具有离散出气孔的旋转盘平均换热特性

罗 翔 徐国强 陶 智 丁水汀

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 实际发动机涡轮盘腔结构中的冷气进入叶片的冷却通道被简化为旋转盘上离散的通孔,冷气从静盘的中心流入,然后从这些通孔和转静盘间隙流出. 针对这样的转静系统进行换热实验,得到了旋转盘表面的平均换热系数和转盘上通孔内平均换热系数. 分析了转速、冷却气体流量对换热特性的影响,并给出了无量纲经验关系式. 结果显示进气流量系数和旋转雷诺数的增加将导致盘面平均努塞尔数和通孔内表面的平均努塞尔数的增加.

关 键 词: 旋转盘; 涡轮转子; 涡轮静子; 换热系数

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0922-04

Heat transfer measurements on a rotating disk with discrete receiver holes

Luo Xiang Xu Guoqiang Tao Zhi Ding Shuiting

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

Abstract: Modern gas turbines are cooled using air diverted from the compressor. In a rotor stator system, the cooling air enters at the center of stator and flows radially outward, then leaves through the discrete receiver holes in the rotor and clearance between rotor and shroud. The rotor with 440 mm diameter has 60 blade-cooling holes with 6 mm diameter at a radius of 195 mm. The temperatures on rotor surface at a number of radial locations were measured by thermocouples. The average Nusselt numbers on the rotating disc $Nu_{av,d}$ and on the surface of receiving holes $Nu_{av,b}$ were determined by experiment results. The magnitude of them was governed by two nondimensional fluid-dynamic parameters: rotational Reynolds number, nondimensional mass flow rate. The experiments reveal that $Nu_{av,d}$ and $Nu_{av,b}$ are increasing as either of them increases. The Nusslet number $Nu_{av,d}$ increases strongly with rotational Reynolds number and weekly with nondimensional mass flow rate compared to the rotating disk without receiver holes.

Key words: rotating disks; rotors; stators; heat transfer coefficients

大多数现代航空发动机中,用于冷却涡轮叶片的冷气先对涡轮盘进行冷却,然后经涡轮盘外缘的榫槽再进入叶片内冷通道. 同时,还有一部分冷气从篦齿封严装置中泄漏到主燃气通道中,这就形成了 1 股进流 2 股出流的流动结构. 旋转盘表面的换热特性是进行热分析重要参数. Wilson (1997)[1], Pilbrow(1999)[2], Karabay(2001)[3] 分别对类似结构的换热特性进行了实验研究. 国内如北航的徐国强[4-5]对旋转盘腔的流动和换热特性进行了研究,南航的吉洪湖[6]用 LDA (Laser Doppler Anemonetry) 测量了腔内流场,但他们采用的都是 1 股进气 1 股出气的结构,忽略了叶片出气孔对腔内流动和换热的影响. 本文将转盘上冷气进入叶片的冷却通道简化为离散的通孔,这样就形成了 1 个入口 2 个出口的盘腔结构,用实验的方法对该结构的换热特性进行了研究,其结果将为实际的发动机的设计提供一定的依据.

1 实验系统简介

图 1 为转静系下旋转盘的实验模型. 冷气 $\dot{m}_0$ 由静止圆盘的中心进气管道流入,流经盘腔后,分为 2 股,一股冷气 $\dot{m}_d$ 从罩与转盘的间隙流出,另

收稿日期: 2005-09-21

作者简介: 罗 翔(1973-),男,四川成都人,博士后, xiang.luo@buaa.edu.cn.

一股冷气 $\dot{m}_b$ 从转盘外缘的叶片冷却孔流出. 2 个出口均与外界大气相连. t_0,t_1,t_2,t_3 分别为转静盘腔的进出口温度和转盘上通孔的进出口温度.

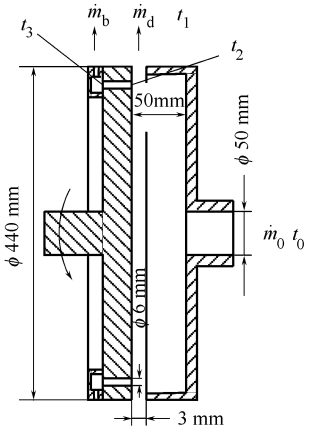


图 1　转静盘结构示意图

转盘是一个由低碳钢加工的厚 30 mm、直径 440 mm 的圆盘. 本实验用电加热来模拟实际发动机涡轮叶片传导到涡轮盘上的热量. 在旋转盘的背面边缘处开一环形沟槽,埋有加热用的电阻丝和测温用的热电偶. 电阻丝外套有瓷管以防短路,用λ=0.12 W/(m·K)的耐火水泥将整个沟槽填满. 为了模拟冷却气流从叶片根部流入叶片内部冷却通道,在转盘半径为 390 mm 处沿圆周均匀开设了 60 个直径为 6 mm 的通孔,通孔后布置有一环形集气腔. 进入通孔的空气经集气腔后,再从外缘 64 个 ϕ6 mm 的通孔直接排入大气.

