

文章编号:1671-6833(2011)06-0005-04

螺旋槽管管内强化传热的三维数值模拟

靳遵龙, 李 赵, 董其伍, 刘敏珊

(郑州大学 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450002)

摘 要: 基于周期段模型, 对不同结构参数的螺旋槽管管内流动和换热进行了三维数值模拟, 得到了管内流体湍流流动的速度场和温度场的细观分布. 结果表明, 随着槽深增大, 螺旋槽管换热性能增强的同时阻力系数也相应增大; 随着螺距增大, 其换热性能减弱且阻力系数明显减小. 最后, 结合模拟结果数据, 拟合出了努赛尔数 Nu 和阻力系数 f 的相应关联式.

关键词: 螺旋槽管; 周期段; 数值模拟; 阻力性能; 强化传热

中图分类号: TK172 **文献标志码:** A

0 引言

改变换热管形状和结构参数来强化其换热性能的研究一直受到很多学者的关注^[1]. 在用于管内传热强化的诸多异形管中, 螺旋槽管具有制造简单, 传热及机械性能好等优点. 螺旋槽管管壁上的螺旋型凹槽对管内外流体同时起作用, 从而起到双边强化作用, 对有相变和无相变的传热都能显著提高传热效果^[2-3]. 近年来一些学者对螺旋槽管进行了实验研究^[4], 但由于不同学者所采用的实验方法不同, 所得到的实验关联式相差很大, 而且不能对螺旋槽管管内流体的真实流动和换热状态进行详尽的表述.

为此, 笔者采用 Fluent 三维数值模拟方法, 对具有不同结构尺寸参数的 25 根螺旋型槽管进行温度场和速度场的模拟. 在模拟结果的基础上, 分析槽深和螺距对螺旋槽管换热性能和阻力性能的影响, 并拟合出相应的关联式.

1 边界条件和数值计算模型

1.1 边界条件

设 L 为周期性长度矢量, 对进出口采用有压降的周期性边界条件

$$U(x, y, z) = U(x, y, z + L) = U(x, y, z + 2L) = \dots \quad (1)$$

$$\Delta p = p(x, y, z) - p(x, y, z + L) = p(x, y, z + L) - p(x, y, z + 2L) = \dots$$

$$-p(x, y, z + 2L) = \dots \quad (2)$$

式中: U 为速度矢量; p 为压力; Δp 为压降.

管内流体为水, 常物性下物性参数如下. 导热系数: $0.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; 比热: $4182 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 密度: $998.2 \text{ kg}/\text{m}^3$; 动力黏度: $1.003 \mu\text{Pa} \cdot \text{s}$. 壁面: 采用恒温壁面, 壁面温度恒定 $T_w = 400 \text{ K}$. 进口: 管内水进口温度 $T = 300 \text{ K}$. 给定 5 个水平的管内水流速: $0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 \text{ m/s}$.

定义无因次温度:

$$\Theta = \frac{T - T_w}{T_s - T_w} \quad (3)$$

式中: T, T_s, T_w 分别是管内流体进口温度, 管内流体平均温度和壁温.

因为流场具有周期性, 采用恒壁温的壁面边界条件, 则努赛尔数在每个周期内相等^[5-6].

1.2 几何和数值模型

采用不同结构尺寸的螺旋槽管, 其规格为 $\Phi 25 \times 2$ 的钢管, 对螺距选用 $10, 15, 20, 25, 30 \text{ mm}$ 5 个水平; 同时对槽深选用 $0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 \text{ mm}$ 5 个水平.

螺旋槽管管内流动是具有周期通道的周期性复杂流动, 当管内流体流动充分发展时, 可截取 1 或 2 个周期来研究整根螺旋槽管的管内流动和换热. 因为考虑到管内流动的充分发展, 笔者选取 1 个周期进行 Fluent 模拟. 利用 Gambit 软件建立数值模型, 采用非结构的四面体网格进行网格的划

收稿日期: 2011-05-20; 修订日期: 2011-09-20

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20100471002)

作者简介: 靳遵龙(1973-), 男, 河南淮阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事过程系统能量综合优化、换热设备流体流动及传热强化研究, E-mail: zljn@zzu.edu.cn.

