

# 螺旋槽管管内传热与流动性能的数值模拟研究

吴锦京<sup>1</sup>, 曹侃<sup>2</sup>, 魏新利<sup>3</sup>

(1. 丽水学院理学院, 浙江 丽水 323000; 2. 河南省过程传热与节能重点实验室, 河南 郑州 450002; 3. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 采用数值模拟方法对以空气为介质的7根螺旋槽管的传热及流阻性能进行了计算, 并与圆形光滑管进行了比较. 分析了螺旋槽管强化传热机理, 发现其场协同程度得到改善是其传热得到强化的主要原因. 同时还分析了管内  $Re$  数、槽深  $e$ 、节距  $p$  以及滚球半径  $r$  对螺旋槽管换热与流阻性能的影响, 结果表明: 在相同流量下, 节距一定时, 槽深越深, 换热效果越好, 同时阻力也越大; 槽深一定时, 节距越小, 流体边界层分离作用越明显, 管内换热越强, 流动阻力也随之增大; 滚球半径对传热影响比较小, 但是对流动阻力的影响却比较大.

**关键词:** 数值模拟; 螺旋槽管; 强化传热; 场协同原理

**中图分类号:** TK124 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2013.00.009

## 0 引言

在石油、化学工业中, 为最大限度地利用热能、降低设备能耗, 换热设备进行强化传热研究越来越受到人们的关注. 人们开发出了各种高效异形强化管, 如螺旋槽管、横纹槽管、螺纹翅片管、缩放管、波纹管及各种粗糙管等, 并对其流动和传热特性进行了大量研究, 取得了丰富的成果<sup>[1~4]</sup>. 在诸多的强化管中, 带波状表面的螺旋槽管与其他强化管相比, 易于加工, 抗污垢性能较好, 易清洗, 强化传热效果好, 因而广泛用于能源、化工等工业领域. 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>[5]</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>[6]</sup>. 唐玉峰等人对空气在螺旋槽管内的对流换热工况进行数值模拟, 并利用场协同原理对强化传热的效果进行分析, 得出了螺纹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<sup>[7]</sup>. 由于不同的研究者所采用的实验方法不同, 所得到的实验关联式相差较大, 因此为了更好地研究螺旋槽管内部流动与传热的情况, 有必要对其进行数值模

拟研究.

笔者采用周期模型以空气为介质对7根螺旋槽管的传热及流阻性能进行了数值模拟, 并与圆形光滑管进行了比较. 首先分析了螺旋槽管强化机理, 认为其场协同程度得到改善是其传热效果强于光滑管的根本原因. 同时还分析了管内  $Re$  数、槽深  $e$ 、节距  $p$  以及滚球半径  $r$  对螺旋槽管换热与流动阻力性能影响, 可为换热器设计与改造提供理论依据.

## 1 计算模型和数值验证

### 1.1 数值计算模型

笔者计算了7种不同结构参数的螺旋槽管, 并将其与光管进行了对比. 管子均选用  $\Phi 40 \times 2$  mm 的有缝钢管, 分别考虑了槽深  $e$ 、节距  $p$  以及滚球半径  $r$  的影响. 其具体结构参数见表1.

螺旋槽管的管内流动属于一种以几何周期通道为周期的复杂流动, 当其充分发展时可以截取管道的1个或者几个周期进行研究, 笔者选取了3个周期进行模拟求解. 利用大型 CFD 软件 Fluent 对其建立数值模型, 采用非结构化的四面体网格进行网格划分, 最后对其进行网格无关性验证,

收稿日期:2013-01-02; 修订日期:2013-02-20

基金项目: 河南省杰出人才创新基金资助项目(0621001600)

作者简介: 吴锦京(1984-), 女, 浙江丽水人, 丽水学院教师, 硕士, 主要从事能源利用及过程装备与系统的优化等研究, E-mail: wjjkitty@gmail.com.

网格数量大约为  $6.1 \times 10^4$ . 笔者采用标准  $k-\varepsilon$  模型,压力—速度耦合采用 Simple 算法,动量和能量方程均采用二阶迎风离散格式. 收敛条件能量方程为  $10^{-8}$ ,其余均为  $10^{-6}$ . 边界条件设置:进出口设为周期性边界条件,质量流量给定;空气温度设为室温,物性假设为常物性,  $T_i = 295\text{ K}$ ;壁面设为恒壁温,  $T_w = 393\text{ K}$ ,无滑移边界条件.

