

中心进气旋转盘的冷却效果实验研究

(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083) 徐国强 丁水汀 陶智 罗翔

摘要: 对涡轮发动机热部件冷却的主要指标目的是使热部件的总体温度尽可能低和热部件内部的温差尽可能小, 因此对涡轮发动机涡轮盘的冷却除研究转盘表面的对流换热系数外, 还应对以上两个指标进行研究。本文将发动机的涡轮盘简化成中心进气旋转盘模型, 用实验的方法研究了旋转雷诺数、进气雷诺数、盘罩间隙比和出气间隙比对转盘无量纲过余体平均温度和无量纲径向温差的影响, 并给出了相应的准则关系式。

关键词: 旋转盘; 换热; 无量纲过余体平均温度; 无量纲径向温差

中图分类号: TK17 文献标识码: A

1 前言

由于结构要求, 许多发动机涡轮盘的冷却系统仍采用冷气从静止机匣流出直接冲击涡轮盘的中心区域这一冷却结构。长期以来国内外对转盘附近冷气的流动与换热进行了大量的实验研究, 并有一定的理论分析及数值计算, 取得了一些有意义的结果, 这些研究结果基本上都是给出了盘面平均换热系数^[1-5]。本文将用实验的方法对中心进气旋转盘的冷却效果进行研究。

对涡轮发动机热部件冷却的主要指标有①要求热部件的总体温度尽可能低, 以满足金属材料的各项强度指标; ②热部件内部的温差尽可能小。

在本实验研究中总体温度 t_{av} 水平用体平均温度与冷气温度之差反映, 即转盘的过余体平均温度; 温差主要用外缘轴向平均温度和中心轴向平均温度之差 $t_2 - t_1$ (t_1 、 t_2 分别为转盘外缘轴向平均温度和转盘中心轴向平均温度) 反映, 文献^[6] 通过引入特征温差 $\frac{q_r R}{\lambda_D}$ 得到转盘的无量纲过余体平均温度 θ_{av} 和无量纲径向温差 $\Delta\theta$ 。

$$\begin{aligned} \theta_{av} &= \frac{t_{av} - t_o}{q_r R / \lambda_D} \\ &= f_1(Re, Pr, Re_\omega, P, \varphi, Cp, \text{无量纲几何参数}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{t_2 - t_1}{q_r R / \lambda_D} \\ &= f_1(Re, Pr, Re_\omega, P, \varphi, Cp, \text{无量纲几何参数}) \end{aligned} \quad (2)$$

文献[6] 引入了涡轮盘平均冷却效率, 其定义式可表示为:

$$\eta = 1 - \theta_{av} \quad (3)$$

由上式可以看出冷却效率越高, 转盘的总体平均温度越低, 因此冷却效率可以直观地反映涡轮盘的冷却程度。以上各式中的准则数为: 进气雷诺数

$$Re = \frac{\rho_0 V_0 R}{\mu_0}, \text{普朗特数 } Pr = \frac{\mu_0 C_{p0}}{\lambda_0}, \text{旋转雷诺数}$$

$$Re_\omega = \frac{\rho_0 \omega R^2}{\mu}.$$

2 实验装置

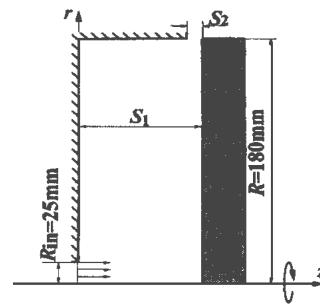


图1 实验模型

为使研究得以简化和使研究结果具有一定的通用性, 将实际发动机涡轮盘简化成图1所示的中心进气模型。冷气从静止罩的中心进入腔体冲击旋转盘, 然后折转径向外流, 在转盘的边缘流出腔体。热量自转盘的边缘加入, 从转盘的迎风面散出, 转盘背面绝热。除盘罩间隙 S_1 和出气间隙 S_2 在实验过程中需要改变外, 其余几何参数均固定不变。由于实验件高速旋转, 给实验研究带来很大的困难。除机械安装方面的问题外, 还存在着如何对旋转件进行加热和从旋转件上准确地获取各测量量的信号, 这也是本实验研究的两大关键技术。考虑以上问题后, 所设计的实验台主要包括以下几大系统: 供气系统、动力系统、实验件和测试系统如图2所示。

