30°预旋进气旋转盘流动与换热特性的实验

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: 用实验的方法对具有30°预旋进气的旋转盘附近冷气流动与换热特性进行了研究,得到了静盘表面压力、转盘表面温度、局部努赛尔特数的分布及平均努赛尔特数的变化. 结果显示静止盘罩表面的压力随着半径的增加而增加,随转速的增加而增加. 转盘表面的局部努赛尔特数在 $r<0.7R$ 的区域基本不变, $r>0.7R$ 的区域里, 局部努赛尔特数随 r 的增加而增大. 该预旋角情况下,进气雷诺数对盘面平均努赛尔特数的影响大于旋转雷诺数.

关 键 词: 燃气轮机; 涡轮转子; 涡轮静子; 压力分布; 换热系数

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2007)03-0290-04

Flow and heat transfer in rotor-stator system with pre-swirl angle of 30°

Luo Xiang Xu Guoqiang Tao Zhi Ding Shuiting

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

Abstract: An experimental study of the flow and heat transfer characteristics in a pre-swirl rotor-stator system was described. Pre-swirl cooling air through nozzles with angle of 30° in the stator flows radially outwards and leaves system from the clearance between rotor and stator. The distributions of the pressure on the stator surface, temperature, local and averaged Nusselt number on the rotating disk surface were obtained from the tests. The experiments reveal that the pressure on the stator surface increase as the radius and also increase as rotating speed. The local Nu number will keep invariable when $r<0.7R$ (R is effective radius of rotating disk) in the rotating disk surface, but it will increase rapidly as radius when $r>0.7R$. The cooling flow rate have more effects on average Nu number than rotating speed in this pre-swirl angle.

Key words: gas turbines; rotors; stators; pressure distribution; heat transfer coefficients

由于热量从涡轮盘的边缘导入, 实际发动机涡轮盘的冷却使用高位射流的好处之一是有效阻止热量向盘内的纵深传递, 这样既可以使全盘平均温度降低, 又可以使径向温差减小. 而在高位射流的基础上对冷气加以预旋, 可以降低冲击转盘冷气的相对总温, 使冷气的冷却品质相对提高, 并降低冷气对涡轮盘的阻力. 最近几年, 预旋进气是盘腔冷却结构研究的一个热点. Wilson[1]和 Pitbrow[2]等使用热流计, Lock[3]等人使用热色液晶分别研究了预旋进气流动条件下不同盘腔结构的换热特性. Karabay[4]等从理论分析和实验方面研究了旋转腔内的流动结构. 国内的徐国强[5]对高位垂直进气的流动和换热特性进行了实验研究. 本文对预旋角度 Φ(冷气与静盘法线方向的夹角)为 30°的高位预旋进气旋转盘附近冷气流动与换热特性进行了实验研究, 并对结果进行了分析.

1 实验系统简介

本文将用实验的方法对如图 1所示的高位进气转静系旋转盘模型进行研究. 图中的 R_d 为冲击半径, R 为转盘的有效半径, δ 为转盘的厚度, S_1 为转盘与静盘之间的间隙, S_2 为出气间隙.

