

圆管内插入螺旋片强化传热数值模拟及焨耗散分析

郑年本 刘志春 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要 本文对圆管内插入不同中空比 ($d^* = d_1/D$) 空心轴螺旋片的湍流传热过程进行了数值模拟研究, 结果显示内插空心轴螺旋片圆管内的传热性能明显得到提升, 平均努谢尔特数相比光滑圆管提高了 105%~385%; 并从(焨)耗散与传热效率的角度定量分析了内插螺旋片强化传热机理, 结果发现内插螺旋片管内传热效率在 91.3%~92.3%之间, 均高于光管。

关键词 螺旋片; 数值模拟; 强化传热; (焨)耗散; 传热效率

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2016)01-0155-05

Numerical Studies on Heat Transfer Enhancement in a Circular Tube Fitted With Helical Screw Tape and Entransy Dissipation Analysis

ZHENG Nian-Ben LIU Zhi-Chun LIU Wei

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

Abstract In this paper, an investigation of turbulent heat transfer in a circular tube fitted with helical screw tape of different clearance ratios ($d^* = d_1/D$) has been conducted by numerical simulation. The simulation results show that the thermal performance of the tube with helical screw tape has been improved significantly, and the average Nusselt number has increased by 105%~385% compared to the smooth tube. In addition, the mechanism of heat transfer enhancement of the helical screw tape has been analyzed quantitatively based on entransy dissipation and thermal efficiency. The result reveals that the thermal efficiency of the tube fitted helical screw tape is in the range of 91.3%~92.3%, which is higher than that of the smooth tube.

Key words helical screw tape; numerical simulation; heat transfer enhancement; entransy dissipation; thermal efficiency

0 前言

换热器作为一种热质交换设备在工业中有着普遍的应用, 换热器中核心的部件是各种换热管, 工业中往往需要应用一定的管内强化传热技术对这些换热管进行传热强化, 以达到减小换热器尺寸, 减少金属耗材进而降低成本的目的。刘伟等^[1]提出了将管内对流强化传热技术分为两类, 分别是基于表面的强化传热技术和基于流体的强化传热技术。基于流体的强化传热技术主要是通过通过对管壁处流体进行扰动, 破坏边界层的形成实现强化传热, 包括各种异型管结构; 基于流体的强化传热技术则是通过对流体核心区的扰动, 使流体核心区域温度尽量均匀, 在边界处形成等效热边界层来实现强化传热, 包括各种插入物结构。

螺旋扭带这种比较传统的插入物已经被许多学者^[2,3]证实可以用来实现管内传热强化。作为一种改进的螺旋扭带, 螺旋片像传统扭带一样可以使管内形成纵向旋流, 但是又有所不同。螺旋扭带形成的是两股被扭带分隔开的平行旋流, 而螺旋片形成的则是单股旋流^[4], 因此两者强化传热机理还不完全相同。本文将水为工质, 采用数值计算方法对管内插入螺旋片换热过程进行模拟, 并应用(焨)耗散理论对螺旋片强化传热机理进行分析。

1 物理及数学模型

图 1 为圆管内插入空心轴螺旋片的几何模型。

收稿日期: 2015-02-07; 修订日期: 2015-12-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (No.2013CB228302); 国家自然科学基金资助项目 (No.51376069)

作者简介: 郑年本 (1990-), 男, 湖北嘉鱼人, 博士研究生, 主要从事强化传热理论与实验研究。通信作者: 刘伟, 教授, 博士生导师, w.liu@hust.edu.cn

螺旋片与管壁面之间区域为流体域,水在其中流动。圆管的直径 $D = 25 \text{ mm}$, 长度 $L = 500 \text{ mm}$ 。螺旋片的宽度 $W = 12 \text{ mm}$, 内径 d_1 分别取为 5 mm 、 8 mm 、 11 mm , 定义无量纲中空比 $d^* = d_1/D$, 对应的中空比依次为 0.20 、 0.32 、 0.44 , 因此外径 $d_2 = d_1 + W = 17 \text{ mm}$ 、 20 mm 、 23 mm , 厚度 $t = 1 \text{ mm}$, 节距 $S = 30 \text{ mm}$ 。

