

宽高比及表面粗糙度对矩形微尺度通道流动特性的影响

高 超, 朱志冰, 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: 实验研究了不同宽高比矩形金属微尺度通道的流动特性,并与硅通道对比来探究表面粗糙度的影响。金属微尺度通道宽为 0.4 mm,通道宽高比分别为 0.50、0.67、和 1.00,相对表面粗糙度范围为 0.160 9%~0.214 5%。硅通道宽度及高度都为 0.4 mm,相对表面粗糙度为 0.003 25%。实验工质为空气,实验的雷诺数范围是 250~3 000。实验结果表明:在粗糙微尺度通道会发生转捩提前,并且转捩雷诺数随着宽高比增大而减小。在层流区,微尺度矩形通道摩擦因数随着雷诺数增大而减小,在转捩区出现明显增大后再减小。表面粗糙度很小时,未发现转捩提前现象。

关 键 词: 微尺度通道; 宽高比; 表面粗糙度; 流动特性; 转捩雷诺数

中图分类号: V211.3 **文献标志码:** A

Influence of aspect ratio and roughness on flow behavior in rectangle microchannels

GAO Chao, ZHU Zhibing, LI Haiwang
(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: The influence of aspect ratio on the flow behavior in metallic rectangle microchannels was experimentally investigated. The results of flow behavior in silicon microchannels were compared to investigate the influence of roughness. The width of metallic microchannels was 0.4 mm and the aspect ratios were 0.50, 0.67, 1.00, respectively; and the relative roughness of the metallic microchannels ranged from 0.160 9% to 0.214 5%. The widths and heights of the silicon microchannels were both 0.4 mm, and the relative roughness was 0.003 25%. All experiments were performed with air. The experiments were completed with Reynolds number within the range of 250—3 000. Results of experiments showed that the onset of transition from laminar flow to turbulent flow occurred earlier in unsmooth microchannels. And the critical Reynolds number decreased with the increase of aspect ratio. In laminar region, the friction factors for all the rectangle microchannels decreased roughly with the increase of Reynolds numbers. In transition region, the friction factors increased then decreased. At very low roughness, the transition enhancement was not found.

收稿日期: 2016-09-14
作者简介: 高超(1989—),男,助理研究员,硕士,主要从事航空发动机涡轮叶片冷却方面的研究。

引用格式: 高超,朱志冰,李海旺. 宽高比及表面粗糙度对矩形微尺度通道流动特性的影响[J]. 航空动力学报,2018,33(5):1173-1177. GAO Chao,ZHU Zhibing,LI Haiwang. Influence of aspect ratio and roughness on flow behavior in rectangle microchannels[J]. Journal of Aerospace Power,2018,33(5):1173-1177.

Key words: microchannels; aspect ratio; roughness; flow behavior; critical Reynolds number

为了获得更大的功率,近些年航空发动机的涡轮前温度已经由 1200 K 升高到 1950 K,新一代发动机更是高达 2200 K^[1]。叶片材料的熔点约为 1150 K,为了保证发动机的正常运行,必须采用更加有效的冷却结构。目前,主要的涡轮叶片冷却方式有内部通道冷却、气膜冷却、冲击冷却等^[1]。

过去几十年,许多学者对微尺度通道(下文简称为微通道)的流动换热特性进行了研究。Wu 和 Little^[2]的研究指出微尺度下对流换热现象偏离于传统观测的结果。他们测量发现:摩擦因子高于由充分发展层流的计算式($f=64/Re$)得到的值,由层流到紊流过渡的转捩雷诺数大大减小($Re_{cr}=400\sim900$),雷诺类比对这种粗糙槽道也不适用。Peng 等^[3]的实验指出,层流转捩出现在相对理论雷诺数低,大概在 200~700 的范围内。当雷诺数为 400~1500 范围时,流体会充分发展成为湍流。随着管径的减小,转捩雷诺数有减小的趋势。Judy 等^[4]进行了一系列不同材料和尺寸、不同流动介质的微通道实验。结果表明对于以上规格的微通道,其内流体的流动规律未发现与 Stokes 流动理论存在着显著偏差。Qu 和 Mudawar^[5]在对矩形和圆形微通道内流体流动特性的研究中,在雷诺数为 139~1672 的范围内并没有发现层流向紊流过渡。Xu 等人^[6]采用不同的实验测量方法研究了不同宽高比微通道的流动特性,结果表明微通道中的流动与传统的 N-S 方程符合很好。秦文波等^[7]实验研究多个截面的矩形微通道中的流动特性,发现层流区流动特性与截面宽高比有关。Lee 等^[8]用实验和数值计算的方法研究了宽高比对矩形微通道换热影响,发现在给定的流速时传热系数随通道尺寸减小而增大。

