3 种转角下旋转 U 形方通道的局部换热

刘传凯 陶 智 丁水汀 徐国强

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在旋转数为 0 ~ 0.26 内用实验方法研究了转角对旋转 U 形方截面通道换热特性的影响. 3 种通道转角分别为 0°,22.5°,45°. 通道转角的变化引起了通道内哥氏力二次流的变化,继而导致通道各表面换热的变化. 结果表明:随通道转角的增大,前缘与后缘之间努塞尔数的差异减小,而内侧面与外侧面之间的努塞尔数差异增大;在低旋转数下,转角的变化对 U 形通道换热的影响较小,但高旋转数下,转角的变化对 U 形通道换热的影响变得明显.

关 键 词: 燃气轮机; 冷却叶片; 对流传热; 蛇形通道; 旋转

中图分类号: V 235.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)03-0284-04

Local heat transfer in a rotating U-shaped square channel with three channel orientations

Liu Chuankai Tao Zhi Ding Shuiting Xu Guoqiang

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The influence of channel orientation on the local heat transfer coefficient in a rotating, U-shaped, square channel with smooth walls was investigated for rotation number from 0 to 0.26. The three channel orientations were square channel parallel to the rotation axis, square channel twisted at 22.5° to the rotation axis and square channel twisted at 45° to the rotation axis. A change in the channel orientation about the rotating frame causes a change in the secondary flow structure, consequently, the heat transfer coefficient from the individual surfaces of the channel changes. Results show that the Nusselt number difference between leading and trailing surfaces was reduced as the channel twisted to the rotation axis, however, the inner and outer surfaces show an increase in Nusselt number discrepancy over their corresponding parallel channel orientation values. Effect of channel orientation on heat transfer is relatively prominent for high rotation number.

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

国际上对旋转涡轮叶片内冷 U 形冷却通道的换热做过大量的实验研究[1~3]. 但这些研究多为通道模型与旋转轴平行的情况. Parsons[4] 等人研究了旋转状态下 3 种带肋通道前后缘在 45°转角下的换热特性. 国内曾对旋转状态下小转角环肋 U 形通道[5] 内换热进行了研究. 本文用实验方法研究了旋转状态下 3 种转角的方截面光滑 U 形通道的换热特性,总结了转角在不同旋转数下对其换热的影响规律,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. 各铜块的换热面积完全相同,其背面的加热量也相等. 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

收稿日期: 2005-04-01

基金项目: 航空科学基金资助项目(03C51028)

作者简介: 刘传凯(1979-),男,黑龙江桦南人,博士生, lckww@sina.com.

了整流滤网,使得进口来流均匀一致.

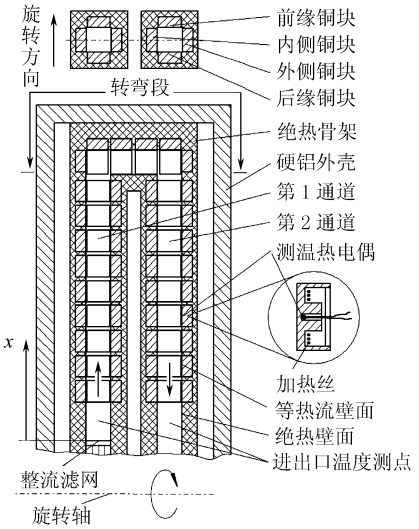


图 1　通道模型简图

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. 见图 2,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

对于旋转涡轮叶片内冷通道的实验研究,由于对实验模型的强度、刚度以及信号线的固定都有比较严苛的要求. 所能采取的绝热措施较为有限,因此热损失也通常要比静态实验大很多. 尤其是对于低雷诺数高转速的旋转换热实验,目前尚无较为完备的绝热措施,使得热损失减小到可以忽略不计的程度. 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. 局部热损失跟被测铜块与环境之间的温差有关,同时也应该包含被测铜块与其相邻铜块之间的导热. 在旋转状态下,实验模型的外表面换热系数将大大增加,被测铜块与环境之间的热阻在一定程度上也随之减小,因此,热损失还受实验模型转速的影响.

