

$\gamma-Re_{\theta t}$ 转捩模型在微通道流动特性研究中的应用

谷 萌¹, 李海旺¹, 程 健^{1,2}

(1. 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;
2. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 应用 ANSYS CFX 对矩形微通道中的流动进行了数值研究。通过与实验数据的对比检验了层流模型、 $\gamma-Re_{\theta t}$ 转捩模型和剪切应力输运模型在微通道流动转捩模拟中的适用性,并在此基础上探究了微通道长径比以及截面宽高比对临界雷诺数的影响。结果表明:3 种模型中,只有 $\gamma-Re_{\theta t}$ 转捩模型捕捉到了转捩的趋势,并较为准确地捕捉到了临界雷诺数。当微通道的长径比不小于 200,进口段对整体流动特性产生的影响可以忽略。当微通道的当量直径和长径比一定,宽高比由 1 增加到 5 时,临界雷诺数呈逐渐增长趋势。

关 键 词: 微通道; 转捩; $\gamma-Re_{\theta t}$ 转捩模型; 长径比; 宽高比

中图分类号: V211.3 **文献标志码:** A

Application of $\gamma-Re_{\theta t}$ transition model in investigation of flow characteristics in microchannel

GU Meng¹, LI Haiwang¹, CHENG Jian^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics, School of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Shenyang Engine Research Institute, Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Numerical investigation was conducted with ANSYS CFX to investigate the flow characteristics in a rectangular microchannel. The performance of laminar model, $\gamma-Re_{\theta t}$ transition model and shear stress transport model in microchannel transition simulation was examined by comparing the predicted results with the experimental data. Furthermore, the effects of length-to-diameter ratio and aspect ratio were also investigated. Results indicated that only the $\gamma-Re_{\theta t}$ model predicted the trend of transition and forecasted a critical Reynolds number close to the experimental result. Length-to-diameter ratio over 200 was suggested to eliminate the influence of the entrance effect. The critical Reynolds number increased when the aspect ratio varied from 1 to 5.

收稿日期: 2017-09-21
基金项目: 国家自然科学基金(51506002)
作者简介: 谷萌(1983—),男,助理研究员,硕士,主要从事飞行器动力设计、航空宇航推进理论与工程研究。
通讯作者: 程健(1993—),女,硕士,主要从事微通道流动换热研究。E-mail:cheng317@126.com

引用格式: 谷萌,李海旺,程健. $\gamma-Re_{\theta t}$ 转捩模型在微通道流动特性研究中的应用[J]. 航空动力学报,2018,33(12):2845-2850. GU Meng,LI Haiwang,CHENG Jian. Application of $\gamma-Re_{\theta t}$ transition model in investigation of flow characteristics in micro-channel[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(12):2845-2850.

Key words: microchannel; transition; $\gamma-Re_{\theta}$ transition model; length-to-diameter ratio; aspect ratio

微机电系统(MEMS)于 19 世纪 80 年代被提出,经过三十余年的发展,已经在电子、机械、化学、医学和生物等众多领域得到广泛应用。作为微流体设备和系统发展的基础研究,微通道的流动研究也经历了一系列的延伸更迭,从最开始的微通道流动特性研究,到流动影响因素研究,再到微通道多相流动以及微通道纳米流体流动等,都彰显出这个学科无限的可能性。

Mala 等^[1]采用实验方法对不同直径的微圆管中水的流动现象进行了研究。结果表明微通道中的流动特性与常规尺度通道中的流动特性有明显区别,如转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也较为明显。Toh 等^[2]以 Tuckerman^[3]的实验为基础,对受热微通道组内部的三维流动现象进行了数值研究。基于有限体积法,作者自行研发了一套数值程序,对稳态层流流动和换热方程进行求解。通过将预测的局部热阻与已有的实验数据比较,使得数值求解的方案得到了验证。孙杰等^[4]采用有限容积-分子动力学耦合算法对微通道内的液体流动进行了模拟研究,发现通道宽度减小会使速度分布与宏观尺度下的分析解出现更大偏离,滑移速度与滑移长度明显增加。邵霞等^[5]采用蒙特卡洛直接模拟(DSMC)方法对在不同马赫数和克努森数条件下的微通道库埃特流动进行模拟研究。结果表明:近壁处速度滑移随着克努森数的增加而增大,增加壁面平移速度将会导致板间的气体温度和压力随之显著增加。Rahmati 等^[6]将熵格子玻耳兹曼方法(ELBM)应用于微流体的模拟中,为了验证方法的有效性,作者分别对克努森数为 0.01、0.05 和 0.10 的微腔流动和克努森数为 0.053 的二维微通道中的流动进行了数值模拟,并与 Tang, Arkilic 等^[7-8]的研究结果进行对比,显示出了比较好的对比效果。另外对于克努森数没有适用范围的限制也是该方法的一个突出优势。Sahar 等^[9]采用层流模型和标准 $k-\omega$ 模型模拟了矩形微通道中的液体流动特性,并通过与文献^[10]等的实验结果的对比使数值模拟的有效性得到了验证。周云龙等^[11]采用 CLSVOF(coupled level set and volume of fluid)方法,以空气和水为介质对矩形截面蛇形微通道内气液两相流动进行模拟研究。为了验证数值方法的可靠性,通过可视化

