

纵向涡强化换热的数值研究及场协同原理分析

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: 用三维数值模拟的方法研究了纵向涡发生器用于管-翅表面的流动换热特征. 计算了 Re (为 800 ~ 2 000)、三角形小翼型涡发生器的冲角 (分别为 30° 和 45°) 对管-翅表面平均 Nu 、压降的影响, 并利用场协同原理进行了分析. 结果发现纵向涡强化管-翅表面换热的内在机理可以用场协同原理进行解释, 即纵向涡发生器使全场速度和温度梯度之间的平均夹角减小. 另外计算还发现: 三角形小翼对顺排换热器的强化换热效果好于对叉排换热器的强化; 冲角为 45° 的三角形小翼强化换热效果好于冲角为 30° 的三角形小翼; 冲角为 45° 的三角形小翼导致空气压降提高, 而冲角为 30° 的三角形小翼则可使压降有所减小. 无论传热管是叉排还是顺排, 冲角为 30° 的三角形小翼比冲角为 45° 的三角形小翼在消耗单位泵功条件下带来的强化换热效果更大.

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)07-0757-05

Numerical Analysis to Vortex Heat Transfer Enhancement Based on 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 simulation results are presented for fin-and-tube heat transfer surface with vortex generators. The effects of Reynolds number (from 800 to 2 000), the attack angle (30° and 45°) of delta winglet vortex generator are examined. The numerical results are analyzed based on the field synergy principle to explain the inherent mechanism of heat transfer enhancement by longitudinal vortex, namely second flow generated by the vortex generators causes the reduction of the intersection angle between the velocity and fluid temperature gradient. In addition, the computational evaluations indicate that the heat transfer enhancement of delta winglet for aligned tube bank heat exchanger is more significant than that for staggered tube bank heat exchanger, the heat transfer enhancement of delta winglet with the attack angle of 45° is more obvious than that of 30°; the delta winglet with the attack angle of 45° leads to an increase in pressure drop, while the delta winglet with the attack angle of 30° results in a slight decrease. The heat transfer enhancement per unit pumping power for attack angle of 30° is larger than that for attack angle of 45° either for staggered or for aligned tube bank arrangement.

Keywords: longitudinal vortex; heat transfer enhancement; field synergy principle

收稿日期: 2006-02-20. 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、气体换热器、电子器件冷却等领域都有着广泛的应用,而如何强化气体侧的换热是相关学者和工程技术人员的一个永恒的研究主题.纵向涡发生器作为传热面上的一种特殊的延伸面,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——纵向涡.从传统概念上讲,纵向涡因对流体产生扰动,增加了流体的混合,导致传热强化.同时,由于纵向涡发生器便于加工与实施,所以近10多年中对纵向涡强化换热的研究也越来越多,而且已在工程实际中得到应用^[1].

从20世纪90年代起,人们就对纵向涡发生器在翅片管换热器中的应用作了较多的研究,其中包括实验研究和数值模拟研究^[2-7].文献[2]在实验研究方面取得了一些很好的结果,但在数值模拟方面,文献中现有的研究还存在一些不足.首先,文献中没有同时考虑纵向涡发生器的厚度及因加工的原因而在翅片上产生的小孔;其次,在对纵向涡发生器用于翅片管换热器的计算中,早先都不考虑翅片效率;最后,除文献[6]外,其他文献的计算单元只包括一排管子(沿空气流动方向的第一排或中间排的传热管)或两排管子(沿流动方向的前两排传热管),所以所取的进、出口边界条件也不完全相同,使得相互间的比较缺乏共同的基础.

针对以上这些问题,本文的模拟工作将考虑翅片及纵向涡发生器的导热、纵向涡发生器的厚度、纵向涡发生器下面因加工而在翅片上产生的小孔.计算单元为所有排管子、相应的纵向涡发生器和全长翅片组成的完整换热通道.由于采用了延长计算区域的方法,所以入口采用均匀速度、均匀温度的边界条件,出口采用充分发展边界条件的处理更为合理.另外,关于纵向涡强化对流换热的根本机制究竟是什么,文献中没有统一的观点.一般认为纵向涡强化换热的原因是它破坏了边界层的发展,使流体旋转,

增加了混合.采用文献[8]中阐述的场协同原理来分析本文的数值计算结果,以便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

在一般的紧凑式换热器中,流动大多处于层流阶段,因此本文所计算的 Re (基于迎面风速和翅片通道净间距 H 的2倍)限在2000以下,使流动处于层流状态,同时假定过程是稳态的.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[9]中已有充分介绍,此处从略.以下仅就翅片管换热器的边界条件和主要的数值方法做出说明.

