

文章编号: 1000-8055(2007)09-1405-07

微通道气体单相流动特性的数值分析

张田田¹, 贾力¹, 武利媛¹, 冯武军²

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院, 北京 100044;

2. 清华大学建筑学院, 北京 100084)

摘 要: 微通道是各种微系统结构中一个基本的组成部分. 考虑了可压缩与粘性加热的影响, 针对氮气在3种不同尺寸的微通道(水力直径范围: 30~3 000 μm)内的流动特性进行了数值研究. 分别就不同尺寸、不同雷诺数(Re)下压力降、摩擦因子和摩擦常数的规律进行了研究, 着重考察了长径比、入口段出口段影响、可压缩性影响及粘性加热影响. 计算分析揭示出转捩雷诺数提前, 在300 μm 管道转捩雷诺数提前到1 200附近.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 微通道; 数值模拟; 流动特性; 可压缩性

中图分类号: TK 121

文献标识码: A

Numerical analysis of single phase gaseous flow characteristics in microchannels

ZHANG Tiantian¹, JIA Li¹, WU Liyuan¹, FENG Wujun²

(1. School of Mechanical and Electronic Control Engineering,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2 School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The microchannel is an integral part of various micro systems. The flow characteristics of nitrogen in three different microchannels (hydraulic diameter of 30~3 000 μm) were numerically investigated with consideration of the effect of compressibility and viscosity heating. The effects of size and Reynolds number (Re) on pressure drop, friction factor and friction constant were investigated. Especially, the priority of the research was placed on the effect of ratio of length, entrance/exit, compressibility and viscosity heating. The calculated results show that transition Re is brought forward to about 1 200 in 300 μm microchannels.

Key words: aerospace propulsion system; microchannel; numerical simulation; flow characteristics; compressibility effect

微通道是各种微系统结构中一个基本的组成部分. 然而, 据有关报道, 微通道内的流动及传热性能均偏离了适用于宏观通道的常规结论.

Wu 和 Little^[1,2]测量了气体流经微小槽道时的流动特性, 发现通道摩擦阻力系数远远高于充分发展层流理论计算值, 由层流到湍流过渡的临界雷诺数大大减小, 雷诺类比对微槽道也不适用, 他们认为偏离常规理论值的原因应归结于通道内壁

较大的相对粗糙度和微细尺寸较大的测量误差.

过增元等^[3]对微细圆管内气体流动阻力特性的实验研究表明, 层流状态下微细圆管内气体流动的 Fanning 摩擦系数大于不可压流体充分发展理论值, 分析其物理机制应归结为微细圆管内气体流动的可压缩性导致速度剖面偏离抛物分布, 使得近壁面处流体的径向速度梯度增加, 从而导致摩擦阻力的增大.

收稿日期: 2006-08-14; 修订日期: 2006-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(50576002)

作者简介: 张田田(1981-), 男, 湖北松滋人, 博士生, 主要从事微通道中传热传质的研究.

另一些研究者的结果则与此相反. Pfahler 等^[4]人测量了气体流经硅蚀刻出来的微小通道时的摩擦阻力系数. 发现流体的流动阻力比传统的不可压缩理论预测的值小, 摩擦阻力系数随雷诺数的降低而减小. Choi 等^[5]考察了氮气在微细圆管内流动的摩擦阻力系数和对流换热系数, 实验测得微通道内流体流动 Darcy 摩擦系数约为 53, 明显小于常规尺度下的理论值 64. 通道内层流充分发展时传热系数与雷诺数相关, 通道湍流对流换热系数大于常规尺度光滑管内关联式预测值. Harley 等^[6]对梯形硅微通道内气体流动行为进行了实验研究和模型分析, 结果表明在低雷诺数时, 通道阻力系数明显小于不可压流体充分发展层流理论计算值, 他们认为这是由于微尺度下气体在壁面存在速度滑移(即稀薄效应)造成的.

还有学者的实验研究表明, 尺度的减小不会导致现象与常规尺寸的差异. Michael^[7]研究认为, 在小尺度下转捩雷诺数与常规尺度下基本一致, 没有发现有转捩提前的迹象, 并且在对水力直径为 25~ 100 μm 的管道的研究中发现, 摩擦因子也与经典值相吻合.

