

克努森数对微尺度相似流动特性影响的实验

郑 杰, 朱惠人, 郭 涛, 孟 通, 吴阿赛, 路宏康
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为了研究克努森数(Kn)对微尺度相似流动特性的影响,选取理论孔径分别为 0.3574 mm 的小孔和 3.6 mm 的相似放大孔实验件,并保证相同的长径比.在相同的雷诺数(Re)下对孔的 Kn 相同和不同的情况进行实验研究,计算孔的流量系数并进行分析比较.结果表明:在相同的 Re 下,小孔与相似放大孔在 Kn 相同时,两者流量系数吻合性很好;在 Kn 不同时,小孔和相似放大孔流量系数不同.因此在采用相似放大模型研究微尺度结构的流动特性时,必须保证相似放大件和微尺度原件 Kn 相同.

关 键 词: 微尺度; 克努森数; 雷诺数; 相似原理; 流量系数

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on effect of Knudsen number on micro-scale similarity flow characteristics

ZHENG Jie, ZHU Hui-ren, GUO Tao, MENG Tong,
WU A-sai, LU Hong-kang
(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to investigate the effect of Knudsen number (Kn) on the micro-scale similarity flow characteristics, a micro-scale hole and another similar scaling-up hole with same length-to-diameter ratio were chosen, with their theoretical hole's diameters of 0.3574 mm and 3.6 mm, respectively. At the constant Reynolds number (Re), different Kn were chosen to analyze the discharge coefficients of these two holes. Results shows that at the same Re , the discharge coefficients of the two holes are in good agreement with each other while the Kn of these two holes, however, the discharge coefficients don't maintain the same when the Kn are different. As a conclusion, it is necessary to ensure the Kn of the similar scaling-up coupon is the same with the micro-scale coupon when similar scaling-up model is used to investigate micro-scale flow characteristics.

Key words: micro-scale; Knudsen number; Reynolds number; similarity principle; discharge coefficients

涡轮是航空燃气涡轮发动机(以下简称航空发动机)的重要部件之一,提高涡轮进口温度是一种既可以增加发动机推力,又可以提高发动机效率的有效方式,但是高性能航空发动机的燃气温

度已大大超过材料本身的耐热温度极限,因此对航空发动机中的高温部件必须采取有效的冷却措施,从而保证航空发动机高效安全的工作,而目前大多数的冷却结构的研究都是基于毫米或者相似

收稿日期: 2013-09-04

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB035702)

作者简介: 郑杰(1987—),男,甘肃平凉人,博士生,主要从事航空发动机高温部件的强化换热以及微尺度流动与换热领域的研究.

放大后的宏观尺度上的,其流动为连续介质流动.根据相关文献[1]将尺度大于 $1000\ \mu\text{m}$ 的称为宏观尺度,尺度在 $1\sim 1000\ \mu\text{m}$ 之间的称为微尺度.随着科技水平和工业技术的发展,有关微尺度结构的流动及换热特性研究已成为热点. Turner 等^[2-7]通过实验的方法大量研究了微尺度典型结构的流动特性,并揭示了不同尺度下的流动差异. Marques 等^[8-15]通过实验的方法研究了微尺度局部位置的换热特性,其不同尺度下局部换热也表现出了一定的差异性.目前对于航空发动机微尺度真实结构中流动特性的研究主要基于相似原理对其进行放大研究,即保证原始尺寸与相似放大后的单值性条件相似,以及保证相等的同名定性准则数,但是直接的相似放大并未考虑微流动时由于尺度减小所引起的其他附加效应的影响.基于本课题组许艳芝等^[16]已经数值模拟研究了连续介质流动条件下, Re 相同, Kn 相同与不同时,微尺度原件与相似放大件的流动特性.本文选取2个尺度的孔模型(孔径分别取 0.3574 , $3.6\ \text{mm}$),并保证相同的长径比为 5.3 ,以及相同的 Re ,分别对微尺度原件和相似放大孔实验件 Kn 相同和不同的情况进行实验研究,通过比较不同尺度下孔的流量系数变化,从而分析和验证 Kn 对连续介质微尺度流动的影响,为连续介质流动基础上微流动的放大相似研究提供理论支持.

