

三种大管径翅管式换热器传热与阻力特性的试验研究

唐凌虹, 谢公南, 曾敏, 王海刚, 韩武涛, 王秋旺
(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为考察不同翅片形式以及管排数对空气侧强化传热的影响, 分别对 9 排和 12 排带平直、开缝、纵向涡 3 种翅片形式共 6 个翅片管换热器元件空气侧的传热及阻力性能进行了试验研究, 发现开缝翅片管换热器的传热性能高于带纵向涡翅片管换热器和平直翅片管换热器, 但阻力相应也增加, 带纵向涡发生器的翅片传热性能略低于开缝翅片, 但阻力却只比平直翅片稍大, 这表明采用这种翅片形式可获得较好的综合性能。不同管排数的同一片型换热器的努塞尔数及阻力因子相差很小, 可以认为与管排数无关。在试验的雷诺数范围内针对各个试件整理出了传热和阻力的经验关联式, 可为相关的理论研究和工程应用提供参考。

关键词: 翅片管换热器; 翅片形式; 传热; 阻力

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)05-0521-05

Experimental Investigation on Heat Transfer and Flow Friction Characteristics in Three Types of Plate Fin-and-Tube Heat Exchangers

Tang Linghong, Xie Gongnan, Zeng Min, Wang Haigang, Han Wutao, Wang Qiuwang
(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Air side heat transfer and friction characteristics in three nine-row and three twelve-row fin-and-tube heat exchanger cores with varied types of fin configurations are experimentally investigated. The test cores consist of three extended surfaces such as plain fins (PF), slit fins (SF) and fins with longitudinal vortex generator (LVG). It is shown that SF offers higher heat transfer and flow friction than the other two fin surfaces. The heat transfer of LVG is slightly lower than that of SF while the corresponding flow friction is slightly larger than that of PF, and LVG in heat exchanger enables to perform better. The effects of number of tube rows on the same kind of fin surface are ignorable. The heat transfer and friction factor correlations for three fin surfaces are obtained in a wide range of Reynolds numbers for the further research and engineering applications.

Keywords: fin-and-tube heat exchanger; fin configuration; heat transfer; flow friction

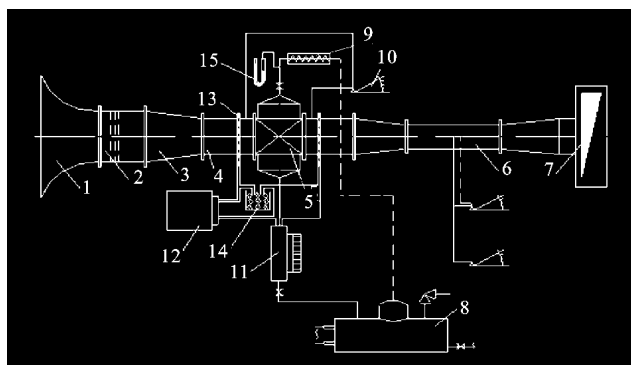
作为能量传递的主要设备, 换热器性能的好坏对节能具有很大的意义。翅管式换热器在制冷、空调与空气冷却等行业得到了广泛的应用。由于热阻主要集中在空气侧, 它占了总热阻的 85% 甚至更多, 空气侧性能很大程度上决定了整个换热器的性能,

因此为了有效地提高空气侧换热效果和减小换热器的尺寸和重量, 常常用到强化换热表面。文献[1]比较了平直翅片、波纹翅片、百叶窗翅片和开缝翅片这 4 种不同翅片形式较小管径(管外径小于 16 mm)的翅管式换热器的换热及阻力特性, 可知平直翅片的

阻力最小,开缝翅片的换热和阻力的综合性能最优.国内外学者针对平直翅片、开缝翅片进行了许多研究工作^[2-4],纵向涡发生器作为第3代强化换热表面,近几年来得到了广泛的关注^[5-8].工业上冷却空气的中冷器所采用的基管管径及管排数均较制冷空调行业中的大,但是关于较大基管管径(大于16 mm)及较多管排数(大于8排)的翅管式换热器的研究相对较少.本文的目的就是通过试验研究较大管径及较多管排数下平直翅片、开缝翅片及纵向涡发生器的换热与阻力特性,为相关的工业应用提供理论根据.

