

波纹管内的流动与传热强化研究

肖金花 钱才富* 黄志新 安维峥
(北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要: 通过数值模拟和实验验证考察了流体在波纹管内的流动与传热情况, 研究了不同的流体雷诺数、波形及管径大小对波纹管强化传热性能的影响, 探讨了其强化传热机理。研究发现, 在湍流范围内, 波纹管的强化传热倍数达到相同条件下直管的 1.78~3.10 倍, 且最佳强化效果出现在 $Re = 10000$ 附近; 文中拟合出的考虑波形影响的波纹管传热准则方程, 对波纹管的工程设计和应用具有一定的指导意义。

关键词: 波纹管; 数值模拟; 实验验证; 强化传热; 准则方程

中图分类号: TQ051.5

作为一种新型高效管壳式换热器, 波纹管换热器已越来越受到关注。它与传统的管壳式换热器结构基本类似, 区别仅在于用横截面周期性变化的波纹管代替了传统的直管作为换热管。这种换热器具有传热效率高、不易结垢、热补偿能力强等优点。其核心换热元件——波纹管, 通常分为不锈钢波纹管和碳钢波纹管两种。不锈钢波纹管是由薄壁不锈钢管从管内胀扩加工形成, 而碳钢波纹管则由碳钢管从管外挤压成型, 因此波纹管的纵截面可近似认为由大小圆弧相切组成, 如图 1 所示。

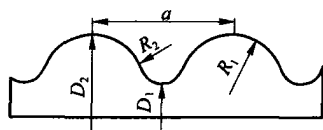


图 1 波纹管纵截面图

Fig. 1 Longitudinal section of the corrugated tubes

波纹管换热器推出的时间还不是很长, 国内外虽有一些学者对其进行了流动和传热方面的研究^[1-7], 但都不是很深入, 关于其强化传热机理的研究, 则更是鲜有报道。对波纹管传热性能的研究大多以实验为主, 随着计算机技术的发展和通用流体分析软件的出现, 人们有可能对流体在波纹管内的流动和传热进行数值模拟, 这一方面可以解决大量

实验所需费用昂贵的问题, 另一方面可以取得管内流场和温度场的分布细节, 探讨传热强化机理。本文的目的旨在通过对波纹管单管内的流动和传热进行数值模拟, 来研究波纹管的传热强化效果及机理。

1 计算模型

本文首先分析了目前工业上常用的一种波纹管, 其小径 $D_1 = 19$ mm, 大径 $D_2 = 25$ mm, 波距 $a = 18$ mm, 大圆弧半径 $R_1 = 15$ mm, 小圆弧半径 R_2 则根据几何关系由 D_1 、 D_2 、 R 和 a 确定, 见图 1。

波纹管内的流动可以近似看成是轴对称的管内不可压缩定常流动, 故数值计算的控制方程采用二维不可压缩稳态流动的连续性方程、Navier-Stokes 动量方程和能量方程 (忽略流体质量力):

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

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = +k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = +k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型^[8]:

$$\frac{\partial (k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

上式中, k 是湍流动能, ϵ 是湍流耗散率, μ_t 为湍流黏性系数, $\mu_t = C_\mu \cdot k^2 / \epsilon$, C_μ 、 C_1 、 C_2 、 k 和

收稿日期: 2005-10-18

基金项目: 北京市教育委员会共建项目 (XK100100541)

第一作者: 女, 1979 年生, 博士生

*通讯联系人

E-mail: qiancf@mail.buct.edu.cn

为常数,其值分别是: $C_p = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $k = 1.0$, $\gamma = 1.3$ 。

波纹管的流动和传热边界条件是:入口给定流速,并假定入口横截面上各点流速均相同;出口相对压力为零;壁面无滑移,60℃恒温。波纹管内的流动介质采用常温下的水,近似处理为不可压缩的常物性流体,且忽略其重力。

为进行对比,本文还对一长度与波纹管长度相同,且内径等于波纹管小径的直管进行了同样条件下的数值计算。

2 数值方法

本文采用有限单元法对上述控制方程组进行离散化,应用流线二阶迎风来离散对流项,应用SIMPLE算法进行压力修正,代数方程采用超松弛法进行迭代求解。计算采用的网格划分如图2所示,其中近壁处网格加密。

