

# 微圆管内液体流动与换热特性的实验研究

李卓 吕嘉喜 何雅玲 陶文铨

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要** 以去离子水作为工质, 在当量直径 300~1570  $\mu\text{m}$  的微圆管 (1Cr18Ni9Ti) 内进行层流流动与换热特性的实验研究。实验结果表明当壁面粗糙度超过 1% 时摩擦系数随着壁面相对粗糙度的增加而增加。在给定外壁面热流密度的条件下, 当雷诺数小于 100 时, 管壁轴向导热对换热特性的影响随着壁厚与内径比的增加而增大; 当雷诺数大于 100 时, 轴向导热的影响随着雷诺数的增加逐渐减弱, 充分发展区的  $Nu$  数接近常规值 4.36。

**关键词** 微圆管; 层流; 壁面粗糙度; 摩擦系数; 管壁轴向导热

**中图分类号**: TK124 **文献标识码**: A **文章编号**: 0253-231X(2006)05-0829-03

## EXPERIMENTAL STUDY OF LIQUID FLOW AND HEAT TRANSFER IN MICROTUBES

LI Zhuo LÜ Jia-Xi HE Ya-Ling TAO Wen-Quan

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

**Abstract** Experiment was conducted to reveal the flow and heat transfer characteristics with deionized water flowing through microtube (1Cr18Ni9Ti) in laminar state. The inner diameter of the test tube is from 300 to 1570  $\mu\text{m}$ . The friction factor obtained from the experiments increases with the surface roughness increase when the relative roughness is greater 1%. For the given heat flux at the outside surface, if the Reynolds number is less than 100, the effect of heat conduction in the tube wall increases with the ratio of wall thickness to the inside diameter; if the Reynolds number is greater than 100, the heat conduction in the tube wall becomes weaker, and the Nusselt number in the fully-developed region approaches the conventional value 4.36.

**Key words** microtube; laminar flow; surface roughness; friction factor; the axial heat conduction in tube wall

## 1 前言

近年来, 在微电系统、微型燃料电池、精细化工、航空航天等领域微尺度流动与换热得到广泛应用。国内外学者对此进行了大量的实验研究, 不同作者实验结果常常差异很大, 相关内容见文献 [1~4]。本文实验研究了去离子水在不锈钢微圆管中层流状态下的流动与换热情况, 从不同的壁面相对粗糙度对摩擦系数的影响以及不同管壁厚与当量直径的比值对换热特性的影响进行了研究, 并与理论值进行比较以进一步查明影响微通道流动与换热特性的主要因素。

## 2 实验方法和装置

实验装置系统如图 1 所示, 主要由三部分组成:

供水段、测试段和数据采集段。测试管材料为 1Cr18Ni9Ti, 尺寸见表 1。采用电子扫描显微镜 SEM 获得实验管的截面如图 2 所示。在供水段, 去离子水通过高压氮气罐 1 驱动流过滤器 5 进入测试段。测试段主要是壁面热电偶的布置、保温层的安装以及加热设备和压差的测量。实验系统共有 7 个测点, 在管子的外表面均匀地布置 5 个直径为 50  $\mu\text{m}$  铜—镍铜热电偶, 为测得水的进出口温度, 在入口和出口的两个连接槽内同样布置 2 个热电偶。

加热部分采用直流电源 8(SKD-30V-100A) 对管壁加热, 为准确获得所加功率, 通过电量隔离器 9(HA00-3D2) 进行电流和电压的实时测量。本实验中保温层采用云母带和黑海绵进行绝热。进出口的压差通过压力变送器 DP6E22M1B1D 获得, 采用高

收稿日期: 2006-01-23; 修订日期: 2006-07-10

基金项目: 973 重点基础研究基金资助项目 (No.G2000026303); 国家自然科学基金资助项目 (No.50236010)

作者简介: 李卓 (1976-), 女, 辽宁葫芦岛人, 博士, 主要从事换热设计强化、微尺度流动与换热研究。

精度的电子秤 11(Sartorius A-11218-23) 测得质量流量。通过数据采集卡 Keithley2700 由计算机 6 完成电压信号的处理过程。

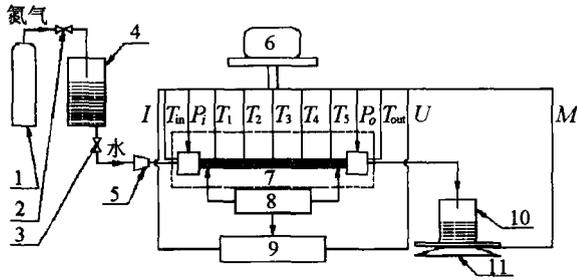


图 1 实验系统图



图 2 SEM 下实验管 No.1、No.2 和 No.3 截面图  
(放大倍数分别为 45、90、120 倍)