1 实验装置

如图1实验系统图所示,空气从高压气瓶经过第1个压力截止阀,随后通过 $0.01\ \mu\text{m}$ 高精度过滤器,并且用高压压力调节阀来调节实验段孔前压力.由于实验中,最高进口压力可达到 $2.2\ \text{MPa}$,因此选择允许承受最大压力为 $12\ \text{MPa}$ 的高压气瓶,并且使用高压气排串联在一起.为了防止小孔实验件堵塞,在小孔实验台上的高精度过滤器选择为 $0.01\ \mu\text{m}$ 高精度过滤器,从而保证空气的纯净度,如图2所示.相似放大孔实验台上选择 $1\ \mu\text{m}$ 高精度过滤器,如图3所示.数据采集系统采用罗斯蒙特耐压为 $4\ \text{MPa}$ 的绝压表和两个耐压为 $4\ \text{MPa}$ 的差压表,差压表量程为 $0\sim 700\ \text{Pa}$ 和 $700\sim 3\times 10^5\ \text{Pa}$,压力调节阀采用耐高压 $4\ \text{MPa}$ 的压力截止阀,来控制实验段前的压力.流量计前的压力截止阀主要是来保证流量控制器前的压力稳定,使流量计在测量中减小波动.实验中采用高精度的美国 ALICA 流量控制器,量程为 $0\sim 100\ \text{L/min}$.

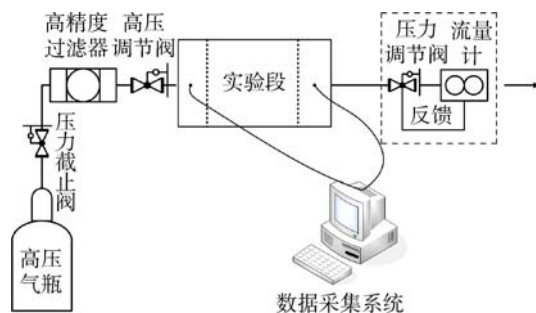


图1 实验系统

Fig. 1 Experimental system



图2 小孔实验系统

Fig. 2 Micro-hole experimental system

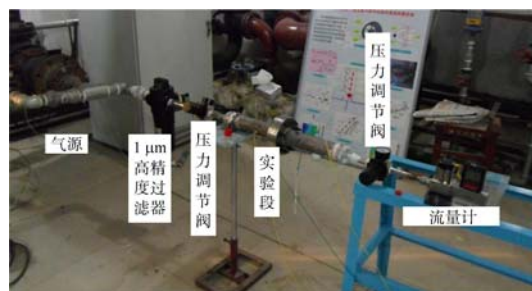


图3 相似放大孔实验系统图

Fig. 3 Similar scaling-up hole experimental system

2 实验件测量

小孔实验件和相似放大孔实验件的加工是由西北工业大学机电学院采用高速金属打孔完成,此方法在小孔圆度、孔内表面粗糙度方面均优于电加工,并且使用中国科学院西安光学精密机械研究所数字处理投影仪测量了小孔实验件的理论直径,如图4所示.

图5给出了小孔实验件,件厚度为 $1.9\ \text{mm}$,在实验件中心均布5个小孔,孔间距为 $15d$ (d 为小孔直径),其小孔的平均理论直径为 $0.3754\ \text{mm}$,如表1所示.图6给出了相似放大孔实验件的示意图,孔深为 $19.1\ \text{mm}$,孔径为 $3.6\ \text{mm}$.小孔与相似放大孔的长径比均为 5.3 .此外,从表1中

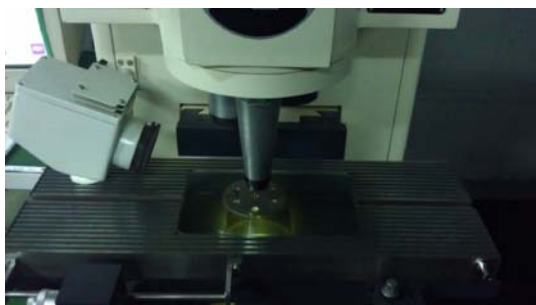


图4 数字投影仪

Fig. 4 Digital projector



图5 小孔实验件

Fig. 5 Micro-hole coupon



图6 相似放大孔实验件

Fig. 6 Similar scaling-up hole coupon

表1 小孔理论直径测量表

Table 1 Theoretical diameter of micro-hole

测量参数	编号及测量图				
	1	2	3	4	5
					
理论直径/mm	0.367	0.358	0.354	0.357	0.351
相对表面粗糙度/%	4.9	3.3	2.1	1.6	0.8
绝对表面粗糙度/ μm	17.98	11.81	7.43	5.71	2.81

观察到,5个小孔的理论直径基本一致,并且经测量小孔平均相对表面粗糙度为2.54%,绝对表面粗糙度平均值为9.15 μm . 本文研究的尺度通过文献[17]研究得出,5%以内的相对表面粗糙度对此尺度下的流动阻力影响很小,并且本文为了减少孔品质对结果的影响,采用多孔来研究小孔的流量系数.