由于尺度的减小有可能使宏观尺度下忽略不计的影响因素起主导作用, 如表面粗糙度、可压缩性、入口效应等的影响对实验研究的结果会产生很大影响, 或扮演更重要的角色, 导致各种结果之间存在很大误差, 这也可能是实验研究中同一问题不同学者会得到不同甚至截然相反的结果的原因. 本文采用计算流体力学法对矩形截面微细管内气体单相流动进行数值分析, 这样可以避免因微尺度实验测量误差和系统条件不同带来的影响, 深入地考察不同参数范围, 揭示影响微细通道内气体流动行为的关键因素.

1 物理模型与数学模型

1.1 物理模型

本文对 3 种不同尺寸的矩形微通道进行了研究, 通道模型如图 1. 通道横截面为正方形, 水力直径为 D_h , 通道长为 L , 尺寸数据如表 1. 工质为氮气. 比热容比 $\gamma = 1.4$, 气体常数 $R = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$. 流动为稳态可压缩流. 给定进口速度, 出口压力为大气压, 流体与壁面均为 293 K, 并且壁面考虑为绝热. 考虑可压缩性的影响与粘性加热的影响.

1.2 数学模型

根据上面的物理模型, 建立对于可压缩气体

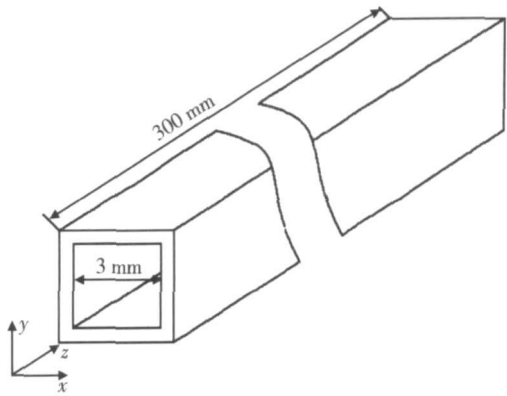


图 1 通道模型示意图

Fig. 1 A schematic diagram of microchannel

的控制方程, 表达如下:

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U \otimes U) = \frac{\partial}{\partial x} \{ -p \delta + \mu [U + (U)^T] \} \tag{2}$$

其中 $\otimes$ 是一个矢量算子, 定义为

$$\otimes = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

δ 是单位矩阵, 这里定义为

$$\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda T) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(U + \frac{U^T}{2} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} U \delta U \right) \right] \tag{3}$$

式中 $\frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(U + \frac{U^T}{2} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} U \delta U \right) \right]$ 就是考虑了粘性加热后产生的附加项. 考虑了可压缩性后方程中总焓定义为 $h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2$.

气体状态方程

$$p = \rho R T \tag{4}$$

边界条件

入口: $u = v = 0 \text{ m/s}$, w 为一定值;

出口: 静压 $p = 0 \text{ Pa}$;

壁面: 绝热 $q_w = 0$, 无滑移 $U_{wall} = 0$.

计算中, 改变进口速度来实现改变入口雷诺

数,所计算的进口雷诺数列在表 1 中.

表 1 通道尺寸与入口雷诺数
Table 1 Channel dimensions and inlet Re

通道	$D_h/\mu\text{m}$	L/mm	Re
# 1	30	3	30/60/90/120
# 2	300	30	300/600/900/1 200/ 1 500/1 800/2 100/2 400
# 3	3 000	300	600/1 200/1 800/2 400

为保证计算精度,使用结构化网格,网格的划分采用 Patran 方式,见图 2,截面 Two way bias 模式,比值为 3,截面节点数为 20×20 ,壁面加密,轴向 Two way bias 模式,比值为 3,数量为 200,总网格数 320 000,这样可以足够保证计算精度.

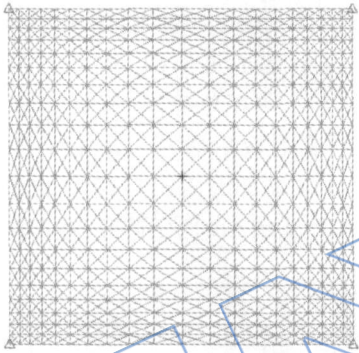


图 2 截面网格示意图

Fig. 2 Details of the mesh used for simulation

2 结果与讨论

2.1 压力降

针对水力直径为 3 mm 和 300 μm 的通道,计算了入口 $Re=600,1\,200,1\,800,2\,400$ 的四种情况,雷诺数定义为 $Re=\rho U D_h/\mu$.图 3 为 3 mm 的通道内进出口压差随 Re 数的变化情况,可以发现通道内进出口压差随 Re 数呈线性变化, Re 越大压差越大,此现象与传统现象符合.从图 4 可以看出当水力直径为 300 μm 时, Re 较小时通道进出口压差随 Re 呈线性变化,但随 Re 增加,进出口压差随 Re 呈非线性变化,此现象和 Mala and Li^[8] 的研究结果相符合.