收稿日期: 1999-03-24; 修订日期: 1999-06-18

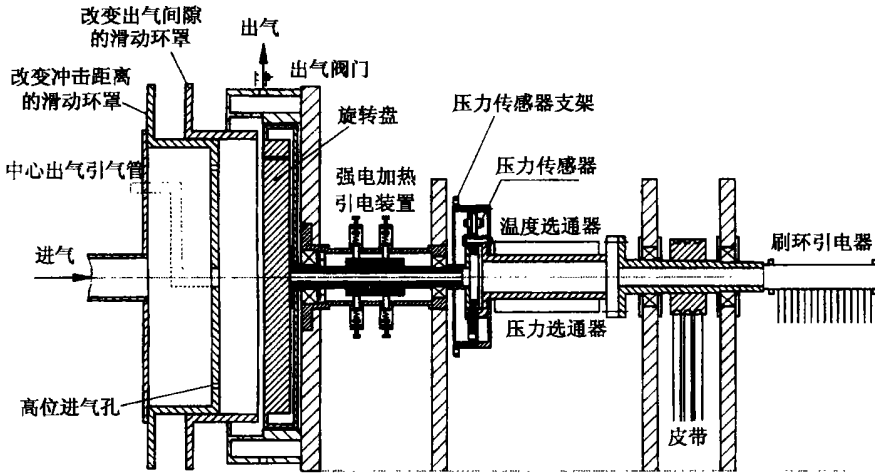


图 2 实验装置图

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。实验中最大加热功率为 2 500 W。

在旋转盘的盘缘开有内径 $\Phi 360$ mm 外径 $\Phi 390$ mm 深 29 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 3 所示。

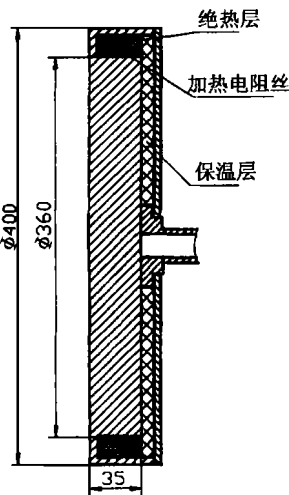


图 3 转盘组件图

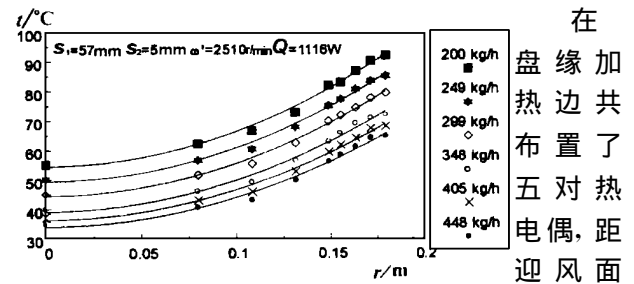
供气系统的空气由中心冲击旋转盘，与盘面对流换热，然后由集气腔收集、排出。为了能仔细地研究旋转盘和静子之间的间隙及出气间隙对流动与换热的影响，在旋转盘的前方装有两个独立的滑动环罩，分别调节环罩可以改变转盘与静盘间的距离 S_1 和出

气间隙 S_2 。两个环罩间及环罩与集气腔间都装有“O”形橡胶密封圈。

驱动装置是一台 11 kW 的交流电机，其转速由电磁调速控制器进行调节和控制，电机的最大转速为 1 200 r/min，经变比为 1:3 的皮带轮带动空心主轴旋转。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。

实际涡轮盘是双面冷却，换热基本上是对称的，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。转盘迎风面沿径向布置了 13 对 $\Phi 0.2$ mm 的 NiCr—NiSi 热电偶。在不同半径处垂直于旋转盘表面开有阶梯形通孔，靠近迎风面处孔的直径为 $\Phi 1$ mm，背风面为 $\Phi 2$ mm。其与盘心距离分别为 0、40、80、108、131、158、180 mm。在转盘的迎风面靠近通孔处沿周向开有深和宽各 1 mm 长 10 mm 的引线槽。测温热电偶从盘子背面经小孔引到转盘迎风表面，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，以免干扰流场。



在盘缘加热边共布置了五对热电偶，距迎风面的距离分别为 0、6、13、21、28、35 mm。所有热电偶从转盘的背面引到空心轴后再与随主轴一起旋转的温度多路选通器连接。当某一路热电偶信号被选通后，经放大器放大再从滑环引电器过渡到静止测试系统上。所有实验数据都是由计算机控制的数据采集系统获取的。为了提高测试系统的精度，在本测试系统中除硬件采取了一定的滤波电路外，还采取了软件的数值滤波方法来削弱、干扰信号对测量的影响，此外还对全系统进行标定，建立测试系统各种测试信号的

