

基于场协同原理的横排锯齿翅片湍流传热强化机理

李娟^{1,2}, 凌祥¹, 彭浩¹

(1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 南京 211816;

2. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037)

摘 要: 通过数值模拟方法分析了横排(TD)锯齿翅片在板翅换热器通道内传热与流动特性. 研究了湍流条件下横排锯齿翅片的温度场、速度场以及两场协同性, 探索其强化传热机理. 在此基础上获得了翅片高度、翅片间距和翅片宽度对传热与流动的影响规律, 并给出了横排锯齿翅片的综合传热性能因子. 结果表明: 横排锯齿翅片通道内流体扰动强烈, 形成了周期性纵向涡流; 改善了通道内速度与温度梯度场之间的协同作用, 强化传热效果, 提高了综合传热性能因子.

关 键 词: 横排锯齿翅片; 场协同; 传热强化; 湍流; 纵向涡流

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Heat transfer enhancement mechanism of transverse direction type serrated fin in turbulent flow based on field synergy principle

LI Juan^{1,2}, LING Xiang¹, PENG Hao¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering,
Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China

2. School of Mechanical and Electronic Engineering,
Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: The heat transfer and flow characteristics of TD (transverse direction) type serrated fin in plate-fin heat exchanger were studied numerically. To explore the heat transfer enhancement mechanism of TD type serrated fin, three dimensional numerical model was established to examine the temperature gradient field, velocity field and fields synergy in turbulence flow. Furthermore the effect of fin height, fin space and fin width on the heat transfer and flow characteristics were analyzed respectively. The integrated heat transfer performance factor were calculated. Results show that: the temperature field and velocity distribution was uniform; periodic longitudinal vortex was formed because of the fin strong disturbance; the synergy of velocity field and temperature gradient was improved owing to vortex enhancing the heat transfer efficiency and improving integrated heat transfer performance factor.

Key words: transverse direction type serrated fin; field synergy;
heat transfer enhancement; turbulence flow; longitudinal vortex

收稿日期: 2014-03-23

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0419); 国家自然科学基金(51506098);

国家科技支撑计划(2012BAA07B02); 江苏省高校自然科学基金(15KJB470007);

江苏省过程强化与新能源装备技术重点实验室(南京工业大学)开放课题; 南京林业大学科研启动项目

作者简介: 李娟(1987—), 女, 湖北洪湖人, 讲师, 博士, 主要从事高效传热研究.

符号说明

A_c	通道截面积, m^2	Δp	压力差, Pa
m	质量流量, kg/s	grad	梯度
a_f	翅片宽度, m	Re	雷诺数
p	压力, Pa	λ	热导率, $\text{W/m} \cdot \text{K}$
D_e	当量直径, m	St	斯特劳哈尔数
div	散度	ν	运动黏度, m^2/s
h_f	翅片高度, m	j	传热因子
t_f	翅片厚度, m	μ	动力黏度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
L	模型有效长度, m	T	温度, K
Δt	温度差, K	μ_t	湍流黏度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
Nu	努塞尔数	c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
ρ	密度, kg/m^3	θ	速度场与梯度场协同角, $(^\circ)$
Pr	普朗特数	f	阻力因子
$\mathbf{u}$	速度矢量, m/s	S_i	动量方程源项
s_f	翅片间距, m	Q	热流量, kW
u	流速, m/s	G	质量流量, kg/s

锯齿翅片作为一种传热效果较好^[1-2], 对流体介质的适应性较宽且承压性能优良的翅片, 广泛应用于高效紧凑型换热器^[3-4]. Muzychka 等^[5]根据流体流过翅片方向将锯齿翅片划分为横排锯齿翅片与纵排锯齿翅片两类, 前者流体流动方向与翅片垂直; 后者流体流动方向与翅片平行. 前人的研究工作多采用实验方法测定或通过数值模拟来获得锯齿翅片的流动与传热特性^[6-8]. 研究结果表明横排锯齿翅片整体传热性能优于纵排锯齿翅片, 但对其对流传热强化物理机制的分析目前还鲜见报道.