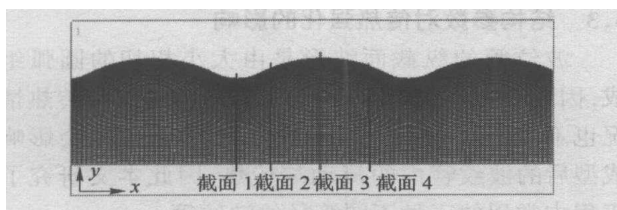


图2 计算网格示意图

Fig. 2 Computing mesh diagram

3 计算结果及讨论

根据流体物性,以波纹管小径为特征尺寸得出流体流动的特征参数:

$$Re = \frac{uD_e}{\mu}; Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}; Nu = \frac{\lambda D_e}{\mu}$$

3.1 流动特性

图3和图4为入口雷诺数 $Re = 56614$ 时,计算所得的充分发展段波纹管横截面速度及湍流动能分布与直管的比较,所取横截面如图2所示,图中 $y = 0$ 为管中心线。由图3可知,波纹管靠近管中心区域的横截面流速比直管有较大提高,且在波纹管的波峰处,截面流速出现了负值,这意味着在波峰处产生了回流。图4则说明波纹管横截面的湍流动能要远远大于直管,尤其在管中心区域附近,这意味着波纹管内流体的湍动程度相对于直管来说要剧烈得多,因此其应该具有很好的传热效果。

图5所示为 $Re = 56614$ 时波纹管波峰截面处流速方向角的分布及其与直管的对比,方向角的定

义为 $\arctan(v/u)$ 。由图中可以看出,波纹管横截面上靠近波峰处流动方向角为负值,这也意味着波峰内存在负向流速,图6所示的流线图也说明了这一点。图5同时还表明,由于截面负向速度区域的存在,波纹管相对于直管也存在较大的流动阻力。

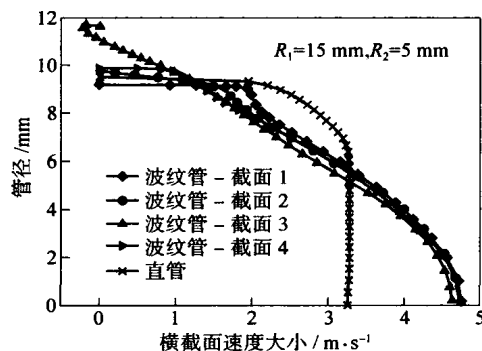


图3 横截面速度分布比较 ($Re = 56614$)

Fig. 3 Comparison of cross sectional velocity magnitudes at $Re = 56614$

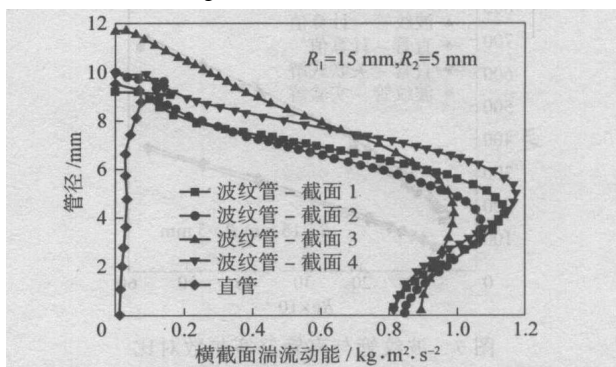


图4 横截面湍流动能分布比较 ($Re = 56614$)

Fig. 4 Comparison of cross sectional turbulence kinetic energies at $Re = 56614$

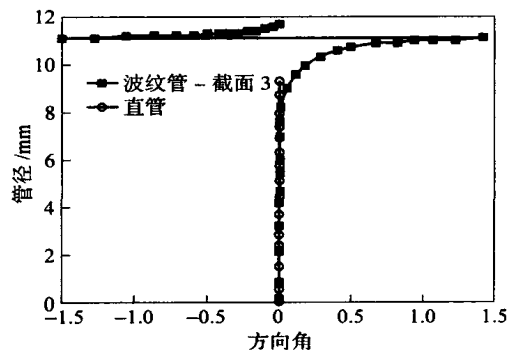
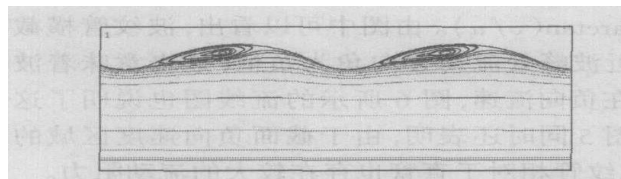


