

圆管内插入多个螺旋片的传热与流动的 数值模拟研究

张晓屿 刘志春 刘伟 周路遥

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 本文讨论了圆管内对流换热的机理, 在此基础上, 基于对流换热的优化理论, 设计一种新的纵向扰流装置, 即在管内有间隔地插入多个螺旋片, 建立了相应的物理和数学模型, 并对其传热和流动特性进行了计算模拟。结果表明, 在圆管内有间隔地插入多个螺旋片可以有效提高换热与流动的综合性能, 其 PEC 达到 2.90~5.10。

关键词 螺旋片; 数值模拟; 核心流; 强化传热; 场物理量协同

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2013)02-0310-04

Numerical Studies on Heat Transfer and Flow Characteristics for Laminar Flow in a Tube With Multiple Helical Screw Tapes

ZHANG Xiao-Yu LIU Zhi-Chun LIU Wei ZHOU Lu-Yao

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract The present study discusses the mechanism of convective heat transfer inside the tube, on this basis, based on the optimization theory of convective heat transfer; we design a new type longitudinal devise for disturbing fluid, which is inserting multiple helical screw tapes in the tube with regular space; the corresponding physical and mathematical models are set up and its heat transfer and flow characteristics are numerically simulated. The results show that the tube inserted with the multiple helical screw tapes can improve the flow and heat transfer performance effectively, the value of PEC varied between 2.90 and 5.10.

Key words helical screw tape; numerical simulation; core flow; heat transfer enhancement; field physical quantities synergy

0 引 言

换热器被广泛应用在发电、钢铁、化工、有色金属等高能耗工业中。为了降低换热器的成本和其尺寸, 在换热器的设计过程中最重要的参数就是换热系数和其带来的压降或阻力。而换热系数的提高往往会带来阻力的增加, 从而降低了换热器的能量利用效率。当前在换热器设计中一个主要的挑战就是在增强换热系数的同时尽可能地使阻力的增加量达到最小。因此针对提高换热综合性能来发展一种新的强化传热理论和技术是非常重要的。过增元^[1-5]等提出了对流换热优化的场协同理论, 得到了多纵向涡为管内层流对流换热的最佳流场形态, 其表现在两个方面, 首先是多纵向涡强化层流换热效果显著, 其次是多纵向涡在获得显著换热强化的同时流

阻增加较少。

在管内插入螺旋片可以使管内流体产生旋转并引起二次流, 促进径向混合, 在离心力影响下使管中心流体和壁面边界层流体充分混合, 造成一个温度比较均匀、速度变化较为明显的核心区域, 同时在换热壁面附近造成一个温度和速度变化均比较显著的边界层区域, 从而达到强化传热效果^[6,7]。

从这两个角度出发, 可考虑在管内有间隔地插入多个螺旋片, 产生流体纵向旋流来强化传热, 从而可以在显著增加层流对流换热系数的同时使阻力增加不大, 提高综合换热性能。本文以水作为流动介质, 对充分发展的层流在有间隔的插入多个螺旋片时的传热与流动特性进行了研究。

收稿日期: 2011-12-13; **修订日期:** 2013-01-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No.2007CB206903); 国家自然科学基金资助项目 (No.51036003; No.50721005)

作者简介: 张晓屿 (1986-), 男, 天津人, 博士研究生, 主要从事强化传热理论和实验研究。

1 物理及数学模型

如图 1 所示, 为有间隔地插入四个螺旋片的圆管。模拟采用周期性边界进行计算, 一个周期的长度 $L = 40 \text{ mm}$, 管内直径 $D = 20 \text{ mm}$, 螺旋片的厚度 $t = 1 \text{ mm}$, 螺旋片的片高 $H = 8 \text{ mm}$, 节距 $s = 20 \text{ mm}$, 间距 $a = L - s = 20 \text{ mm}$ 。