转盘迎风面布置了 26 对 ϕ0.3 mm NiCr-NiSi 热电偶,其与盘心距离(单位为 mm)分别为 0,7.5,15,22.5,30,45,52.5,60,75,82.5,90,105,112.5,120,135,142.5,150,160,165,170,174,179,184,188,192,196. 另外,在转静盘腔的进出口和转盘上通孔的进出口处,分别布置了 4 对热电偶,用于测量进出口气体温度的变化. 所有的旋转温度信号由旋转遥测仪来采集.

旋转盘用法兰与实验台的旋转轴连接,与转轴一起旋转. 转轴由 30 kW 直流电机带动,转速可以调节,并由光电式转速仪测定.

静止圆盘带有周向环罩,后面安装有转盘,静盘与转盘的间隙 50 mm,罩与转盘的间隙为 3 mm,用于模拟动静密封的封严.

对本实验中 2 股出流 $\dot{m}_d$ 和 $\dot{m}_b$ 的流量测量,可参见文献[7].

2　实验数据处理方法

由于转盘上有 60 个出气孔,导致了其温度场不是轴对称的,边界条件的复杂性使本实验不能按照以前的方法[5]来获得局部努塞尔数. 因此采用测量气体进出口温差的办法来获得盘面和出气孔的总换热量的方法来确定盘面平均努塞尔数 $Nu_{av,d}$ 和出气孔内表面的平均努塞尔数 $Nu_{av,b}$.

Q_b 为经过转盘上通孔的冷却气体所带走的热量,Q_d 为盘面换热的热量. 忽略热量损失,则

$$Q_b = c_p\dot{m}_b(t_3 - t_2) \tag{1}$$

$$Q_d = c_p\dot{m}_d(t_1 - t_0) + c_p\dot{m}_b(t_2 - t_0) \tag{2}$$

式中,c_p 为空气的比热容,取为恒值.

盘面的平均换热系数 $\alpha_{av,d}$ 为

$$\alpha_{av,d} = \frac{Q_d}{F(t_{w,d} - t_0)} \tag{3}$$

式中,$t_{w,d}$ 为旋转盘表面平均温度,测量出盘面不同半径位置上的温度,并按面积加权平均方法进行平均;F 为转盘表面面积.

$Nu_{av,d}$ 的定义为

$$Nu_{av,d} = \frac{\alpha_{av,d}R}{\lambda} \tag{4}$$

式中,λ 为空气的导热系数,取为恒值.

对于转盘上出气孔内壁的 $Nu_{av,b}$ 的定义则比较困难. 主要在于孔内壁面的温度的确定,通常应该在内壁面的不同位置焊上若干对热电偶,测量出当地温度后进行平均. 但是实验时无法在内壁面焊上热电偶,另外也为了和 $Nu_{av,d}$ 做比较,采用的特征温度还是转盘表面的平均温度和冷却气体的入口温度. 即出气孔内壁的 $\alpha_{av,b}$ 定义为

$$\alpha_{av,b} = \frac{Q_b}{F(t_{w,b} - t_0)} \tag{5}$$

$Nu_{av,b}$ 的定义为

$$Nu_{av,b} = \frac{\alpha_{av,b}R}{\lambda} \tag{6}$$

3　实验结果

图 2 给出了转盘表面的 $Nu_{av,d}$ 与旋转雷诺数 Re_ϕ($Re_\phi=\rho\omega R^2/\mu$,$\rho$ 为空气密度,ω 为旋转角速度,μ 为空气的动力粘度,R=200 mm 为转盘的有效半径)之间的变化关系. 随着 Re_ϕ 的增加,转盘表面的 $Nu_{av,d}$ 均呈现不断增加的趋势. 造成这一结果的原因主要是腔内流动状态. 吉洪湖的实验[6]显示核心区的旋转速率 β($\beta=U_{core}/\omega R$,U_{core} 为核心区的切向速度)与 Re_ϕ 有关. 尽管 β 随着 Re_ϕ 的增加而增加,但 U_{core} 与转盘的转速差也增大,转盘表面的换热也随着增大.

