ; K —总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

数据的采集计算功能是由以 LABVIEW 为语言基础编写的软件实现的, 使用 Agilent34970A 采集温度、压力、压差、制冷剂流量及冷却水流量等数据, 仪器的不确定度与文献^[16]一致, 实验参数的不确定度如表 1 所示。

表 1 实验参数不确定度

Tab.1 Uncertainty of experimental parameters

测量参数	不确定度/%
干度	2.6~6.4
传热系数	3.4~9.2

使用外径为 9.52、7 和 5 mm 的内螺纹铜管, 临界压力比为 0.8 和 0.9 时进行冷凝换热实验。试验段管长为 560 mm。试验平衡条件为计算得到的制冷剂侧换热量 Q_r 和水换热量 Q_w 的平均值, 以相对误差 η 为判断条件, 满足 $\eta < 5\%$ 时^[20], 实验系统运行处于稳定可记录的状态。

2 实验结果和分析

2.1 质量流率对制冷剂侧传热系数的影响

图 2~图 5 为 R410A 在外径为 5、7 和 9.52 mm 的 3 种内螺纹管中, 压力比 P_r 为 0.8 和 0.9 时, 制冷剂侧传热系数随质量流率的变化。

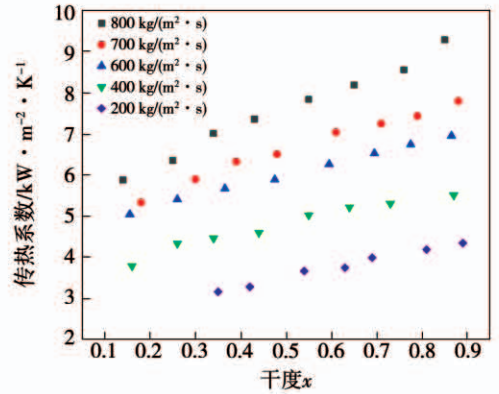


图 2 $P_r = 0.8$ 时 5 mm 管中传热系数随制冷剂质量流率的变化

Fig.2 $P_r = 0.8$ Variation of heat transfer coefficient of 5 mm diameter tube with refrigerant mass flow rate at $P_r = 0.8$

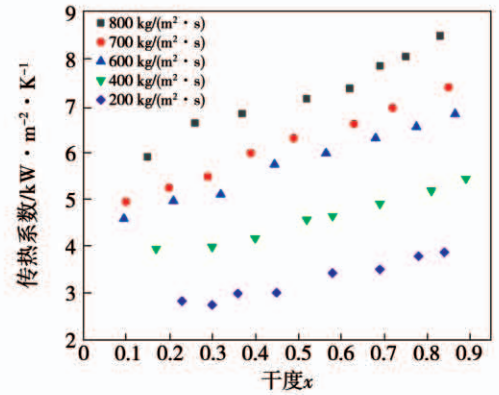


图 3 $P_r = 0.8$ 时 7 mm 管传热系数随质量流率的变化

Fig.3 Variation of heat transfer coefficient of 7 mm diameter tube with refrigerant mass flow rate at $P_r = 0.8$

制冷剂侧的传热系数随着干度以及质量流率的增加而增大。质量流率的影响主要是其对制冷剂在换热管中湍流程度的影响^[21], 质量流率增大, 造成的湍流程度也增强, 从而使换热性能增强。质量流率对制冷剂在管中流动湍流程度的影响机理主要为两方面: 质量流率越大, 受到螺纹内肋的引流和穿刺

液膜的影响越大,对主流区的扰动更加剧烈,增强湍流效应;质量流率越大,流速越大,由于气/液相密度不同,流速增大产生两相之间的速度差,故气/液面的剪切应力变大,使得液膜被拉薄,液膜造成的热阻变小,换热系数增大。在干度较高区域,气相所占的比例更大,液膜被拉得更薄。

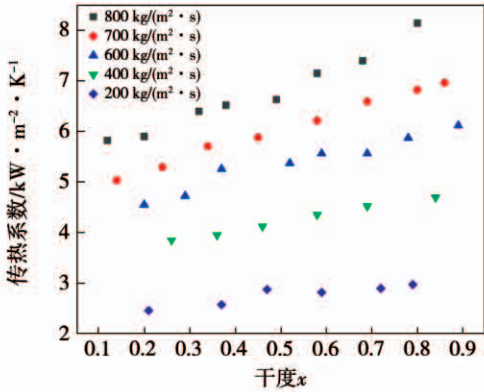


图 4 $P_r = 0.9$ 时 7 mm 管传热系数随质量流率的变化

Fig. 4 Variation of heat transfer coefficient of 7 mm diameter tube with refrigerant mass flow rate at $P_r = 0.9$

