

文章编号:1674-2869(2011)05-0089-05

横纹管脉冲流流动与换热数值分析

林 伟,喻九阳^{*},吴艳阳,刘 倩

(武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:通过数值模拟计算,研究低振动雷诺数下横纹管内脉冲流流动和换热.数值计算结果表明:脉冲流动引起出口压力正(余)弦波动,波动幅度随脉冲流振幅、频率的增大而增大;脉冲流动能够使流体在低速和低振动雷诺数下产生漩涡,并周期性生成、迁移和脱落;由于漩涡的作用,增强了流体的径向扰动和相对扰动,增大了横纹管内壁切应力,引起壁面切应力的周期性变化,减薄边界层,增强流体质量、能量输运;随着脉冲流振幅的增加,强化传热系数最高可以达到 1.97.

关键词:横纹管;脉冲流;换热;流动

中图分类号:TK172.4

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2011.05.023

0 引 言

横纹管是 20 世纪 70 年代中期出现的一种高效换热元件. Kalinin E K、贾檀等对横纹管的传热与流体力学特性进行了研究,研究表明横纹管对流体的扰动效果优于光管,而且管内流体流动会引起层流底层处流体的径向脉冲,有利于热量通过层流底层而进入流体主体^[1-2].

脉冲流动是指在一定的速度基础上叠加一正(余)弦变化的速度的流动. Richardson 和 Tyler 通过实验的方法测得了往复流动的速度分布,发现速度分布存在速度环效应,即最大速度不在管中心,而在靠近壁面处, Uchida 获得了圆管内脉冲流动速度分布的解析解,证明了这一现象^[3-4].

脉冲流动对对流传热的影响目前还没有一致结论:1)俞接成、Himadri Chattopadhyay 等认为脉冲流动对传热过程没有影响^[5-6];2)Mackley M R、Zohir A E 等认为脉冲流能强化传热^[7-9];3)Himadri Chattopadhyay、Valueva E P 等认为脉冲流弱化或强化传热取决于脉冲传热对应的边界条件和脉冲流参数^[6,10].

本研究应用 Fluent 软件对等壁温条件下,横纹管内脉冲流进行数值模拟,研究层流条件下,脉冲流对管内单相流流动和换热的影响.

1 物理模型和控制方程

横纹管的物理模型如图 1,其总长度 $L=1\ 800$

mm,共包含 145 个横纹,两端分别有 $l_1=30$ mm 和 $l_2=36$ mm 的直管段. 计算时做如下假设:1)流动与换热在管内充分发展;2)忽略体积力和粘性耗散. 流动与换热控制方程的张量形式为^[1]:

质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial l_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_k} \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

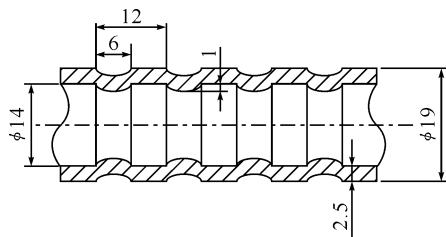


图 1 横纹管尺寸图

Fig. 1 Schematic of Transverse Tube

2 数值计算

用 Gambit 进行网格划分,将横纹管简化成二维模型,并对其进行全尺寸模拟,网格单元类型为结构化四边形网格. 网格化分时,考虑到边界对流动和传热的影响,同时为了便于捕捉漩涡的生成

收稿日期:2010-12-28

基金项目:国家自然科学基金(No. 50976080)

作者简介:林伟(1987-),男,湖北公安人,硕士研究生. 研究方向:强化传热技术.

指导老师:喻九阳,教授,硕士研究生导师. 研究方向:高效节能技术. * 通信联系人

与脱离,对边界部分进行加密,共生成 360 000 个网格单元,网格模型如图 2.

