

R1234ze(E)与R134a在水平双侧强化管外的 凝结换热对比实验

孙晨, 欧阳新萍, 夏荣鑫

(上海理工大学制冷技术研究所, 上海 200093)

摘要:搭建了水平单管降膜蒸发试验台,以第四代制冷剂R1234ze(E)和第三代制冷剂R134a作为工质,在新型水平双侧强化管管外分别进行了改变管内水速、热流密度和冷凝温度条件的凝结换热实验。使用Wilson-Gnielinski图解法计算得到管内表面传热系数 h_i ,进一步采用热阻分离法分离出两种制冷剂的管外表面传热系数,并分析了管内冷却水水速、冷凝温度和壁面过冷度的变化对其换热性能的影响。实验结果表明:同根实验管下不同制冷剂凝结换热性能的差异与制冷剂物性与强化管结构之间的匹配特性有关,实验管型下,R1234ze(E)的管外凝结换热性能高于R134a。

关键词:凝结换热;R1234ze(E);强化管结构;换热关联式;强化换热

中图分类号:TB657.5;TB61⁺1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.08.011

[引用本文格式]孙晨,欧阳新萍,夏荣鑫. R1234ze(E)与R134a在水平双侧强化管外的凝结换热对比实验[J]. 热能动力工程, 2021, 36(8): 72-77. SUN Chen, OUYANG Xin-ping, XIA Rong-xin. Experimental comparison on condensation heat transfer of R1234ze(E) and R134a on horizontal double-sided strengthened tube[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8): 72-77.

Experimental Comparison on Condensation Heat Transfer of R1234ze(E) and R134a on Horizontal Double-sided Strengthened Tube

SUN Chen, OUYANG Xin-ping, XIA Rong-xin

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

Abstract: A horizontal single-tube falling film evaporation test stand was built. Using the fourth-generation refrigerant R1234ze(E) and the third-generation refrigerant R134a as the working fluid, and the condensation heat transfer experiments were carried out outside the new type horizontal double-sided strengthened tube. The experiments were carried out under different conditions of water velocity, heat flux density and condensation temperature. The Wilson-Gnielinski graphical method is used to calculate the surface heat transfer coefficient h_i inside the tube, and the thermal resistance separation method is used to separate the surface heat transfer coefficient of the two refrigerants outside the tube. The effects of changes in the cooling water velocity, condensation temperature and wall subcooling degree on the heat transfer performance of the tube are analyzed. The experimental results show that the difference in surface heat transfer performance of different refrigerants under the same experimental tube is related to the matching properties of refrigerant physical properties and strengthened tube structure. In this experimental tube type, the condensation heat transfer performance of R1234ze(E) is higher than that R134a outside the tube.

收稿日期:2020-10-15; 修订日期:2020-10-15

作者简介:孙晨(1996-),男,浙江宁波人,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:欧阳新萍(1964-),男,江西萍乡人,上海理工大学教授。

Key words: condensation heat transfer; refrigerants of R1234ze(E); structure of enhanced tube; heat transfer correlation; heat transfer enhancement

引 言

R1234ze(E)作为第四代制冷剂,无毒、不可燃、臭氧消耗潜能值(ODP)为零、全球变暖潜能值(GWP)小于1,并且几乎与常见润滑油都具有良好的互溶性,被认为是最有潜力替代 R134a 的新一代绿色制冷剂^[1-2]。

