

文章编号:1671-6833(2017)03-0010-05

内置扭带管内湍流流动与传热数值模拟

吴金星, 王超, 王明强, 刘艳会, 李亚飞

(郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了提高内置扭带管的综合性能, 开发了一种三边扭带, 并对空管、普通扭带管、格栅扭带管及三边扭带管内流体流动与传热特性进行了数值模拟。以水为工质, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 扭带扭率 $\gamma=2.0$, 取 $Re=5\,000\sim30\,000$, 计算了扭带管内努赛尔数 Nu 、阻力系数 f 和综合性能评价因子 η , 与同工况下空管进行了对比。结果表明, 相比于空管、普通扭带管和格栅扭带管, 三边扭带管的综合性能较好, 其 η 值比空管高出 11.9%~33.2%。

关键词: 普通扭带; 格栅扭带; 三边扭带; 强化换热; 数值模拟

中图分类号: TK172 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.018

0 引言

采用强化换热技术提高换热器效率是当前换热器研究领域的一项重大课题。管内插入扭带是一种简单实用的强化传热技术。Manglik、Bergles^[1-2] 以及 Samar 等^[3] 较早地实验研究了螺旋扭带的强化传热特性, 并总结出内置扭带管强化传热的 3 种机理: ①当量直径的减少引起流体流速的增加; ②螺旋结构引起流体流程的增加; ③管内二次流引起管壁切应力的增大并增强了流体的掺混。朱登亮等^[4] 模拟研究了传热系数、压降与雷诺数及湍流动能的关系, 提出应使换热器的湍流动能限制在一定的范围内, 以获得较好的综合性能。张琳等^[5-6] 模拟了扭带管内自旋扭带管内流体流动及传热特性, 发现扭带管内流体近壁区域轴向、切向、径向速度和湍流强度的加大, 强化

了管内的对流传热。王特等^[7] 模拟研究了多种内置交替轴扭带管内层流换热特性, 发现交替轴窄边中空扭带具有较好综合性能。

国内外学者研究表明^[8-11], 管内插入扭带在强化换热的同时, 流动阻力也迅速增大, 强化传热综合性能欠佳, 同时对于不同类型内置扭带管的性能对比研究较少。

笔者开发了一种三边扭带, 并运用 CFD 软件模拟研究了普通扭带管、格栅扭带管及三边扭带管内的流体流动与传热特性, 并与空管进行了对比分析, 用流体流动和传热理论对内置扭带管的综合性能进行分析评价。

1 模型的建立与模拟方法

1.1 几何模型

普通扭带、格栅扭带和三边扭带如图 1 所示。

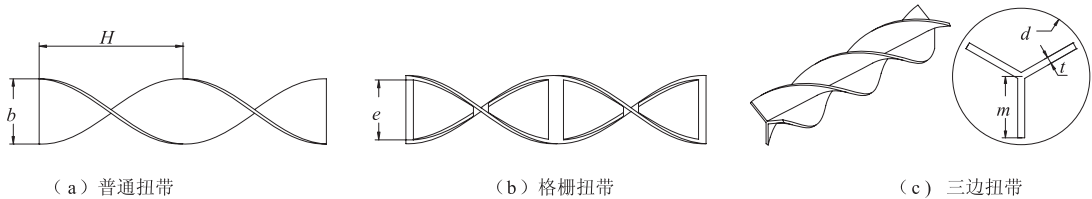


图 1 普通扭带、格栅扭带和三边扭带结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of typical twisted tape, grid spiral tape and 3-edge twisted tape

收稿日期:2016-06-07; 修订日期:2016-08-25

基金项目:河南省重点科技攻关计划项目(132102210406); 郑州市科技攻关计划项目(141PPTGG410)

通信作者:吴金星(1968—), 男, 河南通许人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事强化传热及节能技术研究, E-mail: wujx@zzu.edu.cn.