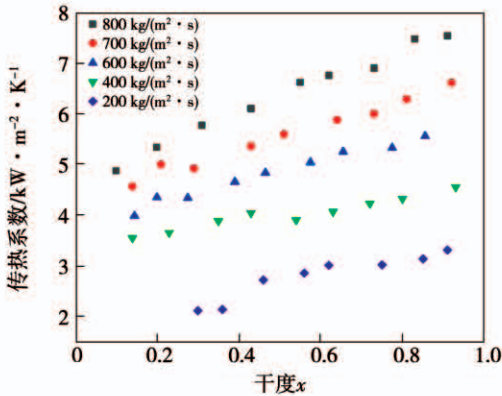


图 5 $P_r = 0.8$ 时 9.52 mm 管传热系数随质量流率的变化

Fig. 5 Variation of heat transfer coefficient of 9.52 mm diameter tube with refrigerant mass flow rate at $P_r = 0.8$

当干度较小时,管中液相制冷剂占比较大,制冷剂在管中流态主要为波状流^[22],此时冷凝液膜较厚,热阻增加,故换热系数较小。反之,换热主流区的流态主要为环状流^[23],此时,液膜充分地均匀分布,热阻均匀性好,所以换热系数较大。

2.2 管径和压力对制冷剂侧传热系数的影响

图 6 ~ 图 9 展示不同冷凝压力下,制冷剂在 3 种不同管径的内螺纹管中冷凝传热系数随质量流率

的变化对比情况。

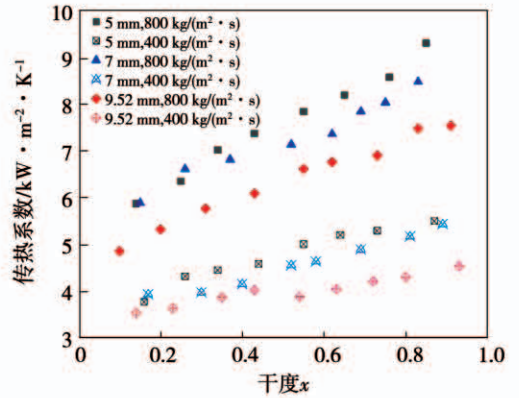


图 6 $P_r = 0.8$ 时 3 根管的传热系数随制冷剂质量流率的变化

Fig. 6 The heat transfer coefficient variations of the three tubes with the mass flow rate of the refrigerant at $P_r = 0.8$

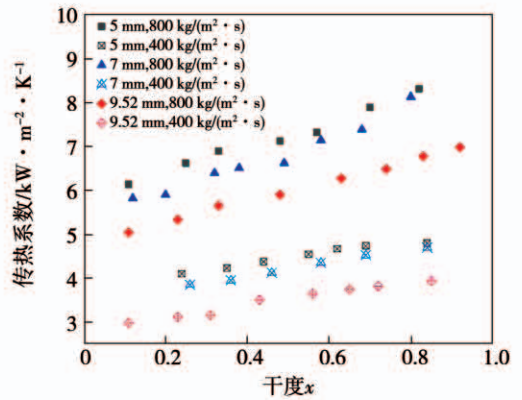


图 7 $P_r = 0.9$ 时 3 根管的传热系数随制冷剂质量流率的变化

Fig. 7 Heat transfer coefficient variations of the three tubes with the mass flow rate of the refrigerant at $P_r = 0.9$

从图中可以明显看出,在相同条件下,管径越小、换热系数越大。此外, $P_r = 0.8$ 的换热系数相比较大。

小管径的强化换热效果在众多文献中都能体现,也有部分学者对亚临界压力下的微通道和不同管径换热管进行了研究。5, 7 和 9.52 mm 管径的实验结果表明,换热管小管径化会增强换热,且 5 mm 管的强化作用更为明显。内螺纹管内表面的扩展使得换热效果增强,而管径越小,管内肋化效率越高,

气液相的混合更加均匀,在管中受到的剪切应力影响比重力效应的影响越大,重力影响导致的液膜堆积越小,液膜分布越均匀,换热效果越好。此外,管径越小相对齿高越大,造成的边界层扰动越高,对底部液膜堆积的破坏作用越大。管径小,环状流容易形成,换热效果越好^[16]。

