

文章编号:1007-6735(2011)01-0084-05

流体在螺旋管内对流换热和压降性能的数值模拟

鲍 伟¹, 马虎根¹, 张希忠²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 淄博万昌化工设备有限公司, 山东 255424)

摘要: 分别对螺旋椭圆管和螺旋扁管建模并进行数值模拟和理论分析,对比研究两种螺旋管道的流动换热性能及沿程换热情况,结果表明:层流范围内,螺旋扁管的换热性能好于螺旋椭圆管,但流动阻力较大,根据综合性能评价因子得知螺旋扁管较好;湍流范围内,螺旋椭圆管性能好于螺旋扁管.沿程换热情况表明螺旋管长约为 0.5 m 时换热效果最佳,同时螺旋管几何尺寸对换热性能也有影响.

关键词: 螺旋管; 流动换热; 压降; 数值模拟

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Numerical simulation on heat transfer and pressure drop of fluid flow in twisted tube

BAO Wei¹, MA Hu-gen¹, ZHANG Xi-zhong²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093;
2. Zibo Wanchang Chemical Manufacture Co., Ltd., Shandong 255424, China)

Abstract: Twisted oval-tube and twisted oblate-tube were modeled respectively and the corresponding theoretical analysis and numerical simulation were carried out. The performances of flow and heat transfer in the two kinds of twisted tube were studied comparatively. The results show that the heat transfer in twisted oblate-tube is better than that in twisted oval-tube under the condition of laminar flow, however the flow resistance of twisted oblate-tube is larger. According to the comprehensive factor, in twisted oblate-tube the flow gets a good heat transfer enhancement. The twisted oval-tube is better than the oblate-tube under the condition of turbulent flow. The property of heat transfer along the tube show that the optimal length of twisted tube is about 0.5 m. The geometical dimensions of twisted tube are of have great effect on heat transfer.

Key words: twisted tube; flow and heat transfer; pressure drop; numerical simulation

随着世界能源供给出现短缺和人类环保意识的增强,节能减排已成为社会进一步发展的重大需求.螺旋管换热器是在传统管式换热器的基础上开发出来的一种新型高效换热器,此换热管为螺旋椭圆管,仅靠管间的相互支撑固定,可以强化传热.不少学者对螺旋管的换热流动情况进行了实验及数值模拟研

究.文献[1]研究了螺旋椭圆管的螺距与当量直径比值对换热情况的影响,指出螺旋椭圆管强化了换热.梁龙虎^[2]对螺旋椭圆管与光管的换热和阻力情况作了实验对比研究,发现雷诺数 Re 小于 3 000 时螺旋椭圆管换热器换热系数提高 2~3 倍, Re 更大时也可提高 50%,但管程阻力也迅速增加.张杏祥^[3]对

收稿日期: 2010-04-29
作者简介: 鲍伟(1986-),男,硕士研究生.研究方向:两相流与相变传热. E-mail: baoweihgc@163.com

螺旋椭圆管的传热与流阻特性进行了模拟分析,认为高普朗特数 Pr 的大黏度流体在低 Re 的层流或过渡流时具有较好的强化传热效果.黄德斌^[4]等对4种不同结构的螺旋椭圆管进行了实验研究,得到了与张杏祥同样的结论,认为螺旋椭圆管对高 Pr 在低 Re 运行时效果良好.

目前,螺旋椭圆管与螺旋扁管的对比研究并不充分,有学者在层流范围内对两种螺旋管作了对比研究^[5-6].该文对两种螺旋管的换热与流阻性能在 Re 为 700~9 000 范围内进行了螺旋管的沿程换热模拟分析,鉴于换热器管道运行时大部分处于进口段,因此也分析了螺旋管的沿程换热性能.

1 计算模型及定解条件

1.1 几何模型

螺旋椭圆管和螺旋扁管的几何模型如图1所示,两种螺旋管模型具有相同的周长,螺旋管长均为 1 200 mm,截面尺寸固定,取4种不同的扭矩,为对比换热流动情况,对直管的模型同时进行模拟.

