

小管径穿片式翅片管三种间距下的 换热与阻力特性

高文通, 欧阳新萍

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 对3种基管外径(10 mm)和管间距相同、翅片间距不同的穿片式空气-水换热器的换热与阻力特性进行了试验研究,翅片间距分别为1.0、1.6、1.9 mm. 得出了不同翅片间距下的管外换热系数和流动阻力系数以及相应的计算关联式,利用评价指标对3种试件的综合换热性能进行了评价. 结果表明:翅片间距对管外换热性能的影响很大;在选择具有合理翅化比的换热器的翅片间距时还需考虑经济性和紧凑度等方面的因素.

关键词: 穿片式翅片管; 翅片间距; 换热系数; 阻力系数; 性能评价

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

Heat Transfer and Resistance Performance of Small Diameter Plate Fin-tube with Three Different Fin Spaces

GAO Wentong, OUYANG Xinping

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai
for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Flow resistance and heat transfer characteristics of the plate fin-tube heat exchanger with three different fin spaces were investigated with the same base tube diameter of 10 mm. Three different fin spaces of 1.0, 1.6, 1.9 mm were used. The resistance and heat transfer coefficients for outside tube as well as their correlations were attained. The comprehensive heat transfer characteristics of the tested tubes were evaluated. The criteria for evaluating the comprehensive thermal performance of tested tubes were adopted. Experimental results showed that the fin space had an important influence on the heat transfer performance outside of the tube. The heat exchanger with reasonable finned ratio should take the economy and compact into the consideration for the fin space selection.

Keywords: plate fin-tube; fin spaces; heat transfer coefficient; resistance coefficient; performance evaluation

收稿日期: 2016-01-09

第一作者: 高文通(1990—),女,硕士研究生. 研究方向:制冷空调新技术. E-mail: 1486450854@qq.com

通信作者: 欧阳新萍(1964—),男,副教授. 研究方向:制冷技术与设备. E-mail: xpoy@163.com

换热器作为能量系统中使用最广泛的单元设备之一,在石油、化工、动力、能源、冶金、航空、车辆、制冷、食品等领域被广泛利用,其性能的改善对于改进系统的用能过程、降低能量消耗具有重要的意义.管翅式换热器一般用于气体与液体或相变工质之间的换热,而其空气侧热阻在整个热阻中起主导作用^[1-2],空气-水冷却器就是其中一种.空气-水冷却器一般由整张翅片与铜管或铜合金管穿片涨管而成,管子外径多在 12~19 mm.随着一些用户对空气-水冷却器的高效紧凑型要求的提高,10 mm 小管径的空气-水冷却器得到了开发和应用.小管径冷却器的传热效率高,但同时管内外流动阻力也高,特别是管外空气流动阻力会增加较多.这是由于小管径冷却器与常规管径冷却器相比,管间距和翅片间距均更小.为了在小管径冷却器的高效紧凑和流动阻力的增加之间达到最优的效果,必须寻求冷却器最优的结构参数,尤其是管间距、翅片间距.受翅片效率和翅化比的约束,管间距的调整范围有限,翅片间距则成为主要的调节参数.基于风机盘管的管翅式换热器的研究^[3-5]表明,翅片间距对传热性能和管外空气流动阻力的影响很复杂.人们针对翅片形状、间距、管径及管排方式等因素对换热的影响做了大量的实验研究^[6-11].目前,多采用一些综合评价指标对传热和阻力性能进行综合评价.以热力学第一定律为基础建立的传热特性参数如传热系数、传热温差用于评价热交换器性能时,只强调了传热强度而没有考虑回收能量的品质.为了反映换热器表面性能的优劣,本文采用比较传热表面能量传递和能量消耗比的方法,对换热器的性能进行评价.由于本文中的换热器是管翅式换热器,所以将翅片效率的变化对表面性能的影响包含在评价指标中是十分必要的.

本文对管径为 10 mm 的电机冷却器的翅片间距进行分析比较,确定了翅片间距变化对换热系数以及换热器的换热性能的影响.

1 试件及试验装置

本文针对 3 种基管外径(10 mm)、管间距相同但翅片间距不同的管翅式换热器进行了试验研究.试验在风洞试验台上进行,试验系统图如图 1 所示.翅片形式为开缝翅片,3 种试件的结构参数如表 1 所示.试件管内通热水,管外空气横掠.试验时,水进、出口温度由热电阻测量,水流量由电磁流量计测量.空气进、出口温度由热电偶测量,空气流量由毕托管测量.在试件前、后风道上装有 U 型测压管,测量其压差,即可得到空气流动阻力 ΔP .试验中,通过调节变频器改变电机转速从而改变通过翅片管的空气流量.

