

文章编号: 1000-8055(2007)05-0709-05

中心出气对高位进气旋转盘流动与换热的影响

罗翔¹, 徐国强¹, 蔡毅², 陶智¹, 耿汀¹

(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重点实验室, 北京 100083;
2. 西安航空发动机(集团)有限公司, 西安 710021)

摘 要: 用实验的方法对三种预旋角度(0° 、 15° 、 30°) 高位进气中心出气的转静系旋转盘附近冷气流动与换热特性进行了研究, 中心出气量最大为总流量的 10%。实验结果显示: 由于中心出气量占总出气量较小时, 对转盘表面的平均努赛尔特数影响不大, 可以忽略中心出气对换热的影响。中心出气量的增加将导致静盘中心附近压力下降得较快, 而转盘转速在不同进气方式情况下对腔内静压的影响各不同。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 燃气轮机; 涡轮转子; 涡轮静子; 换热系数; 压力分布

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Influence of central outflow on flow and heat transfer in a pre-swirl rotor-stator system

LUO Xiang¹, XU Guoqiang¹, CAI Yi², TAO Zhi¹, DING Shuiting¹

(1. National Key Laboratory on Aeroengines, School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
2. Xi'an Aeroengine (group) LTD, Xi'an 710021, China)

Abstract: The flow and heat transfer characteristics of a pre-swirl rotor-stator system with three pre-swirl angles(0° , 15° and 30°) was analyzed experimentally. The maximum outflow rate from central hole was 10% of total outflow. The experimental results show that, when the central outflow rate is much less than total outflow, it has small effects on average Nu number of rotor surface, without considering the effects of central outflow on heat transfer. An increase of central outflow rate results in quick drop of static pressure near the center of stator. The rotating speed of rotor has different influence on static pressure of stator surface at different pre-swirl nozzles.

Key words: aerospace propulsion system; gas turbines; rotors; stators; heat transfer; pressure distribution

在实际发动机中从静子高位进入腔体的冷气绝大部分经榫槽进入涡轮叶片, 对叶片进行冷却。同时有一部分冷气经转子和静子间的密封装置泄露到其他“腔体”中去。虽然这些泄露的冷气的量不是很大, 但在一定程度上影响了腔内的流动结构, 致使冷气与盘面的换热特性发生相应变化^[1-4]。为了探讨这部分冷气对腔内流动与换热特性的影响, 本文用实验的方法对具有中心部分出

气的高位进气结构的流动与换热进行了研究。高位进气的预旋角度 ϕ (冷气射流与垂直于静盘方向的夹角) 分别为 0° 、 15° 和 30° 。最大中心出气量约占总进气量的 10%。

1 试验装置

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, R_1 为出气孔半径, 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。

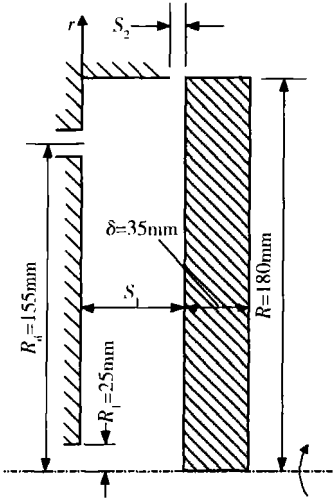


图 1 转静盘结构简图

Fig. 1 Schematic of the rotor-stator system

实验装置如图 2 所示. 供气系统的空气进入旋转盘前方的布气腔, 再经高半径处 $R_d = 155$ mm 均匀布置的 30 个直径为 6 mm 的进气孔(其预旋角度分别为 0° , 15° , 30°) 改变方向后冲击旋转盘, 一部分与盘面换热, 然后由集气腔收集、排出, 一部分由中心出气管流出. 在集气腔后安装总出气阀门, 在中心出气管后安装中心出气

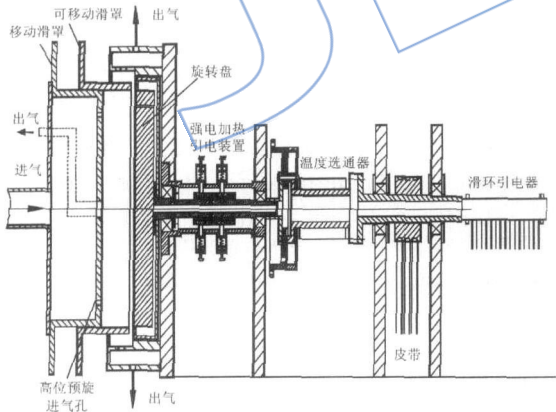


图 2 实验台装置图

Fig. 2 Experimental rig

阀门, 分别来调节这两处出气流量, 流量大小由节流孔板测量. 在旋转盘的前方装有两个独立的滑动环罩, 可以改变转盘与静盘间的间隙 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, 主轴的转速可在 0~ 3 600 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 35 mm 直径 400 mm 的圆盘. 在盘缘开有内径 360 mm 外径 390 mm 深 29 mm 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 360 mm. 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 对直径为 0.2 mm 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.