Anowar Hossain 等人^[3]测试了 R1234ze(E)在水平光滑管外的凝结表面传热系数和压降,并与 R32、R410A 进行了比较。实验结果表明:当制冷剂质量流速在 $300\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时 R1234ze(E)的凝结表面传热系数比 R32 约低 30%,比 R410A 约高 28%;R1234ze(E)的压力梯度比 R32 和 R410A 分别高 26%~50%和 38%~70%。Mota-Babiloni A 等人^[4]通过大量实验得出:螺杆式和离心式压缩机可能更适用于使用 R1234ze(E);R1234yf、R1234ze(E)的冷却能力分别比 R134a 平均下降 9%和 30%;随着冷凝温度的升高,R1234yf 的冷却能力会增强,随着蒸发温度的升高,R1234ze(E)的冷却能力会增强。欧阳新萍等人^[5]对比了 R410A、R404A 和 R407C 在水平强化管外的凝结换热性能,应用威尔逊图解法和热阻分离的方法得到管的内外表面传热系数,结果表明:在相同换热参数下凝结表面传热系数从大到小依次为 R410A、R404A、R407C;R410A 管外凝结表面传热系数随着壁面过冷度的增大而减小,这与 Chen^[6]、燕志鹏等人^[7]实验中纯制冷剂的冷凝特性相同。而 R404A 与 R407C 和 R410A 不同,随着壁面过冷度的增大,管外凝结表面传热系数增大,这主要是非共沸制冷工质管外凝结过程存在的气膜热阻所致。D Sáncheza 等人^[8]通过实验主要对比了 R290、R600a、R134a、R152a、R1234ze(E)和 R1234yf 6 种不同制冷剂在同一制冷设备中,相同工况下的制冷能力与制冷系数(COP)。

随着第四代制冷剂的研发与选取提上日程,对目前潜力较大的 R1234ze(E)、R1234yf 等制冷剂的研究也陆续增多,但大多集中在研究制冷系统的 COP,对于改变冷凝温度、热流密度、壁面过冷度对不同制冷剂传热性能影响的研究仍然很少。

本文使用一种新型水平三维双侧强化管,对 R1234ze(E)和 R134a 两种制冷剂进行管外凝结换热对比实验,分析各种参数对其换热性能的影响。

1 水平强化管外凝结实验

1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示。该实验系统由 4 个溶液回路组成:制冷剂循环回路、冷却水循环回路、乙二醇水溶液循环回路和加热水循环回路。

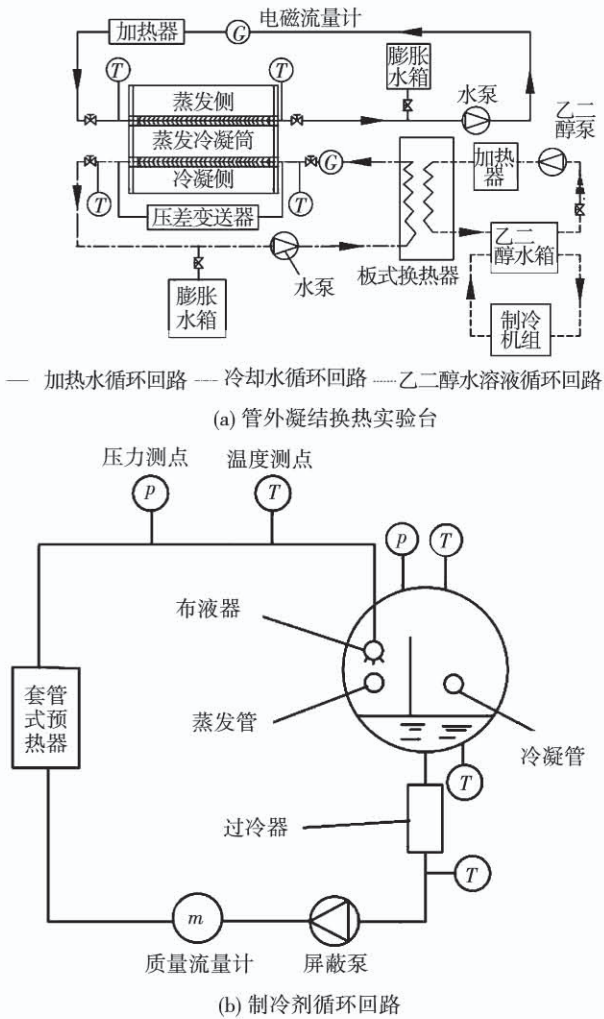


图 1 实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

将待测冷凝管布置于冷凝侧,管内通冷却水。测量冷却水进出口水温 and 流量,可计算凝结换热量。再结合冷凝温度的测量,可计算凝结换热的总传热

系数 K 。

冷凝管为水平三维肋双侧强化管,管内布置螺旋齿,管外制冷剂侧在二维肋的基础上再次加工,在一次翅片的翅尖上斜切出三角形和正方形的二次翅片。其外表面的三维结构和剖面结构如图 2 所示,管件详细几何参数如表 1 所示。