所有的实验均在稳态下进行，雷诺数的变化范围 80~2200，工质流速通过气阀控制，一个工况的稳定时间大约需要 45 分钟。实验过程中需要测定的参数有工质在进出口间的压差  $\Delta P$ 、质量流速  $M$ 、进出口温度  $T_{in}$  和  $T_{out}$ 、壁面的温度  $T_1 \sim T_5$ 。根据所测得的结果可以进行以下数据处理：

$$\Delta p = p_i - p_o - p_d = p_i - p_o - 1.18\rho u^2 \quad (1)$$

$$u_m = \frac{M}{\rho A_c} = \frac{4M}{\rho \pi D_i^2} \quad (2)$$

$$f = \Delta p \cdot \frac{D_i}{L} \cdot \frac{2}{\rho u_m^2} \quad (3)$$

$$Nu_x = \frac{h_x \cdot D_h}{k_l} = \frac{q \cdot L_x / L \cdot D_h}{\Delta T_x k_l} = \frac{M c_p (T_{out} - T_{in}) D_h \cdot L_x / L}{A_w \Delta T_x k_l} \quad (4)$$

### 3 实验结果与分析

实验结果所得到雷诺数  $Re$  和摩擦系数  $f$  的变化关系如图 3 所示。在图 3 中，从三种管道的变化

曲线与常规尺度预测值 ( $f = 64/Re$ ) 作比较可以看出，管道 No.1 阻力系数与经典值吻合很好，No.2 阻力系数增加了 8%，No.3 的阻力系数增加了 15%。实验测得微圆管的绝对粗糙度约为  $5.5 \mu m$ ，相对粗糙度依次为 0.3%、0.9%、1.5%。对于微管，根据文献 [5] 如果相对粗糙度超过 1%，就不能忽略壁面粗糙度的影响。从 SEM 图片上可以看出微通道中粗糙度分布通常比较密集，这就导致即使在较低的相对粗糙度情况下，也能产生较大的流动阻力从而造成微管的摩擦系数大于常规值。比较曲线 1、2 和 3 可以看出，如果以大约  $\pm 10\%$  作为元件的偏差，则当相对粗糙度大于 1.0% 以后，粗糙度对微通道阻力的影响就需加以考虑，这与文献 [1,2] 结果一致。

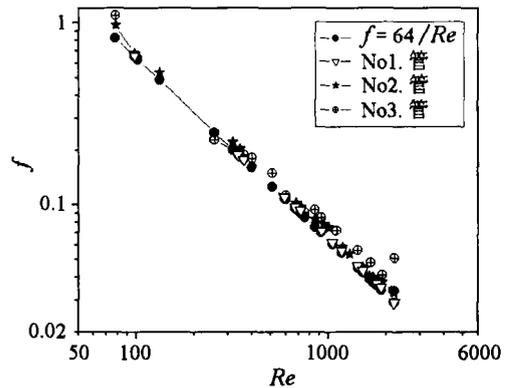
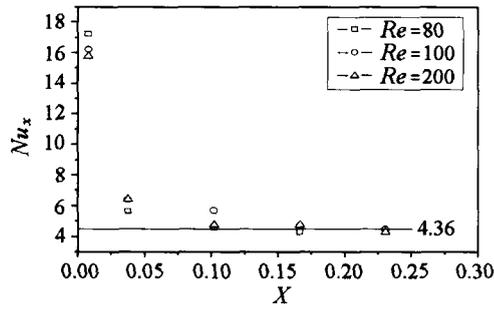


图 3 不同尺寸实验管的  $f-Re$  曲线图

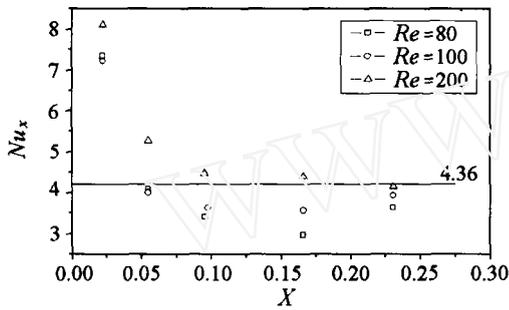
图 4(a)~(c) 给出了三个测试管在  $Re$  数约为 80、100 和 200 的局部  $Nu$  变化曲线。从图中可看出，由于入口效应的影响，管道在入口处的  $Nu$  变化剧烈。从图 4(a) 中，可以看到 No.1 管的换热特性与常规通道相比结果一致，在流动的充分发展区  $Nu$  数接近 4.36。在图 4(b) 中，可以发现低雷诺数的情况下，沿程  $Nu$  与常规值相比偏差很大，尤其当  $Re=80$  时，实验得到的  $Nu$  在充分发展区只有常规值的 70%~85% 左右。随着雷诺数增大， $Nu$  的变化趋势越来越接近常规通道的变化规律。No.3 管道的变化趋势图 4(c) 与图 4(b) 类似。作者认为导致这种现象的原因除了一定的实验误差外，还有一个重要的因素——轴向导热。

