

# 双侧强化管池沸腾传热试验及数据处理方法

欧阳新萍, 林梦, 袁道安

(上海理工大学 制冷技术研究所, 上海 200093)

**摘要:** 针对双侧强化换热管进行了管外工质 R134a 的池沸腾与管内工质水对流换热的传热试验, 管内水的流动处于旺盛湍流状态。结合试验, 分别用“威尔逊图解法”、“扩展 Gnielinski 法”、“修正 Gnielinski 法”和“新型曲线拟合法”计算管内换热系数。结果表明: 对于管内流体旺盛湍流的流动, “威尔逊图解法”、“修正 Gnielinski 法”和“新型曲线拟合法”的数据处理结果基本相同, 说明这 3 种方法可用于双侧强化管的试验数据处理。分析指出, 这 3 种方法各有特点, 需根据应用条件而适当选用, 其中, “修正 Gnielinski 法”需慎重选用。

**关键词:** 强化换热; 传热试验; 池沸腾; 威尔逊图解法; 数据处理方法

中图分类号: TK121 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2015.01.007

## 引言

近几年, 由于环境问题和世界能源紧张, 以节约能源与减少材料消耗为主要目的的高效紧凑型换热器的研究越来越受到重视。其中, 双侧强化换热管的应用日趋增多。双侧强化换热管种类繁多, 由于大多结构复杂, 传热特性涉及到工质的物性、传热表面结构以及液固表面的相互影响等, 其换热性能的计算一般没有统一计算的关联式, 大多通过试验研究获得各自的计算关联式。池沸腾强化管的试验研究中, 一般先试验得到管内对流换热热阻, 再用热阻分离法得出管外沸腾换热热阻。对于管内换热热阻, 通常采用“威尔逊图解法”对试验数据进行处理获得<sup>[1-2]</sup>, 但其较适用于管内热阻远大于管外热阻的情况, 对于管内外热阻相差不多的情况易出现较大误差。另外, “威尔逊图解法”要求知道管内换热关联式中流速的幂指数, 这使得其应用受到限制。文献[3]在冷凝双侧强化换热管的试验中, 采用 Gnielinski 管内对流换热公式来计算管内换热系数, 计算时将公式中分子和分母上的光滑管阻力系数都替换为实际测试的强化管的阻力系数。运用该扩展

公式来计算管内换热系数的方法可称之为“扩展 Gnielinski 法”。文献[4]在内螺纹强化管的换热试验中也采用 Gnielinski 管内对流换热公式来计算管内换热系数, 与前者不同的是, 其将公式中分子上的光滑管阻力系数替换为实际测试的强化管的阻力系数, 分母上的阻力系数仍采用光滑管阻力系数, 并在旺盛湍流区给出了验证结果。运用该修改公式来计算管内换热系数的方法可称之为“修正 Gnielinski 法”。文献[5]采用一种新型曲线拟合法得到对流换热系数关联式, 其试验方法与“威尔逊图解法”类似, 但对流换热关联式中流速的幂指数可以未知, 因而应用可以更广泛。本研究通过对一种双侧强化池沸腾换热管进行传热试验, 分别尝试用以上各种方法进行数据处理。

