

文章编号:1000-8055(2012)05-0969-06

瞬态法测量高转速旋转盘表面传热系数

孙纪宁¹, 罗翔¹, 刘金楠¹, 徐国强¹, 周志翔², 邱长波²

(1. 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;

2. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 将实际发动机涡轮盘冷却系统简化为中心进气旋转盘, 用瞬态实验的方法对该结构的换热特性进行了研究. 以高转速旋转换热实验台为基础, 建立了转静系盘腔中瞬态换热的实验流程和数据处理方法, 得到了转盘表面的努塞尔数, 并研究了流量系数、旋转雷诺数和出气间隙比对努塞尔数的影响. 研究表明: 对于中心进气冷却结构, 在转盘低半径处, 转盘表面的表面传热主要由冷气冲击控制, 随着半径的增大冲击对换热的影响减弱. 转盘表面的努塞尔数随冷气流量系数的增大而增大, 随旋转雷诺数的增大而增大, 随出气间隙比的增大而减小.

关 键 词: 传热; 旋转盘; 高转速; 表面传热; 瞬态法**中图分类号:** V231.1**文献标志码:** ATransient measurement for measuring the heat transfer in
a rotating cavity with a high rotational speedSUN Ji-ning¹, LUO Xiang¹, LIU Jin-nan¹, XU Guo-qiang¹,
ZHOU Zhi-xiang², QIU Chang-bo²(1. 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;2. China Aviation Powerplant Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: A real turbine disk cooling configuration was simplified to be a shrouded rotating disk system with central coolant air. Heat transfer characteristic was studied by experimental method. On the heat transfer test rig with high rotating-speed for rotating components, the procedure of experiment and the method of data processing were established initially. The Nusselt number of the rotating disk surface was got, and the variations with the mass flow coefficient, the rotating Reynolds number and the ration of sealing clearance were studied. Conclusions could be drawn as follows: For central inlet, the heat transfer in the lower radius is mainly controlled by the impingement of cooling air, the influence of impingement decreases with the increasing of radius. The Nusselt number increases with the mass flow coefficient and the rotating Reynolds number, decreases with the ratio of sealing clearance.

Key words: heat transfer; rotating disk; high rotating speed;
convective heat transfer; transient heat transfer measurement

收稿日期: 2011-09-27; **网络出版地址:** www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120525.1516.201205.969_002.html**基金项目:** 国家自然科学基金 (50806004)**作者简介:** 孙纪宁 (1975—), 男, 辽宁辽阳人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机传热研究.

对航空发动机的涡轮盘而言,通常获得涡轮盘的最高温度和盘内温度分布,以便进行强度分析.热量从涡轮盘的边缘径向传入涡轮盘,盘侧面冷气的流动与换热直接决定了涡轮盘的最高温度和温度分布.因此,涡轮盘表面与冷气的表面传热系数是计算转盘温度分布的必要条件之一.表面传热系数的准确与否,直接影响涡轮盘内温度场和热应力的计算结果^[1].

徐国强等人^[2-3]对外缘加热中心进气带罩的旋转盘的平均和局部换热特性进行了初步的研究,得到了转盘平均和局部表面传热系数.罗翔等^[4-5]以实验的方法研究了涡轮旋转盘附近冷气在非定常情况下的流动与换热特性.王锁芳等^[6-7]对预旋进气转静盘腔换热进行了研究.实验中采用了热色液晶测温技术,实验结果表明,高位预旋进气对转盘外缘的冷却效果较好,转盘上的温度分布呈现同心圆形状.数值计算表明,当预旋孔的径向位置增大时,无量纲总温降和转盘表面的平均努塞尔数都是先增大后减小,预旋孔存在一个最优的径向位置. Saniei 等人^[8]采用实验和数值计算的方法研究了转静系,转盘在较高转速下的静盘上的表面传热系数,得到了雷诺数和转静间隙对换热的影响. Ko 和 Rhode^[9]在 1992 年用数值计算的方法计算了有外流存在时盘腔内的流场与温度场,射流点在 $0.5R$ 处.但他们没有给出盘面的换热情况分析. Long^[10]对旋转盘上的换热进行了实验研究.研究发现在小罗斯比数下部分冷气进入盘腔,转盘上的换热增强,此时间隙比对换热的影响不明显,而且随着旋转雷诺数的增加也不再有明显的变化;而在大罗斯比数下,旋转盘上的换热随间隙比的增大而增强.主要有两个因素影响盘腔内的换热:离心力场下自然对流的发生和中心通流进入盘腔,也就是说旋转盘上的换热受强迫对流和自然对流的共同作用,在低半径处强迫对流占主导地位,在高半径处自然对流占主导地位. Wilson, Pilbrow 和 Owen^[11]在中心进气的转静系盘腔外缘引入一股预旋气流,用实验和数值计算得方法对腔内的流动和旋转盘面的换热情况进行了初步的研究.随着进口预旋比的增加预旋空气的温度减小,但计算结果比实验结果低的多.为进一步研究复杂冷却结构提供了一定的参考. Lock, YAN Youyou, Owen 等^[12-13]使用热色液晶对带预旋的转静系盘腔的换热特性进行了研究.热边界条件即来流温度,采用指数级数的处

