

文章编号: 1000-8055(2006) 03-0512-06

旋转对光滑U形通道内换热的 影响研究

刘传凯, 陶 智, 冼汀, 徐国强, 邓宏武
(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重点实验室, 北京 100083)

摘要: 在通道进口雷诺数从6 100~25 100, 旋转数从0~0.26的范围内, 实验研究了旋转对光滑U形通道的换热特性的影响。通道长度与水力直径的比值为23, 通道平均旋转半径与水力直径的比值为24。结果表明, 静止状态下, 通道局部努塞尔数随雷诺数增加而增加, 但其沿程分布规律基本不变。旋转状态下, 第一通道前后缘换热差异随旋转数的增加而增加, 在第二通道中正好相反。旋转对第一通道中部转静努塞尔数比的影响最大, 而弯道效应则主要影响转弯段及第二通道上游的换热。

关键词: 航空、航天推进系统; 燃气轮机; 冷却叶片; 对流传热; 旋转; 蛇形通道
中图分类号: V 235.1 文献标识码: A

Effect of Rotation on Heat Transfer in a Rotating U-Shaped Passage

LIU Chuan-kai, TAO Zhi, DING Shui-ting,
XU Guo-qiang, DENG Hong-wu

(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The influence of rotation on convective heat transfer in a rotating two-pass square channel was investigated experimentally for Reynolds number from 6100 through 25 100 and the rotation number from 0 through 0.26. The square channel has a length-to-hydraulic diameter ratio of 23. The mean rotating radius to the channel hydraulic diameter ratio was kept at a constant value of 24. The results show that the values of Nusselt number reveal an increase with the increase of Reynolds number, keeping the ratios of local Nusselt number to Dittus-Boelter correlation at all locations the same as stationary state. As the channel rotated, the Nusselt number of the first pass was found to increase on the trailing wall and to decrease on the leading wall, the reverse was true in the second pass. The effect of rotation on the heat transfer is most significant in the middle part of the first pass. The geometry of the sharp turn dominates the local heat transfer distributions in the turning region and the upstream of the second pass.

收稿日期: 2005-04-26; 修订日期: 2005-06-15

基金项目: 航空科学基金资助(03C51028)

作者简介: 刘传凯(1979-), 男, 黑龙江桦南人, 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重点实验室博士生, 主要从事传热的研究。

Key words: aerospace propulsion system; gas turbines; cooling blades; convective heat transfer; rotating; serpentine passage

随着航空发动机涡轮前温度的不断提高, 高压涡轮叶片冷却问题越来越受到人们的普遍关注。国际上对于旋转涡轮叶片内部 U 形冷却通道的换热已经开展了大量的实验研究^[1~3], 其中包括了矩形、正方形等截面通道的旋转换热特性。近些年来, 国内对旋转 U 形冷却通道的研究也逐渐重视, 并对旋转状态下单纯径向出流的光滑方截面直通道^[4]进行了实验研究, 但对于真实发动机所普遍采用的 U 形回转通道, 目前国内还仅限于邓宏武等人^[5]所研究的环肋换热结构。不仅如此, 国内研究的实验旋转数与真实发动机存在一定差距, 难以满足航空发动机涡轮叶片内冷通道优化设计的需要。

本文在较大的旋转数范围内, 用实验方法研究了旋转状态下光滑方形截面 U 形通道的换热特性, 实验旋转数覆盖了真实发动机参数范围, 对涡轮叶片内冷通道的设计具有一定的参考价值。

1 实验模型及设备

1.1 实验模型

图 1 为实验简化模型的剖面图, 模型通道内截面为边长 14 mm 的正方形, 通道加热面是由安装了加热丝和热电偶的铜块组成, 并由绝热性较好的环氧酚醛夹布胶木相互隔离。各铜块垂直于

