

文章编号: 1000-6761 (2005) 03-0404-04

应用流场协同理论的多纵向涡强化换热管

孟继安, 过增元, 李志信

(清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘 要: 应用流场协同理论研发了两种多纵向涡强化换热管——不连续双斜向内肋管和交叉缩放椭圆管, 分析了其强化换热的物理机制。数值模拟和实验结果表明, 当 $Re = 500 - 2300$ 时, 与考虑进口段效应的圆形截面管 ($L/D = 300$) 相比, 不连续双斜向内肋管的换热增强 250 % ~ 650 %, 阻力增加 120 % ~ 300 %; 交叉缩放椭圆管 Nu 可提高 200 % ~ 500 %, 沿程阻力增加 100 % ~ 350 %; 当 $Re = 2300 \sim 5 \times 10^4$ 时, 与圆管相比, 不连续双斜向内肋管换热可增强 110 % ~ 240 %, 阻力增加 120 % ~ 240 %; 交叉缩放椭圆管换热可增强 35 % ~ 170 %, 阻力增加 130 % ~ 160 %。两种新型强化换热管具有优良的换热性能, 可广泛应用于电力、石化、建筑供热等行业。图 7 参 10

关键词: 工程热物理; 强化传热; 多纵向涡; 实验; 数值模拟; 流场协同理论; 换热管

中图分类号: TK121

文献标识码: A

Tubes with Heat Transfer Property Intensified by Multi-longitudinal Vortices According to the Field Coordination Theory

MENG Ji-an, GUO Zeng-yuan, LI Zhi-xin

(College of Aeronautics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Two kinds of tubes with heat transfer properties, intensified by multi-longitudinal vortices, i. e. tubes with discrete double inclined ribs (DDIR) and with alternating elliptical axes (AEA), have been developed and their physical mechanism of heat transfer intensification analyzed. Numerical simulation and experimental results show, that in the range of $Re = 500 - 2300$, heat transfer in DDIR tubes is raised by 250 % ~ 650 %, with flow resistance increased by 120 % ~ 300 %, while in AEA tubes their respective increase is 200 % ~ 500 %, and 100 % ~ 350 %, compared to circular tubes ($L/D = 300$) with entrance effect included; in the range of $Re = 2300 - 5 \times 10^4$, as compared with circular tubes, the increase of heat transfer is 110 % ~ 240 % and that of flow resistance 120 % ~ 240 % in DDIR tubes while in AEA tubes the respective increase is 35 % ~ 170 % and 130 % ~ 160 %. The performance of these two kinds of tubes with intensified heat transfer property is excellent and there may be a broad field of application in the power, petrochemical and building industry for heating purposes. Fig 7, ref 10.

Key words: thermo-physical engineering; intensified heat transfer; multi-longitudinal vortices; experiment; numerical simulation; field coordination theory; heat exchanger tube

收稿日期: 2004-07-10 修订日期: 2004-09-31

基金项目: 国家 973 项目资助 (G20000263)

作者简介: 孟继安 (1964-), 男, 清华大学航天航空学院, 博士, 高级工程师。主要从事传热强化与应用技术方面的研究。

对流换热普遍存在于石油化工、能源动力等领域。为了降低换热设备的重量, 减少换热设备的体积, 节能降耗, 应力求强化传热过程。近 30 年来各种强化换热技术得到了快速的发展和广泛的应用,

但相关的研究多数仍然停留在经验的基础上,即研究者根据其经验设计出某种具体的强化技术,然后通过实验和数值计算归纳出适用于一定范围的经验关联式。因此,传热强化研究目前仍属于重要领域^[1,2],研究人员通常所采用的经验性的研究方法不可避免存在着一定的局限性。

在对流换热过程中,流场的变化必然会影响换热空间内的温度分布,进而改变热量传输特征,并对换热整体性能产生影响。对流换热的流场协同强化理论的提出^[3,4],为对流换热的强化研究提供了新的思路。本文在简要介绍对流换热场协同理论的基础上,通过数值分析获得了管内对流换热的优化速度场——多纵向涡,研究开发了两种多纵向涡强化管并对其进行性能分析和比较。

1 对流换热场协同理论简介与管内换热优化速度场

文献[3,4]从层流对流换热的能量方程出发,将能量方程中的对流项比拟为内热源,从而将对流换热问题看作有内热源的导热问题,所不同的是此热源是速度场和温度梯度场的函数,进一步导出了二维层流对流换热的努谢尔数与速度场和温度梯度场的理论关系式,并指出改善速度场与热流场的协同程度可实现对流换热的强化。文献[5]将对流换热场协同理论进一步扩展至3D湍流换热。