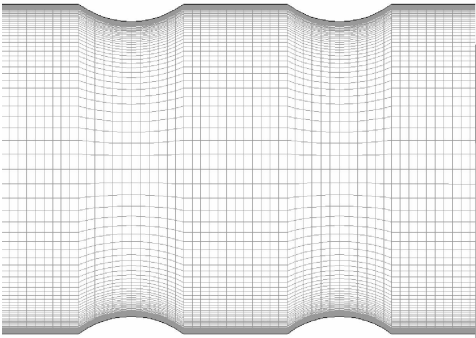


图 2 横纹管网格

Fig. 2 Transverse Tube grid

该模型的几何参数如图 1. 壁面为等温条件,温度为 293 K,壁面速度无滑移. 本文将入口给定速度脉冲作为脉冲流动的原因,其表达式为:

$$v_0 = v_s [1 + A \cdot \sin(2\pi ft)] \tag{4}$$

其中 v_0 为脉冲流瞬时速度, v_s 为稳态流速度, A 为脉冲流振幅, f 为脉冲流频率. 显然当 A 为零时,演变成稳态流. 计算时, $v_s = 0.03 \text{ m/s}$, A 分别取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, f 分别取 2, 4, 5, 8, 10, 流体进口温度为 333 K.

采用压力与速度耦合的 SIMPLER 算法进行离散求解. 对流项采用 QUICK 格式,扩散项采用中心差分格式. 收敛标准是出口处的平均温度呈周期性等幅波动.

3 结果与讨论

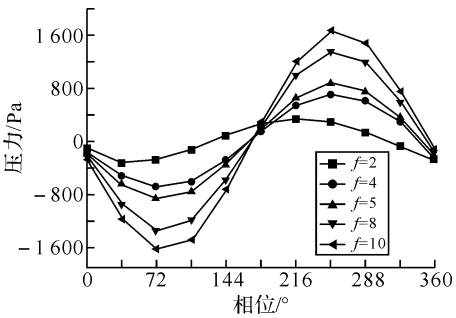
为了更好的对获得的计算结果进行分析. 定义无量纲振动雷诺数 $Re_0 = \frac{V}{\sqrt{f\gamma}}$, 其中 V 为脉冲流振幅速度, m/s ; f 为脉冲流频率, $1/\text{s}$; γ 为运动学粘度 m^2/s [11-12]. 计算得出 Re_0 值为 3~40.

定义脉冲流强化传热系数 $h = \frac{\alpha_0}{\alpha_s}$, 式中 α_0 为脉冲流工况下的对流传热系数, α_s 为稳态流工况下的对流传热系数.

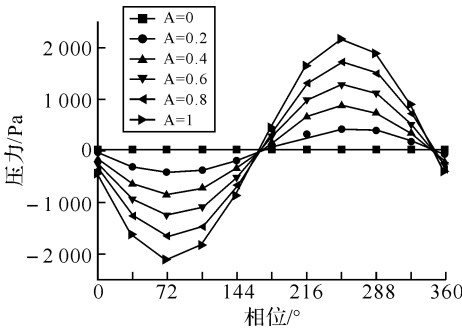
3.1 出口截面平均压力

图 3 给出了在振幅一定或频率一定的条件下,出口截面平均压力随相位 $(2\pi ft)$ 的波动图.

图 3(a)给出 $A = 0.4$, f 分别取 2, 4, 5, 8, 10 时出口截面平均压力图,从图中可以看出,随着脉冲频率 f 的增大,出口截面平均压力的波动振幅增大.



(a) $A = 0.4$



(b) $f = 5$

图 3 出口截面平均压力波动图

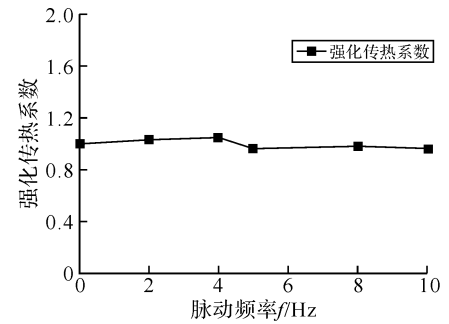
Fig. 3 Distribution of the average outlet pressure

图 3(b)给出 $f = 5$, A 分别取 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 时出口截面平均压力图,从图中可知,随着脉冲振幅 A 的增大,出口截面平均压力的波动振幅变大.