分,网格数大约在8~12万之间,其相对误差为3%以下,认为具有网格的独立性.

1.3 数值计算方法

在常物性下管内流体水为不可压缩的牛顿型流体,假设宏观能量守恒,则管内流体的流动和传热满足连续性方程、动量方程以及能量方程.求解过程采用分离变量法的隐式求解,湍流模型采用标准 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型,并对动量方程和能量方程采用二阶迎风离散求解,压力和速度耦合采用经典的SIMPLE算法^[6].定义残差的收敛条件为:质量计算绝对值小于 10^{-6} ,能量计算绝对值小于 10^{-6} .

2 模拟结果及数据分析

2.1 管内温度、速度分布规律

20#管, $Re = 34\ 833$ 时横截面和纵剖面的温度云图如图1和图2所示.

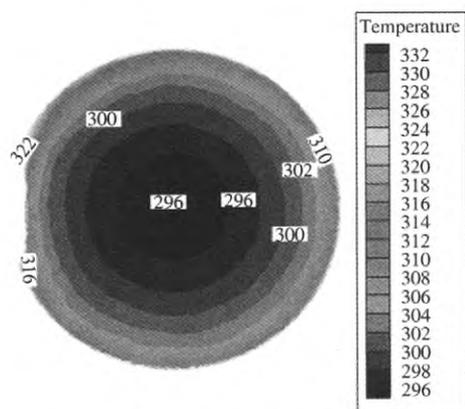


图1 横截面内温度分布

Fig. 1 The temperature distributions in cross section

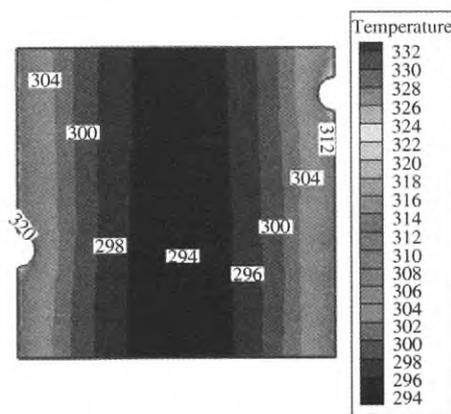


图2 纵剖面内温度分布

Fig. 2 The temperature distributions in longitudinal profile

从图1和图2中可以清楚地看到,在管内湍流充分发展时,湍流核心区域温度分布等值

线与光管温度分布等值线一致.近壁面处温度边界层的温度分布呈离沟槽越近,温度分布等值线越密集,温度梯度越大.壁面温度梯度越大,努塞尔数 Nu 越大.根据流体流动的边界层理论,当流体与流过的壁面相接触时,会有一个较薄的边界层在与壁面相接触的地方形成,这个较薄的边界层可分为:紊流层、过渡层和层流底层.紊流层中,流体由于剧烈混合充满了旋涡,温度梯度极小;过渡层中,对流换热和热传导同时起作用;而层流底层中,靠近壁面流体几乎不动,流体流速为零,主要依靠导热进行热量的传递,这样湍流核心区的传热效率比层流底层中的高很多.流体流经螺旋槽管内时,螺旋槽对靠近壁面处流体的流动具有限制作用,使流体做整体的管内螺旋运动从而有局部二次流的产生,同时螺旋槽会形成形体阻力,产生可使边界层分离的逆向压力梯度,边界层产生分离以及壁面和流体的再次接触使得对流换热得到强化.因此,螺旋型槽管的沟槽起到了强化传热的作用.

20#管, $Re = 34\ 833$ 时横截面和纵剖面的速度矢量分布如图3和图4所示.

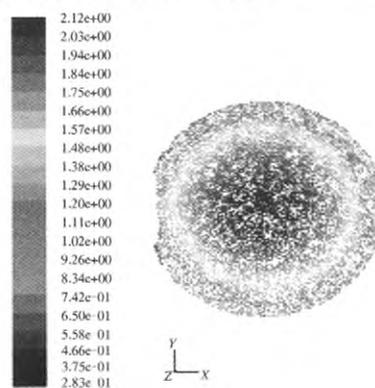


图3 横截面内速度矢量分布

Fig. 3 The velocity vector in cross section

通过图3和图4,可以看到,在螺旋槽管中当流动充分发展时,湍流中心部分区域速度分布趋于平坦的状态,几乎没有流体发生旋转,在管中心轴线附近速度达到最大,与光管相似.但由于螺旋槽管内壁面存在螺旋型凸肋,管内壁面和流通面积不断变化,使远离中心区域的部分流体发生螺旋形扰动,在近壁面处速度梯度很大.同时受螺旋槽的导向作用,管内流体的径向速度很大,从而加剧了边界层的扰动,削弱了边界层,且在沟槽位置附近出现回流和漩涡.这种漩涡改变了管内流体的流场分布,增强了靠近壁面流体的湍动程度,从而提高了对流换热系数.