1.1 边界条件

所模拟的带纵向涡发生器的翅片管换热器的结构见图1.在每个圆管的侧后方,翅片上都冲出一对对称的三角形小翼.由于布置上的对称性,选择图1中虚线边界以及上下两相邻翅片厚度一半处的截面所围的区域作为计算单元.表1列出了所要计算的叉排或顺排翅片管换热器及三角形小翼的几何尺寸及计算条件.实际的计算区域包括上述计算单元、进口延长段和出口延长段.进口延长段的延长距离为翅片净间距的10倍,出口延长段的延长距离为翅片净间距的30倍.计算区域所采用的边界条件简述如下.

进口边界为轴向速度、温度均匀分布,横向速度为0.出口为充分发展边界条件.延长段所有侧面均为对称边界条件.

在翅片管区域:没有纵向涡发生器时,上、下翅片壁面为无滑移绝热边界条件,前、后面流体区为对称边界条件,前、后面管壁区为无滑移恒壁温边界条件,前、后面翅片区为无滑移绝热边界条件;有纵向涡发生器时,上、下翅片壁面为无滑移、温度周期性

表1 具有纵向涡发生器的翅片管换热器的几何尺寸及计算条件

参数名称	符号/单位	数值	参数名称	符号/单位	数值
圆管外径	D/mm	10.2	三角形小翼的弦长	l/mm	6
纵向管间距	P_l/mm	28	三角形小翼的高度	h/mm	3
横向管间距	P_t/mm	25.4	管壁温度	T_w/K	300
管排数	N	3	空气进口温度	T_0/K	340
翅片净间距	H/mm	3	迎面风速	$u_0/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2~6
翅片厚度	t/mm	0.3			

注:管壁取为恒壁温;翅片、三角形小翼(从翅片上直接冲出)材料为铝.

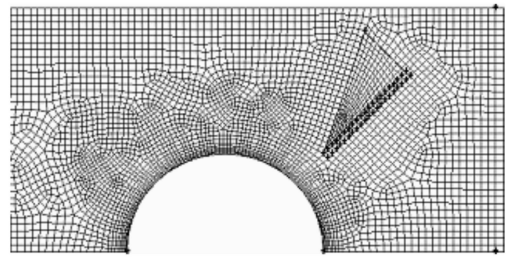
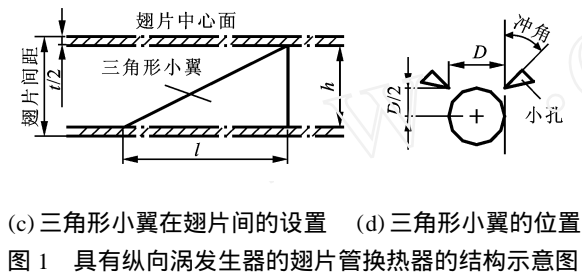
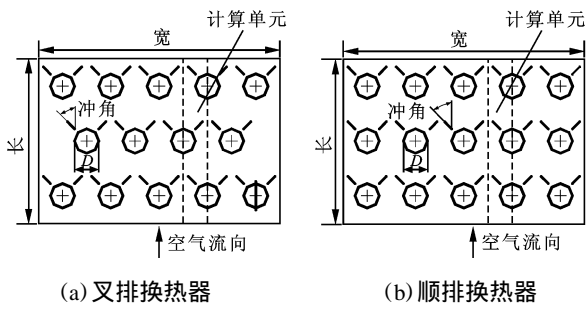


图 2 圆管及三角形小翼附近的网格分布

度和温度梯度之间的夹角. p 表示空气的压降.

