Development of Energy Science
Volume 4, 2016, PP.41-48

Evaporating Heat Transfer Characteristics of R123 in a Double–pipe Evaporator

Mingjun Zhou,Jingfu Wang†, Xinxin Zhang

Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China

†Email: jfwang@bjut.edu.cn

Abstract

In this paper, flow boiling heat transfer characteristics of R123 inside a double-pipe evaporator at two different saturation pressure, 0.152MPa and 0.2MPa, are experimentally investigated with various mass flow rates of working fluid, different heat fluxes and various vapor qualities. Under the same experimental condition, flow boiling heat transfer coefficients are calculated using Shah's correlation, Gungor-Winterton's correlation and Kandlikar's correlation. The investigation results show that flow boiling heat transfer coefficient increases as the working fluid mass flow rate increases, when the saturation pressure and heat fluxes are constant. It also increases as the heat flux increases, when the saturation pressure and mass flow rate are constant. And it increases as the saturation pressure increases, when the heat fluxes and mass flow rate are constant. However, it increases first and then decreases as the vapor quality increases. Comparing the heat transfer coefficient of experimental results with that correlation values using Shah's correlation, Gungor-Winterton's correlation and Kandlikar's correlation, it can be seen that the experimental results have a good agreement with Kandlikar's correlation.

Keywords: R123; Flow; Heat Transfer; Mass Flow Rate; Evaporation; Correlation

R123 在套管式蒸发器中的换热特性

周明君[1,2]，王景甫[1,2]，张新欣[1,2]

1．北京工业大学传热强化与过程节能教育部重点实验室，北京 100124

2．北京工业大学传热与能源利用北京市重点实验室，北京 100124

摘 要：该文对饱和压力分别为 0.152MPa 和 0.2MPa 的 R123 在水平套管蒸发器中的换热特性进行了实验研究。探讨了工质质量流速、热流密度、蒸发压力以及工质干度对管内流动沸腾换热系数的影响规律。同时，分别采用 Shah 关联式、Gungor-Winterton 关联式以及 Kandlikar 关联式对相同实验工况下 R123 的管内流动沸腾换热系数进行了计算，并与实验结果进行了对比。结果表明：当蒸发压力和热流密度一定时，管内流动沸腾换热系数随工质质量流速的增大而增大；当蒸发压力和质量流速一定时，随热流密度的增大而增大；当热流密度和质量流速一定时，随蒸发压力的升高而增大，而随工质干度的增大先增大后减小。相较于 Shah 关联式和 Gungor-Winterton 关联式，采用 Kandlikar 关联式计算精度更高。

关键词：R123；流动；传热；质量流速；蒸发；关联式

引言

目前，利用有机朗肯循环（Organic Rankine Cycle，ORC）系统对余热资源进行回收利用是节能的有效手段。ORC 系统主要包括工质泵、蒸发器、膨胀机及冷凝器四大部件。在系统运行过程中，有机工质在进入膨胀机膨胀做功之前需要先经过蒸发器吸热依次成为饱和蒸气、气液两相流或者过热蒸气。因此，蒸发器的合理选配设计对于提高 ORC 系统的整体性能至关重要。在设计 ORC 系统蒸发器时，认为工质在预热段主要进行的是单相对流传热，对于管道内的强制对流传热，应用时间最长也最普遍的关联式是 Dittus—

国家重点基础研究发展计划（973 计划）资助（2013CB228306）；国家自然科学基金项目资助（NO.51506001）

Boelter 公式，由于其形式简单，目前仍在工程上广泛应用[1]。而在工质的受热蒸发段，对于管内流动沸腾换热，由于产生的蒸气混入液流，出现多种不同形式的两相流结构，目前在工程上没有统一标准的传热计算关联式，对于蒸发器的设计也没有参照的标准。因此，实验研究有机工质的换热特性可以为 ORC 中蒸发器的合理选配设计提供理论依据。

