

DOI: 10.7652/xjtub201505010

## 不同材料翅片管换热器特性的试验研究

张凡, 李兆辉, 李晓宇, 丁靖, 陈磊, 陶文铨

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

**摘要:** 针对目前对翅片管换热器的试验研究大多不涉及到接触热阻, 或者实际上将接触热阻归纳到气体侧热阻中的问题, 对翅片管换热器的接触热阻进行了研究, 逐步积累有关的数据。利用风洞试验台研究了在相同的加工工艺条件下, 基管和翅片材料对接触热阻的影响。通过对 4 种工程常用材料的翅片管换热器的试验研究, 在工业常用的雷诺数  $Re$  范围内给出了换热和阻力特性的试验关联式。试验结果表明, 在  $1\ 300 < Re < 4\ 500$  的范围内, 铁白铜管-铝翅片管外空气努赛尔数比 304 不锈钢管-铝翅片高 28%~40%, 在相同的加工工艺以及相同的翅片材料(铝)的情况下, 304 不锈钢管比铁白铜管增加的附加接触热阻为  $4.53 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。本试验的不确定度为 7.28%, 接触热阻数据可靠, 可供工程实际选用。

**关键词:** 翅片管换热器; 接触热阻; 换热和阻力特性

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)05-0062-06

### Experimental Study on the Performance of Plane Fin-Tube Heat Exchanger Made of Different Materials

ZHANG Fan, LI Zhaohui, LI Xiaoyu, DING Jing, CHEN Lei, TAO Wenquan

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In the current research of fin-tube heat exchanger, thermal contact resistance is rarely considered, or it is included in the air side heat transfer resistance. In this paper, the influence of materials of tubes and fins on the thermal contact resistance is studied. The heat transfer performance of four fin-tube heat exchangers made of different materials is investigated experimentally, and the general correlations of heat transfer and pressure drop characteristics are obtained in the Reynolds number range commonly encountered in engineering. It is found that in the Reynolds number range of 1 300-4 500, the Nusselt number of air across the copper-nickel-iron alloy tube-aluminum fins is 28%-40% greater than that of 304 stainless steel tube-aluminum fins. For the same manufacturing technology and fin material, the thermal contact resistance of pipes made of 304 stainless steel is  $4.53 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$  more than that of copper-nickel-iron alloy. The measurement uncertainty of this experiment is 7.28%, and the thermal contact resistance is reliable, which can be used in engineering design.

**Keywords:** fin-tube heat exchanger; thermal contact resistance; heat transfer and pressure drop characteristics

作为热量传递中的过程设备, 换热器在工业领域中的应用极为广泛, 其性能的好坏直接影响着能

源利用的效率。因此, 针对换热器的材料、结构尺寸进行综合性能分析, 是一件兼具理论指导意义和实

收稿日期: 2014-09-18。 作者简介: 张凡(1990—), 男, 硕士生; 陶文铨(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士。

网络出版时间: 2015-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150227.1724.014.html>

际工程应用价值的工作。

翅片管换热器具有加工和装配简单、能承受高温高压、可靠性高、适应性强、选材范围广等优点,被广泛应用在空调、制冷、化工等工业领域。多年来,众多学者对翅片管换热器进行了深入的研究和优化设计<sup>[1-4]</sup>。何雅玲等人利用三维数值模拟的方法,研究了不同雷诺数、翅片间距、管排数、管间距等因素对翅片管换热器换热和阻力特性的影响,并运用场协同理论进行了分析<sup>[5]</sup>。康海军等人试验研究了3种翅片间距(2.0、2.6、3.2 mm)和3种管排数(2、3、4)的9个平直翅片管换热器的换热和阻力特性,给出了翅片间距与管排数影响的换热和阻力性能通用关联式<sup>[6]</sup>。

