

波节管脉冲流强化对流换热数值分析

汪 威,喻九阳*,杨 侠

(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,探讨脉冲流对波节管对流换热的强化机理.研究表明:脉冲流强化效果与速度和频率有关,与稳流相比脉冲流可使波节管换热效果提高90%.脉冲流强化换热原因是脉冲流使得波节管波节处产生漩涡,增强扰动,减少热边界层厚度.

关键词:强化传热;波节管;脉冲流

中图分类号:TQ051;TQ501

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.03.023

0 前 言

脉冲流是指按照一定规律如正(余)弦周期变化流动的流体.对于脉冲流速度场分布规律,大量学者都进行了研究,并得到公认的结论.20世纪中前期,Richardson 通过对管内往复流动脉冲流的试验发现速度分布存在速度环效应,即最大速度在靠近管壁处而不是在管中心^[1];Uchida 对此结论进行理论分析,证明速度环效应^[2].

但脉冲流是否能强化换热,各专家学者的研究结论都不一致.1990年,Mackly 实验证实脉冲流对带内肋片圆管强化效果显著,但对普通圆管直通道没有强化换热的效果^[3],俞接成对这两种情况进行数值模拟分析,得到一致的结论^[4].

同时,波节管作为一种新型高效换热元件,换热效果是传统直管的1.8~2.5倍^[5],并在工业中广泛应用,如若脉冲流在波节管中作用具有强化效果,则换热效率较传统的工业换热器将会有显著的提高^[6-7].为此,通过流体数值计算软件 fluent 对波节管脉冲流的对流换热进行模拟分析,探讨脉冲流是否提高波节管换热效率,并分析其机理.

1 计算模型及边界条件

在数值计算中,采用了二维轴对称方法建立模型,取波节管长度为 $L=1\ 820\text{ mm}$,基管直径(波节管胀扩前的圆管直径) $D_2=19\text{ mm}$,波峰处直径 $D_1=25\text{ mm}$,波长 $S=20\text{ mm}$,其中圆弧管段 $S_1=13\text{ mm}$,直管段 $S_2=7\text{ mm}$,如图1所示.此

外,按照实际模型的结构,在建立波节管几何模型时,在管的进出口端各增加了两个直管段,直径为25 mm,长度为40 mm;在管长方向,除了进出口直管段外,还包含了87个波距的长度.为了便于计算和建模,管壁厚度为零,温度恒定为293 K.流体工作介质为水,入口温度为353 K.

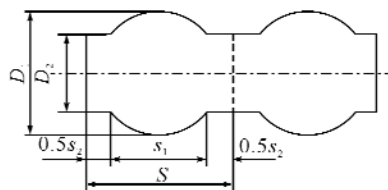


图1 波节管示意图

Fig.1 Corrugated Tubes structural schematic diagram

数值模拟采用结构四边形网格对所建立的几何模型计算区域进行离散,考虑边界层对传热和流动的影响,将壁面附近网格加密,整个模型共划分14.6万个网格单元.计算时选用离散格式,压力与速度的耦合计算采用SIMPLEC方法,压力采用STANDARD,忽略重力的作用,对流项采用二阶迎风格式.流体入口定义为速度输入,并通过UDF输入正弦脉冲流如式(1),出口定义为压力出口,压力为零.

$$v_z = v_f [1 + A \sin(2\pi n t)] \quad (1)$$

式(1)中: v_z 为瞬态入口流速(m/s), v_f 为相应的稳态入口流速(m/s), A 为脉冲信号的波动幅度, n 表示脉冲流周期变化角速度(rad/s).计算时, $A=0.4$, n 分别取10 r/s,20 r/s,30 r/s,50 r/s; v_f 取值范围为0.1~1.0 m/s,并设定脉冲流换热强化

收稿日期:2010-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(No.50976080)

作者简介:汪 威(1984-),男,湖北黄石人,硕士研究生,研究方向:化工过程机械.

指导老师:喻九阳,教授,硕士,硕士生指导老师,研究方向:化工过程机械.*通信联系人.

