

波纹管管内层流流动和换热规律的实验研究及数值模拟

曾 敏 石 磊 陶文铨

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要 波纹管是近几年来被广泛采用的一种强化换热元件, 对其管内的流动和换热规律进行研究具有十分重要的意义。本文通过实验和数值模拟的方法, 对三种不同尺寸 ($\phi=19$ mm、25 mm、32 mm) 的波纹管层流流动和换热进行了研究, 发现存在一个临界的 Re 数, 当 Re 数小于临界值时波纹管的换热性能不及对应的光管, 随着 Re 数的增加, 波纹管换热性能逐渐改善。

关键词 波纹管; 实验研究; 数值模拟; 层流流动和换热

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2006)01-0142-03

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF LAMINAR FLOW AND HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS IN CORRUGATED TUBES

ZENG Min SHI Lei TAO Wen-Quan

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract As an effective configuration for heat transfer enhancement, the corrugated tube is widely employed in engineering. It is very important to study the flow and heat transfer characteristics in corrugated tubes. The laminar heat transfer and flow characteristics in three corrugated tubes ($\phi=19$ mm、25 mm、32 mm) were investigated both experimentally and numerically. It has been found that the heat transfer of a corrugated tube is inferior to that of a plain tube in low Reynolds number region. With the increase of Reynolds number, the heat transfer of a corrugated tube is gradually enhanced and beyond a certain value of Reynolds number it has a higher heat transfer rate than that of a plain tube.

Key words corrugated tube; experimental study; numerical simulation; laminar flow and heat transfer

1 引 言

光管由于加工方便, 成本较低, 是管壳式换热器中应用最广的, 但其换热性能较差, 因此如何强化光管的换热一直是十分重要的研究课题。在光管内加翅片是一种有效的强化换热手段, 这常应用于空气压缩机的中冷器中^[1]。对不同形状的内翅片, 人们已从实验和数值计算的角度进行了很多的研究^[2~5]。另一种强化换热的方法是采用波纹形通道^[6,7], 一般认为波纹形通道的换热能力比平直通道的要好。文献^[8]发现采用波纹圆管作为换热表面的

换热器综合性能有显著的提高, 但对波纹管单管内的换热与流动规律的研究却不多见。本文的目的是探索空气在波纹管内的流动和换热规律。

2 实验系统及实验方案

如图 1 所示, 整个实验系统由入口段、实验段、后置段、转子流量计和风机五部分组成。入口段为维多辛斯基曲线喇叭口, 空气经过这种渐缩入口以后速度分布接近均匀。实验中, 空气进口的温度由温度计测量, 出口温度由布置在出口胶木连接处的

收稿日期: 2005-03-13; 修订日期: 2005-11-06

基金项目: 国家重点基础研究基金资助项目 (No. G2000026303)

作者简介: 曾 敏 (1976-), 男, 湖北黄梅人, 讲师, 博士, 主要从事传热强化和计算传热方面的研究。

多个热电偶测定, 壁面温度通过热电偶连接到 IMP 上采集。在大流量时的压力是通过多点压力测量仪来采集的, 小流量时通过 1151 压力传感器来测量。通过调节变频器来改变电机的转速, 从而改变通过波纹管空气的质量流量。

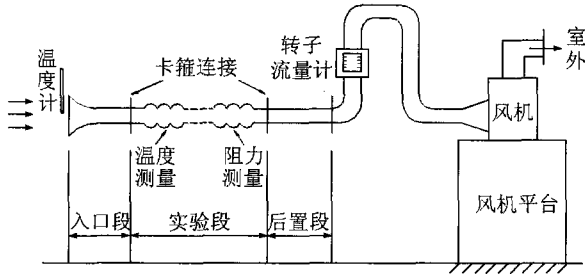


图 1 实验台示意图

三种波纹管的主要尺寸如下:

表 1 波纹管结构尺寸

波纹管 编号	最小直径 mm	最大直径 mm	波距 mm
I	19	22	22
II	25	28	28
III	32	37	34

3 数值方法

采用微分方程法生成计算网格^[9], 在圆柱曲线坐标下求解波纹管内的流动和换热。网格系为同位网格, 采用 SIMPLEC 来处理速度和压力的耦合问题, 对流项的离散格式为 QUICK。计算时, 计算区间取 15 个波节作为计算周期, 相应的边界条件处理如下:

$$\text{入口条件: } u = u_{in}, v = 0, t = t_{in}; \quad (1)$$

出口条件: 速度和温度均采用充分发展的边界条件;