R123（2,2-二氯-1,1,1-三氟乙烷）作为 R11 的过渡性替代物，其热力性质与 R11 接近，临界压力较低（3.66MPa），ODP 值为 0.02，GWP100 的值为 93，虽然 R123 对臭氧层具有破坏作用且存在温室效应，但其综合性能很好，能够作为制造其它制冷剂的副产品进行生产[2]。此外，R123 是干流体，无需过热就可避免工质在汽轮机中膨胀做功时进入湿区，可节省换热器的面积，降低设计成本[3]。相关研究表明，在 ORC 系统中，当回收热量一定时，相同工况下采用 R123 作为循环工质的热效率高于 R245fa[4]。在回热型有机朗肯循环中，采用 R134a 和 R123 作为循环工质从系统效率、输出功以及不可逆损失等方面进行分析，结果表明 R123 要比 R134a 具有更好的性能表现[5]。综上，研究结果均表明 R123 具有良好的循环性能且十分适用于 ORC 系统。如果对 ORC 系统进行优化，蒸发器是其中尤为关键的一部分，对工质在蒸发器中如何高效合理地与热源进行换热以及蒸发器的设计选型均有必要进行深入研究。尤其是工质在蒸发器中的换热特性尤为重要，但国内外关于有机工质 R123 在水平管中流动沸腾换热特性的研究还不够充分。

故本文在前人研究的基础上以一台套管式蒸发器，实验研究 R123 在其中的换热特性，并将实验结果与利用经验关联式计算得出的理论值进行对比分析，最终，筛选出更适用于计算工质管内换热系数的关联式，从而为有机朗肯循环系统中蒸发器的设计选型提供合理准确的指导。

1 实验系统搭建及实验原理

1.1 实验装置

图 1 为研究 R123 在水平套管换热器中换热特性的实验系统示意图。如图所示，整个实验系统主要由 3 个独立的流动回路组成，分别为：R123 回路、加热水回路和冷却液回路。此外，还包括数据采集系统和工质预热系统。

R123 回路主要包括工质泵、干燥过滤器、工质质量流量计、预热器、压力变送器、实验测试管段、蒸发压力调节阀、冷却器、储液罐等。从储液罐流出的液态工质经工质泵加压以后，流经质量流量计和预热器后进入实验测试管段与热水进行逆流换热。之后，从实验测试管段流出的工质经冷却器冷却成液态后重新流回储液罐完成一次循环。在实验过程中，系统的压力和流量通过与工质泵连接的变频器和蒸发压力调节阀进行调节。

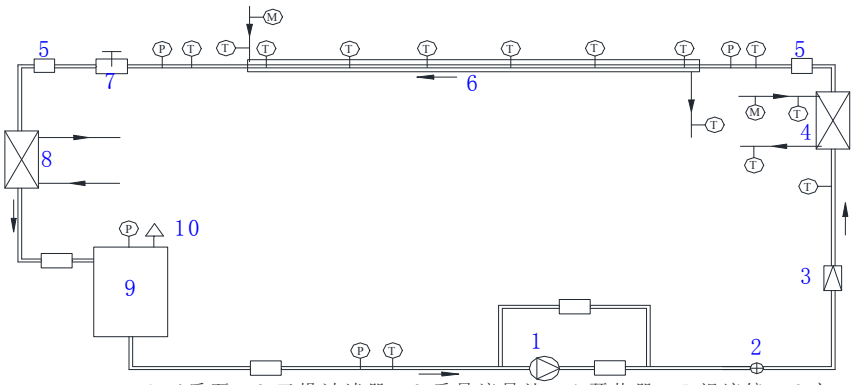


图 1 实验系统示意图

加热水回路主要包括水加热器、电磁流量计等。热水从水加热器中流出以后，经电磁流量计后流入实验测试管段与套管内的工质换热，最后重新流回水加热器完成一次循环。

冷却液回路主要由低温恒温槽、板式换热器组成。本实验中采用的冷却液是水和乙醇的混合溶液，其最低温度为-5℃。在实验过程中，冷却液由一台低温恒温槽提供。冷却液从低温恒温槽中流出，经板式换热器将工质进行冷却后重新流回低温恒温槽，完成一次循环。