普通扭带的几何参数主要有:扭带宽度 b ,扭带半节距 H ,即扭带扭转 180° 对应的长度,扭率 $y = H/d$. 在普通扭带上面间隔轧出一定尺寸的方孔就形成了格栅扭带,方孔沿轴向均布;三边扭带是将三片金属薄板焊接后扭曲而成,邻边夹角为 120° .

内置扭带管的全流道模型主要参数有:换热管内径 $d = 20.0\text{ mm}$,全长 $L = 600\text{ mm}$,进出口留有 20 mm 空管段,所有扭带厚度 $t = 1.0\text{ mm}$,扭带半节距 $H = 40.0\text{ mm}$,扭带宽度 $b = 18.0\text{ mm}$,扭率 $y = 2.0$,三边扭带边高 $m = 9.0\text{ mm}$,格栅扭带开孔边长 $e = 16.0\text{ mm}$. 模拟的流体 $Re = 5\,000 \sim 30\,000$,对应的流体流速为 $0.25 \sim 1.5\text{ m/s}$.

1.2 模拟方法及模型验证

分别建立普通扭带管、格栅扭带管及三边扭带管及空管的几何模型,划分六面体网格,并对近壁面网格细化处理. 划分 5 套网格,计算 $Re = 10\,000$ 时的 Nu 和 f . 当网格数量为 72.84×10^4 时即可满足网格无关性要求. 为保证模拟精确,选择网格数目为 140.76×10^4 . 流道采用速度进口,压力出口,管壁面温度设为 330 K ,扭带表面设为绝热壁面.

模拟 $Re = 5\,000 \sim 25\,000$ 时的 Nu 与 f 值,并与 Manglik and Bergles 经验公式^[2] 进行了对比,结果如图 2 所示. 模拟得到的 Nu 值与实验值最大误差在 10% 以内;模拟得到的 f 值与实验值误差大部分都在 15% 以内,因此模拟结果满足准确性要求.

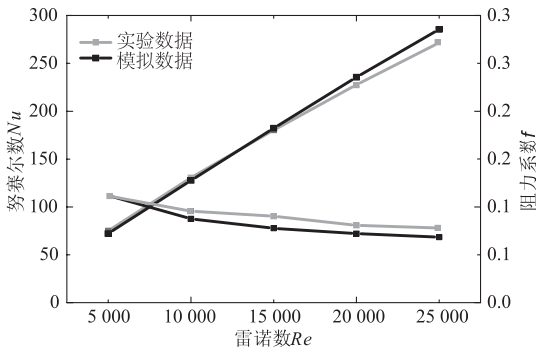


图 2 数值模拟结果与实验结果对比

Fig. 2 Comparison of simulation and experiment

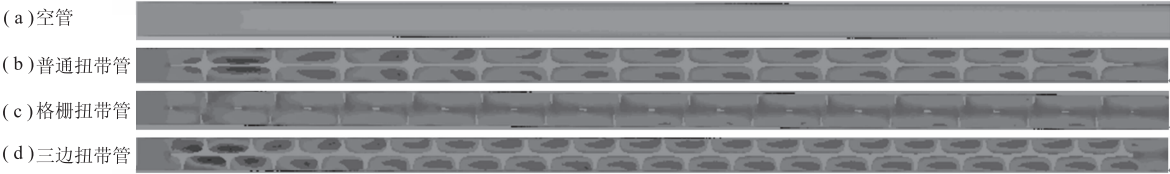


图 3 空管及内置扭带管轴向速度分布云图

Fig. 3 Contour plots of velocity on the axial plan of tubes

2 模拟结果与分析

2.1 速度与温度分布特性

图 3 为内置扭带管轴向速度分布云图. 云图显示:三边扭带管内两侧区域流体速度变化剧烈,速度梯度较大,普通扭带次之,格栅扭带较小. 图 4 为内置扭带管中心横截面速度分布云图,云图显示:各种扭带管内流体的速度分布均呈漩涡状,而三边扭带管内流体呈现 3 个螺旋流动. 可见三边扭带的旋流作用较强,从而使流体产生径向及切向流动,加强了壁面区流体与中心区流体的掺混,管内速度梯度较大. 格栅扭带因中心开孔较大,导致旋流作用较弱,速度梯度较小.