1998 年, 过增元等^[9]对边界层类型的流动提出了一种强化换热的新概念, 指出对流传热的强度不仅取决于速度场和温度场本身, 而且还取决于它们之间的夹角, 即不仅取决于速度场、温度场、夹角场的绝对值, 还取决于这 3 个值的相互搭配, 这一观点被称为“场协同”. 速度场与温度场的协同体现在 3 个方面: ①速度矢量与温度梯度矢量的夹角余弦值尽可能大, 即两个矢量的夹角尽可能小或尽可能大; ②流体速度剖面 and 温度剖面尽可能均匀(在最大流速和温差一定条件下); ③尽可能使 3 个标量场中的大值与大值搭配, 也就是说要使 3 个标量场的大值尽可能同时出现在整个场中的某些域上^[10].

对流传热的场协同原理最初是针对稳态二维层流边界层流动提出来的, 但通过大量的实例研究, 已推广至湍流流动^[11-12]. 在场协同理论得到发展的同时, 许多研究者成功的运用场协同原理, 为各类传热结构建立数学模型, 研究分析其传热强

化机理^[13-15].

本文应用 Fluent 软件对横排锯齿翅片(下文也简称翅片)在湍流条件下传热与流动进行数值计算^[16], 通过研究横排锯齿翅片通道内速度场、温度场与两场协同性, 分析了不同结构参数对传热效率与阻力的影响, 计算了综合传热性能因子 $j/f^{1/3}$, 并应用场协同原理解释强化传热物理机制.

1 计算模型与边界条件

图 1 所示为流体流过锯齿翅片时的两种流动方向, 其中流体横向流过的翅片为横排锯齿翅片. 在数值建模时, 考虑到横排锯齿翅片的周期对称结构, 为了简化计算, 选取图 2 用点划线标出的单个周期性单元进行三维模型建立. 横排锯齿翅片通道上下隔板厚度为 0.25 mm; 为了消除流动区域入口效应, 设置入口流道长度为 5 mm; 为了保证出口无回流, 设置出口长度为 15 mm, 如图 3 所

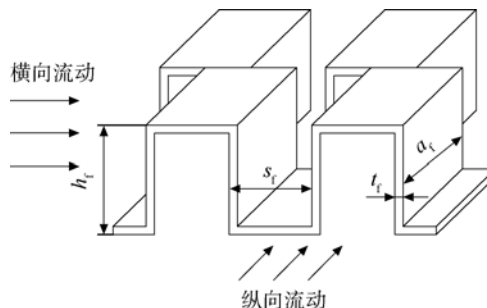


图 1 流体流动方向

Fig. 1 Flow direction fluid

示. 为了研究翅片高度、翅片间距与翅片宽度等结构参数的影响规律, 本文模拟了 7 种不同尺寸的横排锯齿翅片, 结构尺寸参数见表 1.

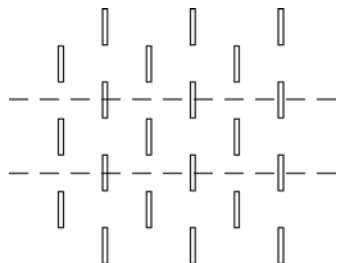


图 2 横排锯齿翅片结构(顶视)

Fig. 2 Configuration of TD type serrated fin (top view)

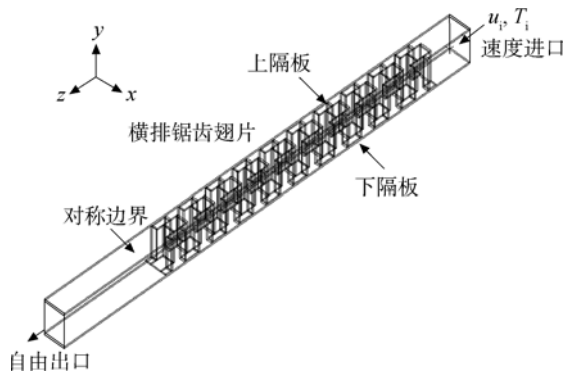


图 3 数值模型与边界条件

Fig. 3 Numerical model and boundary conditions

表 1 横排锯齿翅片模型尺寸

Table 1 Dimension of TD type serrated fin model

型号	$h_f /$ mm	$s_f /$ mm	$t_f /$ mm	$a_f /$ mm	$L_f /$ mm	$L_m /$ mm
1 #	2.5					
2 #	4.7			1.5		
3 #	6.5	2.0			40	55
4 #			0.2	2.0		
5 #				2.5		
6 #	2.5	3.0			60	75
7 #		4.0		1.5	80	95