3 参数定义

1) 克努森数

$$Kn = \frac{\lambda}{L} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2} \cdot \frac{1}{pL} \quad (1)$$

式中 λ 为分子自由程; L 为几何特征尺度;玻耳兹曼常数 $k=1.38 \times 10^{-23}$; 空气分子有效直径 $\sigma=3.5 \times 10^{-10}$ m; p 为流体压力,即 Kn 的定性压力; T 为气体温度.

2) 雷诺数

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{4 \dot{m}_r}{\pi L \mu} \quad (2)$$

式中 ρ 为流体密度; u 为小孔入口速度; d 为小孔直径,即为本文中几何特征尺度; μ 为流体动力黏度; $\dot{m}_r$ 为流体流量.

3) 流量系数

$$C_d = \frac{\dot{m}_r}{A p_i^* \left[\frac{p_i^*}{p_0} \right]^{-\frac{\kappa+1}{2\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{(\kappa-1)R_g T} \left[\left(\frac{p_i^*}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]}} \quad (3)$$

式中 A 为小孔流通横截面积; p_i^* 为小孔进口总压; p_0 为小孔出口静压; κ 为气体等熵指数,对空气取 1.4; R_g 为气体常数,对空气取 286.7 J/(kg · K).

4 实验结果分析

本文主要选取流量系数来衡量孔的流动特性,在满足相等的 Re 和相似的单值性条件下,对各尺度孔 Kn 不同与相同的情况下的流动特性进行实验研究,并且用数值模拟分析研究孔局部流动与边界层分布,从而进一步揭示其流动规律与特征. 本文中流体压力和几何特征尺度为影响 Kn 大小的主要因素.

4.1 孔间距对测量结果的影响

由于高压空气通过孔的流量很小,孔的加工精度也会对流量系数有所影响,为了保证流量计的精确度,增大流量,因此选择5个孔,等距的排列在实验件上,减小品质的影响,从而获得更准确

的流量。

图7~图10采用数值模拟的方法分析了孔间距对速度场的影响,图中 t 为孔间距。如图8所示,当 $t/d=5$ 时,孔与孔之间对速度场的影响比较大,如图9所示,当 $t/d=10$ 时,孔与孔之间对速度场基本上没有什么影响,当 $t/d=15$ 时,孔与孔之间影响更小,如图10所示。因此,实验件孔间距选择为 $15d$,从而忽略孔与孔之间的互影响,此处数值计算孔的长径比与实验件均为5.3。

