

文章编号: 1000-8055(2000) 03-0282-04

转速非稳态变化对中心进气旋转盘平均换热的影响

罗 翔 王建宁 徐国强

(北京航空航天大学 402 教研室, 北京 100083)

摘要: 实际的中心进气涡轮盘被简化成中心进气外缘加热的旋转盘模型, 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, 主要是转速变化对盘面温度和盘面的平均努赛尔特数的影响。转盘的有效半径为 200 mm, 最大转速为 3000 r/min, 加热功率为 1000 W。实验结果表明: 盘缘区域温度随时间的变化率大于中心区域温度随时间的变化率; 转速增加使盘面平均努赛尔特数增大; 在给定时间内转速增至最大后使系统稳定还是分段使系统稳定后再增加转速, 对盘面平均努赛尔特数的影响不是特别明显。

关键词: 转速; 盘; 换热; 流动

中图分类号: V 232.3

文献标识码: A

1 前 言

发动机在飞机起飞、加速、减速、降落及停车等非定常情况下工作时, 气流参数和热部件的温度随时间发生较大的变化, 导致有比定常情况下更为复杂的流动与换热。对涡轮旋转盘的定常流动与换热问题国内外已进行了大量的研究, 并取得了较大的成果^[1~3]。但对非定常情况下流动与换热属该领域的前缘研究课题, 国内尚未开始, 也未见到国外有关这方面的研究报导。

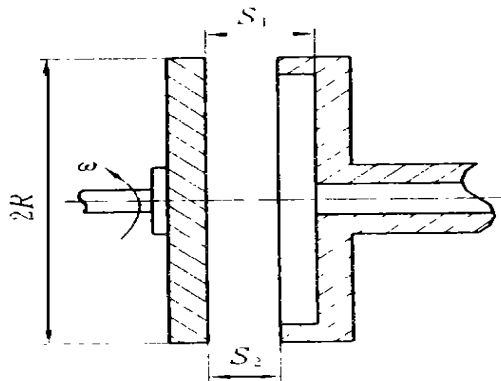


图 1 实验模型

本文主要目的是研究如图 1 所示模型的典型涡轮旋转盘附近冷气在非定常情况下的流动与换热特性。探索非定常情况下涡轮旋转盘附近气体的流动与换热规律。

2 实验装置和测量设备

压缩空气由管道输送至实验段前段的稳压箱内进行稳压, 由中心进入腔体, 入口大小为 $\Phi 50$ mm, 然后轴向冲击旋转盘面后径向流出。用压力传感器分别测量出空气流经节流孔板前的压力和孔板前后压差, 用热电偶测量空气流经孔板时的温度, 这些数据由采集系统采集, 并由计算机计算出空气的质量流量, 用于流量的控制和调节。驱动装置是一台 18 kW 的交流电机, 其转速由变频器进行调节和控制。实验时, 主轴的转速可在 0~3000 r/min 内连续变化, 大小由红外数字转速仪测定。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量。在空心轴的外面套有强电引电装置, 将交流电引到旋转盘边缘的电阻丝上。在旋转盘的背面边缘处开有内径 $\Phi 400$ mm 外径 $\Phi 420$ mm 深 26 mm 的环形沟槽, 加热用的电阻丝和测温用的热电偶就埋在这里。电阻丝外

套有瓷管以防短路, 并将其均匀密绕在环形沟槽内。为防止电阻丝脱落和进行绝热, 用耐火水泥将整个沟槽填满。如图 2 所示。实际涡轮盘是双面冷却, 换热基本上是对称的, 中间截面基本相当于绝热, 为简化实验, 本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。实验件是一个由低碳钢加工的厚 30 mm 直径 $\Phi 440$ mm 的圆盘。由于有环形沟槽, 实验件的有效实验直径为 $2R = \Phi 400$ mm。在转盘冷却边不同半径处垂直于旋转盘表面开有 26 个贯穿的阶梯孔, 靠近冷却边处孔的直径为 $\Phi 1.5$ mm, 另一边为 $\Phi 2$ mm, 用于布置热电偶, 其与盘心距离分别为 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 mm。所用热电偶的数目是由测量系统的最大可测容量决定的。为了保持转盘的动平衡, 这些开孔分别开设在两条垂直线上。在加热边共布置了 6 对热电偶, 距冷却边的距离分别为 2, 5.5, 12, 16, 20.5, 26 mm。测温热电偶从盘背面经小孔引到转盘冷却边, 将引线埋在小槽内, 热电偶测点焊接在转盘表面的金属上, 然后用环氧树脂将小槽抹平, 以免引起流场的变化。