1.2 实验测试管段

本实验中，采用一根同心套管换热器作为测试管段，如图 2 所示，同心套管有效长度为 1.3m，外管为不锈钢管（外径 32mm，壁厚 2mm）并且对其外表面进行保温处理，内管为硬质紫铜管（外径 10mm，壁厚 1mm）。

在实验测试管段上等间距选取 7 个截面，每个截面上布置 3 个 Pt100 温度传感器（规格：A 级，精度：0.5%），分别测量管内工质温度、紫铜管外壁温度及环形区域内加热水的温度，温度传感器的安装布置如图 3 所示。

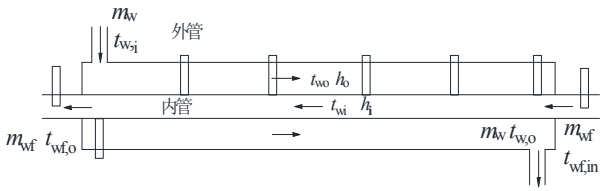


图 2 实验换热测试管段示意图

本实验以热水为热源，主要研究 R123 在饱和压力分别为 0.152MPa 和 0.2MPa 时，在水平套管换热器中的流动沸腾换热特性。主要包括工质质量流速、热流密度、工质干度以及蒸发压力对工质在整个实验测试管段中的流动沸腾换热系数的影响规律。同时，并将实验结果与典型的半经验关联式的计算结果进行对比。

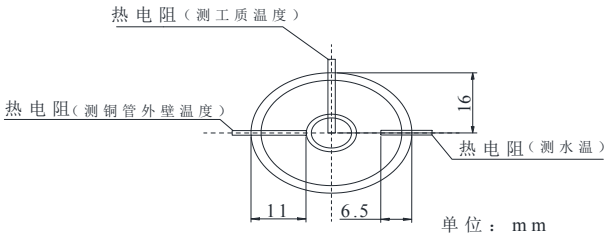


图 3 温度传感器布置示意图

1.3 实验原理

在实验中对套管换热器外壁进行了保温处理，因此，热水向环形区域外的散热量可以忽略不计，故可认为热水在测试管段的放热量等于管内工质的吸热量，即：

$$Q_w = Q_{wf} \tag{1}$$

式中，Q_w——热水放热量，W；Q_{wf}——工质吸热量，W。其中：

$$Q_w = m_w c_{p,w}(t_{in} - t_{out}) \tag{2}$$

式中，m_w——加热水的质量流量，$kg \cdot s^{-1}$；$c_{p,w}$——水的定压比热容，取 $4180J \cdot kg^{-1} \cdot k^{-1}$；$t_{in}$、$t_{out}$——测试管段所选两侧点间水的进、出口温度，℃。

根据布置在铜管外壁的温度传感器可测得两测点之间外壁的平均温度 $\bar{t}_{w,o}$，两测点间铜管内壁的平均温度可由下式得到：

$$\bar{t}_{\mathrm{w,i}}=\bar{t}_{\mathrm{w,o}}-\frac{Q_{\mathrm{wf}}}{L}\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{d_{\mathrm{o}}}{d_{\mathrm{i}}} \tag{3}$$

式中，L——两测点之间的管长，m；λ——紫铜管的导热系数，$\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$；$d_{\mathrm{o}}$——紫铜管外径，m；$d_{\mathrm{i}}$——紫铜管内径，m。

若工质在实验测试管段进行的是单相对流传热，则工质在两测点之间的平均表面换热系数为：

$$h_{\mathrm{aver,pool}}=\frac{Q_{\mathrm{wf}}}{A_{\mathrm{i}}(\bar{t}_{\mathrm{w,i}}-\bar{t}_{\mathrm{wf}})} \tag{4}$$

式中，A_{i}——两测点之间紫铜管内壁表面积，$\mathrm{m^2}$；$\bar{t}_{\mathrm{wf}}$——两测点之间工质的平均温度，℃，可由温度传感器测量得到。