理方法使得热边界条件满足半无限大理论.分析认为当地努塞尔数的分布由预旋率、旋转雷诺数和湍流度决定.并将换热区域分成两个区域,靠近预旋孔区域的换热特性主要受冲击影响;另外一个区域中流量系数小,换热特性主要受黏性作用的影响.

通过以上的回顾可以看出,虽然有关转静盘腔换热特性的研究成果众多,但对于高速旋转状态下转盘换热随各参数的变化规律尚缺乏深入的了解.本文基于上述背景,将在高旋转雷诺数的旋转实验台上,研究给定转静盘腔结构的转盘表面换热特性.目的在于探索高旋转雷诺数下转静盘腔换热特性,以期完善涡轮盘腔换热特性数据并为以后的研究提供参考.

1 实验台与实验件介绍

本实验台主要包括以下几部分:供气系统、动力、润滑及冷却系统,加热系统,实验件,数据测量及采集系统和照明系统等.实验台总体结构示意图如图 1 所示.为了使研究得以简化和使研究结果具有一定的通用性,将实际发动机涡轮盘腔简化为如图 2 所示的模型,即中心进气外缘出气模型.冷气经加热器加热后,从静止罩中心进入腔体并冲击旋转盘,然后折转径向外流,从转盘的外缘流出腔体.

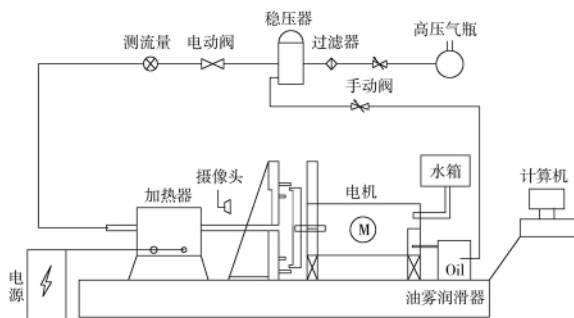


图 1 高转速实验台

Fig. 1 High rotating speed test rig

在实验过程中出气间隙 S_c 和转静间隙 S 需要改变,其余几何参数均固定不变.其中,静盘罩上中心进气半径 $r_{in}=15\text{ mm}$,转盘内半径 $r_o=140\text{ mm}$,出气间隙 S_c 变化范围为:1, 1.5, 2, 2.5 和 3 mm;与之对应的转静间隙 S 变化范围为:14, 14.5, 15, 15.5 和 16 mm.图中其他未注明尺寸长度单位均为 mm.转盘厚度满足半无限大条件.

图 4 所示。

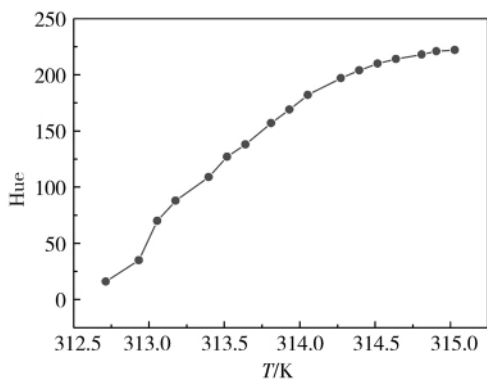


图 4 液晶标定曲线

Fig. 4 liquid crystal calibration curve

4 实验过程与数据处理

转盘转速变化为 0, 3 000, 6 000, 9 000 和 12 000 r/min; 冷气流量变化为 200, 300, 400, 500 和 600 kg/h; 出气间隙 S_c 的变化为 1, 1.5, 2, 2.5 和 3 mm, 与之相应的转静间隙 S 为 14, 14.5, 15, 15.5 和 16 mm. 对应的旋转雷诺数范围为 $4.06 \times 10^5 \sim 1.62 \times 10^6$, 冷气流量系数范围 $2.18 \times 10^5 \sim 6.54 \times 10^5$, 出气间隙比范围 $0.00714 \sim 0.02143$.