为能较为准确的估算实验工况下热损失分布规律,减小热损失对实验结果造成的影响,在气体流量为零,内通道塞满绝热岩棉的条件下进行了大量不同加热功率及不同转速的实验. 针对每个铜块,均拟和了具有如下形式的局部热损失多元函数表达式: $q_{\mathrm{loss}}=f(T_i,T_{i\mathrm{L}},T_{i\mathrm{R}},T_{i\mathrm{U}},T_{i\mathrm{D}},T_{\mathrm{e}},n)$, 式中,$q_{\mathrm{loss}}$为被测铜块的热损失;$T_i$ 为被测铜块温度;$T_{i\mathrm{L}}$和 $T_{i\mathrm{R}}$分别为沿通道周向左右相邻铜块的温度;$T_{i\mathrm{U}}$和 $T_{i\mathrm{D}}$分别为沿通道流向上下相邻铜块的温度;T_{e} 为环境温度;n 为实验模型转速.

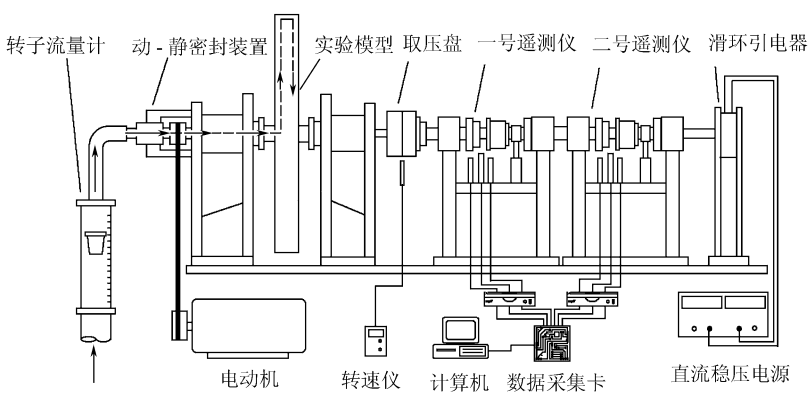


图 2　旋转换热实验台

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},转角 β. 实验中,表示物性的无量纲参数 *Pr* 基本为常数,所以,局部努塞尔数可表示为

$$Nu=f(Re,Ro,Bo,x/D_{\mathrm{h}},\beta)$$

式中,$Nu=hD_{\mathrm{h}}/\lambda$;$Re=\rho_0 D_{\mathrm{h}}\bar{V}_0/\mu$;$Ro=\Omega D_{\mathrm{h}}/\bar{V}_0$;$Bo=(\Delta\rho/\rho)Ro^2R/D_{\mathrm{h}}$($\Delta\rho/\rho$ 为密度比,$\Delta\rho/\rho=(\rho_0-\bar{\rho}_{\mathrm{w}})/\rho_0=(\bar{T}_{\mathrm{w}}-T_0)/\bar{T}_{\mathrm{w}}$);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 $h=q_{net}/[A(T_w-T_b)]$,q_{net} 为净换热量,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 $T_b = T_0 + \sum Q_{net}/mc_p$,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 为气体流量;特征尺寸为 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$(T_w+T_b)/2$.

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、转角 β 的定义及相应的哥氏力二次流.

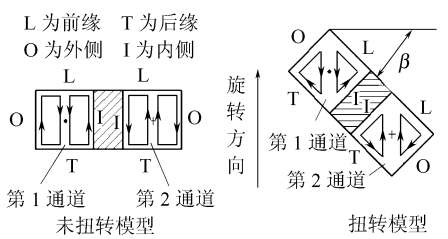


图 3 通道 β 及其相应的哥氏力二次流

对于旋转通道换热实验的数据处理,一般以实验所得的努塞尔数与具有相同当量直径的静态光滑圆管充分发展湍流的平均努塞尔数的比值进行分析,即:$Nu/Nu_0=(hD_h/\lambda)/0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$. 本文重点就 β 及 Ro 对通道换热的影响进行分析.

3.1 β 对旋转 U 形通道局部换热的影响

图 4 给出了在 $Re=6\,000$,$Ro=0.26$ 时,未扭转的旋转 U 形通道 Nu/Nu_0 的沿程分布,其换热特性呈现出明显的旋转效应:第 1 通道后缘 Nu/Nu_0 明显高于前缘,且前后缘 Nu/Nu_0 的差异随无因次位置 x/D_h 的增大而增大;在第 2 通道前段,受弯道效应的强烈影响,通道各表面换热都比较接近. 但随着无因次位置 x/D_h 的增大,哥氏力的影响逐渐显现,前缘 Nu/Nu_0 逐渐大于后缘. 内外侧的换热由于对称性,基本上沿程一致.