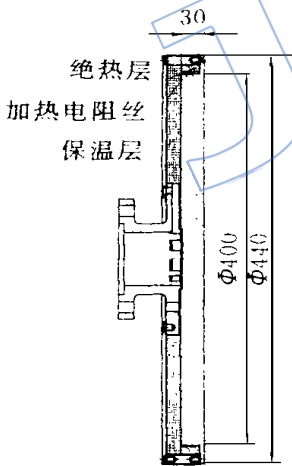


图 2 转盘组件图

本实验主要研究中心进气情况下转静系旋转盘的非稳态流动与换热特性。要求改变的因素是转盘的转速。盘罩间隙和出气间隙固定不变, 分别为: $S_1 = 58.3$ mm, $S_2 = 3.2$ mm, 功率为 1000 W 固定不变。

所有测试信号均由计算机控制的数据采集系统来获取。数据采集系统中除在硬件上采取一定的滤波电路外, 在软件上还采取了数字滤波技术

和对整个系统进行标定, 并建立了各种传感器的输入输出数学模型来减少中间环节造成的误差。控制软件有 VB 语言编制, 可以在实验中直接观察到各个测点随时间的变化, 实验件上的参数分布, 便于直接掌握实验情况和发现问题。

本实验研究是利用热电偶测出转盘加热边和冷却边的温度, 并分别拟合成温度与轴向坐标和温度与径向坐标的关系式, 作为加热边和冷却边的边界条件。转盘中心为对称边界条件, 背面为绝热边界条件。实验时, 当转盘在某一个条件下达到稳定后, 记录所有的温度数据, 作为转盘的初始温度。在每一个时间步长, 用数值计算的方法求出盘内的温度分布和盘表面的热流密度, 进而求得冷却表面对流换热的局部和平均努赛尔特数。由于转盘的温度变化范围不是很大, 计算时取转盘材料的导热系数为定值, $\lambda = 47$ W/(m · °C)。平均努赛尔特数 Nu_w 的定义为: $Nu_w = \alpha_w R / \lambda$ 。其中 $\alpha_w = Q_{conv} / [A(t_w - t_0)]$, Q_{conv} 为从转盘冷却表面散出的总热量, t_0 为冷气入口温度, t_w 为壁面平均温度, 其平均方法为按面积加权平均。

3 实验结果和分析

第一种工况, 流量分别固定在 200 kg/h, 300 kg/h, 400 kg/h 的情况下, 转盘不转, 实验系统达到热平衡后, 转速在 5 分钟内由 0 r/min 线性增至 3000 r/min, 在 3000 r/min 时达到热平衡, 然后再由 3000 r/min 在 5 分钟内线性降至 0 r/min。其典型温度分布如图 3 所示, 图中 1 域为加热区,

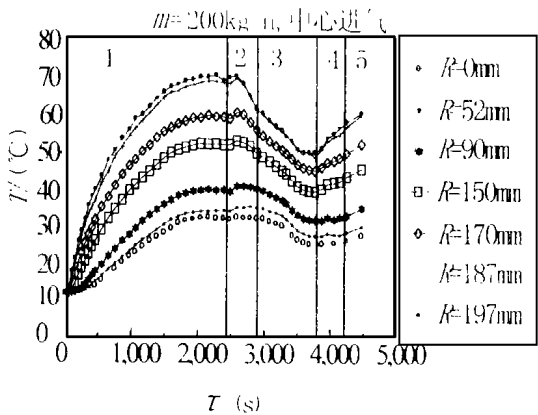


图 3 盘面温度随时间的分布

转速为 0, 2 域的转速在 5 分钟内由 0 r/min 增加到 3000 r/min, 3 域的转数为 3000 r/min, 4 域的转数在 5 分钟内由 3000 r/min 到 0 r/min, 5 域的转数为 0 r/min。由于本实验为边缘加热, 所以边

缘温度明显高于中心温度。当转盘转速由 0 r/min 在 5 分钟内升到 3000 r/min 的过程中, 盘边缘的切向速度越来越大, 导致边缘对流换热加强, 温度开始逐渐降低。而盘中心的切向速度变化不大, 换热强化程度不大, 因此该处的温度几乎没有变化。当转速达到 3000 r/min 时, 系统并没有达到热平衡, 温度继续降低。半径愈大的地方, 切向速度愈大, 对流换热强度也就越大, 温度下降也较快。盘的中心部分, 由于半径较小, 即使在高转速的情况下, 切向速度也比较小, 所以该处的温度开始时几乎没有变化, 后来略有降低, 主要是边缘温度降低对中心的影响。因此, 中心温度的变化相对于边缘温度变化有一段时间的滞后, 这段时间主要是边缘温度变化影响到中心所用的时间。但总的来说, 转速提高盘面的总体温度下降。