在瞬态实验方法中, 如何确定气流温度值、转盘表面温度值及每帧照片所对应的时间是实验的难点. 因为温度和视频这两个量是通过两个相互独立的程序所采集, 为此本文采用了如下的方法: 通过 VB 程序对气流温度进行采集, 并记录下每个温度值所对应的计算机的系统时间; 实验采用的 Logitech 摄像头具有视频时间跟踪显示功能, 另外 Logitech 摄像头每秒采集 15 帧照片, 所以每帧照片之间的时间间隔为 0.0667 s, 这样只要将两组数据的一个点对应好, 其他的点可通过计算程序根据照片的顺序自动确定每帧照片的时间. 这样两个时间就完全对应起来.

在转盘转动时, 由于摩擦的原因将产生摩擦温升, 采用如下方法进行处理. 在转盘外缘处布置热电偶测量各工况下出口气流温度, 该温度减去进口处的气流温度得到最高摩擦温升 ΔT , 摩擦温升沿径向的变化是不同的, 各半径处的摩擦温升按如下公式处理.

$$\Delta T_i = \Delta T \left(\frac{r_i}{r_0} \right)^5 \quad (4)$$

所以, 各工况下靠近转盘壁面处与壁面进行换热的气体温度为 $T^* + \Delta T_i$ (转速为 0 时无 ΔT_i 项). T^* 为热电偶测量温度.

5 实验结果分析

5.1 流量系数对努塞尔数的影响

定义各无量纲参数:

旋转雷诺数 $Re_\omega = \frac{\rho \omega r_0^2}{\mu_0}$; 努塞尔数 $Nu =$

$\frac{hr_0}{\lambda}$; 流量系数 $C_w = \frac{\dot{m}}{\mu r_0}$; 间隙比 $G_c = \frac{S_c}{r_0}$. 定性温度为进口气体温度.

图 5 给出了 $Re_\omega = 4.65 \times 10^5$, $G_c = 0.00714$ 时, 不同冷气流量系数对转盘表面的努塞尔数的影响. 可以看出, 转盘表面努塞尔数从盘中心到盘缘沿半径方向逐渐减小. 在靠近中心进气位置的低半径区域, 冷气冲击转盘, 换热相对比较强烈, 表面传热的局部努塞尔数比较大, 这一区域为冲击冷却控制区, 其主要特征是局部努塞尔数的梯度绝对值不断减小. 随着径向坐标的增加, 冲击冷却的作用迅速减小, 冷气流通截面增加, 截面平均流速不断减小, 表面传热的能力不断下降.

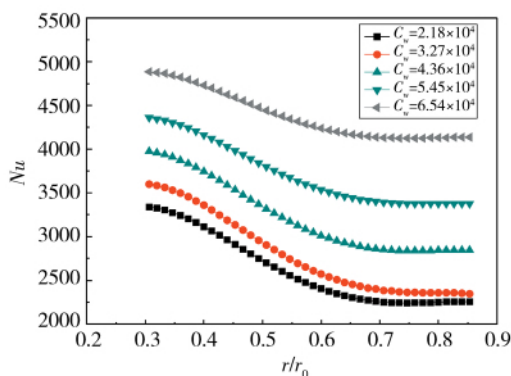


图 5 $G_c = 0.00714$, $Re_\omega = 4.65 \times 10^5$ 时 C_w 对 Nu 的影响

Fig. 5 Distribution of local Nusselt number Nu for different C_w ($G_c = 0.00714$, $Re_\omega = 4.65 \times 10^5$)

在其他条件保持不变时, 冷气流量系数的增加使腔内径向出流的平均速度将增大, 单位面积的过流率增大, 即单位时间转盘单位表面积流过的冷气量加大, 速度和温度边界层变薄, 换热增强. 另一方面, 冷气流量系数的增加也将使腔内回流区涡的运动加剧, 有利于换热的加强.