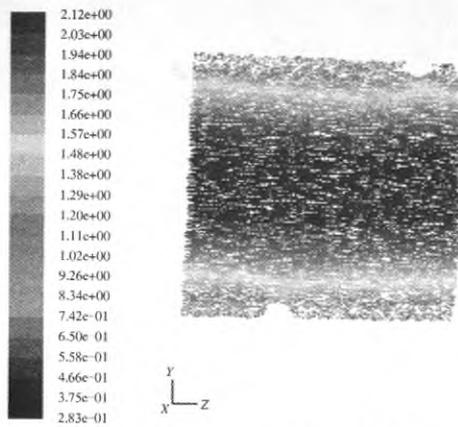


图 4 纵剖面内速度矢量分布

Fig. 4 The velocity vector in longitudinal profile

2.2 槽深和螺距对换热性能和阻力性能的影响

当雷诺数 $Re = 24\ 880$ 时, 分别计算 25 根螺旋槽管的努塞尔数和阻力系数. 可以分别得到槽深与努塞尔数和阻力系数的关系, 如图 5 和图 6 所示.

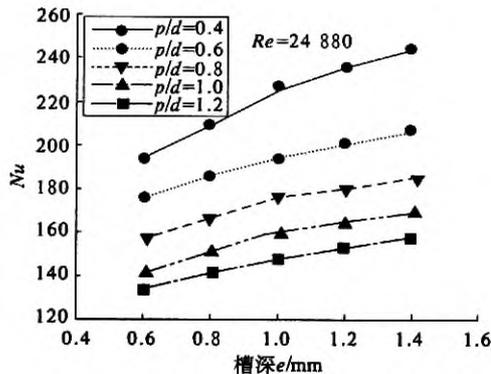


图 5 努塞尔数 Nu 与槽深 e 的关系

Fig. 5 Relation of Nu and fluted depth

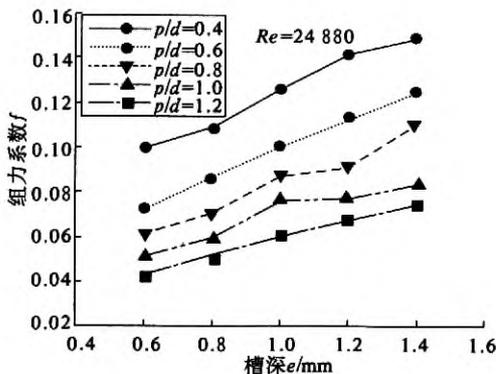


图 6 阻力系数 f 与槽深 e 的关系

Fig. 6 Relation of resistance and fluted depth

在图 5 中可以看到, 在同一槽深时, 随着螺距增加, 努塞尔数降低; 在同一螺距时, 槽深越大, 换热性能越好. 这是因为螺旋槽的存在, 使每个螺距

间流体的边界层不能稳定充分的发展, 从而可以强化流体和壁面间的换热. 此外, 在流体流过螺旋型凸肋时会产生部分流动脱离区, 产生不同强度和大小的小涡, 正是由于这种小涡改变了管内流体的流场分布, 增强了靠近壁面流体的湍动程度, 从而提高了对流换热系数. 当螺距增加时, 槽管内相邻两螺旋槽之间的区域增大, 前一螺旋槽的扰动作用已经减弱, 后一螺旋槽的扰动作用还没开始, 这样随着螺距的增加, 螺旋槽对对流强化的程度逐渐减弱. 而随着槽深的增加, 螺旋槽的扰动作用增加, 产生强度和体积更大的小涡改变了管内流体的流场分布, 增强了靠近壁面流体的湍动程度, 边界层的扰动和削弱得到强化, 从而提高了换热性能.

