

# 内置螺旋片的强化传热管的数值模拟研究

张晓屹 刘志春 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 本文采用数值计算的方法, 以水为流动介质, 对内置螺旋片的强化传热管进行流动与传热特性的分析。结果表明, 在管内插入螺旋片可以有效提高换热与流动的综合性能, 雷诺数  $Re$  在 3000~12000 之间时, 其  $PEC$  值在 1.60~2.40 之间。

**关键词** 螺旋片; 数值模拟; 核心流; 强化传热

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)03-0448-03

## Numerical Studies on Heat Transfer and Friction Factor Characteristics of a Tube Fitted with Helical Screw-Tape Without Core-Rod Inserts

ZHANG Xiao-Yu LIU Zhi-Chun LIU Wei

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

**Abstract** In this paper, a three-dimensional turbulence analysis on heat transfer and fluid flow of a tube fitted with helical twisted tape without core-rod inserts is performed by numerical simulation. The simulation results show that the overall performance of the tube fitted with helical twisted tape has improved efficiently, and the  $PEC$  value of the helical twisted tape inserts of different width varies between 1.60 and 2.40 in the range of Reynold number 3000~12000.

**Key words** helical twisted tape; numerical simulation; core flow; heat transfer enhancement

### 0 引言

在管内插入扭带可以强化传热已经被很多学者所证实<sup>[1,2]</sup>, 其主要原因是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<sup>[3]</sup>。Eiamsa-ard 和 Promvong<sup>[4]</sup> 实验研究了在装有螺旋片的同心双管式换热器的强化传热问题中发现, 装有螺旋片的有实心轴的换热器的换热系数比空心轴的高约 10%, 但却大大增加了摩擦损失。

研究表明, 若在受限空间的核心区添加扰流物, 促使核心区的流体温度趋于均匀, 同时扰流物所占空间比较小, 不足以产生较大的阻力, 则可以实现传热强化的同时阻力增加不大, 从而提高换热设备的性能<sup>[5]</sup>。因此, 本文以水作为流动介质, 对插入有缠绕在空心轴上的螺旋片的强化传热管的传热与流动特性进行了数值模拟研究。

### 1 物理及数学模型

图 1 所示<sup>[6]</sup> 为插入有缠绕在空心轴上的螺旋

片的强化传热管的物理模型。水在管内壁流动, 管长  $L = 1500$  mm, 直径  $D = 25$  mm。螺旋片外径为  $d_2$ , 内径为  $d_1 = 5$  mm,  $d_2$  取四种 12.5 mm、17 mm、20 mm、25 mm, 因此螺旋片宽度  $W = d_2 - d_1 = 7.5$  mm、12 mm、15 mm、20 mm, 节距  $s = 18$  mm, 厚度  $t = 1$  mm。

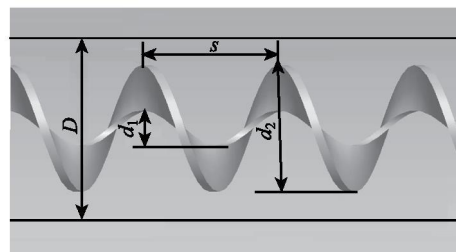


图 1 螺旋片的几何模型

Fig. 1 The model of helical screw-tape

水的入口温度为 353 K, 体积流量从 100 L/h 到 500 L/h, 步长为 25 L/h。圆管壁面采用定壁温的方式, 壁温为 298 K。为了简化计算, 对计算单元流道内流体的工况做如下假设: (1) 流体的热物性参数

收稿日期: 2011-01-11; 修订日期: 2011-02-17

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 (No.51036003; No.50721005) 资助项目

作者简介: 张晓屹 (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。

如  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $c_p$ ,  $k$  等均为定值; (2) 流动状态为稳态流动; (3) 流体为不可压缩流体, 各项同性, 且为连续介质; (4) 流体为牛顿流体; (5) 忽略重力的影响。

根据计算单元的物理模型, 单相不可压缩流体稳态流动的控制方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中,  $u_i (i, j = 1 \sim 3)$  为速度矢量沿  $x, y, z$  坐标方向的分量;  $p, T$  分别为流体压力、温度;  $\rho, \mu, c_p, k$  分别为流体密度、动力黏度、比定压热容、导热系数。对于湍流区, 采用标准  $RNG k-\varepsilon$  模型 [7]。

