

圆管插入十字形扭带强化传热数值模拟

郭 剑 杨 昆 刘 伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要 对圆管内添加两种宽度的十字形扭带的强化传热进行了数值模拟, 对传热与阻力特性和 PEC 值进行了比较分析, 模拟结果表明: 通过减小十字形扭带的宽度使换热管内流体核心区域扰动, 在紊流区域能在换热强化减小不大的情况下有效减小流体阻力, 从而能提高换热管的性能。

关键词 十字形扭带; 核心流; 强化传热; 流动阻力; PEC

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2009)07-1216-03

NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER ENHANCEMENT BY ADDING CROSS TWISTED-TAPE IN THE CIRCULAR TUBE

GUO Jian YANG Kun LIU Wei

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

Abstract Numerical simulation of heat transfer enhancement by adding cross twisted-tapes of two different widths in the circular tubes was performed. The character of heat transfer and flow resistant as well as the PEC value were analyzed with comparison. The results showed that the flow resistant was reduced considerably with slight reduction of the heat transfer in the turbulent flow when the cross twisted-tape width was reduced, accordingly, the thermal performance factor was augmented.

Key words cross twisted-tape; core flow; heat transfer enhancement; flow resistant; PEC

0 引 言

管内插入扰流元件是目前较为常用的强化传热方法, 扰流元件的种类很多, 扭带是其中一种结构简单并且实用的管内漩流装置。扭带强化传热的主要机理是管内流体产生旋转并引起二次流, 产生不断的旋涡, 使主体流体和壁面边界层流体充分混合, 减薄边界层, 以强化传热。此外, 扭带还能分割和阻碍流动、产生肋片效果以及扩大流动路径, 这些效果也能达到强化传热目的^[1]。伴随着传热的强化, 管内插入扭带也使流体的流动阻力增大, 从而增大了能量损失。而且由于流动机理的原因, 管内插入扭带对紊流区域的传热强化效果并不明显^[2]。因此近年来国内外许多学者都在努力做两方面研究: (1) 减小扭带造成的流动阻力; (2) 扩大在紊流区域扭带适用的 Re 数范围。目前出现了一些新的扭带, 比如打断的扭带^[3], 锯齿状扭带^[4], 方管内插扭带^[5], 多个扭带^[6], 等等。

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。本文对圆管核心流区域和整个区域添加十字形扭带的强化传热进行数值模拟, 比较这两种换热管的换热和阻力特性。

1 数值模拟

两种换热管的螺旋扭带均在管内沿全程放置, 厚度均为 1 mm, 宽度分别为 18 mm 和 10 mm, 如图 1 所示。扭带的扭曲度用扭比表示, 定义为扭转 180° 沿轴向的长度 H 与管子内径 D_{in} 之比。模型取管内径为 20 mm, 管长为 90 mm, 扭带沿全程旋转 360°, 扭比为 2.25。换热管取恒定壁温 400 K, 流道进出口采用周期性边界条件, 流体为水, 给定质量流量, 初始温度为 300 K。雷诺数 Re 分别取 400, 800, 1200, 1600, 4000, 8000, 12000, 16000。层

收稿日期: 2008-12-12; 修订日期: 2009-06-18

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

作者简介: 郭 剑 (1985-), 男, 江西九江人, 博士研究生, 主要从事强化传热研究。

流时采用层流方程, 紊流时采用标准 $k-\varepsilon$ 两方程紊流模型, 压力场与速度场采用 SIMPLE 算法。

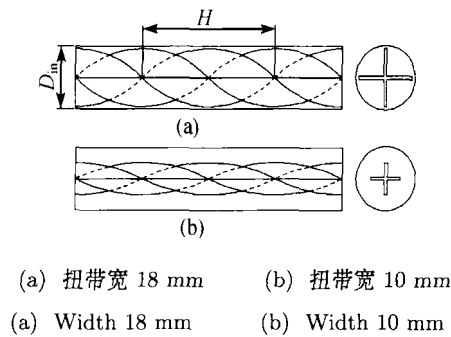


图 1 换热管示意图
Fig. 1 Tube with cross twisted-tape

计算在三维直角坐标系中进行, 控制方程为:
连续方程:

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

动量方程:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i$$

能量方程:

$$\rho \frac{De}{Dt} = -\text{div}(\lambda \text{grad}T) + \sigma_{ji} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

2 模拟结果及分析

2.1 平均努塞尔数 Nu

图 2 为各雷诺数 Re 下两个换热管的平均努塞尔数 Nu 的值。从图中可见, 两种换热管的 Nu 都随着 Re 的增大而显著增大, 而在紊流区域 ($Re \geq 4000$) 的增大速度比在层流区域 ($Re \leq 2000$) 的增大速度明显小很多。模拟结果与实际情况相符合, 说明紊流区域的传热强化效果不如层流区域的好。比较这两条曲线还可以发现, 在整个 Re 范围内, 内插 18 mm 扭带比内插 10 mm 扭带的换热管的 Nu 都要大。在层流区域, 内插 18 mm 扭带比内插 10 mm 扭带的换热管的 Nu 大 1 倍左右, 而在紊流区域大得并不多。这就说明, 如果把十字形扭带的宽度从接近管径减小到管径的一半, 管内紊流区域的传热强化效果只是略有降低, 但相差不太明显。

2.2 平均范宁摩擦系数 f

图 2 为各雷诺数 Re 下两个换热管的平均范宁摩擦系数 f 的值。根据图中显示的结果, 无论在层流还是紊流区域, 内插 18 mm 扭带比内插 10 mm 扭带的换热管的 f 均大 1 倍以上, 可见把十字形扭带

