

微通道流动转捩数值模拟

袁 星, 陶 智, 李海旺

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 应用 CFD 计算软件 ANSYS CFX 对水力直径为 0.4 mm 的矩形截面微尺度通道中的气体流动进行了数值模拟. 采用了 3 种流动模型, 即 $\gamma-Re_\theta$ 转捩模型、层流模型和剪切应力输运 (SST) 模型, 并将模拟结果与实验结果进行了对比. 模拟结果表明: 层流模型及 SST 模型不具有预测转捩的能力; $\gamma-Re_\theta$ 转捩模型捕捉到了临界雷诺数且摩擦因数相对误差在 20% 以下. 在未达到临界雷诺数之前, 通道后部已经出现局部湍流区, 且局部湍流区随着雷诺数的增大而增大. 壁面摩擦因数的最低点对应的流向位置与通道中前后湍流区的交结位置几乎一致.

关 键 词: 微通道; 气体流动; $\gamma-Re_\theta$ 转捩模型; 摩擦因数; 临界雷诺数; 间歇因子; 壁面摩擦因数

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Numerical simulation of flow transition in microchannel

YUAN Xing, TAO Zhi, LI Hai-wang

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine

Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Numerical simulation was conducted with CFD software ANSYS CFX to investigate the characteristics of gas flow in a rectangular microchannel with a hydraulic diameter of 0.4 mm. Three flow models, namely, $\gamma-Re_\theta$ model, laminar model and shear stress transport (SST) model, were taken in the simulation. The simulation results were compared with the experimental data. Results indicate that laminar model and SST model are incapable of predicting transition. $\gamma-Re_\theta$ model forecasts the critical Reynolds number well and the relative errors of friction factor keep under 20%. Before Reynolds number reaches the critical value, local turbulent regions appear at the rear of the microchannel and the regions expand with the growing Reynolds number. The streamwise position where the inlet and the rear turbulent regions meet is almost identical with the position where the skin friction reaches its minimum value.

Key words: microchannel; gas flow; $\gamma-Re_\theta$ model; friction factor; critical Reynolds number; intermittency; skin friction

微机电系统在航空航天、信息、机械、生物工程等众多领域都有着广泛的应用前景^[1-2], 因此自 19 世纪 80 年代被提出以来, 就迅速成为各国的研究热点. 微尺度通道中的流动作为其中的一个

分支, 自然也得到了许多研究者的关注. Mala 和 Li^[3] 以水为工质, 对不同直径的微尺度圆管中的流动现象进行了实验研究. 结果表明微通道中的流动明显区别于常规尺度通道中的流动, 包括转

收稿日期: 2016-08-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51506002)

作者简介: 袁星 (1981—), 男, 湖南郴州人, 讲师, 博士生, 主要从事微尺度通道流动换热研究.

捩提前和摩擦因数增大等;另外表面粗糙度对微通道中流动的影响不能忽略. HU 等^[4]通过在微通道壁面布置粗糙元,用数值方法研究了表面粗糙度对微通道流动特性的影响. QU 等^[5]研究了截面形状为梯形的硅制微通道中流动和换热情况,发现测量得到的摩擦因数比数值预测的要大,作者将这种差别归于壁面的表面粗糙度并提出了表面粗糙度-黏度模型来解释这种实验现象. Toh 等^[6]对受热微通道组内部的三维流动现象进行了研究. 采用有限体积法对稳态层流流动进行求解,通过将预测的局部阻力与已知实验数据比较,使得数值求解的方案到了验证. Rawool 等^[7]在微通道中布置粗糙元,经过数值研究发现,粗糙元为梯形和矩形时摩擦因数要大于三角形;且随着粗糙元高度的增加,摩擦因数呈现非线性的增长趋势. Mokrani 等^[8]对高度为 50~500 μm 的微通道流动进行了数值研究,发现在常规尺度中一些准则和关系依然适用. ZHANG 等^[9]对不同宽高比、不同表面粗糙度的矩形截面微通道内水的流动和换热特性进行了实验研究,发现流动转捩提前,且认为壁面的表面粗糙度可以增强换热但对摩擦因数影响较小. Sahar 等^[10]采用 Fluent 软件数值模拟了矩形微通道中的水流特性,结果表明:二维模型预测的摩擦因数偏低,而三维模型的模拟结果则与实验值较为接近,并且在雷诺数为 1600 附近呈现出转捩的趋势.