选取空气作为流动介质, 在计算过程中假设流动介质为稳定不可压缩流体. 应用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型, 其控制方程为

连续性方程

$$\text{div}(\rho \bar{U}) = 0 \quad (1)$$

动量方程($k-\epsilon$ 两方程模型)

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho_i u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \epsilon}{k} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

能量方程

$$\text{div}(\rho T \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T} \right) \text{grad } T \right] \quad (4)$$

控制方程离散采用控制容积积分法, 对流项离散采用 2 阶迎风, 压力和速度的耦合应用 semi-implicit method for pressure-linked equations-consistent(SIMPLEC)算法^[17-18]. 实际计算区域包括横排锯齿翅片, 进口延长段和出口延长段, 以 1 # 为例, 模型网格划分如图 4, 非结构化六面体网格总数为 231 136.

计算时所采用的边界条件为: 上、下隔板温度设为常数 293 K, 壁面速度无滑移; 流体进口速度 u_i 设为轴向速度, 分别取 17.3, 34.55, 51.8, 69.05, 86.32 m/s 五种工况速度; 流体进口温度 T_i 设为 423 K; 出口设为充分发展边界条件; 通道两侧均为对称边界条件, 如图 3 所示.

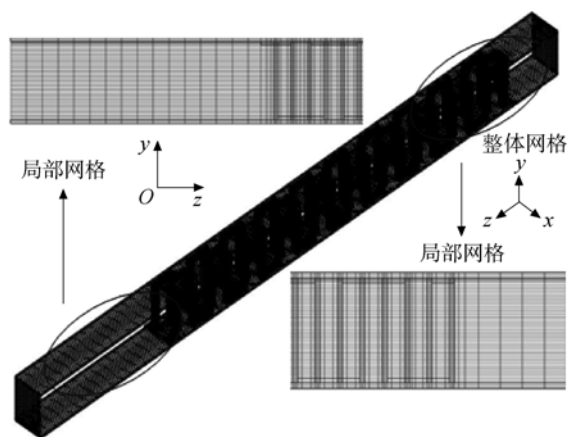


图 4 计算模型的局部网格

Fig. 4 Local mesh of computational model

2 数据处理与模型验证

传热因子 j 与阻力因子 f 定义为

$$j = St Pr^{2/3} \quad (5)$$

$$f = \frac{\Delta p D_c}{2 L \rho u^2} \quad (6)$$

其中

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (7)$$

$$St = \frac{q_w}{c_p G (T_m - T_w)} \quad (8)$$

$$D_e = \frac{2(h_f - t_f)(s_f/2 - t_f)}{(h_f - t_f) + (s_f/2 - t_f)} \quad (9)$$

$$Re = \frac{uD_e}{\nu} \quad (10)$$

$$q_w = \frac{Q}{A_c} \quad (11)$$

$$T_m = \frac{T_i + T_o}{2} \quad (12)$$

式中 T_m 为平均温度, K; T_i 与 T_o 分别为流道进、出口温度, K; T_w 为壁面温度, K; q_w 壁面热流密度, W/m^2 .

局部场协同角与平均场协同角定义方程为

$$\theta = \cos^{-1} \frac{u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}}{|U| |\text{grad } T|} \quad (13)$$

$$\theta_m = \frac{\sum A_i \theta_i}{\sum A_i} \quad (14)$$

在本文中,当局部区域速度场与温度场夹角(即局部场协同角) θ 大于 90° 时,取 $(180^\circ - \theta)$ 并入整场计算平均协同角^[10].

为了验证本文数值模型的可靠性与准确性,将数值计算结果与文献[6]中实验结果对比进行模型准确性验证,如图 5 所示. 通过比较不同雷诺数下传热因子与压降发现二者非常接近,变化趋势一致. 阻力因子 f 的误差不超过 7%, 传热因子 j 的误差不超过 5%.