Pfund 等^[9]对于深度为 128~521 μm 的矩形通道的摩擦因子 f 以及泊肃叶数 Po 进行了研究,雷诺数范围 60~3450。发现在雷诺数 $Re<2000$ 的时候, f 和雷诺数成反比,而实验获得 Po 和理论预测的 Po 发生了一定的偏差。Li 等^[10]分别对玻璃和硅两种不同材质的微通道进行实验研究,实验雷诺数为 350~2300。在充分发展的光滑玻璃微管和硅质微管内, Po 接近于 64,这个结论与理论值相一致。实验的转捩雷诺数在 1700~2000 之间。Natrajan 等^[11]通过实验对当量直径 D_h 为 600 μm 的矩形截面微通道进行研

究,通道表面粗糙度分别为近似光滑通道以及相对表面粗糙度为 1.25% 和 2.5%。实验测得对于光滑通道,转捩雷诺数 Re_{cr} 约为 1800,而对于 1.25% 表面粗糙度通道,转捩雷诺数 Re_{cr} 约为 1500,对于 2.5% 相对表面粗糙度通道, Re_{cr} 约为 1300,有较为明显的转捩提前的现象。Mala 和 Li^[12]研究了微小通道中水的流动特性,通道的相对表面粗糙度在 0.69% 到 3.5% 之间。结果发现实验摩擦因数大于理论预测的摩擦因数,在低雷诺数下,压降与理论预测相同。和 Peng 等^[3]一样, Mala 和 Li 在其实验中同样发现了转捩提前现象。Lorenzini 等^[13]对当量直径在 26 μm 和 508 μm 之间微管通以具有可压缩性的氮气,结果发现不论是粗糙的微管还是光滑的微管,在层流区 f 的实验值和理论值有较好的吻合度。当 Re 大于 1300 时,当量直径小于 100 μm 的微管出现转捩提前。在湍流区,光滑管道的实验结果仍然可以与理论有较好的吻合,而在粗糙管道中与理论的误差较为明显。Tang 等^[14]的研究发现对于相对表面粗糙度在 1% 左右的实验件,其在层流区 f 的实验值与理论预测值基本相同,当相对表面粗糙度大于 1% 时, f 的实验值与理论预测的值存在矛盾,矛盾随雷诺数的增大逐渐增大。Yang 和 Lin^[15]的实验中相对表面粗糙度在 1% 左右, D_h 变化范围是 123~962 μm 。结果发现当流体处于层流区时,流体的流动特性与理论预测相吻合。但是实验与理论的矛盾随着实验管径的减少会有变大的趋势。在实验中流体转捩发生在雷诺数为 2300~3000 之间,并未出现转捩提前。Liu 等^[16]实验研究了相对表面粗糙度对矩形微通道流动换热特性的影响,结果未发现转捩提前,但是结果指出相对表面粗糙度越大流动阻力越大。

1 实验方法

1.1 实验装置

实验原理如图 1 所示。实验工质为空气,压缩空气由气源提供,气源压力可稳定在 0.7 MPa。在实验段前后各安置两个集气腔以获得稳定的实验气流并测量两个集气腔的压力。实验时,当实验段两端的压差保持不变时认为流动达到稳定。流量计安置在实验段前,流量通过 FCI (fluid components international) 热式质量流量计测量。

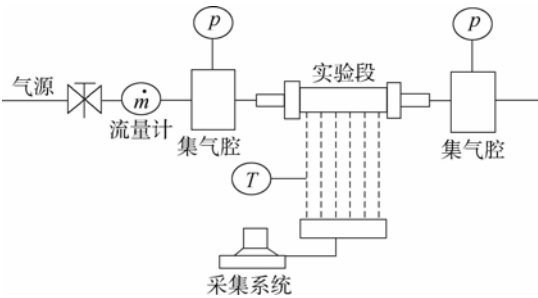


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

压力和流量信号通过 ADAM-4018 模块转换为数字信号。

1.2 实验段

实验段的示意图如图 2 所示。整个实验段采用对称布置。两个对称分布的实验件中间放置尼龙板,构成封闭的实验通道。

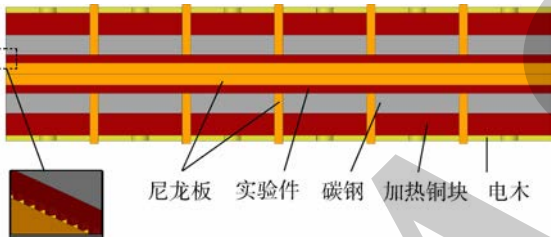


图 2 实验段示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental section

金属矩形微通道实验件由铜加工而成,实验采用微小通道组的方法,每个实验件有 30 个通道。实验件通道宽度 $W=0.4\text{ mm}$,高 $H=0.4, 0.6, 0.8\text{ mm}$,长度 $L=97.5\text{ mm}$,表面粗糙度 R_a 在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 左右,相对表面粗糙度范围为 $0.1609\%\sim 0.2145\%$ 。