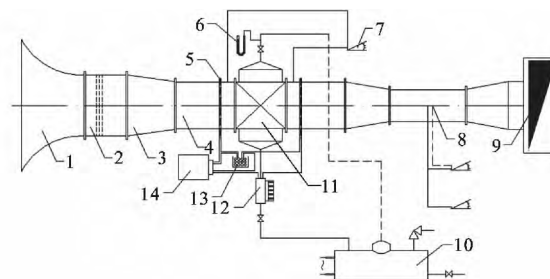
翅片管换热器除了整体轧制的翅片外,各种加工方式都会使基管与翅片之间存在一定的接触热阻。由于接触热阻定量研究困难,目前对翅片管换热器的试验研究基本都是针对开缝形式、翅片间距、管排数、管间距等因素,大多不涉及接触热阻,或者实际上将接触热阻归纳到气体侧的热阻中,例如文献<sup>[7]</sup>的空气侧换热系数的试验数据实际上包含了接触热阻在内。由于接触热阻与多个因素有关且具有很大的随机性<sup>[7]</sup>,因此虽然20世纪60年代就已经引起人们的注意<sup>[8]</sup>,但经历了半个多世纪的研究后,目前仍然是传热学中最缺少系统知识和规律的分支领域<sup>[9-12]</sup>。近年来,不少学者引入了分形理论等近代数理方法对其进行了研究<sup>[13]</sup>,但要直接应用到工程实际还有距离。本文认为对于工程实际的换热器设计,制造厂家应该对自己的生产工艺通过必要的试验测定,逐步积累有关的数据,以获得可靠的接触热阻数据。基于这一基本思想,我们用同一种加工制造工艺(液压胀管,胀管压力为150~180 MPa),分别采用不同硬度的管材(铁白铜、304不锈钢以及316L不锈钢),用铝材做翅片,制造了4台试验换热器,旨在通过相同条件下的试验测定,查明不同材料对翅片管换热器的基管-翅片间接触热阻的影响。

## 1 试验系统及测量方法

### 1.1 试验系统

试验在吸风式风洞上进行,风洞试验台如图1所示。

本系统由空气和蒸汽凝结水两回路组成。在试件段进出口截面上各均匀布置了由16对铜-康铜热电偶串联而成的热电堆,以测量进口风温和进出口



1:风洞入口;2:过渡段;3:收缩段;4:稳定段;5:热电偶;  
6:U型管;7:压差计;8:毕托管;9:引风机;10:锅炉;  
11:试件段;12:流量计;13:冰瓶;14:数字电压表

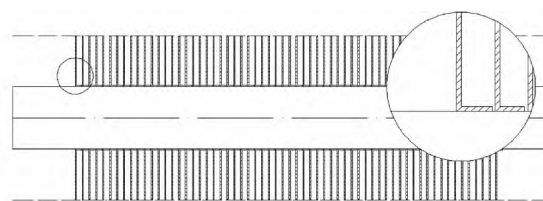
图1 风洞试验台示意图

风温之差。热电堆在试验前均在标准恒温水浴中用二等标准水银温度计配数字电压表及7708采集卡进行了数据采集校验,标定了电势-温度关系曲线。

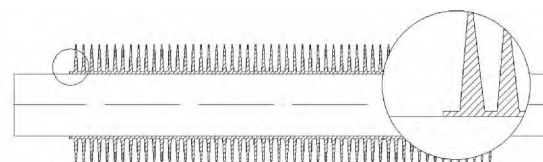
空气从1250 mm×930 mm的双扭线吸风口吸入,经整流段、收缩段、稳定段后进入试验段(横截面积为300 mm×250 mm),横向流过翅片管外侧。被加热后的空气流经稳定段及方圆收缩段进入安装毕托管的测速段、调节阀,然后由风机排向大气。饱和蒸汽由电热锅炉产生,本测试台电热锅炉共有6个电加热器,其中3个加热功率为8 kW,另外3个加热功率为16 kW,总加热功率为72 kW。蒸汽通过上联箱进入试件,在垂直管内放出热量凝结成水,水经下联箱、容积式流量计回到锅炉。试验过程中保证空气侧与凝结水侧测得的换热量偏差在±5%以内。