试验中的操作工况和实验结果对数值方法进行验证。周俊等^[12]考虑了微尺度效应引起的速度滑移和温度跳跃边界,针对微通道内气粒间流动传热过程开展数值研究。在数值研究基础上,分析了微通道受限空间、克努森数、气体流速以及颗粒表面温度对微通道内气粒换热的影响。

在众多的研究中,微通道流动特性的研究仍然是所有后续研究的基础,这也是虽然经过了这么多年的发展,仍然有学者孜孜不倦地对微通道流动特性进行研究的原因。本文考虑到微通道中低雷诺数的流动,将转捩模型引入微通道流动的数值模拟当中,通过与实验结果的对比验证其有效性,并在此基础探究微通道的长径比及截面宽高比变化对微通道流动特性的影响。

1 模型有效性验证

在本文微通道气体流动模拟中,克努森数 $Kn \approx 1.75 \times 10^{-4}$,根据文献^[13-14]可知,当 $Kn < 0.001$,连续性假设依然成立,且可认为壁面无滑移。考虑到计算量的问题,本文数值模拟中将带有 22 个理论尺寸为 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 的微通道的实验件简化为单个通道(实验原理参照文献^[15],本文不再赘述),则计算域选定为尺寸为 $0.4 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 长方体区域。采用 ICEM 软件将计算域划分为六面体结构化网格,以保证较高的网格质量。计算软件采用 ANSYS CFX。边界条件设置为:进口设置质量流量入口,出口设置压力出口,微通道四周壁面为光滑绝热无滑移壁面。流动工质设置为理想空气。采用层流模型、 $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型^[16-17]和剪切应力输运模型 SST(shear stress transport)三种模型进行模拟,其中选用 SST 模型的理由为: $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型正是在 SST 模型的基础上发展而来的,而且该模型在常规尺度的流动模拟中也较为常用,故选用该模型来作为对比。数值模拟网格无关解验证以微通道进出口压差相对变化不大于 1% 为标准。

定义摩擦因数

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

式中 Δp 为微通道进出口压差, ρ 为进口处空气密度, u 为进口处气体速度, D 为当量直径, L 为通道长度。

定义雷诺数

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$$

(2)

式中 μ 为流体的动力黏度。

实验和数值模拟中均以 f 的突变来判断临界雷诺数。采用三种模型模拟得到的摩擦因数与实验结果的对比情况如图 1 所示。

根据实验结果,临界雷诺数在 2 124 左右。三种模型当中,层流模型及 SST 模型没有模拟出转捩的趋势, $\gamma-Re_{\theta_t}$ 转捩模型捕捉到的临界雷诺数在 2 227 左右,与实验的临界雷诺数较为接近,但在摩擦因数的具体数值上,与实验值相比有一定的误差。经过简单计算,采用 $\gamma-Re_{\theta_t}$ 转捩模型进行模拟得到的结果,与实验结果的相对误差都可以保持在 20% 之内,课题组计划在后续的研究中将引入边界滑移及表面粗糙度等修正因素,以减小模拟结果与实验之间的误差。由于本文的关注点在于捕捉临界雷诺数,故本文暂且认为这个误差是可以接受的。

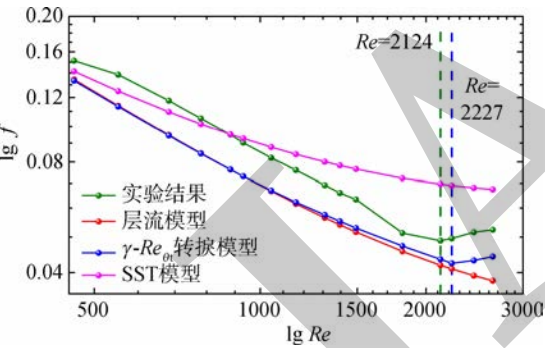


图 1 三种模型模拟的摩擦因数随雷诺数的变化情况
Fig. 1 Variations of friction factor with Re with three models