2.2 摩擦因子与摩擦常数

不可压缩流动,摩擦系数 f 为

$$f = \frac{2D_h \Delta p}{\rho U^2 L} \tag{5}$$

式中 U 表示截面平均速度, ρ 表示流体平均密度,

D_h 和 L 分别表示微通道的水力直径及长度.

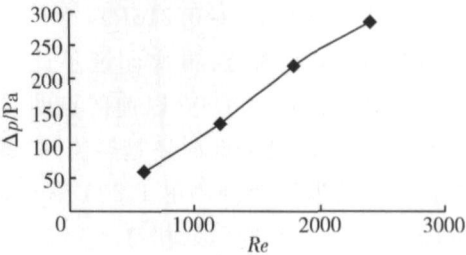


图 3 3 mm 通道进出口压差随 Re 的变化

Fig.3 Pressure drop with Re variation in 3 mm channel

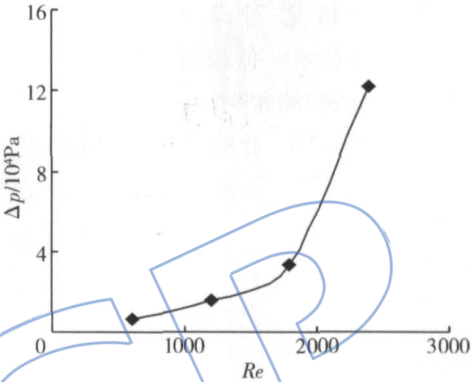


图 4 300 μm 通道进出口压差随 Re 的变化

Fig.4 Pressure drop with Re variation in 300 μm channel

摩擦系数与雷诺数的乘积通常被称作摩擦常数 C .

$$C = f Re \tag{6}$$

经典研究结果表明,对特定截面 C 为常数,本文通道充分发展层流的 $C=57$.

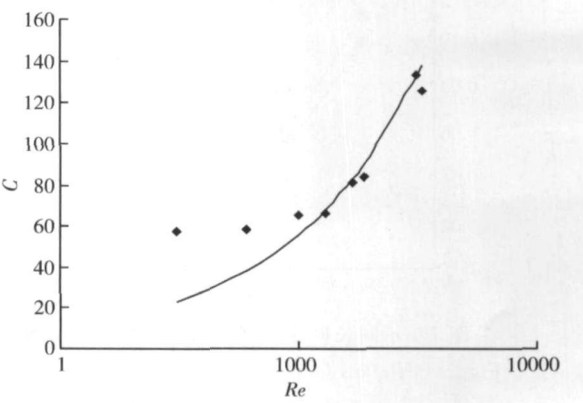


图 5 300 μm 通道 C 随 Re 的变化

Fig.5 Friction constant with different Re in 300 μm channel

图 5 是水力直径为 300 μm 的通道中 C 随 Re 的变化关系图,可以发现,当 Re 大于 1 200 时 C 由平缓变化变为陡然上升,说明此时流动发生转

振. 图中实线为 Blasius 给出的湍流区 f 与 Re 的函数关系曲线, 形式为 $f = 0.316Re^{-0.25}$. 当 $Re > 1\,200$ 时散点与实线吻合, 再次印证了此时流动已经进入湍流区, 而 $Re = 900$ 以前的点明显偏离湍流区所在的实线, 说明此时还是层流区, 据此推测 $300\,\mu\text{m}$ 的通道转捩 Re 在 $1\,200$ 附近, 这与 Wu and Little^[12] 的研究结果相符.

为了研究尺度变化对摩擦因子的影响, 将长径比、入口 Re 给定, 改变管径, 研究管径对 f 的影响. 图 6 是管径为 $3\,\text{mm}$ 和 $300\,\mu\text{m}$ 时, f 在不同 Re 下的变化情况. 可以发现, 层流区, 低马赫数情况下, 不同管径 f 值相同, 说明此时管径对 f 无显著影响. 但 Re 增加时, 由于马赫数的增加导致可压缩性影响增强, 此时 f 值不再相等.