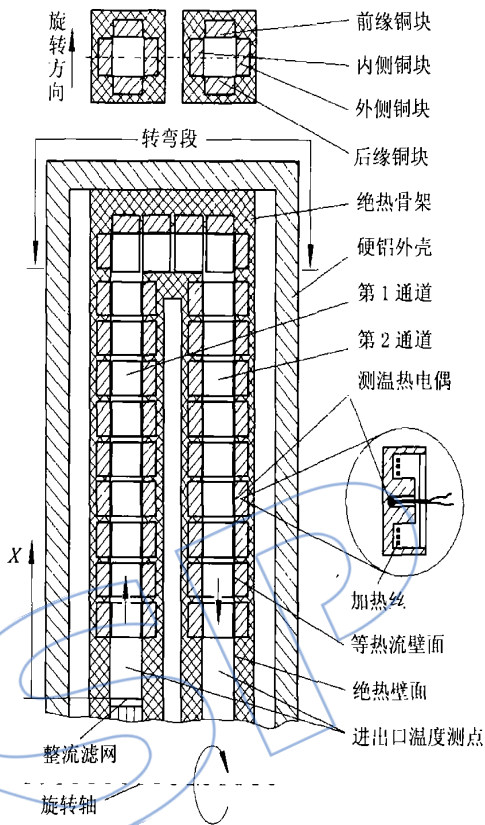


图 1 通道模型简图

Fig. 1 Schematic of the heat transfer test model

换热面的投影面积完全相同, 其背面的加热量也

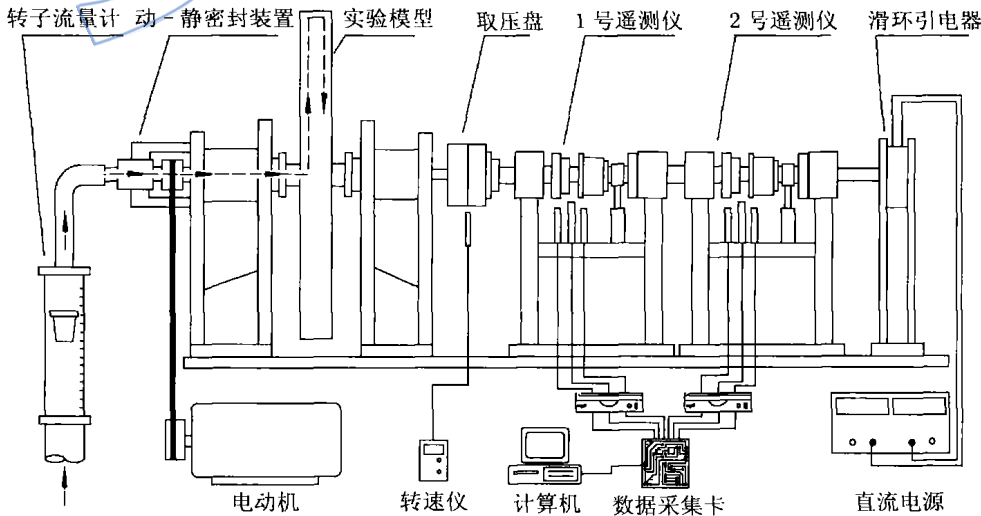


图 2 旋转换热实验台

Fig. 2 Schematic of the rotating test facility

相等。每一个铜块都对应着唯一的热电偶测点, 由于铜的高导热系数, 可认为热电偶所测得温度即代表了该位置的平均壁温。为获得较好的进口条件, 进口处安装了整流滤网, 使得进口来流均匀一致。

1.2 旋转换热实验台

本实验在北京航空航天大学航空发动机气动热力实验室的高速综合旋转换热实验台上进行。如图2所示, 实验冷气来自经过稳压后的压缩空气, 其流量由转子流量计测量, 经过动-静密封装置进入旋转部件; 实验件的温度信号由遥测仪采集并发射到静止的接受器, 经过数据采集卡转化为数字信号后传送到计算机。旋转部件的供电设备为直流稳压电源, 通过滑环引电器接入旋转部件。

1.3 加热及热损失估计

本实验的加热方法为镍铬电阻丝加热, 整个加热模型为等热流条件。实验中铜块的热损失主要是通过铜块背面的保温材料向环境散失的热量, 铜块与其相邻铜块之间的导热也记入局部热损失中。局部热损失的估算是在气体流量为零, 内通道塞满绝热岩棉的条件下进行的。依据不同加热量及转速下的实验, 建立了能较为准确的反映实验工况下热损失分布规律的数学模型, 用于热损失修正。

