

文章编号:1672-3961(2011)02-0158-05

# 螺旋槽管内流动换热场协同分析

唐玉峰, 田茂诚, 冷学礼

(山东大学能源与动力工程学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**运用数值模拟结合场协同原理,对螺旋槽管内充分发展湍流的流动和换热进行了分析。模拟以空气为工质,管壁温度恒定,分别选取了4种不同的螺纹节距和螺纹高度组成的16组结构参数。讨论了螺纹凸起,以及螺纹节距、螺纹高度变化对螺旋槽管场协同性能和强化传热能力的影响。结果表明:利用场协同原理,可以解释结构参数的变化对螺旋槽管传热效果的影响,并能够对强化传热元件的结构优化提供指导。通过对比,模拟所得  $Nu$  数与实验所得  $Nu$  数关联公式的计算结果基本一致。

**关键词:**螺旋槽管;强化传热;场协同理论

**中图分类号:**TK124      **文献标志码:**A

## Field synergy analyses on inner flow and heat transfer characteristics of spirally corrugated tubes

TANG Yu-feng, TIAN Mao-cheng, LENG Xue-li

(School of Energy & Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** A numerical study combined with the field synergy principle was performed to investigate the flow and heat transfer of fully developed turbulent flow in a spirally corrugated tube. Air was selected as the working fluid and constant temperature was applied to the tube wall. Sixteen different structural parameters consisting of four different corrugation pitches and depths were considered. The effects of helical corrugation and changes of corrugation pitch and depth on field synergy performance and heat transfer enhancement of the enhanced tube were discussed. It indicates that the field synergy principle is efficient in explaining the effect of structural parameter changes on the heat transfer performance of spirally corrugated tubes and also is a guide to structural optimization of enhanced heat transfer elements. By contrast, the Nusselt number acquired from the numerical calculation is in relatively good agreement with the results of experimental correlation.

**Key words:** spirally corrugated tubes; heat transfer enhancement; field synergy principle

## 0 引言

强化传热是提高能源利用效率,降低设备能耗的重要手段,强化传热技术的种类很多<sup>[1,2]</sup>,其中螺旋槽管作为一种高效强化传热元件,由于其易于加工、传热性能优良而被广泛应用于能源、化工等工业领域。螺旋槽管自产生以来,始终是强化传热领域研究的热点。Wang 提出了用碳钢螺旋槽管替代铜

光管在高压加热器中的应用<sup>[3]</sup>,Vicente 通过对螺旋槽管中湍流流动时对流换热的研究发现,在高  $Re$  数下螺旋槽管  $Nu$  数要比光管提高 30% 以上<sup>[4]</sup>。Zimparov 通过实验建立了数学模型,用以对内置纽带螺旋槽管充分发展湍流流动的阻力及换热特性进行预测<sup>[5]</sup>。之前的研究,多是对螺旋槽管流动及换热的整体性能进行分析,通过对实验数据的拟合,得出其流动及换热的关联式<sup>[6]</sup>,且多为液体或蒸汽凝结换热,对于螺旋槽管强化传热的本质机理以及以

收稿日期:2010-06-24

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目计划(973 计划)资助项目(2007CB206903);山东省科技攻关项目经费资助项目(2007GG30007001);山东大学自主创新基金资助项目

作者简介:唐玉峰(1982-),男,山东德州人,博士研究生,主要研究方向为强化传热及节能技术. E-mail:tyf-sdu@foxmail.com

气体为工质的研究<sup>[7-8]</sup>开展的相对较少。本文对空气在螺旋槽管内的对流换热工况进行数值模拟,利用场协同原理对强化传热的效果进行分析,得出了螺距节距及螺纹高度对壁面场协同性能及传热性能的影响规律。过增元在场协同理论中指出,提高流体速度、传热温差等可以强化传热,而减小速度矢量与温度梯度间的夹角可以更有效地强化传热,并将场协同原理运用于强化传热的分析细化为3个基本原则:大值原则;匹配性原则;均匀性原则<sup>[9]</sup>。冷学礼提出了用算术平均协同角余弦衡量大值原则的方法,在此借助这种评价方法对螺旋槽管内对流换热及场协同进行分析<sup>[10]</sup>。