当旋转通道和旋转轴心具有一定角度 β 以后,导致垂直于前后缘方向的哥氏力分量减小,同时,产生了垂直于两侧面的哥氏力分量,由此引起通道内二次流及通道各表面换热的变化. 在 $Re=6\,000$,$Ro=0.26$ 的条件下,图 5 给出了 $\beta=22.5°$

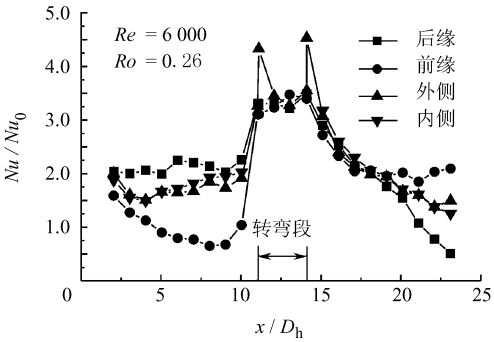


图 4 Nu/Nu_0 的沿程分布($\beta=0°$)

时,旋转 U 形通道 Nu/Nu_0 的沿程分布. 与未扭转的模型相比,通道换热发生了显著的变化:前后缘 Nu/Nu_0 的差异随 β 的增大而减小,内外侧面 Nu/Nu_0 的差异随 β 的增大而增大. 当通道 β 为 45°时(如图 6 所示). 由于垂直于前后缘的哥氏力分量与垂直于侧面的哥氏力分量相当,在换热上的表现即为:第 1 通道后缘与内侧的换热趋于一致,前缘与外侧的换热趋于一致;第 2 通道前缘与内侧的换热趋于一致,后缘与外侧的换热趋于一致. 可见,在扭转情况下,哥氏力对前后缘换热的影响减小了[4],但增大了内外侧的换热差异.

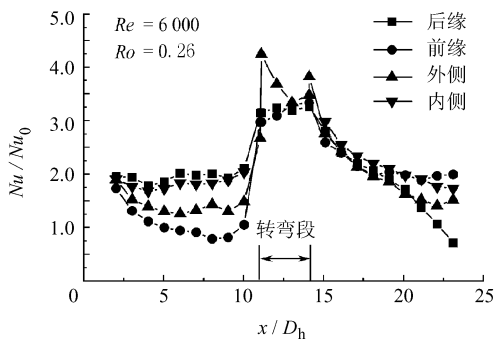


图 5 Nu/Nu_0 的沿程分布($\beta=22.5°$)

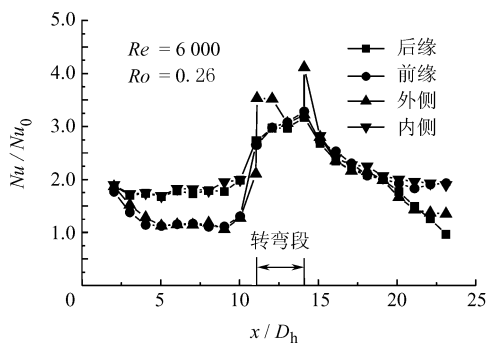
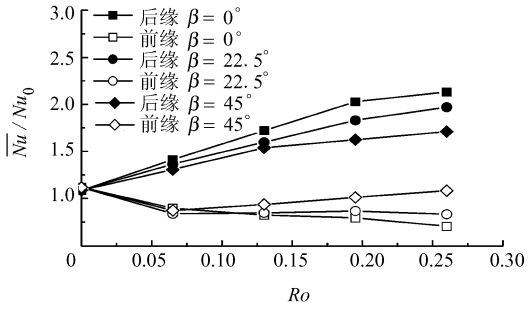


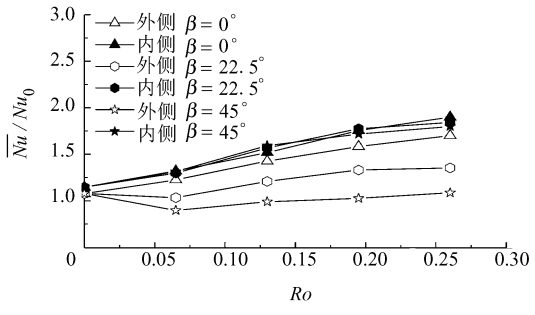
图 6 Nu/Nu_0 的沿程分布($\beta=45°$)