由图 1 易见:三个流动模型中,SST 的模拟值总体高于其他两个模型。在 $\gamma-Re_{\theta_t}$ 转捩模型捕捉到转捩点之前,其模拟结果与层流模型的模拟结果是十分接近的;当雷诺数逐渐增大,两者之间开始显现出细微的差别,当 $\gamma-Re_{\theta_t}$ 转捩模型捕捉到转捩点之后,这个两者的模拟结果之间的差别就很明显了。那么两者之间的模拟值差别变化是如何产生的呢?下面将从间歇因子的角度进行分析。

分别选取雷诺数为 932、1047、1811、2 227 和 2 441 的模拟结果如图 2 所示,图 2 中 γ 为间歇因子。当 $Re \leq 932$,除了微通道进口的湍流区,微通道下游的间歇因子接近 0,可以认为是层流;而同时采用的微通道很长,进口的湍流区的影响可以

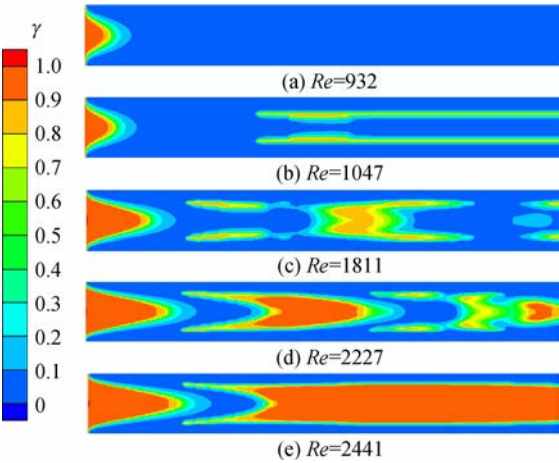


图 2 不同雷诺数下的间歇因子云图($\gamma-Re_{\theta_t}$ 模型)
Fig. 2 Contours of intermittency using $\gamma-Re_{\theta_t}$ transition model with different Reynolds numbers

忽略,故 $\gamma-Re_{\theta_t}$ 转捩模型的模拟结果与层流结果非常接近。而从 $Re=1047$ 开始微通道下游开始有局部的湍流区出现,因此 $\gamma-Re_{\theta_t}$ 模型模拟得到的摩擦因数开始与层流结果出现了微小的差异,并且随着雷诺数的增大,微通道下游的局部湍流区逐渐扩大,因此 $\gamma-Re_{\theta_t}$ 的模拟结果与层流结果的差异就逐渐增大。而当雷诺数达到 2 441 时,湍流几乎布满整个通道空间,所以此时两个模型的模拟差异就比较明显了,即本文所说的临界雷诺数,指的是因为通道中湍流区扩大到充满整个空间而引起的摩擦因数的突然变化所对应的雷诺数。

综上所述: $\gamma-Re_{\theta_t}$ 转捩模型能够捕捉到转捩趋势,较为准确地捕捉到临界雷诺数,且在捕捉到转捩点之前与层流模型的模拟结果差别并不大,故在本文的后续的研究中,将直接采用 $\gamma-Re_{\theta_t}$ 转捩模型进行模拟。

2 微通道流动转捩影响因素

由于后续对影响因素的探究可能涉及到比之前实验更高的雷诺数,而若继续采用理想气体,则可能需要特别考虑压缩性等因素带来的影响。另外课题组后续影响因素探究实验采用的工质是水。综上考虑,在转捩影响因素的探究这一部分中,将采用水为流动介质。

另外,在影响因素探究这一部分,算例较多,为了减少计算量,节约时间,将利用微通道本身的几何对称性,计算域取微通道的 1/4,如图 3(图中 W 为微通道的宽度, H 为微通道的高度)。边界条件设置为:质量流量入口,压力出口,两个对称面、两个光滑无滑移壁面。网格无关解验证仍然以微