图 3 为进气流量系数 $C_{w,0}$($C_{w,0}=\dot{m}_0/\mu R$)对中心进气旋转盘表面 $Nu_{av,d}$ 的影响实验结果. 当

其他条件不变时,随着 $C_{w,0}$ 的增加,$Nu_{av,d}$ 不断增大. 这是因为 $C_{w,0}$ 的增加腔内径向出流的平均速度将增大,速度和温度边界层变薄,换热增强. 另一方面,进气流量的增加也将使腔内回流区流体的运动加剧,有利于换热的加强. 单从这一点来看,流量越大对换热越有利,但是冷气流量过大,会使发动机的总体性能减低,因此过大的冷气用量也是不可取的.

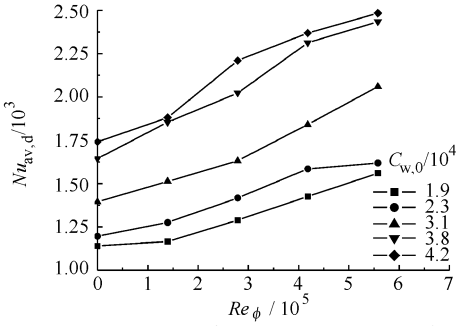


图 2 $C_{w,0}$ 不变,Re_ϕ 对 $Nu_{av,d}$ 的影响

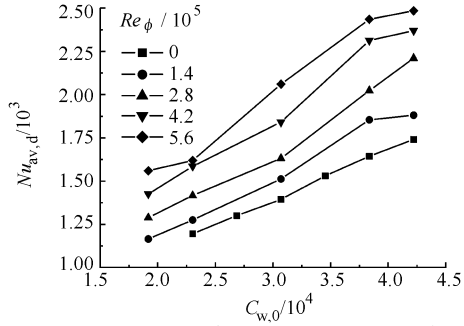


图 3 Re_ϕ 不变,$C_{w,0}$ 对 $Nu_{av,d}$ 的影响

图 4 给出了转盘上孔内壁的 $Nu_{av,b}$ 与 Re_ϕ 之间的变化关系. 随着 Re_ϕ 的增加,孔内壁的 $Nu_{av,b}$ 均呈现不断增加的趋势. 冷气在进入转盘上的出气孔前,其切向速度低于转盘的旋转速度[6],一旦进入转盘的出气孔后,其切向速度与转盘的切向速度一致. 因此进入通孔的气体流速的变化,使气体对通道内部的切向冲击变大,导致了换热系数的增加. 另外,旋转的影响还使通道内的流量增加[7],使流体相对于转盘内出气孔壁面的流速增加,导致了换热系数的增加. 这 2 个因素,最终使孔内的 $Nu_{av,b}$ 增加.

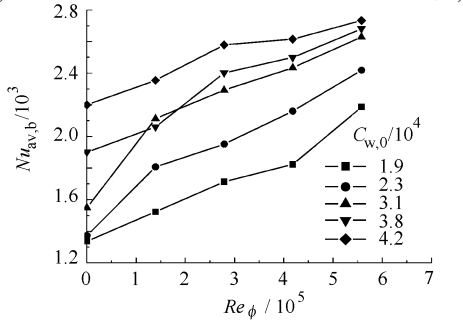


图 4 $C_{w,0}$ 不变,Re_ϕ 对 $Nu_{av,b}$ 的影响

图 5 给出了 $C_{w,0}$ 对 $Nu_{av,b}$ 的影响,在 Re_ϕ 相同的条件下,孔内的 $Nu_{av,b}$ 随着 $C_{w,0}$ 的增加而增加. $C_{w,0}$ 的增加,使进入盘面出气孔的流量增加[7],气体在孔内的流动速度也增加,导致换热系数的增加. 另外,流量的增加,气体在腔入口处的冲击增强,也会使局部换热系数增加.

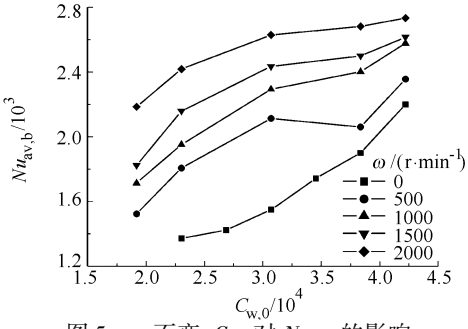


图 5 ω 不变,$C_{w,0}$ 对 $Nu_{av,b}$ 的影响

4 $Nu_{av,d}$ 的经验关系式

根据实验数据进行了公式拟合. 在实验的范围内冷气的温度变化较小,因此可取 Pr 为常数,盘间隙比和出气间隙比不变,对 $Nu_{av,d}$ 进行拟合,可得:

$$\left.\begin{aligned} Nu_{av,d} &= 3.91\ C_{w,0}^{0.572} \\ Re_\phi &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

$$\left.\begin{aligned} Nu_{av,d} &= 0.128\ C_{w,0}^{0.673}\ Re_\phi^{0.206} \\ Re_\phi &\neq 0 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

以上的实验数据点都落在式(8)、式(9)的 ±10% 的范围内.

