

内置斜流杆的强化传热管的数值模拟研究

周路遥 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘要 本文采用数值计算的方法, 以水为流动介质, 对管内插斜流杆的强化传热管进行流动与传热特征分析。结果表明, 管内插入斜流杆能有效扰动流体并且使流体形成一种多纵向涡的旋流结构, 能够有效提升换热管的换热和流动综合性能, 雷诺数 Re 为 300~1500 时, 其 PEC 值为 2.1~4。

关键词 斜流杆; 强化换热; PEC; 纵向旋流; 数值模拟

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2015)03-0596-04

Numerical Studies on Heat Transfer Performance for Tube Inserted With Diagonal Rod Inserts

ZHOU Lu-Yao LIU Wei

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

Abstract In this paper, a three-dimensional analysis on heat transfer and fluid flow of a tube inserted with diagonal rod inserts is performed by numerical simulation. Results indicated that diagonal rod inserts caused a multi-longitudinal vortex formation which significantly improved the overall heat transfer performance of the tube. The value of performance evaluation criterion (PEC) lies in the range of 2.1~4, which demonstrates that the diagonal rod inserts has a very good overall thermo-hydraulic performance.

Key words diagonal rod inserts; heat transfer enhancement; PEC; longitudinal vortex; numerical simulation

0 引言

换热器在电力、石化、钢铁、冶金、制冷、低温等行业中得到广泛的应用, 而增强对流换热, 减小流动阻力, 是提高换热器综合性能的有效途径。为了改善换热器性能, 国内外研究者在强化传热方面做了大量的工作^[1-4], 并提出了一些新的强化换热理论, 如场协同理论^[5]、多场协同理论^[6]以及核心流强化传热理论^[7-8]等。

纵向涡强化管是目前经常采用的强化传热管之一, 它是一种通过某种旋流元件或特定的装置使流体在换热空间产生涡旋流动的无源换热强化技术^[9]。因为管内纵向涡流强化传热相对于其他形式传热具有在增强换热同时流阻增加不大的优点^[10], 因此近年来纵向涡流强化传热的研究和应用成为强化换热的研究热点之一。本文尝试了一种新的管内插入物强化传热——管内插斜流杆强化传热, 发现这种形式的管内插入物能够使流体形成一种多纵向涡的旋流结构, 并且能在流体流动阻力增加不太大的

情况下有效提高换热能力。

1 物理及数学模型

图 1 为内插斜流杆强化传热管的物理模型。水在管内壁流动, 管长 $L = 1000$ mm, 直径 $D = 20$ mm, 内插斜流杆的直径 $d = 2$ mm, 长度 l , 斜杆倾角 α 以及每组斜流杆的布置周期 P 均为可优化的变量。其中长度 l 取 6、8、10、12 和 14 mm; 斜杆倾角 α 取 20°、30°、40° 和 50°; 周期 P 取 30、50、70 和 90 mm。

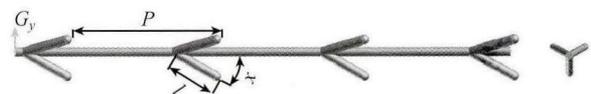


图 1 斜流杆内插物的几何模型

Fig. 1 The model of diagonal rod inserts

收稿日期: 2014-01-07; 修订日期: 2015-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51036003); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No.2013CB228302); 教育部博士点基金 (No.20100142110037)

作者简介: 周路遥 (1983-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事强化传热方面的研究。通信作者: 刘伟, 教授, 博导 w.liu@hust.edu.cn.

