

中心进气和高位垂直进气转静系旋转盘 冷却品质比较*

徐国强, 詹治国, 丁水汀, 陶智, 罗翔

(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘要: 基于实验结果, 对中心进气和高位垂直进气转静系旋转盘的冷却品质进行了较为系统的比较, 结果发现: 虽然两者的盘面平均努赛尔特数和无量纲过余体平均温度相差很小, 但是从减小径向温差角度看, 高位垂直进气具有明显的优势, 证明了以前提出的涡轮盘冷却指标应包含径向温差的合理性。

关键词: 涡轮盘; 冷却; 效率

中图分类号: V235

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055(2000)05-0042-03

Comparison of cooling effectiveness between central and high-positioned air inlet rotor-stator disk systems

XU Guo-qiang, ZHAN Zhi-guo, DING Shui-ting, TAO Zhi, LUO Xiang

(Dept. of Jet Propulsion, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Cooling effectiveness was compared, based upon experimental data, between central (CP) and high-positioned (HP) air inlet rotating disk systems. It was found that the high-positioned mode is better in reducing the disk radial temperature difference, though the differences of averaged Nusselt number and the averaged excessive body temperature are quite small between the two cases. It was concluded that the radial temperature difference should be included in determining cooling effectiveness.

Key words: Turbine disk; Cooling; Efficiency

1 引言

国内外已经对涡轮盘的流动与换热进行了很多研究^[1~6], 其成果都集中在涡轮盘、腔内的流动与换热上, 得到了转盘表面的换热系数等, 这对发动机涡轮盘的设计是极其重要的。为了全面衡量冷却结构的优劣, 作者对涡轮盘冷却应包含的指标作了较为全面的描述^[7,8], 指出对涡轮盘冷却不应仅仅考虑盘面的对流换热努赛尔特数, 而且也应考虑反映转盘持久强度指标, 即转盘总体温度和反映转盘热应力大小的转盘径向温差, 并给出了相应的准则定义式。本文将用实验数据对中心进气 (CP) 和高位垂直进气 (HP) 转静系涡轮盘冷却的这些指标进行比较。

2 结果及讨论

实验是在北京航空航天大学多功能旋转换热实验台上进行的, 实验模型如图 1 所示。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, 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, 进而得到转盘表面的热流密度和平均对流换热系数。衡量涡轮盘冷却好坏的两个指标为: 盘内总体温度水平和盘内的温差^[8], 分别用转盘的无量纲过余体平均温度 θ_{av} 和无量纲径向温差 $\Delta\theta$ 度量, 其定义为

$$\theta_{av} = \frac{t_{av} - t_0}{q_r R / \lambda_p}, \quad \Delta\theta = \frac{t_2 - t_1}{q_r R / \lambda_p}$$

其中 $t_{av} = \frac{1}{\pi R^2 \delta} \int_0^\delta \int_0^R 2\pi r t dr dz$; $t_1 = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta t dz$ 在 $r = 0$

* 收稿日期: 1999-08-26; 修订日期: 1999-12-23。基金项目: 国家重点实验室基金资助项目 (96JS48.2.4.2ZS480)。

作者简介: 徐国强 (1964—), 男, 博士, 副教授, 主要研究领域为工程热物理。

处, $t_2 = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta t dz$ 在 $r = R$ 处; t_0 为冷气进口温度。

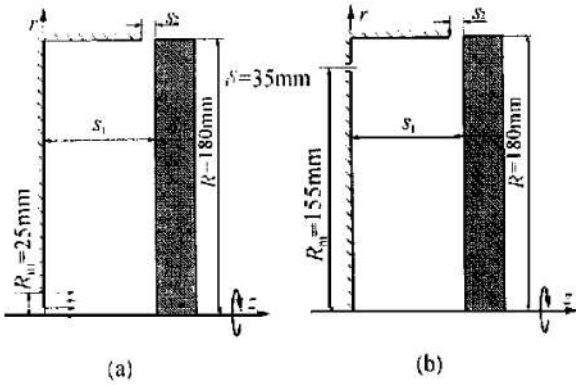


Fig. 1 Two experimental models

(a) Central air inlet (b) High positioned air inlet

2.1 盘面温度

为消除进气温度对盘面总体温度分布的影响, 对 CP 和 HP 比较时, 采用盘面各点温度分别减去冷气进口温度之差, 即盘面过余温度 Δt 。图 2 为 CP 和 HP 的 Δt 比较结果, 标记为实验点, 实线为拟合曲线。