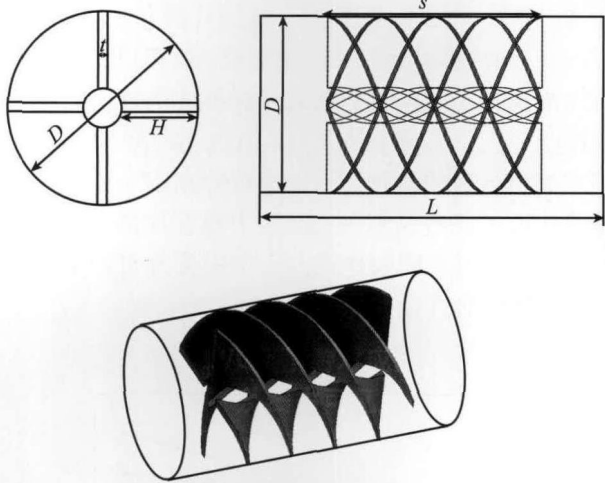


图 1 有间隔地插入四个螺旋片的圆管

Fig. 1 The tube fitted with four regularly spaced helical screw tapes

雷诺数、努塞尔数以及阻力系数的定义如下:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (1)$$

$$Nu = \frac{h D}{k} \quad (2)$$

$$f = \frac{\Delta p}{(\rho u^2 / 2)(L/D)} \quad (3)$$

模拟工质采用水, 水这里被认为是不可压缩的。另外, 假设流体处于局部热力学平衡状态, 忽略自然对流并认为流体的物性是常数。水的动力黏度 (μ), 热导率 (k), 密度 (ρ) 和比定压热容 (c_p) 分别为: $\mu = 1.003 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, $k = 0.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $\rho = 998.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $c_p = 4182 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。计算的雷诺数范围为 300~1500。控制方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (5)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j c_p T - k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) =$$

$$u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (6)$$

2 数值模拟结果及分析

2.1 传热性能

图 2 为各雷诺数 Re 下的平均努塞尔数 Nu 的值。从图中可见, 两种强化换热管的 Nu 都随着 Re 的增大而增大, 且其努塞尔数均远远大于光管的努塞尔数, 说明在模拟的 Re 数范围内, 有间隔地插入多个螺旋片都可以得到较好的强化换热效果。这可以归因于使用螺旋片产生的旋流效应, 使核心流区域的温度比较均匀, 由此造成近壁面区域较高的温度梯度。此外, 旋流加强了水流的紊动, 从而导致更好的对流换热。因此, 雷诺数越大, 换热系数越高。另外, 在 Re 小于 1200 的情况下, 插入四个螺旋片的努塞尔数要大于插入三个螺旋片的圆管, 这是因为在雷诺数较小的情况下, 流体的流速较小, 这时螺旋片产生的旋流对流体的影响较大, 四个螺旋片对流体的扰动作用要比三个螺旋片要强, 因此其对应的努塞尔数也相应较大; 而当 Re 大于 1200 时, 随着流体流速的增加, 流体本身的扰动逐渐增大, 这时三个螺旋片和四个螺旋片产生的旋流对流体的影响差别不大, 四个螺旋片反而会造成流体流动不均匀的情况, 导致插入三个螺旋片的圆管的努塞尔数反而比插入四个螺旋片的努塞尔数要大。