5.2 旋转雷诺数对努塞尔数的影响

图 6 给出了固定流量系数、间隙比情况下的旋转雷诺数对转盘表面的努塞尔数的影响. 可以看出随着旋转雷诺数的提高, 盘面努塞尔数增大; 转盘盘面高半径处的努塞尔数增大的幅度要远大

于低半径处的增幅;当旋转雷诺数足够大时,高半径处的努塞尔数超过低半径处的努塞尔数,这与低旋转雷诺数时的趋势相反。

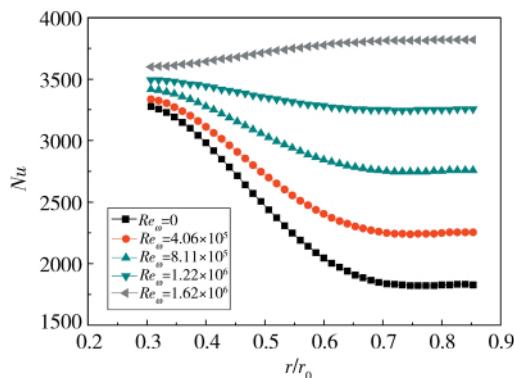


图6 $G_c=0.00714, C_w=2.18 \times 10^4$,
 Re_w 对 Nu 的影响

Fig. 6 Distribution of local Nusselt number Nu for different Re_w ($G_c=0.00714, C_w=2.18 \times 10^4$)

造成这一结果的原因主要是腔内流动状态。其一是随旋转雷诺数的增加,特别是高半径位置,转盘与冷气的相对速度加大,盘面的边界层减薄,表面传热系数增加;另一原因是,在这种结构情况下的腔内流场,会出现一个回流涡,这个涡沿着动盘表面径向向外流动,在静盘位置径向向内流动。在旋转的情况下,涡流流体旋转将使其受到离心力的作用,径向速度增大(盘表面上的流体除外),径向出流能力加大,这样也加强了表面传热。

5.3 出气间隙比对努塞尔数的影响

在固定旋转雷诺数、冷气流量系数,不同出气间隙比下,转盘表面努塞尔数的变化规律如图7所示。可以看出,随着出气间隙比的减小转盘表面努塞尔数随之增大。这是因为,实验过程中减小出气间隙时,同时也减小了转静盘之间的间隙,这样可以使得中心冷气冲击距离减小,冲击冷却作用增强;另一方面是出气间隙减小,要保持出气流量不变,出气速度必然增加,这样会对高半径位置起到了强化换热的作用。出气流速增加也会带动腔内回流涡的旋转速度,这对转盘其它位置的换热也有一个强化作用。因此这两个因素的作用下,可以看到转盘表面的努塞尔数,在出气间隙减少的情况下,低半径和高半径的换热都得到了加强。

同时还应注意到,从盘腔密封结构来讲,周向罩的作用是阻止主流高温燃气倒灌进盘腔,出气间隙越小周向罩的密封效果也越好,同时使得冷

气对转盘的冷却效果也越好,但是会增大出流的阻力。因此,减少出气间隙并不是越少越好,应该综合考虑发动机的实际情况来确定一个合适的间隙。

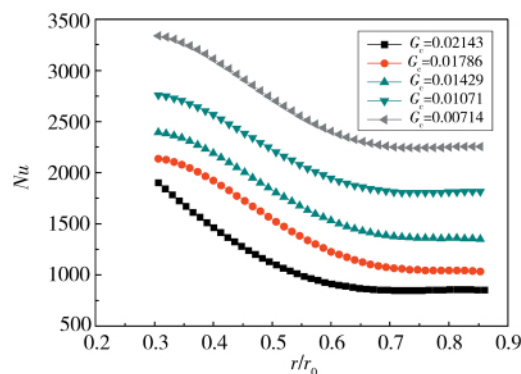


图7 $C_w=2.18 \times 10^4, Re_w=4.06 \times 10^5$ G_c
对 Nu 的影响

Fig. 7 Distribution of local Nusselt number Nu for different G_c ($C_w=2.18 \times 10^4, Re_w=4.06 \times 10^5$)

对取得的各半径处的当地努塞尔数采用面积平均的方法得到对应工况下的盘面平均努塞尔数,面积平均方法如下:

$$Nu_{av} = \frac{\sum_{r=r_1}^{r=r_0} Nu [\pi(r+dr)^2 - \pi r^2]}{\pi r_0^2 - \pi r_1^2}$$