系数 $R = \frac{K_M}{K_W}$, 其中 K_M, K_W 分别脉冲流和稳流条件下传热系数。

2 计算结果分析

2.1 出口中心处温度分布图

图 2 表示当 $v=0.2 \text{ m/s}$ 时, $n=10, 50 \text{ rad/s}$ 时波节管流体出口截面平均压力分布。从 2 图中可以得到, 在相同的速度波动条件下, n 越大, 压力波动也越大。

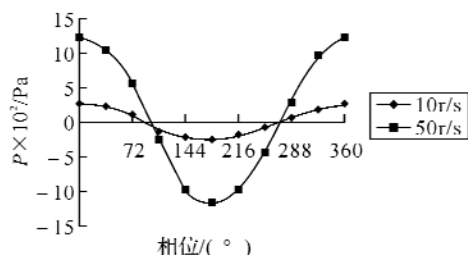


图 2 出口中心处压力波动图

Fig. 2 The outlet center pressure distribution

2.2 流函数分布图

图 3、图 4 分别是 $v=0.2 \text{ m/s}, n=20 \text{ r/s}$ 第 44 个波节段的稳态和脉冲流条件下的流函数分布图和速度矢量图。图 3 中 a~h 分别表示一个周期下不同相位时的流函数图 g 为稳态情况下流函数图; 图 4 中 a~f 表示脉冲流条件下一个周期内不同相位时流体的速度矢量图, i 为稳态情况下速度矢量图。通过图形可以表明: 稳态流动条件下, 此波段内流体流态是固定且无漩涡; 而脉冲流情况下, 在一个周期内, 流体流态不断变化, 基本过程如下: 首先流体同向流动, 速度场无涡旋, 当脉冲相位超过 180° , 即达到负周期时, 脉冲流流体在波节靠近流体入口(背速)处产生漩涡, 并随着速度的减小逐渐长大, 当速度增加时, 漩涡又逐渐变小, 直至消失。

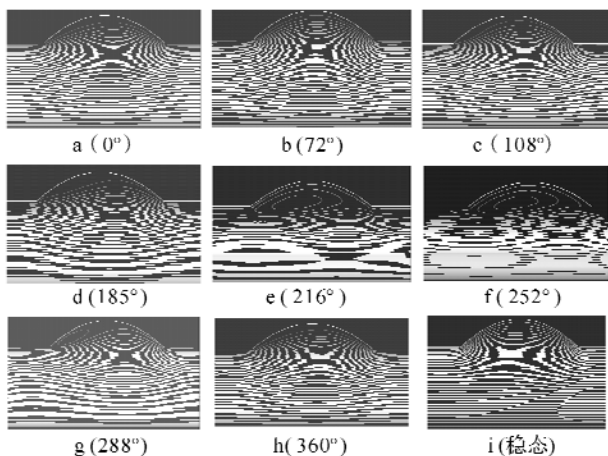


图 3 流函数分布

Fig. 3 Stream function distribution

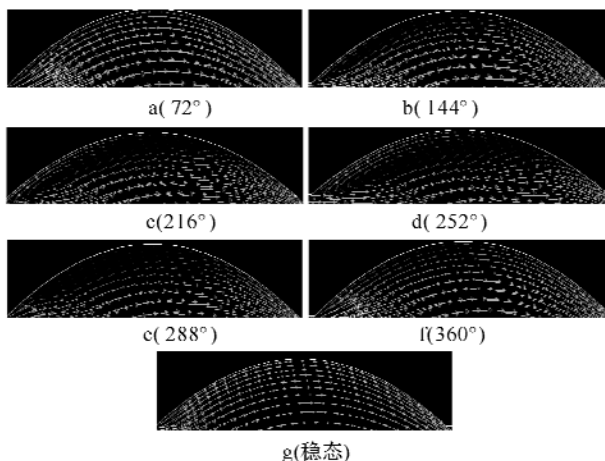


图 4 速度矢量图

Fig. 4 The velocity vectorgraph

2.3 时均径向温度分布

图 5 是 $v=0.1 \text{ m/s}, n=20 \text{ r/s}, x=910$ 处第 44 个波节段的稳态和脉冲流条件下的温度分布图。从图 5 中可以看出, 由于脉冲流作用, 时均径向温度分布在壁面附近比稳态时的斜率大, 降低温度边界层的厚度, 从而强化传热。结合图 3 和图 4 可得到波节管脉冲流强化传热的基本机理是: 由于脉冲流改变了流体的速度分布, 产生涡旋, 流场紊流增大, 从而影响流体径向温度分布。

