

文章编号:1000-8055(2012)10-2161-08

直接供气预旋转静系的换热

徐国强, 赵 熙, 罗 翔, 蔡 旭, 余鸿鹏

(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: 用实验方法研究了直接供气转静系预旋腔内转盘表面的换热情况,得到了转盘表面的局部努塞尔数分布云图、周向平均努塞尔数沿径向的分布以及转盘表面平均努塞尔数随转速和流量的变化规律。实验结果表明:相同流量系数下,旋转雷诺数较低时,主盘面局部努塞尔数的峰值区出现在低半径小分离区的上方,旋转雷诺数较高时,局部努塞尔数的峰值区向高半径移动和扩展,且覆盖的半径范围变宽。相同旋转雷诺数下,流量系数越大,局部努塞尔数的峰值区向低半径移动,其覆盖的半径范围变窄;主盘面的平均努塞尔数与旋转雷诺数或流量系数均呈单调增大关系。

关 键 词: 直接供气系统; 转静系; 预旋; 旋转盘腔; 换热

中图分类号: V231

文献标志码: A

Heat transfer in direct transfer pre-swirl rotor-stator system

XU Guo-qiang, ZHAO Xi, LUO Xiang, CAI Xu, YU Hong-peng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine

Aero-thermodynamics, School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Heat transfer of direct transfer pre-swirl rotor-stator system was investigated by experiments. Contours of local Nusselt number on the rotating disk, distribution of circumferential-averaged Nusselt number along radial direction, and variation of average Nusselt number with rotating Reynolds number and mass flow rate coefficient were obtained. The results show that with the same mass flow rate and low rotational Reynolds number, peak zones of local Nusselt number arise at small radius. When rotational Reynolds number increases, peak zones of local Nusselt number move to larger radius and expand. With the same rotational Reynolds number, peak zones of local Nusselt number move to smaller radius and their ranges decreases. Average Nusselt number would increase when rotational Reynolds number or mass flow rate coefficient increases.

Key words: direct transfer system; rotor-stator; pre-swirl; rotating cavity; heat transfer

高压涡轮一级盘一个常用的冷却结构就是使冷气通过静止盘罩上的预旋孔来降低冷气与转盘的相对速度,进而降低冷气相对于旋转部件的总温以增强冷气对旋转高温部件的冷却效果。目前,

发动机主要采用直接供气系统和盖盘系统两类转静系预旋结构,国内外针对这两种预旋结构的换热情况展开了大量的研究工作。对于直接供气系统, Owen 和 Meierhofer 等人^[1-2]最早测量了采用

收稿日期:2012-01-04

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2161_012.html

作者简介:徐国强(1964—),男,河北丰宁人,教授,博士,主要从事旋转换热研究。

了预旋结构后冷气的温降, El-Oun 等人^[3-6]对于预旋腔的绝热效率进行了研究, Wilson 等人^[7]采用实验和数值模拟方法研究了得到了盘面的局部努塞尔数分布, Lock 等人^[8-9]采用瞬态液晶法测量了旋转盘表面的局部努塞尔数分布. 对于盖盘系统, Pilbrow 等人^[10]和 Karabay 等人^[10-13]采用热流计测量转盘表面热流来获得其表面的局部努塞尔数, 并将实验结果与计算结果进行对比. 国内王锁芳等人^[14]采用窄幅液晶, 对不考虑封严泄露情况下的直接供气系统转盘表面的局部努塞尔数进行了测量, 曾军等人^[15]则对直接供气系统盘腔内的换热情况进行了数值模拟研究, 何振威等人^[16]测量了盖盘系统预旋后冷气的温降, 朱晓华等人^[17]通过数值模拟方法得到了盖盘系统预旋后冷气的温降和压力损失情况.

本文的研究是针对直接供气系统, 采用窄幅液晶来测量转盘表面的局部努塞尔数分布情况.

1 实验系统

本文的实验是在北京航空航天大学航空发动机气动热力国家级重点实验室的多功能旋转实验台上进行的, 实验系统如图 1 所示, 实验台系统主

要由实验件部分、以及动力、供气、加热以及测试等几个子系统构成.

1.1 实验件部分和实验模型

图 2 所示为实验件的装配图以及实验段内的详细结构和主要尺寸. 实验件的转静腔由发动机原型经简化和放大后得到, 腔体有效旋转半径为 350 mm. 其结构特点是具有中心缝和预旋孔 2 股进气, 以及盘缘封严缝和转盘接收孔 2 股出气.

实验件由转盘组件和静盘组件构成, 各组件所包含的部件名称及其相对位置关系可如图 2 所示. 为了满足瞬态换热实验要求及减小热损失的需要, 主盘、构型盘和构型环的材料均为导热系数较低的有机玻璃. 主盘外缘与辅盘之间留有径向膨胀间隙以防止主盘因径向膨胀而损坏. 构型环上开有 102 个直径为 4.6 mm 的接收孔.