实验装置如图 2所示. 供气系统的空气进入旋转盘前方的集气腔, 再经半径 $R_d=155$ mm 均匀布置的 30个预旋角为 30°的 Φ6 mm 进气孔冲击

收稿日期: 2006-04-26

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

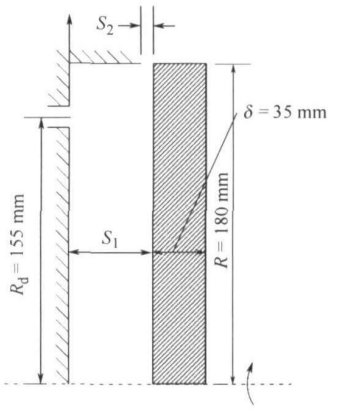

图 1　转静盘结构简图

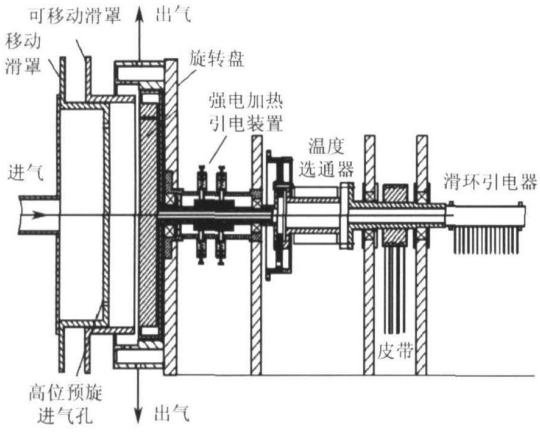

图 2　实验台装置图

旋转盘, 与盘面对流换热, 然后由集气腔收集、排出, 其流量 $\dot{m}$ 由节流孔板测量. 为了能研究旋转盘和静子之间的间隙及出气间隙对流动与换热的影响, 在旋转盘的前方装有 2个独立的滑动环罩, 分别调节环罩可以改变转静间隙 S_1 和出气间隙 S_2, 则盘罩间隙比 $G = S_1/R$ 和出气间隙比 $G_s = S_2/R$ 也随之改变. 驱动装置是一台 11 kW 的交流电机, 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 ω可在 0~ 3600 r/min 内连续变化, 其转速由光电式数字转速表测定.

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传导过程. 在空心主轴的外面套有强电引电装置, 将交流电引到该装置的滑环上, 然后再用导线将滑环和旋转盘边缘的电阻丝连接起来. 实验件是一个由低碳钢加工的厚 35mm, 直径 400 mm 的圆盘. 在盘缘开有内径 360mm, 外径 390mm, 深 29mm 的环形沟槽, 用于埋有加热用的电阻丝和测温用的热电偶, 实验件的有效实验直径为 360mm. 实际涡轮盘是双面冷却, 换热基本上是对称的, 为简化实验, 实验取其一半来研究, 在转盘的背面贴有玻璃棉和石棉板等绝热材料, 然后用盖板将其压紧. 转盘迎风面沿径向布置了 13对 Φ0 2mm 的 NiCr-NiSi热电偶, 在盘缘加热边共布置了 5对热电偶. 所有热电偶从转盘的背面引到空心主轴后再与随主轴一起旋转的温度多路选通放大器连接, 信号经放大后再从滑环引电器过渡到静止的数据采集系统上.

2　实验结果分析

2 1　压力特性

在静止盘罩上沿径向共布置了 9个压力测点. 图 3为预旋角度 30°情况下定流量变转速时的静止盘罩的压力 P 分布. 可以看出, 总的趋势是静止盘罩的 P 在半径 r为 100mm以前变化很小, 但当 r大于 100mm 以后, 随着 r的增大 P 迅速增大. 像中心进气一样[6], 随着 ω 的提高静止盘罩的 P 升高. 但在 r较小的区域, 转速对径向 P 分布的影响较小, 各种 ω时的 P 基本相等, 在 r比较大的区域, ω对 P的分布才有明显的影响. 在预旋角度为 30°的整个实验范围内没有观测到 ω的上升 P 下降现象, 出现了随着 ω的增高盘罩 P 上升的"压力逆增"现象.

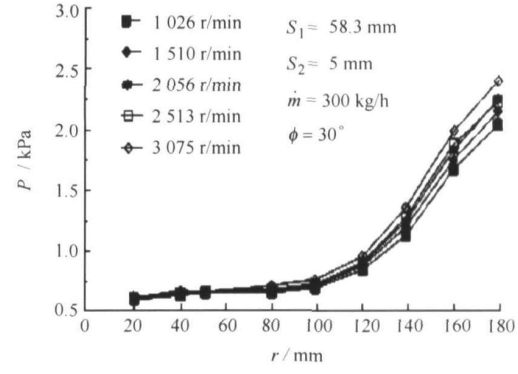

图 3　不同 ω 时静盘 P分布

流量增加时, 静止盘罩表面的静压在预旋 30°时均呈增加趋势, 在相同的结构下, 提高腔内的 P 便于出流. 另外, P 在外缘区域增加的幅度比内部区域增加的幅度大, 如图 4所示.

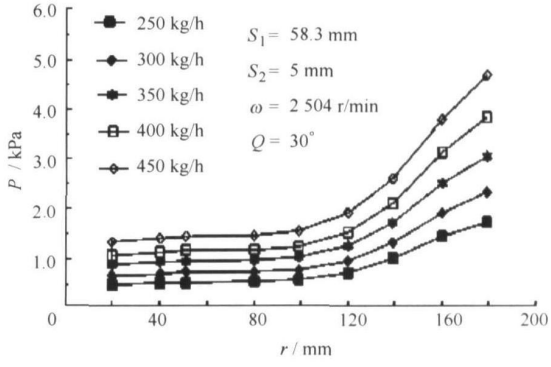

图 4　不同进气流量时静盘 P分布

2.2 换热特性

2.2.1 盘面温度

在图5和图6中给出了转盘表面温度 t 测量的实验结果，图中的 Q 为加热量. 在 $r<0.1$ m 范围内盘面温度变化很小，径向温度梯度接近于0，但在 $r>0.1$ m以后，随着转盘 r 的增加，盘面温度不断提高，径向温度梯度逐渐增大. 与高位垂直进气情况一样，为了给转盘提供第1类边界条件，盘面温度分2段按 $t\left(\frac{r}{R}\right)=a_0+a_1\left(\frac{r}{R}\right)+a_2\left(\frac{r}{R}\right)^2$ 拟合，在2条曲线的交点处满足数值相等和斜率相等，如图5、图6中的实线所示. 从中可以看出，随着 ω 的提高、冷气流量的增大都将使盘面的总体温度降低，但冷气流量的增加对盘面温度的影响比较大.