历年来国内外研究者们对于微通道流动的研究,大多关注两个方面:其一是对于微通道流动特性研究,如压降、摩擦阻力系数、临界雷诺数等;其二是探究影响微尺度流动特性的因素,如粗糙元、截面形状、工作介质的可压缩性^[11]、速度滑移^[12]、温度跳跃^[13]等. 在数值模拟这一方面,大多数的研究者通常会直接选用层流模型或者全湍流模型,本文考虑到微通道内部可能存在转捩,首次将转捩模型引入微通道流动的数值模拟当中,考察其模拟效果.

1 实验简介

本文实验是在自主设计的实验台上完成,实验台装置如图 1 所示.

原理可参照文献^[14]. 本文模拟所对比的实验中,实验件采用的通道组共有 22 个通道,每个通道理论截面尺寸为 0.4 mm×0.4 mm,通道长度为 90 mm. 实验中以空气为流动工质,测得进口压力 p_{in} 及出口压力 p_{out} .

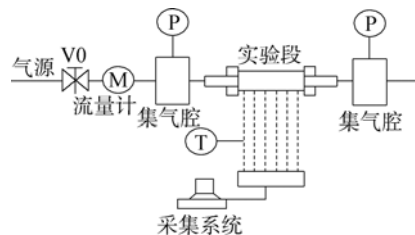


图 1 实验台原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

定义压降 Δp

$$\Delta p = p_{\text{in}} - p_{\text{out}} \quad (1)$$

定义摩擦因数

$$f = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho u^2} \cdot \frac{D}{L} \quad (2)$$

式中 ρ 为进口处空气密度, u 为进口处气体速度, D 为水力直径, L 为通道长度.

定义进口雷诺数

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (3)$$

式中 μ 为气体的动力黏度.

由此可得到 f 随 Re 变化的曲线,实验以 f 的突变来判断临界雷诺数.

2 数值模拟

2.1 连续性假设

在对常规尺度流动进行流动和换热模拟时,连续性假设通常都适用.但是在微尺度的流动中,由于尺度微小,有时甚至会达到与分子平均自由程相同的量级,所以在进行微尺度的数值模拟时需要预先考虑连续性假设是否依然成立.

对于微通道中的流动,通常采用克努森数 (Kn) 来判断连续性假设是否依然适用^[15]. 克努森数定义为

$$Kn = \frac{\lambda}{D} \quad (4)$$

式中 λ 为空气分子的平均自由程. 当 $Kn < 0.001$ 时,即认为连续性假设成立.

经简单计算可知,在本文中 $Kn < 0.001$,故连续性假设依然适用.

2.2 流动模型的选取

根据实验现象判断,随着进口雷诺数逐渐增大,微尺度通道中开始有湍流的出现,即当进口雷诺数达到某一数值时,通道中有转捩发生.

模拟转捩过程除了可以采用直接数值模拟

(DNS)和大涡模拟(LES)之外,还有 4 种比较常用的方法,即低雷诺数湍流模型、间歇因子模型、层流脉动模型和不稳定波模型^[13]。

本文数值研究采用间歇因子模型中的 $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型^[16-17]进行数值模拟。

另外为了突出该模型对微通道流动转捩的预测效果,研究中还选用了层流模型以及工程中较为常用的剪切应力输运(SST)模型与之对比。

2.3 计算模型

原实验件有 22 个通道,数值模拟中简化处理为单个通道。另外,考虑到通道的对称性,为了减少网格数量进而减少计算时间,数值模拟中只选取通道的四分之一进行数值模拟。综上,整个计算区域是一个 $0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ 的长方体区域。

由于计算区域较为简单且规则,直接采用商业软件 ICEM 进行建模并划分网格。采用结构化网格进行网格划分,考虑到与计算软件 ANSYS CFX 的对接,输出时转化为非结构化网格。

