

# 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

屈治国 何雅玲 陶文铨

(西安交通大学动力工程多相流国家实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要** 本文用数值模拟的方法对翅片管换热器中广泛使用的平直开缝翅片的传热特性进行了数值模拟。结果表明在平翅片后部开缝与在翅片前部开缝相比, 换热增强更多, 并用场协同理论分析说明, 在速度场和温度场协同比较差的区域开缝要比在场协同比较好的区域开缝对传热强化更有效。

**关键词** 开缝翅片; 数值模拟; 场协同

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2003)05-0825-03

## 3D NUMERICAL SIMULATION ON HEAT TRANSFER PERFORMANCE OF SLIT FIN SURFACE AND ANALYSIS WITH FIELD SYNERGY PRINCIPLE

QU Zhi-Guo HE Ya-Ling TAO Wen-Quan

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

**Abstract** In this paper, numerical investigation of air side performance of slit fin heat exchanger is presented. It is revealed that the strips located in the rear part of a typical slit fin configuration have better heat transfer performance than those in the front. The results are also analyzed with the field synergy principle. It turns out that it is more efficient to set the strips in the part where the velocity and the temperature field are in poor synergy to enhance heat transfer.

**Key words** slit fin; numerical simulation; field synergy principle

### 1 前言

翅片开缝是一种有效的强化空气侧传热方法, 广泛地使用在供热、通风、空调、制冷工业的换热器中。对开缝翅片空气侧换热的研究, 前人的工作主要集中在用实验方法测定流动和传热特性<sup>[1]</sup>, 由于结构的复杂性, 有关数值模拟工作并不多见<sup>[2]</sup>。本文主要用数值模拟的方法, 对其传热特性进行了研究。

1998 年, 过增元等<sup>[3]</sup>对边界层类型的流动提出了一种强化换热的新概念, 指出减小速度场与温度梯度的夹角, 即速度矢量和温度梯度矢量方向的协同一致, 可以达到强化换热的目的, 这一观点被称为“场协同”。以后文献[4,5]把这一思想推广到椭圆型的流动, 并用这一原理成功地解释了传统的强

化传热的三种方法。本文利用该原理分析了计算结果。

### 2 计算区域的选取及其数学描述

本文对四种形式的两排翅片管进行数值模拟, 结构尺寸表示在图 1 中, 四种翅片分别用 A,B,C,D 来表示, 其中片形 A 为全平片, 翅片 B,C 为部分开缝片, 翅片 B 的开缝主要集中在上游, 而 C 则主要集中在下游。翅片 D 为全部开缝片, 缝的布置接近“X”形, 双侧开缝。三维计算区域的选取如图 2 所示, 该图表示了全开缝片的计算区域, 其余三种翅片情况类似。在流动方向上, 入口延长 1.5 倍翅片长度, 出口延长 5 倍的翅片长度, 以保证出口无回流。

收稿日期: 2002-12-12; 修订日期: 2003-07-01

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No.G2000026303); 自然科学基金项目 (No.50076034)

作者简介: 屈治国 (1978-), 男, 陕西人, 博士研究生, 主要从事传热强化和计算流体力学方面的研究。

计算在三维直角坐标中进行, 控制方程<sup>[6]</sup>为:  
连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) \quad (3)$$

数值模拟参数表示在表 1 中。

表 1 数值模拟参数

管子外径	横向管间距	纵向管间距	翅片厚度	翅片间距
7.2 mm	12.7 mm	11.97 mm	0.105 mm	1.4 mm
开缝宽度	管壁温度	入口温度	迎风面流速	开缝高度
1.0 mm	313 K	303 K	0.5~5 m/s	0.7 mm