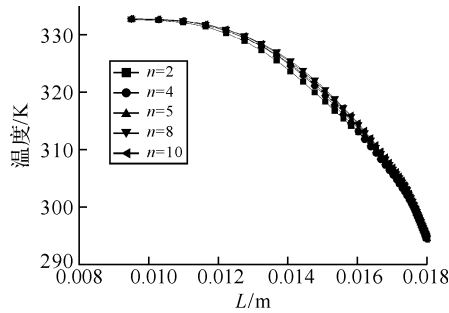
3.2 脉冲流参数对温度场的影响

图 4(a)给出了脉冲流振幅 $A = 0.4$ 时不同频率下的强化传热系数曲线,强化传热系数随着脉冲频率的增加波动幅度不大. 图 4(b)给出了脉冲流振幅 $A = 0.4$ 时不同频率下的横纹管中间段第 73 个圆弧最小截面处时均径向温度分布图,随着脉冲频率的增加,时均径向温度分布曲线变化不明显. 从图中可以看出当脉冲流流速和振幅较低时,对流换热系数时均值、在管内流动充分发展段的径向温度时均值与对应的稳态流的值相同,其中微小差别是计算误差造成的. 图 4(c)给出了脉冲流频率的变化对横纹管出口平均温度的影响,由于脉冲流的作用,出口平均温度呈现出正(余)弦波动.

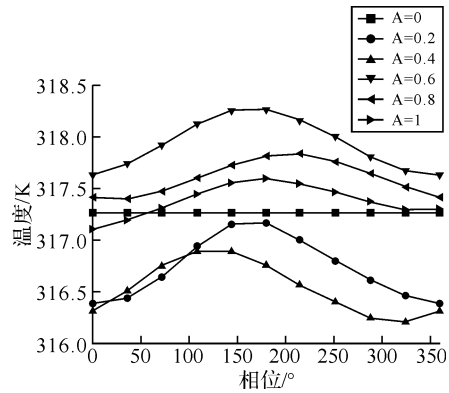
图 5 给出了在脉冲频率 $f = 5$ 时强化传热系数曲线. 从图中可以看出,当脉冲振幅增加至 $A = 0.8$ 时,强化传热系数得到大幅提高. 同时对计算结果进行分析发现横纹管第 73 个圆弧最小截面处时均径向温度分布图曲线发生变化,温度梯度变大.



(a) 强化传热系数曲线



(b) 第 73 个圆弧最小截面处时均径向温度分布



(c) 出口平均温度分布图

图 4 脉冲流振幅 $A=0.4$ 温度参数曲线

Fig. 4 The temperature distribution when pulsating flow amplitude $A=0.4$

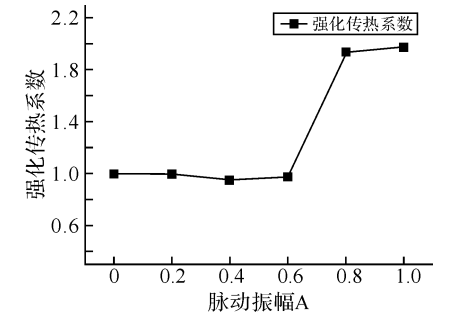


图 5 脉冲流频率 $f=5$ 时,强化传热系数曲线

Fig. 5 The enhanced heat transfer coefficient curve, when $f=4$

3.3 脉冲流参数对流场的影响

图 6 给出稳态流工况下横纹管管内流场分布和在脉冲流参数 $A=0.6, f=5$ 时管内流场随时间

的分布. 稳态流工况下,管内流体流动呈层流状态;在脉冲流作用下,随着时间的变化,在管壁附近不断会有漩涡的周期性的生成和脱落.

