

# 用 PIV 法研究燃气轮机冷却叶片的冷却空气流场

梁 晨, 李伟顺, 孙淑兰

(哈尔滨·第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

**摘 要:** 采用粒子成像技术—PIV(Particle Image Velocimetry), 测量某型燃气轮机第一级动叶的内部复杂冷却通路中流动的速度分布, 介绍了实验装置、实验方法和实验结果, 分析了冷却空气的流动情况和分配方式。

**关 键 词:** 燃气轮机; 冷却叶片; PIV 系统; 实验

中图分类号: TK47 文献标识码: A

## 1 前 言

根据燃气轮机的工作原理, 燃气初温对机组效率有非常大的影响。初温的提高依赖于高温材料的性能改进和热部件冷却技术的进步。初期单纯依赖材料的进步, 至 20 世纪 50 年代中期, 叶片冷却技术开始被成功的应用于航机中, 据统计, 近 30 年来使用的高温材料的工作温度, 平均每年提高  $10^{\circ}\text{C}$  左右, 而燃气轮机初温的提高大约是每年  $30^{\circ}\text{C}$  左右(例如英国, 在 1960~1970 年间, 由于采用了冷却叶片, 燃气初温提高了  $300^{\circ}\text{C}$ ), 比只改进材料的效果大两倍, 而研究冷却叶片的费用仅为发展新材料费的四分之一, 因而冷却叶片技术的应用可称之为突破性进展。

本文主要介绍对复杂结构冷却叶片冷却气流的流动进行研究的实验装置、实验方法和实验结果。实验研究在上海交通大学动力学院涡轮机研究所实验室里进行。采用粒子成像技术(PIV)测量冷却叶片内部流道的速度场, 分析了冷却空气的流动情况, 并对冷却空气的分配方式进行了研究。

## 2 实验装置

本实验装置模拟空气冷却涡轮叶片内部的几何

形状和工作参数, 用于进行 PIV 流场测量, 确定冷却空气的流动特征。

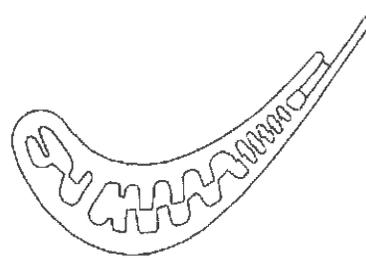


图 1 冷却叶片内  
流道截面图

实验模型为某型燃气轮机第一级涡轮动叶的 5 倍放大模型。图 1 为该冷却叶片横截面形状。模型由高强度透明有机玻璃制造, 对其内部的“涡流”型槽、“涡流”筋、节气孔等几何结构都

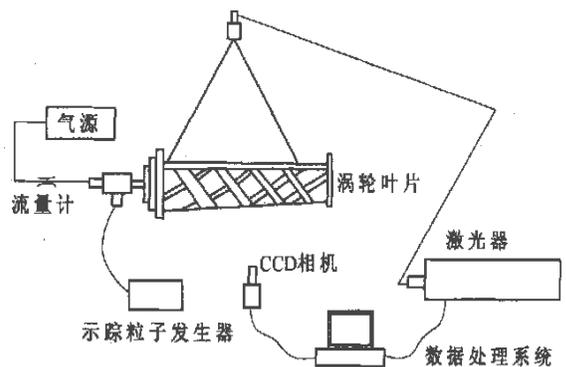


图 2 PIV 实验测量系统图

按实物 5 倍放大制成。按该型机工作时的流动方式, 从叶片叶根的进气孔引入冷却空气, 由叶片叶冠的三个出气孔及叶片出气边流出。图 2 和图 3 所示分别为 PIV 实验测量系统示意图及其叶片布置照片。激光器发出的激光束经过光学元件后, 转变成具有一定厚度和张角的片光源。将片光源布置在通



图 3 PIV 测量系统(有叶片)