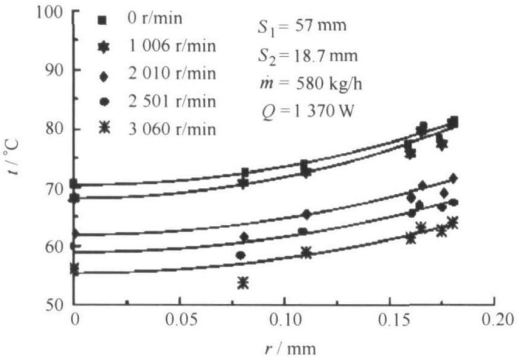

图5 冷气流量不变，t 随 ω 的变化

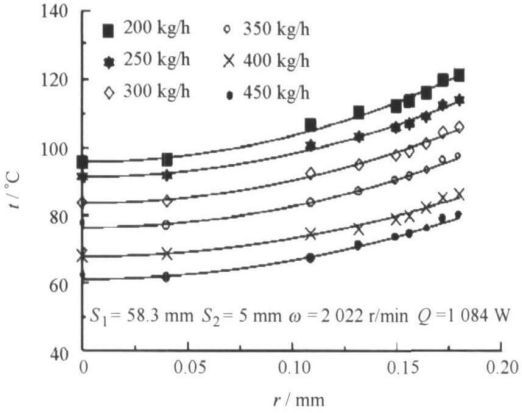

图6 ω 不变，t 随冷气流量的变化

2.2.2 盘面局部努赛尔特数

实验时利用热电偶测出转盘冷却表面和加热边的温度，作为第1类边界条件，转盘的背风面绝热，中心位置为绝热对称，用数值计算的方法求解热传导微分方程得出转盘内的温度分布. 然后再利用傅里叶导热定律，得到表面局部热流，进而得到转盘表面的局部和平均对流换热系数.

图7和图8给出了不同旋转雷诺数 Re_ω ($Re_\omega=\rho\omega R^2/\mu$，$\rho$ 为空气密度，ω 为旋转角速度，μ 为空气的动力粘度)和进气雷诺数 Re ($Re=V_0R/\mu$，V_0 为定性速度，此速度仍按中心进气结构[6]时的进气孔径所计算出的流速作为参考速度)下，转盘表面对流换热的局部努赛尔特数 Nu_r ($Nu_r=\alpha_r R/\lambda$，α_r 为局部换热系数，λ 为空气的导热系数)的分布，这与高位垂直进气[5]换热规律基本相同. 大致可分为2个区域：Nu_r 在 $r<0.7R$ 以内基本不变，在 $r>0.7R$ 以外随 r 的增大迅速增大. 转盘外缘对流换热的 Nu_r 高主要是由于转盘外缘的切线速度大，另一原因是由于采用的是高位进气，进气点在转盘的外缘，冷气对转盘进行强有利的冲击冷却，使转盘这一区域的 Nu_r 增大.

