

研究论文

## 内置交替轴扭带的管内层流换热特性

王特, 王飞龙, 范爱武, 刘伟

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 为了提高管内层流换热性能, 开发了三种不同的交替轴扭带作为强化换热的扰流元件。通过数值模拟对内置这些扰流元件的管内换热与流动特性进行了研究, 结果表明: (1) 对于交替轴窄边扭带, 在较低 Reynolds 数下 Nusselt 数随错位角的增大而增大; 而  $Re$  较高时, 错位角的影响较小。阻力系数  $f$  随错位角的变化不大,  $90^\circ$  对应的综合性能指标 PEC 最高。(2) 对于交替轴中空扭带,  $Nu$  在  $60^\circ$  时达到最大值,  $f$  随错位角的增加而有较明显的增加, PEC 在  $60^\circ$  时最好。(3) 对于交替轴窄边中空扭带,  $Re$  较低时,  $Nu$  随错位角增大而增加; 而  $Re$  较高时, 错位角的影响较小。 $f$  的最大值出现在错位角为  $60^\circ$  时, 但错位角的影响并不明显, 而且比交替轴窄边扭带的  $f$  降低很多。 $90^\circ$  错位角对应的 PEC 最好。(4) 总体来看, 采用交替轴窄边中空扭带能全面获得优良的热-水力学综合性能。

**关键词:** 换热; 层流; 交替轴扭带; 窄边扭带; 中空扭带; 数值模拟

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2014.zl.051

**中图分类号:** TK 124

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438—1157(2014)S1—316—07

## Laminar heat transfer characteristics in circular tubes with twisted tapes of alternate axes

WANG Te, WANG Feilong, FAN Aiwu, LIU Wei

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

**Abstract:** In order to improve the performance of laminar heat transfer in a tube, three types of twisted tape with alternate axes were designed. Numerical study was performed on the laminar heat transfer characteristics in circular tubes inserted with these different twisted tapes. The results show that, (1) For the case with short-width twisted tape of alternate axes, Nusselt number ( $Nu$ ) increases with the increment of the dislocation angle under small Reynolds number ( $Re$ ); but for large  $Re$ , the impact of dislocation angle grows negligible. However, a sudden decrease of  $Nu$  occurs at large  $Re$  for the small dislocation angles cases. The dislocation angle has an insignificant effect on the friction factor ( $f$ ). The value of performance evaluation criterion (PEC) is the highest for the case with a  $90^\circ$  dislocation angle. (2) For the case with center-cleared twisted tape of alternate axes, the largest  $Nu$  is reached at the  $60^\circ$  dislocation angle. The friction factor  $f$  is relatively larger than that when the dislocation angle is  $0^\circ$ , and it exhibits an obvious increment with the dislocation angle. The PEC value demonstrates a complex variation with the dislocation angle. However, in general, the thermo-hydraulic performance is the best for the case

2014-02-13 收到初稿, 2014-02-23 收到修改稿。

**联系人:** 范爱武。第一作者: 王特 (1990—), 男, 硕士研究生。

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目 (51036003)。

**Received date:** 2014-02-13.

**Corresponding author:** FAN Aiwu, faw@hust.edu.cn

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (51036003).

with a  $60^\circ$  dislocation angle. (3) For the case with center-cleared short-width twisted tape of alternate axes, the  $Nu$  increases with the increment of the dislocation angle under small  $Re$ ; but at large  $Re$ , the differences for different dislocation angle is limited. The dislocation angle has an insignificant effect on the friction factor ( $f$ ). The PEC value is the highest for the case with a  $90^\circ$  dislocation angle. But the sudden decrease of  $Nu$  does not occur at large  $Re$  for the small dislocation angles cases. The largest  $f$  appears when the dislocation angle is  $60^\circ$ , but the differences between the cases with different dislocation angles are small. Moreover, the friction factor  $f$  is reduced by a great extent as compared with short-width twisted tape of alternate axes. The variation tendency of PEC is similar to that of  $Nu$ , and it performs best at the  $90^\circ$  dislocation angle. (4) In summary, a better comprehensive thermo-hydraulic performance could be obtained by applying the center-cleared short-width twisted tape of alternate axes.