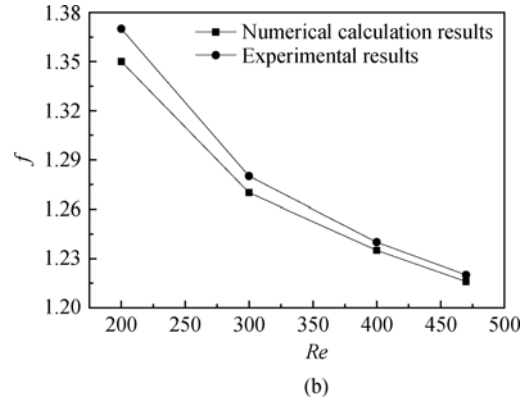
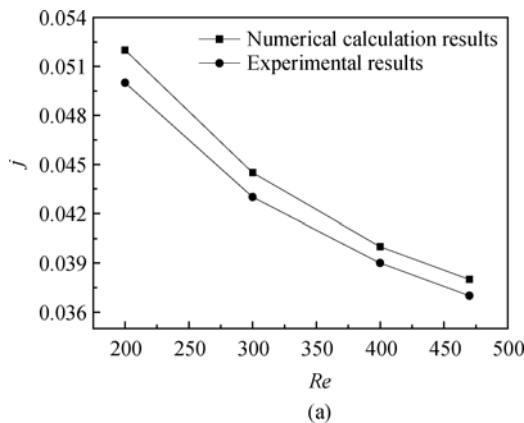


图 5 数值计算结果与实验结果比较

Fig. 5 Comparison between experimental result and numerical calculation result

3 计算结果与场协同分析

3.1 横排锯齿翅片通道内流体温度场与速度场分析

以 2# 翅片为例,水平方向上的横排锯齿翅片通道截面的温度场与速度场如图 6 与图 7 所示. 图 6 为速度矢量图,由图中可以看到,在水平截面上,由于翅片周期性的阻挡,形成变截面流道,流体呈现周期性弯曲绕流,在靠近翅片表面的流体区域,出现了涡流. 同时,流道截面的变化使流体速度发生周期性骤变,对流体产生较强烈的扰动,产生明显的径向速度,在横截面上均出现与主流方向不一致的二次流. 涡流及二次流区域的流体速度明显小于其附近区域的流体速度,这样的速度分布使壁面附近速度梯度增大,对于增强湍流度和减薄边界层十分有利,能够实现强化传热.

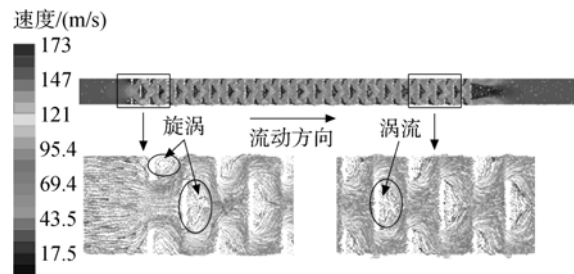


图 6 速度矢量图

Fig. 6 Velocity vector chart

图 7 为温度等值线图,可以发现,靠近翅片壁面处的流体区域温度等值线较密集,温度梯度较大,同时此处的速度模量也较大,符合场协同原理中的第 3 方面:大值搭配,温度场与速度场大值同

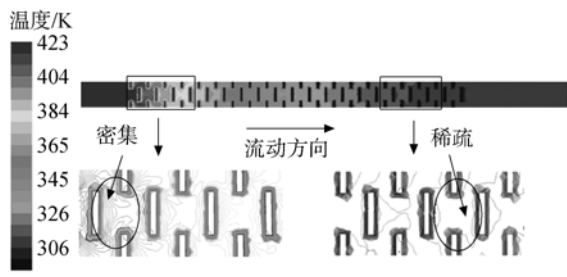


图7 温度等值线图

Fig. 7 Temperature isolines chart

时出现在翅片附近区域. 沿流体流动方向, 由于翅片通道阻力, 流体湍流强度逐渐减弱, 温度等值线逐渐稀疏, 温度梯度变化逐渐减小, 符合传热效率沿流体通道逐渐减小的规律.