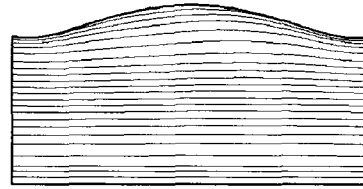
壁面条件: 固体壁面上的速度采用无滑移边界条件, 等热流的热边界条件采用附加源项法来处理;

$$\text{轴线条件: } \frac{\partial u}{\partial r} = 0, v = 0, \frac{\partial t}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

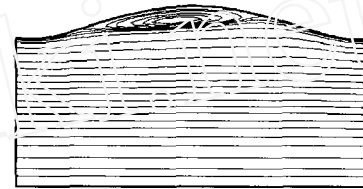
式(1)中的 u_{in} 和 t_{in} 均为对应实验工况的入口流速和温度。在进行实验工况的数值计算之前, 我们先要进行网格考核, 在获得与网格无关的解以后, 再进行实验工况的数值模拟, 本文最终的计算网格为: 1505×52 。

4 结果分析

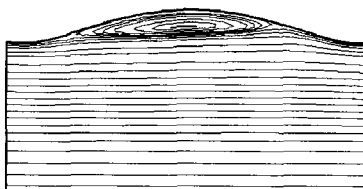
先来看波纹管充分发展周期内的流线, 由于篇幅原因我们仅给出其中一个波纹管内的流线。从下面的流场显示我们可以看到, 当 Re 较小的时候, 波纹管中没有出现流动的分离, 随着 Re 的增加流动分离的现象就会开始发生。 Re 数的计算流速取为入口平均流速, 特征尺寸取为最小直径。



(a) $Re = 235$



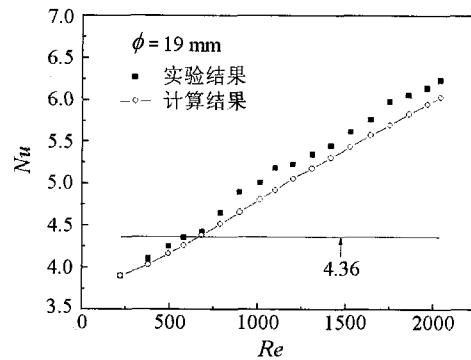
(b) $Re = 907$



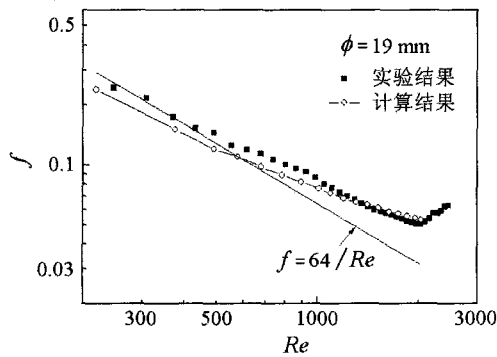
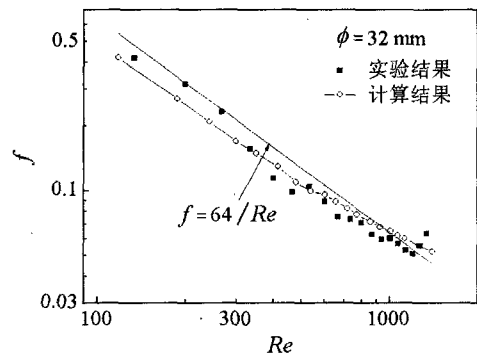
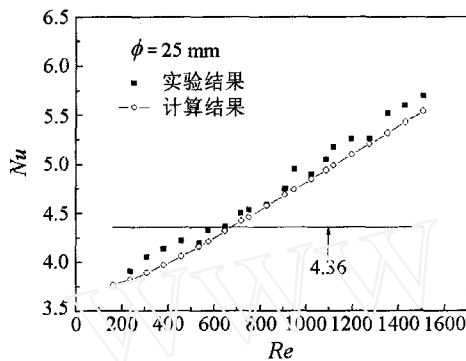
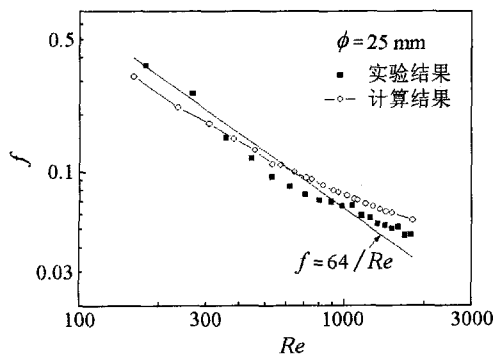
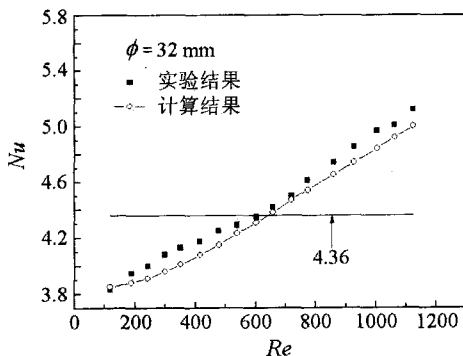
(c) $Re = 1506$