### 1.2 试验元件

试验元件的翅片型式如图2所示,试件编号与结构参数如表1所示。4个试件流动方向的管排数都为12,横向管间距为32.5 mm,纵向管间距为28.1 mm,均采用叉排布置。轧制管的翅片高度为5.85 mm。



(a)平翅片管换热器



(b)轧制管换热器

图2 翅片管换热器示意图

表1 试件编号及参数

试件编号	翅片类型	换热管材质	翅片材质	换热管尺寸/mm×mm	翅片厚度/mm	翅片节距/mm
1	板翅片	304 不锈钢	铝	Φ19×1.25	0.2	2
2	板翅片	铁白铜	铝	Φ19×1.25	0.2	2
3	板翅片	304 不锈钢	铝衬酚醛树脂	Φ19×1.25	0.2	2
4	轧制管	316L 不锈钢	铝	Φ19×1.25	根部 0.7; 顶部 0.3	2.1

## 2 试验数据整理

空气侧的换热系数可用热阻分离法获得。传热系数的计算公式为

$$k = \varphi_m / (\Delta t_m F_o) \quad (1)$$

以换热管束的外侧换热总面积为依据的总热阻与分热阻的关系式为<sup>[7]</sup>

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{h_i} \frac{F_o}{F_i} + \frac{\delta_1}{\lambda} \frac{F_o}{F_i} + \frac{1}{h_o} \quad (2)$$

式中： $h_i$ 、 $h_o$  分别为管内、外的换热系数； $F_i$  为换热管束内侧换热总面积； $\delta_1$  为管壁厚度； $\lambda$  为管材的导热系数，取 20℃ 时的导热系数值，铁白铜为 46.1 W/(m·K)<sup>[14]</sup>，304 不锈钢为 15 W/(m·K)<sup>[15]</sup>，316L 不锈钢为 14 W/(m·K)<sup>[15]</sup>； $F_o$  为换热管束的外侧换热总面积，由无肋部分的总表面积  $F_1$  和肋表面的总面积  $F_2$  组成。

蒸汽侧的凝结换热系数按下式计算

$$h_i = 1.177 \left( \frac{9.81 \gamma \rho_w^3 \lambda_w^3}{\mu_w L q} \right)^{1/3} \quad (3)$$

式中： $\rho_w$ 、 $\lambda_w$ 、 $\mu_w$  分别为饱和水的密度、导热系数和动力黏性系数； $L$  为单根换热管的高度； $q$  为用换热管束内表面积计算的热流密度。

空气侧的传热系数从总热阻中按下式分离出来

$$h_o = 1 / \left[ F_o \left( \frac{1}{kF_o} - \frac{1}{h_i F_i} - \frac{\delta_1}{\lambda F_i} \right) \right] \quad (4)$$

描述空气侧换热特性的  $Nu$  为

$$Nu = \frac{h_o d'}{\lambda} \quad (5)$$

式中： $d' = d_o + 2\delta_2$  为特征尺寸， $d_o$  为胀管后的换热管外径， $\delta_2$  为颈领厚度。

同样， $Re$  定义为

$$Re = \frac{u_m d'}{\nu} \quad (6)$$

式中： $u_m$  为最窄截面流速； $\nu$  为运动黏性系数。

由于 4 个试件流动方向长度相同，阻力系数  $f$  的定义式如下

$$f = \Delta P / \left( \frac{1}{2} \rho u_m^2 \right) \quad (7)$$

式中： $\Delta P$  为空气流经换热器的压降； $\rho$  为进出口空气的平均密度。

## 3 结果与分析

### 3.1 试验结果

在工业常用的  $1\ 300 < Re < 4\ 500$  范围内，4 个试件各自的空气侧  $Nu$ 、阻力因子与  $Re$  的关联式如表 2 所示。

表2 试验关联式

试件编号	换热关联式	阻力关联式
1	$Nu = 0.220 Re^{0.392}$	$f = 9.820 Re^{-0.383}$
2	$Nu = 0.154 Re^{0.476}$	$f = 3.399 Re^{-0.243}$
3	$Nu = 0.348 Re^{0.330}$	$f = 7.088 Re^{-0.337}$
4	$Nu = 0.106 Re^{0.507}$	$f = 5.768 Re^{-0.305}$