采用 FLUENT6.3 三维双精度稳态求解器对强化管模型进行计算, 采用非结构化网格划分, 计算前验证了网格独立性和光管换热综合性能的准确性。圆管壁面定壁温 $T_w = 350$ K, 水进口温度为 300 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) 流体的热物性参数如 ρ , μ , 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; 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:

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

动量方程:

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

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 分别为流体的压力、温度; ρ, μ, c_p, k 分别为流体密度、动力黏度、比定压热容、导热系数。压力与速度的解耦采用 SIMPLE 算法, 动量和能量等方程的离散均采用 QUICK 格式。

2 数值模拟结果及分析

2.1 流体速度场和温度场

数值计算结果表明, 在内插斜流杆的换热管管内, 流体在斜杆的作用下形成强烈的多纵向旋流。图 2 和图 3 分别是 $Re = 600, P = 30$ mm, $x = 40^\circ, l =$

10 mm, 内插斜杆 5 mm 后圆管段横截面处的速度场和温度场, 可以看到在横截面处出现 6 个纵向旋流, 在 $60^\circ, 180^\circ$ 和 300° 附近出现冲击壁面的流动, 而在 $0^\circ, 120^\circ$ 和 240° 处出现离开壁面的流动。对于光管换热管的温度场, 其截面等温线为圆形, 而对于内插斜流杆换热管, 涡流的出现使等温线发生较大的变化, 近壁处在 $60^\circ, 180^\circ$ 和 300° 附近等温线更为密集, 换热得到了强化。将图 2 的速度场与图 3 的温度场放在一起可以清楚地看到, 在 $60^\circ, 180^\circ$ 和 300° 附近出现的冲向壁面的径向流动与壁面附近等温线最为密集处相对应, 这也说明径向流动使速度场与热流场的协同改善而导致换热强化。

2.2 平均努塞尔数 Nu

图 4~6 分别为各雷诺数 Re 下的平均努塞尔数 Nu 随斜流杆布置节距 P 、斜杆倾角 x 、斜杆长度 l 改变而改变的趋势。从图 4 中可见, 各种情况 Nu 都随着 Re 的增大而增大, 说明在模拟的 Re 数范围内, 插入斜流杆都可以得到较好的强化换热效果。这可以归因于使用斜流杆产生的旋流效应, 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。而且可以看出周期 P 值越小, 换热越好。这是因为斜流杆密集布置引起的流体扰动更加强烈, 流体在流经斜杆后形成旋流, 在旋流还没有衰减时再次得到强化, 因此换热能力强。从图 5 可见, 增加倾角 x 也能有效提高换热能力, 这是因为倾角 x 越大, 纵向扰动越深, 流体越容易形成旋流, 换热能力因此更强。但当倾角 x 达到 50° 的时候, 换热能力反而下降, 这说明当倾角超过某一极限值时扰流机理发生改变而使旋流的形成更加困难, 因此换热能力减弱。而斜杆长度对流体换热能力的影响如图 6。杆长