1200, 流量计为浮子式流量计。空气经过调节阀门调整流量大小, 并将示踪粒子引射到叶片的冷却流道中。

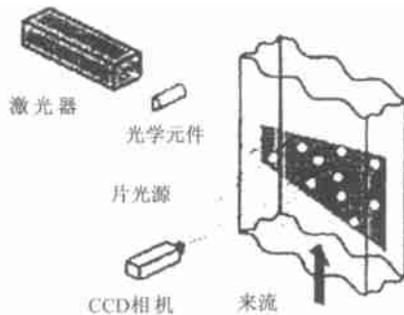


图 4 PIV 原理示意图

过叶片前缘叶背面上的冷却孔照亮该孔内的示踪粒子。实验用风源为空气压缩机 3WC-0.9/7 型, 最大空气流量为  $0.9 \text{ m}^3/\text{min}$ ; 工作压力  $0.7 \text{ MPa}$ ; 烟雾发生器型号为 ACME Fogger F-

### 3 PIV 系统

PIV 技术是在流动显示技术的基础上发展起来的, 主要用于二维速度场的测量, 能同时测量流场中一个切面上, 一定范围内的

的速度流场, 应用范围从低速流动到超声速流动。PIV 测量包括三个阶段, 如图 4 所示。第一, 两台激光器产生具有一定频率的脉冲光, 通过一系列光学元件转变成  $3 \text{ mm}$  左右厚度的片光源。片光源照亮了分散在流体中的粒子, 两个激光脉冲之间的时间间隔是可变的, 取决于所测量流体的速度, 在与片光源垂直的方向, 相机拍下被照亮的流体粒子。两个脉冲光所形成的粒子图存在 CCD 相机中的不同帧存储器中。第二, 数据处理。使用相关分析的方法对照片中粒子位移进行分析, 得到速度矢量, 经过进一步的信号分析, 消除掉噪声信息。第三, 速度场的显示。通过软件的数据处理, 以带箭头的矢量图表示瞬态速度场。

PIV 系统的硬件由下列几部分组成: 处理器、激光器、片光源生成系统、照相机、同步器、示踪粒子发生器和相关软件。其中 PIV 处理器 PIV2100Processor 是以硬件方式实现的, 可以用于非稳态流动的二维速度全场实时测量; 激光器为双谐振脉冲式 Continuum-YAG (200 mJ); 光源为绿光 ( $532.0 \text{ nm}$ ), 通过一系

列光学元件生成厚度调整范围为  $\delta=3 \sim 12 \text{ mm}$ , 张角  $15^\circ$  的片光源; 图象拍摄系统采用 Kodak CCD10.0Plus 以互相关双帧模式工作; FlowMap 软件提供了控制 PIV 各硬件部分工作的功能, 使各部分能得以协调工作, 存储和分析图像, 显示流场。

## 4 实验参数的选择及实验过程

### 4.1 实验参数的选择

#### 4.1.1 双曝光时间间隔的确定

为保证在两个光脉冲间隔时间内, 同一个粒子始终位于拍摄到的两幅示踪粒子图谱中, 使对两幅示踪粒子图谱的互相关处理更准确容易, 本实验采用片光源厚度  $\delta$  的一半作为最小穿透时间的计算标准。这样, 从片光源厚度和最大穿透片光源速度分量  $v_{out}$  之间的关系, 可以得到穿透片光源厚度的双曝光时间间隔取值范围为  $\Delta t_{il} \leq \delta/2v_{out}$ 。根据以上原则, 双曝光时间间隔调整成为  $100 \mu\text{s}$  和  $230 \mu\text{s}$  来拍摄。

#### 4.1.2 吹风实验参数的确定

实验的几何相似由冷却叶片模型保证, 流动相似由各种假设可以认为当雷诺数相等时就相似, 实际工作叶片的流动参数如下:

用于冷却第一级涡轮动叶的空气入口设计参数为:

压力:  $P_w = 1.036 \text{ MPa}$ ; 温度:  $T_w = 779.15 \text{ K}$ ; 流量:  $G_w = 27.43 \text{ g/s}$

吹风实验进口气流参数应保证:

$Re_w = Re_T$ ;  $Re_w$ —工作状态雷诺数;  $Re_T$ —实验状态雷诺数。

实验时入口空气温度常温, 即:

温度:  $T_T = 303.15 \text{ K}$

由于模型为 5 倍放大, 所以特征尺寸  $5L_w = L_T$ , 工作工质运动粘性系数  $\nu_w = 7.94 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , 吹风试验中空气的动力粘性系数为:

$\mu_T = 18.6 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ , 其运动粘性系数

$$\nu_T = \frac{\mu_T}{\rho_T}, \quad \rho_T = \frac{\rho_0 P_T}{P_0} = 1.165 \frac{P_T}{P_0}$$

式中:  $\rho_0, P_0$  为常温常压下空气的密度和压力。

为保证流动相似, 则:

$$\frac{u_w L_w}{\nu_w} = \frac{u_T L_T}{\nu_T}$$

$$\frac{u_w}{7.94} = \frac{5u_T \times 1.165 P_T}{18.6 P_0}$$

式中:  $P_T$  为试验空气压力,  $P_0$  为大气压力。

$$u_w = 2.48 u_T \frac{P_T}{P_0}$$

$$G_w = u_w \rho_w A_w = u_w \cdot 4.56 \cdot A_w$$

$$G_T = u_T \rho_T A_T = u_w \cdot \frac{P_0}{2.48 P_T} \cdot 1.165 \frac{P_T}{P_0} \cdot 25 A_w$$

$$= \frac{G_w}{\rho_w} \frac{P_0}{2.48 P_T} \cdot 1.165 \frac{P_T}{P_0} \cdot 25$$

$$G_T = 2.575 \cdot G_w = 70.63 \text{ g/s}$$

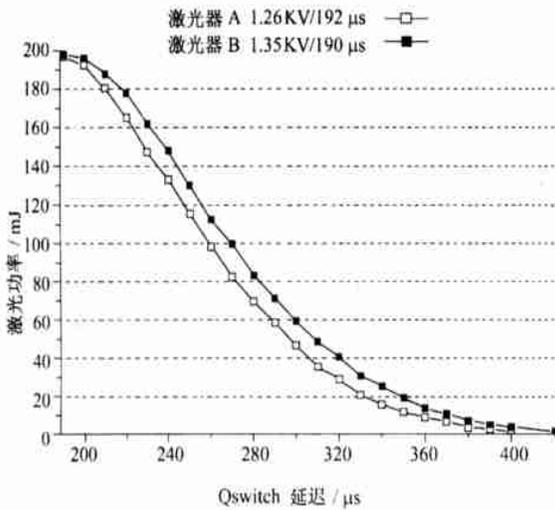


图 5 YAG 双谐振脉冲式激光器特性曲线标定

可见, 当试验温度为  $30^\circ\text{C}$  时, 流量保持为  $70.63 \text{ g/s}$  则流动自然实现雷诺数相等。

#### 4.2 标定

标定是保证 PIV 测试精度的重要环节。包括片光源强度、位置的标定和询问区的标定。

##### 4.2.1 片光源强度、位置的标定

为确保两幅示踪粒子图谱的可比性, 要求将两个激光器脉冲产生的片光源的中间均匀厚度部分重合照射到流动测量区域, 并且确保两个激光器工作在同一功率下。

本实验通过 Qswitch 延迟大小来控制激光器功率, 实验中采用光强计对两个激光器分别进行了标定, 如图 5 为激光器 A 和激光器 B 的功率标定曲线。通过以上标定可以保证片光源位置重叠, 以确保多数粒子两次出现在同一测量区中。

##### 4.2.2 图形拼裁的标定

由于本叶片为弯扭叶片, 所以测量面为曲面, 只能在进气边叶背和出气边叶背两处进行测量。每张照片可以摄取  $72 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}$  的面积, 叶片的高度为  $288 \text{ mm}$ , 每处分 4 个区域需要 4 张照片才能满足要

求, 在拼裁这 4 张照片时, 需确定各照片之间的界线, 方法是在叶片表面上贴上毫米方格纸, 每一定间隔用数码标记, 确定 4 张照片的位置, 然后分别摄取该 4 张照片, 打印后找出对应各照片的交界线进行拼接, 得到整体流场。