进口采用速度进口, 进口温度为 298 K , 管壁面采用定壁温边界条件, 壁温为 330 K , 出口为自由出流。雷诺数取为进口的雷诺数, 为简化计算做出以下假设: 1) 工质水为牛顿流体, 各向同性, 热物性参数为常数; 2) 忽略螺旋片的导热; 3) 忽略重力、气泡等影响。

整个计算域内为稳定湍流, 湍流模型采用文献 [5] 中推荐的时均化的 SST $k-\omega$ 模型, 控制方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \\ -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{T}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i \bar{T}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

湍动能方程:

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho k)}{Dt} = \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

耗散率方程:

$$\begin{aligned} \frac{D(\rho \omega)}{Dt} = \frac{\gamma}{\nu_t} \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ 2\rho(1 - F_1) \sigma_\omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, 运动黏性系数为:

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S F_2)} \quad (6)$$

剪切力为:

$$\bar{\tau}_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (7)$$

其中, δ_{ij} 为克罗内克符号。应变率张量为

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

其他关系如下:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_\omega^2 k}{C D_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (9)$$

其中,

$$C D_\omega = \max \left(2 \rho \sigma_\omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right) \quad (10)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2 \sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (11)$$

SST $k-\omega$ 中其他常量如下:

$$\begin{aligned} \beta_1 = \frac{3}{40}, \beta_2 = 0.0828, \beta^* = \frac{9}{100}, \\ \sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{k2} = 1, \sigma_{\omega 1} = 0.5, \\ \sigma_{\omega 2} = 0.856, \gamma_1 = 0.5532, \gamma_2 = 0.4404 \end{aligned}$$

压力项采用标准离散格式, 其他项采用二阶迎风格式, 速度压力耦合采用“SIMPLC”算法, 当能量残差达到 10^{-6} , 其他项残差达到 10^{-5} 时认为计算收敛。

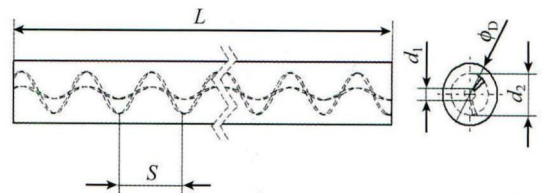


图 1 圆管内插螺旋片几何模型

Fig. 1 Schematic diagram of a tube fitted with helical screw tape

2 计算域选择与计算方法验证

为了消除入口效应的影响, 对管内的局部努塞尔数 Nu_{local} 进行了分析, 局部努塞尔数定义如下:

$$Nu_{local} = \frac{q_{local}}{T_w - T_f} \cdot \frac{D}{\lambda} \quad (12)$$

其中, q_{local} 为轴向截面的周向平均热流密度, T_w 为壁温, T_f 为轴向截面流体平均温度, λ 为流体导热系数。

图 2 为管内局部努塞尔数 Nu_{local} 沿轴向分布, 从图中可以发现, 局部努塞尔数 Nu_{local} 在 $z = 200$ mm 之前变化幅度由十分明显到逐步趋于平缓, 到了 $z = 200$ mm 至 $z = 400$ mm 之间 Nu_{local} 基本保持不变, 可以认为此区间内传热已经达到充分发展, 因此选择此区间为本文的计算域。

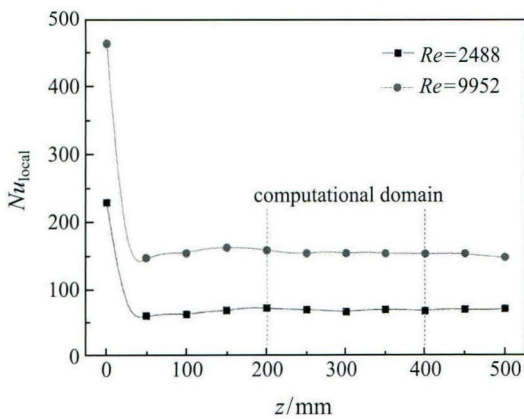


图 2 管内局部努塞尔数 Nu_{local} 沿轴向分布

Fig. 2 Local Nusselt number distribution along axis direction

为了验证本文所采用计算方法的正确性, 采用相同的算法对光滑圆管内传热进行了模拟计算, 计算结果与经验公式^[6]的对比如图 3 所示, 在计算雷诺数范围了计算值与经验值误差均在 5% 之内, 由此说明本文所采用的数值计算方法具有合理精度。