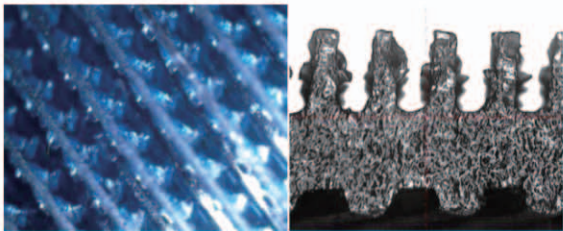


图 2 实验管外表面结构图(左)和剖面图(右)
Fig.2 Surface structure (left) and cross-sectional view (right) of the test tube

表 1 实验用强化管结构参数

Tab.1 Structure parameters of test tubes

参数	数值
光段外径/mm	19.00 ± 0.02
光段内径/mm	16.70 ± 0.02
管长 L /m	2.5
光段壁厚/mm	1.15 ± 0.02
一次翅高/mm	0.757 5
一次翅间距/mm	0.638 5
三角形二次翅高/mm	0.171
矩形二次翅高/mm	0.141
内齿高/mm	0.273 5
内齿间距/mm	0.998 5
内齿螺旋角/(°)	44.2
内齿厚/mm	0.600 5

1.2 实验方法

实验中,采用单一控制变量原则。首先将热流密度控制在 15 kW/m^2 ,冷凝温度为 $35\text{ }^\circ\text{C}$,冷却水流速在 $1\sim3\text{ m/s}$ 范围内调节,得出管内传热性能特性。再选定冷凝温度为 $20,25,30,35\text{ }^\circ\text{C}$ 和冷却水速为 2 m/s ,在 $15\sim40\text{ kW/m}^2$ 范围内调节热流密度,得出管外凝结换热性能参数。采用 Wilson-Gnielinski 图解法,从总传热系数 K 中分离出管内、管外表面传热系数 h_i 和 h_o [9]。

1.3 实验误差分析

本实验采用 A 级精度 Pt100 温度传感计,测量

误差为 $\pm(0.15\pm0.002\text{ t})\text{ }^\circ\text{C}$, t 为测量温度,温度传感器量程为 $-50\sim400\text{ }^\circ\text{C}$,压力传感器量程为 $0\sim2.5\text{ MPa}$,最大绝对误差为 $\pm0.006\text{ 25 MPa}$,电磁流量计量程为 $0\sim4.5\text{ m}^3/\text{h}$,最大绝对误差为 $\pm0.009\text{ m}^3/\text{h}$ 。通过不确定度分析,计算得到最大不确定度为 15.66% 。

2 实验结果和分析

2.1 管内传热性能

首先采用 R134a 工质,在管内变水速条件下进行凝结换热实验。利用 Wilson-Gnielinski 图解法分离出管内表面传热系数 h_i ,如图 3 所示。并拟合出管内表面传热系数与水速 u 的关系式:

$$h_i = 9\,396.9u^{0.875\,5} \tag{1}$$

依据 Dittus-Boelter 公式,计算出光滑管内表面传热系数,与图 3 所示的数据比较,求出强化管管内传热的平均强化倍率为 1.76。

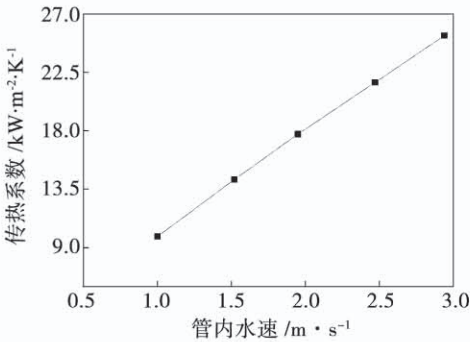


图 3 管内表面传热系数与水速关系
Fig.3 Effects of the surface heat transfer coefficient on water speed inside the tubes