出于对换热实验减少空气热损失的考虑, 在实验件的流体通道内安装了由夹布胶木或有机玻璃加工而成的绝热衬套和隔热板, 并在通道壁面刷涂太空节能绝热涂料. 夹布胶木的导热系数为 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 有机玻璃的为 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 而该绝热涂料的仅为 $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

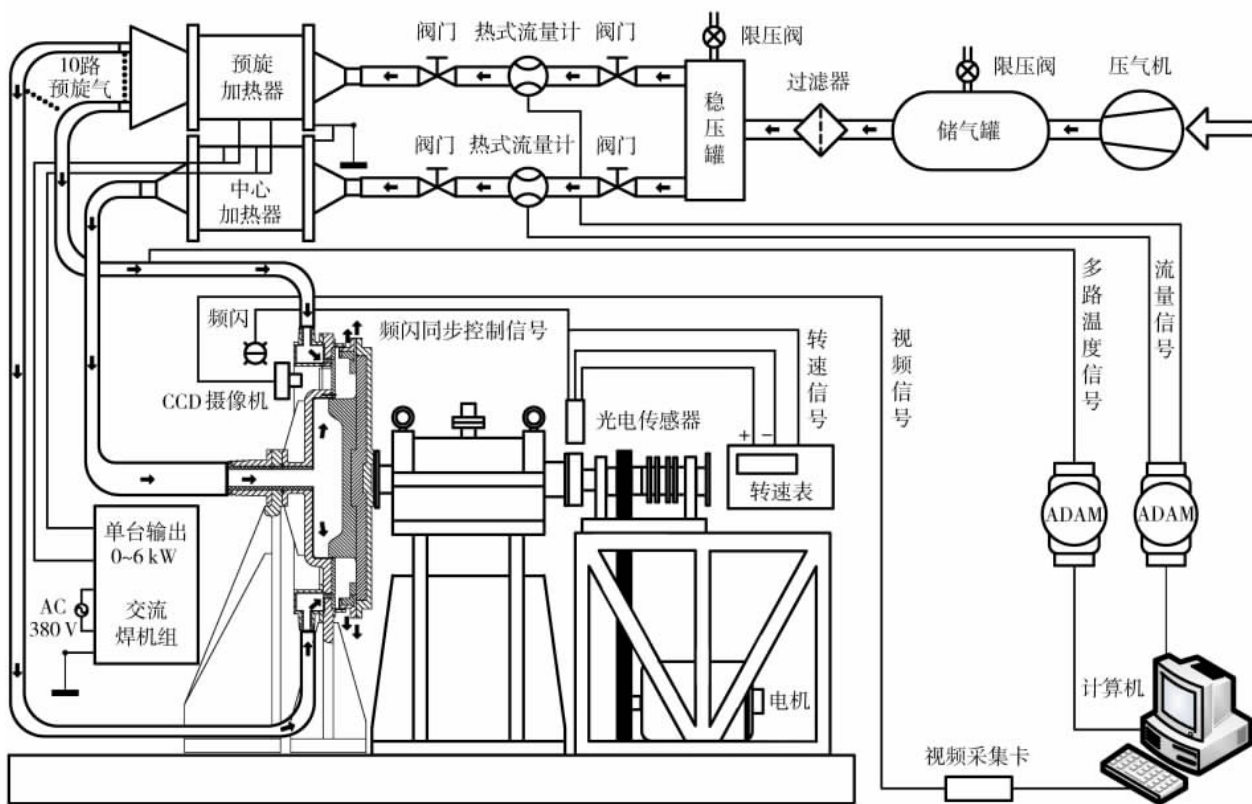


图 1 实验台系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment system

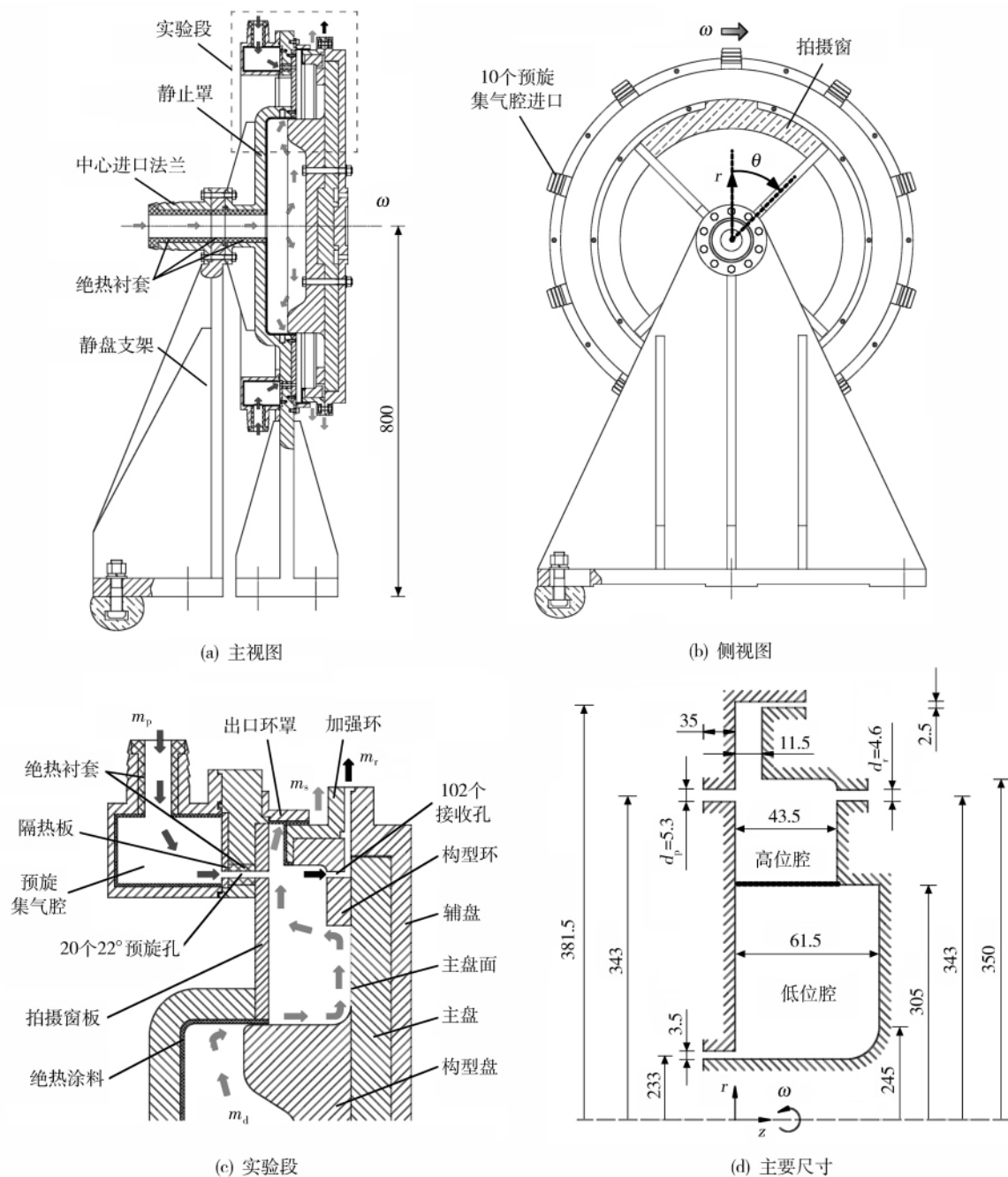


图 2 实验件部分和实验模型(单位:mm)

Fig. 2 Experiment rig and model (unit:mm)

1.2 动力系统及供气系统

动力是 1 台 30 kW 的直流电机,其转速由电磁调速控制器进行调节和控制。实验时,主轴的转速可在 $0 \sim 3\,600$ r/min 内连续变化,其转速由光电传感器配合数字转速表测定。