表 1 实验管的几何尺寸

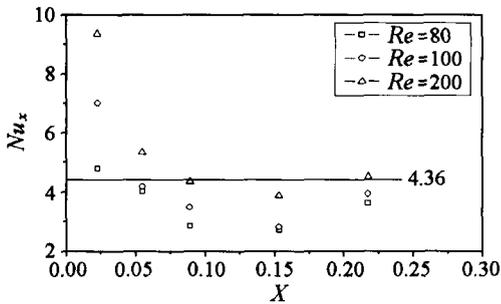
管	内外直径 $D_i/D_o$ ( $\mu m$ )	管 $L$ (mm)	管壁加热 $L_h$ (mm)	相对粗糙度 (%)	壁厚与内径比 $(D_o - D_i)/2D_i$ (%)	功率 (W)
1	1570/1810	500	470	0.3	7	15
2	624.4/1000	300	270	0.9	30	12
3	372/670	300	270	1.5	40	9



(a) No.1



(b) No.2



(c) No.3

图4  $Nu_x$ - $x$  实验结果

常规通道均匀热流密度时充分发展区  $Nu=4.36$ , 这是在壁厚与当量直径的比值很小时忽略了轴向导热而得出的实验值<sup>[6]</sup>。从表1和SEM图片中可以看到实验中 No.1 管的壁厚只有当量直径的7%左右, 所测的实验值与常规值很接近, 而且不受雷诺数变化的影响。No.2 和 No.3 的管壁厚与当量直径比值达到30%~40%, 在这种情况下壁面的导热已经不能忽略。轴向导热的存在使得热流密度沿着管长不再均匀变化, 然而在处理实验数据时由于不能测得沿程的流体平均温度, 只能按照

线性插值来推算流体的温度值, 按均匀热流计算局部换热系数, 因而导致了以上结果。

## 4 结 论

本文通过对不同微尺寸的管内进行层流流动与换热的实验研究, 得出以下结论:

(1) 由于微通道中粗糙度的密集分布和粗糙度相对作用面加大, 使得实验得到的摩擦系数比常规值大, 并且随着粗糙度增大摩擦系数越来越大。本实验研究的进一步任务是查明, 如果以 $\pm 10\%$ 作为元件的偏差, 在多大的相对粗糙度下, 液体在微通道内层流流动充分发展区仍可采用常规公式。

(2) 当壁面的厚度与当量直径处于同一数量级, 且流动处于低雷诺数区时, 壁面导热会引起内壁面不均匀热流分布从而使流体的温度分布呈现非线性变化。由于整理实验数据时流体温度按线性变化处理, 热流密度认为是均匀的, 就导致了所得到的局部值偏离常规尺度的通道。当雷诺数增大时, 这种偏离现象逐渐减弱。

(3) 在微通道实验中测量误差对测试结果的影响比常规通道大得多, 如何提高微通道流动与换热测试的实验精度是微尺度研究中需要解决的课题。

## 参 考 文 献

- [1] Mala G M, Li D. Flow Characters of Water in Microtubes. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 1999, 20(2): 142-148
- [2] Li Z X, Du D X, Guo Z Y. Experimental Study on Flow Characteristics of Liquid in Circular Microtubes. In: G.P. Celata, et al. *Proceedings of International Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Microscale*. New York: Begell House, 2000. 162-168
- [3] Herwig H, Hausner O. Critical View on "New Results in Micro-Fluid Mechanics". *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2003, 46(5): 935-937
- [4] Guo Z Y, Li Z X. Size Effect on Microscale Single-Phase Flow and Heat Transfer. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(1): 149-159
- [5] 唐桂华. 微尺度气体流动与换热特性研究及格子 Boltzmann 方法分析: [博士论文]. 西安: 西安交通大学, 2004
- [6] Shah R K, London A L. *Laminar Flow Forced Convection in Ducts*. In: T F Irvine, J P Hartnett (Eds.). *Advances in Heat Transfer, Supplement 1*. Academic Press, New York, San Francisco, London, 1978. 17-36