

# 粗糙度与气体稀薄性对微尺度流动特性的影响

唐桂华 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** 对氮气和氦气在粗糙微通道以及光滑微通道内流动进行了阻力特性实验研究。实验结果表明, 即使在较小的相对粗糙度高度下, 由于微通道中的粗糙度分布密集, 会极大地增加流动阻力, 这是导致文献中微通道流动阻力系数实验值相互偏差的主要原因之一; 而对于滑移区的气体流动, 气体稀薄性使流动阻力明显减小而导致流量增加。

**关键词** 微通道; 滑移区; 流动阻力; 实验研究; 粗糙度

**中图分类号:** TK124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2006)02-0304-03

## ROUGHNESS AND RAREFACTION EFFECTS ON FLOW CHARACTERISTICS IN MICROCHANNELS

TANG Gui-Hua 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** Experiments are conducted for nitrogen and helium gaseous flow through rough and smooth microchannels. The experimental results show that the surface roughness increases the flow resistance significantly even though the relative height is rather small. This is one of the major factors which causes the disagreements on the friction factor of microchannel flow in the literature; for the gaseous flow in the slip regime, an evident lower flow resistance is observed due to the gas rarefaction effect which causes the mass flow rate increase compared with the continuum flow.

**Key words:** microchannel flow; slip regime; flow resistance; experimental study; roughness

### 1 前言

在各种空间和时间尺度内, 近二十年来自然科学及工程技术发展的一个重要趋势就是朝着微型化迈进。在飞速发展的微电子机械系统 (MEMS) 应用中, 微尺度流动和传热问题日益显得重要和突出。迄今为止, 研究者们对微尺度流动与换热进行了广泛的研究, 但是不同研究者实验得到的结果在定量甚至定性上存在着较大差别<sup>[1]</sup>, 影响微尺度流动与换热的深层机理仍有待进一步研究。本文针对粗糙度和气体稀薄性开展实验研究, 以期进一步查明影响微尺度流动特性的主要因素。

### 2 实验系统

所建立的微尺度流动实验台如图 1 所示<sup>[1]</sup>。气体由高压气罐 (1) 减压经  $0.5 \mu\text{m}$  过滤器 (4) 后进入测量系统, 测试段 (6) 的进出口设置了两个容积较大的集气装置 (5), 将微细通道与整个流动系统连起

来。测试段进口压力由粗压力调节阀 (2) 及精密压力调节阀 (3) 控制。进出口绝对压力及温度分别由绝对压力传感器 (A1, A2) 和热电偶 (B) 测量。体积流量由不同量程范围的微体积流量计 (C1~C4) 测量, 由球阀 (8) 进行切换, 由截止阀 (7) 连通或关闭。所有测量数据经过 A/D 转化后, 都由计算机 (9) 进行数据采集。

实验中采用的微通道分成两种类型, 不锈钢圆管 (2 个通道, SST1 及 SST2 内径分别  $172 \mu\text{m}$  及  $119.1 \mu\text{m}$ ) 以及微石英圆管 (3 个通道, MFST1、MFST2 及 MFST3 内径分别为  $19.78 \mu\text{m}$ 、 $14.54 \mu\text{m}$  及  $10.06 \mu\text{m}$ )。通道的内径或内截面用扫描电子显微镜 (SEM) 进行电镜测量。图 2 为 SEM 下的两个典型通道尺度测试图像。从 SEM 图上我们还可以发现, 对于石英圆管, 其内表面非常光滑, 而对于不锈钢通道, 其内表面密集分布着不规则的凸起或凹陷, 内表面粗糙度比较大。假设流动为一维、等温、

收稿日期: 2005-12-10; 修订日期: 2006-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No.50406020; No.50425620)

作者简介: 唐桂华 (1974-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 主要从事热设计管理与强化, 微尺度流动与换热以及介观方法研究。