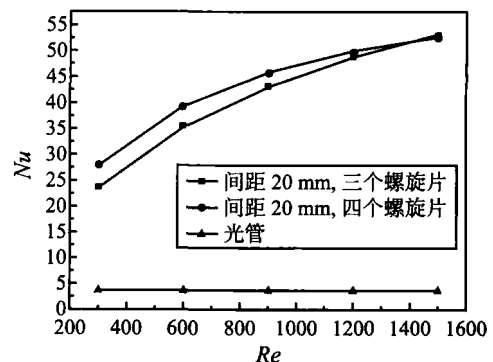


图 2 平均努塞尔数 Nu 随 Re 的变化

Fig. 2 Variation of Nusselt number with Reynolds number for helical screw tapes

图 3 表示了 $Re = 900$ 的情况下, 有间隔地插入多个螺旋片的圆管在间隔处沿圆管直径方向的温度分布。可以看出, 在核心流区域, 流体的温度非常

均匀,从而造成了近壁面较高的温度梯度,因此换热能力得到增加。

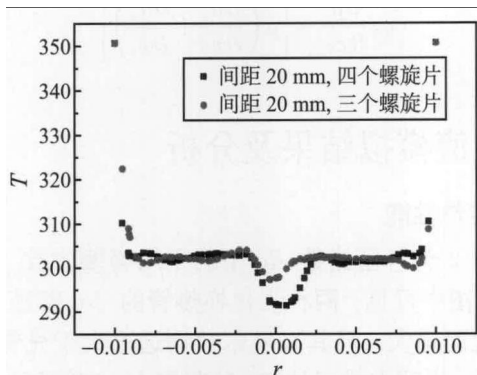


图 3 $Re = 900$ 时,在间隔区域的温度分布
Fig. 3 The temperature profiles in the space area

2.2 阻力系数

图 4 为各雷诺数 Re 下换热管的平均摩擦系数 f 的值。根据图中显示的结果得出,多个螺旋片的插入对阻力系数的影响很大,而且插入四个螺旋片的强化管的阻力系数要比插入三个螺旋片的强化管大。分析其中的原因,可能有两方面:1) 由于螺旋片和壁面接触,加强了流体和壁面的扰动,从而增加了近壁面处的温度梯度,形成了较大的剪切力,从而增加了阻力;2) 螺旋片的插入形成的旋流增加了流体的流动的路径,从而增加了流体的沿程阻力,而且插入的螺旋片数量越多,流体流动的路径越长,带来的阻力也就越大。

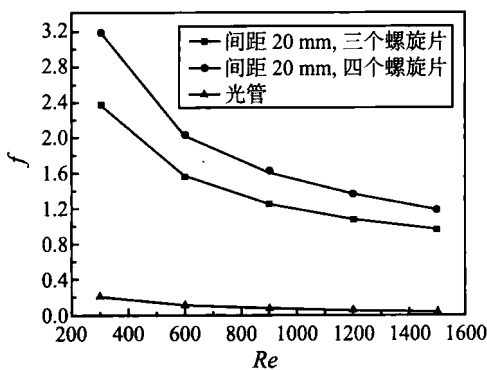


图 4 平均摩擦系数 f 随雷诺数 Re 的变化
Fig. 4 Variation of friction factor with Reynolds number for helical screw tapes

2.3 传热与阻力性能的评价准则 PEC 值

对换热管的传热与阻力性能的评价准则采用如下形式^[8]:

$$PEC = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (7)$$

其中, Nu 和 f 表示多孔强化管的传热与流动系数, Nu_0 和 f_0 表示光管的传热与流动系数。

图 5 为各雷诺数 Re 下强化换热管的 PEC 值。由图可见,在管内有间隔地插入多个螺旋片取得了较好的综合换热性能, PEC 值可达到 2.90~5.10, 这可能是因为多个螺旋片的插入导致了管内热边界层和速度边界层的分离,从而造成了在阻力增加不大的情况下较大程度地增强了换热性能的效果。另外,在 Re 小于 600 时,插入四个螺旋片的 PEC 值要比插入三个的螺旋片的 PEC 值要高,这可以归结为在流体流速较小时,四个螺旋片形成的旋流对换热的增强要大于其带来的阻力;但当 Re 大于 600 时,随着流体流速的增加,三个螺旋片和四个螺旋片取得的均温效果差别不大,但四个螺旋片带来了较大的阻力,这时有间隔地插入三个螺旋片可以取得较好的换热综合性能。

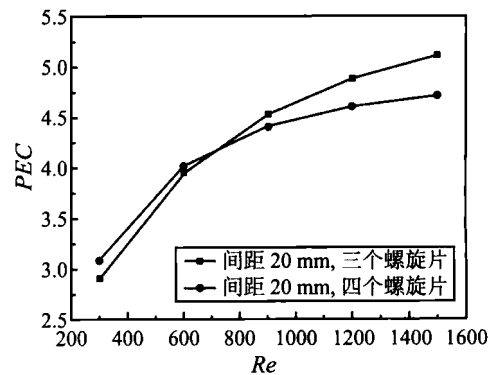


图 5 PEC 值随雷诺数 Re 的变化
Fig. 5 Variation of PEC with Reynolds number for helical screw tapes

3 场协同分析

通过对对流换热物理机制的研究,过增元将层流流场中某一流体质点 M 的速度 U 与温度梯度 ∇T 之间的协同角表达为:

$$\beta = \arccos \frac{U \cdot \nabla T}{|U| |\nabla T|} \quad (8)$$

刘伟^[9,10]等根据流体质点 M 的矢量关系,将速度 U 和压力梯度 ∇p 之间的协同角表达为:

$$\theta = \arccos \frac{U \cdot \nabla p}{|U| |\nabla p|} \quad (9)$$

图 6、图 7 为协同角 β 和 θ 随 Re 数的变化情况,结合前面的换热及流动阻力的曲线图, β 越小,说明管内速度场和温度场的协同性越好,使得管内核心区域的温度均匀性越好,管壁于流体换热的 Nu

