

文章编号:0253-4339(2020)04-0111-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.04.111

小通道钎焊板式冷凝器性能仿真与实验研究

顾 屹¹ 谢 建² 张 俊² 丁天毅² 施骏业^{1,3} 陈江平^{1,3}

(1 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240; 2 浙江银轮机械股份有限公司 天台 317200;
3 上海市高效冷却系统工程技术研究中心 上海 200240)

摘 要 本文针对当量直径为 1.5 mm 的小通道钎焊板式冷凝器的换热和压降特性进行了仿真和实验研究。采用有限体积法建立了一维稳态分布参数模型,对 R134a 和 R1234yf 两种制冷剂在板间冷凝换热的性能进行仿真模拟,并对模型进行了实验验证。实验结果表明:本文所建立的仿真模型精度较高,换热性能平均误差为 4%,压降平均误差为 16%,可用于分析换热器的整体性能。最后用此模型仿真对比了 R134a 和 R1234yf 在小通道钎焊板式换热器内的冷凝换热特性,结果显示,在相同工况下,用 R1234yf 替代 R134a,传热系数平均下降 9%,压降平均下降 8%。
关键词 板式冷凝器;小通道;传热系数;压降
中图分类号:TB61⁺1;TB657.5 **文献标识码**:A

Simulation and Experimental Study on Performance of a Mini-channel Brazed Plate Condenser

Gu Yi¹ Xie Jian² Zhang Jun² Ding Tianyi² Shi Junye^{1,3} Chen Jiangping^{1,3}

(1.Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China; 2.Zhejiang Yinlun Machinery Co., Ltd., Tiantai, 317200, China; 3. Shanghai High Efficient Cooling System Research Center, Shanghai, 200240, China)

Abstract Nowadays, miniaturization is a feasible course of action in the development of brazed plate heat exchangers. In this study, a mini-channel brazed plate condenser with an equivalent diameter of 1.5 mm was studied. The heat transfer and pressure drop characteristics were analyzed. First, a one-dimensional steady-state distribution parameter model was established by the finite volume method to compute the condensation performance of R134a and R1234yf. Second, an experiment was conducted to confirm the reliability of the simulation model. According to the experimental results, the simulation model has high precision. The average error of the heat transfer performance predicted by the model is 4%, and the average error of pressure drop predicted by the model is 16%. Finally, the simulation model was used to calculate the condensation heat transfer characteristics of R134a and R1234yf in the mini-channel brazed plate heat exchanger. The simulation results show that the heat transfer performance and pressure drop of R1234yf are 9% and 8% lower than that of R134a under the same condensation conditions.
Keywords plate condenser; mini-channel; heat transfer coefficient; press drop

钎焊板式换热器是板式换热器的一种,由一系列具有一定波纹形状的叠装金属片经过钎焊加工而成,具有结构紧凑、换热性能好、整体强度高、便于批量生产等优点,被广泛应用于供热、制冷、热回收等领域,有广阔的市场和应用前景^[1-2]。随着制造工艺水平的提高和市场的需要,钎焊板式换热器正向高效和小型化发展。在换热器的分类中,当量直径大于 3 mm 的为大通道,在 1~3 mm 之间的为小通道。相对于大通道换热器,小通道换热器的传热系数更高,在相同的换热效果下可以节约空间与材料。现有对板式换

热器的研究主要集中在大通道可拆卸板式换热器,部分对钎焊板式换热器的研究,其通道当量直径也均为 3 mm 以上。Z. H. Ayub 等^[3]对板式换热器单相换热的关联式进行了研究和总结。G. A. Longo 等^[4-7]对 R134a 和 R1234yf 在钎焊板式换热器内的两相换热特性进行研究,指出在同工况下,R1234yf 的传热和摩擦系数均低于 R134a。Yan Y. Y.等^[8-9]对 R134a 在板式换热器中的蒸发和冷凝分别进行实验研究,拟合出传热和摩擦系数关联式。邱峰等^[10]将 Yan Y. Y.等^[8]的模型应用到 R410A 板式蒸发器上,并进行修