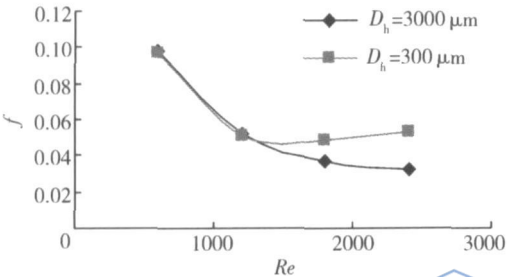


图 6 不同 D_h 下随 Re 的变化

Fig. 6 Friction factor with Re at different D_h

图 7 是 $3\,\text{mm}$ 管道在给定 Re 时, 不同长径比下 f 随 Re 的变化趋势图. 可以清楚地发现 f 随长径比的减少而急剧增加. 分析原因, 是因为小尺度下入口段影响明显增强所导致.

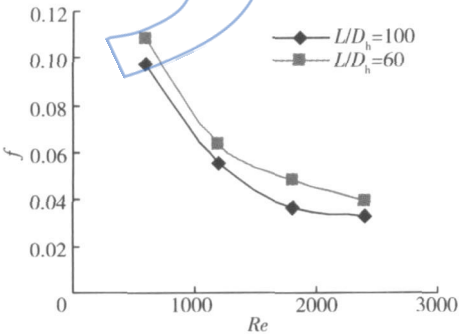


图 7 不同长径比下 f 随 Re 的变化

Fig. 7 Friction factor with Re at different slenderness ratio

2.3 入口段与出口段的影响

入口段速度分布不断变化, 对流动阻力的影响很大, 特别是尺度减小后这种影响更加显著, 许多互相差异很大的微通道流动的实验结果就与没考虑入口段影响有很大关系.

经典理论中, 层流流动入口段长度 L^* 为

$$L^* \approx 0.058 D_h Re \tag{7}$$

湍流流动时, 入口段长度会减短

$$L^* = (30 \sim 40) D_h \tag{8}$$

入口段速度的非均匀性导致压降会增加, 图 8 与图 9 是水力直径为 $3\,\text{mm}$ 和 $300\,\mu\text{m}$ 的通道中沿程的压力分布, 对 $3\,\text{mm}$ 的管道, 从压降可以看出, 入口处压降比充分发展段的大, $Re = 600$ 时, 入口段长度最长, 接近理论值, 随 Re 的增加入口效应也更加剧烈但是可以发现入口段长度会明显减短, 但当 $Re = 2\,400$ 时, 由于进入了湍流区入口段效应已经不太明显. 对于 $300\,\mu\text{m}$ 的通道, 层流区与湍流区入口段效应均比较明显, 并且入口段长度明显比 $3\,\text{mm}$ 的短小, 此时入口段长度只有传统值的 0.2 倍, 入口段长度也是随 Re 的增加而减小, 这个现象与 Lin^[9] 的研究结果一致. 同时应当看到, 当 $Re = 2\,400$ 时, 会有很明显的出口效应. 对 $30\,\mu\text{m}$ 的通道如图 10, 在计算的 Re 下, 入口段已经基本可以忽略了, 但是, 出口效应会很明显, 这个现象是今后研究工作中应该注意的, 应该指出, 出口效应是因为出口速度的明显增加导致了压强的明显减小, 是压降出现非线性变化的趋势.