**Key words:** heat transfer; laminar flow; twisted tape with alternate axes; short-width twisted tape; center-cleared twisted tape; numerical simulation

## 引言

换热器是工业中广泛应用的一种换热设备, 近年来, 随着能源需求与材料费用的不断增长, 推进了高效节能换热器的发展。在各类换热器中, 管壳式换热器仍然是应用最为广泛的类型。影响换热器尺寸和成本的关键因素是换热管的换热效率和管内压降损失。在强化管内换热的同时往往伴随着压降损失的下降, 导致能源利用率降低。因此, 发展理论和技术来强化管内换热和减阻是提高能源利用率的关键。

为了在强化管内对流换热时不过多地增加流动阻力, 管内插入物常常是一种简单又经济的选择。常见的管内插入物有漩涡发生器<sup>[1-2]</sup>、螺旋线圈<sup>[3]</sup>、锥形环<sup>[4]</sup>、锥形片<sup>[5]</sup>、螺旋转子<sup>[6]</sup>以及螺旋扭带<sup>[7]</sup>等。漩涡发生器的原理是利用其一定的攻角使流体产生一定强度的纵向涡, 并在一定的压力推动作用下, 其尾迹可以稳定地延伸到下游比较远的地方, 带动下游流体旋转, 冲刷壁面, 对边界层产生扰动从而强化换热。螺旋线圈主要是使管壁附近的流体产生旋流, 周期性地扰动边界层, 阻止其发展。锥形环/片是利用其迅速收缩和扩张的流通面积, 使湍流程度变得更加剧烈。螺旋扭带是应用最为广泛的管内插入物, 其形成的纵向涡流可以明显地强化管内传热, 但同时由于扭带的存在带来了很大的压降。为了对传统扭带进行改进, 以增强对流换热和减小流体阻力, 提高强化管的综合性能, 国内外学者提出了几种新型扭带, 例如: 间断扭带<sup>[7-10]</sup>, 窄边扭带<sup>[11-13]</sup>, 齿面或齿边扭带<sup>[14-15]</sup>, 打孔扭带<sup>[16]</sup>, 穗齿扭带<sup>[17]</sup>, 多条扭带<sup>[18]</sup>和螺旋扭片<sup>[19-20]</sup>等。本

文通过对层流条件下 ( $1000 \leq Re \leq 1800$ ) 圆管内插入几种不同结构的交替轴扭带进行数值模拟, 比较各种情况下管内的换热与阻力特性及综合性能。

## 1 数值模拟方法

### 1.1 模拟对象与方法

采用的物理模型如图 1 所示, 直径  $D = 20$  mm, 长  $L = 100$  mm 的圆管内插入厚度均为 1mm 的扭带, 其中窄边扭带的宽度为  $W = 18$  mm。对于中空结构的扭带, 中间掏空部分的径向宽度为  $C = 9$  mm。扭带的扭比 (定义为扭带扭转  $180^\circ$  沿轴向的长度  $H$  与管子内径  $D$  之比) 为 2.5, 前后两段之间的交叉角度分别取  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 。几何建模采用 Solidworks 软件, 前处理采用 Gambit 2.4.6, 数值计算应用 Fluent 6.3.26。管壁施加恒定的热流  $6000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 管子进出口采用周期性边界条件 (为方便前处理, 将扭带沿圆管平移 25 mm, 使得圆管前后两截面相同, 便于用 Link 功能对两面进行连接)。流体为水, 给定质量流量, 初始温度为 300 K,  $Re$  范围为 400~1800, 属于层流流动换热。计算模型为三维、层流、稳态、双精度模型, 压力场和速度场之间的耦合采用 SIMPLE 算法。