稳态(定常), 工质为可压缩理想气体, 对于长度为  $L$  的均匀截面通道, 设其进出口 Mach 数分别为  $M_1$  和  $M_2$ , 则可压缩流动平均摩擦系数可表示为<sup>[1]</sup>

$$f_{\text{comp}} = \frac{D_h}{L} \left[ \frac{p_1^2 - p_2^2}{RT(\rho u)^2} - 2 \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right) \right] \quad (1)$$

式中  $\gamma$  为气体比热容。实验误差分析见文献 [1]。

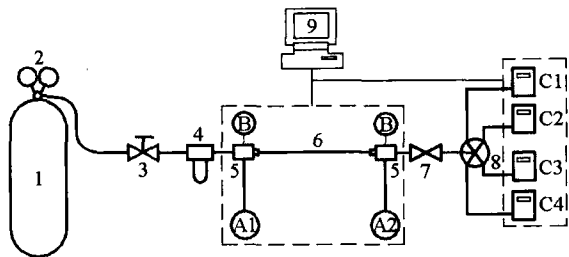


图1 实验装置示意图

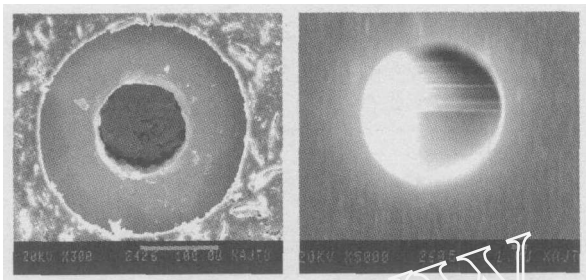


图2 SEM下SST2不锈钢管及MFST1石英管尺度测量

### 3 粗糙度影响

图3及4表示两种不锈钢通道(SST1及SST2)中氦气与氮气流动实验阻力系数, 可以观察到其阻力系数远大于常规尺度通道理论预测值( $fRe = 64$ )。对于通道SST1, 阻力系数约增加55%, 对于通道SST2, 阻力系数约增加70%。而且层流到湍流转换 $Re$ 也明显提前。我们把阻力系数的明显增加归结于粗糙度的影响。利用光切法显微镜, 测量的绝对粗糙度为 $7 \mu\text{m}$ 。所以对于本文SST1及SST2管, 相对粗糙度分别为4.1%及5.9%。通过将图3与4中实验数据与Colebrook关联式(2)<sup>[2]</sup>比较, 同样可以间接地估计通道的粗糙度。对于通道SST1, 估计得到的内表面相对粗糙度 $\varepsilon/D = 5.5\%$ , 通道SST2, 估计得到相对粗糙度 $\varepsilon/D = 8\%$ , 由此得到两种通道的绝对粗糙度约为 $9.4 \sim 9.6 \mu\text{m}$ 。这一估计值比实际测定得到的粗糙度高度要大出很多, 这是因为Colebrook关联式中并没有包括粗糙度的分布规律参数。而常规管的实验表明, 粗糙度的几何结构(其中包括间距、形状、尺寸等)对通道阻力是有较大影响的。作者认为正是因为微通道中粗糙度分布密集, 才造成了即使在较小的相对粗糙度高度情

况下, 也能产生较大的流动阻力。

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \lg \left( \frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