3.2 横排锯齿翅片通道内流体场协同分析

图8为水平截面翅片通道局部场协同角分布云图. 图中壁面附近区域的局部场协同角大于 90° 或者小于 90° , 有些甚至趋于 0° 或 180° , 温度场与速度场之间具有很好的场协同效果. 这是因为流体绕过翅片流动时, 在翅片附近区域的流体流动方向发生改变, 由水平流动逐渐变为垂直流向两侧, 与温度梯度趋于水平, 大大改善协同程度, 从而强化传热. 对比图6速度矢量场可以发现, 翅片背面协同性较好的区域正是涡流或者二次流产生的区域. 由此推断, 横排锯齿翅片周期性截面变化及翅片的阻挡对流体产生较强烈的扰动, 改变流体流动方向的同时形成涡流或二次流, 改善了流体速度场与温度场之间的协同性, 从而实现强化传热.

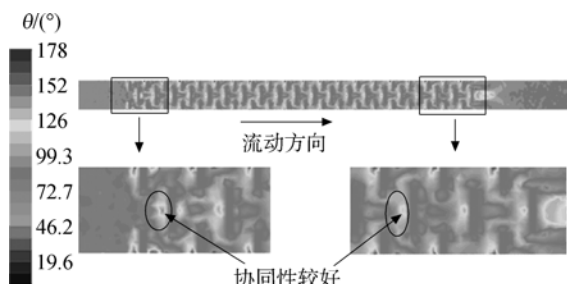


图8 水平面局部场协同角图

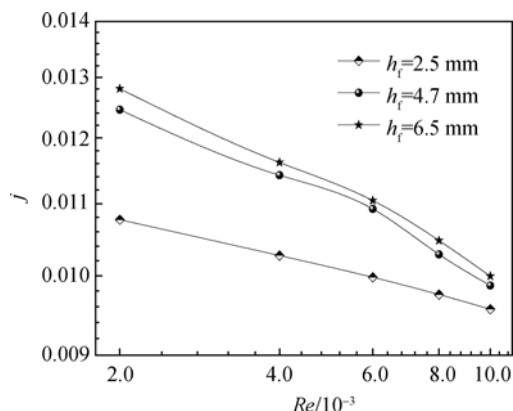
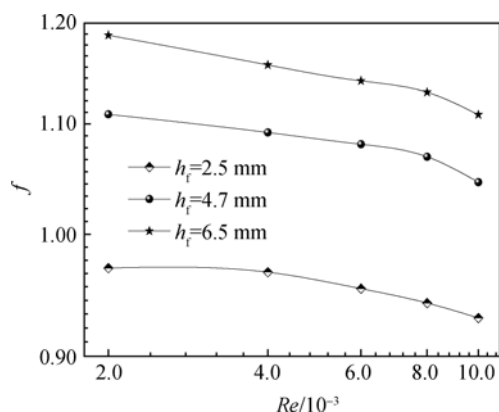
Fig. 8 Local field synergy angles chart

3.3 横排锯齿翅片结构参数对传热、压降以及场协同的影响

在给定质量流量以及流体进口温度与壁面温度的温差下, 局部场协同角越小, 速度与温度梯度的点积越大, 传热就越强烈^[8]. 为了探明横排锯齿

翅片通道强化传热机理, 本文不仅研究结构参数对传热因子 j 与阻力因子 f 的影响规律, 同时分析了平均场协同角的变化趋势.

图9, 图10与图11分别为不同雷诺数 Re 下横排锯齿翅片高度对传热因子 j , 阻力因子 f 与平均场协同角(θ_m)的影响趋势图. 传热因子 j 与阻力因子 f 随着 Re 的增大而减小, 表明随着雷诺数的增大, 通道流场内传热效率下降, 同时阻力降低. 平均场协同角随着 Re 的增大而增大, 速度场与温度场协同削弱.

图9 不同雷诺数下翅片高度对 j 的影响Fig. 9 Effect of fin height on j at different Reynolds numbers图10 不同雷诺数下翅片高度对 f 的影响Fig. 10 Effect of fin height on f at different Reynolds numbers

从图9~图11中可以看出, 随着横排锯齿翅片高度的增加, 传热因子 j 增加, 同时也带来阻力的增大. 根据平均场协同角计算结果显示, 翅片高度为6.5 mm的横排锯齿翅片平均场协同角最小, 协同程度最佳. 通过对沿翅片高度方向的各个水平面流动情况进行比较发现, 中间平面湍流强