### 1.2 数据处理方法

本文用 Nusselt 数, 阻力系数  $f$  和性能评价准则 PEC 来分别评价强化管的换热效果、阻力特性和热流体力学综合性能, 分别定义如下

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} = \frac{qD}{\lambda(T_w - T_f)} \quad (1)$$

$$f = \frac{\Delta p}{(\rho U^2 / 2)(L/D)} \quad (2)$$

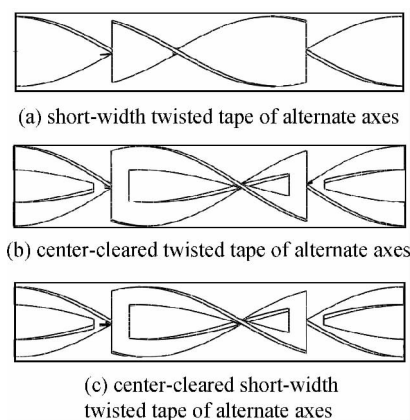


图 1 圆管中插入三种不同交替轴扭带的几何模型

Fig. 1 Circular tubes inserted with various twisted tapes of alternate axes

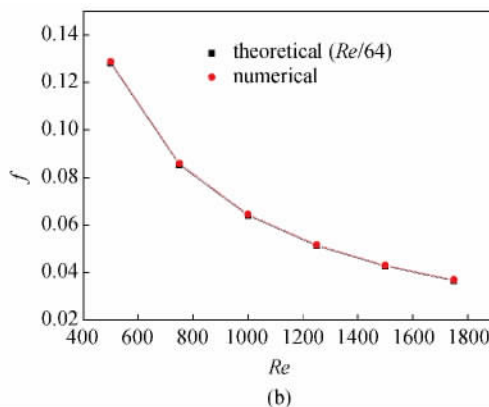
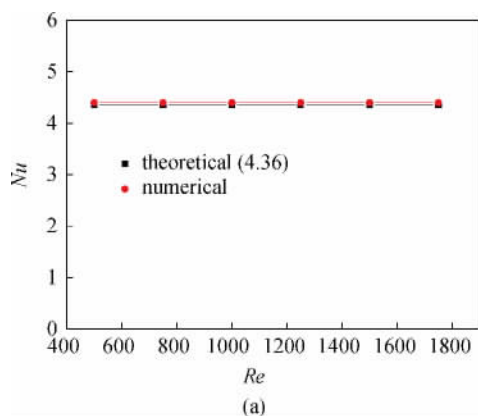


图 2 光管模拟值与理论值比较

Fig. 2 Comparison of numerical results and theoretical data of Nusselt number and friction factor of plain tube

## 2 结果与分析

### 2.1 交替轴窄边扭带的强化换热效果

图 3~图 5 给出了管内插入交替轴窄边扭带时, 各 Reynolds 数对应的 Nusselt 数、阻力系数和性能评价准则随扭带错位角度的变化规律。从图 3 可以看出, 总地来说, 相同 Reynolds 数下交替轴窄边扭带的换热效果要比未错位的情况好很多, 这是因为扭带分段交错布置不仅能引起漩涡流, 还能在交错部分, 流体向两边分流, 引起更高效的流体混合和扰动, 从而能达到更优的换热效果。另外, 在较低的  $Re$  下, 换热效果 ( $Nu$ ) 随着扭带错位角的增大而增强; 而  $Re$  较高时, 不同错位角度

之间的差别越来越小。但是对于错位角较小 (包括光管) 的情况, 在  $Re$  大于 1400 时, 换热效果 ( $Nu$ ) 反而突然降低。从图 4 可见, 与未采用交替轴窄边扭带的情况相比, 扭带分段错位布置并未地显著地增大流动阻力, 而且随着错位角度的增大, 阻力的增加不明显。此外, 大部分工况下  $60^\circ$  错位角对应的阻力系数最大, 而不是  $90^\circ$ 。由图 5 可知, 内置交替轴窄边扭带的性能评价准则  $PEC$  最小为 3.0, 最大可达 6.0 以上, 均远高于 1.0。可见采用交替轴的布置方式可大大提高窄边扭带的热水力学综合性能。另外, 从图 5 可以看出, 性能评价准则  $PEC$  随扭带错位角的变化趋势与  $Nu$  类似, 而且  $90^\circ$  错位角对应的扭带综合性能最好。

$$PEC = \frac{Nu}{Nu_0} \left( \frac{f}{f_0} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