#### 4.3 实验过程

按照选定的参数, 调整同步器、相机和计算机软件的参数选项。

启动空气压缩机, 引入示踪粒子, 将流量调整到  $70.63 \text{ g/s}$ 。操作计算机, 按标定的 4 个位置各拍 4 张照片, 其中两张为表示双曝光时间间隔为  $100 \mu\text{s}$ , 两张为  $230 \mu\text{s}$ , 由软件将噪声信号去除掉, 通过对比选取质量较好的照片, 按照标定线拼成完整的流场矢量图。

### 5 实验结果

(1) 本实验装置较好的模拟了实际冷却叶片内部复杂流道的几何结构和运行参数, 获得了冷却叶片冷却流道内的速度流场。图 6 为试验用冷却叶片模型照片, PIV 实验的拍摄区域为图中 A 和 B 区域, 分别如图 7 和图 8 所示, 图 7 展示了叶片前缘背弧区的 4 个区域, 图 8 展示了叶片尾缘背弧区的 4 个区域。经过对比分析, 发现拍摄间隔  $100 \mu\text{s}$  的实验结果对流动的捕捉效果较好。

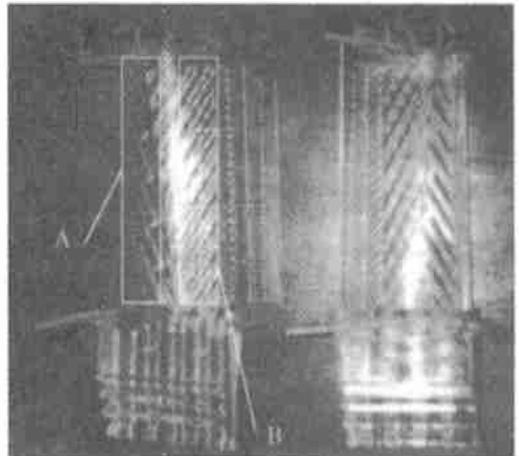


图 6 试验用冷却叶片模型照片

(2) 通过拍摄区域流场速度矢量图可见, 冷却空气在冷却流道中已充分发展为湍流, 沿进口“涡流”型槽的中间的通路并沿断续加强筋的前缘的纵向通路流动, 流动中在沿叶高布置的一系列节气孔