利用 SIMPLE 算法对以上方程组进行求解, 可以得到管内流体的速度分布和温度分布, 从而计算出对流换热系数  $Nu$  数和阻力系数。

## 2 数值模拟结果及分析

### 2.1 平均努塞尔数 $Nu$

图 2 为各雷诺数  $Re$  下的平均努塞尔数  $Nu$  的值。从图中可见, 四种换热管的  $Nu$  都随着  $Re$  的增大而增大, 说明在模拟的  $Re$  数范围内, 插入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, 由此造成边界层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。而且可以看出螺旋片宽度  $W$  越大, 换热越好, 这是因为螺

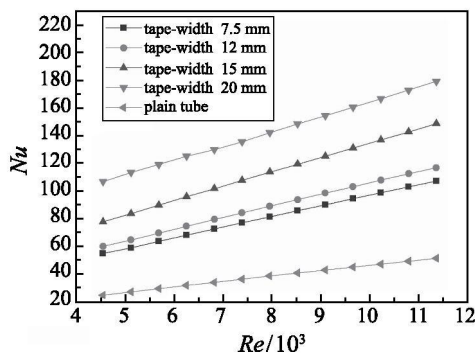


图 2 平均努塞尔数  $Nu$  随  $Re$  的变化

Fig. 2 Variation of Nusselt number with Reynolds number

旋片宽度越大, 而节距不变的话, 螺旋片的扭转比就越大, 此时由螺旋片引起的流体的扰动范围就越大, 而且螺旋片宽度越大, 其造成的核心流区域中温度均匀的区域也就越大, 导致边界层区域更高的温度梯度, 从而换热增强。

### 2.2 平均摩擦系数 $f$

图 3 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, 换热管中插入的螺旋片宽度  $W$  越大, 换热管的平均摩擦系数  $f$  越大, 尤其是当螺旋片厚度等于换热管直径时增加的倍数很大。分析其中的原因, 应该有两方面: (1) 把螺旋片的宽度减小, 管内流体扰动情况发生了变化, 从贴近壁面的扰动逐渐变化成了核心流扰动。流体在贴近壁面扰动时, 在近壁面处形成较大的速度梯度, 产生较大的剪切力, 从而造成较大的流动阻力。而在核心流区域扰动时, 这种近壁面处的速度梯度和剪切力大大降低, 从而有效地减少了流动阻力。(2) 螺旋片宽度减小, 其表面积也随之减小, 流体流经螺旋片时受到的摩擦力也减小, 从而导致流动阻力的减小。

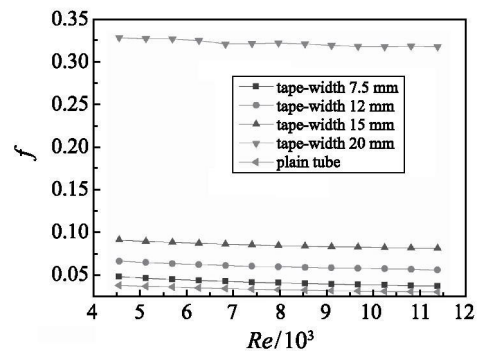


图 3 平均摩擦系数  $f$  随雷诺数  $Re$  的变化

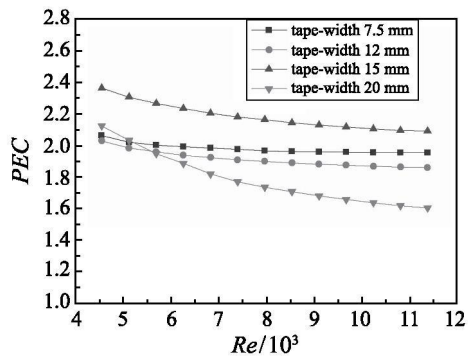
Fig. 3 Variation of friction factor with Reynolds number

