# 旋转状态下矩形微小通道流动与换热试验研究

孙浩峰(1988),男,在读硕士研究 生,研究方向为计算传热和试验传热。 基金项目:国家自然科学基金 (51006008)资助 收稿日期:2012-09-25

孙浩峰,孙纪宁 (北京航空航天大学能源与动力工程学院,北京 100191)

> 摘要:为了研究微小通道结构在航空发动机涡轮叶片中应用的前景和可行性,以空 气为冷却介质,在 Re=1000~3000、转速为 0~500 r/min、Ro=0~3.5×10<sup>-3</sup> 条件下,对 水力直径为1 mm 的旋转微小通道组的流动和换热特性进行试验研究。结果表明:微小通 道流阻系数呈现粗糙壁通道特征,通道临界 Re≈2350,流阻系数以及临界 Re 随转速增加 未见明显改变。在静止状态下,通道组综合换热系数随 Re 增大而增大,换热系数分布沿 流动方向逐渐减小;在旋转状态下,通道组平均综合换热系数略有增大,旋转对换热特性 的影响随着流动的发展而增大。

关键词:微小通道;流阻系数;临界雷诺数;换热;旋转

## Experimental Study on Flow and Heat Transfer of Rectangular Microchannels on Rotating State SUN Hao-feng, SUN Ji-ning

(School of Jet Propulsion, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to find a way to use the microchannels into aeroengine turbine

blades, the experimental investigation was conducted to explore the flow and heat transfer behaviors in the rectangular microchannels, which hydraulic diameter is 1mm, taken air as coolant, in which the range of the Reynolds number is from 1000 to 3000. The rotating velocity varies from 0 to 500 r/min. The rotating numbers are changing from 0 to  $3.5 \times 10^{-3}$ . The results showed that the flow resistance coefficient of the microchannels renders the rough wall characteristics. The critical Reynolds number is about 2350. With the increasing of the rotating velocity, the flow resistance coefficient and the critical Reynolds number shows no significant change. In the stationary state, the integrated heat transfer coefficient is increasing with the Reynolds number, but its distribution go down along the flow direction. In the rotating state, the integrated heat transfer coefficient increases slightly. The influence of rotating on the heat transfer characteristics increases with the developing of the flow.

Key words: microchannel; flow resistance coefficient; critical Re number; heat transfer; rotating

## 0 引言

随着航空涡轮风扇发动机性能提升,要求发动 机涡轮前温度不断提高。通过缩小通道尺寸以增加 换热面积的方法可以有效提高叶片冷却效果,但受 加工工艺限制,目前可以实现的最小通道尺寸为 0.1~1.0 mm 量级。典型结构为微小通道气膜新型复 合冷却结构<sup>III</sup>。

Hetsroni<sup>12-31</sup>等通过对可实现的最小通道的研究发现,微小通道中气体在充分发展的层流中,试验获得的阻力系数可以与传统理论预测值很好地吻合,临界 Re=1800~2200;Poh-Seng Lee<sup>14</sup>等认为微小通道内流 动特性与传统 N-S 方程的预测结果十分接近;Pfund<sup>[5]</sup> 等人发现,光滑矩形微小通道的临界 Re=2000,试验 获得的 Po 大于理论预测值。

同时,Poh-Seng Lee<sup>[4]</sup>、刘庆东<sup>[7]</sup>、马世岩<sup>[8]</sup>对微小 通道结构的换热效果进行了研究。结果表明微小通道 结构可以大大提高换热效率,但强化幅度并未达成统 一结论。

另外,涡轮转子叶片具有旋转运动的特点。通过 对常规尺寸旋转状态下的研究发现,旋转对通道流动 状态产生重要影响,随着旋转数的增加影响效果显著 加强<sup>(9)</sup>;由于流动状态的改变,旋转通道的换热效果也 有所改变<sup>[10]</sup>。但旋转效应对微小通道是否存在影响的 研究仍处于空白。

为此,本文在原尺寸状态下对涡轮叶片尺度的微 小通道的临界 Re 及外壁面综合换热系数进行研究, 并考虑旋转效应对二者的影响。

## 1 试验模型和系统

为研究临界 Re 以及通道流阻特性,定义通道内 流动阻力系数 f 及 Re

$$f = \frac{2\Delta P}{L} \cdot \frac{d_h}{\rho u^2}$$
(1)