2 计算结果与分析

由于考虑了翅片的导热,其表面温度随位置而变.在翅片通道平均对流换热系数计算中,温差取固体壁面(包括管壁、翅片和三角形小翼)的平均温度与空气进、出口温度的对数平均温差.平均协同角取全场的体积平均值.压降为翅片通道进口、出口的静压差.

2.1 纵向涡对于 3 排叉排换热器管-翅表面的换热、场协同性和压降的影响

从图 3 可见,相对于平翅片管-翅(不带纵向涡发生器)表面而言,在所计算的 Re 范围内,冲角为 30 的三角形小翼可提高 Nu_m 约 10%~13%,冲角为 45 的三角形小翼可提高 Nu_m 约 12%~16%.图 3 也给出了 3 种情况下全场(不包括延长区域)的平均协同角的比较.在每一种 Re 下,冲角为 45 的三角形小翼的通道的协同角最小,相应的 Nu_m 最大;平翅片通道的协同角最大, Nu_m 最小;冲角为 30 的三角形小翼的通道的协同角介于二者之间.这充分说明纵向涡发生器实质上是通过改善速度场和温度场之间的协同性来强化换热的.

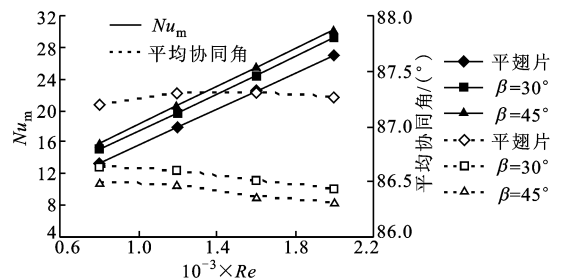


图 3 纵向涡发生器对叉排翅片管换热器空气侧 Nu_m 和平均协同角的影响

另外,三角形小翼也影响到了空气的流动阻力.与没有纵向涡发生器的翅片管换热器相比,冲角为 30 的三角形小翼可以使空气的压降减小,而冲角为

变化边界条件,前、后面流体区,管壁区,翅片区的条件分别与没有纵向涡发生器时的完全一样.

1.2 数值方法

本计算采用 FLUENT 商业软件进行.对于有纵向涡发生器的翅片管换热器的翅片通道,由于计算空间较复杂,因此采用非结构化的六面体网格.为提高数值解的精度,翅片高度方向有 20 层网格,圆管表面有 8 层边界层网格,总网格数约为 40 余万.圆管及三角形小翼附近的网格分布如图 2 所示.

在 FLUENT 中,可以实现固体和流体的耦合求解,方法是直接将翅片及三角形小翼定义为固体区(材料为铝),在该区速度值为 0,只求解导热方程以考虑翅片和三角形小翼的温度分布.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,扩散项采用中心差分,压力和速度的耦合采用 SIMPLIC 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 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.采用空气进行计算, Pr 为 0.71.

计算中取 Re 的范围为 800~2000.选用三角形小翼作为纵向涡发生器.因为三角形小翼的冲角对换热的影响较其他几何因素都大,所以无论传热管是叉排还是顺排布置,都选择了冲角为 30 和 45° 两种情况分别进行计算.计算平均 Nu (Nu_m) 中的平均换热系数时,用到固体壁面(包括管壁、翅片和小翼)和空气进、出换热器的平均温度, Nu_m 中的定性尺寸仍然是翅片净间距的 2 倍.协同角定义为速

45 的三角形小翼则使压降增大,在所计算的 Re 范围内,它们分别减小约 8%~9% 和提高约 9%~11% (见图 4). 这是因为对于没有纵向涡发生器的翅片管换热器而言,空气遇到的阻力来自于圆管的形状阻力和翅片表面的摩擦阻力,且圆管的形状阻力是产生空气压降的主要原因,而当翅片上有了纵向涡发生器后,空气遇到的阻力不仅来自于上述两个方面,还有纵向涡发生器的形状阻力. 纵向涡发生器首先因其自身的形状阻力而导致空气流动阻力增加,但在三角形小翼和圆管之间的空气因受到加速而推迟了与传热管表面的分离,而且形成的纵向涡对圆管后面的流体也有卷吸、带动作用,使圆管后面的尾涡区得以减小,从而会导致空气流过圆管的阻力有所降低. 当然,由于纵向涡引起通道内速度分布的改变也会导致翅片表面的摩擦阻力的变化. 在加了纵向涡发生器后,空气总压降是增大还是减小,取决于这 3 方面综合作用的结果. 冲角为 45 的三角形小翼比冲角为 30 的三角形小翼会产生更显著的形状阻力,所以冲角为 30 的三角形小翼使总压降减小,冲角为 45 的三角形小翼使总压降增大.