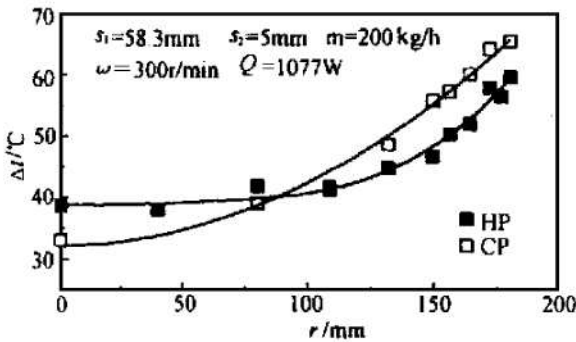


Fig. 2 Excessive temperature of disk surface

可以看出, 在相同冷气流量 m , 转速 ω , 加热量 Q , 盘罩间隙 S_1 和出气间隙 S_2 的情况下, 中心进气的径向温差及径向温度梯度的变化比高位垂直进气时大的多。中心进气过余温度最高值要高于高

位垂直进气之值, 过余温度最低值则低于高位垂直进气的最低值, 但盘面平均温度两者相差不大。高位垂直进气时在转盘中心区域过余温度沿径向梯度变化比较小, 在转盘外缘, 其径向温度梯度与中心进气情况差不多。因此, 无论是从减小热应力角度还是从降低转盘总体平均温度以提高高温持久强度角度考虑, 高位垂直进气要好于中心进气。

2.2 平均努赛尔特数

虽然冷却结构发生了重大变化, 使得盘面温度分布也发生很大的改变, 但是从图 2 直观地看出两者盘面平均温度却变化不大。根据牛顿冷却公式可知, 在相同加热量时, 两者平均努赛尔特数 Nu_{av} ($\alpha_{av} R / \lambda$) 也不会有太大的差别。图 3 (a) 为在相同流量系数 C_w ($m/3600 \text{ HR}$)、盘罩间隙比 G (S_1/R) 和出气间隙比 G_s (S_2/R) 的情况下, 盘面平均努赛尔特数随旋转雷诺数 Re_ω ($\rho \omega R^2 / \mu$) 变化的比较。总的来说, 旋转雷诺数对盘面的平均努赛尔特数影响比较小, 中心进气时转盘的平均努赛尔特数略小于高位垂直进气时的值。图 3 (b) 为流量系数对两者平均努赛尔特数的影响结果。流量系数的增加, 两者平均努赛尔特数都不断增大。高位垂直进气平均努赛尔特数的值略高于中心进气的值。

2.3 无量纲过余体平均温度

图 4 (a) 为在相同的流量系数、盘罩间隙比和出气间隙比的情况下, 转盘无量纲过余体平均温度随旋转雷诺数的变化比较结果。随着旋转雷诺数的提高, 两者的无量纲过余体平均温度均呈下降趋势, 中心进气的无量纲过余体平均温度水平要高于高位垂直进气的水平。图 4 (b) 给出了流量系数对两种进气方式时转盘无量纲过余体平均温度的影响。

从减小转盘的体平均温度角度来考虑, 高位垂直进气要略好于中心进气, 但效果不是特别明显。

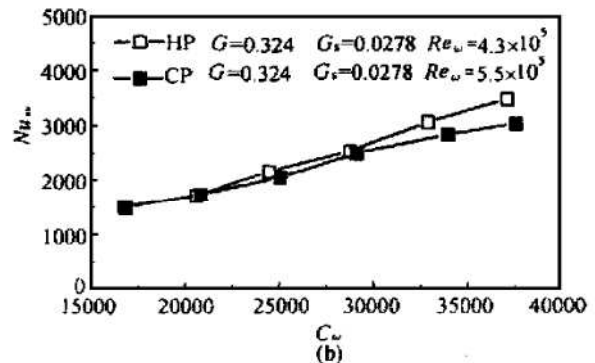
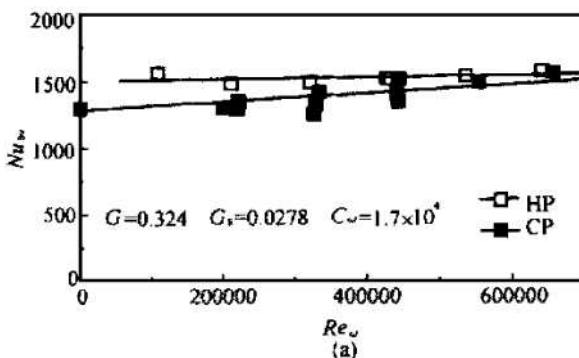


Fig. 3 Averaged Nusselt number of disk surface

2.4 无量纲径向温差

图5给出了旋转雷诺数 Re_ω 及流量系数 C_w 对转盘无量纲径向温差 $\Delta\theta$ 的影响。两者的 $\Delta\theta$ 随 Re_ω 和 C_w 的增大而略微下降, 但高位垂直进气的 $\Delta\theta$ 却远低于中心进气的数值。虽然平均努赛尔特数和无量纲过余体平均温度两者相差不大, 若仅从这两点来看高位垂直进气并没有得到太多的好处, 但是