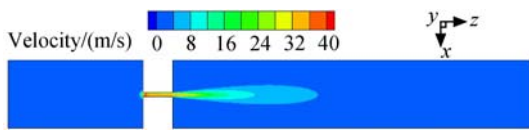


图7 单孔速度场分布云图

Fig. 7 Distribution of velocity field contour at the single hole

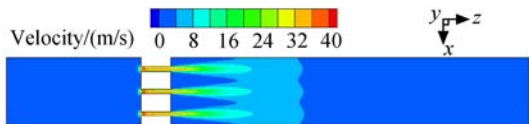


图8 $t/d=5$ 时的速度场分布云图

Fig. 8 Distribution of velocity field contour at the $t/d=5$

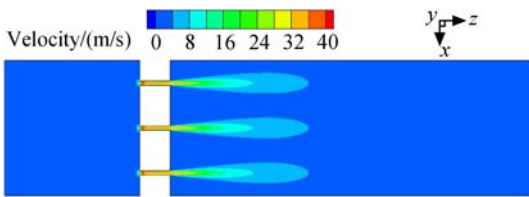


图9 $t/d=10$ 时的速度场分布云图

Fig. 9 Distribution of velocity field contour at the $t/d=10$

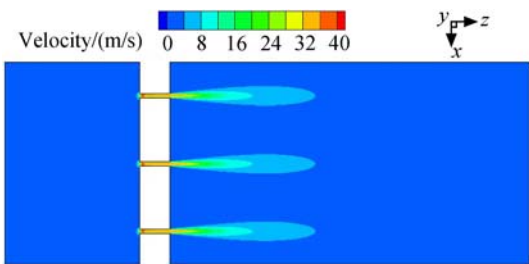


图10 $t/d=15$ 时的速度场分布云图

Fig. 10 Distribution of velocity field contour at the $t/d=15$

4.2 Kn 不同, Re 相同时, 小孔和相似放大孔流量比较

微尺度流动问题中的 Kn 往往超出了连续流动中无滑移流的范围,即超出宏观尺度下的 N-S 方程与无滑移边界条件描述的范围,此时就必须考虑稀薄性和压缩性问题了。但是本文研究的微尺度范围为 $100\sim 1000\mu\text{m}$,此尺度为航空发动机冷却结构研究的范围,因此为了保证与真实航空发动机工况基本一致,本文实验研究中的 Kn 范围为 $1.43\times 10^{-5}\sim 8.58\times 10^{-6}$,根据 Kn 的划分原(并且 $Kn<0.001$ 时流动可以视为具有无滑移边界条件的连续介质流动, $0.001<Kn<0.1$ 时流动仍可视为连续介质流动,但需要经过滑移边界条件处理, $0.1<Kn<10$ 为过渡区, $Kn>10$ 时视为自由分子流)则进行判断,其流态仍可视为具有无滑移边界条件的连续介质流动,且 Kn 的大小也已小于连续模型失效的阈值,但是其与传统的宏观尺度流动特性是否一致,又应当如何研究此类处于敏感区域的微尺度结构的微流动和微换热,这些问题值得深究。

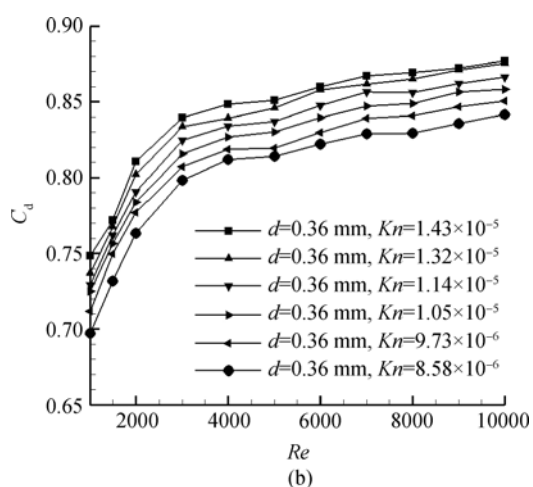
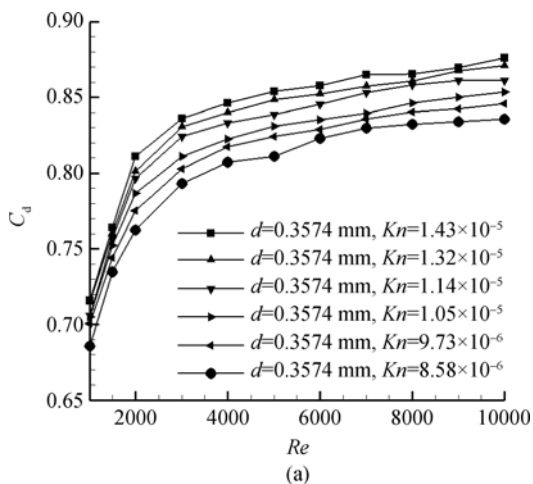
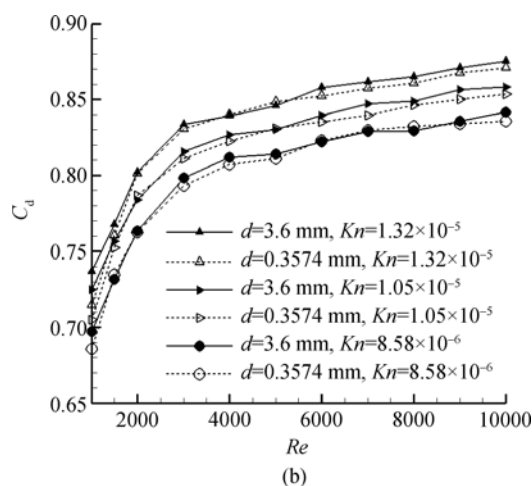
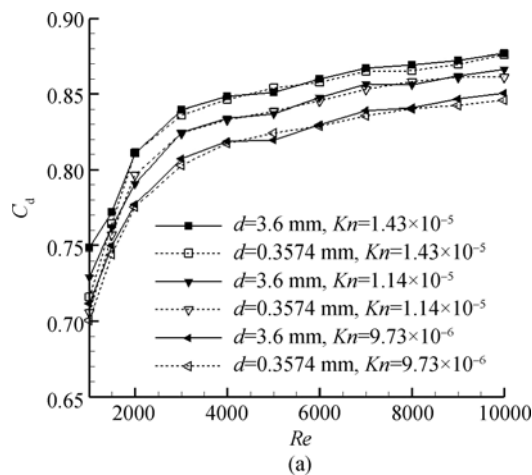
流体力学中有两个重要的无量纲参数马赫数 (Ma) 与 Re 可通过 Kn 表示出来,文献[18]已有推导,最终的关系式如式(4), Kn 与 Ma 成正比,与 Re 的成反比,其中 γ 为比热比。

