

纵向涡强化通道内换热的数值研究及机理分析

武俊梅^{1,2}, 陶文铨¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;
2. 西安工程大学环境与化学工程学院, 710048, 西安)

摘要: 用三维数值模拟方法研究了纵向涡发生器用于层流矩形通道的流动换热特征. 研究了 Re (为 800 ~ 3 000)、涡发生器的冲角 (分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90°)、纵向涡发生器的形状对通道平均 Nu 和平均阻力系数的影响, 并利用场协同原理进行了分析. 结果发现: 纵向涡发生器产生的二次流使全场速度和温度梯度之间的平均夹角减小, 换热得到强化; 纵向涡能改善包括涡发生器附近区域以及下游广阔区域的场协同性, 而横向涡只可以改善涡发生器附近区域的场协同性, 所以纵向涡可以强化整体换热, 而横向涡只可以强化局部换热; 对于光通道, 协同角随 Re 增大而增大, 但对于有纵向涡发生器的通道, 协同角随着 Re 增大而减小. 同时, 在面积相同的条件下三角形小翼优于矩形小翼.

关键词: 纵向涡; 强化换热; 场协同

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2006)09-0996-05

Numerical Investigation and Analysis of the Heat Transfer Enhancement in Channel by Longitudinal Vortex Based on the Field Synergy Principle

Wu Junmei^{1,2}, Tao Wenquan¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China;
2. School of Environment and Chemical Engineering, Xi an Polytechnic University, Xi an 710048, China)

Abstract: 3-D numerical simulations were presented for laminar flow and heat transfer characteristics in a rectangular channel with vortex generators. The effects of Reynolds number (from 800 to 3 000), the attack angle of vortex generator (from 15° to 90°) and the shape of vortex generator were examined. The numerical results were analyzed based on the field synergy principle. It is found that the inherent mechanism of heat transfer enhancement by longitudinal vortex can be explained by the field synergy principle, namely the second flow generated by vortex generators results in the reduction of the intersection angle between the velocity and fluid temperature gradient. The longitudinal vortex improves the field synergy of the large downstream region of LVG as well as the region near LVG, however transverse vortex only improves the synergy of the region near LVG. So longitudinal vortex enhances the integral heat transfer of the flow filed while transverse vortex enhances the local heat transfer only. And the synergy angle decreases with increasing Reynolds number for the channel with LVG to differ from the result obtained from the plain channel, and the triangle winglet performs better than the rectangle one under the same surface area condition.

Key words: longitudinal vortex; heat transfer enhancement; field synergy principle

收稿日期: 2006-02-02. 作者简介: 武俊梅(1966~),女,博士生,现为西安工程大学副教授;陶文铨(联系人),男,教授,博士生导师,中国科学院院士. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50476046);教育部博士点基金资助项目(RFDP20030698015).

紧凑式换热器在空调、制冷、电子器件冷却等领域有着广泛的应用.这种换热器中一侧换热流体是气体,由于气体的传热性能很差,因此如何强化气体侧的换热是学术界与工程技术领域的一个重要研究主题.纵向涡发生器作为传热面上的一种特殊的结构,当流体流经它时,可以产生旋转方向与主流方向一致的二次流,即纵向涡.按传统观点,纵向涡能使流体热边界层减薄,混合增加,从而导致传热强化.因为涡发生器结构简单,便于加工,在换热器的翅片上容易实施,因此近10多年中对纵向涡强化换热的研究日益增加,有关纵向涡发生器强化传热的实验或数值研究方法请参见文献[1-7].

现有文献的研究有以下不足:首先,没有同时考虑纵向涡发生器的厚度及因加工的原因而在通道壁上产生的小孔;其次,计算通道的进、出口边界条件的处理方法也不同,对于所使用的边界条件的合理性也缺乏论述;最后,关于纵向涡强化对流换热的根本机制究竟是什么,没有统一的观点.一般认为是由于纵向涡破坏了边界层的发展,使流体旋转、增加混合所造成,没有从速度场与温度场协同观点来分析.

本文在考虑纵向涡发生器的厚度及其下面的小孔的情况下,采用延长计算区域的方法,研究 Re 、涡发生器的冲角、纵向涡发生器的形状对通道平均 $Nu(Nu_m)$ 和平均阻力系数的影响,并对计算结果应用场协同原理^[8]来分析,以进一步揭示纵向涡强化换热的内在机理.