同样地, 转速在 5 分钟内由 3000 r/min 变到 0 r/min 时, 也可以同样地将盘面温度的变化分为两部分。在相同的加热功率下, 切线速度减小, 对流换热强度减弱, 盘面外缘对流换热量减少, 使沿半径向中心传递的热量增加, 边缘温度增加, 径向温度梯度加大。中心部分温度随转速变化的幅度不大, 温度梯度变化很小, 相对于边缘温度变化同样也有时间上滞后。盘面的平均温度上升。

该工况的对流换热的平均努赛尔特数与相对时间 $\tilde{\tau} = \tau(R^2/\nu)$ (ν 为空气的运动粘度) 的关系, 如图 4 所示。从这些图可以看出, 盘面的平均努赛尔特数随转盘转速的增加而增加, 随转速的减小而减少。图中的 $Re = \rho V_0 R / \mu$, V_0 为冷气进口速度, μ 为空气的动力粘度, R 为转盘半径。

在转速为零的时候, 盘面的平均换热系数主要取决于冷气的流量及此时的流动结构。在转速增加的过程中, 流体的流动结构不断发生变化, 平均对流换热系数将随流动结构变化而不断变化。根据粘性流体的无滑移条件, 在转盘表面的流体随转盘一起旋转。而转盘附近的流体也以某一寄生旋转角速度跟着转盘旋转, 其寄生旋转速度将落后转盘的转速, 离盘面越远差别越大, 这就造成了在主流上附加的一个旋转运动。转速越大, 寄生旋转角速度与盘面的角速度差加大, 使盘面的边界层减薄, 导致盘面平均换热系数增大。另一方面, 由于流体在腔内存在寄生转速, 流体的旋转也将使其受到离心力的作用, 径向速度增加(盘表面的流体除外), 径向出流能力加大, 加剧了腔体内流体的回流流动, 使转盘表面的对流换热加强。

在转速不断提高的非定常条件下, 流动结构

将不断地发生变化, 直到转速不再发生变化时, 流动结构才稳定下来。流动结构的主要特征是腔内出现回流。旋转程度的增加, 增大了这种回流流动, 使它不断地与主流的流体发生质量和动量的交换, 使转盘的努赛尔特数增大。