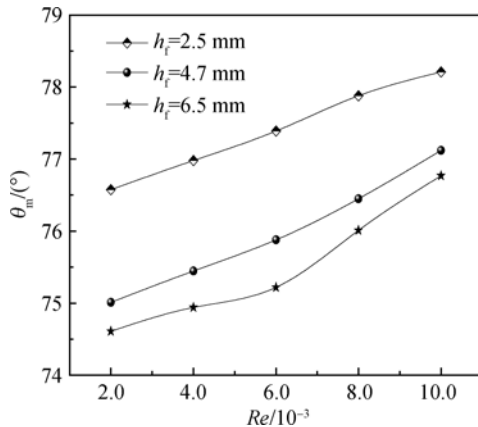


图 11 不同雷诺数下翅片高度对平均场协同角的影响
Fig. 11 Effect of fin height on average field synergy angle at different Reynolds numbers

度最大,此时速度与温度梯度的协同程度最好,沿着翅片高度方向向上、下截面逐渐减弱.因此,可以推测,当翅片越高时,上、下边界层对整个流场流体流动影响较小,亦即传热效率相对翅片高度较小的横排锯齿翅片有所提高,整体协同性较好.

图 12、图 13 与图 14 分别为在不同雷诺数下翅片间距与传热因子 j 、阻力因子 f 与平均场协同角 θ_m 的影响规律图.分析 3 种翅片间距传热通道的传热因子 j ,可以发现当翅片间距增大时,传热因子 j 提高,阻力增加,平均场协同角减小.这是由于翅片间距的增大并没有加强对流体的阻挡,而是加大了阻挡间距,给流体纵向流动更充裕空间,同时二次流受高速流体的扰动作用在纵向空间充裕的情况下形成规则旋涡,改善协同程度,提高传热效率.通过对 3 种翅片间距传热因子的比较发现,翅片间距为 4.0 mm 与翅片间距为 3.0 mm 之间的差值相对翅片间距为 3.0 mm 与翅片

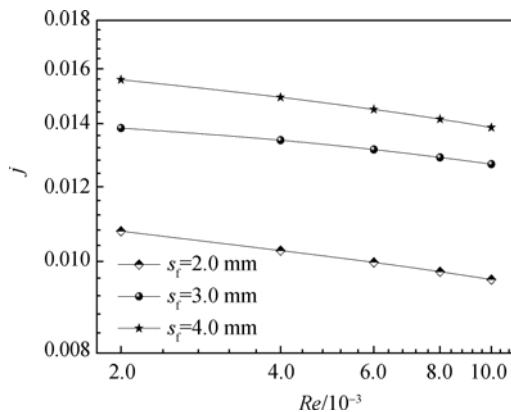


图 12 不同雷诺数下翅片间距对 j 的影响
Fig. 12 Effect of fin space on j at different Reynolds numbers

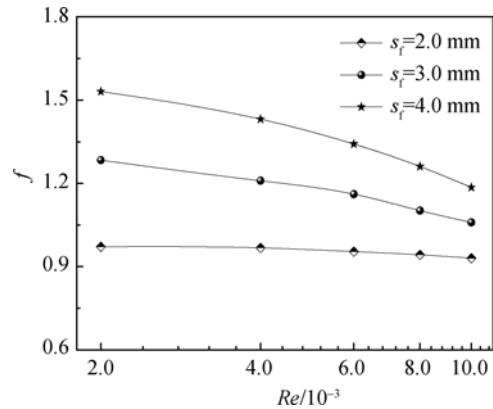


图 13 不同雷诺数下翅片间距对 f 的影响
Fig. 13 Effect of fin space on f at different Reynolds numbers

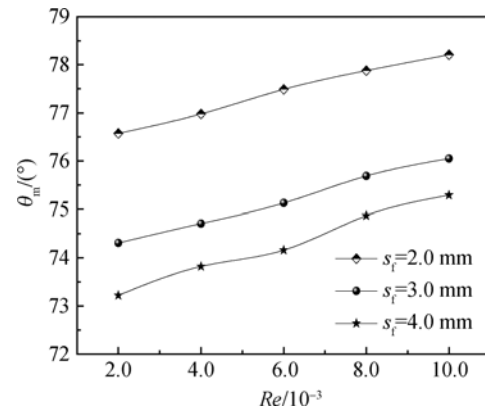


图 14 不同雷诺数下翅片间距对平均场协同角的影响
Fig. 14 Effect of fin space on average field synergy angle at different Reynolds numbers

间距为 2.0 mm 之间差值逐渐减小.所以,可以推测翅片间距增大对提高传热效率的影响会慢慢减弱,存在最优翅片间距值.