图 2 $\phi = 25 \text{ mm}$ 波纹管充分发展段流函数

三种波纹管的实验与计算所得的周期平均特性的比较如图 3、4 和 5 所示。从这三张图中我们可以看到, 实验结果与计算结果无论是数值还是变化趋势均符合较好。当 Re 数小于 600 左右, 波纹管的换热能力不及光管, 但随着 Re 数的增加, 波纹管的换热能力得到了提高, 阻力也相应增加。



(a) $Nu \text{ Vs. } Re$

(b) f Vs. Re 图3 $\phi=19$ mm 波纹管实验与计算结果对比(b) f Vs. Re 图5 $\phi=32$ mm 波纹管实验与计算结果对比(a) Nu Vs. Re (b) f Vs. Re 图4 $\phi=25$ mm 波纹管实验与计算结果对比(a) Nu Vs. Re

5 结 论

本文通过对三种波纹管的层流流动实验和数值模拟,均发现波纹管换热性能存在一个临界的 Re 值,当 Re 数小于这个临界值时,波纹管的换热性能劣于圆管,而当 Re 数大于这个临界值时波纹管的换热性能好于圆管。因此,在流速较低的流动下,不适宜采用波纹管来强化换热。

参 考 文 献

- [1] Webb R L. Principles of Enhanced Heat Transfer. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1994
- [2] Tao W Q. Conjugated Laminar Forced Convective Heat Transfer from Internally Finned Tubes. ASME J. Heat Transfer, 1987, 109(3): 791-795
- [3] Rustun I M, Soliman H M. Experimental Investigation of Laminar Mixed Convection in Tubes with Longitudinal Internal Fins. ASME J. Heat Transfer, 1988, 110(2): 310-313
- [4] Kellar K M, Patankar S V. Numerical Prediction of Fluid and Heat Transfer in Circular Tube with Longitudinal Fins Interrupted in the Streamwise Direction. ASME J. Heat Transfer, 1990, 112(2): 342-348
- [5] Yu B, Nie J H, Tao W Q. Experimental Study on the Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of Tubes with Internal Wave-Like Fin Tubes. Heat and Mass Transfer, 1999, 35(1): 65-73
- [6] Sparrow E M, Comb J W. Effect of Interwall Spacing and Fluid Flow Inlet Conditions on Corrugated-Wall Heat Exchanger. Int J. Heat Mass Transfer, 1983, 26(7): 993-1005
- [7] Mendes P S, Sparrow E M. Periodically Converging-Diverging Tubes and Their Turbulent Heat Transfer, Pressure Drop, Fluid Flow, and Enhancement Characteristics. ASME J. Heat Transfer, 1984, 106(1): 55-63
- [8] 郎彦. 波纹管强化传热式换热器的开发与应用. 节能, 1994, 154(7): 44-46
- [9] 陶文铨. 数值传热学 (第2版). 西安: 西安交通大学出版社, 2001. 442-452