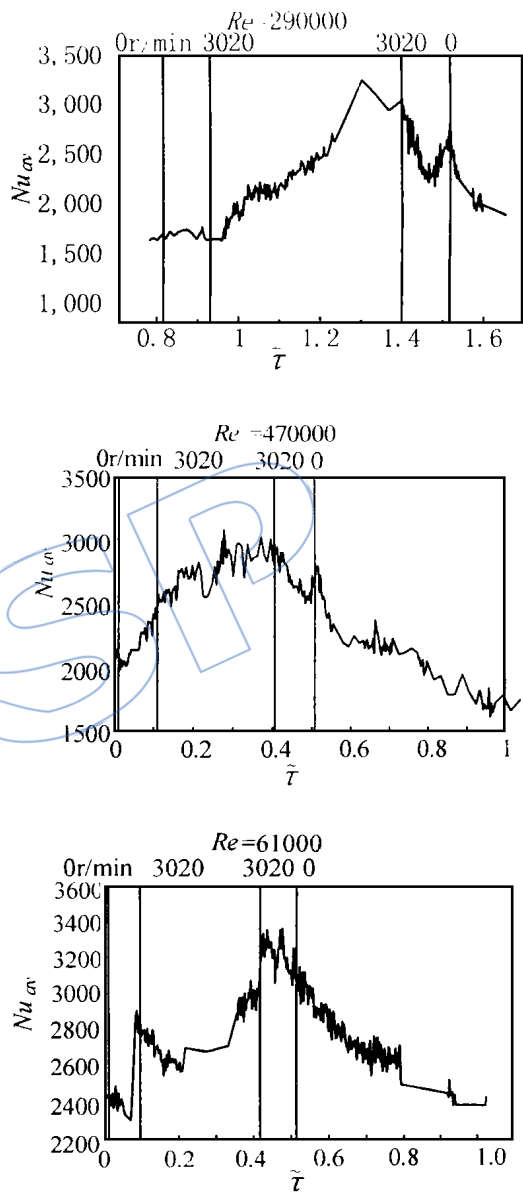


图 4 盘面平均努赛尔特数随时间的变化

对于第二种工况, 将流量分别固定在 200 kg/h, 300 kg/h 和 400 kg/h 的情况下, 转盘不转, 实验系统达到热平衡后, 转速在 2 秒内突然增至 1000 r/min, 待实验系统热稳定后, 转盘的转速再由 1000 r/min 突然提高到 2000 r/min, 最后在系统热稳定的条件下转盘的转速由 2000 r/min 突然提高到 3000 r/min。当系统热稳定后, 再按上述相反的过程进行实验。图 5 为典型温度分布图。

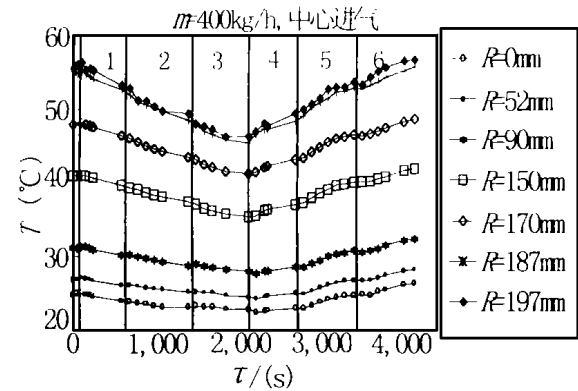


图 5 盘面温度随时间的变化

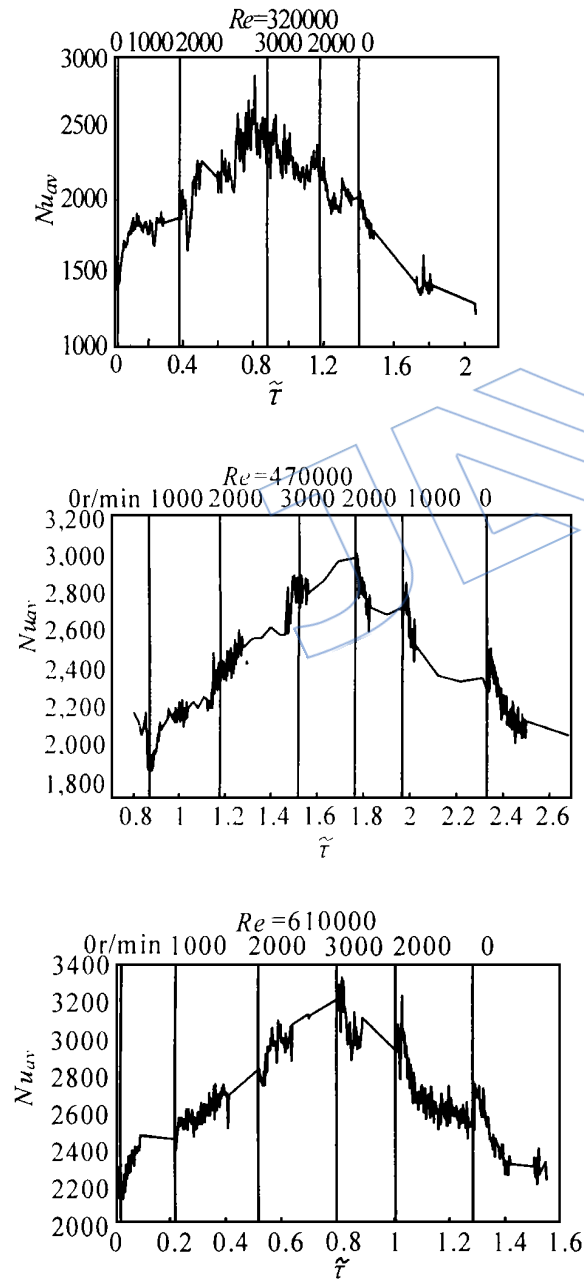


图 6 盘面平均努赛尔特数随时间的变化

1 域的转速为 1000 r/min, 2(1000– 2000 r/min), 3(2000– 3000 r/min) 域为转速突然上升及稳定过程, 4(3000– 2000 r/min), 5(2000– 1000 r/min), 6(1000– 0 r/min) 域为转速突然下降及热稳定过程。我们可以看出, 当转速提高时边缘温度受影响较大, 温度下降较快。反之亦然。