实验时最大转速为 3 000 r/min, 最大流量为 700 kg/h.

2 试验结果及分析

2.1 盘面温度分布

在图 3 到图 5 中给出了不同进气预旋角度情况下中心出气量对转盘表面温度影响的实验结果, 实验时不同预旋角下对盘面的加热量都相同. 与无中心出气情况相比, 中心出气量对转盘表面温度分布形式没有明显的影响. 在各种条件下, 中心出气量的增加, 盘面温度略有下降, 说明中心出气对盘面的换热有一定的强化作用. 图中的实线为拟合曲线, 按照 $t(r) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2$ 拟合, 在

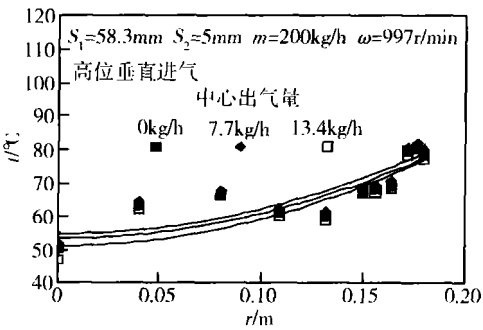


图 3 中心出气量对盘面温度分布的影响

Fig. 3 Local temperature vs. radius with different central outflow

垂直进气和预旋 15° 进气结构与实验数据有一定的偏差,但是通过分析和计算,这对于盘面的平均换热系数影响很小.因为无论按何种方式拟合,拟合后的盘面平均温度非常接近,在转盘加热量一定的情况下,根据牛顿冷却公式 $Q = \alpha A (t_w - t_f)$ 可知盘面的对流换热系数差别不大.

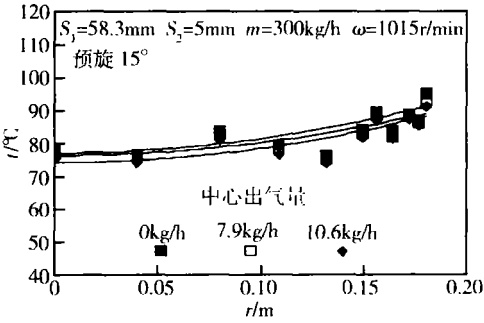


图 4 中心出气量对盘面温度分布的影响
Fig. 4 Local temperature vs. radius with different central outflow

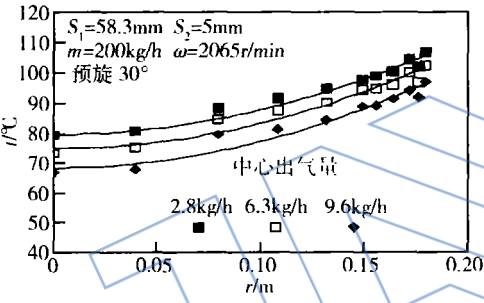


图 5 中心出气量对盘面温度分布的影响
Fig. 5 Local temperature vs. radius with different central outflow

2.2 中心出气量对转盘冷却表面平均努赛尔特的影响

实验时利用热电偶测出转盘冷却表面和加热边的温度,作为第一类边界条件,转盘的背风面绝热,中心位置为绝热对称,这样可以利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.然后再利用傅立叶导热定律,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 6 到图 8 为各种进气方式、旋转雷诺数 $Re_\omega (Re_\omega = \rho v R^2 / \mu, \rho$ 为空气密度, ω 为旋转角速度, μ 为空气的动力粘度)、进气雷诺数 $Re (Re = V_0 R / \mu, V_0$ 为定性速度) 情况下,中心出气率 $\eta\%$ (中心出气率定义为:中心出气量与进气量的百分比) 对盘面平均努赛尔数 $Nu_{av} (Nu_{av} = \alpha R / \lambda$ 其

中 α 为平均对流换热系数, λ 为空气的导热系数) 影响的实验结果.本实验的中心出气率小于 10%,从实验结果中可以看出,在本实验研究的中心出气率范围内,对高位垂直进气,中心出气使盘面平均努赛尔特的增加小于 15%.对于预旋 30° 进气,在其实验范围内,努赛尔特的增加小于 10%.对于预旋 15° 的情况,中心出气率几乎对盘面平均努赛尔数没有什么影响.