式中  $Nu$  和  $f$  分别是内置扭带的圆管对应的 Nusselt 数和摩擦阻力系数, 而  $Nu_0$  和  $f_0$  分别是光管的 Nusselt 数和摩擦阻力系数。层流、恒热流状态下,  $Nu_0$  和  $f_0$  分别为

$$Nu_0 = 4.36 \quad (4)$$

$$f_0 = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

### 1.3 模拟方法验证

为保证模拟方法的准确性, 首先用以上方法对相同条件下的光管进行模拟, 将各 Reynolds 数对应的 Nusselt 数和阻力系数模拟结果与理论值进行对比, 误差均在 5% 以内 (图 2), 从而验证了本文所使用的模拟方法的正确性。

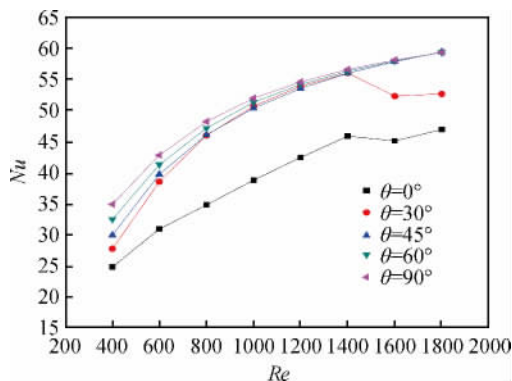


图 3 内置交替轴窄边扭带的圆管内 Nu 随 Re 的变化规律

Fig 3 Variation tendency of Nu versus Re for tube with short-width twisted tape of alternate axes

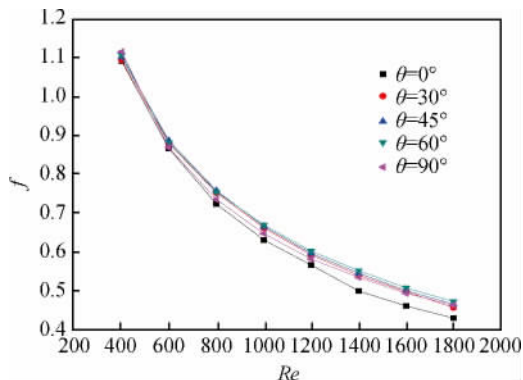


图 4 内置交替轴窄边扭带的圆管内 f 随 Re 的变化规律

Fig 4 Variation tendency of f versus Re for tube with short-width twisted tape of alternate axes

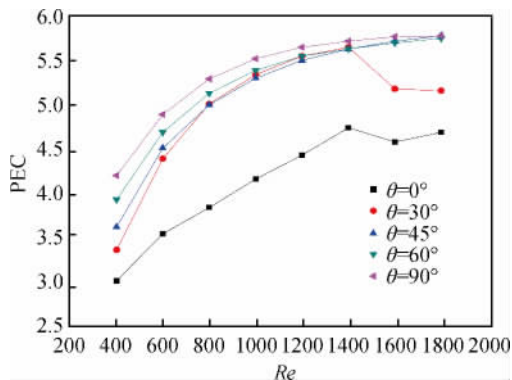


图 5 内置交替轴窄边扭带的圆管内 PEC 随 Re 的变化规律

Fig 5 Variation tendency of PEC versus Re for tube with short-width twisted tape of alternate axes