在  $1\ 300 < Re < 4\ 500$  时，换热关联式最大拟合偏差为 ±9.2%，阻力关联式最大拟合偏差为 ±3.7%。

### 3.2 材料对换热的影响

4 个试件空气侧的  $Nu$  与  $Re$  的变化规律如图 3 所示。从图中可以看出，试件 1 与试件 3 的空气侧  $Nu$  差异很小，而试件 1 与试件 3 的各结构尺寸都相同，差别仅在于试件 3 的翅片外增加了防腐蚀的酚醛树脂涂层，说明翅片上的涂层对管外换热几乎没有影响。试件 2 与试件 1 翅片的类型和尺寸都相同，仅换热管材料不同。换热管材料对管外换热的影响主要是由于不同种类金属材料的接触热阻不同造成的，而所测得的管外空气换热系数实际上包含了接触热阻，从而导致了不同的管外空气换热系数。试件 2，即铁白铜管与铝翅片胀接后，接触热阻最小，因此对比试件 1 和试件 3，试件 2 的翅片能更好地发挥强化对流换热的作用。在翅片材料都选用铝的情况下，材料接触热阻的大小顺序为铁白铜 < 304 不锈钢，在相同的  $Re$  下，铁白铜管管外空气  $Nu$  比 304 不锈钢管高 28%~40%。

对比试件 2 与试件 4， $Re$  在  $1\ 300 \sim 4\ 500$  的范围内时，铁白铜管平翅片管换热器空气侧  $Nu$  比

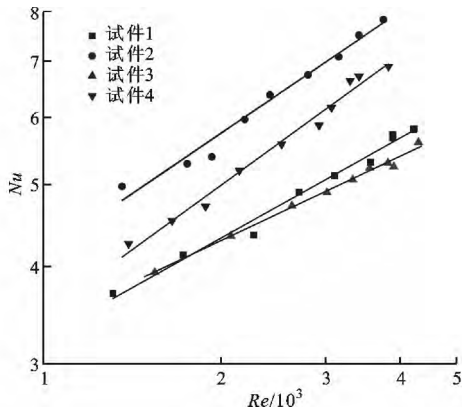


图 3 材料对空气侧 Nu 的影响

316L 不锈钢轧制管换热器高 12%~17%，这些差别主要是由于不同的接触热阻而引起的。测试件平翅片换热器的翅片体积为  $1.51 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，轧制管换热器的翅片体积为  $2.46 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ，所以 316L 不锈钢轧制管换热器的换热性能劣于铁白铜管平翅片管换热器，而且增加了翅片材料。

由于试件 1 与试件 2 的差别仅在于管材的不同，从而可以作为对照试验来确定附加接触热阻的值。从图 4 中可以看出，空气流速在 4~12 m/s，即  $Re$  在 1 300~4 500 的范围内时，试件 1 相对于试件 2 的管外热阻的差值基本恒定，而这个差值即为 304 不锈钢管比铁白铜管增加的附加接触热阻的值。利用线性加权平均可得，在此  $Re$  范围内，304 不锈钢管比铁白铜管增加的附加接触热阻为  $4.53 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。对于 304 不锈钢管， $Re=1 750$  时，这一附加的接触热阻占管外热阻的 23.5%； $Re=3 800$  时，接触热阻占管外热阻的 31.5%。

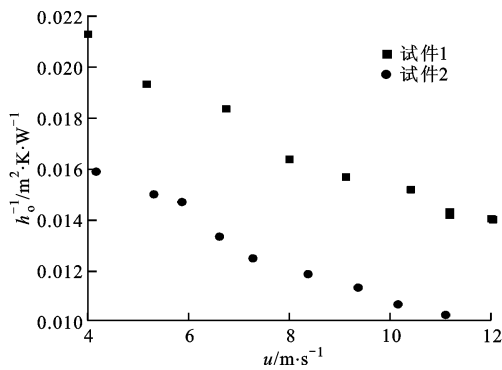


图 4 试件 1 与试件 2 的管外热阻

4 个试件的空气侧压降与迎风面空气流速的变化规律示于图 5 中。从图中可以看出，在相同的空气流速下，4 个试件的压损几乎相同，即不同的换热管材料并不影响管外空气侧的压降。