3.2 Ro 对不同 β 时 U 形通道换热的影响

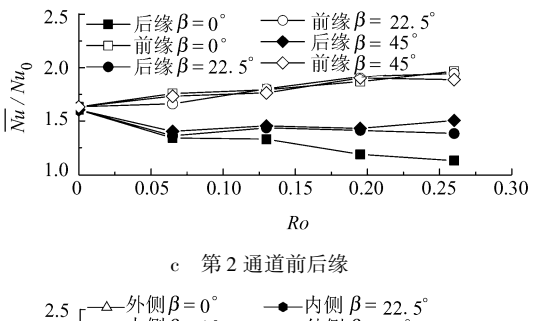
图 7a 和图 7b 分别给出了 $Re=6\,000$ 时,第 1 通道近充分发展段($x/D_h=7\sim9$)前后缘及内外侧面平均努塞尔数比 Nu/Nu_0 与 Ro 的关系. 总体而言,各种 β 下通道前后缘 $\overline{Nu}/Nu_0$ 的差异随 Ro



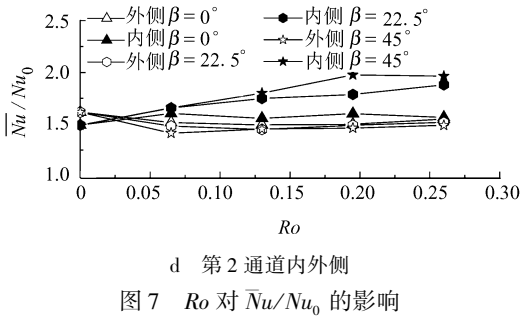
a　第 1 通道前后缘



b　第 1 通道内外侧



c　第 2 通道前后缘



d　第 2 通道内外侧

图 7　*Ro* 对 $\overline{Nu}/Nu_0$ 的影响

的增加而增加,但在高 *Ro* 下,$\beta=45°$的通道前后缘 $\overline{Nu}/Nu_0$ 的差异受 *Ro* 的影响明显变小. 实验结果还表明,在低 *Ro* 小 β 下,β 的变化对前后缘换热的影响有限[5],但随 *Ro* 的增加,β 对换热的影响愈加明显. 与未扭转的通道相比,在最高 *Ro* 下($Ro=0.26$),β 为 22.5°和 45°的第 1 通道前缘 $\overline{Nu}/Nu_0$ 则分别增加了 18% 和 54%;第 1 通道后缘 $\overline{Nu}/Nu_0$ 则分别减小了 8% 和 20%. 从图 7b 上看,第 1 通道内侧面 $\overline{Nu}/Nu_0$ 随 *Ro* 的增大而增大,且受 β 的影响很小;而外侧面 $\overline{Nu}/Nu_0$ 则随 β 的增大而大幅下降,不仅如此,有转角通道外侧面 $\overline{Nu}/Nu_0$ 随 *Ro* 的增大有一个先下降再小幅回升的过程. 图 7c 和图 7d 分别给出了 $Re=6\,000$ 时,第 2 通道近充分发展段($x/D_h=20\sim22$)前后缘及内外侧面 $\overline{Nu}/Nu_0$ 与 *Ro* 的关系. 可以看出,由于离心浮升力在第 2 通道中与主流惯性力的相对方向与第 1 通道相反,并且弯道效应也对下游流场产生了强烈扰动,第 2 通道的换热随 β 及 R_0 的变化的规律性不如第 1 通道明显. 但总的来说,其前缘及外侧面的 $\overline{Nu}/Nu_0$ 受 β 的影响较小;后缘及内侧 $\overline{Nu}/Nu_0$ 随 β 的增加而增加. β 的影响在高 *Ro* 下更为明显.

4　结 束 语

本文用实验方法研究了旋转状态下 3 种转角的方截面光滑 U 形通道的换热特性. 结果表明,在低旋转数下,转角的变化对 U 形通道前后缘换热的影响较小,但高旋转数下,转角的变化对前后缘换热的影响变得明显. 总体上看,随通道转角的增大,前后缘努塞尔数的差异减小,而内外侧面的努塞尔数差异增大;第 1 通道内侧、第 2 通道前缘及外侧的换热受转角的影响较小;转角增强了第 1 通道前缘、第 2 通道后缘及内侧的换热,但减弱了第 1 通道后缘及外侧的换热.

参考文献 (**References**)

[1] Yang W J, Zhang 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] Cho H H, Kim Y Y, Kim K M, *et al*. Effect of rib arrangements and rotation speed on heat transfer in a two-pass duct[R]. GT-2003-38609,2003

[4] Parsons J A, Han J C, Zhang Y M. Effects of model orientation and wall heating condition on local heat transfer in a rotating two-pass square channel with 90° rib turbulators[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1995, 38: 1151~1159

[5] 邓宏武,陶　智,徐国强,等. 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, *et al*. 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(in Chinese)