## 1 求解条件

图1为螺旋槽管模型,内径为 $D_{in}$ ,螺距节距为 $P$ ,螺纹高度为 $e$ ,分别选取表1所示16种几何结构参数进行了模拟。黏性模型选用重整化群(renormalization group, RNG)  $k-\varepsilon$  湍流模型,采用SIMPLEC算法耦合压力和速度,模拟了恒壁温下管内的对流换热。模型中设定入口为 $u_{in} = 10 \text{ m/s}$ 的均匀来流,温度 $T_{in} = 473 \text{ K}$ ,出口为自由出口,管壁流动服从无滑移边界条件,壁温恒为 $T_w = 300 \text{ K}$ 。这样,流体在入口处的速度、温度边界条件为

$$x=0, u=u_{in}, v=0, T=T_{in}. \quad (1)$$

出口处流动充分发展,边界条件为

$$x=L, \frac{\partial u}{\partial x}=0, \frac{\partial v}{\partial x}=0. \quad (2)$$

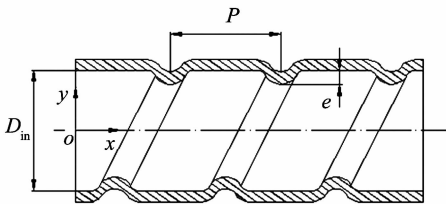


图1 单头螺旋槽管结构图

Fig. 1 Structure of single-start spirally corrugated tube

表1 螺旋槽管结构参数( $D_{in} = 37 \text{ mm}$ )

Table 1 Structural parameters of spirally corrugated tubes

$P/\text{mm}$	$e/\text{mm}$
10	1.17、1.53、1.71、2.0
16	1.17、1.53、1.71、2.0
20	1.17、1.53、1.71、2.0
30	1.17、1.53、1.71、2.0

管壁表面温度恒定,流体无滑移,边界条件为,

$$y=R_{in}, u=0, v=0, T_w=300 \text{ K}, \quad (3)$$

其中, $u$ 、 $v$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向上的速度( $\text{m/s}$ ), $L$ 、 $R_{in}$ 分别为螺旋槽管长度及内半径( $\text{m}$ )。

## 2 模拟结果及数据分析

### 2.1 参数定义

壁面的局部表面传热系数:

$$h = \frac{q}{T_w - T_f}, \quad (4)$$

其中, $q$ 为壁面热流密度( $\text{W/m}^2$ ), $T_w$ 、 $T_f$ 分别为壁面温度和流体温度( $\text{K}$ )。

场协同角为速度矢量与温度梯度的夹角,其定义式为<sup>[9]</sup>

$$\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{u} \cdot \nabla t}{|\mathbf{u}| |\nabla t|}\right). \quad (5)$$

算术平均协同角定义为<sup>[10]</sup>

$$\theta_{av} = \arccos\left(\frac{\int_S \cos\theta dS}{S}\right). \quad (6)$$

其中, $S$ 为管壁面积( $\text{m}^2$ )。

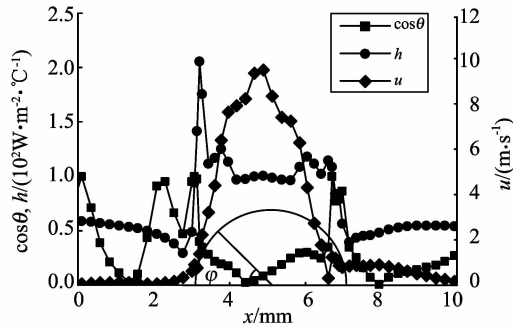
### 2.2 单个节距内的场协同及强化传热分析

图2为管壁上单个螺距节距内流动速度、表面传热系数、协同角余弦及速度与协同角余弦乘积的分布。图中 $\varphi$ 为螺纹突起的圆心角,在 $\varphi = 0^\circ \sim 45^\circ$ 的迎流面上,局部表面传热系数迅速升高,并在 $\varphi = 45^\circ$ 附近出现峰值,这是由于随着 $\varphi$ 的增加,壁面在 $y$ 方向的位置逐渐升高,上游水平壁面边界层对流动和换热的影响减弱造成的。之后随 $\varphi$ 的增加,边界层在螺纹凸起表面重新发展,导致表面传热系数逐渐降低。而在 $\varphi = 135^\circ$ 附近,绕流脱体形成的旋涡使表面传热系数再次出现峰值,其后随着流体离开螺纹表面而回落到平壁面上,换热性能降低。