输入/输出数学模型,使测试系统的准确度大大提高。

3 实验结果分析

3.1 盘面温度分布

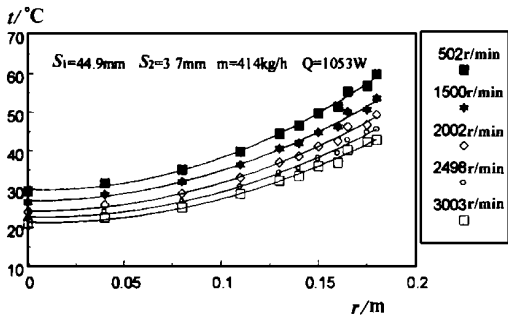


图 5 不同转速时盘面温度分布

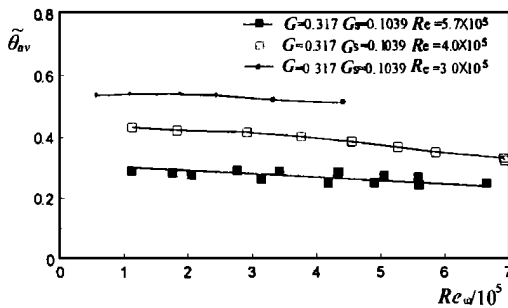


图 6 旋转雷诺数对转盘无量纲过余体平均温度的影响

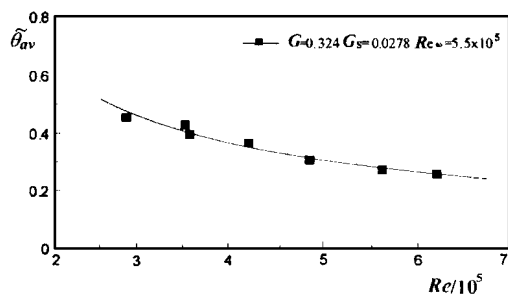


图 7 进气雷诺数对转盘无量纲过余体平均温度的影响

可以看出,无论哪种情况,转盘表面温度的总体分布规律都是一样的,转速的提高、冷气流量的增大都会使盘面的总体温度降低,但温度分布规律无明显变化;既随着转盘半径的增加,盘面温度不断提高,近似按一幂数多项式曲线增加,即 $t(\frac{r}{R}) =$

$\sum_{i=0}^n a_i (\frac{r}{R})^i$ 。在处理实验数据时, i 取不同值时,转盘

无量纲过余体平均温度和无量纲径向温差变化很小,因此本实验中所有盘面的温度分布均按 $t(\frac{r}{R}) = a_0 + a_1(\frac{r}{R}) + a_2(\frac{r}{R})^2$ 处理。图中的曲线就是按这一关系式拟和的。

3.2 转盘无量纲过余体平均温度

图 6 和图 7 示出了转盘无量纲过余体平均温度随转速、流量等变化的情况。随着转速的增加,无量纲过余体平均温度略有下降,造成这一结果的原因主要是腔内气体的流动状态。其一是转盘转速的增加,腔内气体的寄生旋转角速度与盘面的角速度差加大,使盘面附近气体的边界层减薄;另一原因是,由于气体在腔内存在寄生转速,气体旋转将使其受到离心力的作用,转盘附近径向速度增大(盘表面上的气体除外),径向出流能力增强,加剧了腔体内气体的回流流动,使转盘表面的对流换热得以加强,但总的来说旋转对转盘过余体平均温度的影响不大。与转速的影响比较,冷气流量对无量纲过余体平均温度的影响要大的多。说明本实验范围内冷气流量是影响转盘温度的主要因素。