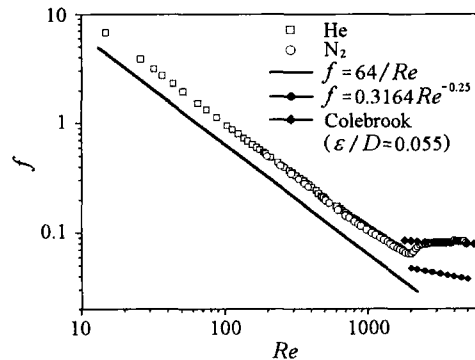


图3 通道SST1实验测试摩擦系数

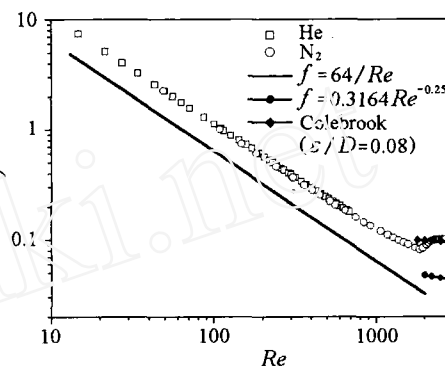


图4 通道SST2实验测试摩擦系数

### 4 气体稀薄性的影响

当气体分子平均自由程 $\lambda$ 与通道的特征尺度比值, 即 $Kn$ 大到一定值后, 连续性假设不再适用。压降以及质量流量都不能再直接应用连续模型进行预测。为了验证气体稀薄性的影响, 对三种内径更小的石英微管(MFST)进行了实验测试。图5与6分别表示氦气和氮气流动的摩擦阻力系数实验结果, 与不可压缩流体理论预测值 $fRe = 64$ 相比, 实验结果明显偏小, 而且随通道直径的减小, 阻力系数偏小程度更高。对于氮气, 实验结果摩擦常数值为不可压缩流体理论预测值的77%~95%之间。对于氦气, 实验结果为不可压缩流体理论预测值的78%~90%之间。随 $Re$ 增大, 图5与6上摩擦常数都有增大趋势。这是因为随着 $Re$ 增大, 由于实验中通道出口直接连通大气, 出口压力不变, 所以通道进口压力增大,  $Kn$ 降低, 通道中总的气体稀薄性效应减弱, 所以阻力增加。

图7与8分别表示氦气和氮气作为工质时的通道平均 $Kn$ 对摩擦阻力系数的影响。实线为考虑稀薄性的一阶速度滑移理论预测值结果, 对于 $Kn$ 范

围为  $0.001 < Kn < 0.1$  的滑移区, 预测公式为 [3]