1 计算模型及方法

本文所计算的 Re 限在3 000以下,使流动处于层流状态,同时假定流动过程是稳态的.所用的控制方程包括三维稳态常物性的连续性方程、动量方程、能量方程(无内热源).这些控制方程在文献中已有充分介绍^[9],此处从略.所计算的矩形通道的边界条件说明如下.

1.1 计算区域及边界条件

对于矩形通道,选一对矩形小翼作为纵向涡发生器来进行研究.通道长度方向为 x ,高度方向为 y ,宽度方向为 z .由于对称性取通道的一半作为计算对象(见图1).通道宽 B 为160 mm,高 H 为40 mm,长 L 为400 mm.因为矩形小翼常常是从壁面上冲出来的,所以其厚度就是翅片的厚度.目前,实际应用的翅片换热器的翅片间距和翅片厚度之比大约为10左右.因此,当通道高度为40 mm,矩形小翼的厚度 b 就取为4 mm.矩形小翼高 h 为20 mm,

即通道高度的一半,长 l 为40 mm.带小翼的通道结构见图1a,矩形小翼在通道中的位置见图1b.计算区域从通道入口向上游延长100 mm(为通道高度的2.5倍),从通道出口向下游延长600 mm(为通道高度的15倍).为了进行比较,对没有纵向涡发生器的相同通道也要进行计算.边界条件汇总如下.

进口采用纵向速度、温度均匀,横向速度为0的边界条件.出口采用充分发展边界条件.上、下壁面采用无滑移、恒壁温边界条件.前、后对称面上为对称边界条件.

因为这里模拟的通道是多片翅片组成的多个通道中的一个,每片翅片上都冲有一个小孔,所以上、下两壁面上的小孔处取为周期性边界条件^[10].矩形小翼的壁面取为无滑移边界条件,温度与壁面温度相同.计算区域延长段的所有侧面均取为对称边界条件.

1.2 数值方法

本计算采用商业软件FLUENT进行计算.在矩形通道中,矩形小翼与主流成一定夹角,使得计算区域的几何形状变得复杂,所以将矩形小翼附近区域分成12个小块,分别定义各边上的节点数以控制网格的疏密,使翅片壁面附近和矩形小翼附近网格较密.矩形小翼附近的网格分布如图2所示.控制方程离散采用控制容积积分法,对流项离散采用二阶迎风格式,扩散项采用中心差分格式,压力和速度的耦合采用SIMPLEC算法.收敛性判据采用迭代过程中单元不平衡质量余量的绝对值之和与迭代之初前5次的最大余量的绝对值之比小于 10^{-7} .满足这个条件后,动量方程、能量方程的相对余量都已小于 10^{-8} ,且温度场不再发生变化.所计算的介质为空气, Pr 为0.71.

2 计算结果及分析

在数据处理中,无量纲量的特征速度为通道入口平均速度,特征尺寸为通道高度 H 的2倍.计算通道平均对流换热系数的温差采用壁温与空气进、出口平均温度之差.协同角的定义为速度与温度梯度之间的夹角,这里反映全场协同性的协同角取其体积平均值. f 为平均摩擦阻力系数, p 为断面平均静压.