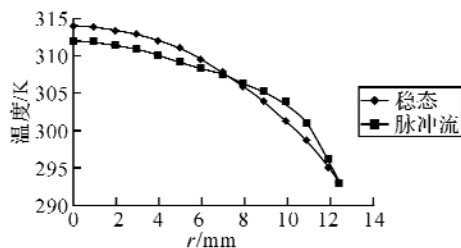


图 5 径向温度分布图

Fig. 5 Radial temperature distribution

2.4 强化换热系数分析

图 6 给出了波节管在不同速度, 不同频率脉冲流作用调节下, 波节管换热强化系数变化。从图中可以看出: 脉冲流能显著提高波节管的换热效率, 在相同的脉冲频率下, 换热强化系数随着速度的增加而增加, 例如 $n=20 \text{ r/s}$, 速度 $v=1.0$ 时的 R 值比速度 $v=0.1$ 时提高了 60.9%; 在相同速度条件下, 换热强化系数先随着频率的增大而增大, 当频率超过一定范围后, R 随着频率的增大而减小, 以 $v=1.0$ 为例, $n=30 \text{ r/s}$ 强化传热系数 R 分别比 $n=10 \text{ r/s}, 50 \text{ r/s}$ 的提高了 20.5% 和 8.6%。

3 结 语

a. 通过 fluent 数值计算, 得到与稳定流动相比脉冲流能显著提高波节管换热效率。

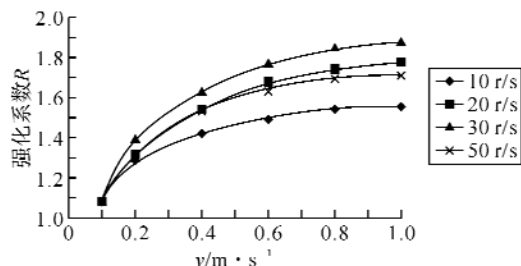


图6 强化系数分布图

Fig. 6 Strengthening factor variation graph

b. 脉冲流使得流体在波节管波节处湍流增强并产生漩涡,大大增加流体的扰动,减小边界层厚度,强化波节管换热效果。

c. 在强化换热过程中,当脉冲相位在 $0 \sim 180^\circ$ 变化时流场稳定变化,不产生漩涡;当脉冲相位大于 180° ,流体速度小于平衡值时,波节处流体流场剧烈变化,产生漩涡,并在随着速度的减小,漩涡不断长大,当速度增大时,漩涡逐渐变小,直至消失。

d. 换热强化系数在一定速度范围内,随速度的增加而增大;在一定频率范围内, R 先随着频率的增大而增大,然后,随着频率的增大而减小。

参考文献:

- [1] Richardson E G, Tyler E. The transverse velocity gradient near the mouths of pipes in which an alternating or continuous flow is established [J]. Proceedings of the Physical Society, 1929, 42: 1-15.
- [2] Uchida S. The pulsating viscous flow superposed on the steady laminar motion of incompressible fluid in a circular pipe [J]. ZAMP, 1956, 7: 403-422.
- [3] Mamayev V V, NOSOV V S, Syromyatnikov N I. Investigation of heat transfer in pulsed flow of air in pipes [J]. Heat Transfer-soviet Research, 1976, 8(3): 111-116.
- [4] 俞接成. 脉冲流动和壁面振动传热研究[D]: 清华大学, 2007.
- [5] 徐建民, 王晓清. 波节管管内流动和传热的数值模拟[J]. 石油化工设备, 2008, 37(1): 4-7.
- [6] 卢霞, 喻九阳. 真空电阻凸焊温度场有限元分析[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(5): 72-75.
- [7] 王仕仙, 徐建生, 卢霞. 基于 ANSYS 的滑动摩擦热结构耦合分析[J]. 武汉工程大学学报, 2009, 31(5): 67-70.

Numerical analysis on convection heat transfer in a corrugated tube

WANG Wei, YU Jiu-yang, Yang Xia

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

Abstract: Heat transfer enhancement of corrugated tube is investigated through numerical simulation. The effect of heat transfer enhancement depends on the Reynolds number and the vibration frequency. The numerical results indicates that compared with the steady flow, the pulsating flow increases the heat transfer efficiency of the corrugated tube flow by 90% most. Heat transfer enhancement of pulsating flow is due to the pulsating flow which makes corrugated tube generate whirlpools and increase disturbance and reduce the thermal boundary layer thickness.

Key words: corrugated tube; pulsating flow; heat transfer enhancement

本文编辑:陈小平