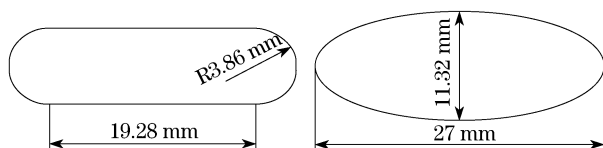


图1 螺旋管截面几何尺寸

Fig.1 Cross-section geometry of the twisted tube

1.2 数学模型

管内流体为不可压缩牛顿流体,假设不考虑温度对物性的影响,流动换热过程满足守恒方程.连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + F_x \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} + F_y \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) =$$

$$\mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - \frac{\partial p}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

能量方程

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

式中 x, y, z 表示直角坐标系的3个坐标方向; u, v, w 表示3个直角坐标方向的流速; ρ 表示工质密度; F_x, F_y, F_z 表示3个直角坐标方向的体积力; μ 表示工质动力黏度; p 表示压强; T 表示温度; a 表示热扩散系数.当管内流体处于湍流状态时,还应加上湍流模型方程.

1.3 数值计算模型

将模型导入 fluent 软件中,计算区域采用六面体网格划分,近壁处对网格进行加密,选用分离式稳态求解器,选中能量方程,湍流情况下采用 realizable $k-\epsilon$ 模型,压力和速度参量采用 SIMPLE 算法计算.边界条件包括管道进口为速度入口边界条件,出口为压力出口边界条件,壁面为恒壁温边界条件,壁面温度设定为 353 K,介质进口温度设定为 293 K.分别模拟 Re 为 700~15 000 范围内的流动换热情况.模型网格划分如图2.

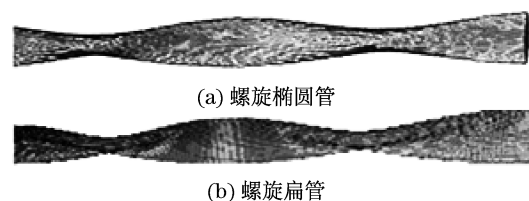


图2 螺旋椭圆管与螺旋扁管网格图

Fig.2 Grid map of twisted oval-tube and twisted oblate-tube

2 模拟结果及分析

2.1 管内速度场

图3(见下页)为螺旋扁管与直扁管管径方向截面的速度场云图.可以看到螺旋管中流速发生旋转和垂直主流的二次流,而直管中速度场是同心圆,分布均匀,二者对比也证实了螺旋管因流场扰混而破坏了温度边界层,从而强化了传热.螺旋椭圆管与直椭圆管的速度场与此类似.

2.2 换热性能

螺旋管换热 Nu 定义如下式

$$Nu = \frac{h \cdot d_e}{\lambda} \quad (6)$$

式中 h 为螺旋管换热系数, d_e 为螺旋管的当量直径, λ 为管内工质的导热系数.

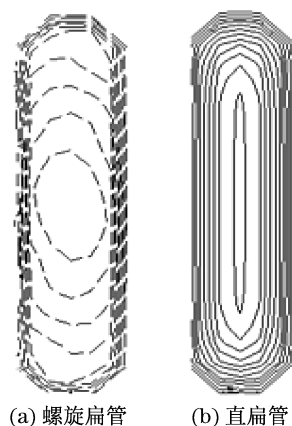


图3 $Re = 3000$ 时直扁管和螺旋扁管内速度场
Fig.3 Velocity field of oblate-tube and twisted oblate-tube when $Re = 3000$

图4为螺旋管 Nu 随 Re 的变化曲线,表明螺旋管道内流动 Re 越高时换热效果越好,在 Re 小于2000时,螺旋扁管的换热效果要好于螺旋椭圆管,约提高30%,与直管相比约提高60%,当 Re 大于2000时,螺旋椭圆管换热性能比螺旋扁管换热性能好,导程 $S = 100$ mm 的螺旋椭圆管换热效果比螺旋扁管效果提高约10%,比直管提高约60%左右,在全部计算的 Re 范围内,螺旋管的换热性能均好于相应直管道.