实验的供气系统参考图 1 所示。离心式压缩机将室外空气压缩后储存在储气罐中,储气罐内的压缩空气由管道输送到压缩空气精密过滤器中,分离水分并除去杂质后,流入稳压罐进行稳压。稳压罐出口的空气再分为两路,分别由对应的

手动螺旋阀门调节各自流量,并由热式气体质量流量计测量出流量大小,然后通过管路分别输送至中心加热器和预旋加热器内,最后再由管路输送至实验件的相应入口:中心加热器出来的空气流向实验件的中心进气法兰,预旋加热器出来的 10 路空气则分别经相同长度的管道流向预旋集气腔的 10 个进口。此后,空气在实验件内的流动路径可参见图 2。

1.3 加热系统

换热实验采用热色液晶瞬态实验方法,需要

对来流进行加热,通过参考 Ireland 等的网格加热单元专利^[18],并结合本实验特点,设计和加工了能满足实验要求的加热器.加热器的内部结构如图 3 所示.两加热器仅在出口段有区别:中心气流加热器只有 1 路出口,预旋气流加热器具有 10 路出口.

为避免热空气与金属件直接发生热交换,外壳、进出口段以及预旋加热器的分流板内均安装了由夹布胶木加工的隔热衬套;此外,实验中还在隔热衬套和加热芯通道内壁上刷涂了如前所述的太空节能绝热涂料,以进一步提高隔热效果.

加热电源为 4 台型号为 BX6-300 的交流弧焊机,分别对中心和预旋加热器的 4 个独立加热回路进行供电.

图 4 所示为使用中心加热器对最大设计实验

流量的空气进行加热时,在加热器出口测得的温升曲线.图中热稳定后温升约 43°C ,已达实验要求;温度稳定时间约为 10 s.