## 1 试验原理与流程

### 1.1 试验原理与装置

本试验采用 R134a 作为沸腾换热工质。试验装置如图 1 所示。试验装置包含管外沸腾换热和管外凝结换热两个试验筒体。凝结换热筒体作为本次试验的辅助部分。

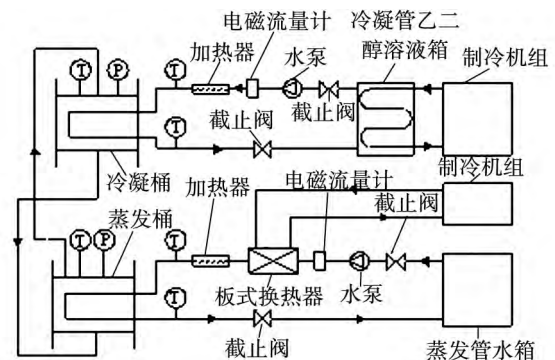


图 1 试验装置系统

Fig. 1 Test device system

收稿日期: 2014-04-09; 修订日期: 2014-10-13

作者简介: 欧阳新萍(1964-), 男, 上海人, 上海理工大学教授。

该装置包含 3 个循环回路,即蒸发管内水循环回路、冷凝管内乙二醇溶液循环回路、管外制冷剂的蒸发、冷凝循环回路。被测试的蒸发管布置于蒸发桶内,试验辅助用冷凝管布置于冷凝桶内。制冷剂 R134a 循环回路:制冷剂液体与蒸发管内的水换热后蒸发成气态,气态的制冷剂通过上方的管路到达冷凝桶,与冷凝管内的乙二醇溶液换热后冷凝成液体,再通过下方的管路到达蒸发筒完成一个循环。蒸发管管内水循环回路:管内流体在水泵的驱动下,经过板式换热器冷却、电加热器加热进行温度控制,再流过电磁流量计、测温点、蒸发管,回到箱体完成循环。冷凝管管内乙二醇溶液循环回路:乙二醇溶液在水泵的驱动下,经过电加热器调温,再流过电磁流量计、测温点、冷凝管,回到乙二醇溶液箱进行冷却(制冷机组提供冷量),完成循环。

1.2 试验测试段和流程

本试验所用强化管为一种双侧强化管,外表面加工成特殊的多孔结构,内表面有螺旋槽,材质铜,长 1.55 m,管外径 25.4 mm,管内径 23.14 mm,壁厚 1.13 mm,其管外表面强化结构如图 2 所示。蒸发桶中布置 2 根管,串联连接。在蒸发管和冷凝管的管内流体进出口分别布置热电阻测温度、布置压力测点测管内流动阻力,管路中布置电磁流量计测管内流体流量。蒸发筒体上布置压力测点,测量蒸发压力。



图 2 强化管结构图

Fig. 2 Structural drawing of the enhanced tube

2 试验方法与数据处理

由于试验装置中蒸发桶、管路测温点、测压点、接头处、阀门等都进行了严格保温,散热量很小,可

以认为蒸发管内热水的放热量  $Q_1$  和冷凝管内乙二醇溶液的吸热量  $Q_2$  应相差较小。通过测量蒸发、冷凝管内流体的进出口温度和体积流量,可计算出  $Q_1$ 、 $Q_2$ , 两者的相对误差小于 5% 的数据被认为是合理的数据。

总传热系数  $K$  可表示为:

$$K = \frac{Q}{A \Delta t} = \frac{q}{\Delta t} \tag{1}$$

式中:  $Q$ —换热量,取  $Q_1$  和  $Q_2$  的平均值, W;  $A$ —传热面积(取基管光滑表面积),  $m^2$ ;  $q$ —热流密度,  $W/m^2$ ;  $\Delta t$ —对数平均温差,  $^{\circ}C$ 。

通过各测量参数,并结合以上公式,可以得到该强化管池沸腾试验的传热系数  $K$ 。试验往往要获得各分热阻的数值,这就要采用合适的试验和数据处理方法,“威尔逊”图解法是最常用的方法。本试验数据处理方法除了采用“威尔逊图解法”以外,还采用了引言中介绍的其它方法。

2.1 威尔逊图解法<sup>[6-7]</sup>

本试验中,管内热水流动处于旺盛湍流状态,一般认为管内换热系数  $h_i$  与流速  $u$  的 0.8 次方成正比,即:

$$h_i = c_1 u^{0.8} \tag{2}$$

总传热系数计算关系式为:

$$\frac{1}{K} = \frac{d_o}{d_i} \frac{1}{c_1 u^{0.8}} + \frac{1}{h_o} + R_w + R_f \tag{3}$$

式中:  $h_o$ —管外换热系数,  $W/(m^2 \cdot k)$ ;  $d_i$ 、 $d_o$ —管子内径、外径, m;  $R_w$ —换热管管壁热阻,  $(m \cdot k)/W$ ;  $R_f$ —污垢热阻,  $(m \cdot k)/W$ 。