图5 波纹管波峰截面上速度方向分布

Fig. 5 Velocity direction distribution in section 3 of the two tubes

3.2 传热特性

为研究波纹管的传热性能,本文在进行数值计

图6 $Re = 56614$ 时波纹管充分发展段流线图Fig. 6 Streamline distribution in the corrugated tube at fully developed regions when $Re = 56614$

算的同时,还进行了实验验证。实验用的波纹管由外径 20 mm 的薄壁不锈钢管从管内胀扩加工形成,其公称规格是 25 mm \times 0.8 mm \times 2500 mm,实测数据是波峰直径 24.5 mm,波谷直径 20.2 mm,波距 18.2 mm。实验工质采用常温下的水。实验时在管外壁包上带有电阻丝的保温层,以施加恒定热流边界,在管入口处改变流量,以测量不同流量下的进出口温度和压降等数据。

图 7 所示为波纹管与直管的努塞尔数 Nu 随雷

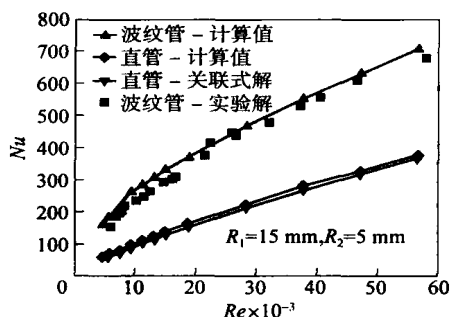
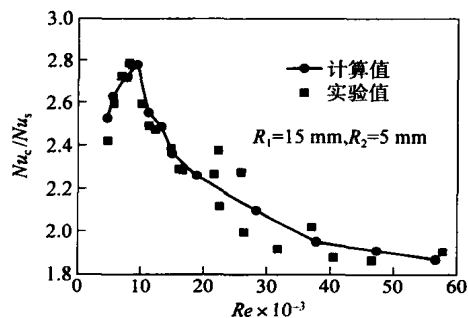


图7 波纹管与直管努塞尔数对比

Fig. 7 Comparison of Nu values for the two tubes

诺数 Re 的变化关系。由图可知,波纹管 Nu 数比直管的大很多,强化传热效果比较显著。

图 8 则显示了波纹管与直管的 Nu 数比值

图8 波纹管 Nu_c / Nu_s 随 Re 的变化关系Fig. 8 Relationship between Nu_c / Nu_s and Re

(Nu_c / Nu_s , 称之为无量纲 Nu 数) 随 Re 的变化关系。由图 8 可知,当 $4718 < Re < 10000$ 时,无量纲 Nu 数随 Re 的增大而增大,而当 $Re > 10000$ 后,无

量纲 Nu 数则随 Re 的增大而减小。这说明,在 $Re = 10000$ 附近是波纹管强化传热效果最佳的一段区域,此时波纹管的平均传热系数达到了直管的 2.8 倍。而 $Re = 10000$ 左右正是直管中的流动从过渡流进入湍流的临界区域。实验研究^[5-7]表明,流体在波纹通道中从层流过渡到湍流时的临界雷诺数要比直管低得多,这就意味着,当直管中的流动刚进入湍流状态时,波纹管中的流动已处于中等或高度湍流状态,故此时波纹管相对于直管的强化传热效果最佳。随着管内湍流进一步发展,直管和波纹管内都出现了大量而剧烈的旋涡,这些旋涡不断冲刷管壁,使层流边界层减薄,传热热阻减小,故此时边界层对直管和波纹管传热性能的影响已相差不大,因此波纹管相对于直管的强化传热倍数也逐渐减小,但最小也达到直管的 1.9 倍左右。

图 7 和图 8 还表明,数值计算结果与实验结果非常吻合。

3.3 结构参数对传热强化的影响

波纹管的纵截面波形是由大小相切的圆弧组成,因此其大小圆弧半径不同,管内的流动和传热情况也不尽相同。此外,波纹管的基管直径也会影响成型后的波纹管内的流动与传热,因此本文研究了工程中常用的三种不同管径的波纹管。