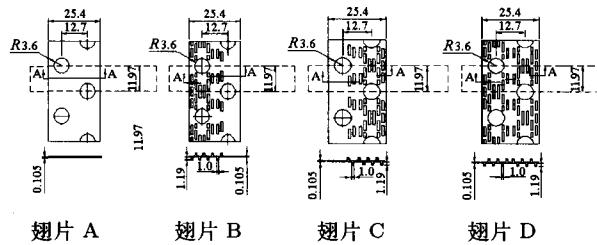


图 1 四种翅片的几何尺寸

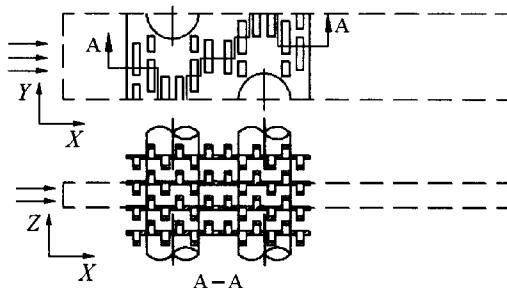


图 2 三维计算区域的示意图

### 3 流动和传热的数值计算方法

假定管壁温度为常数, 而翅片温度需要在计算中确定, 因而是一个耦合问题。在计算中, 翅片和流体分别采用各自的导热系数。为了模拟翅片的结构, 引入一个数组来标识流体, 翅片, 和圆管。圆管的边界用阶梯来进行逼近, 管子的导热系数取为无穷大, 来保证其温度为恒定值。入口为速度和温度已知的均匀来流, 出口速度和温度都局部单向化。在延长区域 Y 方向和 Z 方向的边界上, 垂直于边界

面的流体速度为零, 平行于边界的流速一阶导数为零, 温度在这两个方向为绝热条件; 在计算区域中间的翅片部分, 在 Z 方向上两个边界面上, 翅片与管子为速度固壁条件, 翅片温度由耦合计算确定, 翅片和流体都为周期性边界条件, 管子表面温度为恒定值。在 Y 方向两个对称面上, 垂直于边界的流体速度为零, 平行于边界的流速的一阶导数为零, 在翅片和圆管部分的速度为零, 流体和翅片温度为绝热边界条件, 圆管对称面为恒壁温边界条件。整个计算区域采用  $136 \times 90 \times 24$  网格进行计算, 计算模型为三维稳态层流不可压缩流动, 算法采用 SIMPLE<sup>[6]</sup> 算法。

## 4 计算结果和场协同原理分析

### 4.1 传热计算结果及分析

图 3 表示了四种翅片  $Nu\eta_0$  和  $Re$  数的变化关系, 其中  $\eta_0$  是翅片的表面效率。由图中可以看出, 翅片 D 换热最好, 翅片 A 的换热最差。需要注意的是: 翅片 C 的换热比翅片 B 好, 如在迎风面流速为 2 m/s 时, 换热强化了 8%, 这说明翅片 C 和 B 相比较, 只由于开缝位置的不同, 翅片 C 比 B 要有更好的传热性能, 这个结论与 Kang 与 Kim<sup>[1]</sup> 的试验结果的报道一致。

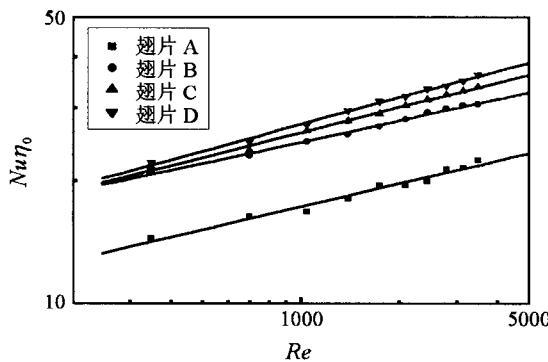


图 3 四种翅片的传热性能比较

### 4.2 场协同原理分析

图 4 和图 5 分别表示速度场和温度场夹角平均值和  $Re$  数的关系以及速度和温度梯度点积积分值和  $Re$  的关系, 夹角和积分值的定义见文献 [4]。由图 4 和图 5 可以看出随着  $Re$  数的增加, 四种翅片的平均夹角都增加, 积分值也增加, 这说明  $Re$  数的增加, 换热的增强主要是由于流量的增加而引起的, 而场的协同性变差, 在相同  $Re$  数下, 全开缝翅片 D 的平均夹角最小, 场的协同性最好, 积分值最大, 换热最好; 相反全平片的夹角最大, 协同性最差, 换热最差, 翅片 B, C 夹角和积分值介于二者之间, 但