1 试验装置及试验元件参数

本试验在吸风式风洞中进行,如图1所示,系统由空气与凝结水两回路组成.试验时,在水蒸气压力保持不变的情况下,通过调节阀改变空气侧的流量,进行多个工况的试验测定.换热与阻力试验数据均是在工况稳定后进行测量的,每个工况测取几组数据,取其平均值进行计算.空气侧与凝结水侧测得的热量偏差在±5%以内,以两者的平均值作为计算换热量.



1:进口;2:整流段;3:收缩段;4:稳定段;5:试验段;6:毕托管;
7:风机;8:锅炉;9:过热器;10:倾斜式微压计;11:容积式
流量计;12:数字电压表;13:热电偶网格;14:冰瓶;
15:U型管差压计

图1 试验风洞系统

图2~图4分别为平直翅片、开缝翅片及纵向涡发生器翅片实物照片的一部分.

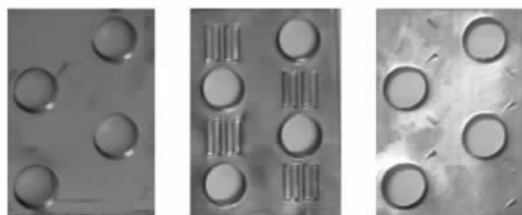


图2 平直翅片 图3 开缝翅片 图4 纵向涡发生器

试验元件基管内径 $d_1=16$ mm,基管外径 $d_2=18$ mm,横向间距 $S_1=42$ mm,纵向间距 $S_2=34$ mm,翅片厚度 $\delta=0.3$ mm,翅片间距 $F_p=3.2$ mm.每种翅片的试验元件均有9排和12排两种管排.试验元件管束排列采用错排方式,基管材料及翅片材料均为紫铜,试件采用胀管的方式使基管与翅片紧密结合.

2 试验数据的整理

2.1 传热试验数据整理

根据试验测得的蒸汽压力及凝结水流量 m ,可以确定蒸汽侧的放热量

$$\Phi_w = r \dot{m} \quad (1)$$

式中: r 为汽化潜热.

根据空气在试验元件进出口的温差 Δt 以及质量流量 q_m ,可以确定空气侧的吸热量

$$\Phi_a = q_m c_p \Delta t \quad (2)$$

式中: c_p 为空气的比定压热容.

文中将 Φ_w 和 Φ_a 的平均值 Φ_m 作为计算热量

$$\Phi_m = (\Phi_w + \Phi_a)/2 \quad (3)$$

试验时,热平衡偏差 $|\Phi_w - \Phi_a|/\Phi_m$ 控制在5%以内.在试验工况下,蒸汽凝结换热热阻只占换热过程总热阻的1%~5%,采用热阻分离法将空气侧换热系数从总传热系数 k 中分离出来,具有较高的精度.由传热学知,传热系数计算式为^[9]

$$k = \Phi_m / (\Delta T A_o) \quad (4)$$

式中: ΔT 为对数平均温差; A_o 为空气侧总换热面积(包括翅片及基管面积).

传热过程的总热阻与分热阻的关系式为

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\eta_o h_o} + \frac{\delta A_o}{\lambda_i A_i} + \frac{A_o}{h_i A_i} \quad (5)$$

式中: η_o 为肋面总效率; h_o 为空气侧换热系数; h_i 为蒸汽侧凝结换热系数.

肋面总效率 η_o 由下式计算

$$\eta_o = 1 - (1 - \eta) A_f / A_o \quad (6)$$

式中: A_f 为翅片面积; η 为翅片效率,计算方法见文献^[10].

空气侧的 Re 及 Nu 定义如下

$$Re = u_{\max} d_3 / \nu \quad (7)$$

$$Nu = h_o d_3 / \lambda \quad (8)$$

式中: d_3 为特征长度, $d_3 = d_2 + 2\delta$; $u_{\max}$ 为最窄截面流速.

