

# 强化换热通道中扰流元场协同优化研究

赵丽华 苑中显 张建国 姜明健

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022)

**摘要** 对一种场协同式周期性强化换热通道进行了数值模拟研究, 考察了折流翅片不同角度、不同间距对通道换热特性的影响。计算结果表明, 翅片倾角增大或间距缩小均有利于换热强化。强化效果随  $Re$  数的增大而愈加显著。

**关键词** 场协同理论; 周期性通道; 数值模拟

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2005)02-0307-03

## NUMERICAL SIMULATION FOR HEAT TRANSFER IN A 2-D CHANNEL ENHANCED BY FIELD SYNERGY PRINCIPLE

ZHAO Li-Hua YUAN Zhong-Xian ZHANG Jian-Guo JIANG Ming-Jian

(College of Environmental and Energy Engineering Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** A numerical study has been performed on the heat transfer in a parallel-plate channel in which the disturbance was periodically deployed by field synergy principle. The effects of the declining angle and the distance of disturbing fins on heat transfer were verified for different Reynolds numbers. The results show that increasing the declining angle or decreasing the fin distance in the studied range of parameter is helpful to enhance heat transfer. Further more, the enhancement effect is more obvious for high Reynolds number.

**Key words** field synergy principle; periodical channel; numerical simulation

## 1 引言

强化传热理论与技术是国内外传热学界研究的热门课题。场协同理论是近年来发展起来的主要针对强化换热技术的指导理论。1998年我国学者过增元教授等人对边界层型的流动换热进行了理论分析, 通过对能量方程在热边界层内积分, 得到如下关系式<sup>[1]</sup>,

$$\rho C_p \int_0^\delta (\vec{U} \cdot \nabla T) dy = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_w = q_w \quad (1)$$

式中  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\lambda$  分别为流体的密度、定压比热和导热系数,  $q_w$  是壁面处的对流换热量。根据矢量运算规则,  $\vec{U} \cdot \nabla T = |U| |\nabla T| \cos \theta$ ,  $\theta$  为  $\vec{U}$  和  $\nabla T$  之间的夹角。此式表明: 在一定的速度和温度梯度下, 减小二者之间的夹角  $\theta$  是强化对流换热的有效途径<sup>[1~3]</sup>。文献[4]还进一步讨论了对流换热的物理机制及控制速度场与热流场协同的方法和途径。文献[5]对优化热边界条件来提高换热的途径做了分析讨论。

收稿日期: 2004-12-02; 修訂日期: 2005-01-14

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (No.3052002); 北京市教委资助项目 (No.KM200410005020)

作者简介: 赵丽华 (1976-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 主要从事强化传热和计算传热方面的研究。

本文构思了一种场协同式二维周期性强化换热通道, 并用数值模拟方法进行了研究。

## 2 物理问题及数学描述

图1所示为通道中的一个周期。由于上下为对称结构, 因此计算区域取一半即可, 见图中阴影部分。通道高度保持为14 mm不变, 翅片间距L变化, 计算中取L=20, 30, 40 mm。上、下翅片在迎风侧间距固定为2 mm, 背风侧间距取不同值, 以实现不同倾角。计算中取h=4, 5, 6 mm。壁温Tw

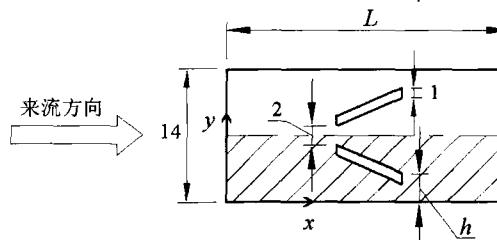


图1 通道形状及数值模拟区

保持均匀, 所计算的流动换热为二维、稳态、层流; 流动与换热均已达到充分发展; 工质为水, 物性为常数; 翅片材料为铜。

控制方程如下:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

根据周期性充分发展流动换热的物理特征, 进出口边界条件为<sup>[6]</sup>,

$$u(0, y) = u(L, y) \quad v(0, y) = v(L, y) \quad (6)$$

$$\theta(0, y) = \theta(L, y) \quad (7)$$

式中的无量纲过余温度定义为,

$$\theta(x, y) = [T(x, y) - T_w] / [T_b(x, y) - T_w] \quad (8)$$

其中

$$T_b(x, y) = \int_A u \cdot T dA / \int_A u dA \quad (9)$$

计算区域的上边界为对称线, 满足

$$\partial u / \partial y = 0, \quad \partial \theta / \partial y = 0, \quad v = 0$$