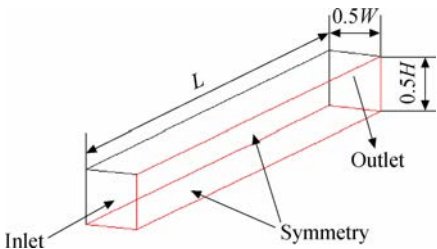


图 3 计算域

Fig. 3 Computational domain

通道进出口压差相对变化不大于 1% 为标准。

2.1 长径比

本节采用 $\gamma-Re_{\theta t}$ 转捩模型对不同长度的微通道中的流动情况进行数值模拟,考察微通道长度变化对临界雷诺数的影响。微通道的参数如表 1 所示。所有微通道当量直径 D 均为 0.4 mm,截面宽高比 R_a (aspect ratio) 为 1。结果如图 4 所示。

表 1 当量直径为 0.4 mm 及宽高比为 1 的不同长径比的微通道

Table 1 Microchannels of different L/D with $D=0.4\text{ mm}$ and $R_a=1$

微通道尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	L/D	D/mm	R_a
0.4×0.4×20	50	0.4	1
0.4×0.4×40	100		
0.4×0.4×60	150		
0.4×0.4×80	200		
0.4×0.4×120	300		
0.4×0.4×200	500		

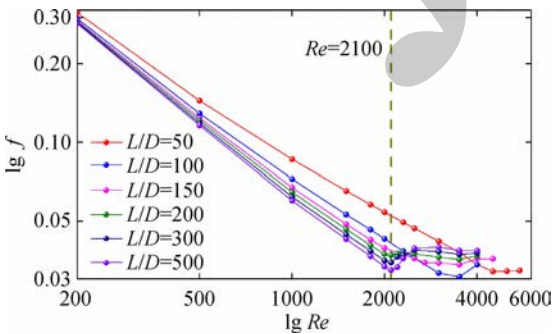


图 4 不同长径比下摩擦因数随雷诺数的变化情况
(截面尺寸为 0.4 mm×0.4 mm)

Fig. 4 Variations of friction factor with Re with different L/D (cross section: 0.4 mm×0.4 mm)

由图 4 可以看出,当微通道的长径比由 50 增加到 500 时,进口段效应对流动特性的影响随着

通道长度的增加而减弱。这一点从直观上也很容易理解:对于截面形状不变的不同长度通道,当雷诺数相同,可以认为其进口段长度相同,那么通道越长,进口段占整个通道长度的比例就越小,则对于整体流动特性的影响就越小。当长径比较大时(200 以上),进口段效应对整体流动特性的影响也比较接近,导致其摩擦因数的曲线比较接近。

将图 4 中各个图线的大概转捩位置提取出来,作图得到图 5。由图 5 可见,当微通道矩形截面的尺寸保持不变,随着长径比的增大,临界雷诺数逐渐减小并最终趋于不变。从图 5 可以直观地看到,长径比 L/D 超过 200 之后,临界雷诺数始终保持在 2000~2200。

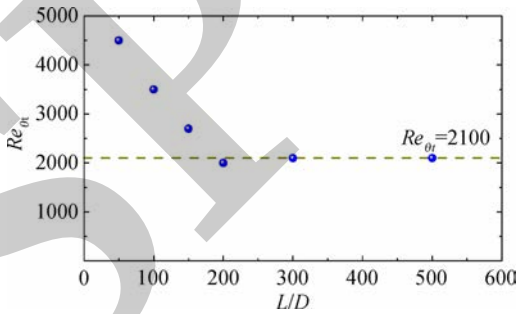


图 5 临界雷诺数随长径比的变化情况
(截面尺寸为 0.4 mm×0.4 mm)

Fig. 5 Variation of critical Reynolds number with L/D (cross section: 0.4 mm×0.4 mm)

需要说明:此处的 2000~2200 只是一个近似的临界雷诺数值,即上述采用 $\gamma-Re_{\theta t}$ 转捩模型的模拟并没有得到精确的临界雷诺数值。长径比 $L/D=200$ 是在此基础上的得到的临界长径比,即当长径比大于该值,进口段的影响相比于整个微通道长度来说可以忽略。事实上,如果在长径比 $L/D=150\sim200$ 之间再进行细分,应该可以得到更为精确的临界长径比,但是考虑到上述模拟也是近似值,需留有一定的裕度,而同时也要考虑到计算量的问题,故此处认为这个临界长径比取 200 较为合适。