图 15、图 16 与图 17 分别为在不同雷诺数下

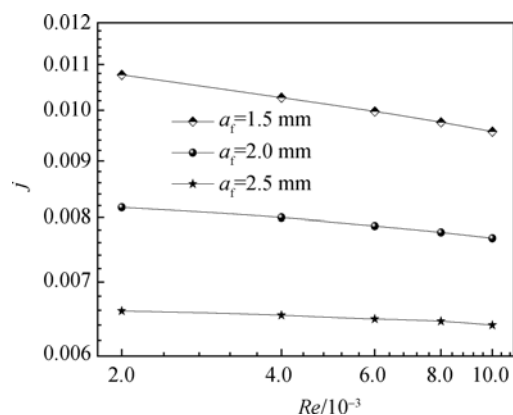


图 15 不同雷诺数下翅片宽度对 j 的影响
Fig. 15 Effect of fin width on j at different Reynolds numbers

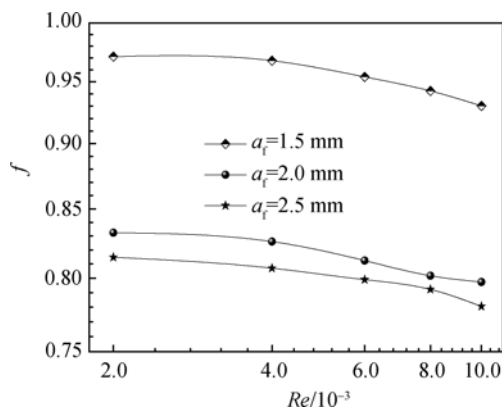
图 16 不同雷诺数下翅片宽度对 f 的影响

Fig. 16 Effect of fin width on f at different Reynolds numbers

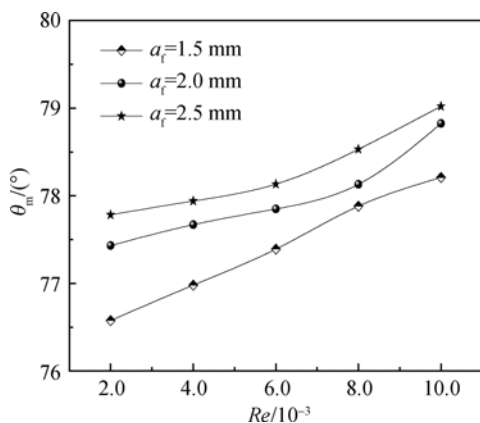


图 17 不同雷诺数下翅片宽度对平均场协同角的影响

Fig. 17 Effect of fin width on average field synergy angle at different Reynolds numbers

翅片宽度与传热因子 j 、阻力因子 f 与平均场协同角 θ_m 的影响规律图。从图中可以看出,随着翅片宽度的增加,平均场协同角增加,协同程度削弱,传热效率减降低。通过对速度场的分析了解到,当流体流过翅片时被其阻挡,从翅片两旁错开的间距穿过,流体在翅片背面滞留,在高速流体的扰动下形成二次流。但是,当翅片宽度较大时,流体滞留区域会随之增大,二次流湍流强度有所减小,因而速度与温度梯度协同程度下降,导致传热效果减弱。

3.4 横排锯齿翅片综合传热性能因子 $j/f^{1/3}$ 的比较

图 18 为不同结构参数横排锯齿翅片综合传热性能因子 $j/f^{1/3}$ 的比较结果。从图中可以看出,翅片间距与翅片宽度对综合传热性能影响较大,翅片高度对其的影响次之。其中 6# 与 7# 翅片传