硅通道采用 MEMS(micro-electromechanical systems)工艺刻蚀得到,实验件共有 22 个通道,通道宽度(W)和高度(H)均为 0.4 mm ,长度(L)为 90 mm ,表面粗糙度为 13 nm ,相对表面粗糙度为 0.00325% 。实验参数如表 1 所示。

表 1 通道实验参数

Table 1 Experimental parameters of channels

编号	材料	W/mm	H/mm	L/mm	W/H
1	金属	0.4	0.4	97.5	1.00
2	金属	0.4	0.6	97.5	0.67
3	金属	0.4	0.8	97.5	0.50
4	硅	0.4	0.4	90.0	1.00

1.3 数据处理

本文主要研究微通道内的流动特性,定义摩擦因数 f 如下:

$$f = \frac{2\Delta p}{L} \cdot \frac{D_h}{\rho u^2} \tag{1}$$

式中 Δp 为通道进出口两端压差, D_h 为通道当量直径, u 为特征速度, ρ 为进口流体密度。

进出口压差 Δp 的可由式(2)得到

$$\Delta p = p_{\text{in}} - p_{\text{out}} \tag{2}$$

式中 p_{in} 是进口处气压, p_{out} 是出口处气压。

u 可由式(3)得到

$$u = \frac{\dot{m}}{NA\rho} \tag{3}$$

其中 N 是通道个数, A 是单个通道流通面积, $\dot{m}$ 为流量计测出的流体的质量流量。

当量直径 D_h 可由式(4)得到

$$D_h = \frac{2WH}{W+H} \tag{4}$$

雷诺数 Re 的计算公式如下,其中 μ 为空气动力黏度。

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \tag{5}$$

泊肃叶数 Po

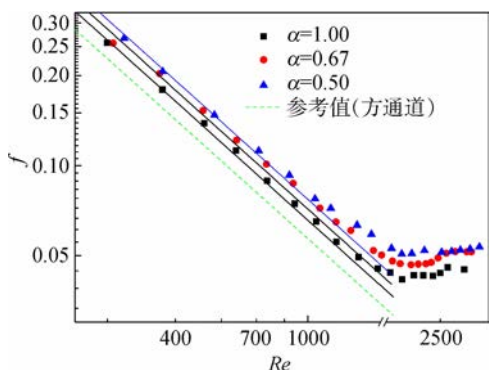
$$Po = fRe \tag{6}$$

2 实验结果及分析

2.1 宽高比对流动特性影响

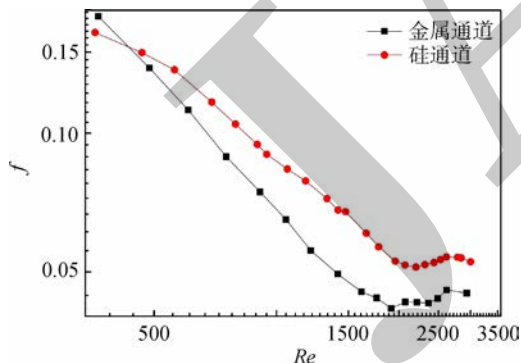
不同宽高比(α)通道得到的 f 随 Re 变化如图 3 所示。可以看出,在层流区随着 Re 的增大, f 逐渐减小,到某一个值时 f 突然增大,随后趋于稳定,这一现象意味着此时出现由层流到湍流的转捩。并且可以看出,随着通道截面宽高比的不同,转捩雷诺数 Re_{cr} 的数值也随着改变。三组通道的 Re_{cr} 都低于 2000,这比传统理论中管流 Re_{cr} 小(传统管流中 $Re_{cr}=2300$),表明在本文的表面粗糙度范围内,矩形微通道出现转捩提前,并且当宽度不变时, Re_{cr} 随宽高比 α 的增大而增大。

另外,根据传统层流理论,对于宽高比为 1 的矩形通道,其 $Po=57$ 。将实验数据进行拟合,得到在三个宽高比下微通道中的 Po 。可以看出,在层流区, f 随 Re 变化的规律仍旧符合大尺度下管流的规律,但是微通道中的流动阻力更大。且随着宽高比的增大,流动阻力减小。这与传统规律是一致的。

图 3 不同宽高比下 f 随 Re 变化Fig. 3 Variations of f with Re at different aspect ratios

2.2 表面粗糙度对流动特性影响

对比宽高比为 1.00 的金属和硅通道的 f , 结果如图 4 所示。可以看到相同的 Re 时, 硅通道的摩擦因数 f 比金属通道的大, 但是变化规律是一致的。通道长度不同可能是出现这一结果的原因之一, 文献[17]的实验也指出, 长度对 f 的影响不容忽视。另一方面, 金属通道通过传统的线切割工艺得到, 通道底部的形状并非标准的矩形, 这也会对结果有影响。