## 2.2 交替轴中空扭带强化换热效果

当管内插入交替轴中空扭带时，各  $Re$  下的  $Nu$ 、 $f$  和  $PEC$  随扭带错位角的变化趋势如图 6~图 8 所示。图 6 表明，中空扭带采用交替轴布置方式时同样能增强换热效果。各  $Re$  下， $Nu$  在  $60^\circ$  左右时达到最大值， $90^\circ$  次之， $45^\circ$  其次， $30^\circ$  最小。 $Nu$  在高  $Re$  时没有表现出非单调的变化规律。与交替轴窄边扭带不同的是，采用交替轴中空扭带时，流动阻力系数  $f$  比未错位的情况增大较多，而且  $f$  随错位角的增加而有较明显的增加，如图 7 所示。从图 8 可见， $PEC$  值随错位角的变化而呈现出复杂的变化规律。当 Reynolds 数较低时 ( $Re < 1000$ )， $60^\circ$  的错位角对应的综合性能最好；在较高 Reynolds 数时 ( $Re = 1200 \sim 1400$ )， $PEC$  值随着错位角的减小而降低，即  $90^\circ$  的情况最好；在高 Reynolds 数时 ( $Re = 1400 \sim 1800$ )，未采用交替轴的中空扭带的综合性能反而要高于错位角为  $30^\circ$  的情况。此外，交替轴中空扭带的  $PEC$  值最小为 3.5，最大可达 6.25，均略高于采用交替轴窄边扭带的情况。

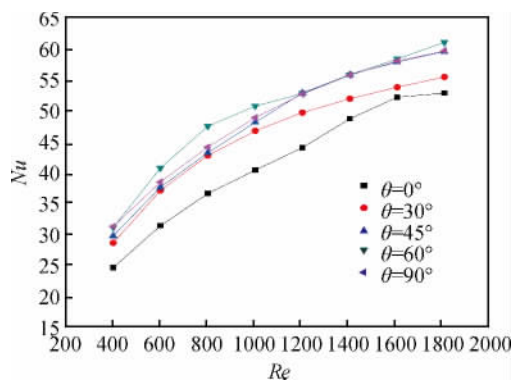


图 6 内置交替轴中空扭带的圆管内 Nu 随 Re 的变化规律

Fig 6 Variation tendency of Nu versus Re for tube with center-cleared twisted tape of alternate axes

## 2.3 交替轴窄边中空扭带强化换热效果

当管内插入交替轴窄边中空扭带时，各  $Re$  下的  $Nu$ 、 $f$  和  $PEC$  随扭带错位角的变化趋势如图 9~图 11 所示。比较图 9 和图 3 可以看出，交替轴窄边中空扭带对应的  $Nu$  比传统窄边中空扭带（错位角为  $0^\circ$ ）的  $Nu$  值要大。在较低的  $Re$  下，换热效果 ( $Nu$ ) 随着扭带错位角的增大而增强；而

$Re$  较高时, 不同错位角度之间的差别越来越小。但是并没有出现错位角较小时,  $Nu$  在高  $Re$  时突然降低的现象。从图 10 可知,  $f$  的最大值出现在  $60^\circ$  时, 但角度的影响并不明显, 而且比交替轴窄边扭带的阻力系数降低很多。由图 11 可见,  $PEC$  随扭带错位角的变化趋势与  $Nu$  类似, 而且  $90^\circ$  错位角对应的扭带综合性能最好。

### 2.4 速度场和温度场分析

下面以交替轴窄边扭带为例, 通过速度场和温度场分布的均匀性和壁面附近的梯度大小进行讨论和分析。图 12 和图 13 分别给出了  $Re=1800$  时内置交替轴窄边扭带的强化管在扭带交错截面上的速度和温度等值线。观察速度场可知, 采用交错布置

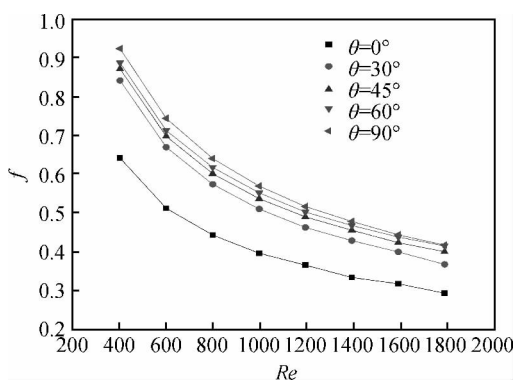


图 7 内置交替轴中空扭带的圆管内  $f$  随  $Re$  的变化规律

Fig. 7 Variation tendency of  $f$  versus  $Re$  for tube with center-cleared twisted tape of alternate axes