表 1 螺旋槽管结构参数

Tab. 1 Structural parameters of spirally fluted tubes

管号	节距	槽深	滚球半径	$e/d$	$p/d$	$r/d$
		$e/\text{mm}$	$r/\text{mm}$			
1	20	1.0	2.0	0.025 0	0.500	0.050 0
2	20	1.5	2.0	0.037 5	0.500	0.050 0
3	20	2.0	2.0	0.050 0	0.500	0.050 0
4	15	2.0	2.0	0.050 0	0.375	0.050 0
5	25	2.0	2.0	0.050 0	0.625	0.050 0
6	20	2.0	2.5	0.050 0	0.500	0.062 5
7	20	2.0	3.0	0.050 0	0.500	0.075 0

1.2 数值模拟验证

为验证数值模拟的正确性,将数值模拟结果与笔者实验结果<sup>[8]</sup>进行对比. 实验台为不同实验管与管壳所组成的套管式换热器,其中过量饱和水蒸气在换热器壳侧冷凝,管内走空气. 整套实验装置由供料系统、数据采集和处理系统以及套管换热器 3 部分组成. 具体流程及实验误差分析文献<sup>[8]</sup>已给出. 其中采用数值模拟与实验对照的螺旋槽管的主要结构参数为:  $e = 1.2\text{ mm}$ ,  $p = 20\text{ mm}$ ,  $r = 2\text{ mm}$ . 计算结果如图 1、图 2 所示,可以发现阻力系数模拟值与实验值最大误差不超过 5%,换热误差最大不超过 7%,从而证明数值模拟方法的正确性,使用周期性模型对其进行数值模拟是可行的.

2 强化传热机理简析

国内外学者对螺旋槽管强化换热机理作了大量研究,认为一方面由于螺旋槽的引导作用使近壁处流体发生旋转,加强了径向扰动;另一方面,由于一部分流体顺壁面轴向流动通过螺旋槽纹凸起处产生轴向涡流,引起边界层分离从而加快了由壁面至流体主体的热量传递<sup>[9]</sup>.

场协同原理<sup>[10]</sup>指出,对流换热的强度,不仅取决于流速、温度和流体物性,还取决于速度场与温度场的协同程度,因此笔者主要从这个方面进行考察. 自从过增元院士提出该原理以来,许多学

者对其进行了大量研究,但是对于场协同的评价标准至今还没有统一. 现有的场协同夹角计算方法可以分为算数平均角、体积平均角、模平均角、矢量点平均角、整体平均角 5 种. 笔者根据周俊杰等人<sup>[11]</sup>的分析,采用模平均角的计算公式来计算场协同角,以此作为螺旋槽管强化传热场协同性的评价指标进行研究.

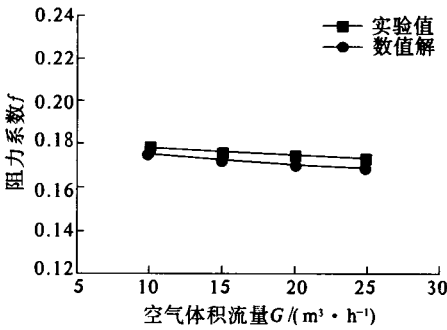


图 1 实验与数值模拟阻力系数  $f$  对比  
Fig. 1 Comparison of  $f$  between simulation and experimental data

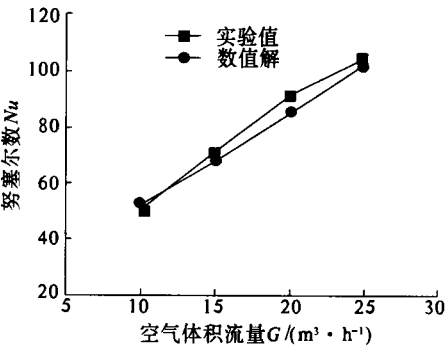


图 2 实验与数值模拟  $Nu$  数对比  
Fig. 2 Comparison of  $Nu$  between simulation and experimental data

通过流量一定时(流量  $Re = 10\,000$ ),对 3 号管和光管进行数值模拟,验证上述螺旋槽管传热强化机理. 通过计算其场协同角,得到光管的体平均场协同角  $\beta$  为  $88.93^\circ$ ,而 3 号管的体平均场协同角  $\beta$  为  $87.83^\circ$ . 由场协同原理<sup>[10]</sup>可以知道,场协同角越接近  $90^\circ$ ,速度和温度矢量之间的场协同效果越差,即管内流体流动对管内的换热几乎不起作用,管内流体与外界的换热主要是通过管壁边界层与外界导热进行,故光管的换热效果比 3 号管差. 笔者还计算了其他几根螺旋槽管在相同流量下的场协同角,发现均比光管的场协同角小,说明螺旋槽管的螺旋槽结构改善了其内部流场与温度场之间的场协同程度,其换热效果也较光管更好.