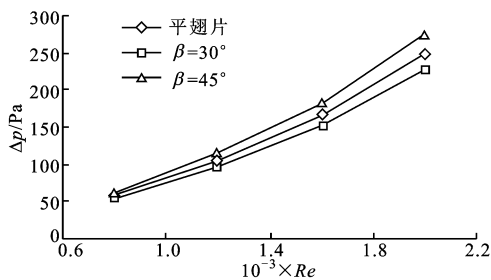


图 4 三角形小翼对叉排管-翅表面空气压降的影响

为了进一步比较冲角为 30 和 45 的三角形小翼的综合性能,图 5 给出了两种情况下换热强化与压降变化之比随 Re 的变化. 事实上,由于 3 种管翅表面所组成的通道几何参数是相同的, Re 相同就意味着流量相同,所以压降之比 p/p_0 就是泵功之比,而 $(Nu_m/Nu_0)/(p/p_0)$ 就表示消耗单位泵功条件下带来的换热强化. 就换热强化和压降变化的综合效果而言,冲角为 30 的三角形小翼效果明显好于冲角为 45 的三角形小翼. 随 Re 的增加,2 种情况下差别增加,但强化效果减小,尤其对于冲角为 45 的三角形小翼,在 Re 大于 2 000 后, $(Nu_m/Nu_0)/(p/p_0)$ 开始小于 1.

2.2 纵向涡对于 3 排顺排换热器管-翅表面的换热、场协同性和压降的影响

不同冲角的三角形小翼对顺排管-翅表面的

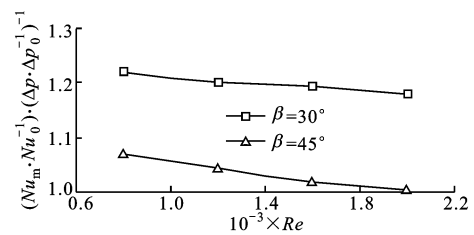


图 5 不同冲角的三角形小翼在单位泵功变化下强化换热效果比较(传热管叉排)

Nu_m 的影响见图 6. 相对于不带纵向涡发生器的平翅片表面而言,在所计算的 Re 范围内,冲角为 30 的三角形小翼可提高 Nu_m 约 16%~20%,冲角为 45 的三角形小翼可提高 Nu_m 约 20%~25%. 从强化后的 Nu_m 来看,在相同的几何参数下,三角形小翼用于顺排翅片管换热器后,换热甚至超过了三角形小翼用于叉排换热器的情况. 上述 3 种情况下全场的平均协同角也示于图 6 中. 在每一种 Re 下,冲角为 45 的三角形小翼的通道协同角最小,不带纵向涡发生器的通道的协同角最大,冲角为 30 的三角形小翼的通道协同角介于二者之间. 与 Nu_m 的变化相对比,刚好也符合协同角减小时 Nu_m 增大,协同角增大时 Nu_m 减小的场协同原理. 这也又一次充分证明纵向涡发生器用于翅片管换热器后,实质上仍是通过改善速度场和温度场的协同性来强化换热的.

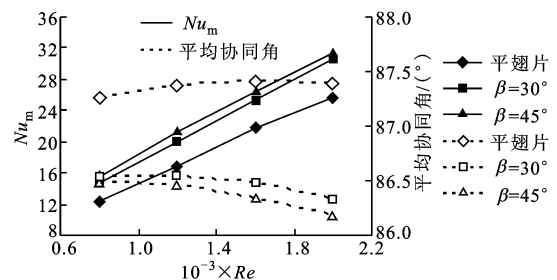


图 6 纵向涡发生器对顺排翅片管换热器空气侧 Nu_m 和平均协同角的影响

由图 7 可见,在所计算的 Re 范围内,冲角为 30 的三角形小翼比没有纵向涡发生器的翅片管换热器空气侧压降约减小 8%~10%,而冲角为 45 的三角形小翼比没有纵向涡发生器的翅片管换热器空气侧压降约提高 10%~12%.