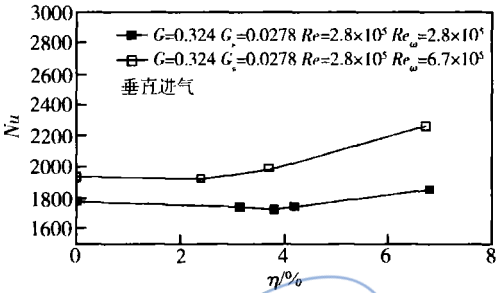


图 6 中心出气率对盘面平均努赛尔特的影响
Fig. 6 Average Nu vs. central outflow ratio

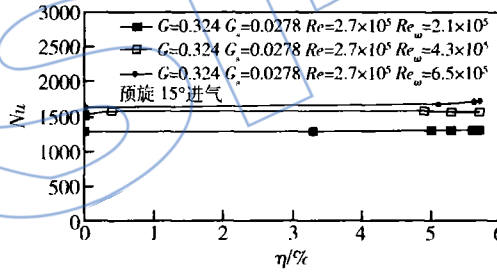


图 7 中心出气率对盘面平均努赛尔特的影响
Fig. 7 Average Nu vs. central outflow ratio

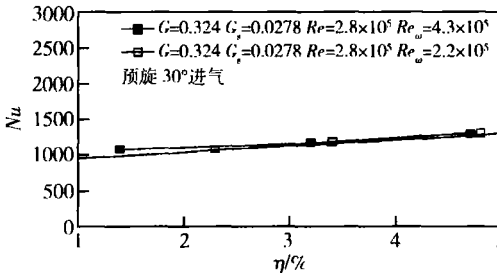


图 8 中心出气率对盘面平均努赛尔特的影响
Fig. 8 Average Nu vs. central outflow ratio

实验结果显示,中心出气使盘面平均努赛尔数略有增加,但增幅不大.无论是高位垂直进气还是预旋进气,热量自转盘外缘向内传递的过程中,由于转盘外缘冲击作用换热比较强烈,大部分热量从转盘的外半径处散出,向盘内部传递的热量相对较少,盘面低半径处温度较低.在中心不出气时,冲击区以下的气体与盘面的换热较差,从这

部分盘面散出的热量不多;从中心少量出气时,腔内的流场不会产生太大的影响,因此中心出气对盘面的换热不会产生太大的影响。

结果显示中心出气率对盘面平均努赛尔特数的影响不超过 15%, 因此在实际发动机的设计中可以不必考虑中心出气对涡轮盘盘面换热的影响,这样做不会对盘内温度场的计算带来很大误差,而且对设计来说是偏于安全的。

2.3 中心出气对腔内压力的影响

图 9 到图 13 为高位垂直进气、预旋角度 15° 和 30° 进气在各种流量、转速情况下中心出气对静盘表面压力分布的影响。虽然中心出气量对转

盘表面的换热影响不大,但对腔内的压力影响却比较大。

对于垂直进气和高位预旋 15° 进气时,中心出气量的调节是将主出气阀门的开度调的比较小,使腔内的压力维持比较高的水平,然后调节中心出气阀门的开度以实现不同的中心出气量要求。从这些图中可以看出,在这种情况下,随着中心出气量的增加静盘表面压力是逐渐降低。在中心出气量为零时,静盘的压力在径向上的分布比较平缓;但随着中心出气量的增加,静盘压力总体下降,静盘中心区域的压力下降的尤其显著。这种趋势对预旋 15° 的情况特别明显。

对于预旋 30° 的情况,静盘表面压力随中心出气量的增加而增加,这与上面的两种情况完全不同。主要原因是中心出气量的调节是保持中心出气阀门的开度不变而改变总出气阀门的开度,因此为了维持一定的中心出气量必须提高腔内的压力,这就造成了静盘表面压力随中心出气量的增加而提高的现象。不管静盘总体压力水平的高低,随着中心出气量的增加静盘中心区域的压力与转盘其他部位的压力相比是逐渐减小的,其他部位的压力沿径向分布无太大的变化。

在总出气阀门和中心出气阀门的开度均保持不变时,转盘转速的提高对腔内压力分布并没有明显的规律。如图 12 所示,对于高位垂直进气情况,在转速为 1 029 r/min 时压力比较低,而在 2 028 r/min 时压力又比较高,以后随着转速的增

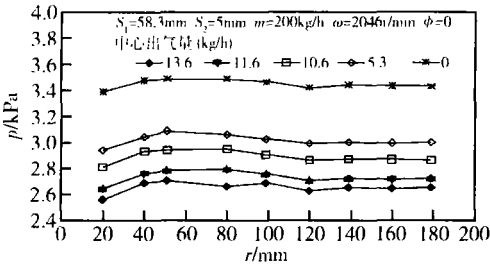


图 9 中心出气量对静子表面压力分布的影响
Fig. 9 Static pressure distribution with different central outflow