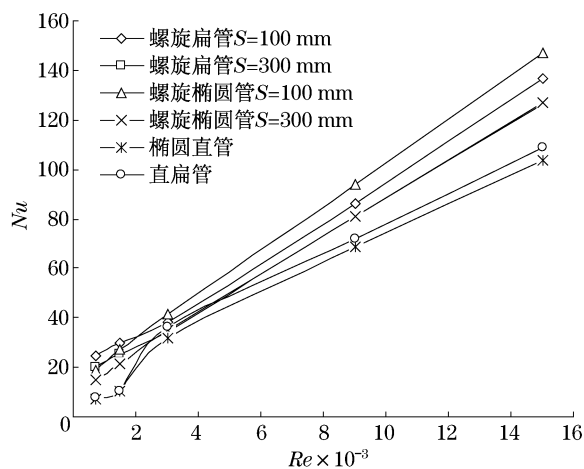


图4 螺旋管与直管换热性能
Fig.4 Heat transfer of twisted tube and straight tube

2.3 流阻特性

图5为压降 Δp 随 Re 的变化曲线.由图可知,螺旋管道的压降远大于相应的直管道,层流时压降

是直管压降的3倍,湍流情况下螺旋管压降更大,这是由于螺旋管道流动旋转剧烈,流阻也相应加大.螺旋扁管的压降大于相同导程的螺旋椭圆管.

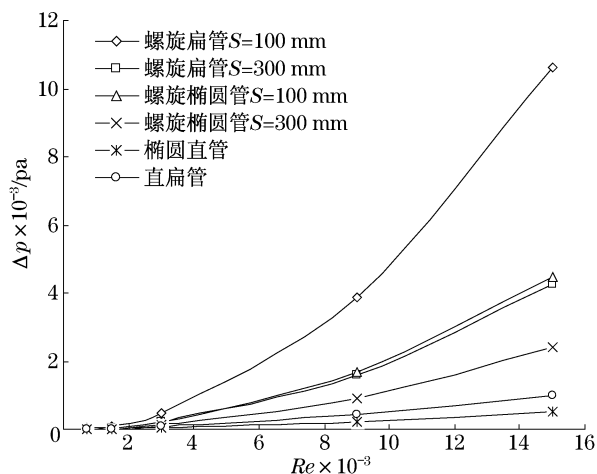


图5 螺旋管与直管压降性能
Fig.5 Pressure drop of twisted tube and straight tube

2.4 强化换热

由于流体的换热性能及湍流强度主要取决于 Re ,而流动阻力与流速及当量直径有关,因此,单纯考虑 Re 对流动换热的影响并不充分,综合考虑换热性能与压降,根据强化传热管综合性能评价因子的定义式^[7]

$$\eta = (Nu/Nu_0)/(f/f_0)^{1/3} \quad (7)$$

式中 Nu 和 f 分别为螺旋管的努塞尔数和摩擦系数; Nu_0 和 f_0 分别为考虑进口段影响的圆管的努塞尔数和摩擦系数.如图6所示,层流状态下,螺旋管道的流动换热性能均较好,随着 Re 的增加,性能