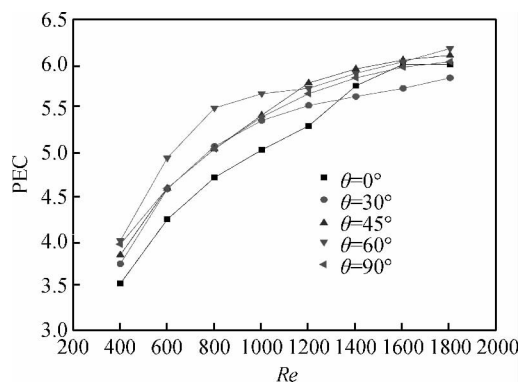


图 8 内置交替轴中空扭带的圆管内  $PEC$  随  $Re$  的变化规律

Fig. 8 Variation tendency of  $PEC$  versus  $Re$  for tube with center-cleared twisted tape of alternate axes

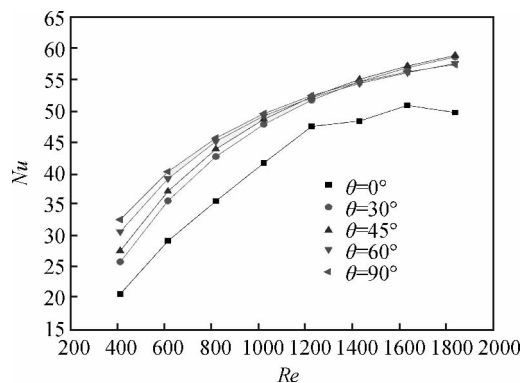


图 9 内置交替轴窄边中空扭带的圆管内  $Nu$  随  $Re$  的变化规律

Fig. 9 Variation tendency of  $Nu$  versus  $Re$  for tube with center-cleared short-width twisted tape of alternate axes

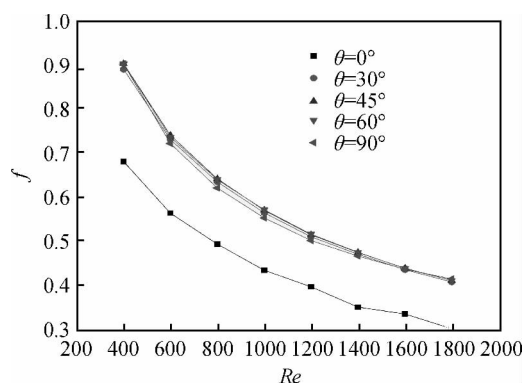


图 10 内置交替轴窄边中空扭带的圆管内  $f$  随  $Re$  的变化规律

Fig. 10 Variation tendency of  $f$  versus  $Re$  for tube with center-cleared short-width twisted tape of alternate axes

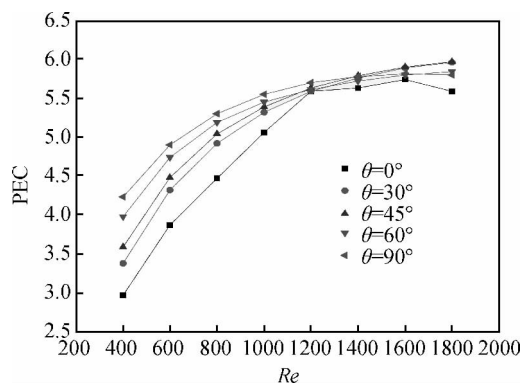


图 11 内置交替轴窄边中空扭带的圆管内  $PEC$  随  $Re$  的变化规律

Fig. 11 Variation tendency of  $PEC$  versus  $Re$  for tube with center-cleared short-width twisted tape of alternate axes