对于稳定无内热源的对流换热过程,如不计粘性耗散的影响,其能量方程可写为:

$$c_p U \cdot \nabla T = \nabla \cdot [(\quad + c_p a_i) \nabla T] \quad (1)$$

由于在壁面处湍流热扩散率 a_i 为0,若忽略轴向导热,根据高斯积分可导出换热壁面 S 导入或导出的总热量为:

$$q_s = \int_S [\nabla T] dS = \int_S [(\quad + c_p a_i) \nabla T] dS \\ = (c_p U \cdot \nabla T) dV \quad (2)$$

所以,平均 Nu 可表示为:

$$Nu = \frac{1}{4} Re Pr (\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}) d\bar{V} \quad (3)$$

式中 \bar{U} 、 $\nabla \bar{T}$ 和 $d\bar{V}$ 分别为无量纲时均速度、无量纲时均温度梯度和无量纲微元体积,由下式确定:

$$\bar{U} = \frac{U}{U_0}, \nabla \bar{T} = \frac{\nabla T}{(T_w - T_m)/D}, d\bar{V} = \frac{dV}{V_0} \quad (4)$$

式中 D 为特征尺度: $D = 4V_0/S$

式(3)为对流换热的整体性能与局域速度场和

温度场的一般关系式。从式(3)可以看出:对流换热的强度不仅取决于 Re 和 Pr ,还取决于 $\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}$ 的积分值,它代表了速度场与热流场的相互协同程度,即速度场和温度梯度场之间存在着最为合理的空间分布,改善速度场与温度梯度场的协同程度可实现对流换热的强化。对流换热强化的流场协同原则的提出,为优化换热过程、发展新的强化技术提供了新的思路。

在粘性耗散一定的条件下,基于对流换热场协同理论,文献[6]采用有条件变分方法,导出对流换热的优化速度场控制方程——流场协同方程,并通过数值求解方法获得了管内层流换热的优化速度场,如图1所示。在计算条件下,当管内为此最优速度场时,与抛物速度分布相比,其换热可增强3.1倍,而阻力只增加17%。可以看出:管内多纵向涡流动是层流对流换热的最有效的强化换热途径之一。数值分析还表明,多纵向涡流流动对管内湍流换热同样具有显著的强化效果,其阻力增加与换热增强倍数相当^[6]。

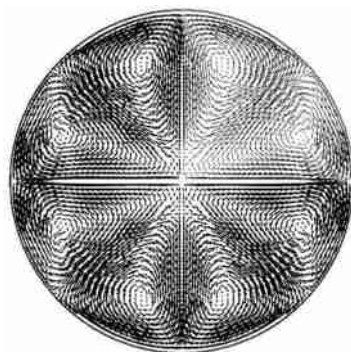


图1 圆管内层流换热的最优速度场 ($Re = 400$)

Fig 1 Optimal velocity field for laminar flow heat transfer in a circular tube ($Re = 400$)

2 多纵向涡换热管及其强化机理

由上述分析可知,根据对流换热的流场协同强化换热理论可获得管内对流换热的最优速度场是在主流基础上附加多纵向涡流动,其特点是换热强化效果显著而流动阻力的增加较少。为此,我们研究开发了两种多纵向涡强化换热管——不连续双斜向内肋管和交叉缩放椭圆管(图2和图3)。

不连续双斜内肋强化换热管是通过轧制等方法在换热管的内壁面形成许多不连续的、与轴线有一定夹角并向两个方向倾斜的条状凸起物(一次表面)——双斜内肋。所谓的“不连续”是相对于螺旋槽管(螺旋连续)、螺纹管(螺旋连续)、横槽管(周向

连续)而言,是一种具有一定长度的粗糙元(条状凸起)。管内流体在管壁上多个双斜内肋对的作用下诱导产生多纵向涡流,且涡流主要集中在管壁面附近,从而使对流换热得到强化。