的宽度从接近管径减小到管径的一半, 换热管内流体的阻力能有效减少。

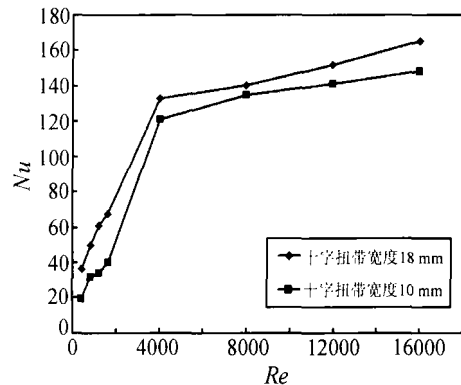


图 2 雷诺数 Re 对努塞尔数 Nu 的影响
Fig. 2 Effect of Re number on Nusselt number

分析其中的原因, 有两方面: (1) 把宽度从接近管径减小到管径的一半, 管内流体扰动情况发生了变化, 从原来的贴近壁面流体的扰动变成了核心流扰动。流体在贴近壁面扰动, 在近壁面处形成较大的速度梯度, 产生较大的剪切力, 从而造成较大的流体阻力。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为降低, 从而有效减小流体阻力。(2) 扭带宽度减小, 其表面积也减小, 流体流经扭带时受到的摩擦力也减小, 从而阻力减小。

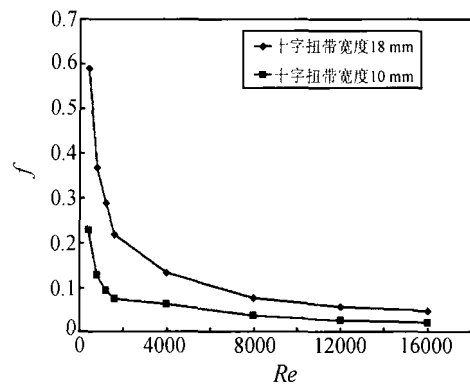


图 3 雷诺数 Re 对平均范宁摩擦系数 f 的影响
Fig. 3 Effect of Re number on mean Fanning friction factor f

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:

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

图 4 为各雷诺数 Re 下两个换热管的 PEC 值。由图可见, 这两种换热管的 PEC 值在层流区域 ($Re \leq 2000$) 内均随 Re 的增大而升高, 在紊流区域 ($Re \geq 4000$) 内均随 Re 的减小而降低, 层流区域

的变化比紊流区域的明显,紊流区域的值远小于层流区域的值。通过比较这两条曲线可以发现,在层流区域内,内插 18 mm 扭带比内插 10 mm 扭带的换热管的 PEC 大,而在紊流区域内,后者略大于前者。这就说明,核心流区域传热强化在紊流范围内能取得一定效果。

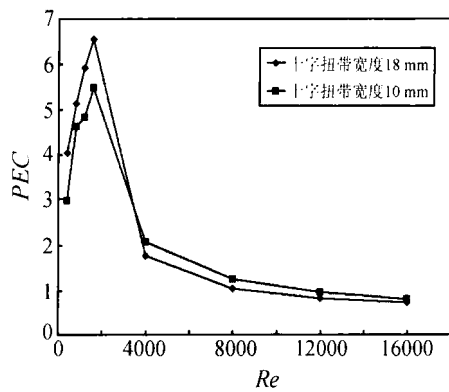


图 4 PEC 数随雷诺数 Re 变化关系

Fig. 4 Variation of PEC value with Re number

2.4 速度场和温度场图示

图 5 和图 6 分别为内插 10 mm 扭带的换热管在 $Re=12000$ 时的速度场和温度场分布图。可见换热管内流体核心区域的速度和温度分布均匀,减小十字形扭带的宽度能造成较好的核心流扰动效果。

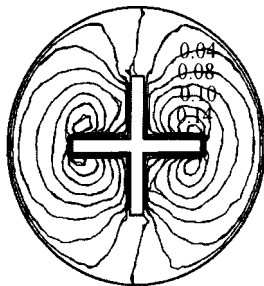


图 5 速度场分布图 (m/s)

Fig. 5 Velocity field distribution map (m/s)

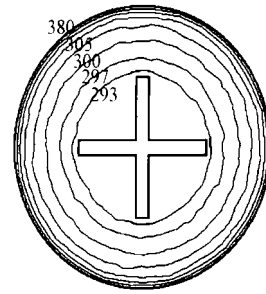


图 6 温度场分布图 (K)

Fig. 6 Temperature field distribution map(K)

3 结 论

通过减小十字形扭带的宽度使换热管内流体核心区域扰动,能有效降低换热管中流体的阻力,在紊流区域能提高换热管的换热性能。本文提出的提高换热管性能的方法为强化传热方法的实际应用提供参考。

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. 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. ASME J. Heat Transfer, 1993, 115: 890-896
- [3] S W Chang, T L Yang, J S Liou. Heat Transfer and Pressure Drop in Tube with Broken Twisted Tape Insert. Exp. Therm. Fluid Sci., 2007, 32: 489-501
- [4] S W Chang, Y J Jan, J S Liou. Turbulent Heat Transfer and Pressure Drop in Tube Fitted with Serrated Twisted-Tape. Int. J. Therm. Sci., 2007, 46: 506-518
- [5] S W Chang, Y Zheng. Enhanced Heat Transfer with Swirl Duct Under Rolling and Pitching Environment. J. Ship Res., 2002, 46: 149-166
- [6] S W Chang, K W Yu, M H Lu. Heat Transfer in Tubes Fitted with Single, Twin and Triple Twisted Tapes. J. Exp. Heat Transfer, 2005, 18: 279-294