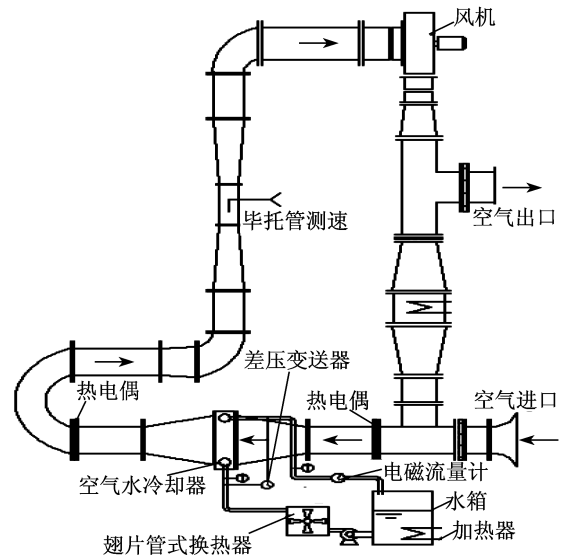


图 1 试验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

表 1 试件结构参数

Tab. 1 Geometrical parameters of the tested tubes

试件编号	翅片间距/mm	基管外径 d_o /mm	基管内径 d_i /mm	横向管间距/mm	纵向管间距/mm	翅片厚度 δ /mm	翅化比 β	迎风面积/m ²
1号	1.0	10.35	9.8	20	15.5	0.15	14.90	0.359
2号	1.6	10.35	9.8	20	15.5	0.15	9.68	0.359
3号	1.9	10.35	9.8	20	15.5	0.15	8.31	0.359

2 试验及数据处理方法

2.1 换热性能试验方法

通过测量热水和空气的进、出口温度及流量计算热水的放热量 Q_1 和冷水的吸热量 Q_2 . 当 Q_1 和 Q_2 之间的热平衡误差满足给定精度要求时, 取两者的算术平均 Q 作为换热量. 总传热系数 K_o . 计算式为

$$K_o = \frac{Q}{A_o \Delta t} \quad (1)$$

式中: A_o 为传热面积(管外总表面积); Δt 为对数平均温差.

管内对流换热系数 h_i 由旺盛湍流的经典公式计算, 即

$$h_i = 0.023 \frac{\lambda_f}{d_i} Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (2)$$

式中: λ_f 为管内水的导热系数; Re_f 为管内水的雷诺数; Pr_f 为管内水的普朗特数.

以管外总表面积 A_o 为基准的总传热系数的热阻方程式为

$$K_o = \frac{1}{\frac{1}{h_o \eta_o} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \left(\frac{1}{h_i} + r\right) \frac{A_o}{A_i}} \quad (3)$$

式中: h_o 为管内对流换热系数; η_o 为肋面总效率; λ 为管壁导热系数; r 为管内污垢系数; A_i 为管内总表面积.

由式(3)可计算得到以管外总表面积 A_o 为基准的管外空气对流换热系数 h_o , 并拟合出管外平均传热系数的准则方程式, 即

$$Nu = C Re^n Pr^{1/3} \quad (4)$$

式中: Nu 为努塞尔数, $Nu = \frac{h_o d_o}{\lambda_a}$, λ_a 为空气导热系数; C 、 n 均为未知系数.

以基管外表面积 A_b 为基准的传热系数 K_b 的热阻方程式为

$$K_b = \frac{1}{\frac{1}{h_b} + \frac{d_o}{2\lambda} \ln \frac{d_o}{d_i} + \left(\frac{1}{h_i} + r\right) \frac{A_b}{A_i}} \quad (5)$$

$$K_b = \frac{K_o A_o}{A_b} \quad (6)$$

由式(5)可计算得到以基管外表面积为基准的管外空气对流换热系数 h_b . 相应地, Nu 的表达式为

$$Nu = \frac{h_b d_o}{\lambda_a} \quad (7)$$

2.2 流动阻力性能试验方法

摩擦阻力系数采用 Darcy 定义, 即

$$f = \frac{2\Delta P}{\rho u_m^2} \quad (8)$$

式中: f 为 Darcy 摩擦阻力系数; ρ 为流体密度; u_m 为来流平均流速.