2.1 Re 和冲角对通道内换热、场协同性和流动阻力的影响

作为比较的基础,首先计算了没有纵向涡发生器的光通道在 Re 分别为800、1 600、2 400和3 000

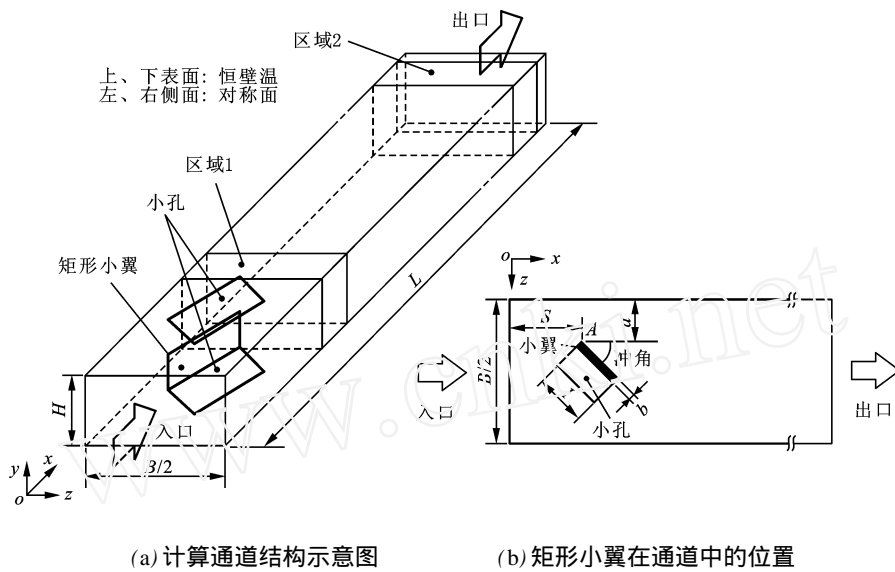


图1 具有纵向涡发生器的通道示意图

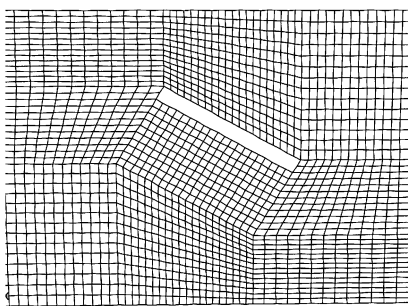


图2 矩形小翼附近网格的分布

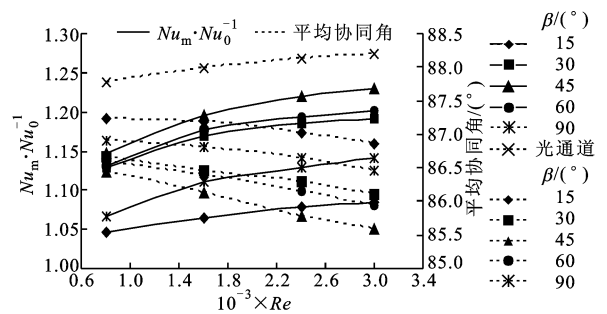


图3 通道平均 Nu 及全场平均协同角随 Re 、的变化

时的4个算例. 根据文献[11], 在涡发生器的冲角小于45°时, 通道内主要产生纵向涡, 而大于45°后, 横向涡的成分越来越多, 等于90°时, 则全部为横向涡. 在纵向涡发生器的尺寸、位置不变的情况下, 分别计算了带矩形小翼的通道在矩形小翼的冲角为15°、30°、45°、60°和90°, Re 为800、1 600、2 400和3 000时的各种情况下相应的物理量, 并把计算结果与光通道(带下标“0”)的相应值进行对比, 结果如图3和4所示.

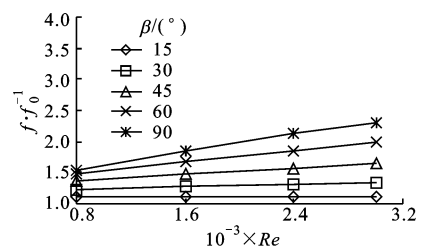


图4 通道平均流动阻力系数随 Re 、的变化

由图3可见, Re 增加, Nu 也增加, 但不同冲角的涡发生器强化换热的程度不同. 在每一个 Re 下, 都是冲角为45°时的强化换热最大, 以下依次是冲角为60°、30°、90°、15°, 其中冲角为60°时的平均 Nu (Nu_m)比冲角为30°的情况稍好些. 这是因为涡的产生使得速度场、温度场整体分布发生了变化. 为进一步了解这种变化, 计算了全场平均协同角随 Re 和的变化, 结果也示于图3中. 由图可见, 在每一种 Re 下, 光通道的协同角是最大的, 而对于带不同冲角的

矩形小翼的通道, 冲角为45°时的协同角最小, 以下依次是冲角为60°、30°、90°、15°. 由此可知, 相同 Re 下, 平均协同角越小, Nu_m 越大, 这完全符合场协同原理[8]. 值得注意的是, 对于光通道, Re 增大, 协同角会有所增大, 但对于有纵向涡发生器的通道, 在不同的 Re 下, 协同角随 Re 增大而减小. 因此, 对于有纵向涡发生器的通道而言, 提高 Re 带来的 Nu_m 的增大, 不仅仅有轴向速度增大而导致的流体载热能力提高的功劳, 而且还有纵向涡强度提高导致的速度