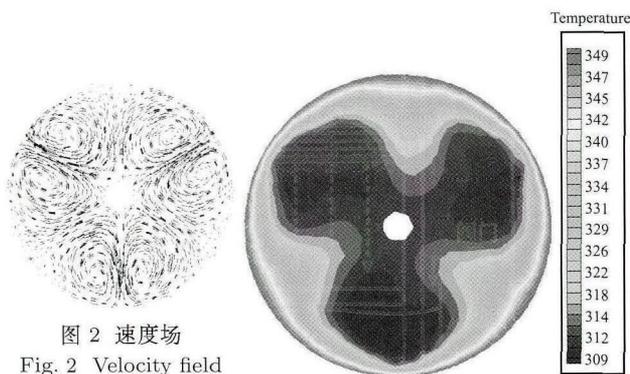


图 2 速度场
Fig. 2 Velocity field

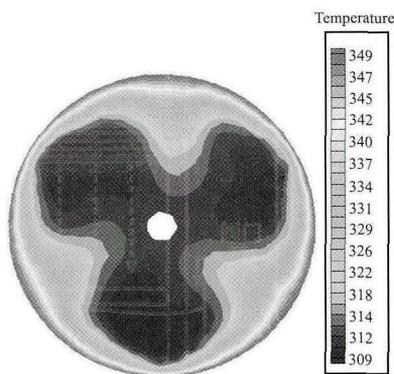


图 3 温度场
Fig. 3 Temperature field

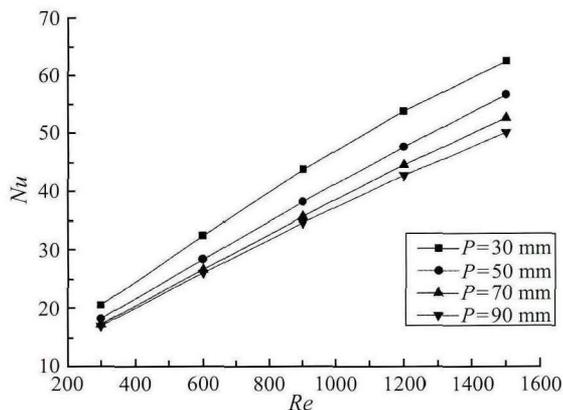


图 4 平均努塞尔数 Nu 随节距 P 的变化
Fig. 4 Variation of Nusselt number with pitch

越长, 扰动越深, 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。

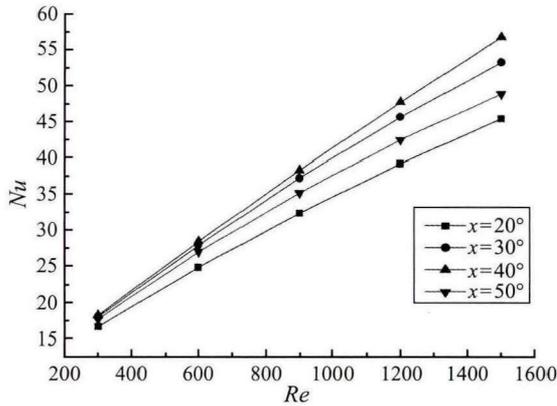


图 5 平均努塞尔数 Nu 随倾角 x 的变化
Fig. 5 Variation of Nusselt number with slant angle

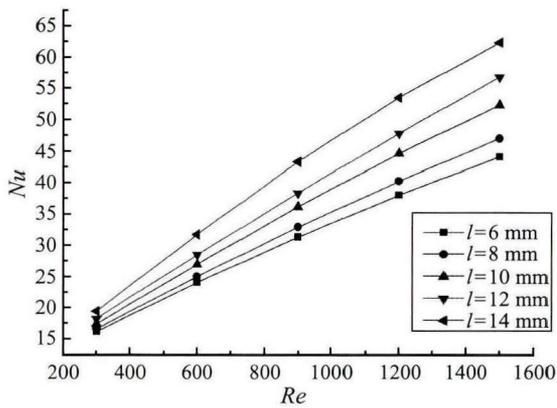


图 6 平均努塞尔数 Nu 随杆长 l 的变化
Fig. 6 Variation of Nusselt number with rod length

2.3 平均阻力摩擦系数 f

图 7~9 分别为各雷诺数 Re 下的平均阻力摩擦系数 f 随斜流杆布置节距 P 、斜杆倾角 x 、斜杆长度 l 改变而改变的趋势。根据图中显示的结果可见, 换热管中插入斜杆布置越密集, 倾角越大, 杆长越长, 换热管的平均摩擦系数 f 越大。这是因为: 1) 无论是增加每组斜流杆的密度, 倾角还是长度都等同增加扰流元件表面积, 流体流经斜杆时受到的摩擦力也增大, 从而导致流动阻力的增大; 2) 斜杆的倾角增大或者杆长增长, 管内流体扰动情况发生了变化, 从核心流扰动逐渐变化成了贴近壁面的扰动。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。