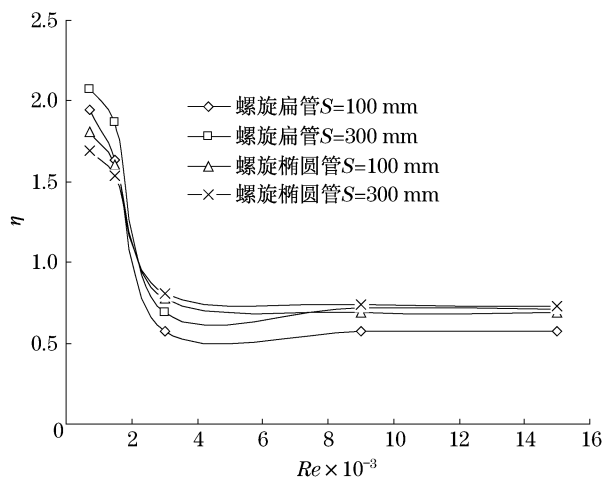


图6 螺旋管综合性能
Fig.6 Comprehensive performance of twisted tube

下降.当 Re 小于 2 000 时,螺旋扁管的流动换热性能好于螺旋椭圆管, Re 大于 2 000 时,螺旋椭圆管性能好于螺旋扁管.由综合性能角度考虑,螺旋管道适合应用于层流范围的工况下.

2.5 S/d_e 对螺旋管道换热的影响

螺旋管道的特点是流动通道为螺旋状,增强流动时径向流体混合,从而破坏换热边界层,即增强了换热效果,因此,螺旋程度对管道换热情况的影响是剧烈的,图 7 和图 8 表示了螺旋管导程与当量直径比值 S/d_e 对换热情况的影响,两种螺旋管道呈现了相同的变化趋势,随着 S/d_e 的减小换热效果越好,但由图可知 S/d_e 值越小压降也越大,综合考虑,导程 $S = 300$ mm 的螺旋管道性能最优.

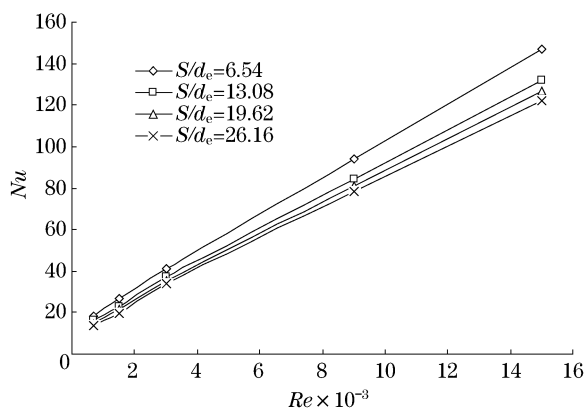


图 7 螺旋椭圆管换热性能随 S/d_e 变化曲线

Fig.7 Local nusselt number vs S/d_e of twisted oval-tube

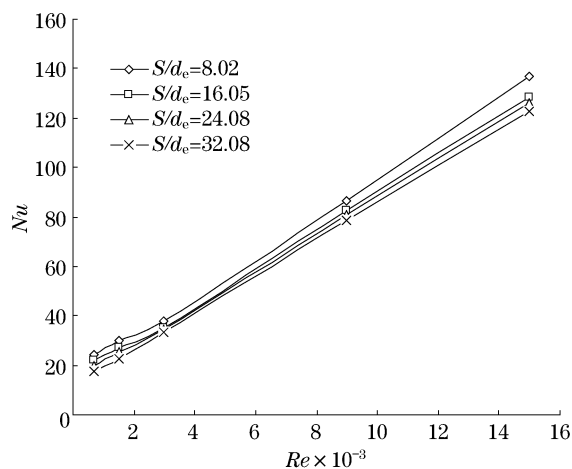


图 8 螺旋扁管换热性能随 S/d_e 变化曲线

Fig.8 Local nusselt number vs S/d_e of twisted oblate-tube

2.6 沿程换热系数的变化情况

换热器管道大多处于流动进口段,因而流动进口段换热情况决定了换热器整体的性能.该文通过

MATLAB 软件整理模型的温度场数据,分别选取导程 $S = 300$ mm 的螺旋扁管和螺旋椭圆管及对应的直管计算了沿程换热努塞尔数.如图 9 所示,当 $Re = 700$ 时,螺旋扁管的换热性能远好于螺旋椭圆管,螺旋管的流动进口段比直管的流动进口段短,选择螺旋管时管长为 0.5 m 左右可以获得较好的换热效果;由图 10 可知当 $Re = 9\ 000$ 时,螺旋管与直管的沿程 Nu 变化相似,此时流动进口段大大缩短.直扁管的换热性能要好于椭圆直管.