式中:ΔP为通道两端总压压差;L为通道长度;d、为 通道截面水力直径;u为特征速度。

$$\operatorname{Re}=\frac{\rho \operatorname{ud}_{h}}{\mu}$$
(2)

定义泊肃叶数 Po

为研究微小通道换热特性,定义综合对流换热系数 h<sub>x</sub>

$$\mathbf{h}_{\mathbf{x}} = \frac{\mathbf{q} - \mathbf{q}_{\text{loss}}}{\mathbf{A} \cdot (\mathbf{T}_{\mathbf{w}} - \mathbf{T}_{\mathbf{f}})} \tag{4}$$

式中:q为总加热功率; $q_{los}$ 为热损失功率;A为换热面积; $T_{s}$ 为通道外壁面温度; $T_{f}$ 为当地主流温度,利用进出口流体温度线性插值获得。

定义无量纲综合换热系数 Nu<sub>x</sub>

$$Nu_{x} = \frac{h_{x} \cdot d_{h}}{\lambda}$$
(5)

式中: λ 为冷却空气导热系数。

为研究旋转效应对流动及换热的影响,定义旋转数 Ro

$$\mathsf{Ro} = \frac{\Omega \cdot \mathsf{d}_{\mathsf{h}}}{\mathsf{u}} \tag{6}$$

式中: 2 为转速。

本试验利用铜的高导热系数特性,采用铜块 – 加 热膜组合加热单元,模拟局部等壁温边界条件,并在 非换热面加绝热材料,减小热损失。总加热功率 q 可 通过计算加热膜发热功率(q=U×I)获得,铜块内埋设 热电偶测量铜块温度即壁温 T<sub>w</sub>,如图 1 所示。

#### 1.1 试验模型

整体试验模型如图 2(a)所示。为提高冷气流量 测试精度,试验采用微小通道组的方法进行,即采用 50个通道的通道组结构,各通道流量均匀分配,流量



#### 图 1 加热单元结构

测点处的流量大大增加,从而减小测量误差,如图 2 (b)所示。每个通道的截面尺寸为 0.6 mm×3 mm,水 力直径为 1 mm,通道壁厚 0.6 mm。

试验通道组总长度为 150 mm。其中:进口段 30 mm,用于冷却气流在通道内充分发展;试验段 100 mm,沿流向被平均分成 5 个加热点单独加热,各加热点之间的加热热流相等,相邻加热单元间用绝热材料进行绝热处理,其中两端加热点为通道提供绝热边界,中间 3 个加热点为试验点;出口段 20 mm,用于消除出口段对通道出口处流动的扰动。对整个试验件的数值模拟结果显示,无论是在静止状态还是在旋转状态,各通道间流量分配的不平均度小于 2%。

相邻铜块之间通过 2 mm 厚的尼龙垫片进行隔 热,尼龙导热系数为铜的 1/2000。在试验室工况下,通 过尼龙绝热垫片的热流不高于铜块加热热流的 4%。

本试验采用径向入流的流动方式,如图 2(e)所示,冷却气体从高旋转半径流向低旋转半径。



本试验模型在试验通道入口和出口端设有集气 腔,对腔内气体总压进行测量,通过数值模拟验证可 知集气腔内总压和通道组进、出口处总压相差不大, 从而通过测量腔内总压得到通道进、出口总压差。

## 1.2 试验装置

试验台如图 3 所示,由进气段、主支撑段、试验段 和数据采集段组成。在冷气人口前段通过热式流量计 测量冷却空气的质量流量,通过旋转进气接头实现冷 却空气由静止到旋转的转化。试验件安装在试验段, 由热电偶测量的温度信号通过旋转亚当实现实时监 测,测试系统及加热膜的供电和数据信号输出通过滑 环引电器实现动静转化,压力信号则直接通过尾部的 旋转测压接头引出,在静止条件下直接测量。



图3 试验台结构

试验供气系统包括空气压缩机、空气过滤器、稳 压腔、稳压阀、电动流量调节装置以及热式质量流量 计。空气经供气系统的稳压除尘处理后进入试验台。 旋转进气接口及试验台中引气管道严格密封,在进入 试验台旋转进气接口之前测量流量,不会产生误差。