翅片 C 的夹角比翅片 B 要小, 积分值大, 表面换热系数大。也就是说, 后部开缝翅片与前部开缝翅片相比, 速度场和温度场的协同性要更好。

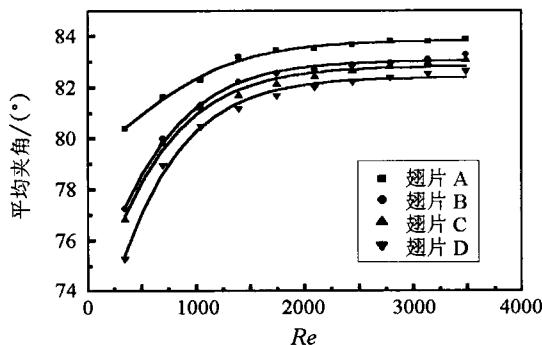


图 4 夹角和  $Re$  数的关系

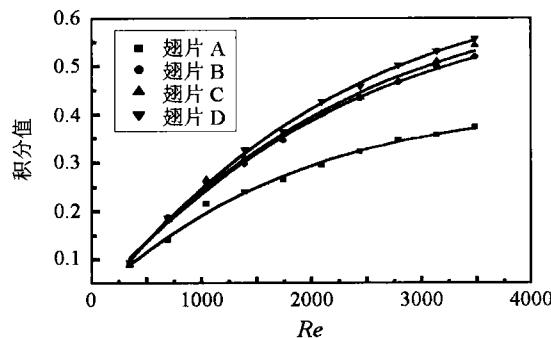


图 5 积分值和  $Re$  数的关系

为进一步查明原因, 对平片 Z 方向中间截面流场和温度场进行分析, 该截面的流场和温度场分别表示在图 6 和图 7 中。

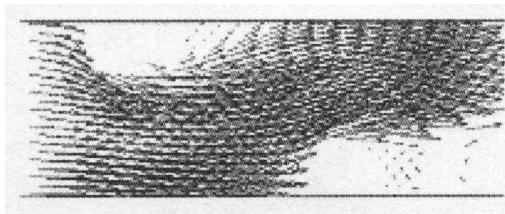


图 6 平片中间截面流场图



图 7 平片中间截面等温线图

从图中可以看出, 在流动的上游区域, 流线与等温线几乎正交, 这就意味着速度和温度梯度的夹角很小, 协同情况比较好; 在流动的下游区域, 特别是管子后面的绕流区域, 两个矢量的夹角很大, 速度场和温度场的协同情况变差, 而翅片 B 和 C 的差别就是: 翅片 B 的开缝在上游速度场和温度场协同情况比较好的区域, 翅片 C 的开缝选取在下游速度场和温度场协同情况比较差的区域, 因此可以说明, 在速度和温度场协同情况比较差的区域中开缝, 可以更有效地强化传热。

## 5 结 论

本文对一种平片和三种开缝翅片进行数值模拟, 并用场协同理论进行分析结果表明:

- (1) 开缝翅片可以有效地强化传热, 开缝翅片强化传热的本质是, 开缝的存在改善了平直翅片中流场和温度场的协同性。
- (2) 下游局部开缝翅片 C 和上游局部开缝翅片 B 相比, 换热有明显的增强。
- (3) 场协同原理分析表明, 后开缝翅片比前开缝翅片优越的原因是, 后开缝翅片的开缝位置选取在流动下游速度场和温度场协同情况比较差的区域, 即在场协同比较差的地方开缝, 可以更有效地强化传热。

## 参 考 文 献

- [1] Kang H C, Kim M H. Effect of Strip Location on the Air-Side Pressure Drop and Heat Transfer in Strip Fin-and-Tube Heat Exchanger. International Journal of Refrigeration, 1999, 22: 303-310
- [2] Shah R K. Progress in the Numerical Analysis of Compact Heat Exchanger Surfaces, Advances in Heat Transfer. New York: Academic Press, 2001, 34: 363-442
- [3] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A Novel Concept for Convective Heat Transfer Enhancement. Int. J. Heat Mass Transfer, 1998, 41: 2221-2225
- [4] Tao W Q, Guo Z Y, Wang B X. Field Synergy Principle for Enhancing Convective Heat Transfer - its Extension and Numerical Verification. Int. J. Heat Mass Transfer, 2002, 45: 3849-3856
- [5] 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. Int. J. Heat Mass Transfer, 2002, 45: 4871-4879
- [6] 陶文铨. 数值传热学. 第 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001