

开缝翅片流动和传热性能的实验研究及数值模拟

李惠珍, 屈治国, 程永攀, 陶文铨

(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: 对 2 排 X 型双向开缝翅片管换热器空气侧的传热及阻力性能进行了实验研究, 在实验的 Re 范围内得出了传热和阻力的性能关联式及特性曲线. 比较得出, 开缝翅片的传热性能远高于平直翅片, 与单向开缝翅片相比, X 型双向开缝翅片的性能更好. 通过数值模拟得出了 X 型双向开缝翅片的效率计算曲线. 应用场协同原理, 对数值模拟得到的气流在 2 片翅片之间的温度场、速度场、对流换热系数及压降在流动方向上的沿程变化进行了分析. 结果表明, 开缝翅片有效强化传热的根本原因是翅片开缝后改善了速度和温度梯度的协同性.

关键词: 换热器; 开缝翅片; 强化传热; 实验研究; 数值模拟; 场协同

中图分类号: TK13 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)03-0229-04

Experimental and Numerical Study on Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics of Slotted Fin-and-Tube Heat Transfer Surfaces

Li Huizhen, Qu Zhiguo, Cheng Yongpan, Tao Wenquan

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Air side heat transfer and fluid flow characteristics of two-row slotted fin-and-tube heat transfer surface with X-type strip arrangement were studied experimentally and numerically. The heat transfer and friction factor correlations were obtained in a wide range of Reynolds number. It is found that the slotted fin-and-tube heat transfer surfaces have excellent performance compared with the plain plate fin heat transfer surfaces and the performance of X-type two-side strip fin surfaces is better than that of one-side strip fin surfaces. By numerical method, the fin efficiency curves for X-type two-side strip fin surfaces were achieved. From the viewpoint of field synergy, the air velocity and temperature fields between the two neighboring fin surfaces and the distribution of local heat transfer coefficient and pressure drop in flow direction were analyzed. The results show that the heat transfer enhancement of slotted fins is caused by the improvement of the synergy between the velocity field and the temperature gradient.

Keywords: *heat exchanger; strip fin surface; heat transfer enhancement; experimental investigation; numerical simulation; field synergy principle*

在制冷、空调、化工等领域的换热器中, 空气侧的换热表面广泛采用整体套片式翅片管. 为强化空气侧传热, 在普通的平直翅片表面上开孔、开缝使其形成间断型翅片(如开缝翅片、百页窗翅片等)是实现这一目标的有效方法. 对开缝翅片管换热器的研究, 文献[1]中给出了 9 个单向开缝翅片管换热器的

传热及阻力性能实验关联式, 文献[2]也对部分单向及双向开缝翅片给出了实验关联式, 但由于开缝翅片结构复杂, 诸多因素如翅片节距、开缝翅片的缝宽、缝长、缝高、开缝数及缝的分布等都不同程度地影响其流动和传热^[3], 翅片效率的计算也因此变得复杂且无公式可循^[2,3], 用于分析开缝翅片流动和

传热机理的数值模拟研究则更少,因此对开缝翅片管的研究还远远不够.本文采用实验研究及数值模拟的方法,对与文献[1-3]中翅片结构不尽相同的国内空调器中应用的双向开缝翅片管换热器的传热和阻力性能进行了研究及分析.

1 实验装置及元件参数

实验装置为一个吸风式风洞,由空气和蒸气凝结水两回路组成,实验系统及测量参见文献[4].实验元件为开缝翅片管,翅片上开缝呈X型双桥布置(如图1所示).所谓双桥即指沿流动方向,开缝处的条带翅片交替地向上或向下突起,其突起高度为0.64 mm,条带宽度为1 mm.元件尺寸及管束参数为:基管外径 $d_0=7$ mm;翅根直径 $d_3=7.24$ mm ($d_3=d_0+2\delta$);翅片节距 $s=1.4$ mm;翅片厚度 $\delta=0.12$ mm;横向管间距 $s_1=21$ mm;纵向管间距 $s_2=12.7$ mm;管排数 $N=2$.管束排列方式为叉排,基管材料为铜,翅片材料为铝合金.