2 实验数据处理

本文将叶片内冷通道横截面设为正方形并适当放大, 通过对控制方程的无因次分析, 在几何相似的基础上控制旋转系对流换热过程的无因次准则数为雷诺数 Re , 旋转数 Ro , 浮力数 Bo , 普朗特数 Pr 以及沿流向无因次位置 x/D_h 。实验中, 表示物性的无量纲参数 Pr 基本为常数, 所以, 局部努塞

$$Nu = f(Re, Ro, Bo, x/D_h)$$

式中:

努塞尔数: $Nu = hD_h/\lambda$

雷诺数: $Re = \rho_0 D_h \bar{V}_0/\mu$

旋转数: $Ro = \Omega D_h/\bar{V}_0$

浮力数: $Bo = (\Delta\rho/\rho) Ro^2 R/D_h$

$\Delta\rho/\rho$ 为密度比。

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_0 - \bar{\rho}_w}{\rho_0} = \frac{\bar{T}_w - T_0}{T_w}$$

沿流向无因次位置 x/D_h 是从进口开始, 沿通道轴线到计算点的距离 x 与水力直径 D_h 的比值; λ 为空气热传导率; T_0 为进口温度; ρ_0 为进口气体密度; R 为换热面径向位置; $\bar{\rho}_w$ 为壁面平均气流密度; $\bar{T}_w$ 为壁面平均温度。

局部换热系数:

$$h = \frac{q_{net}}{A(T_w - T_b)}$$

式中: q_{net} 为净换热热量, 由通道内加热面的电加热功率减去估算的热损失功率获得; A 为通道内换热面积; 壁面温度 T_w 为实验测量值。

局部主流平均温度:

$$T_b = T_0 + \frac{\sum Q_{net}}{mc_p}$$

式中: $\sum Q_{net}$ 为气体与通道壁面从进口到计算点之间的总换热量, m 为气体质量流量; 特征尺寸为水力直径 D_h ; 进口平均速度 $\bar{V}_0$ 为定性速度。

定性温度 T_f 定义为: $\frac{T_w + T_b}{2}$

3 实验结果分析

在旋转通道内冷气流会受到离心力、哥氏力和浮升力的作用及其交互作用。因此, 通道内冷气的流动和换热特性非常复杂, 通道内各个换热面的换热规律各不相同。图3 是通道各面的定义、各种力的作用方向及相应的哥氏力二次流。

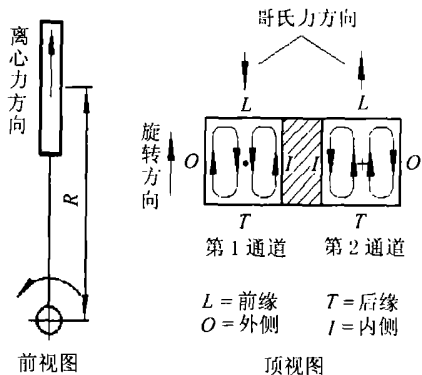


图3 模型的前视图和顶视图

Fig. 3 Front and top view of model passage

本文重点针对哥氏力所指向(或背离)的前后缘表面的换热特性进行分析。

图4 给出了雷诺数分别为6 100, 10 000 和 25 100 时 U 形通道的前后缘局部努塞尔数的沿程分布。可以看出, 在各雷诺数下, 前后缘局部努塞尔数的保持了相同的沿程分布规律。在沿程位置一

定的情况下, 随雷诺数的增大, 局部努塞尔数基本与相同雷诺数下 Dittus-Boelter 关联式的计算值同比增长, 受进口效应的影响, 第一通道局部努塞尔数随无因次位置 x/D_h 的增加是不断下降的, 并逐渐接近 Dittus-Boelter 关联式的计算值, 进入充分发展状态。转弯段受弯道效应影响, 换热显著增加, 其换热最大值达到 Dittus-Boelter 关联式计算值的 2.5 倍以上。第二通道换热基本重复了第一通道的换热规律, 随无因次位置 x/D_h 的增加, 先迅速减小, 然后变化趋缓。