正。Shi Z. Y.等^[11]研究了 R134a 在板式换热器内的局部冷凝传热系数,关联式选用 M. M. Shah^[12] 的模型,获得较好的精度。Zhang J. 等^[13] 对比研究了 R134a 和其他三种常用制冷剂在钎焊式板式换热器内的冷凝特性。Tao X. 等^[14] 总结了板式冷凝器内实验得到的传热和摩擦系数。除了实验研究,仿真模拟研究也是研究板式换热器性能经常使用的方法。J. A. W. Gut 等^[15] 建立了单相流体在板式换热器中的仿真数值模型,并进行了性能优化研究。Qiao H. 等^[16] 采用有限体积法,建立了稳态分布参数模型,可以计算流体相变换热,并且通过氨和 R22 蒸发实验对所建立的仿真模型进行验证。R. Eldeeb 等^[17] 选用 R134a 为工质,对 Qiao H. 等^[16] 的模型进行了冷凝实验验证。王杰等^[18] 针对板式冷凝器,建立了稳态分布参数模型,对比了模拟计算值和文献实验值,具有较好一致性。

本文研究一款当量直径为 1.5 mm 的小通道钎焊板式冷凝器,工质为制冷剂 R134a 及其可能替代品 R1234yf。首先基于有限体积法,建立一维稳态分布参数模型,选用合适的关联式,仿真模拟了两种工质在冷凝器内的换热和压降特性;然后对两种工质分别进行冷凝实验,验证了模型的可靠性;最后基于此模型,对比分析了 R134a 和 R1234yf 在相同工况下的冷凝传热系数和压降。

1 仿真模型

1.1 物理模型

本文使用一款小通道钎焊板式换热器,由 60 片相同的人字形波纹金属板叠加而成,板片的几何形状和尺寸如图 1 和表 1 所示。换热器内相邻的两板片互相倒置组合,波纹相互接触,形成复杂的流动断面

形状,使得流体能在低 Re 下形成湍流。制冷剂和载冷剂在相邻流动中通过板片进行换热,流动布置为单流程逆流。

表 1 换热器几何参数
Tab.1 Geometrical characteristics of the heat exchanger

参数	数值
板片长 L_{plate}/mm	150
进出口距离 L/mm	120
板片宽 W/mm	75
总传热面积 A/m^2	0.57
波纹角度 $\theta/(^{\circ})$	60
板片厚度 δ/mm	0.5
波纹高度 b/mm	0.8
波纹长度 τ/mm	3
当量直径 d_e/mm	1.5

1.2 数学模型

板式冷凝器中的换热涉及复杂的流体三维流动,为简化模拟过程,同时也加快计算速度,本文所建立的分布参数模型基于以下假设:1) 板式冷凝器各流动内流量均匀分配,流体为一维均相稳态流动;2) 只考虑板片径向导热,忽略其他方向的导热;3) 基于每个微元的入口条件评估流体性质,微元段内物性参数一致,传热系数和摩擦系数为定值,若在某一微元内发生相态改变,不会在此微元内进一步细分,而是在下一个微元中改变;4) 板壁不存在热容,即板壁两侧的温度相同;5) 与环境之间没有热交换。

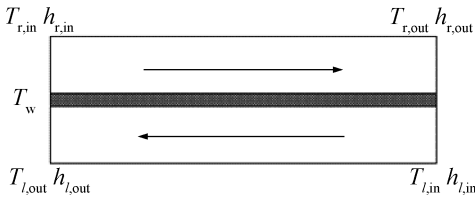


图 2 微元示意图
Fig.2 Schematic diagram of the micro-element

对于每个微元,建立如下方程控制组。

制冷剂侧能量方程:

$$Q_r = m_r(h_{r,in} - h_{r,out}) = \alpha_r A_i(T_{r,in} - T_{wall}) \quad (1)$$

水侧能量方程:

$$Q_l = m_l(h_{l,out} - h_{l,in}) = \alpha_l A_i(T_{l,in} - T_{wall}) \quad (2)$$

两侧能量平衡方程:

$$Q_r = Q_l \quad (3)$$

单相传热和摩擦系数采用 H. Martin^[19] 的关联式

图 1 板片几何结构
Fig.1 Schematic diagram of the plate

计算:

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d_e} \quad (4)$$

$$\Delta p = \frac{2fG^2L}{\rho d_e} \quad (5)$$

$$Nu = 0.122 Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_{ave}}{\mu_{wall}} \right)^{\frac{1}{6}} (f Re^2 \sin 2\theta)^{0.374} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{\cos \theta}{(0.18 \tan \theta + 0.36 \sin \theta + f_0/\theta)^{\frac{1}{2}}} + \frac{1 - \cos \theta}{\sqrt{3.8 f_1}} \quad (7)$$

$$f_0 = \begin{cases} \frac{16}{Re}, Re < 2000 \\ (3.6 \lg Re - 3)^{-2}, Re \geq 2000 \end{cases} \quad (8)$$

$$f_1 = \begin{cases} \frac{149}{Re} + 0.9625, Re < 2000 \\ \frac{9.75}{Re^{0.289}}, Re \geq 2000 \end{cases} \quad (9)$$

冷凝传热系数采用 M. M. Shah^[12] 关联式计算:

$$\alpha_r = \alpha_l \left[(1 - \chi)^{0.8} + \frac{3.8 \chi^{0.76} (1 - \chi)^{0.04}}{\left(\frac{P_{sat}}{P_{crit}} \right)^{0.38}} \right] \quad (10)$$

冷凝压降采用 Lockhart-Martinelli^[20] 的模型计算, 式中的 C 选用 D. Winkelmann^[21] 推荐的值。

$$\Delta p_r = \phi_l \Delta p_l \quad (11)$$

$$\phi_l = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2} \quad (12)$$

$$\chi^2 = \frac{\Delta p_l}{\Delta p_g} \quad (13)$$

$$\Delta p_l = 2f_l \frac{G_l^2}{\rho_l} \frac{L}{d_e} = 2f_l \frac{G^2 (1 - \chi^2)}{\rho_l} \frac{L}{d_e} \quad (14)$$

$$\Delta p_g = 2f_g \frac{G_g^2}{\rho_g} \frac{L}{d_e} = 2f_g \frac{G^2 \chi^2}{\rho_g} \frac{L}{d_e} \quad (15)$$

1.3 算法设计

采用有限体积法, 对通道在制冷剂流动方向上进行离散, 将每一个微通道划分成 n 个微元段, 对每个微元段进行换热和压降的计算, 以每个微元段的出口参数作为下一个微元段的入口参数, 依次迭代计算, 完成整个通道的流动和换热计算。仿真计算流程如图 3 所示。首先, 根据实际工况输入冷凝器结构参数、制冷剂和冷却水的进口参数和质量流量。假设制冷剂侧出口焓值, 可得制冷剂侧总换热量 Q 。根据制冷剂侧出口焓值和水侧入口温度, 依次计算每个微元内的传热系数和压降, 其中计算传热系数时, 需要用

到板壁温度下的物性参数, 所以也必须同时迭代计算出板片的壁温。所有微元依次计算后, 将每个微元的换热量相加得到总换热量 Q_m , 由于制冷剂出口焓值为假设值, 若 $Q \neq Q_m$, 则重新假设制冷剂出口焓值, 继续上述计算, 直至 $Q = Q_m$, 输出计算结果。