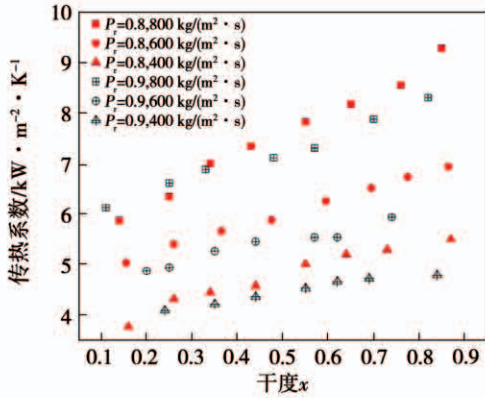


图 8 5 mm 管的传热系数随压力比的变化

Fig. 8 Heat transfer coefficient variation of 5 mm tube with different pressure

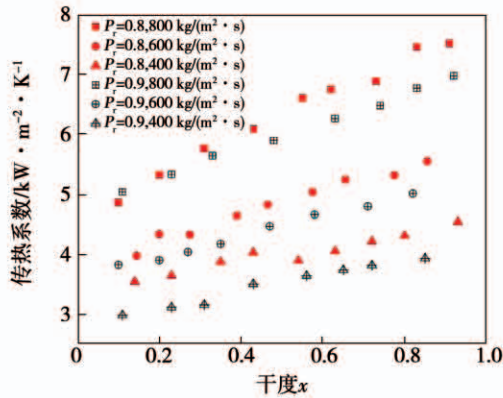


图 9 9.52 mm 管的传热系数随压力比的变化

Fig. 9 Heat transfer coefficient variation of 9.52 mm tube with different pressure

在 $P_r = 0.8$ 压力下,液体的密度差和粘度差比较大,从而可以形成更大的界面剪切应力,配合干度的影响,在干度高时容易出现环状流态,从而增强换热效果。所以在干度高时,压力不同造成的换热系数差别也越大。而质量流率为 $800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,低干度区的换热系数甚至低于压力比 0.9 时的换热系数,且这种现象在较小管径内更加明显。这是由于,干度比较低时,流态为波状流,热阻较大,大质量

流率的换热强化作用被削弱,所以这种现象在低质量流率下不明显。管径变小强化了气液面的剪切力,这种效果在气体比重较大时更为明显,而液体比重较大时受重力的影响较大,这会导致换热恶化。此外,近临界压力时液相传热系数再次升高也强化了换热。但总体来说,对所研究的压力范围,传热系数之间的差异相对不大。

2.3 现有模型比较

目前,对于内螺纹管中的冷凝关联式预测效果比较好的是 Cavallini 等人^[24]提出的关联式,但该关联式使用于冷凝压力比范围为 0.1 ~ 0.67,对压力比 0.9 和 0.8 的近临界压力预测效果可能不好。不过近期 Sunil^[25]提出内螺纹管中的冷凝传热系数新模型,尽管在一般条件下的预测效果不如 Cavallini 提出的模型好,但该新模型压力比区间扩大为 0.16 ~ 0.81。Jiang Y^[3]研究了亚临界压力下 R404A 在 9.4 mm 管中的冷凝换热,并提出了亚临界压力下混合制冷剂的冷凝换热关联式。Garimella^[5]基于 Cavallini 等人^[26]提出的流态模型,提出了亚临界压力下环状流、波状流以及环-波状流过渡区的换热关联式,该关联式适用于直径范围为 0.76 ~ 9.4 mm。Basim A R^[6]研究了亚临界压力下 R410A 在微通道内的冷凝换热系数,并对比分析了 Garimella^[5]和其他关联式的预测效果,最后基于文献^[26]中的关联式提出了适用于高温环境、高冷凝压力下的环状流模型。

对以上各关联式在亚临界压力下内螺纹管中的冷凝换热系数预测值与实验值进行比较,结果如图 10 所示。

根据 Garimella 使用的流态计算方法^[5],发现 Garimella 对波状流的预测效果较好,有 87% 的数据在 $\pm 25\%$ 的预估偏差率以内,而对环状流的预测结果偏低,可能是由于该方法没有考虑到内螺纹的强化效果。Jiang. Y 的关联式对环状流的预测有同样的趋势。而对环状流的预测中, Sunil 关联式的预测效果比较好,有 79% 的数据在 $\pm 25\%$ 的预估偏差率以内,对波状流的预测偏高,这是由近临界压力下制冷剂物性变化引起的。而 Basim 关联式对本实验的预测值偏高,这是由于其关联式同样在近临界压力下,适用于微通道的预测,对于内螺纹管的预测值