1.4 测试系统

测试系统的内容主要包括温度、流量、转速的测量以及换热实验中主盘面液晶图像的采集(如图 5).

实验件内采用直径 0.3 mm 的铜-康铜热电偶测量空气的温度,并配合 ADAM4018,ADAM4520 数据采集传输模块以及计算机程序对热电偶的温度信号进行采集、转换和记录.进口流量由 ST98 型热式流量计进行测量,其量程为 $0\sim 0.55\text{ kg/s}$,测量精度为 $\pm 1\%$,读数为 $\pm 0.5\%$ FS.转盘转速测量使用的是漫射型红外光电传感器,并由 YK-23 型智能转速表显示转速.转速稳定时,光电传感

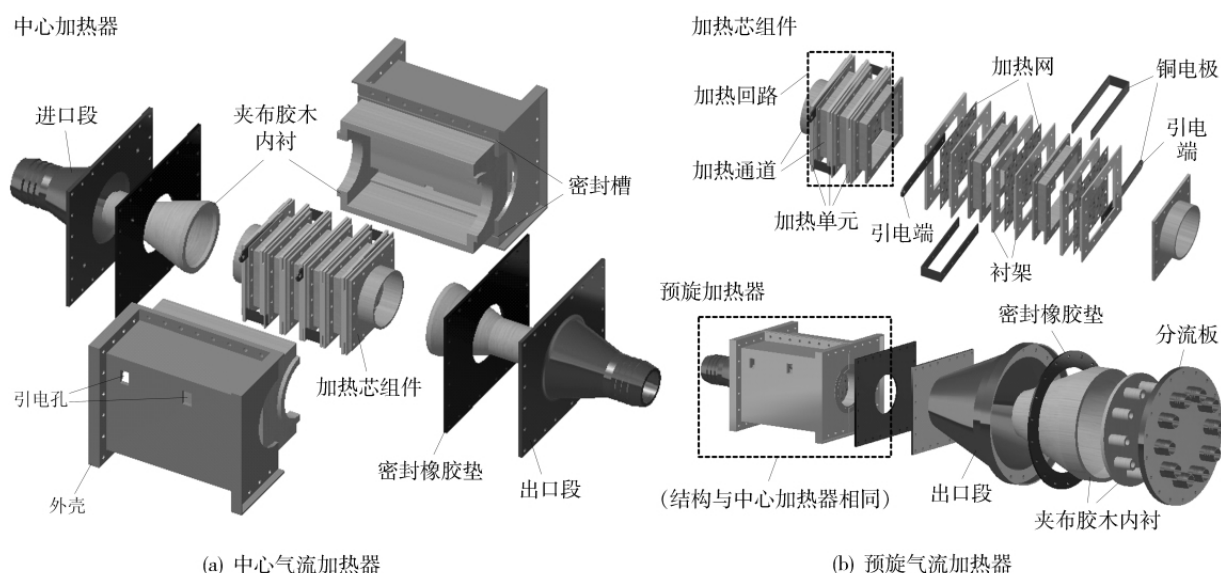


图 3 加热器结构图

Fig. 3 Structures of heater

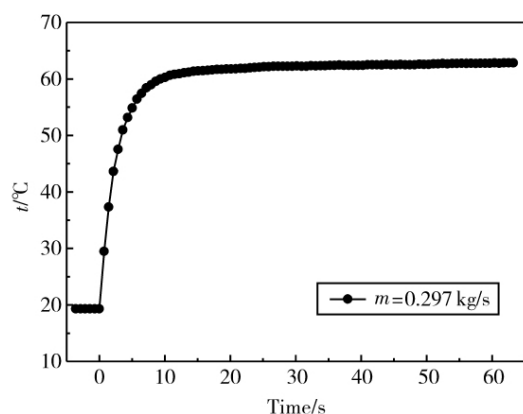


图 4 中心加热器出口温升曲线

Fig. 4 Temperature rising curve at outlet of central stream heater

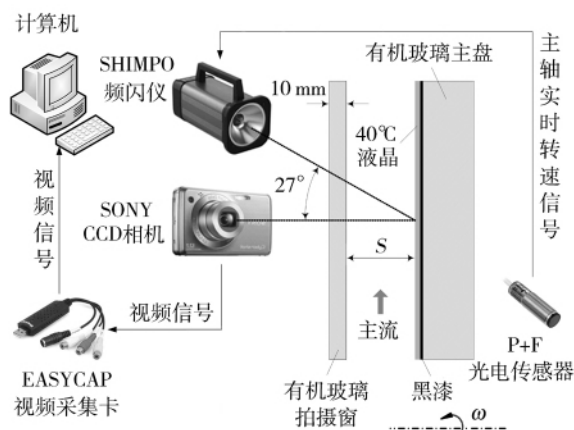


图 5 主盘面液晶图像采集系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of thermochromic liquid crystal (TLC) figure collecting system on main disc

器的误差可忽略,转速表在实验中使用量程为 $0\sim 3\,500\text{ r/min}$,其测量的误差为 $\pm 8\text{ r/min}$.