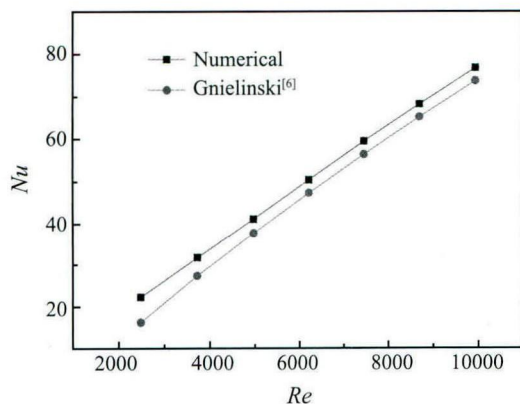


图 3 光滑圆管内平均努塞尔数计算值与经验值对比

Fig. 3 Verification results for the average Nusselt number for a smooth tube

3 数值计算结果与分析

3.1 传热性能

图 4 为内插螺旋片的圆管内不同雷诺数下平均

努塞尔数的值, 从图中可得, 相比于光滑圆管, 插入螺旋片后管内的平均努塞尔数提高了 105%~385%, 说明管内插入螺旋片可以实现传热强化, 此外管内传热性能随着螺旋片中空的增加而提升。为了更好地解释螺旋片强化传热的原因, 下文将从管内流线、截面湍流强度、截面温度场三个方面进行分析。

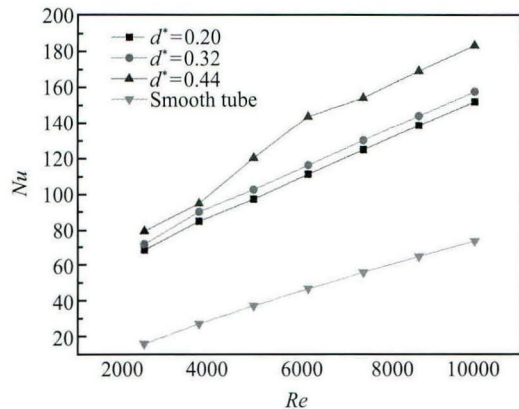


图 4 管内平均努塞尔数随雷诺数变化

Fig. 4 Variations of Nusselt number with Reynolds number

图 5 为光滑圆管与内插螺旋片圆管内的流线分布。从图中可以看到, 管内插入螺旋片后, 在螺旋片的作用下管内形成了纵向旋流。相比于光管内流动, 纵向旋流可以更好地冲刷壁面, 导致壁面处的边界层厚度减薄, 从而更有利于壁面向流体传热。

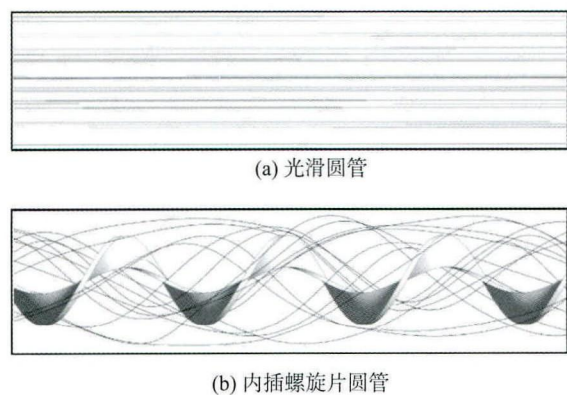


图 5 管内流线分布

Fig. 5 Streamline distribution in the tube
(a) Smooth tube; (b) Tube with helical screw tape

图 6 描述了光管与不同中空比的强化管在截面 $z = 300$ mm 处的湍流强度分布。从图 6 中可知, 内插螺旋片管内的湍流强度均要高于光管, 并且随着中空比的增加, 管内的湍流强度越大, 即螺旋片对管内流动的扰动越大。