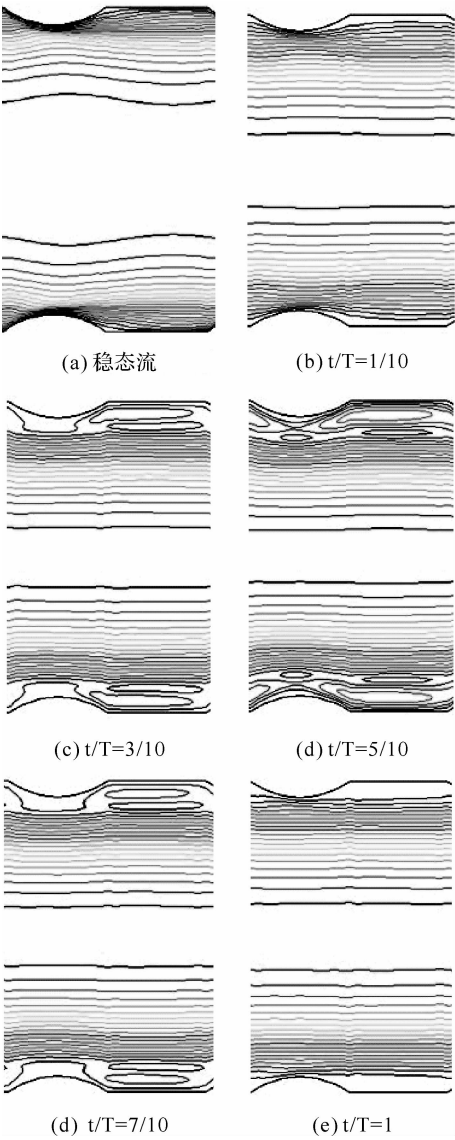


图 6 $A=6, f=5$ 时管内流场分布

Fig. 6 The flow distribution in tube when $A=4, f=5$

通过对计算结果分析:a)在振幅相同时,随着频率的变化,管壁附近漩涡的生成和脱落的规律一致;b)在不同频率生成的最大漩涡内的最大速度随着频率的增加而增加.

图 7 给出了脉冲流频率 $f=5$ 时,不同振幅下产生的最大漩涡流线图.随着脉冲振幅的增加,漩涡由管壁向管中心扩散,当振幅 $A=1$ 时,管内流体形式向有回流的脉冲流(往复流动)过渡,流体状态逐渐转变为紊流,整个管内部不断有漩涡的生成、转移和脱落,加剧流体的径向扰动和相互扰动,这对流体的质量和能量输运是有利的,从而使对流换热系数相对于稳态流工况下有大幅提高.

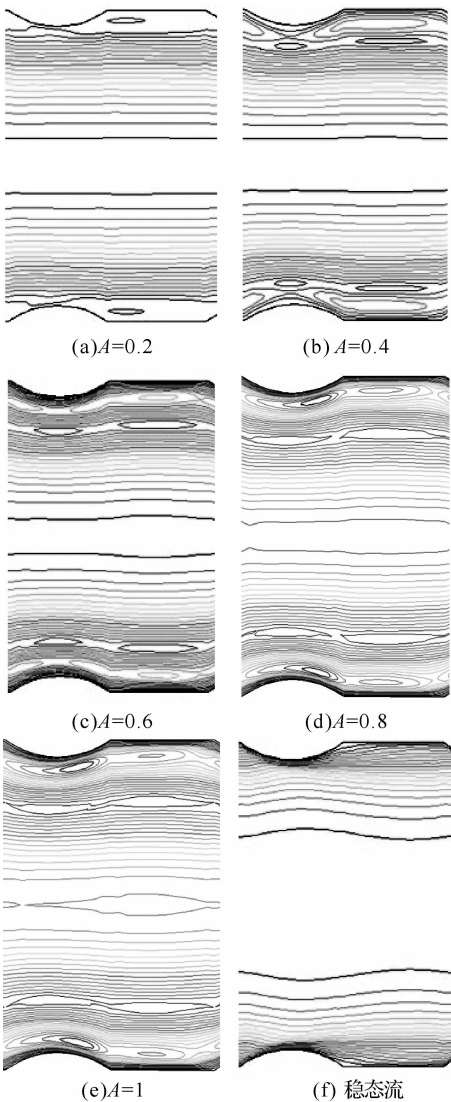


图 7 不同振幅下漩涡流线图

Fig. 7 The vortex of flow under different amplitude
注： $f=5$.

3.4 脉动参数对壁面剪切力的影响

图 8 给出了在脉动流和稳态流工况下,横纹管内壁切应力的变化曲线,脉动流条件下,脉动流增大了管内流体的径向扰动,壁面切应力随着脉

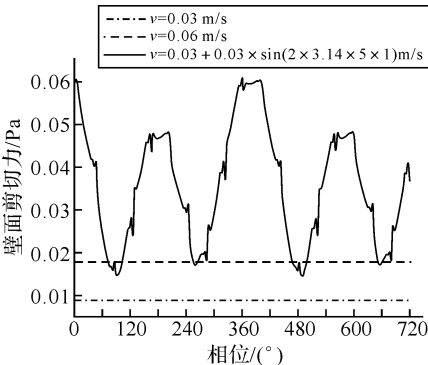


图 8 壁面剪切力分布

Fig. 8 Wall shear stress distribution

动流振幅的变化,随着脉动周期发生周期性波动,周期平均切应力大于稳态流工况下的切应力.