采用  $j$  因子与阻力系数的比值  $j/f$  作为性能比

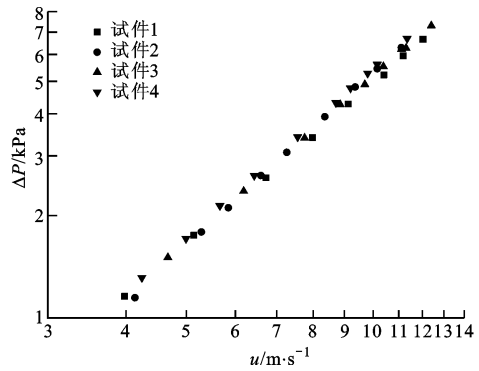


图 5 材料对空气侧压降的影响

较的一种综合指标，结果如图 6 所示。由图可以看出，铁白铜管配合铝翅片的综合性能最优，轧制管次之，304 不锈钢管最差。尽管 304 不锈钢管价格比铁白铜管便宜，但从试验所测的换热效果来看，铁白铜管铝翅片仍然是制作热交换器比较好的选择。

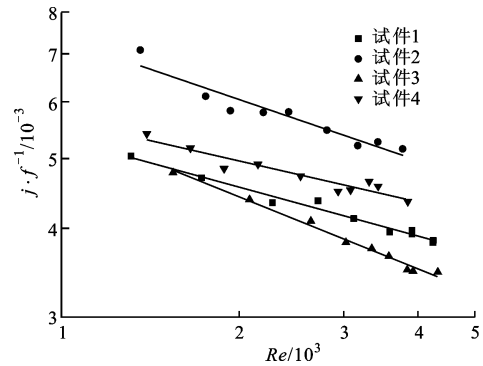


图 6 不同试件的综合性能比较

### 3.3 试验不确定度分析

本文按影响参量及其函数均服从正态分布估算的“二次幂法”<sup>[16]</sup>对试验不确定度进行分析。

设  $R=R(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ， $X_1, X_2, \dots, X_n$  为  $n$  个独立自变量，每个自变量的不确定度服从正态分布，那么  $R$  的不确定度  $\Delta R$  与各个自变量的不确定度  $\Delta X_i (i=1, \dots, n)$  之间的关系由如下方程决定

$$\Delta R = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial R}{\partial X_i} \Delta X_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

相对不确定度可以表示为

$$\frac{\Delta R}{R} = \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta X_i}{X_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

$q, \Delta T_m, k, h_i$  和  $h_o$  等的不确定度分析如下。

本试验中保证换热量热平衡偏差小于 5%，因此取换热量的不确定度为

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = 5\% \quad (10)$$

表面积  $A_o$  的不确定度为

$$\frac{\Delta A_o}{A_o} = \left[ \left( \frac{\Delta d_o}{d_o} \right)^2 + \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[ \left( \frac{1.0}{19} \right)^2 + \left( \frac{1.0}{300} \right)^2 \right]^{1/2} = 5.27\% \quad (11)$$

热流密度  $q$  的不确定度为

$$\frac{\Delta q}{q} = \left[ \left( \frac{\Delta \varphi}{\varphi} \right)^2 + \left( \frac{\Delta A_o}{A_o} \right)^2 \right]^{1/2} = (0.05^2 + 0.0527^2)^{1/2} = 7.26\% \quad (12)$$

对数平均温差由下式确定

$$\Delta T_m = (T_{w,out} - T_{w,in}) / \ln \frac{T_s - T_{w,in}}{T_s - T_{w,out}} = \Delta T_w / \ln \frac{T_s - T_{w,in}}{T_s - T_{w,in} - \Delta T_w} \quad (13)$$