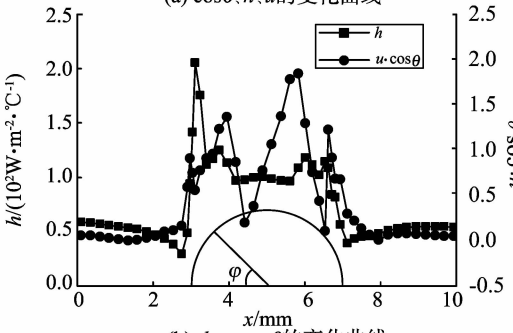
速度与协同角余弦的乘积,即为速度矢量在温度梯度方向上投影的大小,因为在对流换热中速度在温度梯度方向上的分量对换热才具有意义,该分量越大,对换热的强化作用越明显,因此可以将其作为一个强化传热效果的评价参数。从图2(b)中可以看出,表面传热系数变化趋势与该参数变化趋势基本一致,在螺纹突起的前后缘速度与协同角余弦的乘积出现极值的区域,表面传热系数均出现了极值。

在图2中,虽然螺纹凸起部分表面传热系数峰值的分布近似对称,但是其产生机理并不相同。如图3所示,在螺纹凸起的迎流面则是由于来流的冲击使换热得到强化,背流面则是由于流体绕流圆弧表面,发生绕流脱体,形成回流和旋涡,增强了边界区域与主流之间的质量交换,使得背流面的局部换热得到强化,但二者所产生的本质变化均是使得相应区域的场协同性能得到加强,这也反映了场协同原

理所阐述的强化传热本质。在螺纹凸起的顶部区域,流体速度较大而协同角余弦较小,根据场协同原理可知,协同角余弦的改善能够带来换热性能的较大提升,因此该区域具有提升换热性能的较大潜力。



(a)  $\cos\theta, h, u$ 的变化曲线



(b)  $h, u, \cos\theta$ 的变化曲线

图2 螺纹凸起部分  $u, \cos\theta, h$  的变化

Fig.2 Changes of  $u, \cos\theta$  and  $h$  at helical corrugation



图3 螺纹凸起的局部流线图

Fig.3 Local streamlines around helical corrugation

模拟结果显示,螺纹凸起部分的平均表面传热系数比平壁上提高约60%~120%,见图4,因此整个壁面的平均表面传热系数,螺旋槽管较之光管有显著提高。通过图3及图4可以看出,随着螺纹节距的增加,在背流面所形成的旋涡的影响范围之外,平壁部分的表面传热系数略有下降,因此螺距大小应该尽量与旋涡的影响范围相适应,以最大限度的获得好的强化传热效果,而旋涡的大小与 $Re$ 数以及流体的性质及螺纹的高度等因素有关,因此不同 $Re$ 数情况下对应有不同的最优结构参数。

### 2.3 螺旋槽管结构参数对换热性能的影响

#### 2.3.1 螺纹节距 $P$ 对换热性能的影响

从图5(a)中可以看出,螺纹高度相同的情况下,随着螺纹节距的增加,算术平均协同角余弦值逐渐减小,图5(b)中速度与协同角余弦的乘积也呈现相同的趋势。根据场协同原理,可以推断随螺旋槽管螺纹节距的增大,其换热性能逐渐变差。图5(c)为

模拟所得螺旋槽管与光管表面传热系数比值随螺纹节距的变化曲线,从中看出根据场协同原理做出的推断是正确的。

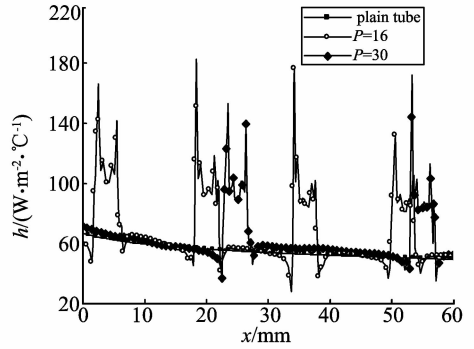
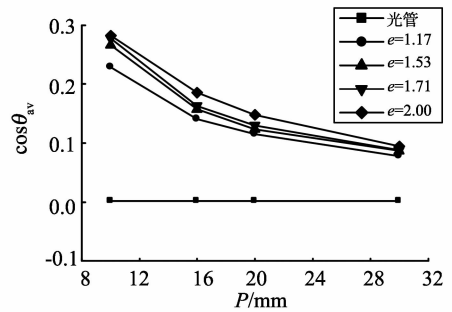
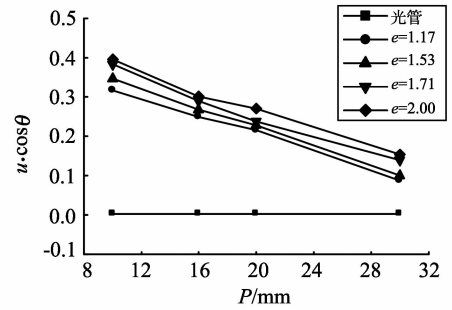