综上所述, 内插螺旋片强化传热的原因是, 内

插螺旋片形成的纵向旋流可以更好的冲刷壁面，对管内扰动增强，因此流体能从壁面处获得更多的热量并且掺混得更加均匀，最终表现为流体平均温度升高。

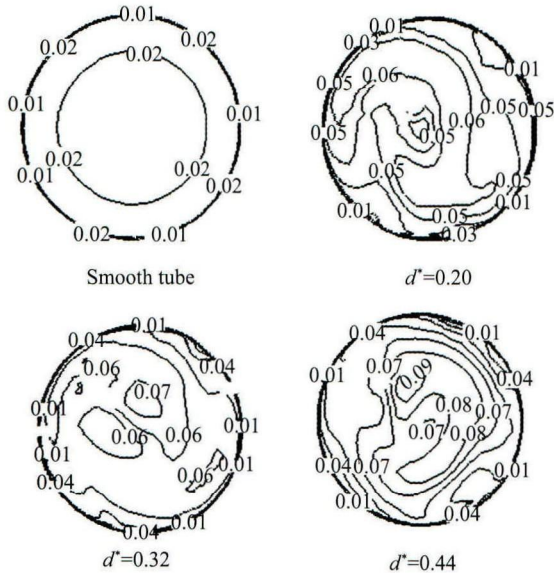


图 6 截面 $z = 300$ mm 处湍流强度等值面图
Fig. 6 Iso-surface of turbulence intensity at $z = 300$ mm

3.2 焓耗散分析

过增元等 [7] 提出了表征物体传热能力的新物理量焓以及焓耗散的概念。焓的提出让定义一个传热过程的效率成为了可能。焓耗散是传热过程不可逆性的体现，过增元 [7] 等人从传热优化的角度建立了基于焓耗散的极值原理。

图 7 为定壁温边界条件下管内传热过程原理图。流体进口温度为 T_{in} ，出口温度为 T_{out} ，质量流率为 m ，比热容为定值 c_v ，壁面温度为 T_w 。在壁面加热下，流体内能增加，温度升高，流体的焓(传热能力)增加。整个传热过程的焓平衡方程如下：

$$QT_w - E_{diss} = \frac{1}{2}c_v m T_{out}^2 - \frac{1}{2}c_v m T_{in}^2 \quad (13)$$

其中， Q 为壁面向流体传递的热量，表达式为：

$$Q = c_v m T_{out} - c_v m T_{in} \quad (14)$$

将式 (14) 带入式 (13) 可以得到焓耗散表达式：

$$E_{diss} = \frac{1}{2}c_v m (T_{out} - T_{in})(2T_w - T_{in} - T_{out}) \quad (15)$$

整个传热过程的效率：

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{E_{in} - E_{diss}}{E_{in}} = \frac{QT_w - E_{diss}}{QT_w} \quad (16)$$

将式 (14)、(15) 带入式 (16) 化简得到：

$$\eta = \frac{(T_{out} + T_{in})}{2T_w} \quad (17)$$

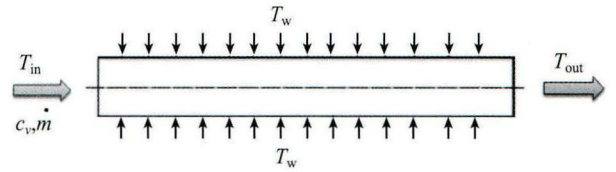


图 7 定壁温边界条件下管内传热过程
Fig. 7 The process of heat transfer under the fix temperature condition

图 8 为管内传热过程总焓耗散随雷诺数的变化。从图中可以看到，内插螺旋片管内的焓耗散要远高于光管内的焓耗散，而且在相同雷诺数下，内插螺旋片的管内的焓耗散随着中空比的增加而增加。本文中换热性能与耗散的这种密切关系与过增元等 [7] 提出的定壁温条件下的焓耗散极值原理符合得很好，即给定壁面温度边界条件最优的传热过程具有最大的焓耗散，可以认为本文数值模拟的结果是对焓耗散极值原理的验证。