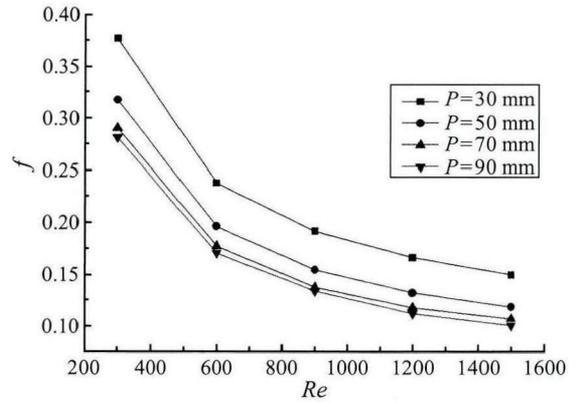


图 7 平均阻力系数 f 随距 P 的变化
Fig. 7 Variation of friction factor with pitch

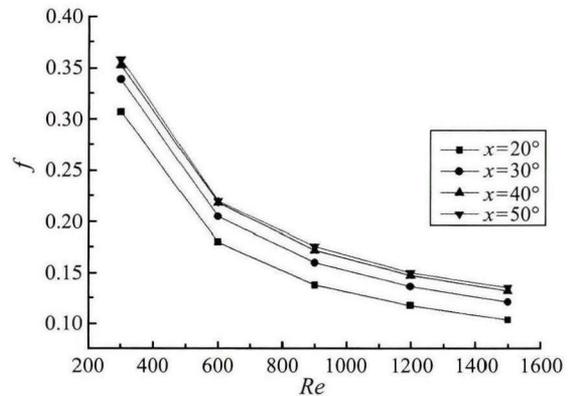


图 8 平均阻力系数 f 随倾角 x 的变化
Fig. 8 Variation of friction factor with slant angle

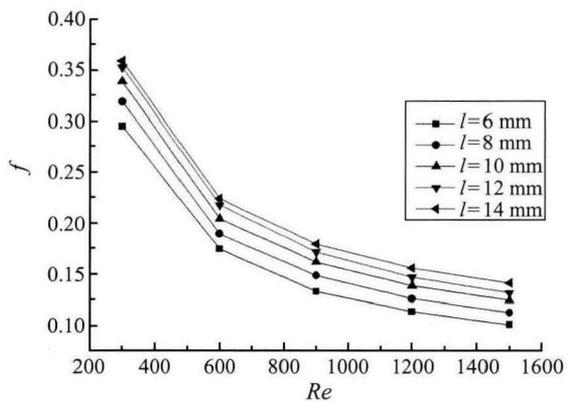


图 9 平均阻力系数 f 随杆长 l 的变化
Fig. 9 Variation of friction factor with rod length

2.4 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采用如下形式:

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

图 10~12 为各雷诺数 Re 下换热管的 PEC 值随斜流杆布置密度 P 、斜杆倾角 x 、斜杆长度 l 改变而改变的趋势。由图可见, 在雷诺数 Re 在 300 到 1500 的范围内, 换热管的 PEC 值均随着 Re 的增大而增