由于试验管为新管,故  $R_f$  忽略不计。

一般认为,对于同种制冷剂和加热表面,核态沸腾换热系数仅是热流密度  $q$  和饱和压力  $P_s$  的函数,故在一定蒸发压力下,调节蒸发管热水进水温度,使热流密度  $q$  保持不变,此时管外换热系数  $h_o$  也恒定不变。且由于  $R$  为 0,  $R_w$  为定值,故公式(3)可简化成:

$$\frac{1}{K} = a \cdot u^{-0.8} + b \tag{4}$$

其中:

$$a = \frac{d_o}{d_i} \frac{1}{c_1} \tag{5}$$

$$b = \frac{1}{h_o} + R_w \tag{6}$$

在定热流密度的条件下,改变蒸发管管内水的

流速, 可以得到一系列  $K$  值。以  $u^{-0.8}$  为横坐标,  $1/k$  为纵坐标, 根据各工况点参数并结合式 (4) 可拟合得到一条直线, 即威尔逊直线图。该直线的斜率为  $a$ , 代入式 (5) 便可求得  $c_1$ , 从而得出强化管管内换热系数  $h_i$  与  $u$  的关联式 (2)。由关联式 (2) 计算出管内换热系数  $h_i$  后, 即可由式 (3) 分离出管外的沸腾换热系数  $h_o$ 。

管内对流换热关联式通常整理成齐德 - 泰特 (Sieder - Tate) 准则式形式<sup>[8-9]</sup>:

$$Nu = c_2 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left( \frac{\eta_f}{\eta_w} \right)^{0.14} \quad (7)$$

对于光滑管  $c_2 = 0.027$ , 对于强化管  $c_2$  通过试验及相应的数据处理方法求出。两者之比可得到强化管的强化倍率。

根据求出的关联式 (2), 结合试验工况点的物性和式 (7) 可求出强化管的系数  $c_2$ , 得到强化管管内换热系数的准则式。

在一定蒸发压力 (温度) 下, 强化管管外换热系数主要与热流密度相关, 整理成如下关联式<sup>[9]</sup>:

$$h_o = c_3 q^n \quad (8)$$

保持蒸发管管内热水流速  $u$  不变, 通过改变蒸发管管内热水的进口温度以调节热流密度, 得到一系列试验数据。根据前述分离得到的管外换热系数  $h_o$ , 通过式 (8) 可拟合得到系数  $c_3$ , 从而得到管外的换热特性。

## 2.2 扩展 Gnielinski 法和修正 Gnielinski 法

Gnielinski 公式是计算管内湍流单相强制对流换热系数精确度最高的一个关联式之一<sup>[10]</sup>, 但该式仅适用于光滑管 (水力光滑区)。而对于管内具有强化表面的强化管, 迄今为止还没有一个可靠的换热系数计算关联式, 一般通过试验的方法进行热阻分离来获得。Gnielinski 公式如下:

$$Nu_f = \frac{(f/8) (Re - 1000) Pr_f}{1 + 12.7 \sqrt{f/8} (Pr_f^{2/3} - 1)} \left[ 1 + \left( \frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right] c_1 \quad (9)$$

其中:  $c_1 = \left( \frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.11}$

式 (9) 中光滑管阻力系数  $f$  由 Filonenko 公式计算:

$$f = (1.82 \lg Re - 1.64)^{-2} \quad (10)$$

文献 [3] 中的“扩展 Gnielinski 法”是将式 (9) 中的阻力系数  $f$  改为螺纹管管内实测的阻力系数  $f_p$ , 由 Darcy - Weisbach 公式计算:

$$\Delta p = f_p \frac{1}{d_i} \frac{\rho u^2}{2} \quad (11)$$

式中的流动阻力  $\Delta p$  和流速  $u$  由实测的数据代入, 计算出  $f_p$ 。

文献 [4] 中的修正 Gnielinski 法是将式 (9) 中分子上的阻力系数  $f$  改为螺纹管管内实测的阻力系数  $f_p$ , 分母中的阻力系数仍为光滑管的阻力系数。其理论依据是假定螺纹管与光管之间的阻力系数的比值等于螺纹管对流换热系数  $h'$  与光滑管对流换热系数  $h$  的比值, 即:

$$\frac{f_p}{f} = \frac{h'}{h} \quad (12)$$

通过试验测得管内的换热数据和流动阻力  $\Delta p$ , 这两种方法都可直接计算管内的对流换热系数, 然后根据式 (3) 分离出管外换热系数。

## 2.3 新型曲线拟合法

在威尔逊图解法中, 流速  $u$  的幂指数是给定的为 0.8。事实上, 对于管内不同的螺纹结构, 幂指数可能不同。如果不管什么样的管内结构, 一概固定流速  $u$  的幂指数为 0.8 可能会带来较大误差。