根据 patankar 等人的理论<sup>[6]</sup>, 周期性充分发展流动中的压力可以被分解为平均压力与波动压力两部分

$$p(x, y) = \beta x + p'(x, y)$$

$\beta$  是一个周期的平均压力梯度, 它与质量流量对应, 计算中给定一个质量流量, 相应地就给定了一个  $\beta$  值。  $p'$  是局部压力偏离平均压力的差值, 为一个周期函数, 满足

$$p'(0, y) = p'(L, y)$$

### 3 数值模拟方法与数据整理

正式计算之前进行了网格考核, 采用的典型网格数为  $100 \times 24$ , 并用 SIMPLE 算法处理压力与速度耦合问题。计算过程中调节进口流量以得到不同的  $Re$  数。计算中除监测压力修正方程、动量方程及能量方程外, 同时还监测求解区域的压力梯度及平

均温度变化率。当压力梯度值不再变化, 表明流动达到充分发展; 当平均温度变化率不再变化, 表明换热达到充分发展。

## 4 计算结果及讨论

### 4.1 流场与温度场

图 2 给出了  $L = 30 \text{ mm}$ ,  $h = 4 \text{ mm}$  和  $h = 6 \text{ mm}$  的流场与温度场。图中左侧为流函数图, 右侧为温度场。 $h = 4 \text{ mm}$  为所计算的翅片张角最大工况,  $h = 6 \text{ mm}$  为翅片张角为零工况, 即翅片水平布置的工况。

由图中可以看出, 在翅片的底部, 特别是翅片尾部的下方等温线比较密集, 说明那里的温度梯度大, 换热比较强烈。对于所研究的通道结构, 翅片张角越大, 改变速度矢量的程度也越大, 对流场的影响也就越大。大  $Re$  数时在翅片前后产生了涡, 且等温线变得更加密集, 说明此时翅片对换热的影响更大。

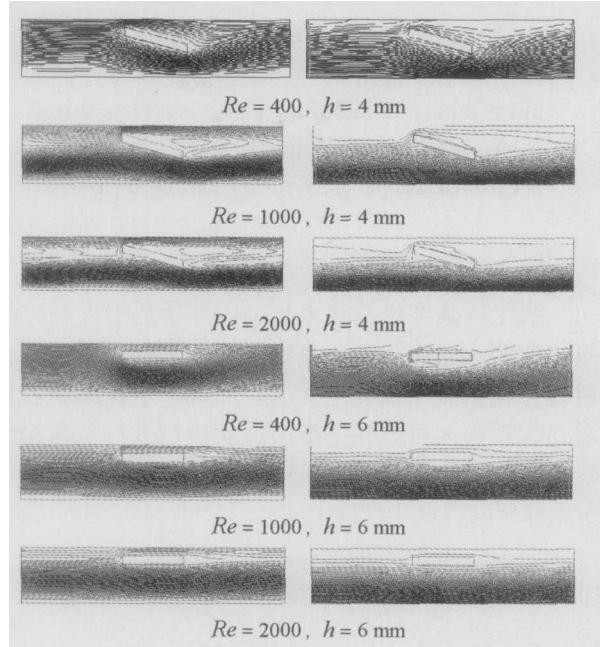
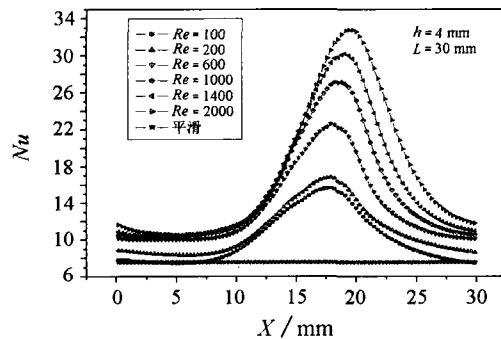