$$Kn = \sqrt{\frac{\pi\gamma}{2}} \frac{Ma}{Re} \quad (4)$$

图11给出了 Kn 不不同时各尺度孔流量系数随着 Re 的变化图,从图中可以看出当 Kn 不同, Re 相同时,实验测得的小孔流量系数和相似放大孔流量系数不相同。从图11中可以看出,保证温度和特征长度不变,而使压力增大,则 Kn 变小,此时当 Kn 变小时,流量系数比 Kn 不变时的流量系数高。此外,在保证温度和特征长度不变的情况下,减小压力,则 Kn 增大,此时当 Kn 变大时,流量系数比 Kn 不变时的流量系数低,即在相同尺度下和相同的 Re 下,随着 Kn 的增加流量系数也相应的增大,当 Kn 随着 Re 的增大,流量系数的增长率也越来越小接近于零。因此当小孔相似放大后,没有保证 Kn 相等,则流量系数也不相同。

4.3 Kn 相同, Re 相同时, 小孔和相似放大孔流量比较

图12给出了 Kn 相同时各尺度孔流量系数随着 Re 的变化图,从图中可以看出流量系数随着 Re 的增大而增大,当 $Re<3000$ 时流量系数变

图 11 Kn 不同时各尺度孔流量系数Fig. 11 Discharge coefficients of different scale holes with different Kn 图 12 Kn 相同时各尺度孔流量系数Fig. 12 Discharge coefficients of different scale holes with same Kn

化的比较剧烈,当 $Re > 3000$ 时,流量系数随着 Re 的增大而缓慢增加直到增长率接近于零. 在相同的 Re 和相同的长径比之下,微尺度小孔 $d = 0.3574 \text{ mm}$ 与相似放大孔 $d = 3.6 \text{ mm}$ 在 Kn 分别相同时 (即 $Kn = 1.43 \times 10^{-5}$, 1.32×10^{-5} , 1.14×10^{-5} , 1.05×10^{-5} , 9.73×10^{-6} , 8.58×10^{-6}),小孔与相似放大孔的流量系数基本吻合. 从图 12 中可以观察到,微尺度小孔和相似放大孔在相同 Kn 与相同 Re 时,流量系数基本吻合,因此在采用相似放大模型研究微尺度结构的流动特性时,为了确保结果的准确性,不仅要满足各尺度流动的单值性条件相似和 Re 相等的条件,同时需要保证相似放大件和微尺度原件 Kn 相同.

4.4 结果分析

通过以上实验研究可以发现,当不同孔径流体的 Kn 不同时孔流量系数是不一致的. 通过文献[16]的数值模拟进一步揭示了不同尺度孔在相

同和不同 Kn 时流量系数的差异 (数值模拟中小孔孔径分别为 0.3 mm 和 3 mm),通过研究发现小孔在进口位置的流线图,如图 13 所示,图中 $u_{\max}$ 为小孔入口速度最大值, s 为流体距孔中心的相对位置,当流体进入小孔后,在 $0.1d$ 的位置形成涡旋,由于涡旋会对孔内流动有一定的影响,因此涡旋的大小会直接影响小孔流量系数. Kn 不同时 ($Kn = 2.2 \times 10^{-5}$ 与 $Kn = 2.2 \times 10^{-4}$),小孔进口处的涡旋是不一样的,而在相同的 Re 与相同的 $Kn = 2.2 \times 10^{-5}$ 下,孔径为 0.3 mm 与 3 mm 的孔进口处的涡旋范围基本一致.