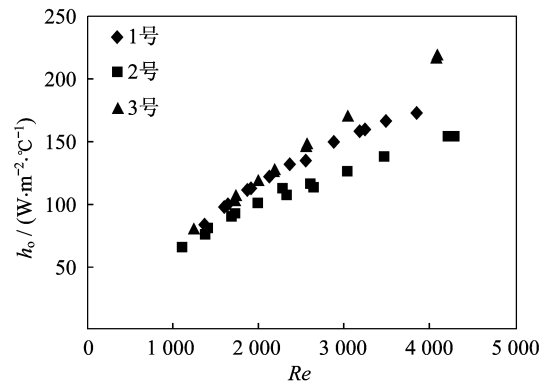
根据试验数据可利用式(8)求出摩擦阻力系数. 将摩擦阻力系数整理成以下形式, 即

$$f = C_f Re^m \quad (9)$$

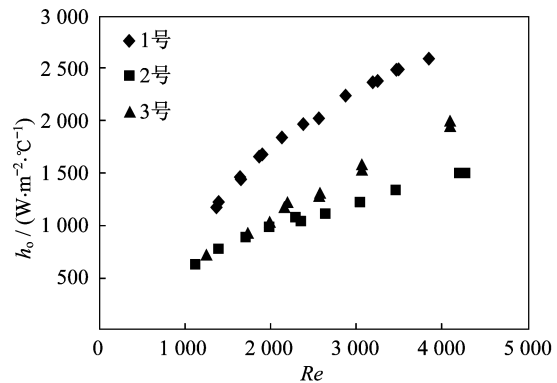
式中: C_f 为阻力系数; m 为未知指数; Re 为雷诺数.

3 试验结果及分析

3种试件的换热特性与阻力系数分别如图2、3所示. 根据试验测得的数据计算得到的准则关系式系数分别如表2、3、4所示.



(a) 基于管外总表面积



(b) 基于基管外表面积

图2 3种试件的换热特性

Fig. 2 Heat transfer performance comparison of three tested tubes

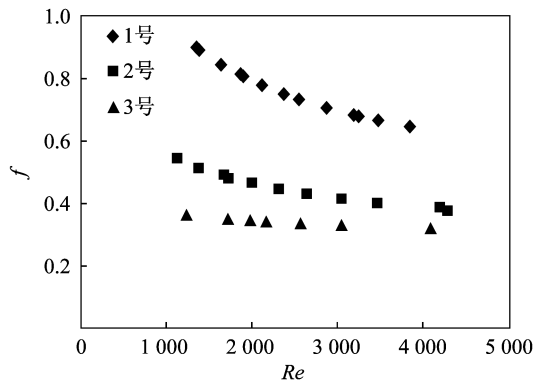


图 3 3 种试件的阻力系数

Fig. 3 Flow resistance comparison of three tested tubes

表 2 基于管外总表面积对流换热准则关系式系数

Tab. 2 Coefficients of convective heat transfer correlation based on the overall surface outside of tube

试件编号	C	n
1 号	0.159	0.752
2 号	0.287	0.656
3 号	0.083	0.849

表 3 基于基管外表面积对流换热准则关系式系数

Tab. 3 Coefficients of convective heat transfer correlation based on the surface outside of base tube

试件编号	C	n
1 号	2.744	0.737
2 号	3.482	0.630
3 号	0.545	0.888

表 4 摩擦阻力关系式中的参数

Tab. 4 Parameters in the Darcy correlation

试件编号	C_f	m
1 号	8.820	-0.317
2 号	3.490	-0.265
3 号	0.750	-0.101

由图 2(a)可知,在所测工况范围内,试件按基于管外总表面积的换热系数由大到小依次为 3 号、1 号、2 号试件.通常,对于穿片式翅片,翅片间距越小,气流在翅片上润湿的周边越大,换热系

数也就越小^[12],因此,1 号、2 号试件的换热系数会低于 3 号试件.但 1 号试件的翅片间距小于 2 号试件,分析认为:当翅片间距非常小时,流经翅片的气流流通截面积很小,促进了开缝片表面气流涡源数量的增加,使气流扰动更加剧烈^[13],而且随着雷诺数的增加,扰动效果明显加强,换热更充分^[14],因而 1 号试件的换热性能强于 2 号试件.除了上述因素以外,还有一些因素会对换热造成影响.在较高雷诺数下,翅片间距较大的翅管换热性能易受到管件诱发产生的涡旋流动的管前区(即前向涡区)和管侧区(即纵侧涡区)的影响而增强^[15].当翅片间距非常小使得流道面积很小时,流体流动时会产生边界层分离现象,造成局部换热系数的较大跌落^[16-18].综合以上因素,1 号试件的换热性能强于 2 号试件而低于 3 号试件.