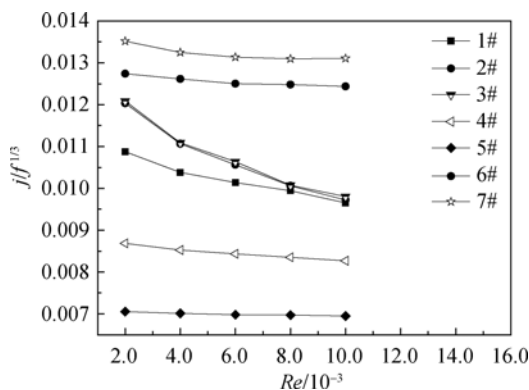
图 18 不同雷诺数下 $j/f^{1/3}$ 的比较

Fig. 18 Comparison of $j/f^{1/3}$ at different Reynolds numbers

热性能较为优越,与场协同分析结果一致。

4 结 论

本文对横排锯齿翅片在湍流条件下的传热与流动进行了数值模拟,研究横排锯齿翅片通道内速度场、温度场与两场协同性来分析不同结构参数对传热效率与阻力的影响,并应用场协同原理解释其强化传热物理机制。主要结论如下:

1) 横排锯齿翅片流道截面的变化使流体速度发生周期性骤变,对流体产生较强烈的扰动,产生明显的径向速度,在横截面上均出现与主流方向不一致的二次流。壁面附近区域温度等值线较密集,速度模量较大,温度场与速度场之间具有很好的场协同性。

2) 流体绕过翅片流动时,在翅片壁面附近区域的流体流动方向发生改变,由水平流动变为垂直流向两侧,与温度梯度趋于水平,对于增强湍流度和减薄边界层十分有利,大大改善协同程度,最终实现强化传热。

3) 在本文所研究的翅片尺寸范围内,当翅片高度增加,翅片间距增大与翅片宽度减小时,有利于改善横排锯齿翅片场协同性,提高传热效率,传热性能更优越。

参考文献:

- [1] 王松汉. 板翅式换热器[M]. 北京:化学工业出版社,1984.
- [2] 彭浩,孙志江,凌祥. 几种紧凑回热面传热和流动的试验和数值研究[J]. 航空动力学报,2008,23(1):138-144.
PENG Hao, SUN Zhijiang, LING Xiang. Numerical and experimental study on flow and heat transfer performance of some compact surface recuperators[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 138-144. (in Chinese)
- [3] 顾黎昊,凌祥,彭浩. 基于翅片板结构的烟气对流传热

- 性能[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2692-2698.
- GU Lihao, LING Xiang, PENG Hao. Experiment on forced convection-condensation heat transfer characteristics based on finned plate configuration[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2692-2698. (in Chinese)
- [4] Kays W M, London A L. Compact heat exchanger[M]. 3rd ed. New York: MacGraw-Hill Book Company, 1984.
- [5] Muzychka Y S, Yovanovich M M. Modeling the f and j characteristics for transverse flow through an offset strip fin at low Reynolds number[J]. Proceedings of the ASME, Heat Transfer Division, 1999(1): 79-90.
- [6] Guo L H, Chen J P. Empirical correlations for lubricant side heat transfer and friction characteristics of the HPD type steel offset strip fins[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2008, 35(3): 251-262.
- [7] Guo L H, Chen J P. Geometrical optimization and mould wear effect on HPD type steel offset strip fin performance[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(9): 2473-2480.
- [8] Peng H, Ling X. Analysis of heat transfer and flow characteristics over serrated fins with different flow directions[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(2): 826-835.
- [9] 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(4): 2221-2225.
- [10] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [11] Meng J A, Chen Z J, Li Z X, et al. Field coordination analysis and convection heat transfer enhancement in duct[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(4): 652-654.
- [12] Tao W Q, Guo Z Y, Wang B X. Field synergy principle for enhancing convective heat transfer: its extension and numerical verifications[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(18): 3849-3856.
- [13] He Y L, Tao W Q. Numerical studies on the inherent interrelationship between field synergy principle and entransy dissipation extreme principle for enhancing convective heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 74: 196-205.
- [14] Jin Y, Tang G H, He Y L, et al. Parametric study and field synergy principle analysis of H-type finned tube bank with 10 rows[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60: 241-251.
- [15] 张艾萍, 姚凯, 徐志明. 强化换热管中超声空化对场协同的影响[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(2): 356-359.
- ZHANG Aiping, YAO Kai, XU Zhiming. The influence of the field synergy by ultrasonic cavitation in the strengthening heat transfer tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(2): 356-359. (in Chinese)
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [17] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [18] Fluent Incorporation. FLUENT user's guide[R]. New York: Fluent Incorporation, 2003.

(编辑: 王碧珺)