此外,同时分别通过提取两种孔径的孔内速度梯度的分布来展示不同 Kn 的影响,如图 14 所示. 研究发现, Kn 不同时,在相同的 Re 下, 0.3 mm 小孔比 3 mm 相似放大孔的边界层更薄,两种不同孔径内部的速度梯度分布也表现出较大的差异性; Kn 相同时,在相同的 Re 下, 0.3 mm 小孔和 3 mm 相似放大孔内的边界层厚度和速度梯度

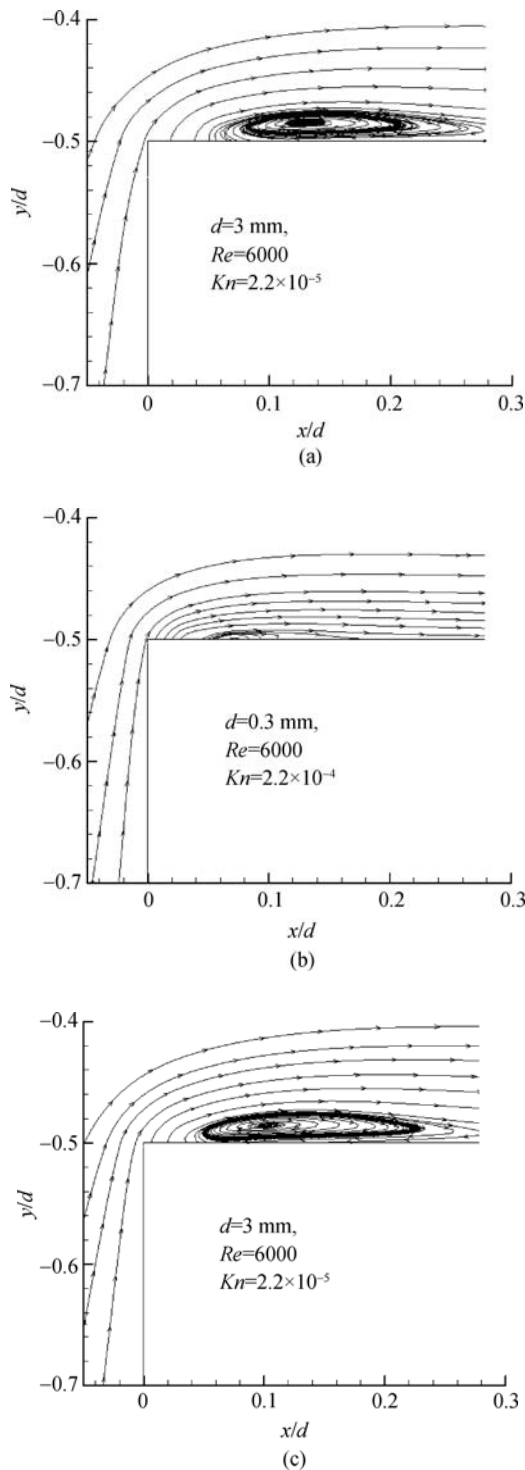
图 13 Re 为 6000 时孔进口处流线分布

Fig. 13 Distribution of streamline of inlet position of holes with $Re=6000$

分布表现出了极好的一致性。

通过以上研究可以发现,当 Kn 不同时,不同尺度下,孔内部流场分布有一定的差异。当 Kn 相同时,相同的 Re 下,孔内部流场分布会表现出极好的一致性,并且小孔孔内边界层厚度和进口处形成的涡旋范围也表现出很好的一致性。因此采