从图 6 可以看到, 在同一槽深时, 随着螺距增加, 阻力系数减小; 同一螺距时, 槽深越大, 阻力系数越大. 这是因为, 在流过螺旋型凸肋时, 会在两肋之间产生一个大的小涡以及两个小角区小涡, 大涡是一个三元结构, 它不停抛出流体和从主流体中补充流体的循环性的运动, 构成了凸起附近流体和主流体之间的能量和质量交换, 而且在大涡的上界面会出现湍流切应力和速度梯度的最大值. 当螺距增加时, 相邻螺旋槽间的区域增大, 螺旋槽对近壁面流体的扰动作用减弱, 从而减小了阻力系数; 而当槽深增加时, 沟槽不仅增加了流体的扰动, 而且会在沟槽附近出现回流甚至小涡, 使流体能量出现损失, 增大了阻力系数.

2.3 关联式的拟合

将相关结构参数和模拟结果所得到的努塞尔数 Nu 和压降 Δp 带入 Origin 软件, 利用 Origin 软件的线性回归拟合, 得到相应的线性关联式, 从而进一步得到努塞尔数 Nu 和阻力系数 f 的计算关联式:

$$Nu = 0.065\ 54 Re^{0.754\ 35} \left(\frac{p}{d}\right)^{-0.391\ 99} \left(\frac{e}{d}\right)^{0.192\ 79} Pr^{0.4} \quad (4)$$

式中: p, d, e 分别是螺旋槽管的螺距、当量直径和槽深; Pr 是普朗特数.

$$f = 2.077\ 4 Re^{-0.133\ 3} \left(\frac{p}{d}\right)^{-0.738\ 44} \left(\frac{e}{d}\right)^{0.640\ 45} \quad (5)$$

式中: p, d, e 分别是螺旋槽管的螺距, 当量直径和槽深.

3 结论

(1) 笔者通过 Fluent 软件对螺旋槽管温度场

和速度场进行了三维数值模拟,比较准确地展现了螺旋槽管管内流体的温度场和速度场的变化,以及流体的细观流动和换热状态.

(2)通过对一组不同结构尺寸螺旋槽管模拟结果分析,拟合出了相应努塞尔数 Nu 和阻力系数 f 的关联式,为以后螺旋槽管换热性能的研究提供了一定的参考.

(3)通过对槽深、螺距与换热性能和阻力系数关系分析,可以得出,选择合适的槽深和螺距组合,可以获得较好的换热性能和较低的阻力系数.

参考文献:

- [1] BRUCE T, ROBERT S, UMESH R. Designing and rating process heat exchangers[J]. *Chemical Processing*, 1998, 61(4): 65-76.
- [2] 钱颂文,朱冬生,李庆领.管式换热器强化传热技术[M].北京:化学工业出版社,2003:8-10.
- [3] 周强泰,赵伶玲,王泽宁.螺旋槽管强化传热研究及其在锅炉中的应用[J].*东南大学学报:自然科学版*,2005,35(01):2-3.
- [4] 王丽芝.螺旋槽管强化传热研究与应用[D].山东:山东大学能源与动力工程学院,2005:4-6.
- [5] 陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版社,2006:488-490.
- [6] 王丹,董其伍,刘敏珊.管壳式换热器模块综合模拟方法研究[J].*郑州大学学报:工学版*,2010,31(3):20-24.

Numerical Simulation on Enhancing Heat Transfer in Spirally Fluted Tubes

JIN Zun-long, LI Zhao, DONG Qi-wu, LIU Min-shan

(Key Laboratory of Process Heat Transfer and Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Based on the periodical section models, the three-dimensional numerical simulation on inside flow and heat transfer of different structural parameters of the spiral groove tube were investigated and we obtain micro-distribution of the flow velocity field and temperature field in the state of turbulence. The simulation results show that with the increase of groove depth, both the heat transfer performance and resistance coefficient increase and with the increase of thread pitch, both the heat transfer performance and resistance coefficient decrease. Finally, the correlation of resistance coefficient and Nusselt are presented from the simulation data.

Key words: spirally fluted tube; periodical section; numerical simulation; resistance performance; heat transfer enhancement