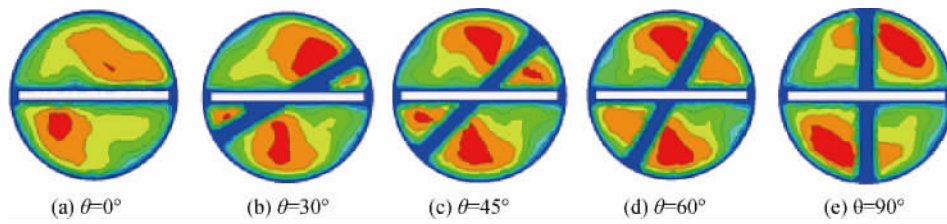


图 12  $Re=1800$  时内置交替轴窄边扭带的圆管横截面速度场

Fig. 12 Flow field in cross-section of tube with short-width twisted tape of alternate axes at  $Re=1800$

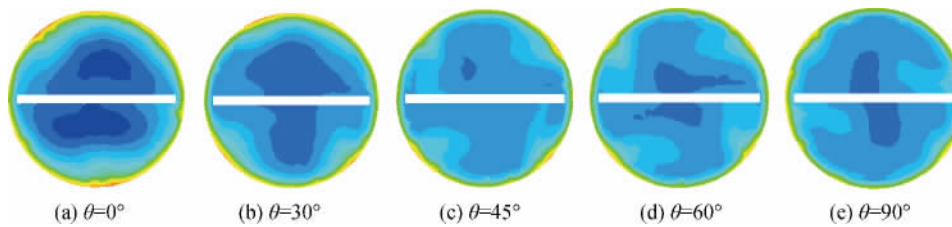


图 13  $Re=1800$  时内置交替轴窄边扭带的圆管横截面温度场

Fig. 13 Temperature field in cross-section of tube with short-width twisted tape of alternate axes at  $Re=1800$

的窄边扭带后，除了能产生很好的旋流效果外，还能额外引起流体的二次扰动，流体在扭带交错处贴近扭带附近具有更大的流动速度，扭带对边界处的流体扰动效果增强。由图 12 可见，在错位角大于  $45^\circ$  时均能造成较好的扰流效果。由图 13 可明显看出，采用传统窄边扭带时，换热管中心部分有一个明显的低温区域，且壁面温度较高。错位角为  $30^\circ$  时，中心的低温区变小；错位角为  $45^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $90^\circ$  时，整个温度场趋向于均匀化，壁面温度低，且壁面边界层薄，温度梯度增大。因此，采用交替轴扭带比传统扭带能明显地增强换热。

### 3 结 论

在基于管内扭带分段交错布置的基础上，设计了三种不同的交替轴扭带（交替轴窄边扭带、交替轴中空扭带、交替轴窄边中空扭带），对它们在  $Re=400\sim 1800$  的层流流动换热进行了数值模拟和比较分析。

(1) 采用交替轴布置方式能较大幅度地强化换热，而阻力系数增加不多，因此能获得较好的热—水力学综合性能。

(2) 对于交替轴窄边扭带，在较低  $Re$  下， $Nu$

随扭带错位角的增大而增大；而  $Re$  较高时，不同错位角度之间的差别越来越小。阻力系数  $f$  随错位角的变化差别不大， $90^\circ$  错位角对应的扭带综合性能 PEC 最好。

(3) 对于交替轴中空扭带， $Nu$  在  $60^\circ$  左右时达到最大值，流动阻力系数  $f$  比未错位的情况增大较多，而且  $f$  随错位角的增加而有较明显的增加，PEC 值随错位角的变化而呈现出复杂的变化规律，总体来说， $60^\circ$  的错位角对应的综合性能最好。