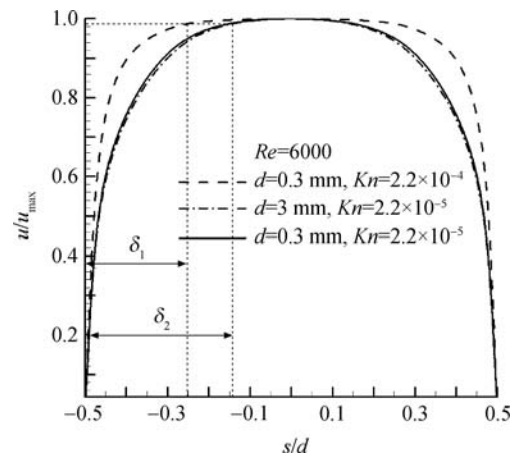


图 14 孔内部边界层示意图

Fig. 14 Sketch of boundary in the inner of holes

用相似放大模型研究微尺度结构的流动特性时,必须在满足各尺度流动的单值性条件相似和 Re 相等的条件时,同时保证相似放大件和微尺度原件 Kn 相同。

5 结 论

为了研究 Kn 对微尺度流动特性的影响,选取理论孔径分别为 0.3574 mm 小孔实验件和 3.6 mm 的相似放大孔实验件,并保证相同的长径比为 5.3。在相同的 Re 和单值性条件下,对孔 Kn 不同和相同的情况进行实验研究,结果表明:

- 1) 当微尺度原件与相似放大件的 Kn 与 Re 分别相同时,小孔与相似放大孔流量系数相同。
- 2) 当微尺度原件与相似放大件的 Kn 不同, Re 相同时,小孔与相似放大孔流量系数不同。
- 3) 在连续介质假定下,采用相似放大模型研究微尺度结构的流动特性时,也必须在满足各尺度流动的单值性条件相似和 Re 相等的条件时,同时保证相似放大件和微尺度原件 Kn 相同。

参考文献:

- [1] 陶然,权晓波,徐建中,等. 微尺度流动研究中的几个问题[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(5): 575-577.
TAO Ran, QUAN Xiaobo, XU Jianzhong, et al. Several questions in research of micro scale flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(5): 575-577. (in Chinese)
- [2] Turner S E, Lam L C, Faghri M, et al. Experimental investigation of gas flow in microchannels[J]. Journal of Heat Transfer, 2004, 126(5): 753-763.
- [3] Kosar A, Mishra C, Peles Y. Laminar flow across a bank of low aspect ratio micro pin fins[J]. Journal of Fluids Engineering, 2005, 127(3): 419-430.

- [4] Celata G P, Cumo M, Mcphail S J, et al. Experimental study on compressible flow in microtubes[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, 28(1): 28-36.
- [5] Weaver S A, Barringer M D, Thole K A. Micro channels with manufacturing roughness levels[R]. ASME Paper GT2010-22976, 2010.
- [6] Hao P F, Zhang X W, Yao Z H, et al. Transitional and turbulent flow in a circular microtube[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 32(2): 423-431.
- [7] Jain V, Lin C. Effects of aspect ratio on compressible gas flow in microchannels[R]. AIAA-2006-3717, 2006.
- [8] Marques C, Kelly K W. Fabrication and performance of a pin fin micro heat exchanger[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2004, 126(3): 434-444.
- [9] Owhaib W, Palm B. Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28(2/3): 105-110.
- [10] Jiang L, Wang Y, Wong M, et al. Fabrication and characterization of a microsystem for a micro-scale heat transfer study[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1999, 9(4): 422-428.
- [11] Beskok A. Validation of a new velocity-slip model for separated gas micro flows[J]. *Numerical Heat Transfer: Part B*, 2001, 40(6): 451-471.
- [12] Croce G, D'Agaro P. Compressibility and rarefaction effect on heat transfer in rough microchannels[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(2): 252-260.
- [13] Jung J Y, Oh H S, Kwak H Y. Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(1/2): 466-472.
- [14] Van Rij J, Ameel T, Harman T. The effect of viscous dissipation and rarefaction on rectangular microchannel convective heat transfer[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(2): 271-281.
- [15] Al Bakhit H, Fakheri A. A hybrid approach for full numerical simulation of heat exchangers[R]. ASME HT-2005-72745, 2005.
- [16] 许艳芝, 朱惠人, 郑杰. 克努森数在微尺度相似流动特性研究中的作用[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(8): 1752-1758.
XU Yanzhi, ZHU Huiren, ZHENG Jie. Effect of Knudsen number on microscale similar flow characteristics[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(8): 1752-1758. (in Chinese)
- [17] 杜东兴. 可压缩性及粗糙度对微细管内流动及换热特性的影响[D]. 北京: 清华大学, 2000.
DU Dongxing. Effect of compressibility and roughness on flow and heat transfer characteristics in microtubes[D]. Beijing: Tsinghua University, 2000. (in Chinese)
- [18] 刘静. 微米/纳米尺度传热学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.