### 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:

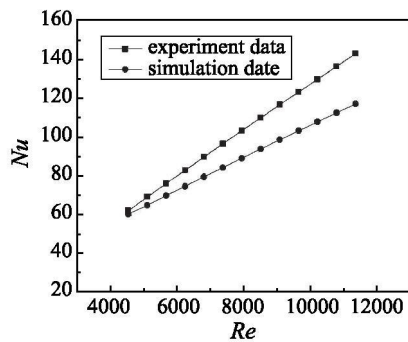
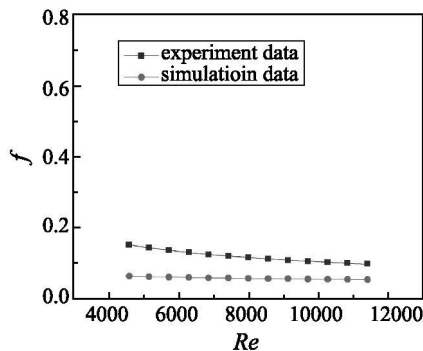
$$PEC = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (4)$$

图 4 为各雷诺数  $Re$  下换热管的  $PEC$  值。由图可见, 在雷诺数  $Re$  在 3000~12000 的范围内, 换热管的  $PEC$  值均随着  $Re$  的增大而降低, 但  $PEC$  值始终在 1.5 以上, 其中最大值达到了 2.60, 说明管内插入螺旋片可以取得很好的换热与流动综合性能的提升。特别是在螺旋片宽度  $W = 15$  mm 时, 对综合性能的提升尤为明显。

图4 PEC 值随雷诺数  $Re$  的变化Fig. 4 The  $PEC$  value versus Reynolds number

### 3 与实验数据的对比

S Eiamsa-ard 和 P Promvonge<sup>[6]</sup> 曾经做过内置螺旋片宽度为 12 mm 的强化传热管的实验工作, 模型和工作条件均与本文内置螺旋片宽度为 17 mm 的强化传热管的数据一致。如图 5~6 为模拟数据和实

图5 模拟值和实验值的  $Nu$  对比Fig. 5  $Nu$  comparison between experimental and simulated data图6 模拟值和实验值的  $f$  对比Fig. 6  $f$  comparison between experimental and simulated data

验数据的对比, 从图中可以看出模拟数据和实验数据还是比较符合的,  $Nu$  数和摩擦系数  $f$  的误差分别为 18.2% 和 43.7%, 这主要是因为: (1) 实验过程中螺旋片实际还有导热作用, 而数值模拟中只考虑了螺旋片的扰流作用; (2) 实验过程中可能有进口、气泡等因素引起阻力问题, 而数值模拟中忽略了这些因素; (3) 实验过程中流体的物性参数是在变化的, 而数值模拟中设定的是定物性参数。

### 4 结 论

随着  $Re$  数的增加, 螺旋片的扰流作用更加强烈, 近壁面处的温度梯度和速度梯度均增大, 因而换热系数和流动阻力均逐渐增加。当螺旋片宽度为 20 mm 时, 由于螺旋片导致换热管内的流体在核心流区域内扰动, 能够有效降低流体的阻力, 并能够提升换热管的换热综合性能。

### 参 考 文 献

- [1] R M Manglik, A E Bergles. Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Twisted Tape Inserts in Isothermal Tubes: Part I—Laminar Flows [J]. ASME J. Heat Transfer, 1993, 115: 881–889
- [2] R M Manglik, A E Bergles. Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Twisted Tape Inserts in Isothermal Tubes: Part II—Transition and Turbulent Flows [J]. ASME J. Heat Transfer, 1993, 115: 890–896
- [3] 崔海亭, 彭培英. 强化传热新技术及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006  
CUI Haiting, PENG Peiyong. Technology and Application of Heat Transfer Enhancement [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006
- [4] S Eiamsa-ard, P Promvonge. Enhancement of Heat Transfer in a Tube with Regularly-Spaced Helical Tape Swirl Generators [J]. Solar Energy, 2005, 78: 483–494
- [5] 郭剑, 杨昆, 刘伟. 圆管插入十字形扭带强化传热数值模拟 [J]. 工程热物理论, 2009, 30(7): 1216–1218  
GUO Jian, YANG Kun, LIU Wei. Numerical Simulation of Heat Transfer Enhancement by Adding Cross Twisted-Tape in The Circular Tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7): 1216–1218
- [6] S Eiamsa-ard, P Promvonge. Heat Transfer Characteristics in a Tube Fitted with Helical Screw-Tape with without Core-Rod Inserts [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2007, 34: 176–185
- [7] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001  
TAO Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. The Second Edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001