图 2 不同  $Re$  数时的流场与温度场

### 4.2 Nusselt 数分布

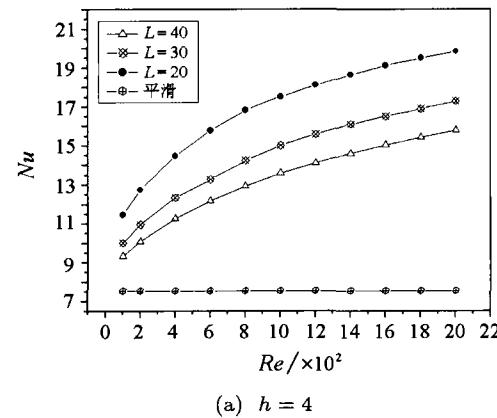
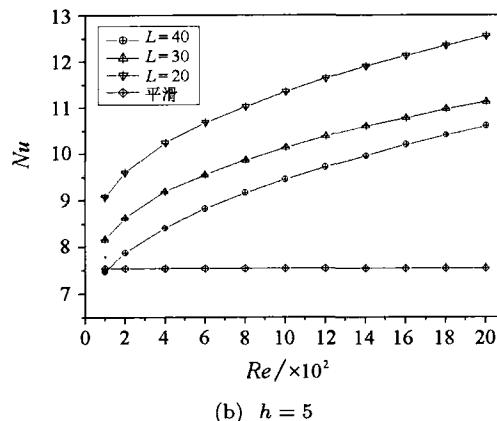
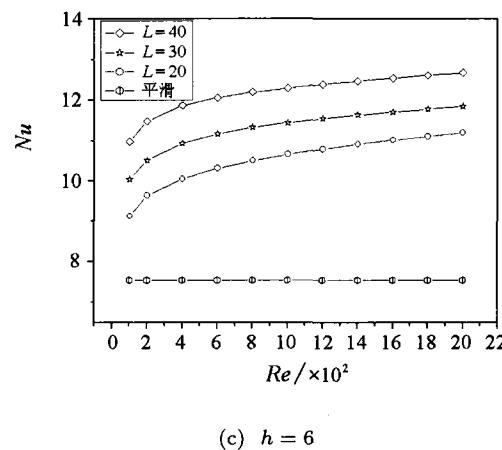
图 3 为  $L = 30 \text{ mm}$ ,  $h = 4 \text{ mm}$  时壁面上局部 Nusselt 数的分布情况。可以看到,  $Re$  增大时  $Nu(x)$  整体抬升。 $Nu_{max}$  大概出现在  $x = 17 \sim 21 \text{ mm}$  的范围内。分析图 2 的流场可以看出,  $Nu_{max}$  与翅片后部流体对壁面的重接触点大致对应。这与倾斜射流冲击换热情况相似。由于流体冲刷壁面, 导致局部边界层变薄, 热阻减小, 换热系数增大。因此, 翅片的存在, 使流场发生了较大的变化, 改变了流体流

动的方向, 增加了场的协同性, 从而使换热增强。由图还可以看出, 随着  $Re$  数的增大,  $Nu_{max}$  向下游移动。分析图 2 所示的流场可知, 这是流体对壁面的重接触点随流速增大也向后移动的结果。

图 3 局部  $Nu$  数的分布

#### 4.3 翅片间距对换热的影响

图 4 示出了不同  $Re$  数下翅片间距  $L$  对壁面平均换热的影响。由图看出, 随着  $L$  的增大, 平均  $Nu$  数减小。这是因为随着翅片间隔的增大, 单位长度内流体对壁面的平均冲击程度减小, 也即减小了近壁处流场与温度梯度场的协同度, 流动换热又趋于直通道内的工况, 导致强化效果减小。

(a)  $h = 4$ (b)  $h = 5$ 图 4 周期平均  $Nu$  数随  $Re$  数的变化

## 5 结 论

本文模拟了平行平板通道中布置周期性折流翅片的流动与换热情况, 研究了流场与温度场以及换热规律。结论如下:

- (1) 流场中加折流翅片能有效地强化换热, 因此是一种值得关注的强化途径。
- (2) 速度场和温度梯度场的协同度对换热起着十分重要的作用, 在所研究的参数范围内, 加大折流翅片的张角有助于场协同度的提高, 因此有利于强化换热。
- (3) 对一定的翅片张角和翅片间距, 强化换热效果随  $Re$  数的增大而更加明显。
- (4) 对一定的翅片张角, 翅片间距愈大, 强化换热效果愈差。

## 参 考 文 献

- [1] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A Novel Concept for Convective Heat Transfer Enhancement. *Int. J. Heat & Mass Transfer*, 1998, 41(14): 2221–2225
- [2] Wang S, Li Z X, Guo Z Y. Novel Concept and Device of Heat Transfer Augmentation. In: Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference of Heat Transfer. Philadelphia: Taylor Francis. 1998. 405–408
- [3] Guo Z Y, Wang S. Novel Concept and Approaches of Heat Transfer Enhancement. In: Cheng P. Proceedings of Symposium on Energy Engineering in the 21<sup>th</sup> Century. 2002. New York: Begell House
- [4] 过增元. 对流换热的物理机制及其控制: 速度场与热流场的协同. 科学通报, 2000, 45(19): 2118–2122
- [5] 苑中显, 张建国, 姜明健. 变壁温管内对流换热场协同优化分析. 中国科学 E 辑, 2004, 34(9): 1003–1010
- [6] Patankar S V. A Calculation Procedure for Two-Dimensional Elliptic Situations. *Numerical Heat Transfer*, 1981, 4(4): 409–425