偏高。

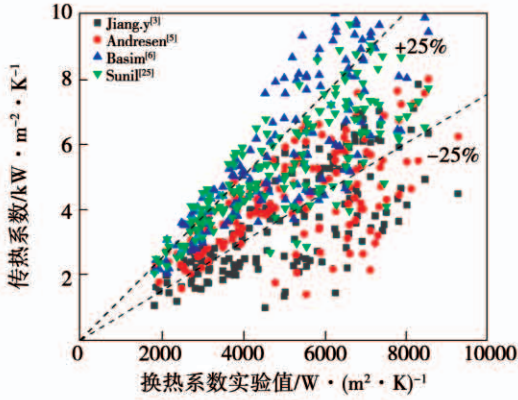


图10 不同关联式预测值与实验值对比图

Fig.10 Comparison of different predicted values and experimental values

3 结论

为了验证近临界压力下 R410A 在内螺纹管中的换热效果以及关联式的适用性,使用外径为9.52, 7 和 5 mm 的内螺纹铜管,在临界压力比为0.8,0.9 时进行冷凝换热实验。此外,对现有的近邻界压力关联式进行对比和验证。通过对实验结果的整理和分析,得出结论:

(1) 在压力靠近临界压力时,受制冷剂物性变化影响,制冷剂的气液密度差、粘度差减小,所受剪切力的影响减小,液膜厚度增加,换热系数降低。

(2) 受管径影响,肋化程度不同,管内两相流湍流度改变,相同条件下 5 mm 内螺纹管的制冷剂侧传热系数最大,且随着管径的增大而减小。

(3) 制冷剂质量流率在 200 ~ 800 kg/(m²·s) 范围内,换热系数随质量流率和干度的增大而增大,且干度高时质量流率的影响更大。

(4) 对近临界压力下的换热预测关联式进行比较发现:对波状流预测,Garimella 关联式的预测效果较好,有 87% 的数据在 ± 25% 的预估偏差率以内。对环状流的预测,Sunil 关联式的预测效果比较好,有 79% 的数据在 ± 25% 的预估偏差率以内。

参考文献:

[1] 胡良玉,柳建华,张 良,等.基于 R404A 的圆形冷凝器小管径化实验研究[J].轻工机械,2018(3):85-88.

HU Liang-yu, LIU Jian-hua, ZHANG Liang, et al. Experimental study on small tube diameter of circular condenser based on R404A [J]. Light Industry Machinery, 2018(3):85-88.

[2] 罗 欣.空调能效比与高效传热内螺纹铜管的发展[J].铜业工程,2007(2):33-34.

LUO Xin. Comparison of air conditioner energy efficiency and the development of high efficiency heat transfer inner-threaded copper tubes[J]. Bronze Engineering, 2007(2):33-34.

[3] JIANG Y. Heat transfer and pressure drop of refrigerant R404A at near-critical and supercritical pressures [D]. Iowa State University, 2004.

[4] GARIMELLA S, ANDRESEN U C, MITRA B, et al. Pressure drop during near-critical-pressure condensation of refrigerant blends [J]. International Journal of Refrigeration, 2015(59):1-13.

[5] GARIMELLA S, ANDRESEN U C, MITRA B, et al. Heat transfer during near-critical-pressure condensation of refrigerant blends [J]. Journal of Heat Transfer, 2016, 138(5):051503. 1-051503. 16.

[6] ALBAKRI B A R, RICCO P. Condensation heat transfer coefficient for rectangular multiport microchannels at high ambient temperature [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 138(8):866-878.

[7] 秦 妍,张剑飞.关于内螺纹管及光管冷凝器换热效果的实验分析[J].制冷与空调,2011,11(1):59-61.

QIN Yan, ZHANG Jian-fei. Experimental analysis on heat transfer effect of condenser with internally ribbed tube or smooth tube [J]. Refrigeration and Air-Condition, 2011, 11(1):59-61.

[8] KIM N H. Condensation heat transfer and pressure drop of R410A in a 7.0 mm O. D. microfin tube at low mass fluxes. [J] Heat Mass Transf. ,2016,52(12):2833-2847.

[9] KIM N H, GOOK H H, LEE B M. Condensation heat transfer and pressure drop of R404A in 7.0 mm O. D. smooth and microfin tube at low mass fluxes [J]. International Journal Air-Conditioning and Refrigeration. 2018,26(1):1850005. 1-1850005. 10.

[10] CAVALLINI A, COLD D, DORETTI L, et al. Heat transfer and pressure drop during condensation of refrigerants inside horizontal enhanced tubes [J]. International journal of refrigeration, 2000, 23(1):4-25.

[11] 胡志宏,陈听宽,孙 丹.近临界及超临界压力区垂直光管和内螺纹管传热特性的试验研究 [J]. 热能动力工程,2001,16(3):267-270.