若工质在实验测试管段内进行的是流动沸腾换热，则工质在两测点之间的平均流动沸腾换热系数如下：

$$h_{\mathrm{aver,boiling}}=\frac{Q_{\mathrm{wf}}}{A_{\mathrm{i}}(\bar{t}_{\mathrm{w,i}}-t_{\mathrm{sat}})} \tag{5}$$

式中，t_{sa}——工质在实验测试管段对应的饱和温度，℃。两测点之间的平均流动沸腾换热系数在实验数据处理过程中可作为局部流动沸腾换热系数处理。

两测点之间干度的变化[6]：

$$\Delta x=\frac{Q_{\mathrm{wf}}}{m_{\mathrm{wf}}r_{\mathrm{i}}} \tag{6}$$

式中，m_{wf}——工质的质量流量，$\mathrm{kg\cdot s^{-1}}$；r_{i}——工质在对应饱和温度下的汽化潜热，$\mathrm{J\cdot kg^{-1}}$。

两测点之间的平均干度：

$$x_{\mathrm{aver}}=x_{\mathrm{in}}+\frac{\Delta x}{2} \tag{7}$$

式中，x_{in}——工质的进口干度。

2 实验结果及分析

2.1 单相对流换热系数

对饱和压力为 0.152MPa，出口温度低于饱和温度时，R123 的单相对流换热系数随工质质量流速的变化规律进行了实验研究并且，利用 Dittus-Boelter 公式[1]进行了理论计算。两者对比结果如图 4 所示，可以看出，实验值与理论值之间的平均误差为±6%，这在一定程度上验证了实验过程中热量守恒及实验的准确性与可靠性。

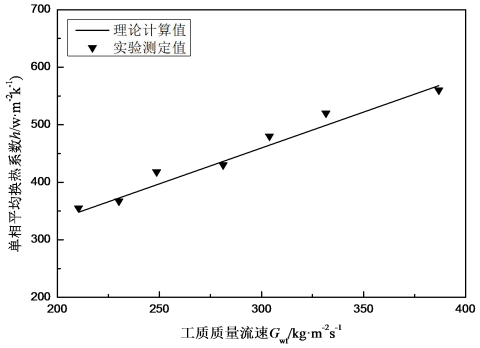


图 4 单相换热系数实验值与 Dittus-Boelter 公式计算值比较

2.2 流动沸腾换热系数

图 5 所示为 R123 在饱和压力为 0.152MPa、热流密度为 15kW·m^{-2} 时，管内局部流动沸腾换热系数随工质质量流速的变化情况。从图中可以看出，当热流密度一定时，R123 的局部流动沸腾换热系数同时受工质干度和工质质量流速的影响。同时，工质的局部流动沸腾换热系数随质量流速的增大而增大；而随工质干度的增大呈现先增大后减小趋势，且在工质干度为 0.5-0.6 之间存在一个最大值。这是由于在沸腾的初始阶段，含气率较低，液体与壁面之间的传热机理与管内单相液体的对流传热基本相同，随着气泡数量增加含气率不断提高同时气泡的扰动作用增强，引起传热强度增大，工质的流动沸腾换热系数随之升高；之后随管内含气率的继续增大，气体越来越多，管内的换热过程进入缺液区[7]，流体与壁面的换热受到阻碍，故工质的流动沸腾换热系数开始下降。

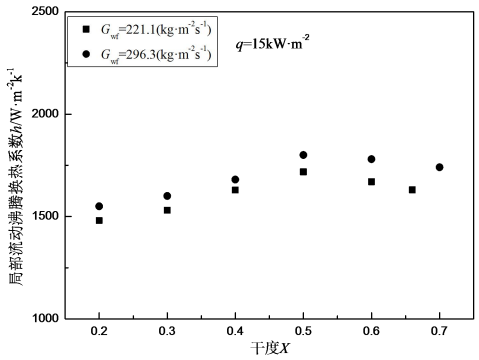


图 5 R123 局部流动沸腾换热系数随质量流速的变化

图 6 所示为 R123 在饱和压力为 0.2MPa、质量流速为 281.8kg·m^{-2}s^{-1} 时，管内局部流动沸腾换热系数随管内热流密度的变化情况。从图中可以看出，当工质质量流速一定时，管内局部流动沸腾换热系数同时受到热流密度和工质干度的影响，且随热流密度的增大而增大，随工质干度的增加呈先增大后减小趋势。由于上述同样的原因，干度在 0.4-0.5 之间时，管内局部流动沸腾换热系数存在一个最大值。