数越大, 同图 2 中 Nu 数的变化一致; θ 越小, 质点速度 U 的方向和压力梯度 ∇p 的方向越一致, 流体的压降越小, 传热单元的功耗也越小, 同图 4 中的阻力变化情况相同。

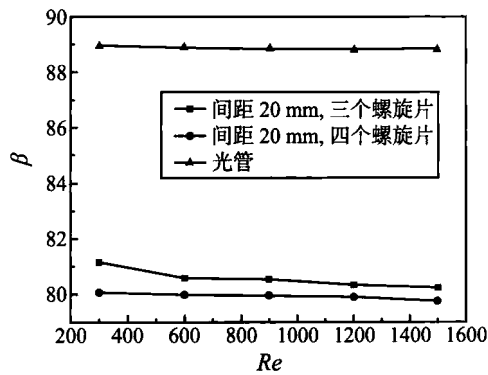


图 6 β 角随 Re 数的变化

Fig. 6 The variation of average synergy angle β with Re

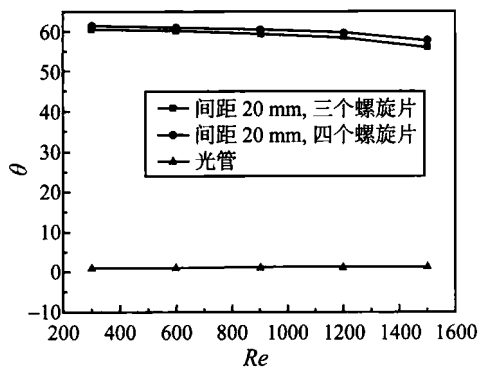


图 7 θ 角随 Re 数的变化

Fig. 7 The variation of average synergy angle θ with Re

4 结 论

在充分发展的层流区域中, 在管内有间隔地插入多个螺旋片可以造成圆管内速度边界层和温度边界层的分离, 从而使得在流动阻力增加不大的基础上, 大大增强了换热能力, 提高了换热管的传热与流动综合性能, 在 Re 为 300~1500 在范围内, 其 PEC

值达到 2.90~5.10。数值模拟结果验证了对流换热层流流场多场协同的关系式, 其中: 协同角越小 β , 对流换热系数 h 越大, 流体与壁面间的换热越强; 协同角越小 θ , 流体阻力系数 f 越小, 流体流动的压降越小。

参 考 文 献

- [1] Z Y Guo, H Y Zhu, X G Liang. Entransy—A Physical Quantity Describing Heat Transfer Ability [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2007, 50 (13/14): 2545–2556
- [2] Z Y Guo. New Physical Quantities in Heat [J]. J Eng Thermophys, 2008, 29(1): 112–114
- [3] J A Meng. Enhanced Heat Transfer Technology of Longitudinal Vortices Based on Field-Coordination Principle and its Application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2001
- [4] J A Meng, X G Liang, Z X Li. Field Synergy Optimization and Enhanced Heat Transfer by Multi-Longitudinal Vortexes Flow in Tube [J]. Int J Heat Mass Transfer, 2005, 48: 3331–3337
- [5] Z Y Guo, D Y Li, B X Wang. A Novel Concept for Convective Heat Transfer Enhancement [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1998, 41(14): 2221–2225
- [6] S. Eiamsa-ard P. Promvonge, Heat Transfer Characteristics in a Tube Fitted with Helical Screw-Tape With Without Core-Rod Inserts [J]. Int Commun Heat Mass Transfer, 2007, 34: 176–185
- [7] 张晓屿, 刘志春, 刘伟. 内置螺旋片的强化传热管的数值模拟研究 [J]. 工程热物理学报, 2011, 32(3): 448–450
X Y Zhang, Z C Liu, W Liu. Numerical Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of a Tube Fitted With Helical Screw-Tape Without Core-Rod Inserts [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(3): 448–450
- [8] R L Webb, Performance Evaluation Criteria for use of Enhanced Heat Transfer Surfaces in Heat Exchanger Design [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1981, 24: 715–726
- [9] W Liu, Z C Liu, Z Y Guo. Physical Quantity Synergy in Laminar Flow Field of Convective Heat Transfer and Analysis of Heat Transfer Enhancement [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(19): 3579–3586
- [10] W Liu, Z C Liu, T Z Ming, Z Y Guo. Physical Quantity Synergy in Laminar Flow Field and its Application in Heat Transfer Enhancement [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(19/20): 4669–4672