式中 r_1 为最小半径, r_0 为最大半径, dr 由图像像素点决定。上式经化简,略去阶小项高 dr^2 后得到

$$Nu_{av} = \frac{\sum_{r=r_1}^{r=r_0} Nu \cdot 2rdr}{r_0^2 - r_1^2}$$

通过数值拟合,分别得到静止和旋转状态下的平均努塞尔数经验关系式

静止时

$$Nu_{av} = 0.0418 C_w^{0.8104} G_c^{-0.5059}$$

旋转时

$$Nu_{av} = 0.03893 C_w^{0.53425} Re_w^{0.27837} G_c^{-0.40209}$$

在剔除一个坏点后,上述两个经验关系式的拟合值和实验值数据之间的误差均在15%以内。

6 结 论

本文用瞬态实验的方法研究了中心进气转静系旋转盘表面的换热特性,初步探索建立了转静系盘腔瞬态换热的实验流程、数据处理方法。得到了以下结论:

1) 在转盘低半径处,转盘表面的换热主要由

冷气冲击控制,随着半径的增大冲击对换热的影响减弱;在转盘高半径处,转盘表面的换热主要受转盘转速的影响。

2) 随冷气流量系数的提高,转盘表面换热得到强化,盘面努塞尔数随之增大。

3) 随旋转雷诺数的提高,转盘表面努塞尔数随之增大,并且盘面高半径处努塞尔数的增大幅度要远大于其在低半径处的增大幅度。

4) 随着出气间隙比和转静间隙比的减小,转盘表面努塞尔数随之增大。

参考文献:

- [1] 曹玉璋. 航空发动机传热学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [2] 徐国强,曹玉璋,邱绪光. 中心进气的旋转盘平均换热特性研究[J]. 航空动力学报,1994,9(1):27-30.
XU Guoqiang, CAO Yuzhang, QIU Xuguang. Heat transfer from shrouded rotation disk with centric air inflow[J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 9(1): 27-30. (in Chinese)
- [3] 徐国强,丁水汀,邱绪光,等. 具有中心进气外缘加热旋转盘的局部换热特性研究[J]. 航空动力学报,1995,10(3):229-232.
XU Guoqiang, DING Shuiting, QIU Xuguang, et al. An investigation on local heat transfer performance for rim heated rotating disk with central air inflow[J]. Journal of Aerospace Power, 1995, 10(3): 229-232. (in Chinese)
- [4] 罗翔,王建宁,徐国强. 流量变化对中心进气旋转盘平均换热的影响[J]. 航空动力学报,2000,15(3):278-281.
LUO Xiang, WANG Jianning, XU Guoqiang. Transient heat transfer characteristics of shrouded rotating disk with unsteady centric air inflow[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(3): 278-281. (in Chinese)
- [5] 罗翔,王建宁,徐国强. 转速非稳态变化对中心进气旋转盘平均换热的影响[J]. 航空动力学报,2000,15(3):282-285,290.
LUO Xiang, WANG Jianning, XU Guoqiang. Transient heat transfer characteristics of shrouded rotating disk with variation of rotating speed[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(3): 282-285, 290. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 王锁芳,朱强华,张羽,等. 预旋进气位置对转静盘腔换热影响的数值研究[J]. 航空动力学报,2007,22(8):1227-1232.
WANG Suofang, ZHU Qianghua, ZHANG Yu, et al. Numerical studies of heat transfer in a rotor-stator cavity with different radial positions of pre-swirl inlet[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1227-1232. (in Chinese)
- [8] Saniei N, Yuan Z X, Johnson T. Heat transfer from a stationary disk situated near a secondary rotating disk[R]. Missouri: 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference 2002-3011.
- [9] Ko S H, Rhode D L. Thermal details in a rotor-stator cavity at engine conditions with a mainstream[J]. Journal of Turbomachinery, 1992, 114(2): 446-453.
- [10] Long C A. Disk heat transfer in a rotating cavity with an axial throughflow of cooling air[J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 1994, 15(4): 307-316.
- [11] Wilson M, Pilbrow R, Owen J M. Flow and heat transfer in a preswirl rotor-stator system[J]. J. of Turbomachinery, 1997, 119(2): 364-373.
- [12] Lock G D, YAN Youyou, Newton P J. Heat transfer measurements using liquid crystals in a preswirl rotating-disk system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(2): 375-382.
- [13] Lock G D, Wilson M, Owen J M. Influence of fluid dynamics on heat transfer in a preswirl rotating-disk system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(4): 791-797.
- [14] 凌善康,李湜然. 温度测量基础[M]. 北京:中国标准出版社,1998.