3.3 转盘无量纲径向温差

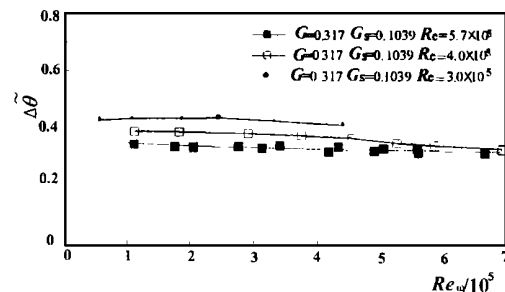


图 8 旋转雷诺数对转盘无量纲径向温差的影响

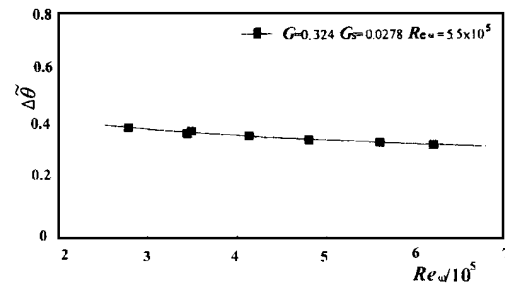


图 9 进气雷诺数对转盘无量纲径向温差的影响

有下降,但这种影响也比较小,如图 9 所示。与无量纲过余体平均温度相比,进气雷诺数对无量纲径向

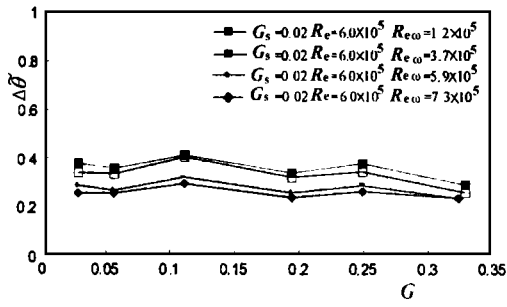


图 10 盘罩间隙对转盘无量纲过余体平均温度的影响

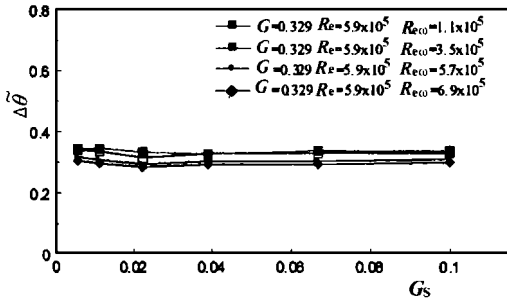


图 11 出气间隙对转盘无量纲径向温差的影响

温差的
影响要
小于对
无量纲
过余体
平均温
度的影
响,其原
因是进
气雷诺
数的增
加主要
反映在
冷气流
量的增
加,盘面
的换热
总体加
强,各处
强化的
相对程
度基本一
样,转盘
内的温
度总体
下降,径
向温差
变化不
大.因此
增加冷
气流量
对减小
转盘的
径向温
差没有
特别明
显的作
用。

盘罩间隙和出气间隙对转盘无量纲过余体平均温度和无量纲径向温差的影响比较小。如图 10 和图 11 所示。

根据实验数据对转盘的冷却效率 η 和无量纲径向平均温差进行了回归。实验研究范围内冷气的温度变化很小,因此可取 Pr 等物性参数为常数,无量纲几何参数除盘罩间隙比 $G(= S_1/R)$ 和出气间隙 $G_s(= S_2/R)$ 外没有改变,因此,它们都不参与回归。回归公式分别为:

$$\eta = 1 - \vartheta_{av}$$

$$= 5.6 \times 10^{-4} Re^{0.47} Re_{\omega}^{0.07} G^{-0.01} G_s^{0.009} \quad (4)$$

$$\Delta\theta = 33.6 Re^{-0.27} Re_{\omega}^{-0.082} G^{-0.018} G_s^{-0.0097} \quad (5)$$

上述公式适用范围: $10^5 < Re_{\omega} < 6.5 \times 10^5$, $1.4 \times 10^5 < Re < 8.2 \times 10^5$, $0.022 < G < 0.459$, $0.011 < G_s < 0.1039$ 。

与 139 组实验数据比较,式(4)有 6 个实验数据落在 $\pm 15\%$ 的拟合精度(分散度)外,式(5)有 1 个实验数据落在 $\pm 15\%$ 的拟合精度外。可以看出,除进气雷诺数外,其它因素对冷却效率和无量纲径向温差的影响均比较小,

4 主要结论

本文对中心进气旋转盘的两个冷却指标进行了实验研究,得到以下主要结论:旋转雷诺数对转盘无量纲过余体平均温度和无量纲径向温差影响较小;进气雷诺数对转盘的过余体平均温度影响较大,而对无量纲径向温差的影响不大。

参考文献

- [1] Haynes C M, Owen J M. Heat transfer from a shrouded disk system with a radial outflow of coolant. J. of Engineering for Power, 1975.
- [2] Owen J M. Fluid flow and heat transfer in rotation disk system. Heat and Mass Transfer in Rotating Machinery, Eds: D. E. Metzger and N. H. Afgan, Hemisphere, Washington, 1984.
- [3] Owen J M. Air-cooled gas-turbine disk; a review of recent research. Int. J. Heat and Fluid Flow, 1988, 19(4).
- [4] 徐国强, 曹玉璋, 邱绪光. 具有中心进气外缘加热旋转盘的平均换热特性研究. 航空动力学报, 1994, 9(1).
- [5] Wilson M, Pi Brown R, Owen J M. Flow and heat transfer in a preswirl rotor-stator system. J. of Turbomachinery, 1997, 119; 364 ~ 373.
- [6] 徐国强. 转静系旋转盘腔流动与换热特性研究. [博士学位论文]. 北京: 航空航天大学, 1999.