图 5 为扭带管轴向温度分布云图. 云图显示:三边扭带管内低温区长度较短,格栅扭带管低温区长度较长. 图 6 为中心横截面的温度分布云图. 云图显示:三边扭带低温区面积较小,温度梯度较大,热流密度较高. 格栅扭带的温度分布状况较差,主要是因为中间开孔的阻隔减弱了流体的旋流,从而减弱了壁面区流体与中心区流体的掺混,造成温度梯度较小,对流换热效率较低.

2.2 传热和阻力性能分析

3 种内置扭带管及空管的 Nu 随 Re 的变化规律如图 7 所示. 结果表明:同等条件下,三边扭带管的 Nu 较大,比空管提高 $70\% \sim 116\%$,比普通扭带管提高 $8.34\% \sim 9.72\%$,普通扭带管和格栅扭带管的 Nu 相差不大.

3 种内置扭带管及空管的阻力系数 f 随 Re 的变化规律如图 8 所示. 由图 8 可以看出,三边扭带管的 f 高于普通扭带管,低于格栅扭带管. 格栅扭带呈现较大 f 值的原因在于:流体流经开孔处时,由于管中心低压区的存在,使周围高压区的流体产生流经方孔的横向流动,扭带区域内的流体速度分布混乱,致使流动阻力增大,同时因为中间肋的阻碍作用也使得流动阻力进一步增大.