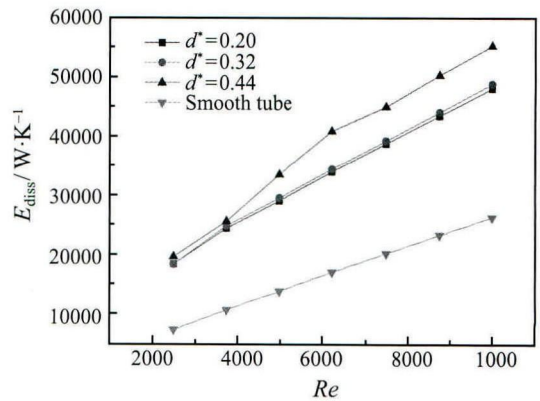


图 8 管内传热过程的焓耗散随雷诺数变化
Fig. 8 Variations of entransy dissipation with Reynolds number

焓与焓耗散概念的提出让定义传热过程的效率成为可能，可以更好地描述与优化传热过程。图 9 给出了管内传热过程的效率对比。从图中可以看到，内插螺旋片的管内传热效率在 91.3%~92.3%之间，均要高于光管内的传热效率。传热效率的提升是内插螺旋片可以实现管内强化传热的根本原因。此外，内插螺旋片管内的传热效率随着中空比的增加而增加，这很好的解释了内插螺旋片管内的传热性能随着中空比增加而提升的原因。

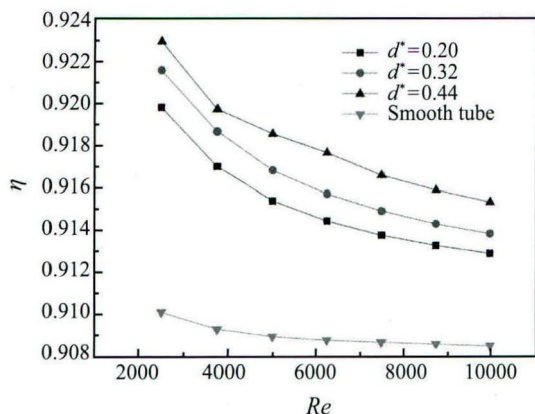


图9 管内传热过程效率对比

Fig. 9 Variations of thermal efficiency with Reynolds number

4 结 论

本文对管内插入不同中空比的空心轴螺旋片的传热性能进行了数值模拟研究。结果表明, 内插螺旋片可以实现强化传热, 管内平均努塞尔数相比光管提高了 105%~385%, 并且中空比越大, 内插螺旋片管内传热性越强。这主要是由于, 中空比越大, 螺旋片越靠近壁面, 对壁面处的扰动越强, 整个管内流体相互掺混得更加均匀, 平均温度更高。

此外, 对管内传热过程的焓耗散以及传热效率进行了分析计算, 内插螺旋片能实现强化传热的根本原因是提高了管内的传热效率, 内插螺旋片的管内传热效率在 91.3%~92.3%之间, 均要高于光管内的传热效率, 而且中空比越大, 管内传热效率越高。传热效率是传热性能最直接的指标, 采用强化传热

技术实现强化传热的原因都可以归结为传热效率的提高。

参 考 文 献

- [1] LIU W, LIU Z, WANG Y, et al. Flow Mechanism and Heat Transfer Enhancement in Longitudinal-Flow Tube Bundle of Shell-and-Tube Heat Exchanger [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(10): 2952-2959
- [2] MANGLIK R M, BERGLES A E. Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Twisted-Tape Inserts in Isothermal Tubes: Part I—Laminar Flows [J]. Journal of Heat Transfer, 1993, 115(4): 881-889
- [3] MANGLIK R M, BERGLES A E. Heat Transfer and Pressure Drop Correlations for Twisted-Tape Inserts in Isothermal Tubes: Part II—Transition and Turbulent Flows [J]. Journal of Heat Transfer, 1993, 115(4): 890-896
- [4] EIAMSA-ARD S, PROMVONGE P. Heat Transfer Characteristics in a Tube Fitted with Helical Screw-Tape With/Without Core-Rod Inserts [J]. International Communication of Heat and Mass Transfer, 2007, 34(2): 176-185
- [5] MENTER F R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications [J]. AIAA journal, 1994, 32(8): 1598-1605
- [6] GNIELINSKI V. New Equations for Heat and Mass Transfer in the Turbulent Flow in Pipes and Channels [J]. International Journal of Chemical Engineering, 1976, 16(2): 359-368
- [7] GUO Z-Y, ZHU H-Y, LIANG X-G. Entransy—a Physical Quantity Describing Heat Transfer Ability [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(13): 2545-2556