2.2 阻力试验数据整理

在传热试验的同时测取各元件的阻力数据,阻

力因子 f 可根据下式计算

$$f = \Delta p / (0.5 \rho u_{\max}^2 L / d_3) \quad (9)$$

式中: L 为流动方向翅片长度; Δp 为整个试件的流动阻力。

本试验所得出的 Nu 和 f 的不确定度分别为 6.48% 和 8.69%。

3 试验结果及分析

3.1 试验数据可靠性考核

为了保证试验结果的可靠性,本文首先对 9 排光管进行了试验,将试验结果与茹卡乌斯卡斯公式^[10]进行对比,如图 5 所示, Nu 最大偏差为 8.3%,表明本试验系统所得试验数据可信。

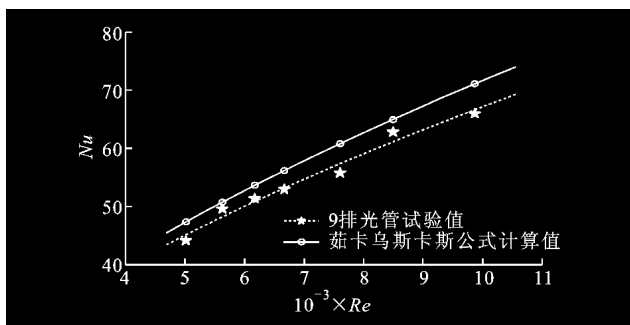


图 5 9 排光管试验结果考核

3.2 试验结果

流动和换热的整体特性可用下式表示

$$Nu = aRe^b; f = cRe^d \quad (10)$$

3.2.1 3 种翅片试验元件换热性能试验结果 3 种翅片两种不同管排数试验元件的换热性能对比性试验数据和拟合的关联式见图 6~图 8。

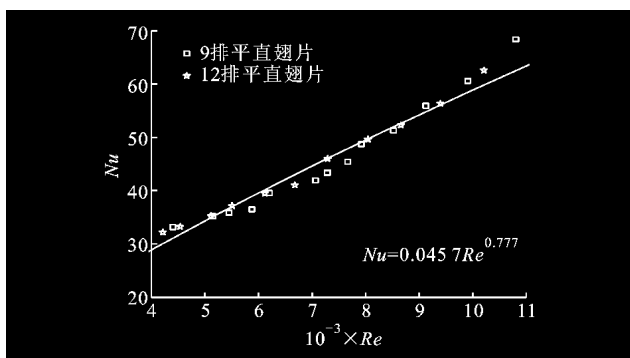


图 6 平直翅片试验元件 Nu 与 Re 关系图

图 6~图 8 均表明,3 种翅片两种不同管排数(9 排、12 排)试验元件的换热性能相差很小,管排数对 Nu 影响不大,说明翅片侧流体已达到充分发展状态。关联式拟合的标准偏差均小于 8%, Re 的适用范围为 $4.0 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4$ 。