同样,为了进一步比较冲角为 30 和 45 的三角形小翼的综合性能,图 8 给出了 2 种情况下消耗单位泵功带来的换热强化,可见仍然是冲角为 30 的

三角形小翼效果明显好于冲角为 45° 的三角形小翼. 随 Re 的增加, 2 种情况下差别有所增加, 但强化效果减小. 在所计算的 Re 范围内, $(Nu_m / Nu_0) / (p / p_0)$ 都大于 1. 比较图 5 和图 8 可发现, 在相同工作条件下, 三角形小翼在顺排管-翅表面上的强化效果好于在叉排管-翅表面上的强化效果.

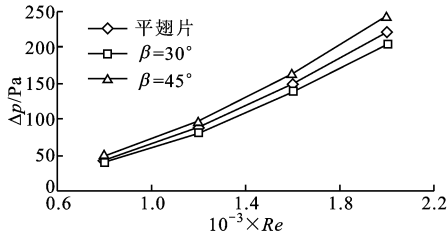


图7 三角形小翼对顺排管-翅表面空气压降的影响

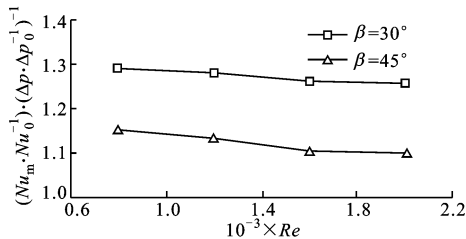


图8 不同冲角的三角形小翼在单位泵功变化下强化换热效果比较(传热管顺排)

3 结 论

(1) 纵向涡强化管-翅表面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) 与没有纵向涡发生器、相同尺寸的管-翅表面相比, 三角形小翼可以提高管-翅表面的 Nu_m , 单从换热方面考虑, 冲角为 45° 的三角形小翼的强化换热效果好于冲角为 30° 的三角形小翼的强化换热效果, 三角形小翼在顺排管-翅片表面中的强化换热效果超过在叉排管-翅表面中的强化换热效果.

(3) 不管对于叉排还是顺排管-翅表面, 与没有纵向涡发生器、相同尺寸的管-翅表面相比, 冲角为 30° 的三角形小翼使空气流过管-翅表面的压降减小, 而冲角为 45° 的三角形小翼使空气流过管-翅表

面的压降提高.

(4) 无论是叉排还是顺排, 冲角为 30° 的三角形小翼比冲角为 45° 的三角形小翼在消耗单位泵功条件下带来的强化换热效果更大.

参考文献:

- [1] Wang Chichuan. Technical review—a survey of recent patents of fin-and-tube heat exchangers[J]. J of Enhanced Heat Transfer, 2000, 7(5): 333-345.
- [2] Fiebig M, Sanchez M A. Enhancement of heat transfer and pressure loss by winglet vortex generators in a fin-tube element, HTD-201 [R]. New York: ASME, 1992: 4-14.
- [3] 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.
- [4] Chen Y, Fiebig M, Mitra N K. Heat transfer of a finned oval tube with staggered punched longitudinal vortex generators [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2000, 43(3): 417-435.
- [5] Fiebig M. Vortex generators for compact heat exchangers[J]. J of Enhanced Heat Transfer, 1995, 2(1): 43-61.
- [6] Leu Jinsheng, Wu Yinghao, Jang Jiinyuh. Heat transfer and fluid flow analysis in plate-fin and tube heat exchanger with a pair of block shape vortex generator [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2004, 47(20): 4327-4338.
- [7] Torri K, Kwak K M, Nishino K. Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with winglet-type vortex generators for fin-tube heat exchanger [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2002, 45(18): 3795-3801.
- [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.

(编辑 王焕雪)