### 3 数值模拟结果及数据分析

#### 3.1 槽深 $e$ 对流动和换热的影响

图3和图4为3种不同槽深螺旋管的阻力系数  $f$  和  $Nu$  数随  $Re$  变化曲线. 从图3中可以明显看出螺旋槽管螺距一定时, 其  $Nu$  随流量变大而增大. 这主要是因为槽深越大, 边界层受到的分离和旋转越大, 槽深过大时, 起到很强的搅拌作用, 加剧了边界层的扰动, 使得边界层内产生了二次流和旋转流, 降低了壁面热阻, 所以增强了传热效果. 从图3可以看出槽深越深, 其  $Nu$  数比光管增加的幅度就越大, 3号管  $Nu$  数为66.4~194.2, 而光管的  $Nu$  数为33.2~111.7, 即3号管  $Nu$  数约为光管的1.7~2.0倍. 从图4可以看出, 在流量和节距一定时, 很明显槽深越深, 其阻力系数越大. 这是因为, 槽深越大, 流体的突缩、突扩作用越明显, 边界层的脱离程度加大, 边界层内的流体出现回流甚至出现漩涡, 导致流体的能量出现很大的损失. 笔者计算的管子中, 最大阻力系数为0.1972, 约为光管的6.8倍. 因此结合上述两图, 可以发现增加强化传热效果往往是以增加阻力降和泵功为代价的.

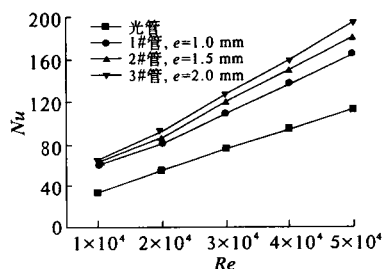


图3 不同槽深下换热  $Nu$  比较  
Fig. 3  $Nu$  number vs fluted depth

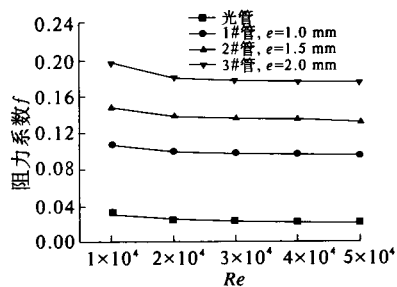


图4 不同槽深下阻力系数  $f$  比较  
Fig. 4 Coefficient of resistance  $f$  vs fluted depth

#### 3.2 节距 $p$ 对流动和换热的影响

图5和图6为3种不同节距螺旋槽管的阻力系数  $f$  和  $Nu$  数随  $Re$  变化曲线图. 从图中可以看

出, 当槽深一定时, 节距越小, 换热效果越好, 阻力系数越大. 其中4号管  $Nu$  数约比光管增加了0.7~0.9倍, 阻力系数约为光管的7~9倍. 这主要是因为槽深一定时, 若采用大节距, 则在相邻两个螺旋槽之间的壁面上会出现这样一段区域, 在这段区域中前一个螺旋槽产生的对边界层的扰动已经减弱, 但后一螺旋槽对边界层的扰动作用尚未形成, 并且这段区域随着节距的增加而增加. 所以, 在相同槽深、相同流量情况下, 节距越小对流体边界层的分离作用越明显, 从而使换热增强, 同时阻力变大.