3.2.2 3 种翅片试验元件阻力性能试验结果 3 种翅片两种不同管排数试验元件的阻力性能对比性试

验数据和拟合的关联式见图 9~图 11。

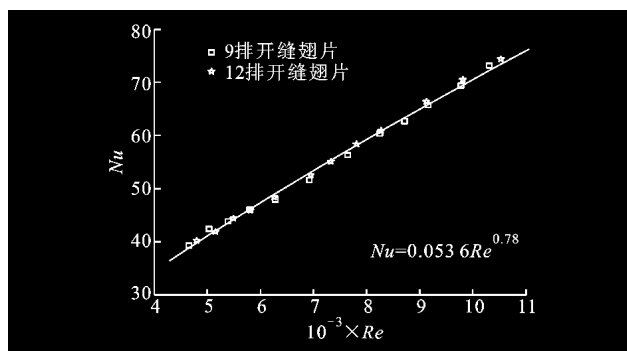


图 7 开缝翅片试验元件 Nu 与 Re 关系图

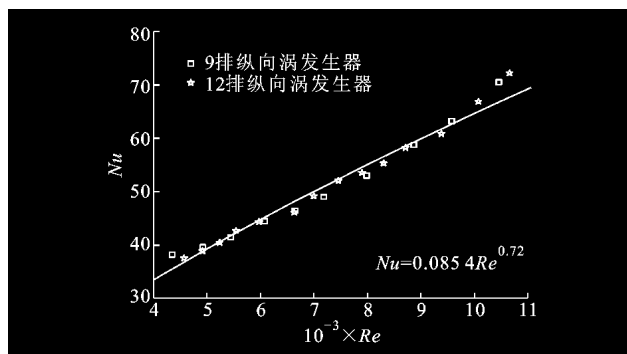


图 8 纵向涡发生器翅片试验元件 Nu 与 Re 关系图

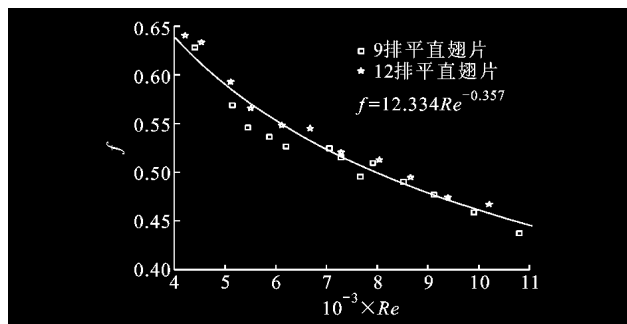


图 9 平直翅片试验元件 f 与 Re 关系图

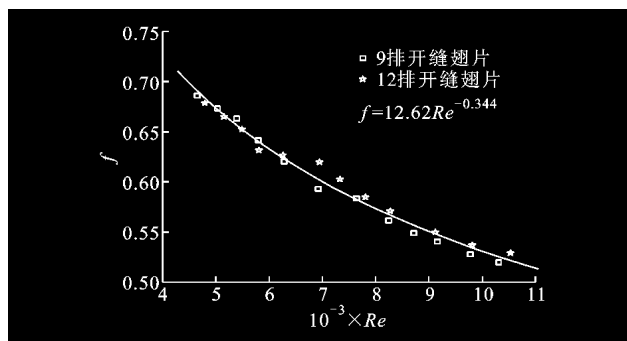
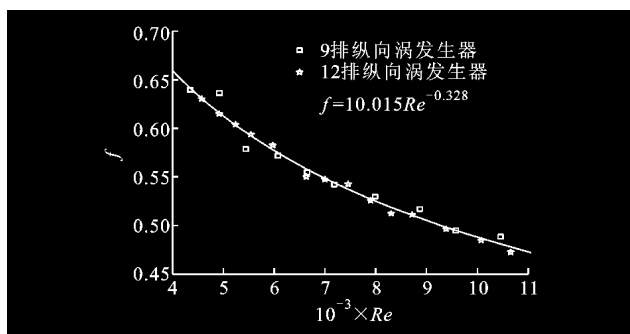


图 10 开缝翅片试验元件 f 与 Re 关系图

图 9~图 11 均表明,3 种翅片两种不同管排数(9 排、12 排)试验元件的 f 相当接近,在工程计算所允许的误差范围内,可以认为管排数对阻力系数没有什么影响,这也同时说明翅片侧流体已达到充分发展状态。根据式(9)可以认为本试验得出的 f 是折算到每排管子上的阻力系数,即每排管子上的

图11 纵向涡发生器翅片试验元件 f 与 Re 关系图

压降均相同. 关联式拟合的标准偏差均小于8%, Re 的适用范围为 $4.0 \times 10^3 \sim 1.1 \times 10^4$.