实验采用 Newton 等人^[19]使用过的热色液晶配合频闪照明的拍摄系统来拍摄主盘面的液晶显色图片,然后根据液晶显色时其色调值与温度值之间的标定关系确定盘面的瞬时温度,最后基于瞬态法原理计算主盘面局部对流传热系数.图 5 所示为主盘面液晶图像采集系统示意图.

2 实验结果及分析

2.1 局部努塞尔数分布

图 6 为不同流量系数下主盘面局部努塞尔数的二维分布云图,在周向取了约 5° 的区域.由图中可以观察到,相同流量系数下,旋转雷诺数较低时,主盘面局部努塞尔数的峰值区出现在低半径小分离区的上方,这主要是由于此处盘面附近流

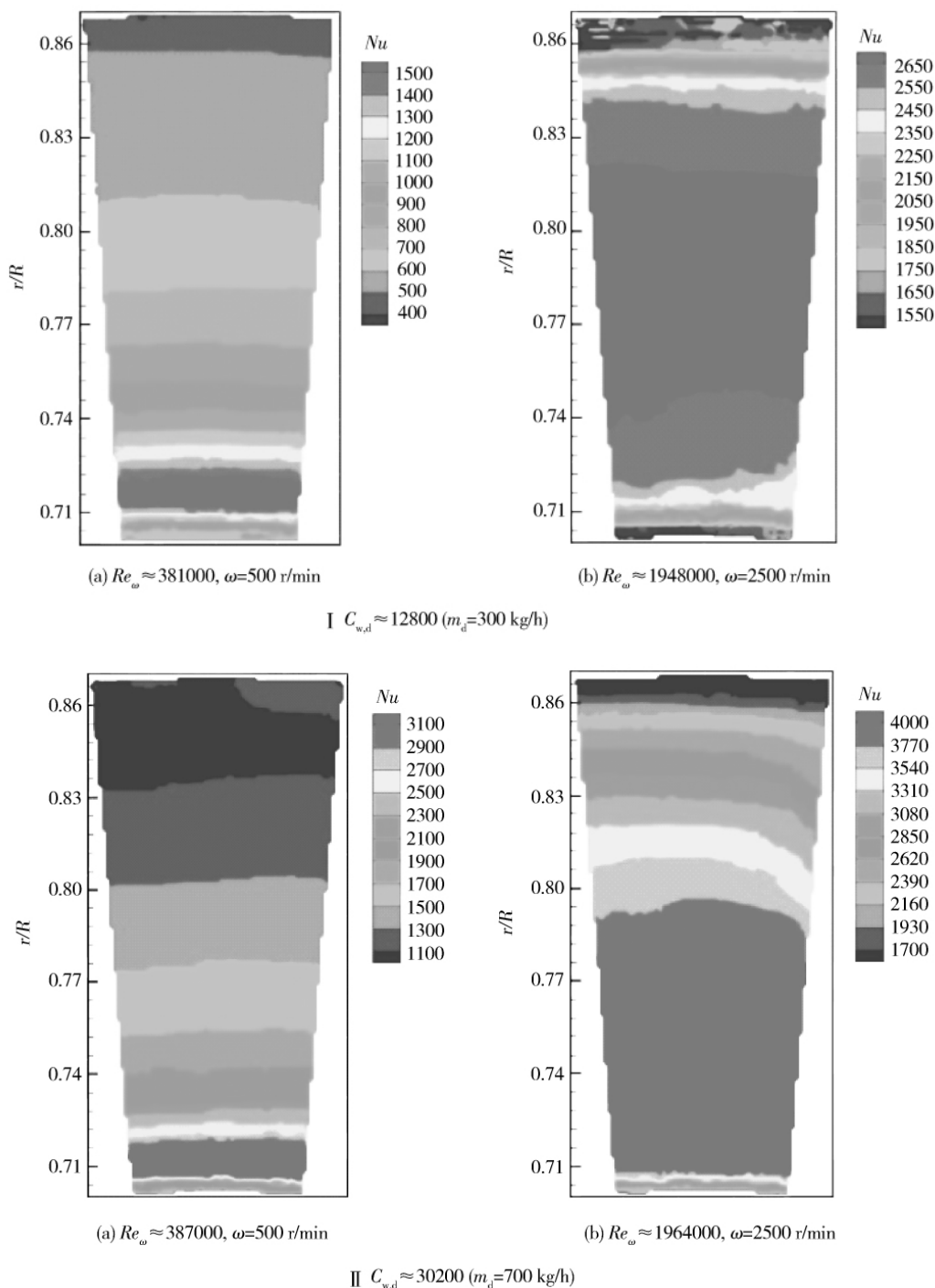


图 6 局部努塞尔数的二维分布云图

Fig. 6 Contours of local Nusselt number

体的径向速度上升使得换热增强;旋转雷诺数较高时,在黏性力的作用下,盘面附近流体的切线速度按半径的平方增大,使得局部努塞尔数的峰值区向高半径移动和扩展,且覆盖的半径范围变宽。相同旋转雷诺数下(例如图 6 中的 I (b) 和图 6 II (b)),流量系数越大,局部努塞尔数的峰值区向低半径移动,其覆盖的半径范围变窄。