针对选定的 3 种流动模型分别验证网格无关性,如表 1 所示。以 $\gamma-Re_{\theta}$ 模型为例(取进口雷诺数为 2000 的情况)。

表 1 $\gamma-Re_{\theta}$ 模型网格独立性验证

Table 1 Grid independence check for $\gamma-Re_{\theta}$ model

编号 j	网格划分	网格 单元数	$\Delta p/\text{Pa}$	$[(\Delta p^j - \Delta p^{j-1}) / \Delta p^{j-1}] / \%$
1	$20 \times 20 \times 360$	129 960	33 761.1	
2	$25 \times 25 \times 360$	207 360	31 245.6	7.451
3	$30 \times 30 \times 360$	301 760	30 216.4	3.294
4	$40 \times 40 \times 360$	547 560	30 119.3	0.321
5(1)	$50 \times 50 \times 360$	864 360	30 082.6	0.122
5(2)	$40 \times 40 \times 500$	1 198 099	30 108.7	0.035

本文认为当压降变化幅度小于 1% 则认为所得的解为网格无关解。根据表 1 的计算结果,本文采取的网格为 $40 \times 40 \times 360$ 的网格。应注意 $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型要求 $Y_{\text{plus}} < 1$ 且壁面法向的节点间距增长率不应超过 1.1^[18]。

2.4 计算方法

采用 CFD 软件 ANSYS CFX 进行数值模拟。

流体工质设置为理想气体。进口边界条件设置为质量流量入口,进口湍流度设置为 9%;出口边界条件设置为压力出口,其值为 101 325 Pa。壁

面设置无滑移边界条件;另外由于表面粗糙度十分微小,设定为光滑壁面。对称面设置为对称边界条件。

另外采用 $\gamma-Re_{\theta}$ 模型时,进口间歇因子设置为 1。

3 结果与讨论

3.1 $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型转捩预测效果

利用 ANSYS CFX 自带的后处理软件读取通道进出口压力,利用式(1)和式(2)计算摩擦因数 f 。

采用 $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型、层流模型以及 SST 模型的模拟结果如图 2 所示。

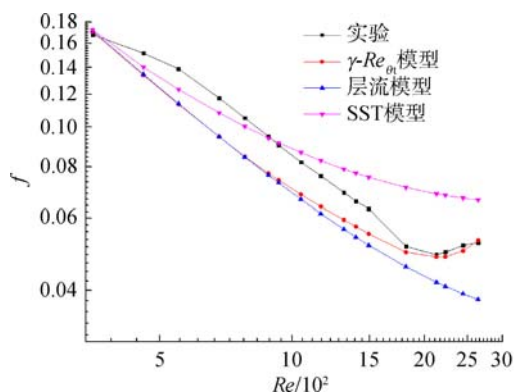


图 2 摩擦因数随 Re 的变化

Fig. 2 Variation of friction factors with Re

根据实验结果,流动转捩的临界雷诺数在 1811~2 125 之间。由图 2 可见,在 3 种模型当中,层流模型及 SST 模型没有模拟出转捩的趋势, $\gamma-Re_{\theta}$ 模型捕捉到了转捩的临界雷诺数,但模拟值与实验值有一定的误差。经过简单计算,摩擦因数模拟值与实验值的相对偏差在 20% 以下。

本文认为引起上述偏差的主要原因为气流在流入和流出通道时有一定的压力损失,而数值模拟得到的 Δp 仅仅是气流在通道中的压降,故计算得到的通道内压降要低于实验测量值。另外,数值模拟是在实验原型的基础上进行了大量的简化和理想化处理的情况下进行的,这也会造成一定的偏差。