场和温度场更加协同的贡献。

另外,为了比较纵向涡和横向涡对通道内各区域速度场和温度场的协同性的影响,特取 2 个区域,一个在涡发生器附近,在 $x = 0.08 \sim 0.11 \text{ m}$ 的范围,定义为区域 1;另一个在接近通道出口,在 $x = 0.25 \sim 0.28 \text{ m}$ 的范围,定义为区域 2,区域 1 和区域 2 的位置见图 1 所示. 分别计算不同冲角的通道中这 2 个区域内的速度和温度梯度之间的夹角,计算结果列于表 1 中. 由表 1 可见,与光通道相比,区域 1 内冲角为 90° 的情况下平均协同角最小,以下依次是 60° 、 45° 、 30° 和 15° ,而在区域 2 内,冲角为 45° 的情况下平均协同角最小,以下依次是 30° 、 60° 、 15° 和 90° ,这就充分说明纵向涡(冲角为 45° 、 30° 的情况)之所以能强化换热是因为它改善了包括涡发生器附近区域(区域 1)以及下游广阔区域(区域 2)的场协同性,而横向涡(冲角为 90° 的情况)只可以改善涡发生器附近区域的场协同性,因此纵向涡可以强化整体换热,而横向涡只可以强化局部换热。

表 1 不同冲角的纵向涡发生器对通道内各区域场协同改善程度的比较

通道	平均协同角/ $(^\circ)$	
	区域 1	区域 2
光通道	88.525	89.264
= 15°	87.515	88.743
= 30°	86.654	88.402
= 45°	85.679	88.259
= 60°	85.137	88.552
= 90°	85.081	88.861

由图 4 可见,随着 α 的增大,阻力系数迅速增加,这主要因为通道中安置的涡发生器对流动会产生较大的局部阻力——形状阻力,而形状阻力是通道总阻力的主要来源. 形状阻力的大小主要与阻流件的迎风面积有关. α 越大,涡发生器的迎风面积越大,流动阻力就增大. 由图 5 可以发现,通道入口有一个显著的压降,而空气经过涡发生器时产生一个更陡的压降,由于纵向涡导致的流体掺混使得涡发生器后面压力又有回升,此后又缓慢下降。

2.2 纵向涡发生器的形状对矩形通道内的换热、场协同性和流动阻力的影响

常见的小翼型纵向涡发生器除有上述的矩形小翼外,还有三角形小翼. 为比较二者对强化换热和流

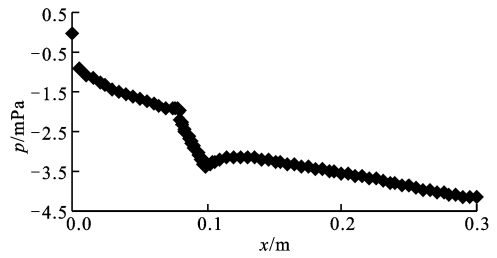


图 5 有纵向涡发生器的通道内断面压力的沿程变化 ($Re = 1600$ 、 $\alpha = 30^\circ$)

动阻力的影响,在涡发生器内缘点(图 1b 中的 A 点)位置不变的情况下,计算了与 2.1 节中矩形小翼面积相同的 2 种三角形小翼对通道内的换热、场协同性和流动阻力的影响. 三角形小翼 a 的高度为通道的高度 H ,三角形小翼 b 的高度为通道的高度 H 的一半. 由图 6 可见,在不同 Re 下,三角形小翼可以使通道内速度场和温度场的协同性得到更多改善,因此它比相同面积的矩形小翼对强化换热更有利. 三角形小翼 b 比三角形小翼 a 在大 Re 下更有利于强化换热. 这是因为对于矩形小翼而言,流体经过其侧缘(长度方向的边)时会因惯性和边界层分离而产生纵向涡,而对于三角形小翼而言,流体经过其前缘(斜边)时产生纵向涡,在纵向涡发生器面积一定的情况下,侧缘或前缘越长,越会产生更多的纵向涡,对流体的扰动也越大,换热也会得到更多的改善. 三角形小翼 a 的前缘比矩形小翼的侧缘长,而三角形小翼 b 的前缘又比三角形小翼 a 的前缘长,所以相比较而言,三角形小翼 b 的强化换热效果最好,三角形小翼 a 的强化换热效果居中,矩形小翼的强化换热效果稍差. 因此,三角形小翼是性能较好的纵向涡发生器. 图 7 为 3 种小翼对通道流动阻力的影响对比. 可见,三角形小翼 a 的阻力最大,三角形小翼 b 的阻力比矩形小翼的阻力稍低。