2.2 周向平均努塞尔数分布

将局部努塞尔数结果进行周向上按面积加权进行平均后,即可得到周向平均努塞尔数沿半径的分布,如图 7~图 8 所示。

图 7 为不同流量系数 $C_{w,d}$ 下旋转雷诺数 Re_ω

对周向平均努塞尔数 Nu_r 分布的影响情况。观察两图可发现: $C_{w,d}$ 一定时, Re_ω 的增大使得周向平均努塞尔数 Nu_r 总体升高;当 Re_ω 较小时, Nu_r 的峰值区出现在低半径, Re_ω 增大后,峰值区向高半径延伸,覆盖的半径范围变宽。

图 8 为不同旋转雷诺数 Re_ω 时流量系数 $C_{w,d}$ 对周向平均努塞尔数 Nu_r 的影响情况。首先,指定 Re_ω 时, $C_{w,d}$ 的增大使得 Nu_r 总体增大;其次, $C_{w,d}$ 对 Nu_r 随 r/R 的分布形状影响较小。综合以上分析可见:在规定预选流量和中心进口流量相等的情况下,低位腔内主盘面的局部换热特性与静盘中心进气简单转静系的类似。

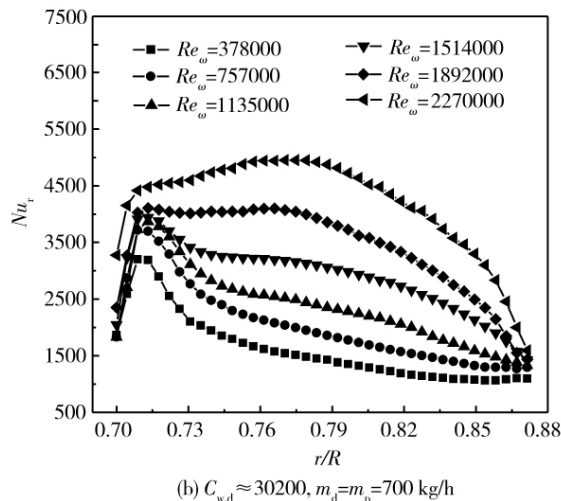
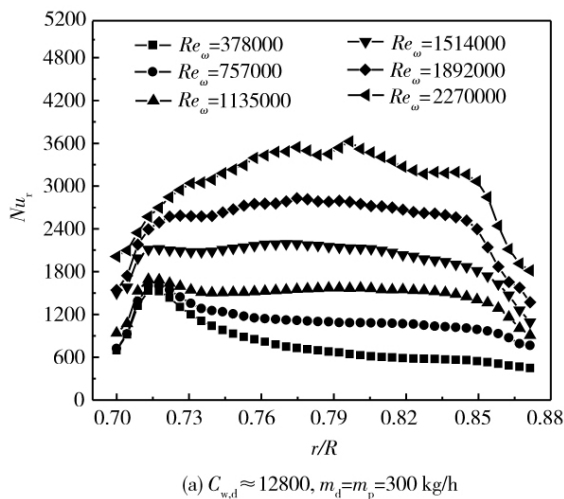