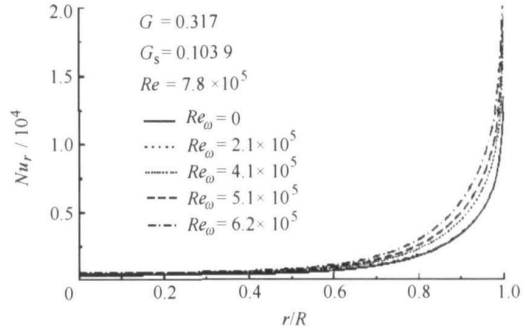

图7 Nu_r 随 Re_ω 的变化

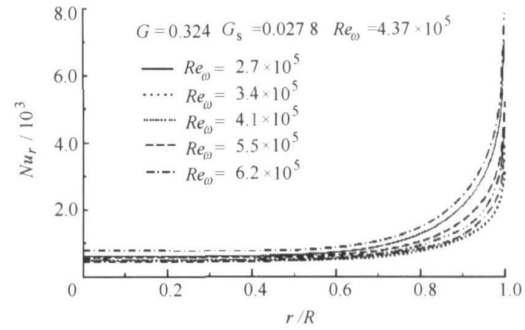

图8 Nu_r 随 Re 的变化

2.2.3 盘面平均努赛尔特数

图9和图10给出了转盘平均努赛尔特数 Nu_{av} ($Nu_{av}=\alpha R/\lambda$，其中 α 为平均对流换热系数)与 Re_ω 之间的变化关系. 从实验结果可以看出，在进气流量比较低和出气间隙比 G_s 较小时转盘旋转对盘面的 Nu_{av} 的影响较小，几乎不变，见图9，进气雷诺数 Re 和 G_s 较大时 Re_ω 才对盘面的换热产生较强的影响，随着 Re_ω 的增加，转盘表面的 Nu_{av} 不断增加，见图10.

图11为 Re 对盘面 Nu_{av} 的影响，在本实验研究范围内，当其他条件不变时，随着 Re 的增加，转盘 Nu_{av} 不断增大，冷气对转盘的冲击冷却作用加强.

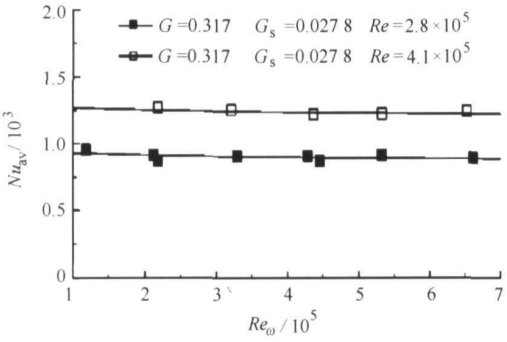

图 9　Re_ω 对 Nu_{av}的影响 (G_s = 0. 0278)

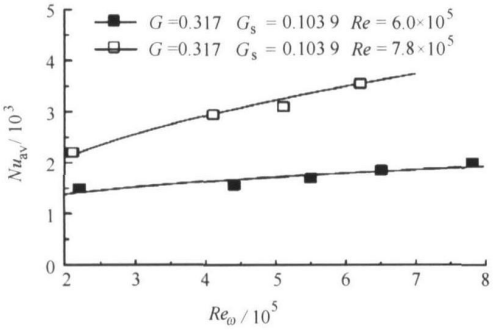

图 10　Re_ω 对 Nu_{av}的影响 (G_s = 0. 1039)

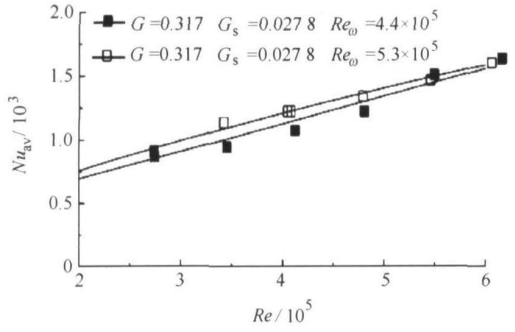

图 11　Re对 Nu_{av}的影响

3　结　论

1) 静止盘罩表面的静压随着半径的增加而增加. 在低半径处压力几乎不变, 而在高半径处随着半径的增加, 压力迅速增大. 预旋角为 30°时, 静压随着转速的增加而增加;

2) 转盘表面的局部努赛尔特数在 $r < 0.7R$ 的区域基本不变, $r > 0.7R$ 的区域里, 局部努赛尔特数随半径的增加而迅速增大;

3) 冷气流量和出气间隙较大时, 随着旋转雷诺数的增加, 转盘表面的平均努赛尔特数不断增加. 其余情况下, 旋转雷诺数对平均努赛尔特数影响不大. 预旋角 30°情况下, 进气雷诺数对盘面平均努赛尔特数的影响大于旋转雷诺数.

参考文献 (**References**)

[1] Wilson M, Pilbrow R, Owen J M. Flow and heat transfer in 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] Lock G D, Wilson M, Owen J M. Influence of fluid dynamics on heat transfer in a pre-swirl rotating-disc system [R]. ASME 2004-GT-53158, 2004

[4] Karabay H, Chen J X, Pilbrow R, et al. Flow in a "cover-plate" preswirl rotor-stator system [J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121: 160- 166

[5] 徐国强, 陶智, 丁水汀, 等. 高位垂直进气旋转盘流动与换热的实验研究[J]. 航空动力学报, 2000, 15(2): 164- 168
Xu Guoqiang, Tao Zhi, Ding Shuiting, et al. Experimental investigation on flow and heat transfer in shrouded rotating disk with high-positioned air flow [J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2): 164- 168(in Chinese)

[6] 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)

(责任编辑: 张　嵘)