新型曲线拟合法是对式 (4) 进行改进, 将幂指数作为未知, 得到如下计算式:

$$\frac{1}{K} = a \cdot u^{-n} + b \quad (13)$$

实验方法与威尔逊图解法相同, 但采用非线性拟合方法对式 (13) 进行拟合<sup>[5]</sup>, 可求得管内、管外的换热系数。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 管内换热关联式与换热性能分析<sup>[11]</sup>

试验时管内通水, 管外 R134a 沸腾换热。控制蒸发温度为 5.6 °C、热流密度为 40 000 W/m<sup>2</sup> 左右, 在 1.0 - 3.0 m/s 的范围内改变蒸发管管内水流速, 得到一系列数据。

#### 3.1.1 威尔逊图解法

根据测得数据得到的威尔逊图解法, 如图 3 所示。

根据“威尔逊图解法”拟合求得  $c_1 = 11 308$ , 得出强化换热管的管内换热系数与水速的关联式为:

$$h_i = 11 308 u^{0.8} \quad (14)$$

结合试验工况下的物性数据, 按式 (7) 得到如下管内换热系数的计算关联式。

$$Nu = 0.085 Re^{0.8} Pr^{1/3} \left( \frac{\eta_l}{\eta_w} \right)^{0.14} \quad (15)$$

故  $c_2 = 0.085$  ,与光滑管的系数  $c_2$  ( 0.027) 相比,可知管内的换热系数的强化倍率为 3.15。

根据式(3)分离得到管外换热系数并拟合得:

$$h_o = 208.2q^{0.42} \quad (16)$$

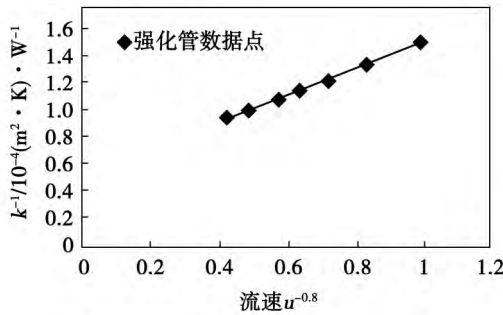


图3 威尔逊图  
Fig.3 Wilson chart

### 3.1.2 扩展 Gnielinski 法和修正 Gnielinski 法

扩展 Gnielinski 法和修正 Gnielinski 法需测试管内的流动阻力。根据实测的数据,得到的流动阻力系数如图 4 所示。图 4 也给出了根据式(10)计算的光滑管阻力系数。

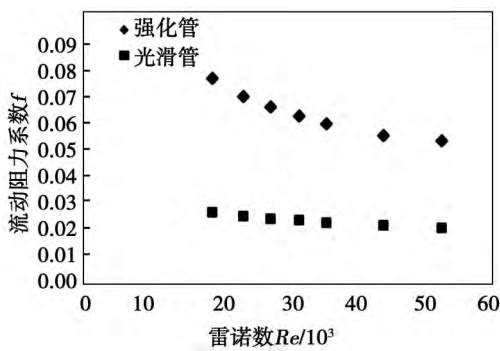


图4 强化管和光滑管的流动阻力系数图  
Fig.4 Chart showing the flow resistance coefficient of the enhanced tube and a smooth one

有了阻力系数,即可根据式(9)的扩展式或修正式计算管内换热系数。经过计算发现扩展 Gnielinski 法计算得到的管内换热系数比威尔逊图解法的管内换热系数低得较多,且分离得到的管外沸腾换热系数明显超出合理的数值范围。因此认为扩展 Gnielinski 法不适合此种强化换热管的计算。其原因可能是由于本强化管表面结构对流动阻力和换热系数的影响与文献[3]中所采用的强化管存在较大