图 7 不同 $C_{w,d}$ 下 Re_ω 对 Nu_r 的影响

Fig. 7 Effect of Re_ω on Nu_r with different $C_{w,d}$

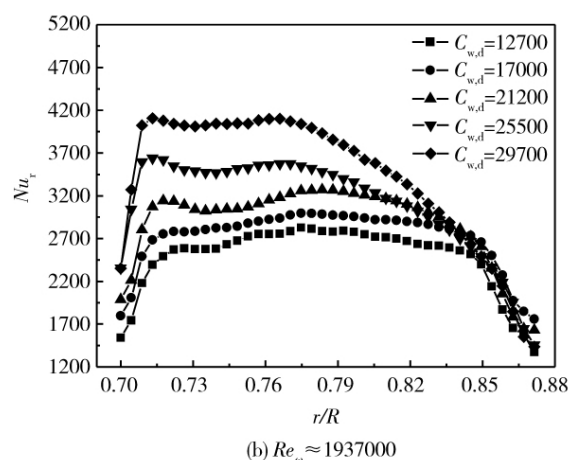
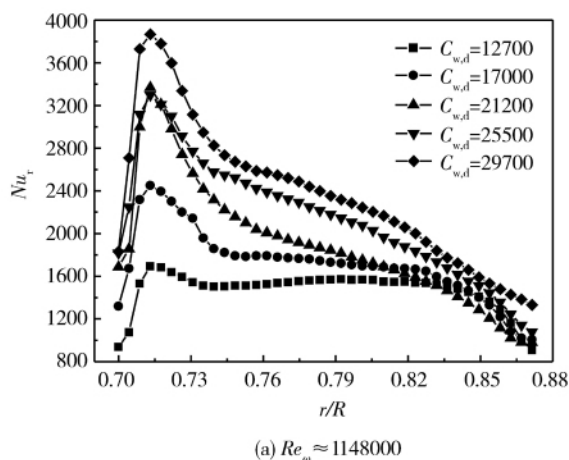


图 8 不同 Re_ω 时 $C_{w,d}$ 对 Nu_r 的影响 ($\omega = 1500$ r/min)

Fig. 8 Effect of $C_{w,d}$ on Nu_r with different Re_ω ($\omega = 1500$ r/min)

2.3 平均努塞尔数

图 9 给出了不同旋转雷诺数 Re_ω 下,由主盘面周向平均努塞尔数而得到的平均努塞尔数 Nu_{av} 随流量系数 $C_{w,d}$ 的变化关系.图 10 给出了不同 $C_{w,d}$ 下,主盘面平均努塞尔数 Nu_{av} 随旋转雷诺数 Re_ω 的变化关系.由图中可明显看到,平均努塞尔数 Nu_{av} 与旋转雷诺数 Re_ω 或流量系数 $C_{w,d}$ 的关系均呈单调增大的特点.将各工况的 Nu_{av} 结果按旋转雷诺数 Re_ω 和中心进气流量系数 $C_{w,d}$ 进行拟合后,得到主盘面平均努塞尔数的实验关联式如下:

$$Nu_{av} = -105.14 + 0.0006353Re_\omega + 3.45826 \times 10^{-10}Re_\omega^2 + 0.063463C_{w,d} \quad (1)$$

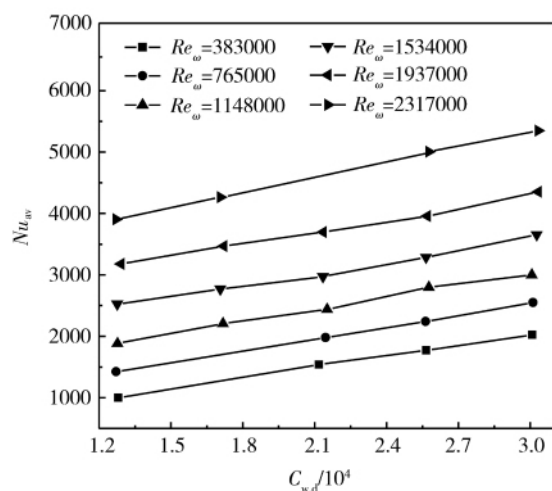


图 9 主盘面 Nu_{av} 随 $C_{w,d}$ 的变化

Fig. 9 Variation of Nu_{av} with $C_{w,d}$ on main disc

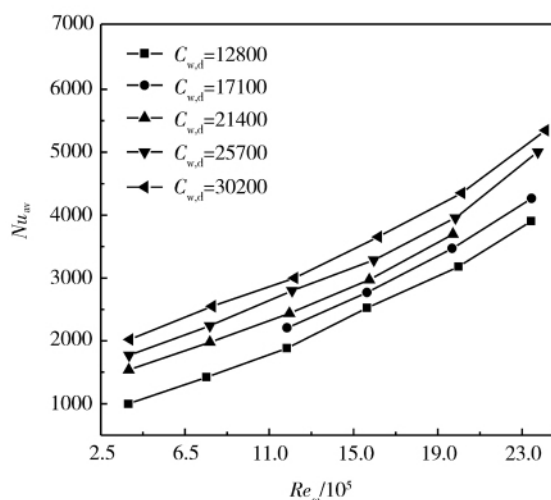


图 10 主盘面 Nu_{av} 随 Re_ω 的变化

Fig. 10 Variation of Nu_{av} with Re_ω on main disk

式中实验范围: $12\,500 \leq C_{w,d} \leq 30\,300$, $380\,000 \leq Re_\omega \leq 2\,400\,000$; 拟合式的相关系数为 0.997. 需再次注意的是式(1)仅是针对中心进气和预旋进气流量系数相等的情况下而得到的.