图 4 不同表面粗糙度下 f 随 Re 变化 ($\alpha=1.00$)Fig. 4 Variations of f with Re at different roughnesses ($\alpha=1.00$)

虽然硅通道和矩形通道的长度不同, 但是根据文献[17]的结论, 长度对转捩没有影响。从图 4 可以看出, 硅通道中 Re_{cr} 在 2300 左右, 与传统理论的值相同。而在金属通道中, Re_{cr} 为 1900 左右, 出现较明显的转捩。Lorenzini 等^[13]的实验也指出, 对于光滑管道的计算得到的 f 实验结果仍然可以与理论有较好的吻合。这也表明, 在微小通道中, 表面粗糙度是影响转捩的一个很重要的影响因素。

3 结 论

在矩形微通道中截面宽高比和表面粗糙度对与通道的流动都有很大的影响。

在微通道中, 通道截面宽高比对摩擦因数 f 影响很大。宽高比越大, 出现 Re_{cr} 越大。微通道中 Po 也较常规大尺度通道的大。层流区时 f 随 Re 的变化规律与常规理论一致。相同的宽高比, 微通道的流动阻力较常规管流大。

表面粗糙度对于 Re_{cr} 有很大影响。光滑通道不出现转捩提前现象, Re_{cr} 的值仍在 2300 左右, 粗糙通道会出现一定的转捩提前。

参考文献:

- [1] 顾维藻, 刘文艳. 高温涡轮叶片三种内冷通道冷却性能的实验研究[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(2): 198-203.
GU Weizao, LIU Wenyan. Experimental investigation on the cooling performance of three gas turbine blade internal passages[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19(2): 198-203. (in Chinese)
- [2] WU Peiyi, LITTLE W A. Measurement of friction factors for the flow of gases in very fine channels used for micro-miniature Joule-Thomson refrigerators [J]. Cryogenics, 1983, 23(5): 273-277.
- [3] PENG X F, WANG B X, PETERSON G P, et al. Experimental investigation of heat transfer in flat plates with rectangular microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38(1): 127-137.
- [4] JUDY J, MAYNES D, WEBB B W. Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(17): 3477-3489.
- [5] QU W, MUDAWAR I. Experimental and numerical study of the pressure drop and heat transfer in a single-phase micro-channel heat sink[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(12): 2549-2565.
- [6] XU B, OOTI K T, WONG N T, et al. Experimental investigation of flow friction for liquid flow in microchannels [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2000, 27(8): 1165-1176.
- [7] 秦文波, 程惠尔, 牛禄, 等. 大高宽比微小宽度矩形通道内的水力特性实验研究[J]. 热科学与技术, 2002, 1(1): 38-41.
QIN Wenbo, CHENG Huier, NIU Lu, et al. An experimental study on the hydraulic characteristics inside rectangular channel with big aspect ratio and small width[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2002, 1(1): 38-41. (in Chinese)
- [8] LEE P S, GARIMELLA S V, LIU D. Investigation of heat transfer in rectangular microchannel [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(9): 1688-

1704.

[9] PFUND D, REETOR D, SHEKARRIZ A. Pressure drop measurements in a microchannel[J]. *AIChE Journal*,2000, 46(8):1496-1507.

[10] LI Zhixin, DU Dongxing, GUO Zengyuan. Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes[J]. *Microscale Thermophysical Engineering*,2003,7 (3):253-265.

[11] NATRAJAN V K, CHRISTENSEN K T. The impact of surface roughness on flow through a rectangular microchannel from the laminar to turbulent regimes[J]. *Microfluidics and Nanofluidics*,2010,9(1):95-121.

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

[13] LORENZINI M, MORINI G L, SALVIGNI S. Laminar, transitional and turbulent friction factors for gas flows in smooth and rough microtubes[J]. *International Journal of Thermal Sciences*,2010,49(2):248-255.

[14] TANG G H, LI Z, HE Y L, et al. Experimental study of compressibility, roughness and rarefaction influences on microchannel flow[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2007,50(11/12):2282-2295.

[15] YANG C Y, LIN T Y. Heat transfer characteristics of water flow in microtubes[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*,2007,32(2):432-439.

[16] LIU Yangpeng, XU Guoqiang, SUN Xujing, et al. Investigation of the roughness effect on flow behavior and heat transfer characteristics in microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2015,83:11-20.

[17] TAO Zhi, ZHU Zhibing, LI Haiwang. Experimental Investigation of the air flow behavior and heat transfer characteristics in microchannels with different channel lengths [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2017, 139 (5): 052403. 1-052403. 7.

(编辑:陈 越)