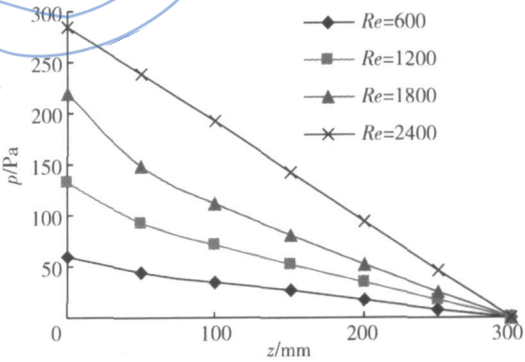


图 8 $3\,\text{mm}$ 通道沿程的压力分布

Fig. 8 Pressure variation along channel with $D_h = 3\,\text{mm}$

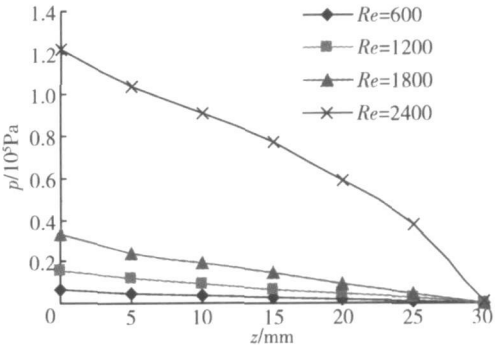


图 9 $300\,\mu\text{m}$ 通道沿程的压力分布

Fig. 9 Pressure variation along channel with $D_h = 300\,\mu\text{m}$

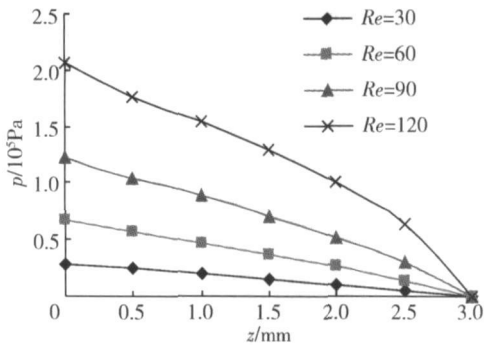


图 10 30 μm 通道沿程的压力分布

Fig. 10 Pressure variation along channel with $D_h = 30 \mu\text{m}$

2.4 可压缩性影响

气体的分子间距离比较大, 压缩性也显著一些, 宏观尺度下, 由于速度较小, 可压缩性也很小, 因此, 一般忽略了可压缩性影响. 但是在微尺度下, 可压缩性的影响会很显著地增强, 压强的剧烈变化使可压缩性变得很突出, 从图 3 和图 4 也可以看出尺度的变化导致的压强的剧烈变化. 不考虑可压缩性的影响就会带来很大误差, 甚至导致结果的错误, 本文在计算建模时就考虑了可压缩性的影响.

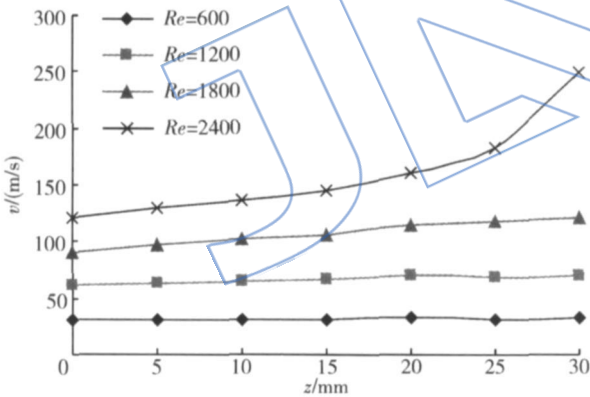


图 11 300 μm 通道沿程速度分布

Fig. 11 Velocity variation along channel with $D_h = 300 \mu\text{m}$

图 11 是 300 μm 管道不同进口 Re 下沿程速度分布, 图 12 是平均马赫数. 可以看出, 在平均马赫数为 0.1 左右时, 沿程速度基本没有明显变化, 也就是说此时可压缩性的影响可以忽略, 但当平均马赫数为 0.2 左右时, 此时沿程速度已经有变化, 此时可压缩性的影响就已经不能忽略了, 随着进口马赫数的增加沿程的速度变化会越来越明显, 即可压缩性的影响十分显著, 从图 12 中得出, 300 μm 时, 当马赫数为 0.2 左右时, 就需要考虑

可压缩性的影响.