差异。修正 Gnielinski 法计算的结果与威尔逊图解法接近,可作为本强化管的试验方法。事实上,作为修正 Gnielinski 法理论基础的式(12)也只是对部分管型适用。对相当部分管型,式(12)的左边阻力系数比值会大于右边换热系数比值,文献[3]中的强化管即属于此种管型。式(12)更普遍的表达式及相应的 Gnielinski 方法有待于进一步研究。

### 3.1.3 新型曲线拟合法

根据式(13)进行拟合,可得到拟合关系式为:

$$\frac{1}{K} = 0.000\ 092\ 3u^{-0.75} + 0.000\ 056 \quad (17)$$

由此得出管内换热系数与流速的关系为:

$$h_i = 10\ 834u^{0.75} \quad (18)$$

用以上 3 种方法(除扩展 Gnielinski 法)得到的管内对流换热系数  $h_i$  与管内流速  $u$  的关系如图 5 所示。试验的雷诺数范围为 18 000 – 53 000。

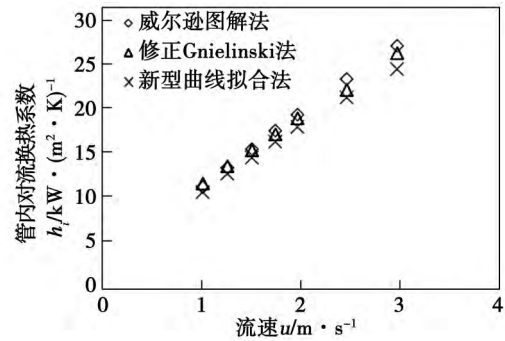


图5 3种计算方法的管内换热系数比较  
Fig.5 Comparison of the heat exchange coefficients inside the tube obtained by using the three calculation methods

图中显示 3 种数据处理方法的结果很接近,且数值范围合理,表明这 3 种方法都可适用于此种双侧强化换热管管内换热系数的计算,但各有特点。

威尔逊图解法是经典的试验方法,计算结果较稳定,但在试验的时候须保持管外的换热系数不变,且必须知道管内换热关联式中流速的幂指数。而对于不同管内强化结构的强化管该幂指数应该是变化并且未知的,如果一概指定为 0.8 可能会带来误差。

“修正 Gnielinski 法”试验的时候不必保持管外的换热系数不变,但须测量管内的流动阻力。由于可以不必知道管内换热关联式中流速的幂指数,因而给数据处理带来方便。但其依据式(12)的假设前提值得推敲,事实上,对于不同强化结构的管子,

式(12)左边的比值可能大于或小于其右边的比值。本次实验的结果与其它方法相吻合,也可能是由于正好对于本实验的管型式(12)成立。因此,使用“修正 Gnielinski 法”还是要慎重。

文献[6]认为“扩展 Gnielinski 法”可用于粗糙管的管内换热系数的初步计算,文献[3]将其用于强化冷凝管的管内计算则得到了较好的结果。本次实验将“扩展 Gnielinski 法”用于强化管的管内换热系数计算并不满意,因此说明“扩展 Gnielinski 法”可能也只适合部分强化管管型,使用更需慎重。

新型曲线拟合法的实验方法与威尔逊图解法相同,但可以不知道管内换热关联式中流速的幂指数,因此比威尔逊图解法更方便。但在实际使用中发现,实验数据的准确度要求较高或者数据量要求较大,否则拟合过程中数据可能不收敛或者得到不合理的结果。

## 4 结 论

(1) 对一种双侧强化池沸腾换热管进行了试验,用“威尔逊图解法”、“扩展 Gnielinski 法”、“修正 Gnielinski 法”和“新型曲线拟合法”分别计算了强化管管内的换热性能。“扩展 Gnielinski 法”计算结果不合理,不适合此种管型的试验;其它 3 种方法得到的结果非常接近,且计算结果合理。

(2) 对于双侧强化换热管管内外换热性能的实验研究,“威尔逊图解法”、“修正 Gnielinski 法”和“新型曲线拟合法”都可采用,但须充分了解各种方法的特点而选用,其中“修正 Gnielinski 法”还有待进一步研究,需慎重选用。