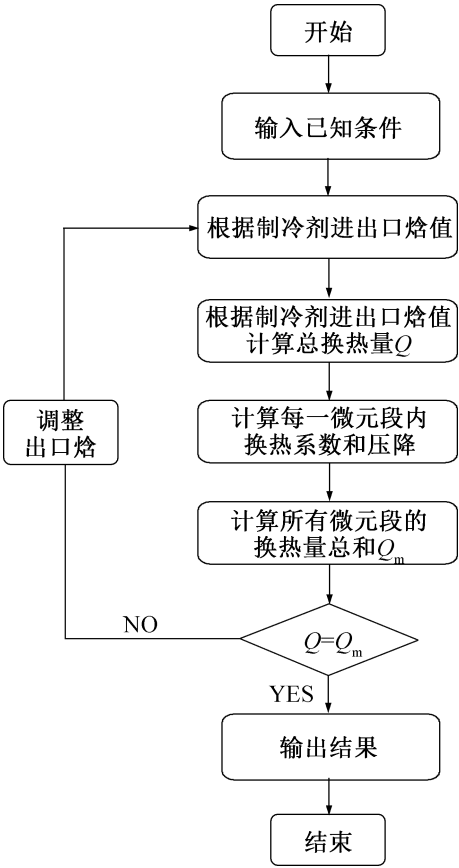


图 3 仿真计算流程图
Fig.3 Simulation flow chart

2 实验方案

2.1 实验原理

实验系统由制冷剂回路、水回路两个回路组成, 如图 4 所示。制冷系统主要由压缩机、蒸发器、冷凝器和电子膨胀阀这四件组成。此外, 还有油分离器、气液分离器、视液镜、辅助冷凝器、止回阀等装置。在制冷剂回路中, 制冷剂经压缩机进入油分离器, 在前冷凝器中达到设定的工况条件后进入待测板式换热器, 然后在后冷凝器中完全过冷, 再经由膨胀阀、蒸发器和气液分离器后回到压缩机, 形成一个完整的循环。水路由恒温水箱提供恒定温度的水流, 在板式换热器中和制冷剂进行换热。

2.2 实验流程

实验开始前, 检查设备、管线的可靠性和气密性, 对热电偶、压力传感器和流量计进行校准。实验开始

度和速度,将模型离散微元数定为 30。

3.2 仿真模型验证

为了验证仿真程序的准确性和合理性,用实验里的工况作为输入参数,将仿真结果与实验结果进行对比。对比结果如图 6 和图 7 所示,换热量误差绝大多数均在 10% 以内,最大误差 13%,平均误差 4%;压降误差绝大多数均在 20% 以内,最大误差 34%,平均误差 16%。验证结果表明,仿真模型的精度较高,可以用来分析研究换热器的整体性能。

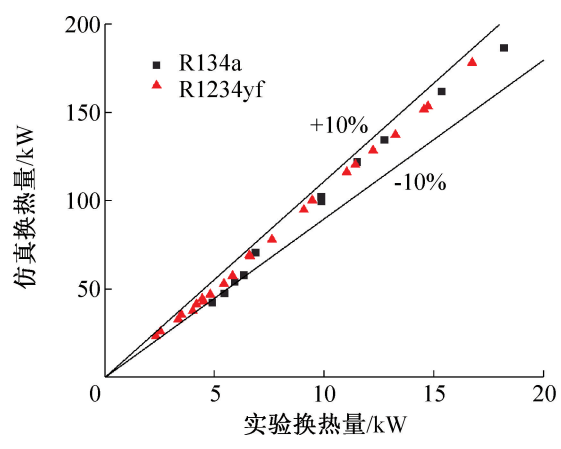


图 6 仿真与实验换热量对比

Fig.6 Comparison between experimental and calculated heat exchange

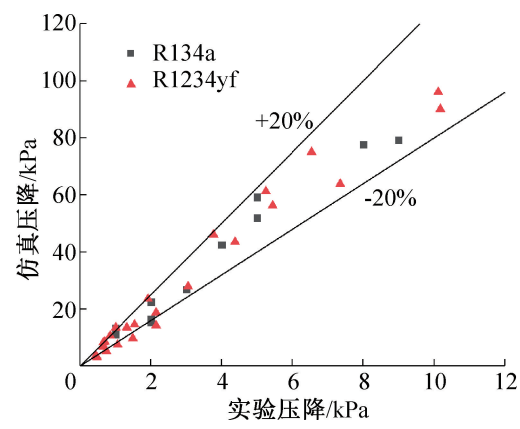


图 7 仿真与实验压降对比

Fig.7 Comparison between experimental and calculated pressure drop

3.3 制冷剂对比

为研究在小通道钎焊板式冷凝器内 R1234yf 替代 R134a 的效果,用校准好的仿真模型,在相同工况下分别用 R134a 和 R1234yf 进行冷凝计算。制冷剂进口均为干度为 1 的 50 ℃ 饱和蒸气,水侧进口温度为 40 ℃,制冷剂质量通量为 20~32 kg/(m²·s),调节水侧流量,使得制冷剂出口干度为 0。结果输出为制冷剂侧的传热系数和压降,如图 8 和图 9 所示。计算