由图 2(b)可知,试件按基于基管外表面积的换热系数由大到小依次为 1 号、3 号、2 号试件.由于 3 种试件的基管外表面积、试件体积相同,因此,图 2(b)可以理解为单位体积换热能力的比较,而图 2(a)则是基于单位面积换热能力的比较.通常,对于仅翅片间距存在差异的翅片管而言,以基管外表面积为基准的管外换热系数会随着翅片间距的减小而增加.因为随着翅片间距的减小,管外实际参与换热的面积增加,换热量增加,而用于计算换热系数的基管外表面积并无变化.所以,图 2(b)中 1 号试件的管外换热系数最大属合理,但翅片间距较大的 3 号试件的管外换热系数大于 2 号试件则不合常理.分析认为,图 2(a)中 2 号试件的基于单位面积的换热性能太弱,即使其实际换热面积大于 3 号试件,其单位体积的换热性能仍低于 3 号试件.

由图 2 及上述分析可以推断,对穿片式翅片管而言,翅片间距对管外换热性能的影响很大.因此,可能存在一个翅片间距的范围,在此范围内,翅片管的换热性能较弱.本文中翅片间距为 1.6 mm 的 2 号试件就处在此范围.因此,在设计翅片间距时应避开这一范围.

由图 3 可知,3 种试件的阻力系数由大到小依次为 1 号、2 号、3 号试件.阻力系数随着翅片间距的增大而减小,这是正常现象.

4 试件综合性能评价

对流换热的强化往往伴随着压降的增加,因此,如何综合评价传热强化方法的优劣是研究传热强化方法中的关键.本文采用比较传热表面能量传递与能量消耗比的方法对3种翅片间距试件进行综合评价^[13].

翅片效率的变化对表面性能的影响不容忽视,所以将翅片表面效率 η_o 包含在评价指标中.以 $E/(\eta_o h_o)$ 为横坐标, $\eta_o h_o$ 为纵坐标,将3种试件的试验数据绘成图4(a),其中 E 为单位传热面积的有效泵输入功率.图4(a)用于评价管外换热性能与流体驱动耗功的综合性能.由图可见,3号试件的换热性能最优.这意味着在相同功耗下,3号试件的管外换热系数最大,所需换热面积最小,翅片材料最省,或者说相同的管外换热系数时,3号试件的耗功最小.

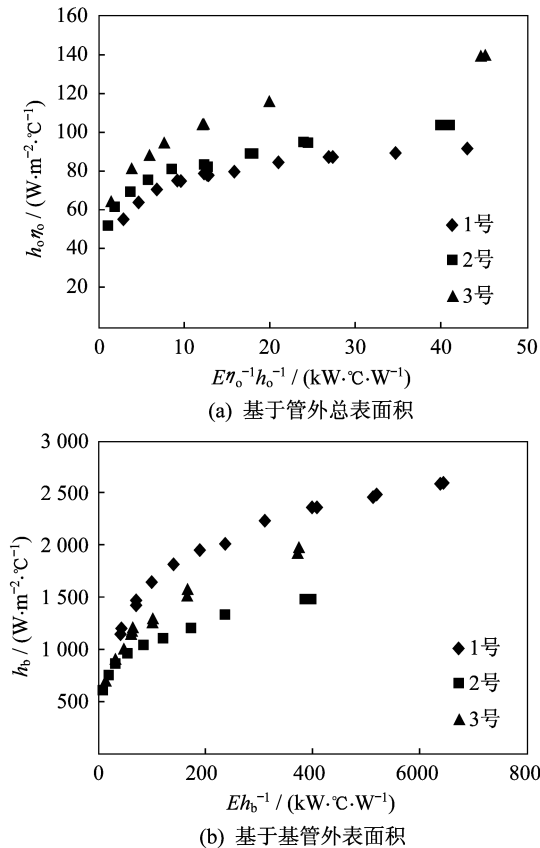


图4 3种试件的综合性能

Fig. 4 Comprehensive performance comparison of three tested tubes

选择换热设备时还需要考虑其结构的紧凑度.图4(a)无法反映出设备的紧凑度,图4(b)是以基管外表面积为基准的综合性能比较图,可反映设备的紧凑度,即以 h_o 取代图4(a)中的 $h_o \eta_o$,且不考虑 η_o .由图4(b)可知:1号试件所需要的基管外表面积最小.对3种试件而言,相同的基管外表面积意味着相同的换热器体积,因此,1号试件的体积最小,最为紧凑.

综上所述,从布置最小的管外总换热面积、节省翅片材料的角度考虑,翅片间距为1.9 mm的3号试件的性能最优;从换热器的紧凑度角度考虑,翅片间距为1.0 mm的1号试件性能最优.