4 结 语

本研究运用数值模拟的方法对低速、低振动雷诺数下横纹管内脉冲流流动和换热情况进行了分析. 所得结论如下:

a. 横纹管出口截面的平均压力呈现与脉冲流周期相同的正(余)弦波动,大小随着脉冲流振幅、频率的增大而增大.

b. 管出口截面平均温度随脉冲流速度的变化,呈现出正(余)弦波动.

c. 相较稳态流的层流流动,由于脉冲流的作用,管内壁附近会有漩涡周期性的产生、迁移和脱落,壁面切应力呈周期性波动.

d. 在脉冲流流速较低、振幅较小的情况下,脉冲流换热与稳态流对流换热系数基本相同,脉冲流频率对强化传热系数影响较小.

e. 随着脉冲流振幅的增加,脉冲流对流换热系数明显提高,当 $A=1$ 时,强化传热系数达到 1.97.

参考文献:

[1] Afgan, Schlunder N H. Heat exchanges: Design and theory sourcebook [M]. Columbus: McGraw - Hill, 1974.

[2] 贾 檀,陆应生,庄礼贤. 横纹管的传热与流体力学特性研究[J]. 化工学报,1990(5):612 - 616.

[3] Richardson E G, Tyler E. The Transverse Velocity Gradient Near the Mouths of Pipes in Which an altering or Continuous Flow[J]. The Proceedings of the Physical Society, 1929, 231(42): 1 - 15.

[4] Uchia S. The Pulsating Viscous Flow Superposed on the Steady Laminar Motion of Incompressible Fluid in a Circular Pipe[J]. ZAMP, 1956(7): 403 - 422.

[5] 俞接成,李志信. 圆管层流脉冲流动对流换热数值分析[J]. 工程热物理学报,2005, 26 (2): 319 - 321.

[6] Chattopadhyay H, Durst F, Ray S. Analysis of heat transfer in simultaneously developing pulsating laminar flow in a pipe with constant wall temperature [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2006, 33: 475 - 481

[7] Mackley M R, Stonestreet P. Heat transfer and associated energy dissipation for oscillatory flow in baffled tubes [J]. Chemical Engineering Science, 1995, 50(14): 2211 - 2224.

[8] Zohir A E, Habib M A, Attya A M. An experimental investigation of heat transfer to pulsating pipe air flow

with different amplitudes[J]. Heat and Mass Transfer, 2006, 42: 625 - 635.

[9] 汪 威,喻九阳,杨 侠. 波节管脉冲流强化对流换热数值分析[J]. 武汉工程大学学报,2010,32(3): 89 - 91.

[10] Valueva E P. Hydrodynamics and heat transfer in pulsating turbulent flow of gas in a heated pipe[J]. High Temperature,2006,44:120 - 128.

[11] Patankar S V, Liu C H, Sparrow E M. Fully Developed Flow and Heat Transfer in Ducts Having Steam wise - Periodic Variations of Cross - Sectional Area[J]. Heat Transfer,1977,99:180 - 186.

[12] Nasiri M, Moorhem W k V. An investigation of heat and mass transfer in oscillating flows at high acoustic Reynolds numbers[J]. Heat and Transfer, 1996, 23(5):613 - 622.

[13] 高九阳. 沟槽对 O 形圈密封结构性能的影响[J]. 武汉工程大学学报,2010,32(7):78 - 80.

Numerical analysis of heat transfer and flow field of pulsating flow in transverse tube

LIN Wei , YU Jiu - yang , WU Yan - yang , LIU Qian

(School of Mechanical Eletrical Engineering, Wuhan Institute of Technology,Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, the flow and heat transfer of pulsating flow under low vibrational Reynolds number in a transverse tube were studied through numerical simulation method. The results showed that: the sine (or cosine) fluctuation of outlet pressure was produced by pulsating flow, furthermore, the fluctuate scope increased with increasing amplitude and frequency of pulsating flow; under low velocity and low vibrational Reynolds number, the vortices were induced to generate,migrate and shed periodically by pulsating flow; due to the growing of vortices, radial and mutual disturbance of flow were aggravated and flow boundary layer was thinner, therefore, the mass and energy transfer were enhanced; with the increasing amplitude of pulsating flow, the maximum enhanced heat transfer coefficient can reach 1.97.

Key words: transverse tube; pulsating flow; heat transfer; flow field

本文编辑:张瑞