管内强化换热性能主要跟管内螺纹结构有关,与管外制冷剂类型无关。因此,采用 R1234ze(E) 进行实验并分离管外凝结表面传热系数时,管内换热特性也采用图 3 数据。

2.2 管外凝结换热性能

管外凝结换热性能主要受壁面过冷度和冷凝温度两个因素影响,控制冷凝温度,以 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 为间隔在 $20\sim35\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度区间内变化,保持管内冷却水速为 2 m/s ,热流密度在 $15\sim40\text{ kW/m}^2$ 的区间内变化,得到 R134a 和 R1234ze(E) 在不同冷凝温度下对应的凝结管外表面传热系数与壁面过冷度的关系,如图 4 和图 5 所示。

由图 4、图 5 可知,制冷剂 R134a 的管外表面凝结传热系数会随着壁面过冷度的增大而减小。R1234ze(E)在冷凝温度为 20、25 和 35 ℃ 时,管外表面凝结传热系数随着壁面过冷度的增大先上升后下降。在冷凝温度为 30 ℃ 时,管外表面凝结传热系数随着壁面过冷度的增大而上升。R134a 的管外表面凝结传热系数随着冷凝温度的升高而增大,R1234ze(E)的管外表面凝结传热系数随冷凝温度升高呈现波动性。

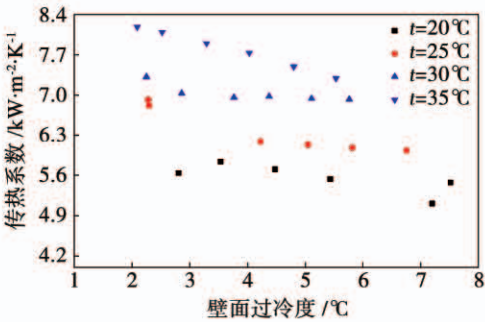


图 4 R134a 管外表面凝结传热系数与壁面过冷度的关系

Fig. 4 Effects of the surface heat transfer coefficient of R134a on wall subcooling degree outside the tubes

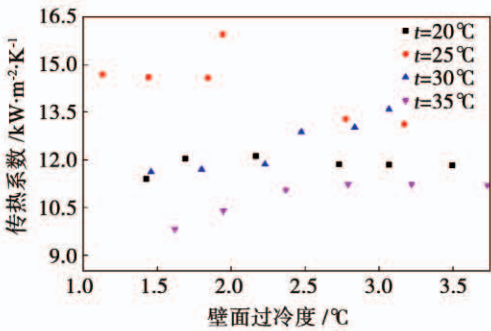


图 5 R1234ze(E) 管外表面凝结传热系数与壁面过冷度的关系

Fig. 5 Effects of the surface heat transfer coefficient of R1234ze(E) on wall subcooling degree outside the tubes

取两种工质冷凝温度为 35 ℃ 时的性能曲线作为典型工况进行对比,并加入努塞尔(Nusselt)凝结理论关联式的计算曲线,如图 6 所示。

两种工质是在相同的热流密度范围的实验,由于 R1234ze(E) 的传热性能优于 R134a,因此在相同热流密度下, R1234ze(E) 的壁面过冷度小

于 R134a。

Nusselt 凝结理论关联式的计算曲线依据 Chen 等人^[10]提出的 Nusselt 凝结理论修正模型。其模型认为,在三维强化管外凝结换热的性能也遵循 Nusselt 的相关性,但需要在光滑管关联式(2)的系数前乘以强化倍率 c_i ,即:

$$h_{o,smooth} = 0.729 \left[\frac{rg\lambda_1^3\rho_l^3}{\mu_l d(t_s - t_w)} \right] \tag{2}$$

$$h'_{o,smooth} = c_i \cdot 0.729 \left[\frac{rg\lambda_1^3\rho_l^3}{\mu_l d(t_s - t_w)} \right] \tag{3}$$