另外,翅片间距的选择还要考虑翅化比,因为这关系到换热器的整体换热性能.对于空气和水的换热,翅化比为8~20时较为合理.表1中所给出的3种试件的翅化比均处在合理范围.

5 结论

(1) 对于穿片式翅片管而言,翅片间距对管外换热性能影响很大,可能存在一个翅片间距的范围,在此范围内翅片管的换热能力较弱,在设计翅片间距时应避开这一范围.

(2) 对于10 mm小管径的穿片式翅片管而言,从布置最小的管外总换热面积、节省翅片材料的角度考虑,翅片间距为1.9 mm的3号试件的性能最优;从换热器的紧凑度角度考虑,翅片间距为1.0 mm的1号试件性能最优.

(3) 翅片间距大小的选择还要考虑翅化比.对于空气和水的换热,翅化比为8~20时较为合理.

参考文献:

- [1] KUPPAN T. 换热器设计手册[M]. 钱颂文,译. 北京:中国石化出版社,2004.
- [2] WANG C C. A survey of recent patents of fin-and-tube heat exchangers from 2001 to 2009 [J]. International Journal of Air-conditioning and Refrigeration, 2010, 18(1): 1-13.
- [3] 徐凤林. 风机盘管表冷器的优化设计[J]. 制冷空调技术, 2001(2): 21-27.

(下转第49页)

- [7] NOORMAN S, VAN SINT ANNALAND M, KUIPERS H. Packed bed reactor technology for chemical-looping combustion [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, **46**(12): 4212 - 4220.
- [8] NOORMAN S, VAN SINT ANNALAND M, KUIPERS J A M. Experimental validation of packed bed chemical-looping combustion[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, **65**(1): 92 - 97.
- [9] NOORMAN S, GALLUCCI F, VAN SINT ANNALAND M, et al. A theoretical investigation of CLC in packed beds[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **167**(1): 297 - 307.
- [10] NOORMAN S, GALLUCCI F, VAN SINT ANNALAND M, et al. A theoretical investigation of CLC in packed beds[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, **167**(1): 369 - 376.
- [11] GUO X Y, SUN Y L, LI R, et al. Experimental investigations on temperature variation and inhomogeneity in a packed bed CLC reactor of large particles and low aspect ratio[J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, **107**: 266 - 276.

(上接第 42 页)

- [4] 周礼. 干工况平行流换热器空气侧翅片参数优化与实验研究[D]. 广州: 广州大学, 2013.
- [5] 倪美琴, 沈炜. 风机盘管机组选型及设计问题的探讨[J]. *制冷与空调*, 2007, **21**(1): 55 - 58.
- [6] 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.
- [7] KANG H J, LI W, LI H Z, et al. Experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of four types of plate fin-and-tube heat exchanger surfaces [J]. *Journal of Thermal Science*, 1994, **3**(1): 34 - 42.
- [8] YUN J Y, LEE K S. Investigation of heat transfer characteristics on various kinds of fin-and-tube heat exchangers with interrupted surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, **42**(13): 2375 - 2385.
- [9] 刘建, 魏文建, 丁国良, 等. 翅片管式换热器换热与压降特性的实验研究进展——实验研究[J]. *制冷学报*, 2003, **24**(3): 25 - 30.
- [10] 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.
- [11] 余小章, 俞勤芳. 紧凑热交换器优化设计[J]. *南京航空航天大学学报*, 1994, **26**(4): 489 - 494.
- [12] RICH D G. The effect of fin spacing on heat transfer and friction performance of multi-row smooth plate fin and tube heat exchangers [J]. *Ashrae Transactions*, 1973, **79**: 137 - 145.
- [13] 顾维藻, 神家锐, 马重芳, 等. 强化传热[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [14] 史美中, 王中铮. 热交换器原理与设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2009.
- [15] 李红智, 罗毓珊, 王海军, 等. 圆弧型与 X 型开缝翅片空气侧流动与传热特性可视化试验[J]. *化工学报*, 2008, **59**(8): 1936 - 1941.
- [16] SABOYA F E M, SPARROW E M. Local and average transfer coefficients for one-row plate fin and tube heat exchanger configurations [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1974, **96**(3): 265 - 272.
- [17] SABOYA F E M, SPARROW E M. Transfer characteristics of two-row plate fin and tube heat exchanger configurations [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1976, **19**(1): 41 - 49.
- [18] SABOYA F E M, SPARROW E M. Experiments on a three-row fin and tube heat exchanger [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1976, **98**(3): 520 - 522.