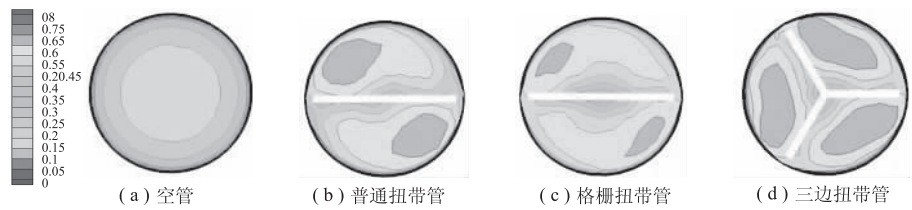


图 4 空管及内置扭带管中心横截面速度分布云图

Fig. 4 Contour plots of velocity on the middle cross-section plan of tubes

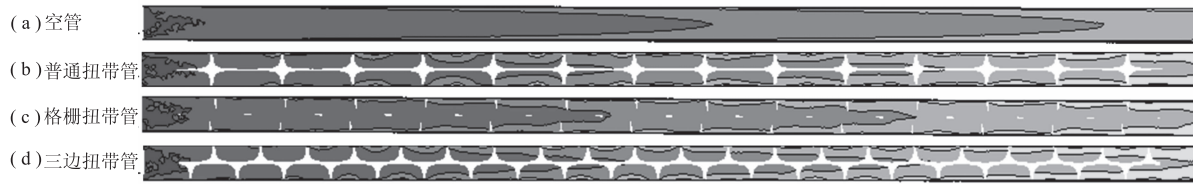


图 5 空管及内置扭带管轴向温度分布云图

Fig. 5 Contour plots of temperature on the axial plane of tubes

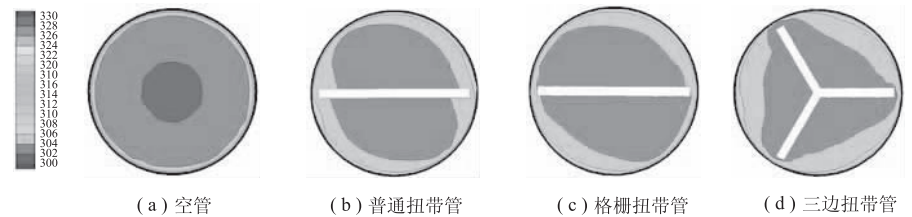


图 6 空管及内置扭带管中心横截面温度分布云图

Fig. 6 Contour plots of temperature on the middle cross-section plane of tubes

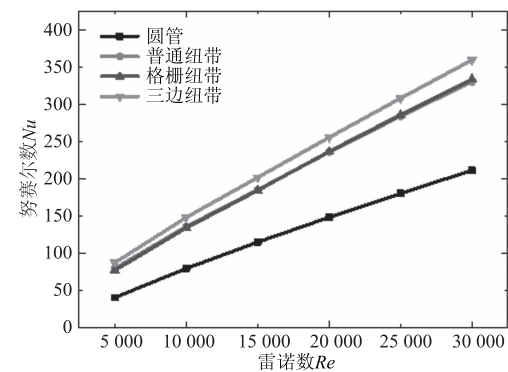


图 7 内置扭带管 Nu 随 Re 的变化规律

Fig. 7 Variation of Nu of tubes with twisted tape inserts

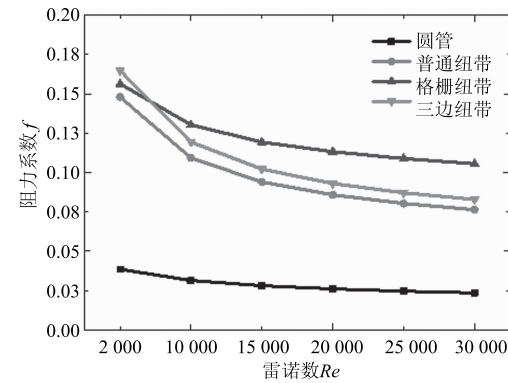


图 8 内置扭带管 f 随 Re 的变化规律

Fig. 8 Variation of f of tubes with twisted tape inserts

2.3 综合评价及场协同分析

基于等泵功评价指标,用综合性能评价因子 η 来评价不同内置扭带管的综合性能, η 越大表明其综合性能越好, η 的定义如下:

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

根据场协同原理^[12-13],提高速度矢量和温度梯度矢量的协同程度可强化传热,采用场协同数 Fc ^[14] 来分析流场的协同程度, Fc 越大,表明整个流场的协同性越好. Fc 的定义如下:

$$Fc = \frac{\int \vec{U} \cdot \nabla T d\vec{y}}{Re \cdot Pr} = \frac{Nu}{Re \cdot Pr}$$

不同扭带管的综合性能评价因子 η 随 Re 的变化规律如图 9 所示. 可以看出,在模拟 Re 范围内,各内置扭带管的综合评价因子 η 随着 Re 增加而降低,这是由于随着雷诺数的增加,管内流体滞留层减薄到一定程度,通过破坏边界层的方式进行强化换热的能力逐渐弱化. $Re = 5\ 000 \sim 15\ 000$ 时,各扭带管的 η 值在 $1.0 \sim 1.33$,强化换热效果明显; $Re > 15\ 000$ 时,只有普通扭带和三边扭带的 η 值在 1.0 以上,三边扭带管的 η 值较大,比空管高出 $11.9\% \sim 33.2\%$.

不同扭带管的场协同数 Fc 随 Re 的变化规律

如图10所示.可以看出,场协同数 F_c 随着 Re 的增大而减小,说明流速越高,场协同性能越差.通过对比发现,三边扭带管的场协同数较大,流体的整场协同性较好;普通扭带管和格栅扭带管的场协同数相差不大,均小于三边扭带管.