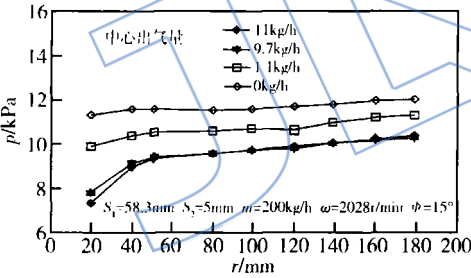


图 10 中心出气量对静子表面压力分布的影响
Fig. 10 Static pressure distribution with different central outflow

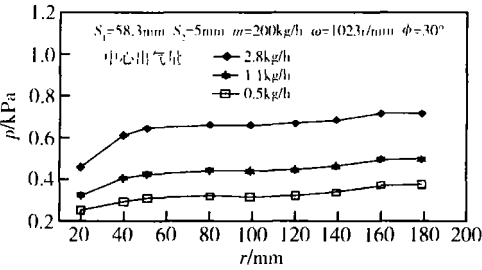


图 11 中心出气量对静子表面压力分布的影响
Fig. 11 Static pressure distribution with different central outflow

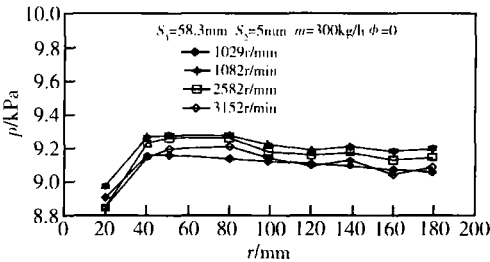


图 12 有中心出气时静子表面压力与转速的变化关系
Fig. 12 Static pressure distribution with different central outflow

高腔内压力分布总体降低,从此时的中心出气量来看,出气量也没有明显的规律性,有可能是进气压力的变动引起的。对于预旋 30° 的情况,见图 13,转速的提高导致静止盘罩表面的压力分布水平随之不断提高,这同 Owen 等发现的“压力逆增”的情形一样,中心区域的压力同样也比其他区域小。对于预旋 15° 时,转速的提高却导致静盘表

面的压力逐渐降低, 没有出现“压力递增”现象^[5], 如图 14 所示, 这是因为旋转雷诺数的增加导致了气体出流能力的增加, 致使腔内压力降低.

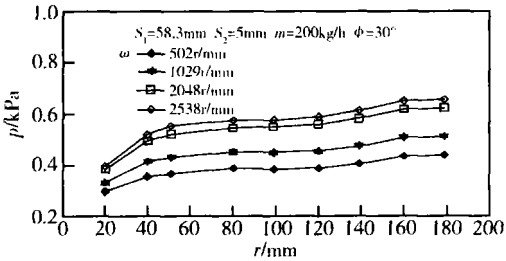


图 13 有中心出气时静子表面压力与转速的变化关系
Fig. 13 Static pressure distribution with different central outflow

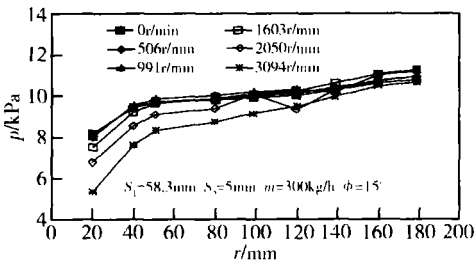


图 14 有中心出气时静子表面压力与转速的变化关系
Fig. 14 Static pressure distribution with different central outflow

3 结 论

针对高位进气旋转盘腔中心出气结构, 分别

对预旋角度为 0°, 15° 和 30° 进气方式进行换热和流动实验. 在本实验范围内, 得到以下结论:

- (1) 中心出气量的增加, 盘面温度略有下降, 中心出气对盘面的换热有一定的强化作用.
- (2) 由于中心出气量比较少, 对转盘表面的平均努赛尔特数影响不大, 在实际应用中可以忽略中心出气对换热的影响.
- (3) 中心出气量的增加将导致静盘中心附近压力下降得较快. 转盘转速在不同进气方式情况下对腔内静压的影响各不同, 预旋 30° 时, 转速的提高导致静盘表面的压力增大, 而预旋 15° 时, 转速的提高却导致静盘表面压力降低.

参考文献:

[1] Phadke U P, Owen J M. An investigation of ingress for an “ air-cooled ” shrouded rotating disk system with radiat clearance seals[R]. ASME Paper 82 GT-145, 1982.

[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. Influence of fluid dynamics on heat transfer in a preswirl rotating disc system[R]. ASME Paper 2004 GT-53158.

[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] Owen J M, Rogers R H. Flow and heat transfer in rotating disc systems, vol. 1: rotor stator systems[M]. New York: Research Studies Press, 1989.