在常规尺度通道流动中,研究者通过大量的实验分别总结出层流区和湍流区进口段长度与管道当量直径以及雷诺数的关联式,并认为对于层流流动,当通道长度与当量直径的比值 L/D 大于 60 时,进口效应产生的影响可以忽略;而湍流则因为扩散能力强,边界层厚度增长快,致使其进口段长度要比层流短得多。然而根据本文的模拟结果,微通道流动临界长径比取 200,该数值明显高

于常规尺度通道的经验结论,而诸多实验研究也表明微通道流动的临界长径比确实要高于常规尺度通道的流动^[18-20]。

2.2 宽高比

本节采用 $\gamma-Re_{\theta}$ 转换模型对截面宽高比的微通道中的流动情况进行数值模拟,考察微通道宽高比变化对临界雷诺数的影响。拟对比的宽高比 R_a 分别为 1、2、3、4、5,同时长径比和宽高比保持不变。

根据文中第 2.1 节得到的结论,对于宽高比为 1 的微通道,当长径比不小于 200 时进口段对微通道整体流动特性的影响可以忽略。那么如果截面宽高比变化,这个结论是否依然成立呢? 即:对于截面宽高比为 2、3、4、5 的通道,保证进口段对微通道整体的流动特性产生的影响可以忽略的临界长径比的值是否会变化? 因此,在进行通道截面宽高比影响的探讨之前,我们选择对宽高比为 2 的、当量直径 0.4 mm 的不同长度的微通道进行如文中第 2.1 节的探讨,选取通道的相关参数如表 2 所示。数值模拟的结果如图 6 所示。

表 2 宽高比为 2 及当量直径为 0.4 mm 的不同长径比的微通道

Table 2 Microchannels of different L/D with $D=0.4\text{ mm}$ and $R_a=2$			
微通道尺寸(长×宽×高)/ (mm×mm×mm)	L/D	D/mm	R_a
0.6×0.3×40	100	0.4	2
0.6×0.3×80	200		
0.6×0.3×120	300		
0.6×0.3×200	500		

由图 6 可见,对于截面宽高比为 2、当量直径为 0.4 mm 的微通道,当长径比大于 200 之后,临界雷诺数趋于稳定。对比图 4 中宽高比为 1 的微通道结果,本文认为对于当量直径为 0.4 mm 的不同宽高比的微通道,只要长径比不小于 200 时,进口段产生的影响就可以忽略,对宽高比为 3、4、5 的情况不做额外讨论。结合文中第 2.1 节的结论,本文认为在微通道的流动特性研究中,若想要忽略进口段对整体流动特性产生的影响,需要保证微通道的长径比不小于 200。

在此基础上,本节研究宽高比对临界雷诺数影响时采用的微通道尺寸如表 3 所示。模拟结果如图 7 所示。

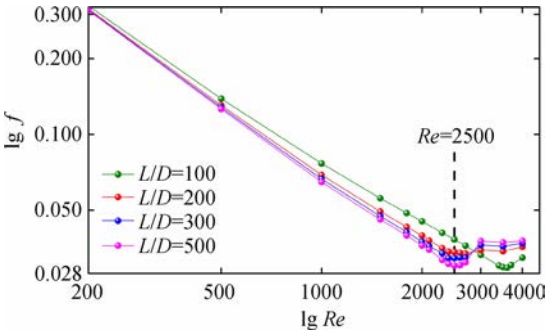


图 6 不同长径比下摩擦因数随雷诺数的变化情况 ($R_a=2$)

Fig. 6 Variation of friction factor with Re with different L/D ($R_a=2$)

表 3 长径比为 200 及当量直径为 0.4 mm 的不同宽高比的微通道
Table 3 Microchannels of different aspect ratios with $L/D=200$ and $D=0.4\text{ mm}$

微通道尺寸/ (mm×mm×mm)	L/D	D/mm	R_a
0.4×0.4×80	200	0.4	1
0.6×0.3×80			2
0.8×0.2667×80			3
1.0×0.25×80			4
1.2×0.24×80			5

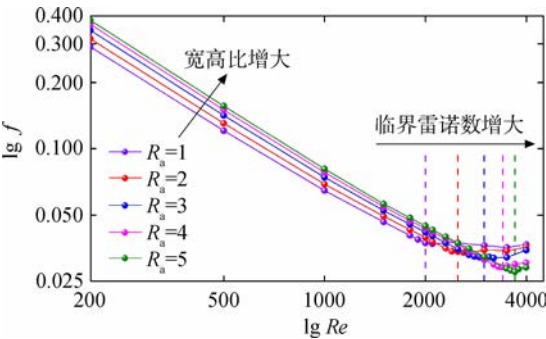


图 7 不同宽高比下摩擦因数随雷诺数的变化情况
Fig. 7 Variation of friction factor with Re with different aspect ratios