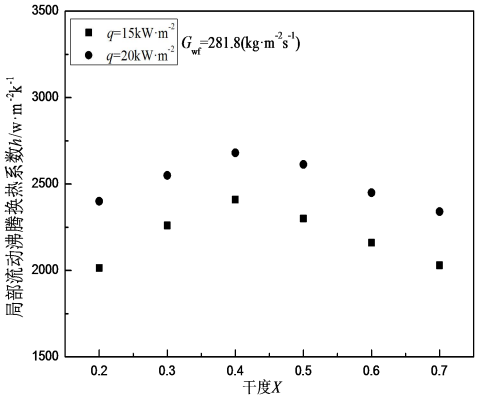


图 6 R123 局部流动沸腾换热系数随热流密度的变化

图 7 所示为 R123 在热流密度为 15kW·m^{-2}，质量流速为 296.3kg·m^{-2}s^{-1} 时，管内局部流动沸腾换热系数随工质饱和压力的变化情况。从图中可以看出，当管内的热流密度一定时，管内局部流动沸腾换热系数同时受到工质饱和压力和工质干度的影响，且局部流动沸腾换热系数随工质饱和压力的升高而增大，同时，管内局部流动沸腾换热系数随工质干度的变化情况与图 6 中所示的变化趋势一致。这是由于工质的饱和压力

越高，从环形区域中热水的吸热量就越大，因此管内局部流动沸腾换热系数会相应地增大。

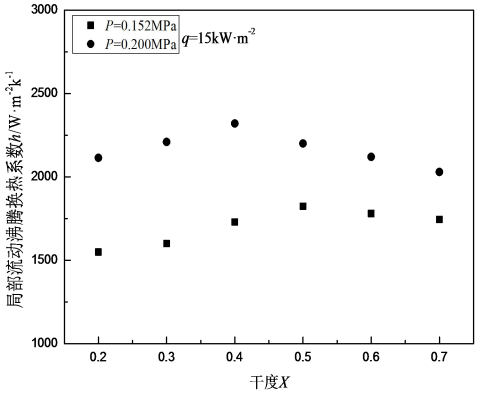


图 7 R123 局部流动沸腾换热系数随饱和压力的变化

3 实验结果与相关关联式计算结果对比

3.1 管内流动沸腾换热系数关联式

液体在管内发生强制对流沸腾时，由于产生的蒸气混入液流中，会出现多种不同形式的两相结构，因此传热机理相对复杂。目前，计算管内流动沸腾换热系数主要是采用理论模型与实验相结合的方法。但准确度高且适用于工程实际的通用型关联式较少。目前，通用的且具有代表性的半经验计算关联式主要包括：Shah 关联式[8]、Gungor-Winterton 关联式[9]以及 Kandlikar 关联式[10]。

Shah 关联式：

Shah 对于环形管、水平管以及竖直管的管内流动沸腾换热提出了经验关联式，其基本形式如下：

$$h_{tp}=\max(h_{cb},h_{nb}) \tag{8}$$

式中，h_{cb}——强制对流换热系数，$W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$；$h_{nb}$——核态沸腾传热系数，$W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$。

Gungor-Winterton 关联式：

Gungor 和 Winterton 总结了 28 位作者的 4300 个实验数据后，提出了一个适用于竖直管、水平管和环形管内的流动沸腾换热的经验关联式，其基本形式如下：

$$h_{tp}=Eh_l+Sh_{pool} \tag{9}$$

式中，E——两相对流强化因子；S——核态沸腾抑制因子；h_{pool}——池沸腾换热系数，$W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$；$h_l$——单相强制对流换热系数，$W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$。