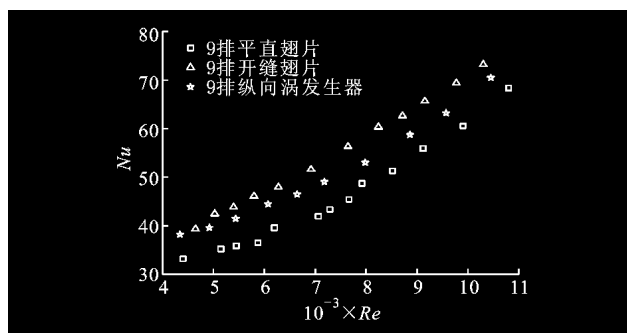
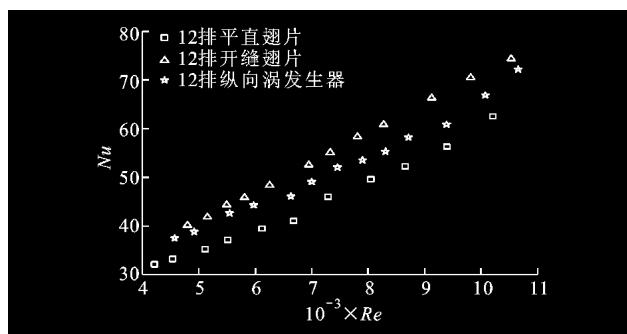
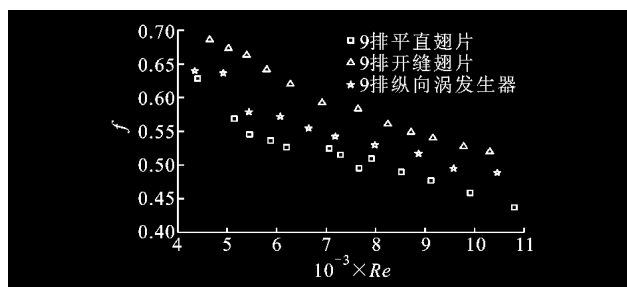
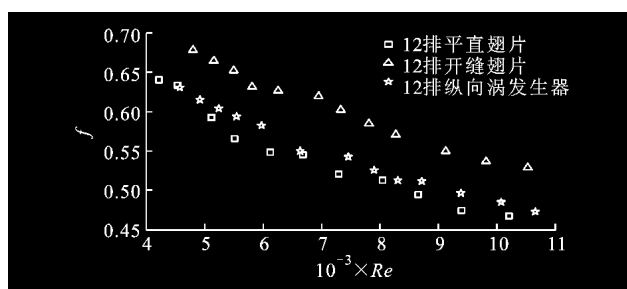
3.3 3种翅片换热与阻力性能综合比较

图12、图13所示是3种不同翅片相同管排数试验元件换热性能的比较, 图14、图15所示是3种不同翅片相同管排数试验元件阻力性能的比较.

图12及图13表明, 开缝翅片试验元件的 Nu 最高, 纵向涡发生器翅片试验元件的 Nu 次之, 平直翅片的 Nu 最低, 并且各种不同翅片试验元件的 Nu 都随着 Re 的增大而增大. 图12中, 当 $Re = 5000$ 时, 平直翅片试验元件的 Nu 比开缝翅片和纵向涡发生器翅片的 Nu 分别低21.8%和14.4%; 图13中, 当 $Re = 5000$ 时, 平直翅片试验元件的 Nu 比开缝翅片和纵向涡发生器翅片的 Nu 分别低21.5%和14.9%. 这是因为在翅片表面开缝及冲三角翼, 都扰动了边界层的发展, 使流动紊流增强, 沿流动方向边界层的发展不再是连续地发展而厚度不断增加, 而是使开缝处及三角翼处边界层破坏, 造成流动边界层的间歇发展, 因而使开缝翅片及纵向涡发生器翅片的换热强度增大, 其产生的阻力也必然比平直翅片的大. 很显然, 开缝翅片对气流的扰动比纵向涡发生器翅片更强烈一些, 因此开缝翅片的换热强度比纵向涡发生器翅片的更大.