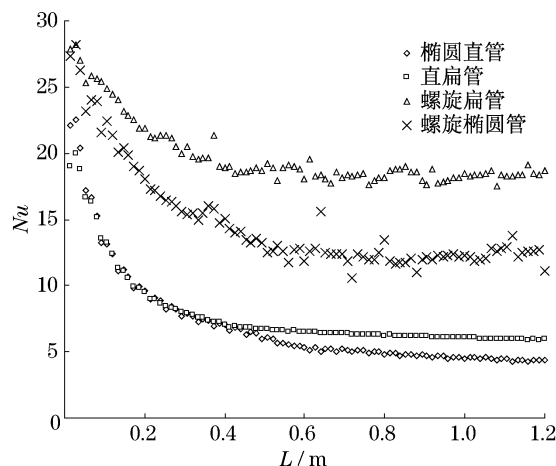


图 9 $Re = 700$ 时螺旋管与直管沿程换热曲线

Fig.9 Local nusselt number of twisted tube and straight tube when $Re = 700$

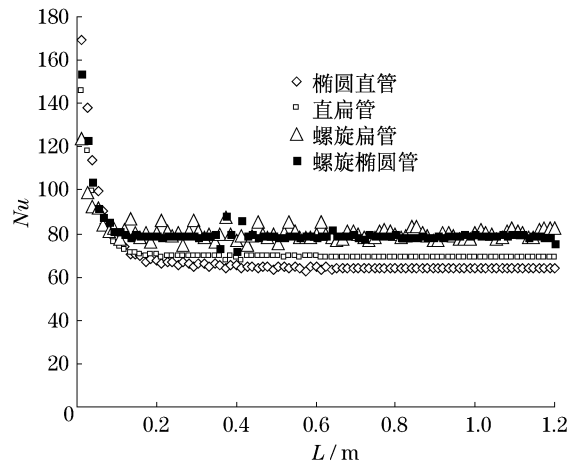


图 10 $Re = 9\ 000$ 时螺旋管与直管沿程换热曲线

Fig.10 Local nusselt number of twisted tube and straight tube when $Re = 9\ 000$

3 结 论

a. 通过数值模拟得到螺旋管与直管内工质流动速度场,证实螺旋管内流体运动会出现二次流及

垂直主流的扰流,因此,螺旋管内温度边界层受扰减薄,增强了换热.

b. 螺旋管的换热性能优于对应的直管,而流动阻力也大于直管.在层流范围内,螺旋扁管的综合性能较螺旋椭圆管好,螺旋扁管 Nu 比直管大 60%,比螺旋椭圆管大 30%,但螺旋扁管流阻约是直管流阻的 3 倍,数值计算表明当螺旋管导程与当量直径比值为 15~20 时为宜;湍流范围内,螺旋椭圆管综合性能较好,此时螺旋椭圆管换热效果比螺旋扁管提高 20% 左右,当螺旋管导程与当量直径比值为 5~12 为宜.

c. 螺旋管沿程换热性能均好于对应的直管,层流时,螺旋扁管的管长取 0.5 m 时可达最佳换热效果.

参考文献:

- [1] ASMANTAS L A, NEMIRA M A, TRILIKAIUSKSA V V. Coefficients of heat transfer and hydraulic drag of a twisted oval tube[J]. Heat Transfer Soviet Research,

1985, 17(4):103-109.