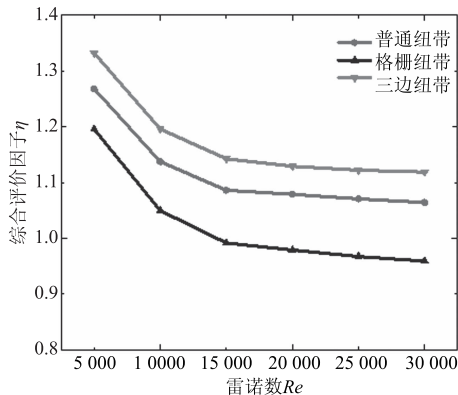


图9 各内置扭带管 η 随 Re 的变化规律

Fig.9 Variation of η of tubes with twisted tape inserts

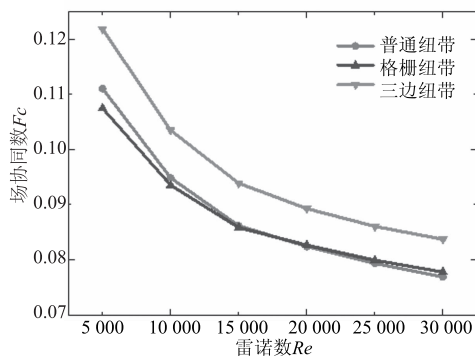


图10 各内置扭带管 F_c 随 Re 的变化规律

Fig.10 Variation of F_c of tubes with twisted tape inserts

3 结论

为了提高内置扭带管的综合性能 η 值,开发了一种三边扭带,同时模拟研究了空管、普通扭带管、格栅扭带管以及三边扭带管内的流体流动与传热特性,得到的主要结论如下:

(1)3种内置扭带管的 Nu 均随着 Re 的增大而增大,同等条件下三边扭带管的 Nu 较大,比空管提高70%~116%,比普通扭带管提高8.34%~9.72%,普通扭带管和格栅扭带管的 Nu 相差不大.

(2)3种内置扭带管的 f 随着 Re 的增大而递减,同等条件下三边扭带管的阻力系数 f 高于普通扭带管,低于格栅扭带管.

(3)在模拟的雷诺数范围内,三边扭带管的综合性能 η 较好,比空管高出11.9%~33.2%;格栅扭带的综合性能 η 较差, $Re > 15\,000$ 时,格

栅扭带的 η 值小于1.0.

(4)三边扭带管的场协同数较大,流体的整场协同性较好;普通扭带管和格栅扭带管的场协同数相差不大,均小于三边扭带管.

参考文献:

- [1] MANGLIK R M, BERGLES A E, Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes, part I: laminar flows[J]. Journal of heat transfer, 1993, 115(4): 881-889.
- [2] MANGLIK R M, BERGLES A E, Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes, part II: transition and turbulent flows[J]. Journal of heat transfer, 1993, 115(4): 890-896.
- [3] SARMA P K, SUBRAMANYAM T, KISHORE P S, et al. Laminar convective heat transfer with twisted tape inserts in a tube[J]. International journal of thermal sciences, 2003, 42(9): 821-828.
- [4] 朱登亮, 吴金星, 张丽娜, 等. 圆形流道内置扭带强化传热机理分析[J]. 节能技术, 2006, 24(139): 402-418.
- [5] 张琳, 钱红卫, 俞秀民, 等. 自转螺旋扭带管内湍流特性研究[J]. 高校化学工程学报, 2005, 19(1): 17-21.
- [6] 张琳, 钱红卫. 自转螺旋扭带管内三维流动与传热数值模拟[J]. 化工学报, 2005, 56(9): 1633-1638.
- [7] 王特, 王飞龙, 范爱武, 等. 内置交替轴扭带的管内层流换热特性[J]. 化工学报, 2014, 65(S1): 316-322.
- [8] 马晓英. 扭带强化管内单相对流换热的研究进展[J]. 能源研究与信息, 2011, 27(1): 50-54.
- [9] 向飒, 王定标, 梁珍祥. 规则间隙内置扭带管的强化传热特性研究[J]. 热科学与技术, 2012, 11(4): 301-306.
- [10] 张琳, 钱红卫. 自转螺旋扭带管内三维流动与传热数值模拟[J]. 化工学报, 2005, 56(9): 1633-1638.
- [11] KHWANCHIT W, SMITH E. Heat transfer enhancement by twisted tapes with alternate-axes and triangular, rectangular and trapezoidal wings[J]. Chemical engineering and processing: process intensification, 2011, 50(2): 211-219.
- [12] GUO Z Y, LI D Y, WANG B X. A novel concept for connective heat transfer enhancement[J]. International journal of heat transfer, 1998, 41(14): 2221-2225.
- [13] GUO Z Y, WANG S. Novel concept and approaches of heat transfer enhancement[C]//Process of Symposium on Energy and Engineering. New York: Hemisphere Public Corporation, 1995: 137-145.
- [14] 夏翔鸣, 赵立伟, 徐宏, 等. 基于场协同理论的强化传热综合性能评价因子[J]. 热能动力工程, 2011, 26(2): 197-202.