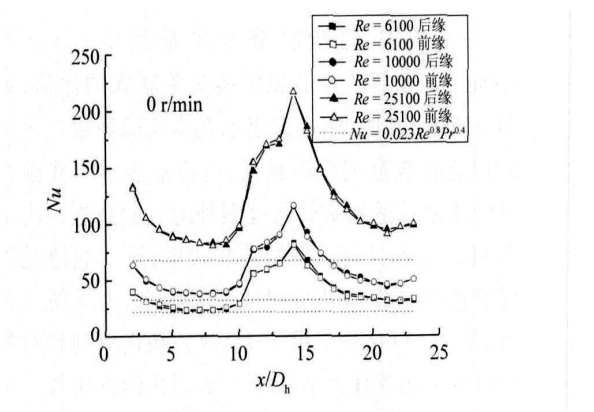


图4 雷诺数对静止状态下局部努塞尔数的影响
Fig. 4 Effect of Reynolds number on the local Nusselt number for stationary case

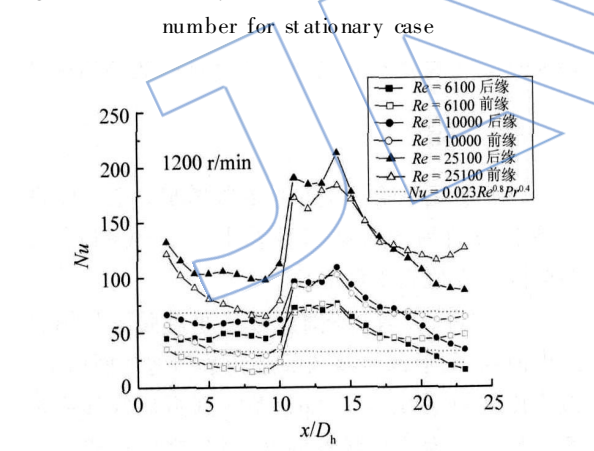


图5 旋转对不同雷诺数下局部努塞尔数的影响
Fig. 5 Effect of Rotation on the local Nusselt number at various Reynolds number

图5 给出了旋转状态下, 雷诺数分别为6 100, 10 000 和 25 100 时的前后缘努塞尔数的沿程分布。实验转速均为 1 200 r/min。对应的旋转数分别为0.065, 0.159 和0.26。可以看出, 旋转使得通道前后缘换热产生了差异。在第一通道, 后缘全程局部努塞尔数大于前缘, 旋转效应在通道上游是沿程增强的, 在通道下游变化趋缓; 在转弯段, 主

流方向与旋转轴平行, 其流场几乎不受哥氏力的直接作用, 弯道结构本身引起的弯道二次流是影响换热的主导因素, 因此, 转弯段前后缘换热未呈现规律性的差异。但是, 通过与图4 的对比可以看出, 旋转状态下转弯段上游的换热要比静止状态有所增强, 这可能是离心力加强了第一通道的冷流体对转弯段上游的冲击作用所致。在第二通道上游, 弯道效应的影响依然强烈, 其与哥氏力的交互作用使得前后缘换热趋于一致, 但随 x/D_h