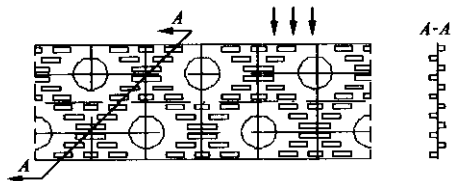


图1 开缝翅片条缝布置

2 实验数据整理

实验时管外翅片侧为空气强制对流换热,管内为蒸气凝结放热,在工况稳定后进行测量,各工况的热平衡偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内,以两侧热量的平均值作为计算热量.采用热阻分离法,将空气侧对流换热系数从总传热热阻中分离出来[5],表达式如下

$$\frac{1}{h_o \eta_o} = \frac{1}{k} - \left(R_w + R_s + \frac{1}{h_i} \frac{A_o}{A_i} \right) \quad (1)$$

式中: η_o 为肋面总效率, $\eta_o=(A_1+\eta_f A_2)/A_o$, A_1 为翅片间基管表面积, A_2 为翅片表面积, η_f 为翅片效率,用数值计算的方法确定; A_o 为翅片侧总表面积; A_i 为管内表面积; R_w 为管壁热阻; R_s 为污垢热阻(新换热器 $R_s=0$);管内蒸气凝结换热系数 h_i 按文献[5]计算.空气侧的雷诺数、努谢尔特数、摩擦因子如下

$$\left. \begin{aligned} Re &= u_m d_3 / \nu, \quad Nu = h_o d_3 / \lambda \\ \text{摩擦因子} &= \left(\frac{1}{2} \rho u_m^2 \frac{L}{d_3} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: u_m 为最窄截面处的空气流速; L 为气流流动方向的翅片长度; Δp 为气流沿流动长度的总压降.在式(2)的计算中,定性温度为实验元件进、出口空气的平均温度,特性尺度为翅根直径 d_3 .

3 实验结果

3.1 传热和阻力特性

拟合整理实验数据,得出2排X型双向开缝翅片管的传热和阻力特性实验关联式如下:

传热性能关联式

$$Nu = 10^{1.1974 - 0.2078(\lg Re) + 0.1034(\lg Re)^2} \quad (3)$$

适用范围为 $7.80 \times 10^2 < Re < 6.84 \times 10^3$

最大拟合偏差 $+1.75\%, -1.57\%$

阻力性能关联式

$$f = 10^{2.4249 - 0.9307(\lg Re) + 0.0711(\lg Re)^2} \quad (4)$$

适用范围为 $7.80 \times 10^2 < Re < 6.84 \times 10^3$

最大拟合偏差 $+2.42\%, -2.94\%$

X型双向开缝翅片管的传热和阻力特性实验曲线如图2所示,为进行比较,图中还给出了2排单向开缝翅片管[1]及平直翅片管[4]的特性曲线.由图2可看出:随 Re 增大, Nu 增大, f 减小;开缝翅片管的传热性能和阻力性能远高于平直翅片,在实验的 Re 范围内,X型双向开缝翅片管的传热性能比平直翅片管平均高约97.3%,阻力性能平均高约63.4%;两开缝翅片管的阻力性能接近,X型双向开缝翅片管的传热性能比单向开缝翅片管高约9.95%.简单比较可知,开缝翅片是一种有效强化空气传热的方式,而且X型布置的双向开缝翅片性能更好.

3.2 双向开缝翅片的效率

由于气流沿开缝翅片表面的流动和传热情况与平直翅片完全不同,开缝翅片效率的计算也变得复杂且无公式可循,在有关的实验研究文献中,是将开

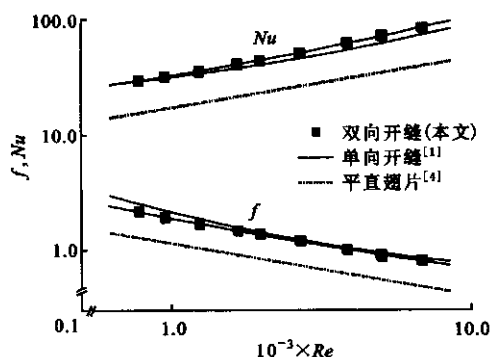


图2 翅片管的传热和阻力特性曲线及比较

缝翅片的效率近似取为 1 进行数据处理的^[2,3]. 本文应用文献[6]提出的数值模拟方法, 所得 X 型双向开缝翅片效率的计算曲线如图 3 所示.