结果显示,用 R1234yf 直接替代 R134a,传热系数平均下降 9%,压降平均下降 8%。

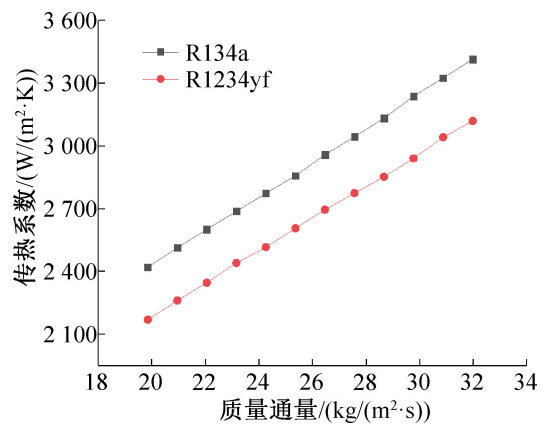


图 8 传热系数随质量通量变化

Fig.5 The heat transfer coefficient changes with the mass flux

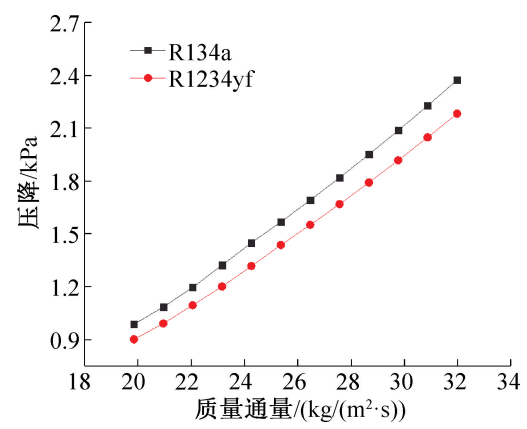


图 9 压降随质量通量变化

Fig.9 The press drop changes with the mass flux

4 结论

本文对小通道钎焊板式冷凝器进行了研究,建立了一维稳态分布参数模型,通过实验对模型进行了验证,并在相同工况下分别计算了 R134a 和 R1234yf 在板内的冷凝特性,得到如下结论:

- 1)小通道钎焊板式冷凝器的一维稳态分布参数模型选用 M. M. Shah^[12] 的冷凝换热关联式、Lockhart-Martinelli^[20] 的冷凝压降关联式以及 H. Martin^[19] 的单相换热和摩擦系数关联式,微元划分数到 30 时,具有较好的精度。通过 35 个有效的 R134a 和 R1234yf 冷凝实验点对仿真结果进行了验证。结果显示,仿真模型换热量平均误差为 4%,压降平均误差为 16%,可用于指导小通道钎焊板式冷凝器的设计和选型。
- 2)在小通道钎焊板式冷凝器内用 R1234yf 替代 R134a,在相同模拟工况下,传热系数和压降均有下降。在制冷剂冷凝温度为 50 ℃、质量通量为 20~32

kg/(m²·s)、水侧进口温度为 40℃ 的工况范围内,传热系数平均下降 9%,压降平均下降 8%。

符号说明

- A——传热面积,m²
 - b——波纹高度,mm
 - d_e——当量直径,mm
 - f——摩擦系数
 - FS——量程
 - G——质量通量,kg/(m²·s)
 - h——焓值,kJ/kg
 - L_{plate}——板片长度,mm
 - L——板片进出口距离,mm
 - m——质量流量,kg/h
 - p——压力,Pa
 - Δp——压降,Pa
 - Q——换热量,W
 - T——温度,℃
 - W——板片宽度,mm
 - α——传热系数,W/(m²·K)
 - δ——板片厚度,mm
 - θ——波纹角度,mm
 - λ——导热系数,W/(m·K)
 - μ——动力黏度,Pa·S
 - ρ——密度,kg/m³
 - τ——波纹长度,mm
 - χ——干度
 - Re——雷诺数
 - Nu——努塞尔数
 - Pr——普朗特数
- 下标
- ave——平均
 - crit——临界
 - sat——饱和
 - i——微元
 - l——单相液体
 - g——单相气体
 - r——制冷剂
 - in——进口
 - out——出口
 - wall——板壁

参考文献

[1] 杨崇麟. 板式换热器工程设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. (YANG Chonglin. Plate heat exchanger engineering design manual [M]. Beijing: China Machine Press, 1994.)