Kandlikar 关联式：

Kandlikar 对于竖直管和水平管提出经验关联式，形式如下：

$$h_{cb}=1.1360Co^{-0.9}h_l+667.2Bo^{0.7}F_{fl}h_l \tag{10}$$

$$h_{nb}=0.6683Co^{-0.2}h_l+1058Bo^{0.7}F_{fl}h_l \tag{11}$$

流动沸腾换热系数 h_{tp} 取两者之间较大者，同公式(8)。其中：

$$Co=\left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.8}\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5} \tag{12}$$

式中，Bo——沸腾数，为计算点处气化蒸气的质量流速与总质量流速之比；ρ_g——蒸气密度，$kg\cdot m^{-3}$；ρ_g——液体密度，$kg\cdot m^{-3}$；F_{fl}——Kandlikar 关联式中引进的一个与工质种类相关的参数，不同种类的工质 F_{fl} 值不同，在 Kandlikar 所给出的工质中没有 R123 对应的 F_{fl} 值，在这里采用强化因子[11-13]代替 R123 的 F_{fl} 值。

3.2 实验结果与各关联式计算结果的对比

本节分别采用 Shah 关联式、Gungor-Winterton 关联式以及 Kandlikar 关联式计算了相同实验工况下的管内流动沸腾换热系数，计算值与实验值的对比结果如图 8～图 10 所示。

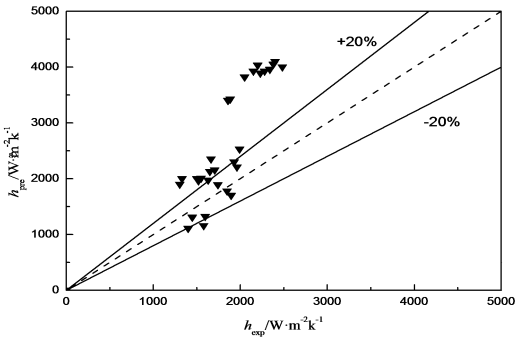


图 8 实验值与 Shah 关联式的比较

由图可知，采用 Kandlikar 关联式计算管内流动沸腾换热系数的误差较小，而采用 Shah 关联式和 Gungor-Winterton 关联式的计算结果与实验值偏差较大，平均误差分别为 28.6%和 21.2%。相较于上述两种关系式，利用 Kandlikar 关联式计算的平均误差为 10.6%，完全可以满足工程实际中对精度的要求。因此，在为有机朗肯循环系统设计选配蒸发器时，工质在沸腾段的换热系数可利用 Kandlikar 关联式进行计算。