图14表明, 开缝翅片试验元件的 f 最大, 纵向涡发生器翅片试验元件的 f 次之, 平直翅片的 f 最小, 当 $Re = 5000$ 时, 平直翅片试验元件的 f 比开缝翅片和纵向涡发生器翅片的 f 分别低16.4%和8.6%; 图15表明, 开缝翅片试验元件的 f 仍然最大, 纵向涡发生器翅片试验元件的 f 比平直翅片的 f 大, 但是已相当接近, 当 $Re = 5000$ 时, 平直翅片试验元件的 f 比开缝翅片和纵向涡发生器翅片的 f 分别低14.6%和5.8%. 各种不同翅片试验元件的 f 都随着 Re 的增大而减小. 图12~图15表明: 带纵向涡发生器的翅片换热比开缝翅片略小, 阻力只比平直翅片稍大, 显示出这种换热翅片具有优良的

综合性能.

图12 9排3种翅片试验元件 Nu 与 Re 关系图图13 12排3种翅片试验元件 Nu 与 Re 关系图图14 9排3种翅片试验元件 f 与 Re 关系图图15 12排3种翅片试验元件 f 与 Re 关系图

4 结 论

本文通过对3种不同翅片试验元件的换热与阻力的对比试验研究, 得到如下结论:

(1) 当管排数大于9时, 管排数对 Nu 及 f 的影响都很小, 可以认为试验元件的 Nu 及 f 与管排数无关;

(2) 对这3种不同翅片来说, 开缝翅片试验元件的 Nu 最高, 纵向涡发生器翅片试验元件的 Nu 次

之,平直翅片的 Nu 最低;

(3)管排数为9时,开缝翅片试验元件的 f 最大,纵向涡发生器翅片试验元件的 f 次之,平直翅片的 f 最小;管排数为12时,开缝翅片试验元件的 f 仍然最大,纵向涡发生器翅片试验元件的 f 只比平直翅片的 f 稍大;

(4)本文所拟合的关联式可为相关的工业应用提供理论根据。

参考文献:

- [1] 唐凌虹,曾敏,王秋旺. RIK 压缩机中间冷却器片型的优化[C]//第二届新型传热技术和设备研讨会会议论文集. 北京:中国化工学会化工机械专业委员会, 2005:108-111.
- [2] 康海军,李妩,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 Wu, Li Huizhen, et al. Experimental study on heat transfer and pressure drop for plane fin-and-tube heat exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1994, 28(1): 91-98.
- [3] Kang Haijun, Li Wu, Li Huizhen, 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.
- [4] 李惠珍,屈志国,程永攀,等. 开缝翅片流动和传热性能的实验研究及数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(3):229-232.
Li Huizhen, Qu Zhiguo, Cheng Yongpan, et al. Experimental and numerical study on heat transfer and fluid flow characteristics of slotted fin-and-tube heat transfer surfaces[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(3):229-232.
- [5] Wang Chichuan, Jerry Lo, Lin Yurtsai. Flow visualization of annular and delta winglet vortex generators in fin-and-tube heat exchanger application [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(18):3803-3815.
- [6] Kwak K M, Torii K, Nishino K. Heat transfer and flow characteristics of fin-tube bundles with and without winglet-type vortex generators[J]. Experiments in Fluids, 2002, 33(5):696-702.
- [7] 王令,陈秋炆,王秋旺,等. 一侧带有周期性分布纵向涡发生器的矩形窄通道内传热强化的实验研究[J]. 核动力工程, 2005, 26(4):344-347.
Wang Ling, Chen Qiuyang, Wang Qiuwang, et al. Heat transfer enhancement in narrow rectangular channel with periodically mounted longitudinal vortex generators on one sidewall [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 4 (26): 344-347.
- [8] 陈秋炆,曾敏,王秋旺,等. 纵向涡发生器对矩形窄通道内对流换热的影响[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(9):1010-1013.
Chen Qiuyang, Zeng Min, Wang Qiuwang, et al. Effect of mounted longitudinal vortex generators on convective heat transfer in narrow rectangular channel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(9): 1010-1013.
- [9] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [10] 王启川. 热交换器设计[M]. 台湾:五南图书出版公司, 2001.

(编辑 荆树蓉)