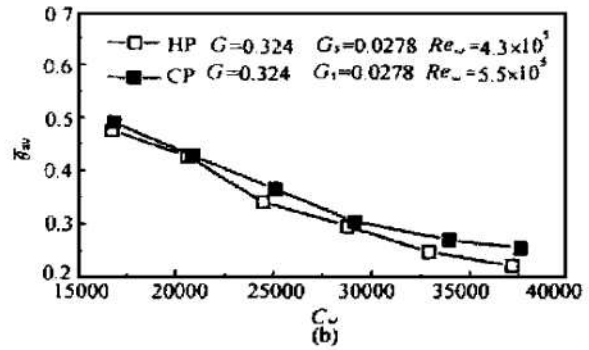
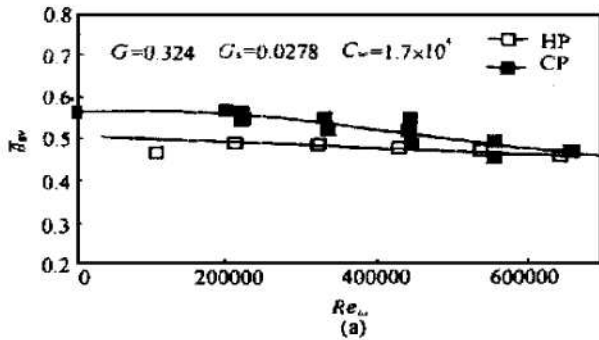


Fig. 4 Disk dimensionless excessive body-averaged temperature

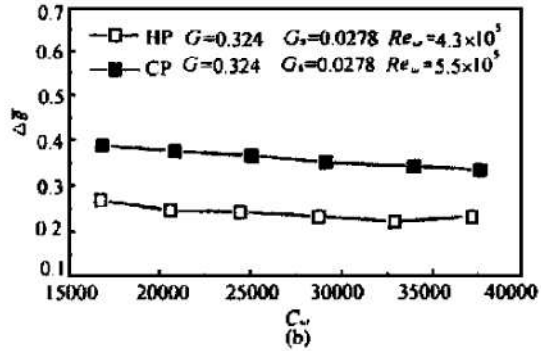
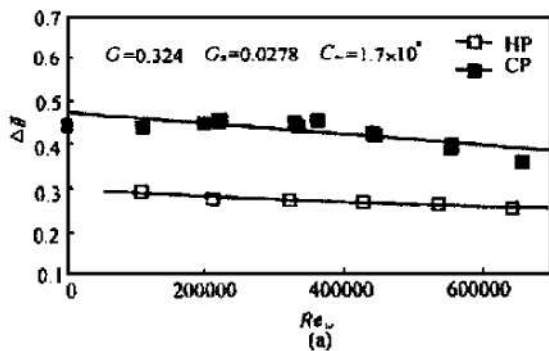


Fig. 5 Disk dimensionless radial temperature difference

3 结论

(1) 在相同的冷气流量、转速、加热量、盘罩间隙和出气间隙的情况下, 中心进气的径向温差及沿径向的梯度变化比高位垂直进气要大的多。

(2) 高位垂直进气时盘面平均努赛尔特数略高于中心进气时数值, 但差别不大。

(3) 从减小转盘的体平均温度考虑, 高位垂直进气要略好于中心进气, 但效果不明显。从减小转盘径向温差考虑, 高位垂直进气优势明显。

(4) 为了全面衡量转盘冷却效果, 单靠转盘表面的对流换热系数是不够的, 转盘的总体温度和径向温差也是两个非常重要的指标。

参考文献

[1] Owen J M. Air-cooled gas turbine disk: a review of recent research [J]. Int J Heat and Fluid Flow, 1988, 19 (4) .

减小转盘径向温差角度看, 高位垂直进气却显示出其具有明显的优势, 这对达到发动机热部件冷却的两个指标之一即减小热部件的热应力是非常有好处的。因此, 衡量涡轮盘冷却的好坏, 不应只看盘面对流换热的努赛尔特数, 这也证明了以前提出的涡轮盘冷却指标应包含径向温差的合理性。

[2] Dibelius G H, Heinen M. Heat transfer from a rotating disc [R]. 90-GT-219.

[3] Wilson M, Pilbrow R, Owen J M. Flow and heat transfer in a preswirl rotor-stator system [J]. J of Turbomachinery, 1997, 119: 364~ 373.

[4] 徐国强, 丁水汀, 陶智, 等. 高位垂直进气转静系旋转盘流动与换热的数值计算 [J]. 推进技术, 2000, 21 (4) .

[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) .

[6] 丁水汀, 徐国强, 陶智, 等. 外缘预旋进气的旋转空腔主盘局部换热及流阻特性研究 [J]. 推进技术, 1998, 19 (6) .

[7] 丁水汀, 陶智, 徐国强, 等. 旋转盘腔冷却问题的工程评价 [J]. 航空动力学报, 1999, 14 (1) .

[8] 徐国强. 转静系旋转盘腔内冷气的流动与换热特性的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.

(责任编辑: 龚士杰)