图4 螺旋槽管与光管的表面传热系数对比

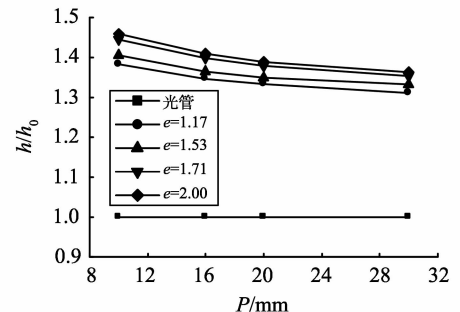
Fig.4 Comparison of heat transfer coefficient between plain tube and spirally corrugated tubes



(a)  $\cos\theta_{av}$ 随 $P$ 的变化曲线



(b)  $u \cdot \cos\theta$ 随 $P$ 的变化曲线



(c)  $h/h_0$ 随 $P$ 的变化曲线

图5 螺纹节距对换热性能的影响

Fig.5 Effects of corrugation pitches on heat transfer performance

在螺纹高度相同的情况下,由于随着螺纹节距的增加,单位长度内的螺纹凸起减少,壁面对流体流动的扰动效果减弱,场协同性能较好的区域所占比

重下降,整个壁面上的平均场协同性能变差,所以表面传热系数随螺纹节距的增大而逐渐降低。光管内壁面上的算术平均协同角余弦几乎为0,整个壁面上的场协同性能很差,导致其表面传热系数较低。从图5(c)中可以看出,光管的表面传热系数与螺旋槽管相差较大,最高可达45%以上。由图5(a)可知,螺纹节距越小,螺纹高度增加对算术平均协同角余弦值增大的影响越显著,即螺纹节距越小螺纹高度的增加对场协同性能的提升作用越大。

2.3.2 螺纹高度  $e$  对换热性能的影响

从图6(a)中看出,螺纹节距相同时,随着螺纹高度的增加,壁面的算术平均协同角余弦值逐渐增大,图6(b)中速度与协同角余弦的乘积呈现相同的趋势。根据场协同原理,可以推断随螺旋槽管螺纹高度的增加,其换热性能逐渐增强。图6(c)为模拟所得螺旋槽管与光管壁面传热系数比值随螺纹高度的变化曲线,从中也得到相同的结论。

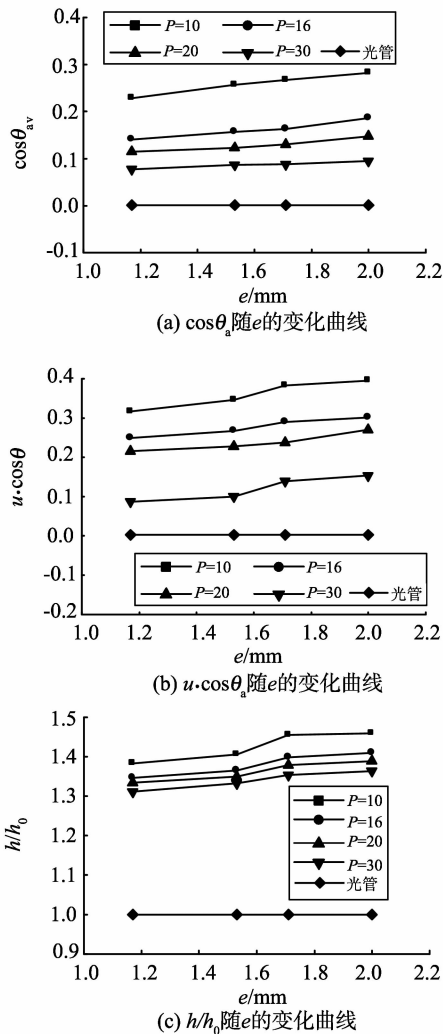


图6 螺纹高度变化对换热性能的影响  
Fig. 6 Effects of corrugation depths on heat transfer performance