## 2 结果分析

## 2.1 静止状态

Po 随 Re 的变化曲线如图 4 所示。从图中可见, 通道 Po 随 Re 的增大而增大。这与经典理论的常规 尺度光滑圆管层流状态下 Po=64 的结论不同。而非光 滑壁面通道在层流段 Po 随 Re 的增大而增大<sup>[11]</sup>,与本 试验结果相吻合。所以采用线切割工艺加工的试验表 面在微小通道内不能认为是光滑壁面。



流阻系数 f 随 Re 的变化规律如图 5 所示。从图 中可见,通道内的流阻大于常规尺度光滑圆管的。Re 增大到 2350 时,流阻系数出现明显的转折现象,表明 此时已经进入层流和湍流间的过渡流动状态<sup>[12]</sup>。



3 个试验测点及平均 Nu<sub>x</sub> 随 Re 的变化规律如图 6 所示。试验测点沿流动方向分为 P1、P2、P3。从图中 可见 Nu<sub>x</sub> 随 Re 的增大而增大。



图 6 在静止状态下  $Nu_x$  随 Re 的变化规律

为了研究试验通道沿流动方向换热效果的分布, 定义无量纲数 x 为试验点的无量纲径向距离

$$\mathbf{x} = \frac{\mathbf{L}^{\star}}{\mathbf{L}_{\exp}} \tag{7}$$

式中:L<sup>\*</sup>为试验点与试验段入口的距离;L<sub>exp</sub>为试验段 总长度。

在静止状态下 Nu<sub>x</sub> 随 x 变化趋势如图 7 所示。从 图中可见,通道的换热效果沿流动方向逐渐减弱,由于 微小通道结构有很强的流向导热效果,在各试验点加 热热流相同的情况下,沿流动方向,通道内当地主流温 度升高,壁温也升高,在流向导热的作用下,热流会向 通道进口方向传导,使得进口处的局部换热效果增强。

#### 2.2 旋转状态

在不同转速下 Po随 Re 的变化曲线如图 8 所示。

从图中可见,在本试验工况范围内,Po 随转速的变化 改变不明显。在不同转速下流阻系数 f 随 Re 的变化 曲线如图9所示,从图中可见,随着转速的增大,通道 的临界 Re 变化也不明显。





$$\alpha = \frac{Nu_x}{Nu_s} \tag{8}$$

式中:Nu。为静止状态下综合换热系数。 平均旋转换热系数比和沿程旋转换热系数比随

Ro的变化趋势如图 10 所示。从图 10(a)可见,通道平 均 Nu, 随着 Ro 的增大而增大。旋转产生的二次流对 后缘面的冲击作用强化了通道内部的换热效果。 Wen-Lung Fu 等<sup>10</sup>在试验工况为 550 r/min 时,对宽 高比为1:4的常规尺度矩形通道的试验结果显示,在 旋转状态下、Re=3000时, $\alpha$ =3左右。而本试验中虽然 转速和宽高比与其相似,但是在相同 Re 下  $\alpha$  仅约为 1.04。这种换热增强效果的差异,是由于本试验为原 尺寸微小通道模型,水力直径比上述常规尺度通道的 小,在相同转速和 Re 的条件下, Ro 为其 1/140 左右, 所以通道内的旋转效应很弱,由哥氏力产生的二次流 的流动效果很弱,对换热的强化作用并不明显。从图 10(b)、(c)可见,在通道入口处,Nu<sub>x</sub>和 Ro 并没有明 显的关系,但随着流动的发展,Nu,随着 Ro 的增大而 增大的现象逐渐明显。P1 试验点 Nu, 随 Ro 的变化不 明显是由于较弱的旋转效应无法使二次流在进口段 就充分形成。表明在微小通道内二次流始终处于不断 增强的发展过程中。



### 3 结论

(1)本试验模型在静止状态下,在 Re<2300 时, Po 随 Re 的增大而增大,与光滑通道理论结果不符, 所以在微小通道结构中,采用线切割等传统工艺加工 的试验件表面不能视为光滑壁面,粗糙度会对通道流 动特性产生影响。

(2)本试验模型在静止状态下,通道临界 Re 约为 2350。

(3)在静止状态下,通道 Nu<sub>x</sub> 随着 Re 的增大而增 大,且进口段换热效果更强。

(4)在旋转状态下,在本试验的试验工况范围内, 通道流阻系数和临界 Re 均没有明显变化。平均 Nu, 随 Ro 的增大略有增大,其主要原因在于微小通道的 几何尺寸较小,导致 Ro 很小,旋转效应不够显著。但 在一定转速下,局部 Nu,沿流动方向增大幅度提高, 表明在微小通道内二次流始终处于不断增强的发展 过程中。

#### 参考文献:

[1] 孙纪宁,邓晶,邓宏武. 涡轮叶片微小通道气膜新型复合冷却机构设计
 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012,38 (5): 702-706.