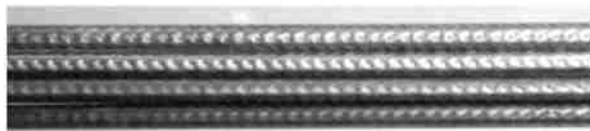


图 2 不连续双斜向内肋换热管

Fig 2 Photo of DDIR tubes



图 3 交叉缩放椭圆换热管

Fig 3 Photo of an AEA tube

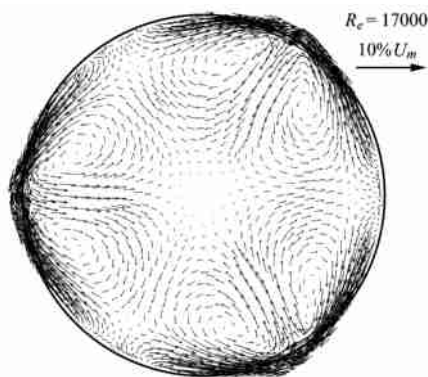


图 4 不连续双斜向内肋管截面的流场

Fig 4 Flow field in DDIR-tube's cross-section

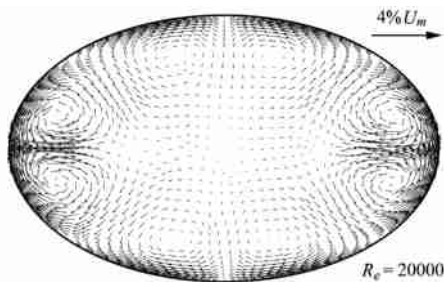


图 5 交叉缩放椭圆管椭圆截面的流场

Fig 5 Flow field in AEA-tube's cross-section

交叉缩放椭圆换热管是以椭圆形截面管段为换热主体,相邻交叉椭圆形截面管段之间存在过渡段。过渡段相对于直椭圆段一般较短,在过渡段处,截面椭圆的长短轴交替,在一个方向的渐扩和在另一方向的渐缩,使流体产生强烈的垂直于主流方向的流动,并在椭圆直段发展为多纵向涡流。即交叉缩放椭圆管是利用椭圆形截面(一次表面)自身的交错变化使流动在管截面内诱导出多纵向涡,在管内形成

多纵向涡流动。

采用 Fluent6.0 对两种换热管进行数值模拟,其流场示于图 4 和图 5。数值模拟结果表明,无论是低 Re 流动,还是高 Re 流动,在管内均可产生多纵向涡,与场协同分析所得的最佳流场相类似;在多纵向涡流动的作用下温度场也发生了明显的改变,特别是在低 Re 区,壁面温度梯度显著增大,因而换热得以显著强化。

3 实验结果与性能比较

单管对流换热和阻力实验装置的原理简图示于图 6。实验装置由冷媒系统、热媒系统、实验段和测量控制系统组成。实验系统采用计算机自动控制和自动数据采集。应用模糊自适应方法的自动控制系统,保证了实验段的进口流量和温度的稳定性和可靠性,可实现实验段进口流量 $\pm 2\%$ 和进口温度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的控制精度。为了保证实验测量的准确性,流量测量采用质量流量计(精度 0.2 级),温度测量采用共同基准测温差的方法以及在实验过程中修正的措施,可保证 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测量精度,从而保证了实验结果的可信度。

对实验装置进行了验证实验,结果表明,湍流和过渡区($Re = 3000 \sim 10^5$)的换热与 Gnielinski 的经验公式^[7]相吻合,偏差在 6% 以内。湍流时的阻力与 Petukhov 的经验公式^[8]相吻合,其最大偏差在 5% 以内。层流($Re = 500 \sim 2000$)换热与 Sieder-Tate 的经验公式^[9]相吻合,其偏差在 10% 以内。实验验证范围为 $Re = 500 \sim 13 \times 10^5$, $Pr = 2 \sim 7$ 以及 $Pr = 80 \sim 200$ 。

实验结果表明,当 $Re = 500 \sim 2300$ 时与考虑进口段效应的圆形截面管($L/D = 300$)相比,不连续双斜向内肋管的换热增强 250% ~ 650%,阻力增加 120% ~ 300%;交叉缩放椭圆管 Nu 可提高 200% ~ 500%,沿程阻力增加 100% ~ 350%。当 $Re = 2300 \sim 5 \times 10^4$ 时与圆管相比,不连续双斜向内肋管换热可增强 110% ~ 240%,阻力增加 120% ~ 240%;交叉缩放椭圆管换热可增强 35% ~ 170%,阻力增加 130% ~ 160%。

图 7 为几种强化换热管的换热增强 Nue/Nus 和同功耗下换热强化指标 PEC 的性能实验拟合曲线,表明两种新型换热管的强化换热效果显著而阻力增加比较小。特别是不连续双斜向内肋管的综合性能最佳,低 Re ($Re < 2300$) 时的 Nu 甚至比管内插扭曲带的 Nu 高出 20% 以上,而阻力系数要比管内插扭

曲带阻力系数低 40 % ~ 60 %。在中高 Re ($Re = 6000 \sim 5 \times 10^4$) 时,不连续双斜向内肋管的 Nu 比螺旋槽管大 15 % ~ 60 %,而阻力系数与螺旋槽管相当或略低。初步实验和工业应用还表明,不连续双斜向内