(渠源 编辑)

(上接 246 页)

参考文献

- [1] 秦裕琨. 一种径向浓淡旋流燃烧器. 中国专利: ZL 93244359, 1993. 1.
- [2] 李争起. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器的工业性试验研究. 动力工程, 1998, 18(4): 63 ~ 67.
- [3] 李争起. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器调节特性的试验研究. 中国

电力, 1997, 30(1): 38 ~ 41.

- [4] 孙锐. 径向浓淡旋流煤粉燃烧器流动特性研究及数值模拟. [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998. 9.
- [5] 郭晓宁. 煤粉空气混合物着火温度与浓度关系的理论分析及计算. 动力工程, 1982, (2): 27 ~ 31.
- [6] 侯栋岐. 煤粉气流着火特性的测试报告. 哈尔滨发电设备成套设计研究所, 1992.

(渠源 编辑)

China, Post Code 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 252 ~ 255

An experimental study was conducted of the nozzle button temperature distribution on a fluidized bed test facility under start-up conditions with the under-bed ignition being carried out with the help of high-temperature gases. The heat resistance of the material used for the nozzle button is also assessed. In view of the increasing use of under-bed ignition mode for the start-up of fluidized bed boilers the above study is of great significance in providing guidance for practical engineering applications. **Key words:** temperature distribution, nozzle button, fluidized bed

压气机进气用雾化式蒸发冷却器实验研究 = **Experimental Study of a Fog-atomizing Evaporative Cooler for Compressor Inlet Air** [刊, 汉] / Lin Feng, Li Weishun, Xiao Dongmin, Wen Xueyou (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 256 ~ 259

From an experimental viewpoint a study has been performed of evaporative coolers for the cooling of compressor air. Discussed are some methods for measuring the wetness of water drop-containing air. With respect to different schemes of wetness addition by way of evaporation at a constant temperature the authors have investigated the effect produced by different water spray quantity on the evaporative cooling effectiveness. An experimental analysis is also conducted of the evaporative cooling effectiveness resulting from the different types of atomizing nozzles under different spray directions. **Key words:** compressor, inlet air cooling, heat transfer, mass transfer, evaporative cooler

中心进气旋转盘的冷却效果实验研究 = **Experimental Study of the Cooling Effectiveness of a Rotating Disc with a Central Cooling-air Feed** [刊, 汉] / Xu Guoqiang, Ding Shuiting, Tao Zhi, *et al* (Power Engineering Department under the Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 260 ~ 263

With regard to the cooling of turbine engine high-temperature components it is essential to meet the following main requirements: a minimal overall temperature of the hot components and a minimal temperature difference within the various parts of the hot components. In view of the foregoing one has to address the above-cited main requirements in addition to the study of convection heat transfer factor of the disc surface. In the present paper an engine turbine disc has been simplified to a rotating disc model with a central cooling-air feed. Under this simplification an experimental study is conducted of the effect of rotating Reynolds number, air inlet Reynolds Number, disc cowl clearance ratio and outlet air clearance ratio on the non-dimensional excessive body average temperature and non-dimensional radial temperature difference. In addition, a relevant criterion relation has also been given in the paper. **Key words:** rotating disc, heat exchange, non-dimensional excessive body average temperature, non-dimensional radial temperature difference

新型双流化床锅炉运行煤种变换仿真试验研究 = **Experimental Study of the Simulation of Fired-coal Rank Variation for a New Type of Double Fluidized-bed Boilers** [刊, 汉] / Zhao Jian, Suo Yisheng, Jiang Zikang, *et al* (Department of Thermal Engineering, Qinghua University, Beijing, China, Post Code 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 264 ~ 266, 271

A general mathematical model has been set up for a circulating double fluidized-bed boiler. On this basis a simulation test of the fired-coal rank variation was performed as a new pioneering attempt in the area of fluidized-bed boiler simulation. The results obtained can serve as useful information and data for the design and operation of fluidized beds, providing guidance for their further advancement. **Key words:** simulation, test, fluidized bed, coal

工业汽轮机增容改造技术研究 = **Technical Study of a Power Output Up-rating-oriented Modification of Industrial Steam Turbines** [刊, 汉] / Qin Xiaocheng, Gao Lei, Qiu Zufa (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2000, 15(3). — 267 ~ 268

Described in this paper is the technical modification of a Model EC-301T steam turbine for enhancing its rated power output by 15%. The power up-rating of the steam turbine has been achieved through a technical modification of such components as nozzle box, diaphragms and couplings, etc. However, the steam turbine rotor has been kept unchanged. **Key**