SUN Jining, DENG Jing, DENG Hongwu. New microchannelfilm cooling composite structural design in turbine blades[J]. Journal of Beijing University of Aeronauties and Astronautics, 2012,38 (5): 702–706. (in Chinese)

- [2] Hetsroni G, Mosyak A, Pogrebnyak E, et al. Fluid flow in microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 1982–1998.
- [3] Hetsroni G, Mosyak A, Pogrebnyak E, et al. Heat transfer in micro-channels: comparison of experiments with theory and numerical results [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 5580–5601.

#### (上接第54页)

[R]. GF-A0041137, 2002:1-2,46.

WANG Rongqiao. Mechanism optimum design and motion simulation of AVEN[R] GF-A0041137,2002:1-2,46 (in Chinese)

- [8] 黎波,王荣桥,隋明君. 计算机模拟试验在矢量喷管研究中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究,2003,16(2):22-26.
  LI Bo, WANG Rongqiao, SUI Mingjun. Computer simulation experiment used in the study of AVEN [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2003,16(2):22-26. (in Chinese)
- [9] 李晓明,伏宇. 轴对称矢量喷管机构优化设计[J]. 燃气涡轮

- [4] Poh-Seng L, Garimella S V, LIU Dong. Investigation of heat transfer in rectangular microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005,48:1688–1704.
- [5] Pfund D, Rector D, Shekarriz A. Pressure drop measurements in a micro-channel[J]. AIChE J,2000, 46:1496–1507.
- [6] Xu B, Ooi K T, Wong N T, et al. Experimental investigation of flow friction for liquid flow in microchannels [J]. Int. Comm. Heat Transfer, 2000, 27(8):1165–1176.
- [7] 刘庆东. 涡轮叶片新内冷结构的实验研究[D]. 北京:北京航空航天大学能源与动力工程学院, 2006.
  LIU Qingdong. Experimental investigation of new cooling structural in turbine blade [D]. Beijing:Beihang University, 2009. (in Chinese)
- [8] 马世岩. 涡轮叶片微小通道冷却结构的换热研究[D]. 北京: 北京航空航天大学能源与动力工程学院, 2009.
  MA Shiyan. Research on heat transfer of micro channel in the turbine blade cooling structure[D]. Beijing:Beihang University, 2009. (in Chinese)
- [9] Willett F T. An experimental study of the effects of rotation on convective heat transfer in smooth and pin fin ducts of narrow cross-section[D]. Rensselaer Polytechnic Institute, 1999.
- [10] Fu W L, Wright L M, Han J C. Heat transfer in two-pass rotating rectangular channels (AR=1:2 and AR=1:4) with smooth walls [J]. Journal of Heat Transfer, 2005, 127: 265-277.
- [11] 邹江, 彭晓峰, 颜维谋. 壁面粗糙度对通道流动特性的影响[J]. 化工学报, 2008, 59(1):25-31.
  ZOU Jiang, PENG Xiaofeng, YAN Weimou. The impact of wall roughness on the flow characteristics of the channel [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(1): 25-31. (in Chinese)
- [12] 王樱, 刁彦华, 赵耀华. 矩形微管内流动特性的实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14):58-62.

WANG Ying, DIAO Yanhua, ZHAO Yaohua. Experimental investigation of flow characteristics in rectangular microchannels [J]. Journal of Electrical Engineering, 2009, 29 (14): 58-62.(in Chinese)

试验与研究,2006,19(3):1-5.

LI Xiaoming, Fu Yu. Optimum design of AVEN mechanism[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2006,19 (3):1–5.(in Chinese)

- [10] Capone F. Comparative investigation of multilane thrust vectoring nozzles[R]. AIAA-92-3263.
- [11] Matesanz A, Velazquez A, Rodriguez M. Mach disk simulation in jets from convergent-divergent axisymmetric and thrust-vectoring nozzles[R]. AIAA-94-2328.