HU Zhi-hong, CHEN Ting-kuan, SUN Dan, Experimental research on the heat transfer characteristics of vertical smooth tubes and internally threaded tubes in near critical and supercritical pressure regions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(3):267-270.

- [12] 张庆,李会雄,张伟强. 近临界压力区内螺纹管内水的传热特性研究[J]. 工程热物理学报,2013,34(8):1470-1474.
ZHANG Qing, LI Hui-xiong, ZHANG Wei-qiang. Investigation on heat transfer of water in near critical pressure region in internally ribbed tubes[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(8):1470-1474.
- [13] 李庆普,陶乐仁,吴生礼,等. 水平光管内 R410A 与 R134a 流动冷凝换热特性的对比研究[J]. 热能动力工程, 2018, 33(12):60-68.
LI Qing-pu, TAO Le-ren, WU Sheng-li, et al. Comparative study on flow condensation heat transfer characteristics of R410A and R134a inside the horizontal smooth tube[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(12):60-68.
- [14] 张宗楠,陶乐仁,程建,等. R410A 在内螺纹强化管管内冷凝的传热性能试验研究[J]. 流体机械, 2013(9):14-16, 31.
ZHANG Zong-nan, TAO Le-ren, CHENG Jan, et al. Experimental study on condensation heat transfer of internally ribbed tube with R410A. [J]. Fluid Machinery, 2013(9):14-16, 31.
- [15] 闫晓龙. 不同齿形内螺纹管内 R410A 的冷凝实验与工程模型研究[D]. 浙江大学, 2019.
YAN Xiao-long. Experiment study and engineering model of condensation of R410A in micro-fin tubes with different geometries [D]. Zhejiang University, 2019.
- [16] 丁永洁,柳建华,张良,等. R404A 在水平内螺纹管中的冷凝换热研究. [J] 热能动力工程, 2020, 35(12):141-147.
DING Yong-jie, LIU Jian-hua, ZHANG Liang, et al. Condensation heat transfer of R404A in horizontal inner-threaded tubes [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(12):141-147.
- [17] KOO K, HWANG J, HUR H, et al. An experimental study on the thermal and fouling characteristics in a washable shell and helically coiled heat exchanger by the Wilson plot method [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(6):2805-2812.
- [18] APREA C, GRECO A, VANOLI G P. Condensation heat transfer coefficients for R22 and R407C in gravity driven flow regime within a smooth horizontal tube [J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(4):393-401.
- [19] 王智科. 微小内螺纹管管内冷凝的实验研究及工程模型 [D]. 杭州:浙江大学, 2012.
WANG Zhi-ke. Experimental study and engineering model of condensation in micro internal thread tubes [D]. Hang Zhou: Zhejiang University, 2012.
- [20] 吴生礼,陶乐仁,李庆普,等. R134a 在水平螺纹管内的冷凝换热特性研究[J]. 轻工机械, 2017(5):8-12, 18.
WU Sheng-li, TAO Le-ren, LI Qing-pu, et al. Study on condensation heat transfer characteristics of R134a in horizontal threaded tubes [J]. Light Industry Machinery, 2017(5):8-12, 18.
- [21] 严彦,董继先,高秀峰. 多通道烘缸水平矩形管内冷凝换热特性及流型[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(4):116-121.
YAN Yan, DONG Ji-xian, GAO Xiu-feng. Heat transfer characteristics of condensation and flow regime in horizontal rectangle channel of multi-channel cylinder dryer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(4):116-121.
- [22] 庄晓如,公茂琼,邹鑫,等. 水平管内流动冷凝流型图研究进展[J]. 制冷学报, 2016, 37(2):9-15.
ZHUANG Xiao-ru, GONG Mao-qiong, ZOU Xin, et al. A review on flow pattern maps of condensation in horizontal tubes [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(2):9-15.
- [23] KOSKY P G, STAUB F w. Local condensing heat transfer coefficients in the annular flow regime [J]. AIChE Journal, 1971, 17(5):1037-1043.
- [24] CAVALLINI A, COL D D, MANCINI S, et al. Condensation of pure and near-azeotropic refrigerants in microfin tubes: A new computational procedure [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(1):162-174.
- [25] MEHENDALE S S. Condensing heat transfer of pure refrigerants and refrigerant mixtures flowing within horizontal microfin tubes: A new model. [J] International Journal of Refrigeration 2019, 103:223-242.
- [26] CAVALLINI A, CENSI G, DEL C D, et al. Condensation of halogenated refrigerants inside smooth tubes [J]. HVAC and Research, 2011(28):429-451.

(刘颖 编辑)