取试验中的典型情况进行分析,  $T_s = 100^\circ\text{C}$ ,  $T_{w,in} = 25.9^\circ\text{C}$ ,  $T_{w,out} = 77.8^\circ\text{C}$ , 令

$$B = \frac{T_s - T_{w,in}}{T_s - T_{w,in} - \Delta T_w} \quad (14)$$

对数平均温差不确定度为

$$\frac{\partial \Delta T_m}{\partial \Delta T_w} = \frac{1}{\ln B} - \frac{\Delta T_w}{(\ln B)^2 (T_s - T_{w,in} - \Delta T_w)} = -0.780 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Delta T_m}{\partial T_s} = \frac{(\Delta T_w)^2}{B (\ln B)^2 (T_s - T_{w,in} - \Delta T_w)^2} = 1.127 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \Delta T_m}{\partial T_{w,in}} = -\frac{(\Delta T_w)^2}{B (\ln B)^2 (T_s - T_{w,in} - \Delta T_w)^2} = -1.127 \quad (17)$$

$$\frac{\Delta(\Delta T_m)}{\Delta T_m} = \left[ \left( \frac{\partial \Delta T_m}{\partial \Delta T_w} \frac{\Delta(\Delta T_w)}{\Delta T_w} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta T_m}{\partial T_s} \frac{\Delta T_s}{T_s} \right)^2 + \left( \frac{\partial \Delta T_m}{\partial T_{w,in}} \frac{\Delta T_{w,in}}{T_{w,in}} \right)^2 \right]^{1/2} = \left[ (-0.780 \frac{0.1}{51.9})^2 + (1.127 \frac{0.1}{100})^2 + (-1.127 \frac{0.1}{25.9})^2 \right]^{1/2} = 0.474\% \quad (18)$$

因此, 传热系数  $k$  的相对不确定度为

$$\frac{\Delta k}{k} = \left[ \left( \frac{\Delta \varphi}{\varphi} \right)^2 + \left( \frac{\Delta A_o}{A_o} \right)^2 + \left( \frac{\Delta(\Delta T_m)}{\Delta T_m} \right)^2 \right]^{1/2} = (0.05^2 + 0.0527^2 + 0.00474^2)^{1/2} = 7.28\% \quad (19)$$

## 4 结 论

本文对 4 种不同材料的翅片管换热器进行了试验研究, 得出了  $Re=1\ 300\sim 4\ 500$  范围内的换热和阻力试验关联式, 可供工程实际选用。试验得出的主要结论如下。

(1) 试验测定的空气侧换热系数实际上包含了接触热阻在内, 不同的换热管材料通过影响接触热

阻, 从而影响管外空气侧换热的优劣。在翅片材料都选用铝的情况下, 换热管材料接触热阻的大小顺序为铁白铜  $<$  304 不锈钢, 304 不锈钢管比铁白铜管增加的附加接触热阻为  $4.53 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

(2) 在相同的  $Re$  下, 铁白铜管平翅片的换热效果优于 316L 不锈钢轧制管, 后者优于 304 不锈钢管平翅片。

## 参考文献:

- [1] JANG J, WU M, CHANG W. Numerical and experimental studies of three dimensional plate-fin and tube heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1996, 39(14): 3057-3066.
- [2] ROMERO-MENDEZ R, SEN M, YANG K T, et al. Effect of fin spacing on convection in a plate fin and tube heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(1): 39-51.
- [3] TANG L H, ZENG M, WANG Q W. Experimental and numerical investigation on air-side performance of fin-and-tube heat exchangers with various fin patterns [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2009, 33(5): 818-827.
- [4] DING W K, FAN J F, HE Y L, et al. A general simulation model for performance prediction of plate fin-and-tube heat exchanger with complex circuit configuration [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31(16): 3106-3116.
- [5] HE Y L, TAO W Q, SONG F Q, et al. Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics of plain plate fin-and-tube heat exchangers from view point of field synergy principle [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005, 26(3): 459-473.
- [6] 康海军, 李斌, 李惠珍, 等. 平直翅片管换热器传热与阻力特性的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(1): 91-98.  
KANG Haijun, LI Bin, LI Huizhen, et al. A study on heat transfer and pressure drop characteristics of plane fin-tube heat exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(1): 91-98.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [8] COOPER M G, MIKIC B B, YOVANOVICH M M. Thermal contact conductance [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1969, 12(3): 279-300.
- [9] MIKIC B B. Thermal contact conductance: theoretical considerations [J]. International Journal of Heat and