图 9 所示为波纹管的基管直径一定、而大小圆弧半径改变时,波纹管的无量纲 Nu 数随 Re 的变化

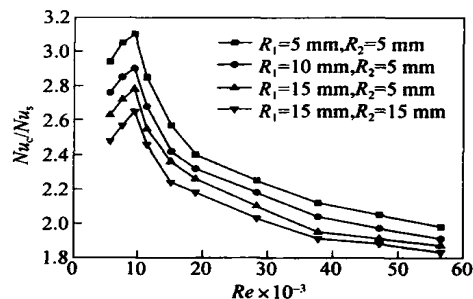


图9 相同管径不同波纹半径时

 Nu_c / Nu_s 随 Re 的变化关系Fig. 9 Relationship between Nu_c / Nu_s and Re at the same pipe diameter and different wave radii

关系。由图 9 可知,此时波纹管的强化传热趋势一致,且最佳强化传热区仍然是在 $Re = 10000$ 左右,这意味着波纹管基管直径一定时,其最佳强化传热区的位置与波形无关。此外,图 9 还表明,波纹管的大小圆弧半径越小,即截面变化越剧烈,其强化传热效果也越高,最大强化倍数可达到 3.1 倍左右。

图10所示是波纹管基管直径不同但大小圆弧半径相同时,波纹管无量纲 Nu 随 Re 的变化关系。由图10可知,不同基管直径对波纹管内部流动和

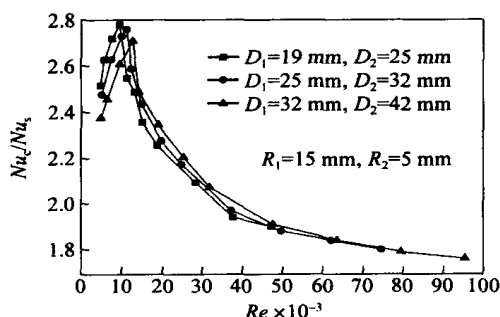


图10 不同管径时 Nu_c/Nu_s 随 Re 的变化关系

Fig. 10 Relationship between Nu_c/Nu_s and Re at different pipe diameters

传热的影响不大;波纹管的总体强化传热趋势一致,都存在一个最佳强化区,但最佳强化区出现的位置稍有不同;随波纹管基管直径的增大,波纹管的最佳强化传热区稍有后移,且最大强化倍数也略有下降。这些结论可为波纹换热管的工程应用提供一定的依据。

3.4 波纹管管内传热准则方程的拟合

根据上文所做的研究和分析,本文拟合出了基于传统直管传热准则方程的波纹管管内的传热准则方程,并给出方程的形式为

$$Nu_c = f \cdot Nu_s \quad (7)$$

上式中, Nu_c 和 Nu_s 分别为波纹管 and 传统直管的努塞尔数,其中 Nu_s 可由经典的 Dittus-Boelter 关联式^[9]表示。 f 为多项式系数,包含了 Re 和波纹管大小圆弧半径 R_1 和 R_2 的影响,故 f 可写成:

$$f = f(Re) f(R_1, R_2) \quad (8)$$

式(8)中,没有包含波纹管管径的影响,这是因为由图10可知,管径的影响不大,因此可从图10中近似取中间一根曲线来分段拟合 $f(Re)$:

$$5000 < Re < 11000 \text{ 时, } f(Re) = A_1 + A_2 Re \quad (9)$$

$$11000 < Re < 75000 \text{ 时, } f(Re) = A_3 + A_4 Re \quad (10)$$

$$f(Re) \text{ 确定后,根据图9可拟合出 } f(R_1, R_2),$$

即

$$f(R_1, R_2) = A_5 + A_6 R_1 + A_7 R_2 \quad (11)$$

式(9)到(11)中, A_1 到 A_7 为带单位的拟合系数,其值和结构参数的单位相关,当结构参数单位为 mm 时,拟合系数的值分别为: $A_1 = 2.02646$, $A_2 =$

1.11827×10^{-4} , $A_3 = 2.91323$, $A_4 = -3.50207 \times 10^{-5}$, $A_5 = 2.2065$, $A_6 = -0.01216$, $A_7 = -0.00411$ 。