[2] 程宝华, 李先瑞. 板式换热器及换热装置技术应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. (CHENG Bao-

hua, LI Xianrui. Plate heat exchanger and heat exchanger technology application manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.)

[3] AYUB Z H. Plate heat exchanger literature survey and new heat transfer and pressure drop correlations for refrigerant evaporators[J]. Heat Transfer Engineering, 2003,24(5): 3-16.

[4] LONGO G A, GASPARELLA A. Refrigerant R134a vaporisation heat transfer and pressure drop inside a small brazed plate heat exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2007,30(5):821-830.

[5] LONGO G A. Refrigerant R134a condensation heat transfer and pressure drop inside a small brazed plate heat exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2008,31(5): 780-789.

[6] LONGO G A. Vaporisation of the low GWP refrigerant HFO1234yf inside a brazed plate heat exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2012,35(4):952-961.

[7] LONGO G A, ZILIO C. Condensation of the low GWP refrigerant HFC1234yf inside a brazed plate heat exchanger [J]. International Journal of Refrigeration, 2013,36(2): 612-621.

[8] YAN Y Y, LIN T F. Evaporation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a plate heat exchanger[J]. Journal of Heat Transfer, 1999,121(1):118-127.

[9] YAN Y Y, LIO H C, LIN T F. Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-134a in a plate heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999,42(6):993-1006.

[10] 邱峰, 谷波, 曾伟平, 等. 基于 R410A 的板式换热器两相仿真计算模型[J]. 制冷学报, 2010,31(1):39-44. (QIU Feng, GU Bo, ZENG Weiping, et al. Simulation on heat transfer and pressure drop of R410A two-phase flow in plate heat exchanger[J]. Journal of Refrigeration, 2010,31(1):39-44.)

[11] SHI Z Y, CHEN J P, GRABENSTEIN V, et al. Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of R134a in a plate heat exchanger[J]. Heat and Mass Transfer, 2010,46(10):1177-1185.

[12] 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.

[13] ZHANG J, KÆRN M R, OMMEN T, et al. Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of R134a, R1234ze(E), R245fa and R1233zd(E) in a plate heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019,128:136-149.

[14] TAO X, INFANTE FERREIRA C A. Heat transfer and frictional pressure drop during condensation in plate heat

- exchangers: Assessment of correlations and a new method [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 135: 996–1012.
- [15] GUT J A W, PINTO J M. Modeling of plate heat exchangers with generalized configurations[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(14): 2571–2585.
- [16] QIAO H, AUTE V, LEE H, et al. A new model for plate heat exchangers with generalized flow configurations and phase change [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(2): 622–632.
- [17] ELDEEB R, AUTE V, RADERMACHER R. A model for performance prediction of brazed plate condensers with conventional and alternative lower GWP refrigerants[EB/OL]. (2014-02-06) [2019-07-09]. <https://docs.lib.purdue.edu/iracc/1426/>.
- [18] 王杰, 胡云鹏, 陈焕新, 等. 热泵热水系统中水平平直波纹板式冷凝器性能研究[J]. *制冷与空调(四川)*, 2015, 29(4): 363–367. (WANG Jie, HU Yunpeng, CHEN Huanxin, et al. Research on the performance of flat corrugated plate condenser in heat pump hot water system [J]. *Refrigeration and Air Conditioning*, 2015, 29(4): 363–367.)
- [19] MARTIN H. A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 1996, 35(4): 301–310.
- [20] CHISHOLM D. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1967, 10(12): 1767–1778.
- [21] WINKELMANN D. Condensation of pure refrigerants and their zeotropic mixtures in plate heat exchangers [J]. *Toward a Better Design Method*, 2010, 11.

通信作者简介

陈江平,男,博士,教授,博士生导师,上海交通大学制冷与低温工程研究所,(021)34206775,E-mail:jpchen_sjtu@163.com。研究方向:车用空调、节能环保技术、换热器设计优化等。

About the corresponding author

Chen Jiangping, male, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 21-34206775, E-mail: jpchen_sjtu@163.com. Research fields: mobile air-conditioning technology, energy saving and environmental protection technology, thermal design and optimization of heat exchangers.