Numerical Simulation of Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer in a Circular Tube with Twisted Tape Inserts

WU Jinxing, WANG Chao, WANG Mingqiang, LIU Yanhui, LI Yafei

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

Abstract: In order to improve the comprehensive performance of convection in tubes inserted with twisted tapes, developed 3-edge twisted tape, a Simulation was carried out to examine the comprehensive characteristics of single phase convection in circular tubes inserted with twisted tapes, including typical twisted tape, grid spiral twisted tape and 3-edge twisted tape. With water as the working fluid, the behavior of fluid flow and heat transfer of these different types of twisted tapes with the same twist ratio $\gamma = 2.0$ was studied. The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model was chosen for the Reynolds number ranging from 5000 to 30,000, The nusselt number (Nu), friction factor(f) and comprehensive performance evaluation factor(η) were calculated and compared with those of a plain tube under the same condition. The result showed that the comprehensive performance of 3-edge twisted tape was better than plain tube, the tubes with typical twisted tape and grid spiral twisted tapes insert.

Key words: typical twisted tape; grid spiral twisted tape; 3-edge twisted tape; enhanced heat transfer; numerical simulation

(上接第 5 页)

The Synthesis and Photocatalytic Properties of $\text{rGO-ZnSn}(\text{OH})_6$ Composite

LU Hongxia, LI Xuexue, LEI Jun, ZHAO Tiange, SHAO Gang

(School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$ microl nanocubes with good dispersancy, uniform particle size distribution, and the average particle size for micro/nanoscale (100 ~ 200nm) were prepared by the hydrothermal method using $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, NaOH and SnCl_4 as reactants, and the acidificate the Zine hydroxysta treatment, graphene oxide(GO) was prepared by a modified Hummers method. $\text{GO-ZnSn}(\text{OH})_6$ composite was prepared under the condition of low temperature, reduction graphene oxide (rGO) was obtained by photo induced reduction of GO under UV irradiation, and finally get $\text{rGO-ZnSn}(\text{OH})_6$ composite. The samples were characterized by the XRD, SEM, FT-IR, UV-Vis and PL, analysis the phase, microstructure and optical absorption properties, and the effect of different amounts of GO dopant on the photocatalytic property of $\text{rGO-ZnSn}(\text{OH})_6$ composite was also evaluated using methylene blue as the degradation of material. The results showed that the mass fraction of GO was 2.0 massfraction, %, the maximum degradation rate of the $\text{rGO-ZnSn}(\text{OH})_6$ composite was 93.2%, the degradation rate constant $k = 0.026\text{min}^{-1}$, which was 2 times and 4.3 times of the pure $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$, respectively.

Key words: $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$; low temperature solution method; $\text{rGO-ZnSn}(\text{OH})_6$; photocatalytic property