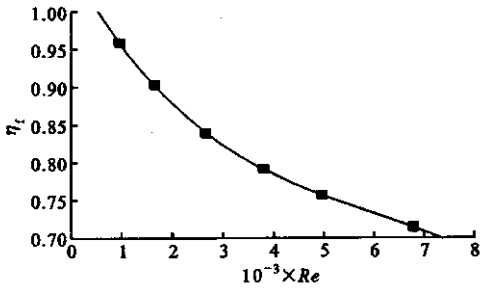


图 3 开缝翅片效率计算曲线

4 数值模拟

4.1 数值计算方法

对双向开缝翅片进行数值模拟时, 由于整个翅片管换热器几何结构的周期性和对称性, 取 2 片翅片之间的空间为计算区域, 如图 4 所示. 计算模型为三维稳态层流不可压缩流动, 采用 SIMPLE 算法^[7], 在气流流动的方向上, 入口取为 1.5L, 出口取为 5L 以使出口无回流, 圆管的边界形状通过阶梯逼近实现, 管壁温度给定为恒壁温, 流体温度和翅片温度由计算确定, 是一个对流和导热的耦合问题, 耦合计算及边界条件处理方法可参见文献[6].

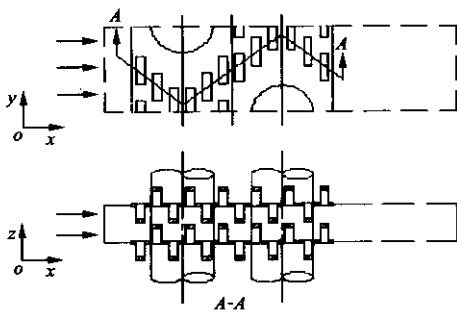


图 4 开缝翅片的计算区域

4.2 数值计算与实验结果的比较

数值计算所得的双向开缝翅片管对流换热系数与迎面风速的关系曲线如图 5 所示. 由图可看出, 数值计算结果在定性上与实验结果一致, 即在实验风速变化的范围内, 对流换热系数随风速的增大而增大. 在定量上, 当迎面风速 $u_0 < 3.6 \text{ m/s}$ 时, 计算值高于实验值; 当 $u_0 > 3.6 \text{ m/s}$ 时, 计算值低于实验值; 当 u_0 为 1.36 m/s 及 9.14 m/s 时, 计算值与实验结果的偏差分别为 +9.26% 和 -8.8%. 其余各点的偏差均小于此值, 说明数值计算结果与实验结果

符合良好.

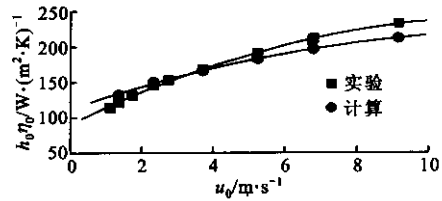
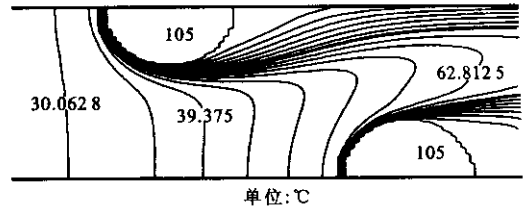


图 5 换热系数与迎面风速的关系曲线

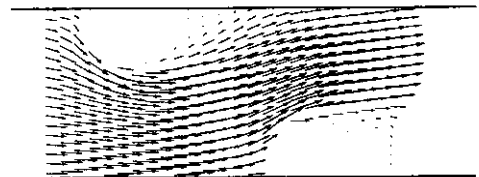
4.3 数值计算结果分析

为分析比较, 本文还对相同尺寸的平直翅片进行了数值模拟, 计算得出的平直翅片及双向开缝翅片的两翅片间中间截面的温度场及速度场如图 6、图 7 所示. 流动方向上对流换热系数及压降的沿程变化如图 8、图 9 所示.