### 参考文献:

- [1] 杨光耀,张胜华,李小利,等.水平双侧强化管单管在 R134a 中的池沸腾传热实验研究[J].制冷学报,2007,28(1):26-32.  
YANG Guang-yao,ZHANG Sheng-hua,LI Xiao-li,et al. Experimental study of the pool boiling heat transfer of R134a on a single horizontally doubly-enhanced tube [J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(1): 26-32.
- [2] 姜帆,欧阳新萍,李海珍,等. Turbo-B 类池沸腾双侧强化管传热性能实验研究[A]. 2011 中国制冷学会学术年会论文集[C],2011.  
JIANG Fan,OUYANG Xin-ping,LI Hai-zhen,et al. Experimental study of the Turbo-B category pool boiling heat transfer performance on doubly-enhanced tube [C]. Collection of Chinese Refrigeration Association academic annual meeting 2011.
- [3] 欧阳新萍,袁道安,等. R404A 在水平强化管外的冷凝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,et al. Condensation experiment of R404A outside horizontally intensified tubes and data processing methods [J]. Journal of Refrigeration 2014, 35(1): 92-97.
- [4] 冀文涛,冯楠,张定才,等.内螺旋强化管内充分发展单相强制对流湍流传热预测-Gnielinski 公式的推广[A]. 2011 中国工程热物理学会学术年会论文集[C],2011.  
JI Wen-tao,FENG Nan,ZHANG Ding-cai,et al. Prediction of the single-phase forced convection turbulent flow heat transfer fully developed inside inner threaded intensified tubes-popularization of Gnielinski formulae [C]. Collection of Chinese Engineering Thermophysics Society academic annual meeting 2011.
- [5] 欧阳新萍,刘宝兴,等.新型曲线拟合法及在翅片管传热试验中的应用[J].化工学报,2002,53(10):1081-1084.  
OUYANG Xin-ping,LIU Bao-xing,et al. Novel curve fitting method and its applications in heat transfer experiments of finned tubes [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2002, 53(10): 1081-1084.
- [6] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,1998.  
YANG Shi-ming,TAO Wen-quan. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [7] 朱聘冠.换热器原理及计算[M].北京:清华大学出版社,1987.  
ZHU Pin-guan. Working principle of heat exchangers and their calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987.
- [8] Dittus F W,Boelter L K M. Univ Calif (Berkeley) Pub Eng, 1930, 2: 443.
- [9] 刘文毅,李旻,陶文铨. 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 Wen-yi,LI Fu,TAO Wen-quan. Experimental study of the pool boiling heat exchange of R123 outside a single horizontally enhanced tube [J]. Journal of Refrigeration 2005, 26(4): 30-34.
- [10] Gnielinski V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flows [J]. Int Chem Eng, 1976, 16: 359-368.
- [11] 赵安利,田松娜,张定才,等.双侧强化管热阻分离实验研究[J]. 中原工学院学报,2011,22(1):15-18.  
ZHAO An-li,TIAN Song-na,ZHANG Ding-cai,et al. Experimental study of the thermal resistance separation of double enhanced tubes both sides [J]. Journal of Zhongyuan University of Technology 2011, 22(1): 15-18.
- [12] Cooper M. G. Saturation nucleate pool boiling—a simple correlation, International Chemical Engineering Symposium Series, 1984, 86: 785-792.
- [13] Sathyabhama A, Ashok Babu T P. Experimental investigation in pool boiling heat transfer of ammonia/water mixture and heat transfer correlation [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow 2011, 32: 719-729

(陈滨 编辑)

ertial stage of a gas turbine. Firstly through the test obtained were the separation characteristic data of the inertial stage and then through a numerical simulation of the discrete phase a qualitative analysis was made of the main mechanism controlling the separation of salt content in the flow passages of the device and factors influencing the separation characteristics. A comparison of the test data with the numerical simulation ones show that the separation efficiency of the separation device in the inertial stage can reach approximately 97% the maximal value being 98.71% and the minimal value being 95.90% nearing to the full separation. To increase the guide blade interval can somewhat reduce the separation efficiency and to increase the initial speed at the inlet can somehow increase the separation efficiency. **Key Words:** inertial stage experimental study separation characteristics discrete phase numerical simulation