(4) 对于交替轴窄边中空扭带，在较低的  $Re$  下，换热效果 ( $Nu$ ) 随着扭带错位角的增大而增强；而  $Re$  较高时，不同错位角度之间的差别越来越小。但是并没有出现错位角较小时， $Nu$  在高  $Re$  时突然降低的现象。阻力系数的最大值出现在  $60^\circ$  时，但角度的影响并不明显，而且比交替轴窄边扭带的阻力系数降低很多。性能评价准则 PEC 随扭带错位角的变化趋势与  $Nu$  类似，而且  $90^\circ$  错位角对应的扭带综合性能最好。

(5) 总地来说，采用交替轴窄边中空扭带能全面获得优良的热—水力学综合性能。

### References

[1] Sarac B A, Bali T. An experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of decaying swirl flow

- through a circular pipe with a vortex generator [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, **32** (1): 158-165
- [2] He Yaling (何雅玲), Chu Pan (楚攀), Xie Tao (谢涛). Application and optimization of fin-and-tube heat exchangers with longitudinal vortex generators [J]. *CIESC Journal (化工学报)*, 2012, **63** (3): 746-760
- [3] Ozceyhan V. Conjugate heat transfer and thermal stress analysis of wire coil inserted tubes that are heated externally with uniform heat flux [J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, **46** (9): 1543-1559
- [4] Promvong P, Eiamsa-Ard S. Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, **34** (7): 849-859
- [5] Promvong P. Heat transfer behaviors in round tube with conical ring inserts [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, **49** (1): 8-15
- [6] Xing Cheng (邢程), Meng Ji'an (孟继安), Li Zhixin (李志信). Numerical study on influence of structural parameters of spiral rotor internal insert on heat transfer [J]. *CIESC Journal (化工学报)*, 2009, **60** (12): 2969-2974
- [7] Saha S K, Gaitonde U N, Date A W. Heat transfer and pressure drop characteristics of laminar flow in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1989, **2**: 310-322
- [8] Eiamsa-Ard S, Thianpong C, Promvong P. Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements [J]. *International Communication in Heat Mass Transfer*, 2006, **33**: 1225-1233
- [9] Saha S K, Dutta A, Dhal S K. Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, **44**: 4211-4223
- [10] Jaisankar S, Radhakrishnan T K, Sheeba K N. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosiphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of twisted tapes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, **29**: 1224-1231
- [11] Ayub Z H, Al-Fahed S F. The effect of gap width between horizontal tube and twisted tape on the pressure drop in turbulent water flow [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1993, **14**: 64-67
- [12] Eiamsa-ard S, Wongcharee K, Sripattanapipat S. 3-D numerical simulation of swirling flow and convective heat transfer in a circular tube induced by means of loose-fit twisted tapes [J]. *International Communication in Heat Mass Transfer*, 2009, **36**: 947-955
- [13] Liu W, Yang K, Liu Z C, Ming T Z, Fan A W, Yang C. Mechanism of heat transfer enhancement in the core flow of a tube and its numerical simulation [J]. *The Open Transport Phenomena Journal*, 2010, **2**: 9-15
- [14] Chang S W, Jan Y J, Liou J S. Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape [J]. *International Journal Thermal Science*, 2007, **46**: 506-518
- [15] Eiamsa-Ard S, Promvong P. Thermal characteristics in round tube fitted with serrated twisted tape [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, **30** (13): 1673-1682
- [16] Rahimia M, Shabaniana S R, Alsairafib A A. Experimental and CFD studies on heat transfer and friction factor characteristics of a tube equipped with modified twisted tape inserts [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2009, **48**: 762-770
- [17] Chang S W, Yang T L, Liou J S. Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, **32**: 489-501
- [18] Chang S W, Yu K W, Lu M H. Heat transfer in tubes fitted with single, twin and triple twisted tapes [J]. *Experimental Heat Transfer*, 2005, **18**: 279-294
- [19] Sivashanmugam P, Suresh S. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics in laminar flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, **26**: 1990-1997
- [20] Sivashanmugam P, Suresh S. Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with helical screw-tape inserts [J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2007, **46**: 1292-1298