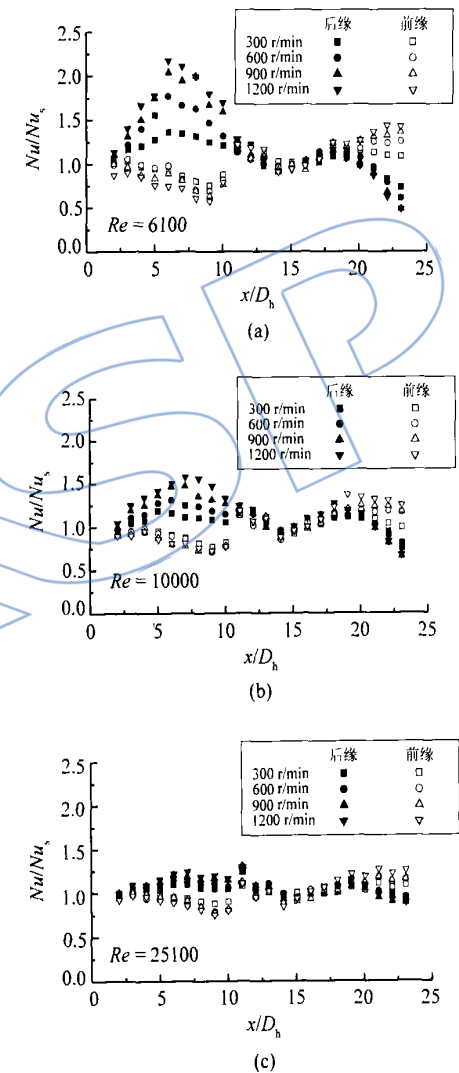


图6 通道局部转努塞尔数比与旋转数的关系
($Re=6\ 100, 10\ 000, 25\ 100$)
Fig. 6 Variations of Nusselt number ratio (to Nu_s) by varying Rotation number ($Re=6\ 100, 10\ 000, 25\ 100$)

的增加, 弯道效应的影响沿程不断衰减, 哥氏力的作用逐渐显现, 在第二通道下游前缘努塞尔数大于后缘。对比不同雷诺数换热特性还可以看出, 在

相同的转速下,随雷诺数的增大(旋转数减小),前后缘表面各沿程位置处的局部努塞尔数也随之增大,但前后缘的努塞尔数差异并没有发生明显变化。

为了减小进口及弯道效应的影响而使旋转的影响更为直观,图6给出了雷诺数为6 100, 10 000和25 100时,光滑通道在不同沿程无因次位置处转静努塞尔数比 Nu/Nu_s 与旋转数的关系。

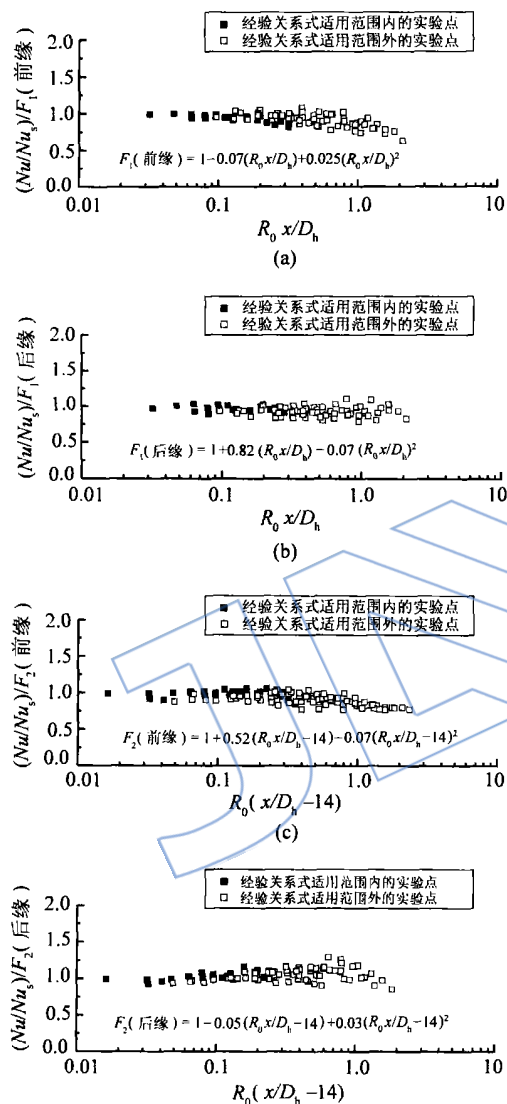


图7 本文实验结果与文献[3]经验公式的比较

Fig. 7 Comparison between the results of present experiment and the correlations from existing literature^[3]

其中, Nu_s 为静止条件下通道的局部努塞尔数。实验转速范围均为0~1 200 r/min, 对应于3种雷诺数下的旋转数范围分别是0~0.26, 0~0.159和0~0.063。可以看出,第一通道以及第二通道下游