微通道轴向导热的拉曼测温实验研究及数值模拟 = **Experimental Study of the Raman Temperature Measurement of the Axial Heat Conduction Inside a Micro-channel and Its Numerical Simulation** [刊, 汉] LIN Ying ( College of Mechanical Engineering ,Shanghai Applied Technology College ,Shanghai ,China ,Post Code: 201418) ,YU Xin-hai ( Education Ministry Key Laboratory on Pressurized Systems and Safety ,College of Mechanical and Power Engineering ,East China University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200237) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30( 1) . -12 -18

Proposed was a method for micro-scale measuring water temperature based on the confocal microscopic Raman spectrum and used was the method in question in the convection heat transfer test of single-phase water. In combination of the test with the numerical simulation the authors studied the influence of the heat conduction in the axial direction inside a micro-channel on the heat transfer of the fluid. It has been found that the heat flux on the wall surfaces at the inlet of the micro-channel is maximal and the liquid and wall temperature all assume a nonlinear development. A singular point will locally appear on Nu number curves and its location will shift to the outlet with an increase of the Reynolds number. In addition the Nusselt number will increase with an increase of the Reynolds number. **Key Words:** micro-channel Raman spectrum axial heat conduction

双侧强化管池沸腾传热试验及数据处理方法 = **Pool Boiling Heat Exchange Experiment of a Tube Intensified at Both Sides and Its Data Processing Method** [刊, 汉] OUYANG Xin-ping ,LIN Meng ,YUAN Dao-an ( Refrigeration Technology Research Institute ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30( 1) . -19 -23

A heat transfer test was performed of the pool boiling of R134a outside the heat exchange tubes intensified at both sides and the convection heat exchange of water inside the tubes ,the flow inside the tubes was in its vigorous turbulent flow state. In combination with the test and by using the “Wilson graphical method” , “extended Gnielinski method” , “corrected Gnielinski method” and “novel type curve fitting method” respectively ,the authors calculated the heat exchange coefficient inside the tubes. It has been found that for the vigorous turbulent flow inside the tubes ,the data processing results obtained by using the “Wilson graphical method” , “corrected Gnielinski method” and “novel type curve fitting method” are basically identical ,indicating that the three methods under discussion can be used in processing the test data of the tubes intensified at both sides. The analytic results show that the three methods have their respective features and can be properly chosen depending on the application conditions ,among them ,the “corrected Gnielinski method” should be prudently chosen. **Key Words:** intensified heat exchange ,heat transfer test ,pool boiling ,Wilson graphical method ,data processing method

利用中低温余热的回热有机朗肯循环性能分析 = **Analysis of the Performance of Recuperative Organic Rankine Cycles Utilizing a Medium and Low Temperature Waste Heat** [刊 汉] YI Si-yang ,GUO Mei-ru ZHU Qi-di ,SUN Zhi-qiang ( College of Energy Science and Engineering ,Central South University ,Changsha ,China ,Post Code: 410083) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30( 1) . -24 -30

The organic Rankine cycles are regarded as an effective approach for recovering and utilizing the medium and low temperature waste heat and to additionally design and arrange a recuperative link can use a part of heat originally transferred to the heat sink to heat the supercooled liquid working medium and reduce the heat absorbed from the heat source ,thus enhancing the thermal efficiency of the cyclic system. With three kinds of typical organic dry fluid R227ea ,R600 and R141b being chosen as the working medium respectively ,under the condition that the temperature of the fluid in the heat source at the inlet was set at the typical flue gas temperature of 423. 15 K for industrial boilers and the temperature of the cooling water at the inlet and ambient temperature were set at 283. 15 K and 293. 15 K respectively ,the authors analyzed the influence of the vaporization temperature ,superheating degree and the temperature of the working medium at the outlet of the feedwater heater on the performance of the recuperative organic Rankine cycle and compared the performance of the recuperative organic Rankine cycle and the basic organic Rankine cycle. It has been found that with an increase of the vaporization temperature ,the total irreversible loss of the cycle will decrease and the thermal efficiency of the cycle and that of the second thermodynamic law will also increase while the net output power of the cycle will first increase and then decrease. With an increase of the superheating degree ,both total irreversible loss and net output power of the cycle will decrease while the variation tenden-