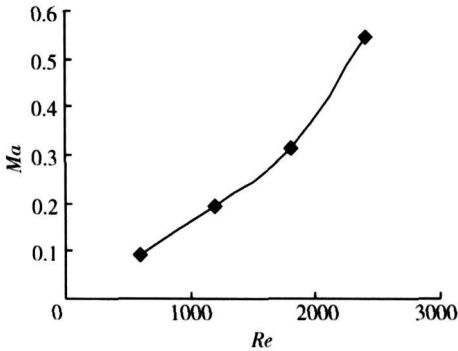


图 12 300 μm 通道平均马赫数随 Re 变化关系

Fig. 12 Average Ma with different Re with $D_h = 300 \mu\text{m}$

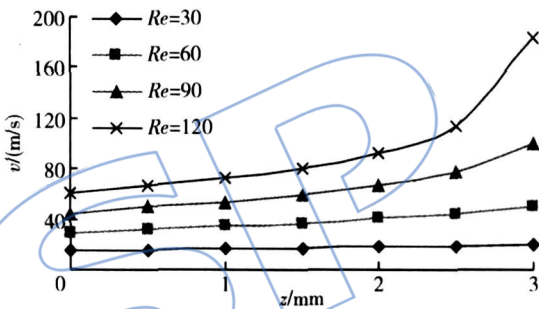


图 13 30 μm 通道沿程速度分布

Fig. 13 Velocity variation along channel with $D_h = 30 \mu\text{m}$

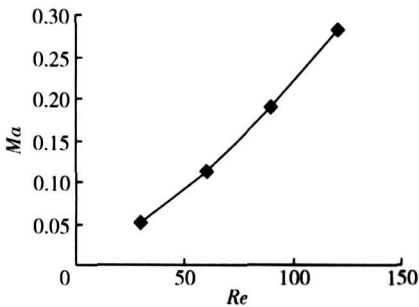


图 14 30 μm 通道平均马赫数随 Re 变化关系

Fig. 14 Average Ma with different Re with $D_h = 30 \mu\text{m}$

图 13 是 30 μm 管道不同进口 Re 下沿程速度分布, 图 14 是平均马赫数. 可以看出, 在平均马赫数为 0.05 左右时, 沿程速度基本没有明显变化, 此时可压缩性的影响可以忽略, 但当平均马赫数为 0.12 左右时, 此时沿程速度已经有变化, 此时可压缩性的影响就已经不能忽略了, 随着马赫数的增加沿程的速度变化会越来越明显, 即可压缩性的影响十分显著, 由此可以发现 30 μm 时, 当平均马赫数为 0.12 左右时, 就需要考虑可压缩

性的影响. 这些与常规尺寸下马赫数大于 0.3 时才需要考虑可压缩性的影响有差异, 并且随着尺度的减小可压缩性的影响会更加显著, 尺度越小可压缩性的影响就会在更低的马赫数下很显著的表现出来. 因此, 马赫数在微尺度下不再是可压与不可压的判据.

图 15 是进出口速度差随进出口压差的变化, 进出口速度差是可压缩性的具体体现, 进出口有明显速度差意味着可压缩性影响的发生. 可以发现, 当进出口压差大于 10 kPa 时, 进出口有了明显的速度差, 也就是说可压缩性的影响就不可以忽略了, 这意味着微通道内可压缩性影响用压力差描述比用 Mach 数好. 可以认为进出口压差大于 10 kPa 是微通道可压缩性的判定条件.

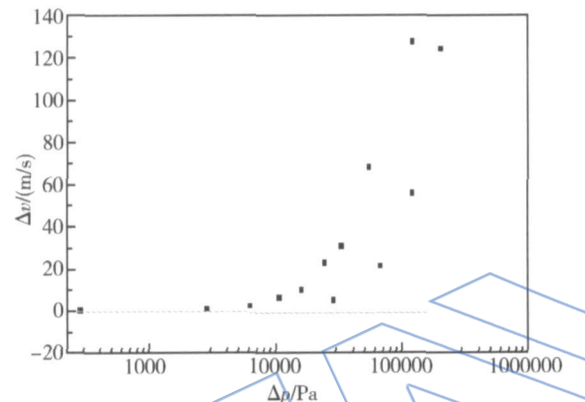


图 15 进出口速度差随进出口压差的变化
Fig. 15 Velocity variation between inlet and outlet with pressure drop along channel

2.5 粘性加热影响

传统通道中, 由于长宽比较低, 速度梯度的变化较小, 因此, 可以忽略粘性加热的影响, 但是在较大长宽比的微通道中, 速度梯度大, 造成在壁面剪切应力加大, 导致近壁处流体被加热使得温度梯度变化明显, 从图 16 可以清楚看到这一现象. 本文分析了 300 μm 与 30 μm 通道中由于粘性加热导致的影响. 表 2 是在 300 μm 与 30 μm 通道中不同 Re 下在粘性加热影响下导致的温升. 可以发现, 随着 Re 的增加和尺度的减小, 粘性加热的影响会增加.