公式(7)的应用范围是: $D_1 = 19 \sim 32$ mm, $D_2 = 25 \sim 42$ mm, $4718 < Re < 95350$, $5 \text{ mm} < R_1, R_2 < 15$ mm。在此范围内,数值计算结果与拟合公式(7)的计算结果最大误差小于 8%。和一些实验拟合关联式不同的是,这里提出的准则方程考虑了波纹管的不同管径和波形尺寸的影响,因此工程应用性更广。

4 结论

(1)横截面上湍流动能大于相同条件下的直管,波峰内存在回流;

(2)波纹管能显著强化管内传热,其强化倍数达到相同条件下直管的 1.78 ~ 3.10 倍,且最佳强化传热区在 $Re = 10000$ 附近;

(3)波纹管的管径对其强化效果影响不大,在管径一定时减小波纹半径能增大其强化传热倍数;

(4)拟合出了波纹管管内传热准则方程,这对于波纹管的工程设计和应用具有一定的参考价值。

符号说明

u, v ——直角坐标系下 x 和 y 方向的流体速度分量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

T ——流体温度,

p ——流体压力, Pa

μ ——流体动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

——流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

C_p ——流体定压比热, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

——流体导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

——对流传热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

De ——波纹管当量直径

Re ——Reynolds 数 Pr ——Prandtl 数

参考文献

- [1] 俞惠敏,蔡业彬. 几种换热管强化传热性能实验分析与比较[J]. 流体机械, 2003, 31(6): 7-10.
- [2] 商福民,毕庆生,张志正,等. 波纹管与光管流体传热性能对比实验研究[J]. 长春工程学院学报, 2003, 4(3): 33-35.
- [3] Russ G, Beer H. Heat transfer and flow field in a pipe with sinusoidal wavy surface: Numerical investigation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40: 1061-1070.
- [4] Russ G, Beer H. Heat transfer and flow field in a pipe with sinusoidal wavy surface: Experimental investiga-

- tion[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40:1071 - 1081.
- [5] Nishimura T, Ohori Y, Kawamura Y. Flow characteristics in a channel with symmetric wavy wall for steady flow [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1984, 17:466 - 471.
- [6] Nishimura T, Ohori Y, Kajimoto, *et al.* Mass transfer characteristics in a channel with symmetric wavy wall for steady flow [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1985, 18:550 - 555.
- [7] Nishimura T, Kajimoto Y, Kawamura Y. Mass transfer characteristics in a channel with a wavy wall[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1985, 19:142 - 144.
- [8] 徐文熙,徐文灿. 粘性流体力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1989.
- [9] 柴诚敬,张国亮. 化工流体流动与传热[M]. 北京:化学工业出版社,2000.

Study of Fluid Flow and Heat Transfer in Corrugated Tubes

XIAO Jin-hua QIAN Cai-fu HUANG Zhi-xin AN Wei-zheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Fluid flow and heat transfer in a corrugated tube have been numerically and experimentally studied. The influence of different Reynolds Number, wave shape and pipe diameter has been investigated. It was found that in the turbulent region, the average convection film coefficient in a corrugated tube is 1.78 ~ 3.10 times that in a straight tube under the same conditions, and the highest heat transfer occurs when Re is about 10000. To facilitate engineering design and application of corrugated tube heat exchangers, a formula for the calculation of the average convection film coefficient of a fluid in a corrugated tube is also given.

Key words: corrugated pipe; numerical simulation; experimental verification; heat transfer intensification; formula for heat transfer

本刊开通“网上投稿系统”

本刊“网上投稿系统”已开通,校内外作者均可通过该系统在线投稿,并实时查询稿件状态。

作者投稿请先登陆我校期刊中心网站(www.journal.buct.edu.cn),然后点击“作者在线投稿”栏目,提供作者信息,进行注册。接着按照页面提示,分别提交稿件各相关信息,逐步完成投稿步骤。最后,对提交的稿件进行确认,完成最终投稿。

该投稿系统还具有在线审稿、远程编辑、在线期刊等功能,不仅方便了校内外作者投稿及专家审稿,缩短了稿件送审周期,也为编辑部稿件自动管理、即时发布预印本提供了保障,极大地提升了我刊现代化管理水平。

欢迎校内外读者登陆本刊网站,欢迎作者使用本刊网上投稿系统后提出建议,以便编辑部改进系统,使之更好地为读者、作者服务。

《北京化工大学学报(自然科学版)》编辑部