式中: μ_l —冷凝液动力粘度, Pa · s; δ —制冷剂汽化潜热, kJ/kg; c_i —强化倍率; λ_1 —制冷剂导热系数, W/(m · K); ρ_l —冷凝液密度, kg/m³; g —重力加速度, m/s²; d —强化管外径, m; t_s —制冷剂饱和温度, ℃; t_w —壁面温度, ℃。

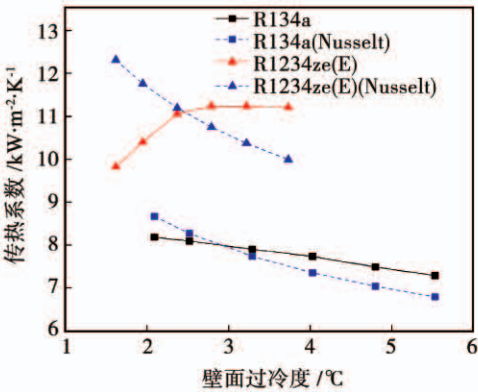


图 6 冷凝温度为 35 ℃ 时 R1234ze(E) 和 R134a 管外表面凝结传热系数与壁面过冷度的对比关系

Fig. 6 The comparison of the surface heat transfer coefficient of R1234ze(E) and R134a on wall subcooling degree outside the tubes when the condensation temperature is 35 ℃

从两种工质管外表面凝结传热系数的比较看,在实验的工况范围内, R1234ze(E) 高于 R134a 20% ~ 54%。

分析认为,两种工质管外表面凝结传热性能的差异是制冷剂物性与管型结构的匹配特性的不同造成的。也有学者研究的结果是 R134a 的凝结换热性能好于 R1234ze(E),说明不同的强化管表面结构适用于不同的制冷剂。这意味着,要用 R1234ze(E) 替代 R134a,需寻求合适结构的强化管,以获得更强

的凝结换热性能。

R134a 的管外表面凝结传热系数随过冷度的增大而减小,而 R1234ze(E) 的管外表面凝结传热系数随过冷度的增大先增大后减小。R134a 的管外表面凝结传热系数的变化趋势与 Nusselt 修正模型的趋势很接近,这与 Chen 等人^[10]的研究结果一致。通过对比发现 Nusselt 修正模型的斜率大于 R134a 实验数据的斜率。分析认为,随着壁面过冷度的增大,管外冷凝液膜增厚,而在实验管翅片间的凹槽强化结构有效地促进了冷凝液的排放,使冷凝液膜变薄,热阻减小。因此,随着壁面过冷度的增大,管外表面凝结传热系数的递减趋势要弱于 Nusselt 修正模型。

与 R134a 不同,R1234ze(E) 的管外表面凝结传热系数的变化趋势与 Nusselt 修正模型的趋势差距较大,说明不同制冷剂与强化管匹配的性能有较大的差异。分析认为,在较低过冷度(低热流密度)区域,随着过冷度增大,蒸汽凝结速率增大,产生液膜波动增强。同时,R1234ze(E) 在低翅表面的换热增强作用明显。随着过冷度继续增大至高过冷度(高热流密度),凝结液膜变厚引起热阻逐渐增加。因此,在高热流区,管外凝结表面传热系数的增长速度趋于平缓并转为下降。

在实际应用中,应寻找最优热流密度区间 q_0 (本文 R1234ze(E) 为 $2.5 \sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 过冷度,对应 $30 \sim 35 \text{ kW/m}^2$),以达到凝结换热效果的最大化。

2.3 管外凝结换热关联式

为研究制冷剂物性对强化管管外凝结换热特性的影响,用较为成熟的预测模型与实验数据比较,进行了管外凝结换热关联式的拟合。

Al-Badri^[11] 和 Reif A^[12] 等多名学者^[13-16] 都进行了关于管外凝结换热关联式的研究。采用 HOLMAN^[17] 提出的无量纲冷凝数定义:

$$Cn = h_o \left(\frac{\mu_1^2}{\rho_1 \cdot \Delta\rho \cdot g \cdot \lambda_1^3} \right)^{1/3} \quad (4)$$