3.2 间歇因子

图 3 为不同进口雷诺数下的对称面上间歇因子的分布云图。图中左端为入口,右端为出口。

根据间歇因子分布,在进口雷诺数未达到模拟所捕捉的临界点之前,微通道中就已经出现局

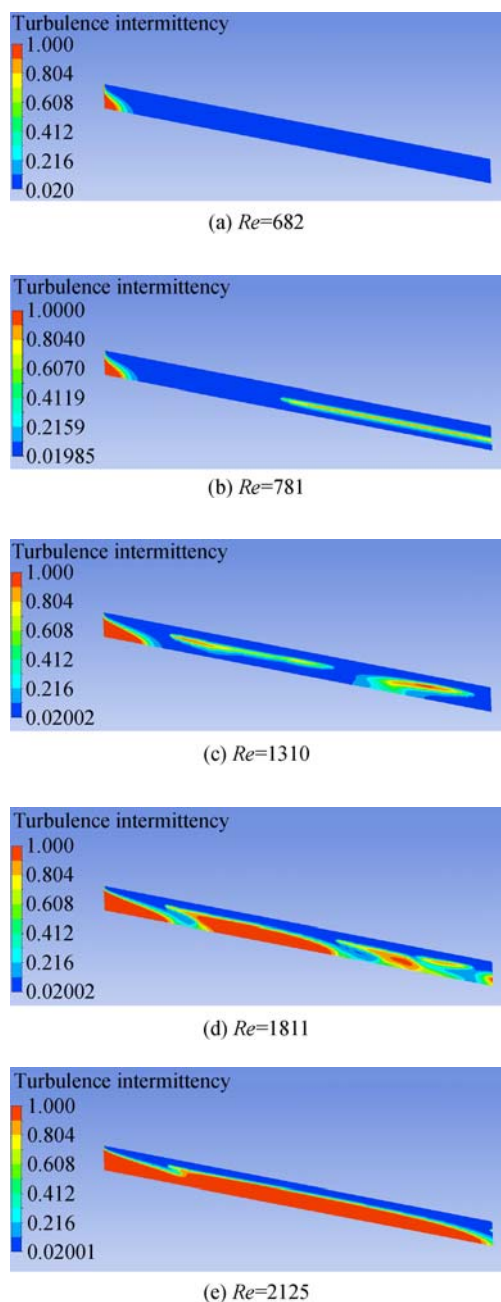


图 3 间歇因子云图

Fig. 3 Contours of intermittency

部湍流区。另外由间歇因子的变化趋势可知,在微通道中,随着进口雷诺数的增大,入口处湍流的影响逐渐增大,而同时在通道的后部开始出现湍流区且随着雷诺数的增大,湍流区逐渐扩大,当 $Re \geq 2125$,入口湍流与后部湍流区相接。

由间歇因子的分布云图可知,在 $Re=682$ 之前,微通道后部是没有湍流区的。

3.3 通道中发生转捩的位置

考察矩形截面通道某一壁面中心线(沿流动方向)上的壁面摩擦因数 C_f 的变化情况。图 4 为 $Re=2125$ 时的壁面摩擦因数随流向位置的变化。

将图 4 与该雷诺数下的图 3 中 $Re=2125$ 的间歇因子云图对照,可以发现 C_f 最低点对应的轴向位置与微通道中前后湍流区相接的位置几乎一致。

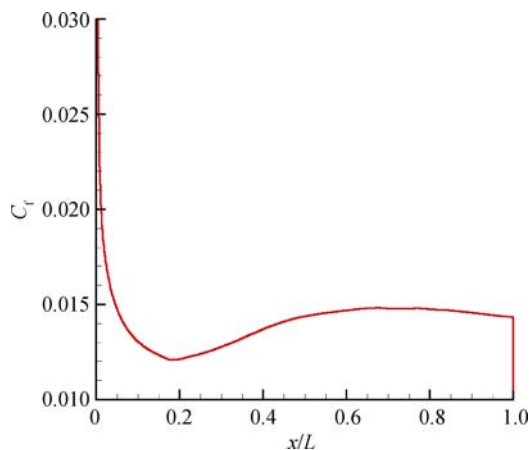


图 4 壁面摩擦因数随流向位置的变化

Fig. 4 Variation of skin friction with streamwise position

4 结 论

本文采用 $\gamma-Re_\theta$ 转捩模型、层流模型和 SST 模型 3 种流动模型对矩形截面微通道中的流动进行了数值研究,结论如下:

1) 3 种模型中 $\gamma-Re_\theta$ 转捩模型捕捉到了临界雷诺数,但在数值上与实验值仍有一定的差别,摩擦因数的相对误差在 20% 以下。

2) 根据间歇因子来看,在未达到临界雷诺数之前,通道后部已经出现局部湍流区,且局部湍流区随着雷诺数的增大而增大。

3) 壁面摩擦因数的最低点对应的流向位置与通道中前后湍流区的交结位置几乎一致。

参考文献:

- [1] 过增元. 国际传热研究前沿:微细尺度传热[J]. 力学进展, 2000, 30(1): 1-6.
GUO Zengyuan. Frintier of heat transfer; microscale heat transfer[J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(1): 1-6. (in Chinese)
- [2] 马哲树,姚寿广,明晓. 微细尺度传热学及其研究进展[J]. 自然杂志, 2003, 25(2): 76-79.
MA Zheshu, YAO Shouguang, MING Xiao. Microscale haet transfer and its investigation progress[J]. Chinese Journal of Nature, 2003, 25(2): 76-79. (in Chinese)
- [3] Mala G M, LI Dongqing. Flow characteristics of water in microtubes[J]. International Journal of Heat and Fluid

- Flow, 1999, 20(2): 142-148.
- [4] HU Yandong, Werner C, LI Dongqing. Influence of three-dimensional roughness on pressure-driven flow through microchannels[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(5): 871-879.
- [5] QU Weilin, Mala G M, LI Dongqing. Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(3): 353-364.
- [6] Toh K C, Chen X Y, Chai J C. Numerical computation of fluid flow and heat transfer in microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(26): 5133-5141.
- [7] Rawool A S, Mitra S K, Kandlikar S G. Numerical simulation of flow through microchannels with designed roughness[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2006, 2(3): 215-221.
- [8] Mokrani O, Bourouga B, Castelain C, et al. Fluid flow and convective heat transfer in flat microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(5/6): 1337-1352.
- [9] ZHANG Ji, DIAO Yanhua, ZHAO Yaohua, et al. An experimental study of the characteristics of fluid flow and heat transfer in the multiport microchannel flat tube[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 65(1/2): 209-218.
- [10] Sahar A M, Özdemir M R, Fayyadh E M, et al. Single phase flow pressure drop and heat transfer in rectangular metallic microchannels[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 1324-1336.
- [11] 赵汉中, 陈瑶. 微尺度通道中可压缩气体三维流动的数值分析[J]. 微纳电子技术, 2007, 44(11): 1008-1011, 1025. ZHAO Hanzhong, CHEN Yao. Numerical analysis of three-dimensional compressible gas flow in microtubes[J]. MEMS Device and Technology, 2007, 44(11): 1008-1011, 1025. (in Chinese)
- [12] 曹炳阳. 速度滑移及其对微纳尺度流动影响的分子动力学研究[D]. 北京: 清华大学, 2005. CAO Bingyang. Molecular dynamics simulation of velocity slip and its effect on micro- and nanoscale flow[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)
- [13] 朱恂. 速度滑移及温度跳跃区微尺度通道内的流动与换热[D]. 重庆: 重庆大学, 2002. ZHU Xun. Flow and heat transfer characteristics in micro-channel in velocity-slip and temperature-jump regime[D]. Chongqing: Chongqing University, 2002. (in Chinese)
- [14] 刘阳鹏, 徐国强, 李海旺, 等. 宽高比对微小通道空气流动换热特性影响实验[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(7): 1253-1258. LIU Yangpeng, XU Guoqiang, LI Haiwang, et al. Investigation of the air flow behavior and heat transfer characteristics in microchannels with different aspect ratios[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(7): 1253-1258. (in Chinese)
- [15] Tsien H S. Super aerodynamics, mechanics of rarefied gases[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1946, 13(12): 653-664.
- [16] 张雯, 刘沛清, 郭昊, 等. 湍流转换工程预报方法研究进展综述[J]. 实验流体力学, 2014, 28(6): 1-12, 38. ZHANG Wen, LIU Peiqing, GUO Hao, et al. Review of transition prediction methods[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(6): 1-12, 38. (in Chinese)
- [17] Menter F R, Langtry R B, Likki S R, et al. A correlation-based transition model using local variables: Part I model formulation[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(3): 413-422.
- [18] Langtry R B, Menter F R, Likki S R, et al. A correlation-based transition model using local variables: Part II test cases and industrial applications[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(3): 423-434.

(编辑: 叶 青)