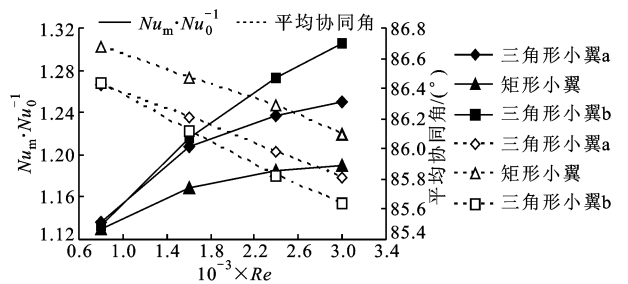


图 6 三角形小翼和矩形小翼的强化换热、场协同性的比较

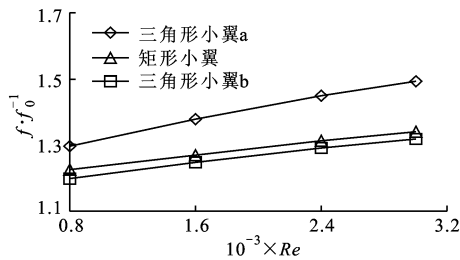


图7 三角形小翼和矩形小翼对通道平均流动阻力系数的影响

3 结论

(1) 纵向涡强化换热的内在机理可以归结于改善速度场和温度场之间的协同性,即减小速度和温度梯度之间的夹角。

(2) 对于光通道,协同角随 Re 的增大而增大,对于有纵向涡发生器的通道,协同角随着 Re 增大而减小。

(3) 在不同的 Re 下,冲角为 45° 的矩形小翼使得矩形通道内平均协同角最小、平均 Nu 最大,以下依次是冲角为 60° 、 30° 、 90° 、 15° ;但随着冲角的增大,平均流动阻力系数增加。

(4) 纵向涡(冲角为 45° 、 30° 的小翼产生的)能改善包括涡发生器附近区域以及下游广阔区域的场协同性,而横向涡(冲角为 90° 的小翼产生的)只可以改善涡发生器附近区域的场协同性,所以纵向涡可以强化整体换热,而横向涡只可以强化局部换热。

(5) 在其他条件都相同的情况下,三角形小翼比矩形小翼对强化换热更有利,在面积一定的条件下,增加三角形小翼的前缘长度可带来换热强化和阻力减小的效果。

参考文献:

[1] Biswas G, Mitra N K, Fiebig M. Computation of laminar mixed convection flow in a channel with wing type built-in obstacles [J]. J Thermophys, 1989, 3 (3):

447-453.

- [2] Biswas G, Chattopadhyay H. Heat transfer in a channel with built-in wing type vortex generators[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1992, 35(5): 803-914.
- [3] Biswas G, Torii K, Fuji D, et al. Numerical and experimental determination of flow structure and heat transfer effects of longitudinal vortices in a channel flow[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1996, 39 (16): 3441-3451.
- [4] Sohankar A, Davidson L. Effect of inclined vortex generators on heat transfer enhancement in a three-dimensional channel[J]. Num Heat Transfer: Part A, 2001, 39(5): 443-448.
- [5] Chung J D, Park B K, Lee J S. The combined effects of angle of attack and louver angle of a winglet pair on heat transfer enhancement[J]. Journal Enhanced Heat Transfer, 2003, 10(1): 31-43.
- [6] Fiebig M, Sanchez M A. Enhancement of heat transfer and pressure loss by winglet vortex generators in a fin-tube element[J]. HTD ASME, 1992, 201(1): 4-14.
- [7] Biswas G, Mitra N K, Fiebig M. Heat transfer enhancement in fin-tube heat exchanger by winglet type vortex generators [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1994, 37(2): 283-291.
- [8] Guo Zengyuan, Tao Wenquan, Shah R K. The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer[J]. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48(9): 1797-1807.
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安:西安交通大学出版社,2001: 3-4.
- [10] Qu Zhiguo, Tao Wenquan, He Yaling. Three-dimensional numerical simulation on laminar heat transfer and fluid flow characteristics of strip fin surface with X-arrangement [J]. ASME J Heat Transfer, 2004, 126(5): 697-707.
- [11] Fiebig M. Vortices and heat transfer[J]. ZAMM Z Angew Math Mech, 1997, 77(1): 3-18.

(编辑 王焕雪)