按照上面的条件,对 $Nu_{av,b}$ 的实验点进行了数据拟合,得到:

$$\left.\begin{aligned} Nu_{av,b} &= 0.3\ C_{w,0}^{0.832} \\ Re_\phi &= 0 \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

$$\left.\begin{aligned} Nu_{av,b} &= 5.01\ C_{w,0}^{0.385}\ Re_\phi^{0.169} \\ Re_\phi &\neq 0 \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

相关的实验数据点都落式(9)、式(10)的 ±12% 的范围内.

尽管实验时的结构和范围不一样,但公式(8)和徐国强[5]总结的没有通孔旋转盘公式在一定程度上有可比性. 本实验 $C_{w,0}$ 的指数为0.673,徐国强公式的进气雷诺数 Re_{in}(Re_{in} 与 $C_{w,0}$ 的关系为 $Re_{in}=\frac{1}{\pi}(R/r_{in})^2 C_{w,0}$)的指数为 0.76,这是因为本实验的冷气在转盘表面发生了分流,一部分气体并不是完全冷却平面后流出,因此 $C_{w,0}$ 对 $Nu_{av,d}$ 的影响小一些. Re_ϕ 的指数本实验为0.268,

徐国强的公式为 0.153,可以看出本实验的 Re_ϕ 对盘面平均努塞尔数的影响要远大于不开出气孔的旋转盘,这主要是本实验的结构决定. 当冷气流量不变时,转盘转速增大,进入盘面出气孔的流量增大,腔内压力将降低,湍流脉动得到加强,从而使转盘表面的对流换热得以加强.

5　结　论

对表面有离散通孔的旋转盘进行换热实验研究,得到了以下结论:

1) 采用测量气体进出口温差的办法来获得盘面和出气孔的总换热量,并确定 $Nu_{av,d}$ 和出气孔内表面的 $Nu_{av,b}$.

2) 进气流量系数 $C_{w,0}$ 和 Re_ϕ 的增加将导致盘面 $Nu_{av,d}$ 和通孔内表面的 $Nu_{av,b}$ 的增加.

3) 分别给出 $Nu_{av,d}$ 和通孔内表面 $Nu_{av,b}$ 的经验关系式. 通过与无通孔的盘面平均努塞尔数的经验关系式做比较,发现在有通孔的情况下,$C_{w,0}$ 对 $Nu_{av,d}$ 的影响降低,Re_ϕ 对 $Nu_{av,d}$ 的影响增加.

参考文献 (References)

[1] Wilson M, Pilbrow R, Owen J M. Flow and heat transferin a preswirl rotor-stator system [J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119:364-373

[2] Pilbrow R, Karabay H, Wilson M, et al. Heat transfer in a "cover-plate" preswirl rotating-disk system[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121:249-256

[3] Karabay H, Wilson M, Owen J M. Approximate solutions for flow and heat transfer in pre-swirl rotating-disc systems[R]. ASME2001-GT-0200, 2001

[4] 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. An investigation on average heat transfer performance for rotating disk with central air inflow[J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 9(1):27-30 (in Chinese)

[5] 徐国强. 转静系下旋转盘腔内冷气的流动与换热特性研究[D]. 北京:北京航空航天大学能源与动力工程学院,1999
Xu Guoqiang. An investigation of flow and heat transfer performance for rotating disk [D]. Beijing: School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999 (in Chinese)

[6] 吉洪湖,Cheah S C,Iacovides H,等. 旋转盘腔流场速度与压力的实验研究[J]. 工程热物理学报,1997,18(3):300-305
Ji Honghu, Cheah S C, Iacovides H, et al. An experimental investigation of velocity and pressure distribution inside a rotating disc cavity[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1997, 18(3):300-305 (in Chinese)

[7] 罗翔. 复杂旋转盘腔内冷气的流动与换热特性研究[D]. 北京:北京航空航天大学能源与工程学院,2003
Luo Xiang. Flow and heat transfer between a stator and a rotor with blade cooling holes[D]. Beijing: School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003 (in Chinese)

(责任编辑:张　嵘)