$$fRe = \frac{64}{1 + 8Kn(2 - \sigma_v)/\sigma_v} \quad (3)$$

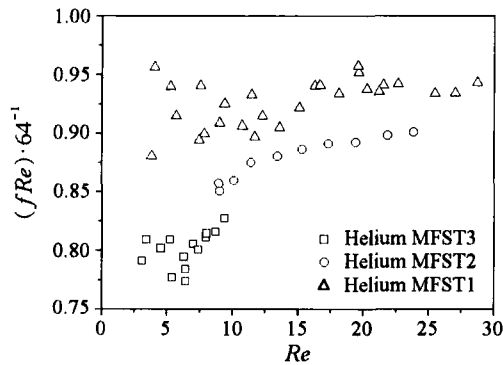


图 5 实验摩擦系数与不可压缩流体的理论值之比, 氦气

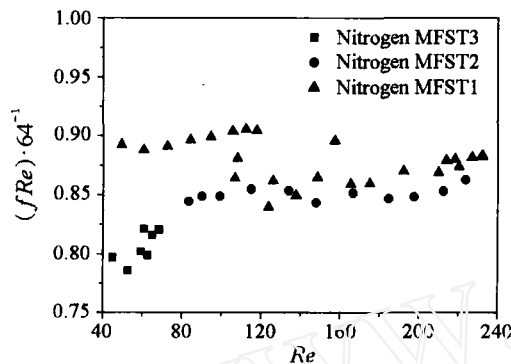


图 6 实验摩擦系数与不可压缩流体的理论值之比, 氮气

从图上可见, 随着  $Kn$  的增加, 阻力系数减小, 与滑移理论预测趋势相同, 但是降低的幅度比预测公式 (3) 要大。在文献 [4] 中, Araki 等也发现了类似的实验结果, 其实验中氮气在微圆管中的流动摩擦系数比一阶速度滑移理论预测结果要明显偏小。分析其原因之一, 有可能是通道表面的实际动量调和系数  $\sigma_v$  小于 1 所致。图 7(氦气) 上分别表示了取  $\sigma_v = 1$  和  $\sigma_v = 0.7$  的一阶滑移模型预测值, 时预测值更接近实验结果。但是对于图 8(氮气), 即使取  $\sigma_v = 0.7$ , 一阶滑移预测值与实验结果还是有较大的偏差, 而取  $\sigma_v = 0.2$ , 则与实验结果符合。气体稀薄性会导致微通道中流动阻力降低, 这已基本形成共识, 但阻力系数降低幅度与气体稀薄性的关系, 各文献的实验结果并不完全相同, 有的实验结果与一阶滑移模型预测值符合, 而有的实验结果则与一阶滑移模型预测值之间有较大偏差。需要更多的实验研究来解释这种滑移区流动实验现象的分歧。本文的计算与实验对比表明, 采用一阶滑移模型及合适的动量调和系数值可以得到与实验相一致的结果。但是如何选取  $\sigma_v$  的数值仍依赖与实验数据的对比。

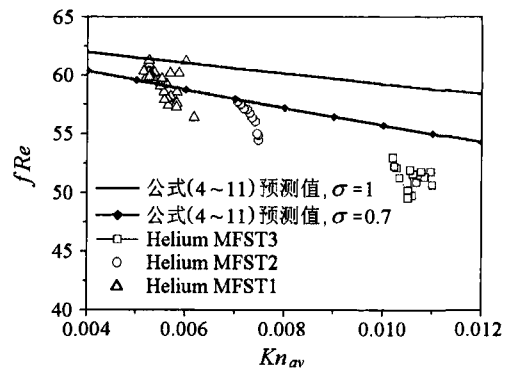


图 7 实验摩擦系数与平均  $Kn$  的关系, 氦气

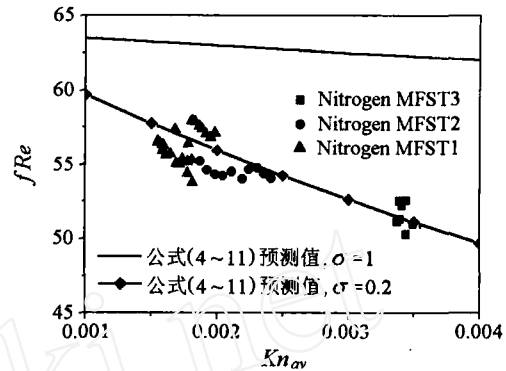


图 8 实验摩擦系数与平均  $Kn$  的关系, 氮气

## 5 结 论

通过对流动处于连续区的粗糙微通道和流动处于滑移区的光滑微通道进行阻力特性实验研究, 获得以下结论:

(1) 粗糙度对流动阻力影响显著, 粗糙度是造成多数文献中关于微通道流动特性实验结果无法统一的重要因素之一。微通道中由于粗糙度分布密集, 即使较小的相对粗糙度也会产生较大的流动阻力。

(2) 对于直径范围为  $10 \sim 20 \mu\text{m}$  的石英微圆管, 其流动阻力比不可压缩流体常规通道理论预测值要小, 摩擦系数 ( $fRe$ ) 随着通道直径的减小而减小, 而且实验获得的阻力系数比运用一阶速度滑移边界条件、动量调和系数为 1 时预测的阻力系数要小。

## 参 考 文 献

- [1] 唐桂华. 微尺度流动与换热特性研究及晶格-Boltzmann 方法分析. 西安: 西安交通大学图书馆, 2004
- [2] Streeter V L, Wylie E B. Fluid Mechanics (8th edition). New York: McGraw-Hill, 1985
- [3] Ebert W A, Sparrow E M. Slip Flow in Rectangular and Annular Ducts. ASME J. Basic Eng., 1965, 87(4): 1018-1024
- [4] Araki T, Kim M S, Iwai H, et al. An Experimental Investigation of Gaseous Flow Characteristics in Microchannels. Microscale Thermophysical Engineering, 2002, 6(2): 117-130