由图 7 可见,对于当量直径均为 0.4 mm,长径比均为 200 的微通道,当微通道的宽高比由小变大,其临界雷诺数的值不断增大。

3 结 论

本文检验了层流模型、 $\gamma-Re_{\theta}$ 转换和 SST 模型 3 种模型在微通道流动转换模拟中的适用性,并在此基础上探究了微通道长径比以及截面宽高

比对临界雷诺数的影响。本文结论如下：

1) 3 种模型中,只有 $\gamma-Re_{\theta}$ 转捩模型捕捉到了趋势,并较为准确地捕捉到了临界雷诺数,虽然在数值上与实验值仍有一定的差别,但本文认为其模拟效果可以接受。

2) 当微通道的长径比不小于 200,进口段对整体流动特性产生的影响可以忽略。

3) 当微通道的当量直径和长径比一定,宽高比由 1 增加到 5 时,临界雷诺数呈逐渐增长趋势。

参考文献：

[1] MALA G M, LI Dongqing. Flow characteristics of water in microtubes[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1999, 20(2): 142-148.

[2] 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.

[3] TUCKERMAN D B. Heat-transfer microstructures for integrated circuits[D]. Los Angeles, California: University of California, 1984.

[4] 孙杰, 何雅玲, 陶文铨. FV-MD 耦合算法在微通道流动研究中的应用[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1631-1634.

SUN Jie, HE Yaling, TAO Wenquan. Application of FV-MD coupling algorithm in microchannel flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(10): 1631-1634. (in Chinese)

[5] 邵霞, 潘剑锋, 薛宏, 等. 微通道内气体库埃特流动的 DSMC 模拟[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(9): 1752-1754.

SHAO Xia, PAN Jianfeng, XUE Hong, et al. Direct simulation of Monte Carlo in microchannel Couette gas flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(9): 1752-1754. (in Chinese)

[6] RAHMATI A R, NIAZI S. Entropic lattice Boltzmann method for microflow simulation[J]. International Journal of Nanomechanics Science and Technology, 2014, 5(2): 153-167.

[7] TANG G H, TAO W Q, HE Y L. Lattice Boltzmann method for gaseous microflows using kinetic theory boundary conditions[J]. Physics of Fluids, 2005, 17(5): 329-355.

[8] ARKILIC E B, SCHMIDT M A, BREUER K S. Gaseous slip flow in long microchannels[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1997, 6(2): 167-178.

[9] SAHAR A M, ÖZDEMİR 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.

[10] KENNING D B R, LEWIS J S, KARAYIANNIS T G, et al. Pressure drop and heat transfer characteristics for sin-

gle-phase developing flow of water in rectangular micro-channels[J]. 2012, 395(1): 012085. 1-012085. 13.

[11] 周云龙, 常赫. 蛇形微通道气液两相流型的数值研究[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(5): 1067-1073.

ZHOU Yunlong, CHANG He. Numerical simulation on flow pattern of gas-liquid two-phase flow in serpentine micro-channel[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2016, 30(5): 1067-1073. (in Chinese)

[12] 周俊, 刘振宇, 吴慧英. 微通道内滑移区气体-颗粒流动传热数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2017, 38(3): 581-586.

ZHOU Jun, LIU Zhenyu, WU Huiying. Numerical simulation of gas-particle flow and heat transfer in slip flow regime in a microchannel[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(3): 581-586. (in Chinese)

[13] TSIEN H S. Super aerodynamics-mechanics of rarefied gases[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1946, 13(12): 653-664.

[14] KOHL M J, ABDEL-KHALIK S I, JETER S M, et al. An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(8): 1518-1533.

[15] 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)

[16] 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.

[17] 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.

[18] 李成文. 微小通道内气体流动特性的实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.

LI Chengwen. Experimental study on gas flow in micro-channels[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010. (in Chinese)

[19] KOHL M J, ABDEL-KHALIK S I, JETER S M, et al. An experimental investigation of microchannel flow with internal pressure measurements[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(8): 1518-1533.

[20] 刘兴华. 微圆管内水流动特性的研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2009.

LIU Xinghua. Study on water flow characteristics in circular micro-tubes[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)