3 结 论

通过对直接供气转静系预旋结构进行换热实验,在给定预旋进口流量和中心进气流量相等的情况下,得到了主盘面的局部和平均努塞尔数;在研究参数范围内,通过对实验结果的分析,得出的主要结论为:

1) 相同流量系数下,旋转雷诺数较低时,主盘面局部努塞尔数的峰值区出现在低半径小分离区的上方,旋转雷诺数较高时,局部努塞尔数的峰值区向高半径移动和扩展,且覆盖的半径范围变宽.相同旋转雷诺数下,流量系数越大,局部努塞尔数的峰值区向低半径移动,其覆盖的半径范围变窄.

2) 主盘面平均努塞尔数 Nu_{av} 与旋转雷诺数 Re_ω 或流量系数 $C_{w,d}$ 的关系均呈单调增大.通过对实验结果进行拟合,得到了到主盘面平均努塞尔数的实验关联式.

参考文献:

- [1] Owen J M. Modelling internal air systems in gas turbine engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(4): 505-520.
- [2] Meierhofer B, Franklin C J. An investigation of a pre-swirled cooling airflow to a turbine disc by measuring the air temperature in the rotating channels[R]. ASME Paper GT1981-132, 1981.
- [3] El-Oun Z B, Owen J M. Preswirl blade-cooling effectiveness in an adiabatic rotor-stator system[J]. Journal of Turbomachinery, 1989(111): 522-529.
- [4] Geis T, Dittmann M, Dullenkopf K. Cooling air temperature reduction in a direct transfer preswirl system[R]. ASME Paper GT2003-38231, 2003.
- [5] Chew J W, Ciampoli F, Hills N J, et al. Pre-swirled cooling air delivery system performance [R]. ASME Paper GT2005-6832, 2005.
- [6] Farzaneh-Gord M, Wilson M, Owen J M. Numerical and theoretical study of flow and heat transfer in a pre-swirl rotor-stator system [R]. ASME Paper GT2005-68135, 2005.
- [7] Wilson M, Pilbrow R, Owen J M. Flow and heat transfer in a pre-swirl rotor-stator system[J]. Journal of Turbomachinery, 1997(119): 364-373.
- [8] Lock G D, Yan Y, Newton P J, et al. Heat transfer measurements using liquid crystals in a preswirl rotating-disk

- system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005(127):375-382.
- [9] Lock G D, Wilson M, Lock G D, et al. Influence of fluid dynamics on heat transfer in a pre-swirl rotating disc system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005(127):791-797.
- [10] Pilbrow R, Karabay H, Wilson M, et al. Heat transfer in a "cover-plate" preswirl rotating-disc system[J]. Journal of Turbomachinery, 1999(121):249-256.
- [11] Karabay H, Pilbrow R, Wilson M, et al. Performance of pre-swirl rotating-disc systems[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000(122):442-450.
- [12] Karabay H, Wilson M, Owen J M. Predictions of effect of swirl on flow and heat transfer in a rotating cavity[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2001(22):143-155.
- [13] Karabay H, Wilson M, Owen J M. Approximate solutions for flow and heat transfer in pre-swirl rotating-disc systems[R]. ASME Paper GT2001-200, 2001.
- [14] 王锁芳, 朱强华, 栾海峰, 等. 高位预旋进气转静盘腔换热实验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8):1216-1221.
WANG Suofang, ZHU Qianghua, LUAN Haifeng, et al. Experimental study on heat transfer in rotor-stator cavity with high-positioned pre-swirl inflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8):1216-1221. (in Chinese)
- [15] 曾军, 张剑, 黄康才. 预旋进气转静盘腔中的流动和传热数值研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(7):1168-1173.
ZENG Jun, ZHANG Jian, HUANG Kangcai. Flow and heat transfer investigation in pre-swirl inflow rotor-stator cavity[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(7):1168-1173. (in Chinese)
- [16] 何振威, 冯青, 刘松龄, 等. 带盖板预旋进气系统的温降实验误差分析[J]. 科学技术与工程, 2010, (26):6439-6444.
HE Zhenwei, FENG Qing, LIU Songlin, et al. The error analysis of an experiment about drop in temperature in a pre-swirl system with a cover-plate[J]. Science Technology and Engineering, 2010(26):6439-6444. (in Chinese)
- [17] 朱晓华, 刘高文, 刘松龄, 等. 带盖板的预旋系统温降和压力损失数值研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11):2498-2506.
ZHU Xiaohua, LIU Gaowen, LIU Songling, et al. Numerical studies of temperature drop and pressure loss in a cover-plate preswirl system[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11):2498-2506. (in Chinese)
- [18] Ireland P T, Gillespie D R H, Wang Z. Heater element: UK, European Patent, No. 0847679[P/OL]. 2000-11-22 [2012-01-04]. <http://www.freepatentsonline.com/EP0847679.html>.
- [19] Newton P J, Yan Y, Stevens N E, et al. Transient heat transfer measurements using thermochronic liquid crystal. Part 1: An improved technique[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003(24):14-22.