但是螺纹高度的增加及螺纹节距的减小,均会带来流动阻力的增加,所以通过优化结构参数来实现强化传热,还要受到热力经济性的影响。

3 模型验证

为验证所选数值模型的可靠性,将平均  $Nu$  数的数值计算结果,与文献[7]实验关联式的计算结果进行了对比,如图7所示。

模拟中采用下式计算平均  $Nu$  数:

$$Nu = \frac{qD_{in}}{\lambda_f(T_m - T_w)}, \quad (7)$$

其中,  $q$  为壁面平均热流密度,  $\lambda_f$  为流体的热导率,  $T_m$  为计算区域的流体平均温度,  $T_w$  为壁面温度。

文献[7]中实验关联式为

$$Nu = 0.15Re^{0.78}Pr^{0.4}(P/e)^{-0.20}(e/D_{in})^{0.17}, \quad (8)$$

通过对比可以看出,平均  $Nu$  数的数值计算结果与实验关联式计算结果的相对误差基本上保持在  $\pm 10\%$  以内,说明所采用的数值模型是合理的。

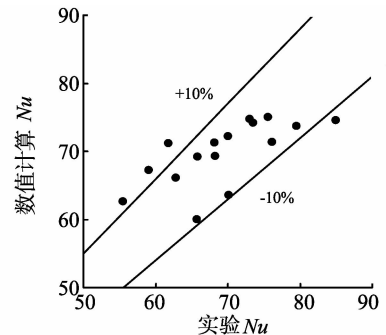


图7  $Nu$  数值计算与实验关联式计算结果的比较  
Fig. 7 Comparison of  $Nu$  between numerical results and experimental correlation results

4 结论

通过以上分析,对螺旋槽管内流动的对流换热与场协同性能得出以下结论:

- (1) 螺旋槽管螺纹凸起部分的场协同性能优于平管壁部分,使得整个壁面上的场协同性能显著提升,从而能够有效强化传热。
- (2) 螺纹高度不变时,随着螺纹节距的增加,整个壁面的平均协同角余弦逐渐减小,螺纹节距不变时,随着螺纹高度的增加整个壁面的平均协同角余弦逐渐增大,壁面的换热性能随之改变。
- (3) 螺纹凸起的顶部流速较大而协同角余弦较小,根据场协同原理该区域内协同角余弦值的改善将会在较大程度上提高整体的换热性能。

## 参考文献:

- [1] 崔永章, 田茂诚, 李广鹏. 内置折边扭带圆管内三维流动与传热数值模拟[J]. 山东大学学报: 工学版, 2010, 40(2): 143-148.  
CUI Yongzhang, TIAN Maocheng, LI Guangpeng. 3D numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a circular tube with edge-fold-twisted-tape inserts[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2010, 40(2): 143-148.
- [2] 翟明, 董芃, 王希影, 等. 圆管湍流脉动流动与换热的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(20): 85-91.  
ZHAI Ming, DONG Peng, WANG Xiying, et al. Numerical simulation of turbulent pulsating flow and heat transfer in tubes[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(20): 85-91.
- [3] WANG L J, SUN D W, LIANG P, et al. Heat transfer characteristics of carbon steel spirally fluted tube for high pressure preheaters[J]. Energy Conversion and Management, 2000, 41(10): 993-1005.
- [4] VICENTE P G, GARCIA A, VIEDMA A. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of spirally corrugated tubes in turbulent flow at different Prandtl numbers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(4): 671-681.
- [5] ZIMPAROV V. Prediction of friction factors and heat transfer coefficients for turbulent flow in corrugated tubes combined with twisted tape inserts. Part 1: friction factors [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(3): 385-393.
- [6] NAPHON P, NUCHJAPO M, KURUJAREON J. Tube side heat transfer coefficient and friction factor characteristics of horizontal tubes with helical rib[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(18-19): 3031-3044.
- [7] 张华, 周强泰. 螺旋槽管强化管内换热试验研究[J]. 发电设备, 2003, 4: 24-27.  
ZHANG Hua, ZHOU Qiangtai. Experimental investigation on inner heat transfer of spirally corrugated tubes[J]. Power Equipment, 2003, 4: 24-27.
- [8] 陆国栋, 周强泰, 田茂诚, 等. 空气横掠顺列螺旋槽管和光管管束的传热特性[J]. 中国动力工程学报, 2005, 25(1): 44-49.  
LU Guodong, ZHOU Qiangtai, TIAN Maocheng, et al. Heat transfer characteristics of air flowing across bundles of rifled and bare tubes in aligned arrangement[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(1): 44-49.
- [9] 过增元, 黄逸素. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 2-11.
- [10] 冷学礼, 张冠敏, 田茂诚, 等. 场协同原理在对流换热中的应用方法[J]. 热能动力工程, 2009, 24(3): 352-354.  
LENG Xueli, ZHANG Guanmin, TIAN Maocheng, et al. Methods for applying field synergy principle in convection heat exchange[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2009, 24(3): 352-354.

(编辑: 陈燕)