- [2] 梁龙虎.螺旋扁管换热器的性能及工业应用研究[J].炼油设计,2001,31(8):28-33.
- [3] 张杏祥,桑芝富.螺旋扭扁管强化传热与阻力性能的模拟分析[J].化工机械,2006,33(1):24-28.
- [4] 黄德斌,邓先和,王扬君,等.螺旋椭圆扁管强化传热研究[J].石油化工设备,2003,32(3):1-3.
- [5] DZYUBENKO B V, ASHMANTAS L A, SEGAL M D. Modeling and design of twisted tube heat exchangers [M]. New York: Begell house, Inc. 1999.
- [6] 刘敏珊,宫本希,董其伍.螺旋扁管的换热性能研究[J].石油机械,2008,36(2):22-25.
- [7] 孟继安,李志信,过增元,等.螺旋扭曲椭圆管层流换热与流阻特性模拟分析[J].工程热物理学报,2002,23(增刊):117-120.
- [8] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,1998.

(责任编辑:巩红晓)

(上接第 29 页)

- [2] OHTSUKI H, IWASA Y, NOWAK M A. Indirect reciprocity provides only a narrow margin of efficiency for costly punishment[J]. Nature, 2009, 457: 79-82.
- [3] NOEAK M A, SIGMUND K. Evolution of indirect reciprocity by image scoring[J]. Nature, 1998, 393: 573-577.
- [4] OHTSUKI H, IWASA Y. How should we define goodness?—Reputation dynamics in indirect reciprocity[J]. J Theor Biol, 2004, 231: 107-120.
- [5] SANTOS F C, SANTOS M D, PACHECO J M. Social diversity promotes cooperation in public goods games [J]. Nature, 2008, 454: 213-216.
- [6] PERC M, SZOLNOKI A. Social diversity and promotion of cooperation in the spatial prisoner's dilemma game[J]. Phys Rev E, 2008, 77: 011904.
- [7] YANG H X, WANG W X, WU Z X, et al. Diversity-optimized cooperation on complex networks[J]. Phys Rev E, 2009, 79: 056107.
- [8] ENQUIST M, LEIMAT O. The evolution of cooperation in mobile organism[J]. Anim Behav, 1993, 45: 747-757.
- [9] AKTIPST C A. Know when to walk away: Contingent movement and the evolution of cooperation [J]. J Theor Biol, 2004, 231: 249-260.
- [10] VAINSTEIN M H, SILVA A T C, ARENZON J J. Does mobility decrease cooperation? [J]. J Theor Biol, 2007, 244: 722-728.
- [11] HELBING D, YU W. The outbreak of cooperation among success-driven individuals under noisy conditions [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2009, 106: 3680-3685.
- [12] SICARDI E A, FORT H, VAINSTEIN M H, et al. Random mobility and spatial structure often enhance cooperation[J]. J Theor Biol, 2009, 256: 240-246.
- [13] MELONI S, BUSCARINO A, FORTUNA L, et al. Effects of mobility in a population of prisoner's dilemma players[J]. Phys Rev E, 2009, 79: 067101.
- [14] YANG H X, WU Z X, WANG B H. Role of aspiration-induced migration in cooperation [J]. Phys Rev E, 2010, 81: 065101.
- [15] AXELROD R, HAMILTON W D. The evolution of cooperation[J]. Science, 1981, 211: 1390-1396.
- [16] NOWAK M A, MAY R M. Evolutionary games and spatial chaos[J]. Nature, 1992, 359: 826-829.
- [17] ERDOS P, RE NYI A. On the evolution of random graphs [J]. Publ Math (Debrecen), 1959, 6: 290-297.
- [18] NEWMAN M E J, WATTS D J. Renormalization group analysis of the small-world network model[J]. Phys Lett A, 1999, 263: 341-346.
- [19] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509-512.
- [20] SZABO G, TOKE C. Evolutionary prisoner's dilemma game on a square lattice[J]. Phys Rev E, 1998, 58: 69-73.
- [21] GOMEZ-GARDENES J, CAMPILLO M, FLORIA L M, et al. Dynamical organization of cooperation in complex topologies[J]. Phys Rev Lett, 2007, 98: 108103.

(责任编辑:金虹)