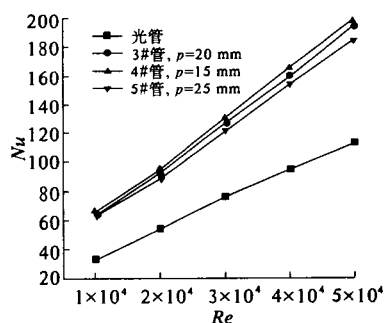


图5 不同节距下换热  $Nu$  数比较  
Fig. 5  $Nu$  number vs pitch

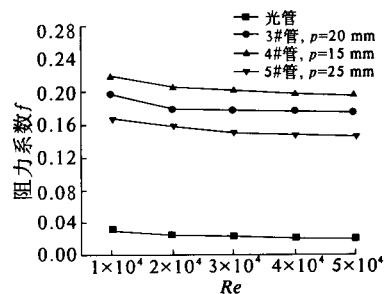


图6 不同节距下阻力系数  $f$  比较  
Fig. 6 Coefficient of resistance  $f$  vs pitch

#### 3.3 滚球半径 $r$ 对流动和换热的影响

以往的许多研究者在整理实验关联式的时候只将槽深  $e$  和节距  $p$  作为主要结构参数加以考虑, 而忽略螺旋槽管凸出物形状对其的影响, 鉴于此, 笔者对凸出物形状进行了分析. 目前螺旋槽管加工方式有轧制法; 拉拔法、滚压法. 笔者所考虑的加工制造方法为滚压法. 就是利用带滚轮的滚压工具, 以一定的压力在待加工管材表面作相对滚动, 使金属表面产生塑性变形, 加工出圆弧形、锥形凹槽以及其它形状的外表面. 凸出物轮廓线可看成由不同曲率半径的圆弧相切而成, 文中用滚压工具形成的凸出物圆弧半径  $r$  来表征凸出物的形状.

通过对比3种不同滚球直径螺旋槽管,如图7、8所示,可以发现在研究范围内,滚球半径对于换热的影响比较小,在相同流量下,7号管的阻力系数与3号管相比最多可以减小约16%,可见滚球半径 $r$ 对阻力的影响比较大,因此在符合加工要求的前提下,建议尽量减小滚球半径的大小,以减小所需的阻力降和泵功。