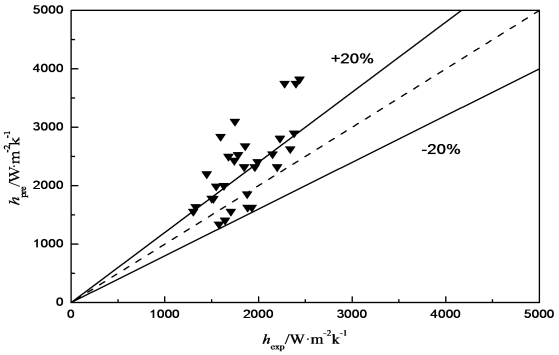


图 9 实验值与 Gungor-Winterton 关联式的比较

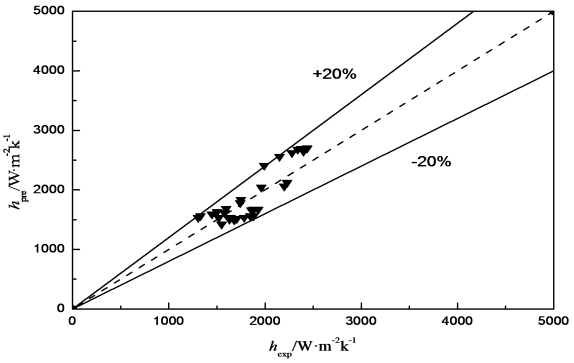


图 10 实验值与 Kandlikar 关联式的比较

4 结论

本文对饱和压力分别为 0.152MPa 和 0.2MPa 的 R123 在套管式蒸发器中换热特性进行了实验研究，主要结论如下：

1) R123 的管内流动沸腾换热系数同时受到工质质量流速、蒸发温度、热流密度及工质干度的影响。

2) 相同蒸发压力及热流密度下，管内流动沸腾换热系数随工质质量流速的增大而增大；相同蒸发压力及质量流速下，管内流动沸腾换热系数随热流密度增大而增大；相同热流密度及质量流速下，管内流动沸腾换热系数随蒸发压力升高而增大。

3) 管内流动沸腾换热系数随工质干度的增大呈现先增大后减小趋势且不同蒸发压力下工质管内流动沸腾换热系数达到最大值对应的干度不同。

4) 相较于 Shah 关联式和 Gungor-Winterton 关联式，采用 Kandlikar 关联式计算 R123 管内流动沸腾换热系数的平均误差最小为 10.6%。因此，在为有机朗肯循环系统设计蒸发器时，工质沸腾段换热系数的计算可采用 Kandlikar 关联式进行计算。

REFERENCES

[1] Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer[M]. Beijin:Higher Education Press, 2006, 243-327.

[2] Wu Yezheng. Refrigeration and cryogenic technology principle[M]. Beijing:Higher Education Press, 2007, 186-192.

[3] Guo Dongqi, Wang Huaixin, Pan Lisheng. Experimental research of Organic Rankine Cycle power system device by waste heat sources[J]. Acta energiae solaris sinica, 2015, 36(6): 1325-1330.

[4] Liu Jian, Wang Huitao, Zhang Songyuan, et al. Thermal performance comparative study of R123 and R245fa for Organic Rankine Cycle[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(1): 112-117.

[5] J.P. Roy, Ashok Misra. Parametric optimization and performance analysis of a regenerative Organic Rankine Cycle using R-123 for waste heat recovery [J]. Energy, 2012, (39): 227-235.

[6] Chi-chuan Wang, Ching-shan Chiang. Two-phase heat transfer characteristics for R-22/R-407C in a 6.5-mm smooth tube[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1997, 18(6): 550-558.

[7] Xu jijun, Jia Dounan. Boiling heat transfer and gas-liquid two phase flow[M]. Beijing:Atomic Energy Press, 1993, 467-476.

[8] M.M. Shah. Chart correlation for saturated boiling heat transfer equations and further study[J]. ASHREA Transaction, 1982, (88): 185-196.

[9] K.E. Gungor, R.H.S. Winterton. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1986, (29): 351-358.

[10] Kandlikar S G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes[J]. Journal of Heat Transfer, 1990, (112): 219-288.

[11] H.S. Lee, J.I. Yoon, J.D. Kim, et al. Evaporating heat transfer and pressure drop of hydrocarbon refrigerants in 9.52 and 12.70 mm smooth tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, (48): 2351-2359.

[12] J.C. Chen. A correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in vertical flow[J]. Heat Transfer Engineering, 1966, 1(4): 32-37.

[13] J.C. Collier, J.R. Thome. Convective Boiling and Condensation[J]. Third Ed., Oxford Science Publications, 1994.

【作者简介】



[1] 周明君（1991-），男，汉族，硕士研究生，主要从事余热发电有机工质传热特性研究。Emails:xiaozhou0830@126.com。

[2] 王景甫（1963-），男，汉族，博士，教授，主要从事研究可再生能源利用与先进环境能源技术，新型热力循环，低品位热能利用，余热回收利用等。Emails:jfwang@bjut.edu.cn。

[3] 张新欣（1981-），男，汉族，博士，讲师，主要从事研究新型热力学循环低品位热能利用及余热回收利用；新型有机工质的开发；热能利用中的环境问题。Emails:xinxinzhang@bjut.edu.cn。