前后缘换热的差异随旋转数的增大而增大,转弯段及第二通道上游则受旋转的影响较小。在相同转速下,随着雷诺数的增大(旋转数减少),旋转产生的哥氏力相对于主流惯性力的作用不断下降,前后缘转静努塞尔数比 Nu/Nu_s 的差异变小。

Hwang G J 等人^[3]在对单向直通道长径比为30的光滑回转通道的研究中,在雷诺数为5 000~20 000,旋转数为0~0.032的范围内,将转静努塞尔数比拟合为 Ro 与 x/D_h 乘积的多项式形式。本文进行了高旋转数范围的实验研究,并给出了本实验第一通道 $x/D_h = 2 \sim 8$ 及第二通道 $x/D_h = 15 \sim 21$ 的转静努塞尔数比 Nu/Nu_s 与 Hwang G J 等人^[3]的旋转换热关联式的比值,如图7所示。其中,实心点表示在本实验经验关联式适用旋转数范围内的数据,空心点表示本实验在经验关联式适用旋转数范围外的实验数据。由于在 Hwang G J 等人^[3]的关联式中,第二通道是以转弯段出口作为其沿程位置起始点,为了便于比较,图7(c)和(d)中用 x/D_h 减去从进口到转弯段出口的无因次距离表示第二通道无因次位置。可以看出,在其适用旋转数范围内,关联式与本实验能够较好的吻合,但在高旋转数下,除第一通道后缘以外,关联式与本实验的数据均存在较为明显的差异。这说明, Hwang G J 等人^[3]的低旋转数旋转换热关联式并不能完全适合高旋转数的情况。

4 结 论

(1) 静止状态下,随雷诺数增加,光滑U形通道各表面局部努塞尔数基本与 Dittus-Boelter 关联式计算值等比例增长。

(2) 哥氏力所指向面(第一通道后缘与第二通道前缘)的局部努塞尔数随旋转数的增加而增加。最大旋转数下($Ro = 0.26$),第一通道后缘局部努塞尔数最大为静止状态的2.3倍;第二通道前缘的局部努塞尔数最大为静止状态的1.4倍。

(3) 哥氏力所背离面(第一通道前缘与第二通道后缘)的局部努塞尔数随旋转数的增大而削弱。最大旋转数下($Ro = 0.26$),第一通道前缘局部努塞尔数最小为静止状态的0.6倍;第二通道后缘的局部努塞尔数最小为静止状态的0.5倍。

(4) 第一通道(径向出流)的旋转效应总体上大于第二通道(径向入流)的旋转效应。

(5) 固定的转速下,前后缘努塞尔数的差异基本不随雷诺数的变化;但前后缘转静努塞尔数比的差异随雷诺数的增大而减小。

(6) 在相同的参数范围内, 本实验的数据与 Hwang G J 等人^[3]的实验关联式能够较好的吻合。

参考文献:

[1] Yang W J, Ahang N, Chiou J. Local Heat Transfer in a Rotating Serpentine Flow Passage[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1992, 114: 354~361.

[2] Han J C, Zhang Y M, Kalkuehler K. Uneven Wall Temperature Effect on Local Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Square Channel with Smooth Wall[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1993, 115: 912~920.

[3] Hwang G J, Kuo C R. Experimental Study and Correlations of Convective Heat Transfer in a Radially Rotating Serpentine Passage[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*,

1997, 119: 460~466.

[4] 王宝官, 王武, 吉洪湖. 模拟涡轮叶片内部冷却通道方管 and 收缩管换热的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 1997, 18(5): 608~611.

Wang Baoguan, Wang Wu, Ji Honghu. Experimental Investigation of Heat Transfer Simulation in the Turbine Blade with Rotating Square and Taper Tubes[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 1997, 18(5): 608~611.

[5] 邓宏武, 陶智, 徐国强, 丁水汀. 旋转状态下有转角带肋 U 形通道内换热实验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2001, 41(1): 38~41.

Deng Hongwu, Tao Zhi, Xu Guoqiang, Ding Shuiting. Experimental Investigation on Heat Transfer within a Rotating Ribbed Serpentine Passage with Stagger Angles [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2001, 41(1): 38~41.