表 2 进出口温差

Table 2 Temperature difference between inlet and outlet

$D_h/\mu\text{m}$	Re	进出口温差/K
300	600	0.4
	1 200	0.6
30	120	1.5
	200	3.5

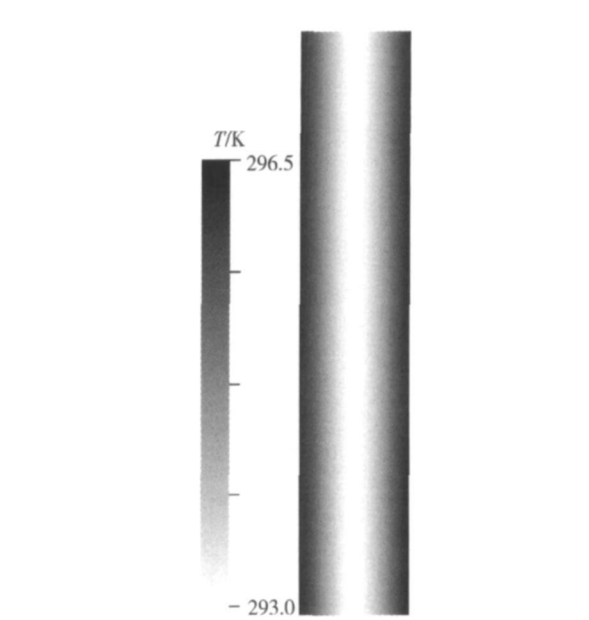


图 16 30 μm 通道 $Re=200$ 时截面温度分布
Fig. 16 Cross section temperature distribution in 30 μm channel with $Re=200$

3 结 论

- 通过上述分析可以得出如下结论:
- (1) 水力直径为 3 mm 的管道并没有发生与常规理论相违背的现象, 可以认为水力直径为 3 mm 的管道依然属于常规尺寸的管道.
 - (2) 微尺度下, 进出口压差随 Re 呈非线性变化; 转捩 Re 提前, 对 300 μm 的管道, 转捩 Re 在 1 200 附近.
 - (3) 摩擦常数处于层流区时与传统值一致, 但在湍流区, 摩擦常数是 Re 的函数, 随 Re 的增加而增加; 达西摩擦因子 f 随长径比的减少而急剧增加; 对不可压缩流体的流动, 管径对达西摩擦因子 f 无显著影响.
 - (4) 微通道中, 入口段影响加剧, 但入口段长度比理论值小, 对 300 μm 的管道, 入口段长度只有理论值的 0.2~0.3, 对 30 μm 的管道, 入口段影响几乎可以忽略, 同时, 随着尺寸的减小会出现出口段效应.
 - (5) 可压缩性的影响在微通道中的影响不可忽略. 常规的马赫数大于 0.3 是可压缩性判别条件的标准在微通道中不再适用, 当进出口压差大于 10 kPa 时, 可压缩性的影响就不可以忽略了, 这意味着微通道内可压缩性影响用压力差描述比用 Mach 数好.
 - (6) 随着 Re 的增加和尺度的减小, 粘性加热的影响会增加.

参考文献:

[1] Wu P Y, Little W A. Measurement of friction factors for the flow gases in very fine channels used for microminiature joule thomson refrigerators[J]. Cryogenics, 1983, 23: 273-277.

[2] Wu P Y, Little W A. Measurement of the heat transfer characteristics of gas flow in very fine channels used for microminiature joule thomson refrigerators [J]. Cryogenics, 1984, 24: 415-423.

[3] 杜东兴,李志信,过增元.微细光滑管内的气体流动阻力特性[J]. 中国科学 E, 2000, 30 (2): 173-178.
DU Dongxing, LI Zhixin, GUO Zengyuan. Friction resistance for gas flow in smooth microtubes[J]. Science in China (Series E), 2000, 30(2): 173-178.

[4] Pfahler J, Harley J C, Bau H, et al. Gas and liquid flow in small channels[C] // Proc. ASME Micromech. Sensors, Actuators, Systems DSC3. New York: 1991, 1: 49-60.

[5] Choi S B, Barron R F, Warrington R O. Fluid flow and heat transfer in microtubes[C] // Proc. ASME Micromech. Sensors, Actuators, Systems DSC3. New York: 1991, 2: 123-134.

[6] Harley J C, Huang Y, Bau H H, et al. Gas flow in microchannels[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995, 28(4): 257-27.

[7] Kohl M. An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, May 2004.

[8] Mala G M, Li D. Flow characteristics of water in microtubes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20: 142-148.

[9] Lin Z Y. Flow visualization and velocity measurements in a liquid microchannel[D]. Taiwan: National Sun Yat-sen University, 2005.