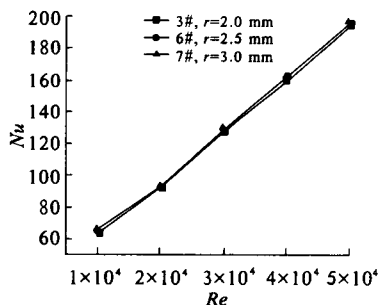


图7 不同滚球半径下  $Nu$  数比较

Fig.7  $Nu$  number vs bowls radius

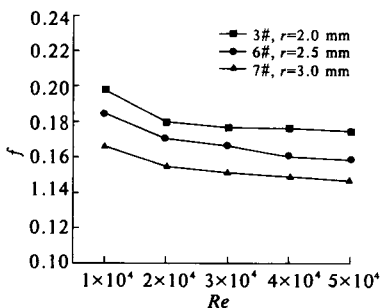


图8 不同滚球半径下阻力系数  $f$  比较

Fig.8 Coefficient of resistance  $f$  vs bowls radius

#### 4 结论

(1)通过数值模拟,研究了以空气为介质的7根不同结构参数螺旋槽管中的流动与传热特性,并与光管进行对比,结果表明螺旋槽管传热与流阻性能明显好于光管。

(2)分析了螺旋槽管强化传热的机理,认为其场协同程度得到改善是其传热效果强于光管的主要原因。

(3)在相同流量下,节距一定时,槽深越深,换热效果越好,但同时阻力也越大。

(4)在相同流量下,槽深一定时,节距越小,流体边界层分离作用越明显,使得管内换热越强,流动阻力也随之增大。

(5)对螺旋槽管制造时的滚球半径进行了初

步探讨,结果表明滚球半径对换热的影响比较小,对流动阻力的影响却比较大。

#### 参考文献:

- [1] 黄维军,邓先和,周水洪. 缩放管强化传热机理分析[J]. 流体机械, 2006, 34(2):76-79.
- [2] 崔海亭,袁修干,姚仲鹏,等. 异型凹槽螺旋槽管传热及流动阻力的实验研究[J]. 中国机电工程学报, 2003,23(6):217-220.
- [3] 邓先和,邓颂九. 管间支撑物的结构对横纹槽管管束传热强化性能的影响[J]. 化工学报, 1992, 43(1):62-67.
- [4] RAINIERI S, PAGLIARINI G. Convective heat transfer to temperature dependent property fluids in the entry region of corrugated tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 24(8):4525-4536.
- [5] 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.
- [6] ZIMPAROV V. Prediction of friction factors and heat transfer coefficients for turbulent flow in corrugated tubes combined with twisted tape inserts. Part1: friction factors[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(3):385-393.
- [7] 唐玉峰,田茂诚,冷学礼. 螺旋槽管内流动换热场协同分析[J]. 山东大学学报:工学版,2011, 41(2):158-162.
- [8] CAO Kan, DONG Qi-wu, LIU Min-shan. Experimental investigation on heat transfer and flow resistance characteristics of spirally fluted tubes[C]. The 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011:4956-4959.
- [9] 过增元,黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京:中国电力出版社,2004,217-223.
- [10] GUO Zeng-yuan, LI De-yu, WANG B X. A novel concept of convective heat transfer enhancement[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(14):2221-2225.
- [11] 周俊杰,陶文铨,王定标. 场协同原理评价指标的定性分析和定量探讨[J]. 郑州大学学报:工学版,2006,27(2):45-47.

## Numerical Simulation on Heat Transfer and Flow Resistance Characteristics of Spirally Fluted Tubes

WU Jin-jing<sup>1</sup>, CAO Kan<sup>2</sup>, WEI Xin-li<sup>3</sup>

(1. School of Sciences, Lishui University, Lishui 323000, China; 2. Key Laboratory of Process Heat Transfer and Energy Saving of Henan Province, Zhengzhou 450002, China; 3. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A comparative numerical investigation was carried out for heat transfer and flow resistance characteristics of smooth tube and 7 spirally fluted tubes with various structural parameters. This paper pointed out that the improvement of the synergy of velocity and temperature fields enhanced the heat transfer of spirally fluted tubes. The main influence factors of heat transfer and flow characteristics of spirally fluted tubes were also analyzed in the paper, such as Reynolds number, fluted depth, pitch and bowls radius. The results show that at the same flow rate and pitch, with the increase of fluted depth, heat transfer improves gradually, and the flow resistance also increases. And then at the same flow rate and fluted depth, with the smaller pitch, the more obvious separation of the fluid boundary layer, which leads to the improvement of heat transfer and the increase of flow resistance. Bowls radius has a little influence on heat transfer, but it has a great impact on flow resistance.

**Key words:** numerical simulation; spirally fluted tube; heat transfer enhancement; field synergy principle

(上接第 31 页)

[14] LI Zhen-hua, CHANG Xi-jun, ZOU Xiao-jun, et al. Chemically-modified activated carbon with ethylenediamine for selective solid-phase extraction and preconcentration of metal ions [J]. *Anal Chim Acta*, 2009, 632(2): 272 - 277.

[15] 王丽, 王爱琴. 壳聚糖/蒙脱土纳米复合材料的制备及对染料的吸附性能[J]. *高分子材料科学与工程*. 2007, 23(5): 104 - 107.

[16] BULUT E, OZACAR M, SENGIL I A. Equilibrium and kinetic data and process design for adsorption of Congo Red onto bentonite [J]. *J Hazard Mater*, 2008, 154 (1/3): 613 - 622.

[17] MOUSSAVI G, KHOSRAVI R. The removal of cationic dyes from aqueous solutions by adsorption onto pistachio hull waste [J]. *Chem Eng Res Des*, 2011, 89 (10): 2182 - 2189.

## Study on Congo Red Adsorption with Ethylenediamine Modified Sawdust

ZOU Wei-hua, LI Ke, GAO Shuai-peng, BAI Hong-juan

(School of Chemical Engineering and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The potential feasibility of ethylenediamine modified sawdust as the adsorbent for removal of anionic dye of congo red from aqueous solution was investigated. The experiments were carried out as function of pH, salt concentration, temperature, initial concentration and contact time. The results show that the sawdust modified with ethylenediamine made the adsorption capacity of congo red increase. By functionalizing, the adsorption capacity ( $q_m$ ) of sawdust for congo red was increased from 6.99 to 14.77 mg/g at 298 K. The equilibrium data agreed well with the Freundlich model. The pseudo-second order and the intra-particle diffusion model were used for discussing the kinetics and mechanism of adsorption of congo red. The adsorption of congo red can be divided into two phases: membrane diffusion and particle internal diffusion. The best desorption method for saturated sawdust was NaOH.

**Key words:** ethylenediamine; sawdust; congo red; adsorption; kinetic study; regeneration