大,且最大值达到了4,说明管内插入斜流杆可以取得很好的换热与流动综合性能。特别是在较密集布置,倾角较大或杆长较长时,换热管综合性能的提升尤为明显。

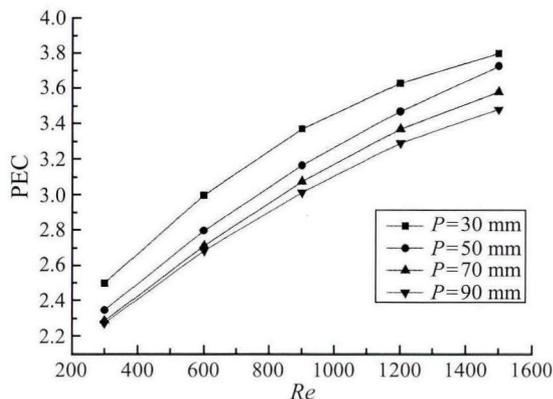


图 10 PEC 值随节距 P 的变化

Fig. 10 Variation of PEC value with pitch

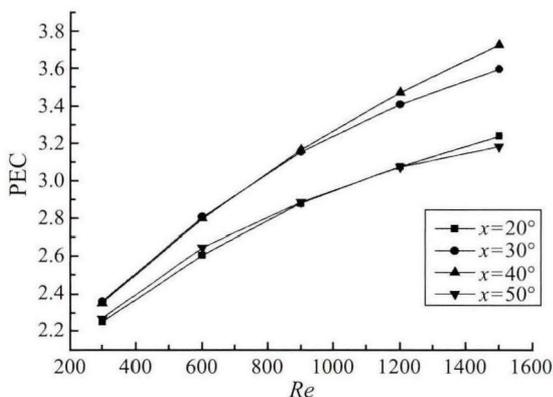


图 11 PEC 值随倾角 α 的变化

Fig. 11 Variation of PEC value with slant angle

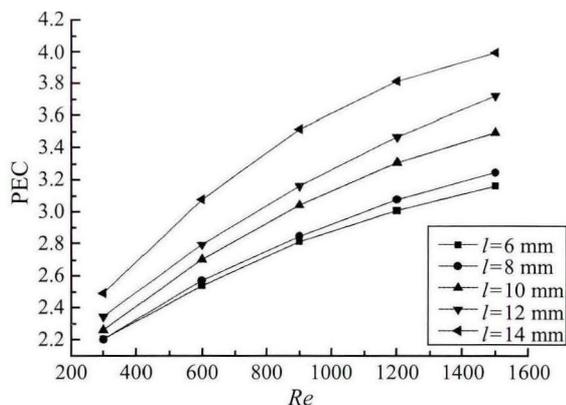


图 12 PEC 值随杆长 l 的变化

Fig. 12 Variation of PEC value with rod length

3 结 论

数值分析结果表明,在 Re 数为 300~1500 范围

内,随着 Re 数的增加,斜流杆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。斜流杆扰流元件可使管内流体形成多纵向旋流,在流动阻力增加不显著情况下,换热性能有较大幅度提升,当斜杆布置较密,倾角较大或杆长较长时,PEC 最高可达 4,显示出了换热管优良的综合强化传热性能。

参 考 文 献

- [1] Liu W, Liu Z C, Ming T Z, et al. 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
- [2] Nield D A, Bejan A. Convection in Porous Media [M]. New York: Springer-Verlag, 1992
- [3] Wang S, Guo Z Y, Li Z X. Heat Transfer Enhancement by Using Metallic Filament Insert in Flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44 (7): 1373-1378
- [4] 郑兆清, 杨臣, 杨昆, 赖凤麟, 吴国强, 刘伟. 方管核心流区域添加内插物强化传热的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2008, 29(09): 1534-1536
ZHENG Zhaoqing, YANG Chen, YANG Kun, LAI Fenglin, WU Guoqiang, LIU Wei. Experimental Study of Heat Transfer Enhancement by Adding Inserters in the Core Flow Zone of Square Duct[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(09): 1534-1536
- [5] Guo Z Y, Li D Y, Wang B X. A Novel Concept for Convective Heat Transfer Enhancement [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1998, 41: 2221-2225
- [6] 刘伟, 刘志春, 过增元. 对流换热层流流场的物理量协同与传热强化分析 [J]. 科学通报, 2009, 54: 1779-1785
Liu W, Liu Z C, Guo Z Y. Physical Quantity Synergy in Laminar Flow Field of Convective Heat Transfer and Analysis of Heat Transfer Enhancement [J]. Chinese Sci Bull, 2009, 54: 1779-1785
- [7] 刘伟, 杨昆. 管内核心流强化传热的机理与数值分析 [J]. 中国科学 (E 辑: 技术科学), 2009, 39(04): 661-666
LIU Wei, YANG Kun. Heat Transfer Enhancement Mechanism and Numerical Analysis of the Core Flow in Tube [J]. Science in China(Series E: Technological Sciences), 2009, 39 (04): 661-666
- [8] 刘伟, 刘志春, 马雷. 多场协同原理在管内对流强化传热性能评价中的应用 [J]. 科学通报, 2012, 57: 867-874
LIU Wei, LIU Zhichun, MA Lei. Application of Multi-Fields Coordination Principle in Heat Transfer Performance Evaluation of Convection in the Tube [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57: 867-874
- [9] Fiebig M, Sanchez M A. Enhancement of Heat Transfer and Pressure Loss by Winglet Vortex Generators in a Fin-Tube Element [C]// Compact Heat Exchangers for Power and Process Industries, HTD-v201, ASME New York, 1992: 7-14
- [10] Fiebig M. Vortices Generators and Heat Transfer [M]. Trans IChemE, A, 1998, 76(2): 108-123