根据参考文献[11],将冷凝数 Cn 表达(以下称为 Reif A 模型)为:

$$Cn = C \cdot Re_f^x \cdot Bo^y \cdot Ro^z \quad (5)$$

$$Re_f = 2qA_o/\mu_1 l r \quad (6)$$

$$Bo = d_o \Delta\rho g s / \sigma \quad (7)$$

$$Ro = \alpha_w^2 / gh^3 \quad (8)$$

式中: Cn —冷凝数; Bo —邦德数,表征重力与表面张

力之比; Ro —管件热扩散率和翅高的关系; $\Delta\rho$ —冷凝液与制冷剂蒸汽密度差, kg/m^3 ; q —热流密度, W/m^2 ; A_o —传热面积, m^2 ; r —凝结潜热, kJ/kg ; l —管长, m ; S —翅片间距, m ; σ —表面张力, N/m ; α_w —热扩散率, m^2/s ; h —翅片高度, m ; C —常量;上角标 x, y, z —待定系数。

采用 Reif A 模型对 R134a 和 R1234ze(E) 的实验数据进行多元线性回归拟合,得到冷凝数 Cn 的计算关联式:

$$Cn = Re_f^{-1/3} \cdot Bo^{-2.64} \cdot Ro^{7.44} \quad (9)$$

通过式(9)可以求得理论上的管外凝结表面传热系数,与试验值相比较,如图7所示。通过比较可知,有78%的理论值与试验值结果在 $\pm 30\%$ 的误差范围内。该关联式对不同制冷剂在强化管外的凝结换热性能有一定的预测作用。

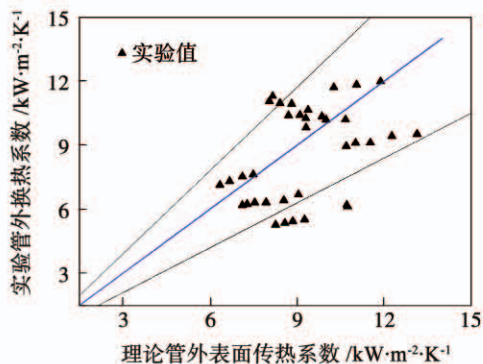


图7 关联式预测结果与实验结果误差

Fig. 7 The relationship between experimental data and calculated data

3 结 论

(1) 在一种水平双侧强化管管外的凝结实验表明,制冷剂 R1234ze(E) 的表面凝结传热系数比 R134a 高 $20\% \sim 54\%$,这种差异是由于制冷剂物性与管型结构的匹配特性所造成的。不同的强化管表面结构适用于不同的制冷剂,用 R1234ze(E) 替代 R134a,需寻求合适结构的强化管,以获得凝结换热性能的增强。

(2) R134a 管外表面凝结传热系数随着壁面过冷度的增大而减小,与 Nusselt 修正模型的预测趋势较吻合,两者斜率不同的主要原因是强化管表面的凹槽结构有效促进了凝结液的排放。

(3) R1234ze(E) 的管外表面凝结传热系数随

着壁面过冷度的增大总体呈先增大后减小的趋势,与Nusselt修正模型的预测偏差较大,呈现独特的性能特征。这一性能特征提示可寻找最优热流密度区间 q_o ,以达到最优的凝结表面传热效果。

(4) R134a的管外表面凝结传热系数随着冷凝温度的升高而增大,R1234ze(E)的管外表面凝结传热系数随冷凝温度升高呈现波动性。

(5) 采用Reif A模型,通过实验数据拟合出了强化管外凝结换热关联式。

参考文献:

- [1] 陈光明,高 能,朴春成. 低碳制冷剂研究及应用最新进展[J]. 制冷学报,2016,37(1):1-11,31.
CHEN Guang-ming, GAO Neng, PIAO Chun-cheng. State of the Art of Research and Applications of Low-carbon Refrigerants[J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(1): 1-11, 31.
- [2] PACHAURI K. MEYER A. Climate Change 2014 Synthesis Report [J]. Environmental Policy Collection, 2014, 27(2): 408.
- [3] HOSSAIN M A, ONAKA Y, MIYARA A. Experimental study on condensation heat transfer and pressure drop in horizontal smooth tube for R1234ze(E), R32 and R410A[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(4): 927-938.
- [4] MOTA B A, NAVARRO E J, BARRAGÁN Á, et al. Drop-in energy performance evaluation of R1234yf and R1234ze(E) in a vapor compression system as R134a replacements[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 71(1): 259-265.
- [5] 欧阳新萍,舒 涛,刘冰儋. R410A、R404A、R407C在水平强化换热管外的凝结换热[J]. 化工进展, 2017, 36(2): 481-486.
OUYANG Xin-ping, SHU Tao, LIU Bing-xiao. Experimental study of condensation heat transfer performance of R410A, R404A and R407C on horizontal enhanced tubes[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(2): 481-486.
- [6] CHEN T. Condensation of different refrigerants on the outside surface of smooth cylindrical tubes[C]//ASME 2017 Heat Transfer Summer Conference-Bellevue, Washington, USA 2017.
- [7] 燕志鹏,刘 建,张 刚,等. R22, R410A, R407C和R134a在花瓣翅片管束外的凝结传热强化[C]//中国化工学会年会暨全国石油和化工行业节能节水减排技术论坛, 2011.
YAN Zhi-peng, LIU Jian, ZHANG Gang, et al. Condensation heat transfer enhancement of R22, R410A, R407C and R134a outside the petal-finned tube bundle[C]//China Chemical Industry Association Annual Conference and National Petroleum and Chemical Industry Energy Conservation, Water Conservation and Emission Reduction Technology Forum, 2011.
- [8] D SÁNCHEZ, CABELLO R, LLOPIS R, et al. Energy performance evaluation of R1234yf, R1234ze(E), R600a, R290 and R152a as low-GWP R134a alternatives[J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 74: 269-282.
- [9] 欧阳新萍,袁道安,张同荣. R404A在水平强化管外的凝结实验及数据处理方法[J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 92-97.
OUYANG Xin-ping, YUAN Dao-an, ZHANG Tong-rong. Condensing test of R404A outside horizontal enhanced tubes and method of data processing[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(1): 92-97.
- [10] CHEN T, WU D. Enhancement in heat transfer during condensation of an HFO refrigerant on a horizontal tube with 3D fins[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 124: 318-326.
- [11] AL B A R, GEBAUER T, LEIPERTZ A, et al. Element by element prediction model of condensation heat transfer on a horizontal integral finned tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 62(7): 463-472.
- [12] REIF A V. Kondensation von Reinstoffen an horizontalen Rohren [D]. Technische Universität München, 2016.
- [13] BELGHAZI M, BONTEMPS A, SIGNE J C, et al. Condensation heat transfer of a pure fluid and binary mixture outside a bundle of smooth horizontal tubes. Comparison of experimental results and a classical model [J]. International Journal of Refrigeration, 2001, 24(8): 841-855.
- [14] GEBAUER T, AL B A R, GOTTERBARM A, et al. Condensation heat transfer on single horizontal smooth and finned tubes and tube bundles for R134a and propane[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2013, 56(1-2): 516-524.
- [15] MITROVIC J. Condensation of pure refrigerants R12, R134a and their mixtures on a horizontal tube with capillary structure: An experimental study [J]. Forschung Im Ingenieurwesen, 1999, 64(12): 345-359.
- [16] KUMAR R, VARMA H K, MOHANTY B, et al. Augmentation of heat transfer during filmwise condensation of steam and R-134a over single horizontal finned tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(1): 201-211.
- [17] HOLMAN J P. Heat transfer[M]. New York: Mc Graw Hill, 1989.

(刘 颖 编辑)