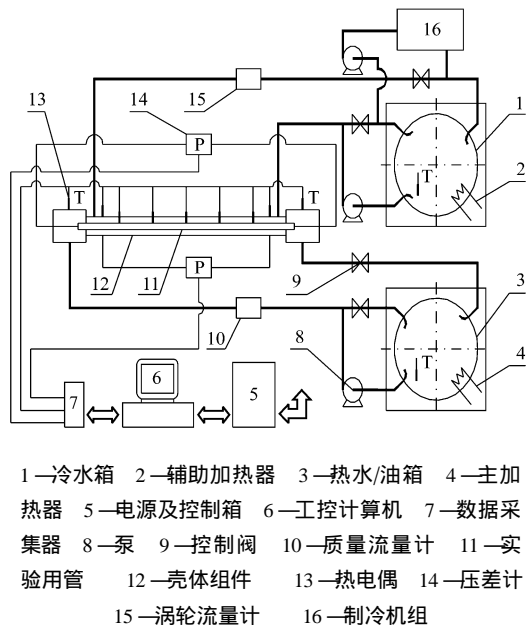


图6 实验系统原理简图

Fig 6 Systematic diagram of the experimental system

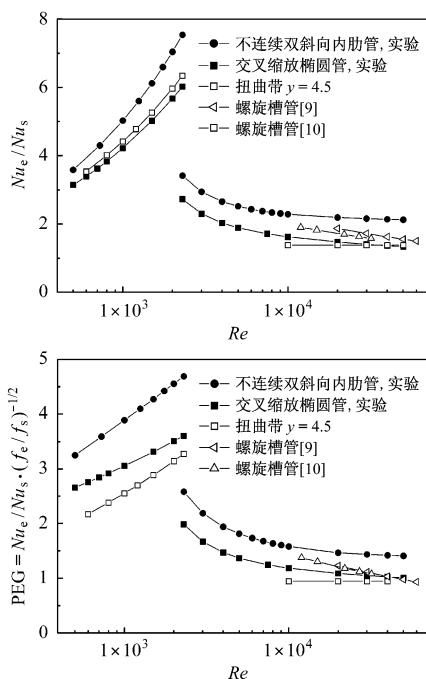


图7 几种强化换热管的性能比较

Fig 7 Performance comparison of some tubes with intensified heat transfer capability

肋管和交叉缩放椭圆换热管还具有良好的抗垢特性,应用场合更为广泛。两种新型强化换热管还具有良好的可制造性,对材料无特别限制,并可高效率低成本生产。

目前已有 100 多台交叉缩放椭圆管换热器成功应用于建筑供热领域,其中部分运行超过 2 年,用户反映良好。基于流场协同理论开发的两种多纵向涡强化换热管,特别是不连续双斜向内肋管,在电力、石化、建筑供热等行业应具有较好的应用前景。

4 结 论

(1) 对流换热场协同分析表明,管内多纵向涡流动可显著的强化换热,具有优良的综合强化换热性能。

(2) 根据对流换热场协同理论及数值分析结果研发的不连续双斜向内肋管和交叉缩放椭圆换热管,可通过自身表面的周期性变化在管内诱发多纵向涡流动。

(3) 数值和实验表明:两种新型强化换热管的强化换热效果显著而阻力增加较少,同时还具有良好的防垢性能和制造效率高的特点,可广泛应用于电力、石化、建筑供热等行业。

参考文献:

- [1] 顾维藻, 神家锐, 马重芳, 张玉明. 强化传热[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] Bergles A E. ExHFT for fourth generation heat transfer technology [J]. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2002 (26): 335 ~ 344.
- [3] Guo Z Y. Mechanism and control of convective heat transfer - Coordination of velocity and heat flow fields[D]. **Chinese Science Bulletin**, 2001, 46 (7): 596 ~ 599.
- [4] Guo ZY, Li DY, Wang BX. A novel concept for convective heat transfer enhancement [J]. **International Journal of Heat And Mass Transfer**, 1998, 41 (14): 2221 ~ 2225.
- [5] 孟继安, 陈泽敬, 李志信, 过增元. 管内对流换热的场协同分析及换热强化[J]. **工程热物理学报**, 2003, 24 (4): 652 ~ 654.
- [6] 孟继安. 基于场协同理论的纵向涡强化换热技术及其应用[D]. 北京: 清华大学力学系, 2004.
- [7] Gnielinski V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flows[J]. **Int Chem. Eng**, 1976 (16): 359 ~ 36.
- [8] Frank P, Incropera, David P, Dewitt. Fundamentals of heat and mass transfer[D]. John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [9] 崔海亭, 袁修干, 姚仲鹏. 旋流管强化传热与流体动力学试验研究[J]. **北京航空航天大学学报**, 2002, 28 (4): 459 ~ 461.
- [10] 吴慧英, 帅志明, 周强泰. 凝结换热器采用螺旋槽管的强化传热研究[J]. **化工学报**, 1997, 48 (5): 626 ~ 630.