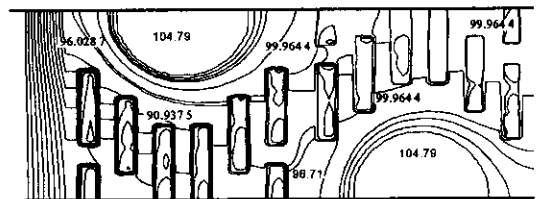
单位: °C

(a) 温度场



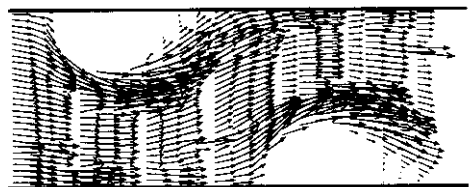
(b) 速度场

图 6 $Re=1657$ 时平直翅片的计算结果



单位: °C

(a) 温度场



(b) 速度场

图 7 $Re=1657$ 时双向开缝翅片的计算结果

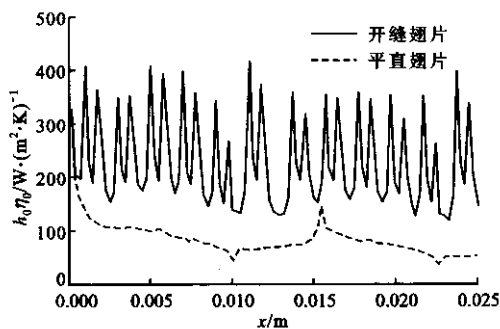


图8 流动方向上对流换热系数的沿程变化

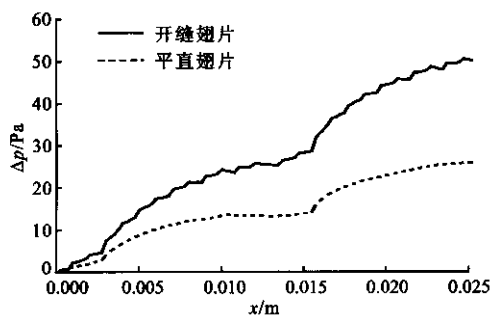


图9 流动方向上压降的沿程变化

图6、图7清楚地显示了这样的事实:在翅片表面开缝后,不仅增加了流体中的扰动,而且边界层在槽缝处被破坏,使边界层形成间歇发展,有效地减薄了翅片表面上的热边界层厚度,因而使传热得到显著的强化。我们还可以从场协同原理得到进一步理解,根据场协同原理^[8,9],减小速度场与温度梯度的夹角,即可使速度矢量和温度梯度矢量的方向协同一致,可以达到强化传热的目的。由图6、图7可知,在平直翅片的进口段,流线与等温线几乎垂直,即速度与温度梯度的方向几乎相同,速度与温度梯度的协同性很好,因而换热强烈,但在流经第一个管子后,两矢量的夹角增加,速度与温度梯度的协同性明显变差,因而局部对流换热系数下降,如图8中虚线所示。开缝翅片,特别是在管子后面的绕流区域开缝的翅片,有效地改善了速度与温度梯度的协同性,因而局部对流换热系数大为增加,如图8中的实线所示。

就沿程阻力而言,开缝使流动阻力增加,因而开缝翅片的沿程压力损失高于相应的平直翅片,如图9所示,但阻力增加的幅度略小于相同 Re 下对流换热系数增加的幅度。综合评价得出,在相同泵功下开缝翅片的性能比平直翅片高约63%。

5 结论

(1) 实验得出了2排X型双向开缝翅片管换热

器的传热和阻力性能关联式。

(2) 比较得出,开缝翅片的传热性能远高于平直翅片,再次表明开缝翅片可有效强化空气传热,且X型双向开缝翅片的性能更好。

(3) 数值模拟得出了X型双向开缝翅片的效率计算曲线。

(4) 通过数值模拟,得出了X型双向开缝翅片及同尺寸平直翅片的两翅片间的温度场、速度场及流动方向上对流换热系数和压降的沿程变化曲线。应用场协同原理分析表明,开缝翅片有效强化传热的根本原因是开缝的存在改善了速度和温度梯度的协同性。因此,如能得出整个流场中速度和温度梯度的夹角,在协同性比较差的区域布置开缝,可更有效地强化传热。

参考文献:

- [1] 李惠珍,康海军,辛荣昌,等. 开缝翅片管换热器传热和阻力特性实验研究[A]. 全国高等学校工程热物理第四届学术会议论文集[C]. 杭州:浙江大学出版社, 1992. 277-280.
- [2] Wang C C, Lee W S, Sheu W J. A comparative study of compact enhanced fin-and-tube heat exchangers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(18): 3 565-3 573.
- [3] Yun J Y, Lee K S. Influence of design parameters on the heat transfer and flow friction characteristics of the heat exchanger with slit fins[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(14): 2 529-2 539.
- [4] 康海军,李 妩,李惠珍,等. 平直翅片管换热器传热和阻力特性的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(1): 91-98.
- [5] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 第三版. 北京:高等教育出版社, 1998. 313-319.
- [6] 屈治国,何雅玲,陶文铨. 平直开缝翅片传热特性的三维数值模拟及场协同原理分析[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 825-827.
- [7] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第二版. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [8] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A novel concept for convective heat transfer enhancement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(14): 2 221-2 225.
- [9] Tao W Q, He Y L, Wang Q W, et al. A unified analysis on enhancing single phase convective heat transfer with field synergy principle[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(24): 4 871-4 879.

(编辑 王焕雪)