- Mass Transfer, 1974, 17(2): 205-214.
- [10] MADHUSUDANA C V. Thermal contact conductance [M]. New York, USA: Springer, 1996: 4-5.
- [11] BAHRAMI M, CULHAM J R, YOvanovich M M. Modeling thermal contact resistance; a scale analysis approach [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2004, 126(6): 896-905.
- [12] CONG P Z, ZHANG X, FUJII M. Estimation of thermal contact resistance using ultrasonic waves [J]. International Journal of Thermophysics, 2006, 27(1): 171-183.
- [13] ZOU M Q, YU B M, CAI J C, et al. Fractal model for thermal contact conductance [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2008, 130(10): 101301.
- [14] 汪明朴, 尹志民. 中国材料工程大典: 第四卷 有色金属材料工程 上 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 334.
- [15] 干勇, 田志凌. 中国工程材料大典: 第三卷 钢铁材料工程 下 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 507-543.
- [16] KLINE S J, MCCLINTOCK F A. Describing uncertainties in single-sample experiments [J]. Mechanical Engineering, 1953, 75(7): 3-9.

(编辑 荆树蓉)

## (上接第 35 页)

- [6] 沈胜强, 梁刚涛, 龚路远, 等. 水平管降膜蒸发器传热系数空间分布 [J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3381-3385.
- SHEN Shengqiang, LIANG Gangtao, GONG Luyuan, et al. Distribution of heat transfer coefficient in horizontal-tube falling film evaporator [J]. Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(12): 3381-3385.
- [7] DARWISH M A, AL-JUWAYHEL F, ABDULRAHEIM H K. Multi-effect boiling systems from an energy viewpoint [J]. Desalination, 2006, 194(1/2/3): 22-39.
- [8] ALY N H, EL-FIGI A K. Thermal performance of seawater desalination systems [J]. Desalination, 2003, 158(1/2/3): 127-142.
- [9] EL-DESSOUKY H T, ETTOUNEY H M. Fundamentals of salt water desalination [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2002: 193-196.
- [10] EL-DESSOUKY H T, ALATIQUI I, BINGULAC S, et al. Steady state analysis of the multiple effect evaporation desalination process [J]. Chemical Engineering & Technology, 1998, 21(5): 437-451.
- [11] EL-DESSOUKEY H T, ALATIQUI I M, ETTOUNEY H M, et al. Performance of wire mesh mist eliminator [J]. Chemical Engineering and Processing, 2000, 39: 129-139.
- [12] EL-DESSOUKY H T, ETTOUNEY H M, MANDANI F. Performance of parallel feed multiple effect evaporation system for seawater desalination [J]. Applied Thermal Engineering, 2000, 20 (17): 1679-1706.
- [13] SHEN Shengqiang, LIU Rui, YANG Yong, et al. Condensation character of a stratified flow inside a horizontal tube [J]. Desalination and Water Treatment, 2011, 33(1/2/3): 218-223.
- [14] 刘华, 沈胜强, 龚路远, 等. 水平管降膜蒸发器温度损失计算与分析 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(4): 90-94.
- LIU Hua, SHEN Shengqiang, GONG Luyuan, et al. Evaporation temperature loss evaluation in horizontal tube falling film evaporator [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 90-94.
- [15] SHEN Shengqiang, ZHOU Shihe, YANG Yong, et al. Study of steam parameters on the performance of a TVC-MED desalination plant [J]. Desalination and Water Treatment, 2011, 33(1/2/3): 300-308.

(编辑 荆树蓉)