此时盘面的平均努赛尔特数与相对时间的关系, 如图 6 所示。本工况的特点在于转速是阶梯式突然改变的, 而上一工况的特点在于转速是在某一段时间内逐渐改变的。

该工况由于仍然是在改变转速的情况下进行实验, 因此, 其影响转盘平均努赛尔特数的因素与上一种情况差不多。从总的冷却效果来看, 转速的升高和降低对平均努赛尔特数影响是较大的。在转速突然增加, 并在一个很短的时间内达到稳定的情况下, 腔内的流动结构也趋于稳定, 但是由于系统的热容比较大, 热稳定并不是在一个很短的时间内完成的, 有一段时间的延续性。因此, 转速的突然变化并没有导致盘面平均努赛尔特数的突然变化, 平均努赛尔特数则是在一段时间里逐渐变化的, 直至最终稳定下来。

4 结 论

通过用实验的方法研究了转盘转速对中心进气旋转盘非定常流动与换热的影响, 得到以下主要结论: (1) 工况改变时, 盘缘区域温度随时间的变化率大于中心区域温度随时间的变化率。(2) 无论是转速突然改变还是在某一段时间内渐变, 盘面温度需要很常时间才能稳定。(3) 转速增加盘面平均努赛尔特数增大。在给定时间内转速增致最大转速后使系统稳定还是分段使系统稳定后再增加转速, 对盘面平均努赛尔特数的影响不是特别明显, 两者总的分布趋势没有明显的区别。转速的减小过程也是如此。

参 考 文 献

1 Owen J M, Haynes C M, Bayley F J. Heat Transfer from an Air-Cooled Rotating Disk. Proc. Roy. Soc., London, 1974, A336
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
3 徐国强, 丁水汀, 邱绪光, 曹玉璋. 中具有心进气的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

(责任编辑 杨再荣)

(英文摘要转第 290 页)

静止状态的增加量大于前表面。

参 考 文 献

- 1 王代军, 吉洪湖, 王宝官. 带有叉排扰流柱阵列的旋转矩形通道的对流换热实验研究[C]. 重庆: 中国工程热物理学会传热传质学学术会议, 论文编号 973083, 1997

- 2 吉洪湖, 王宝官, 王代军, 邓化愚. 叉排扰流柱排列参数对旋转矩形通道对流换热特性的影响[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 231– 236
- 3 吉洪湖, 王宝官, 王代军, 邓化愚. 涡轮叶片尾缘出流对带叉排扰流柱阵列的内冷通道传热特性的影响[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 237– 241

(责任编辑 杨再荣)

The Effects of Tip End Ejection Area Ratio and Installation Angle on Heat Transfer of Orthogonally Rotating Rectangular Duct with Staggered Pin Fins

Ji Honghu¹, Wang Baoguan¹, Wang Daijun², Deng Huayu²

¹(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

²(Gas Turbine Establishment, Xindu 610500, China)

Abstract: An experimental research was conducted on orthogonally rotating rectangular ducts with staggered pin fin array and radial outward throughflow, to determine the effects of the duct tip end ejection area ratio and installation angle on the heat transfer of the duct. In order to study the effect of ejection area ratio (the ratio of the tip end ejection area A_0 to the area of the cross section of the duct A) three models were used with A_0/A equal to 0.067, 0.38 and 1.0 respectively. For the investigation of the effect of installation angle α , two models with α equal to 0 and 20 degree were tested. The effects of Reynolds number Re , rotation number Ro and other relevant parameters on heat transfer were also investigated.

Key words: blades; rotating; heat transfer

(The Chinese text of the following abstract is printed in PP282– 285)

Transient Heat Transfer Characteristics of Shrouded Rotating Disk with Variation of Rotating Speed

Luo Xiang, Wang Jianning, Xu Guoqiang

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A gas turbine disk was simplified to be a shrouded rotating disk system with central cooling air inflow, the disk was heated at rim. Transient heat transfer characteristics of the disk were investigated experimentally as the rotating speed was varied. The disk diameter was 400 mm and its maximum rotating speed was up to 3000 r/min. The results show that the rate of temperature vs time at large radius is greater than that at small radius. Averaged Nusselt number enlarges with the increase of Rotational Reynolds number. There are no significant difference in averaged Nusselt number between the stepwise abrupt variation and linear variation in the rotating speed.

Key words: rotation speed; rotating disk; heat transfer; flow