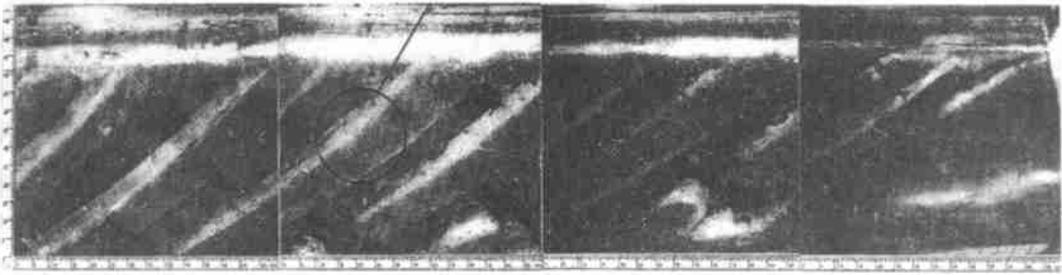


图 7 叶片前缘背弧区图形

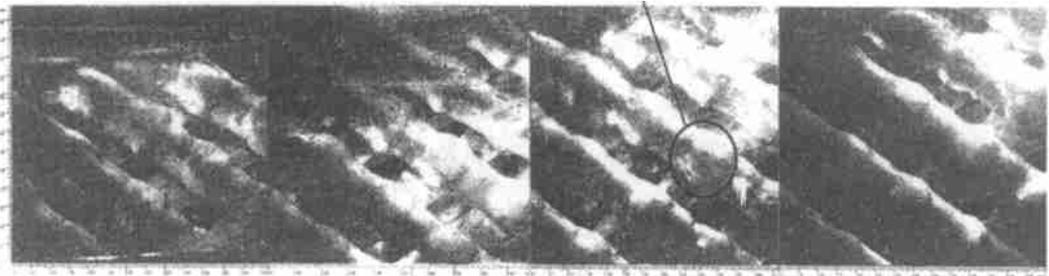


图 8 叶片尾缘背弧区图形



图 9 1 处放大图

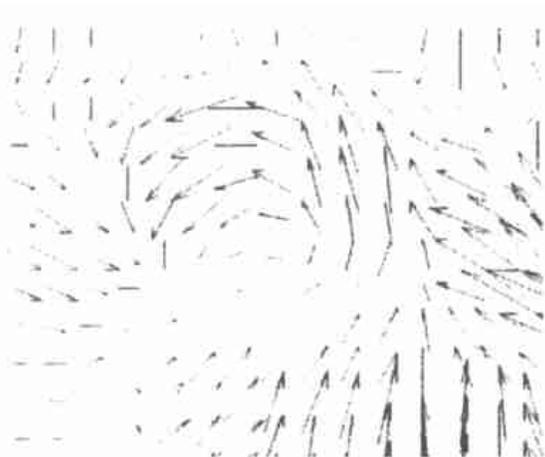


图 10 2 处放大图

中得以再分配, 气流在节气孔中的流动在(图 9)放大图 1 处中可以清楚地看到, 气流在上层流道和下层流道之间交换, 以保证叶身两侧的冷却。

(3) 在叶身的中间部分, 冷却流道为了使流动的湍流速度加大, 以进一步加强对流换热系数, 在上下流道交汇处加工成圆形, 如图 8 所示。这样结构中的流动可以在(图 10)放大图 2 处中看到: 在交汇处气流形成了涡流, 使流动的湍流度和对流换热系数都得以增大, 这样就保证了叶身中间部分和出口部分的冷却。

(4) 实验中结合装置的实际情况, 设计 PIV 的调控机构, 选择实验参数, 在数据处理方法及流场显示方法上作了有益的改进。

参考文献:

[ 1 ] RAFFEL M, KOMPENHENS J. Theoretical and experimental aspects of imageshifting by means of a rotating mirror system for particle image velocimetry[J]. *Meas Sci Technol*, 1994(6): 23-29.  
 [ 2 ] 赵亚滨. 用 PIV 测量法研究燃气轮机叶轮与导叶间流体的速度场[J]. *热能动力工程*, 1999 14(4): 266-270.

(何静芳 编辑)

微型燃气轮机技术 = **Micro Gas Turbine Technology** [刊, 汉] / YANG Ce, LIU Hong-wei, LI Xiao, et al (Institute of Vehicle and Transportation Engineering under the Beijing University of Science & Technology, Beijing, China, Post Code: 100081) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 1~4

High-efficiency micro gas-turbine power generating sets are used in a variety of engineering sectors, such as aeronautics and astronautics, distributed electric power generation, auxiliary power plants for military vehicles, and hybrid power units for automobiles, etc. In view of this, the study of this type of power plants is of major practical significance. The development history of the micro gas turbines is first presented, briefly describing the changes in structure experienced by such turbines over the past four decades. This is followed by the enumeration of some problems demanding close attention during the design of the micro gas turbine key components. In conclusion, the authors reviewed the research work conducted by some Chinese institutions engaged in this realm of study. **Key words:** micro gas turbine, auxiliary power unit, hybrid power unit

循环流化床灰渣利用研究进展 = **Recent Advances in a Study on the Utilization of Circulating Fluidized Bed (CFB) Ash Residue** [刊, 汉] / LI Deng-xin, LU Jun-fu, GUO Qing-jie, et al (Thermal Energy Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 5~8

On the basis of analyzing the characteristics of circulating fluidized bed (CFB) ash residue a broad overview is given of the recent advances both at home and abroad in the comprehensive utilization of CFB fly ash. Owing to its low carbon content and the presence of a certain hydraulic activity the CFB ash residue can be used directly for the fabrication of cement or building materials. However, the high carbon content and poor hydraulic activity of the fly ash make it necessary to develop some relevant technologies prior to using it. The latter include the pelleting of fly ash for its return burning, the direct sending back of fly ash, and its sending back for desulfurization following its hydration, its use as a raw material for the manufacture of cement and also as soil ameliorative agents, etc. **Key words:** circulating fluidized bed, fly ash, low-carbon ash, processing and utilization

用 PIV 法研究燃气轮机冷却叶片的冷却空气流场 = **A Study of the Cooling Air Flow Field of Gas Turbine Cooled Blades through the Use of a PIV (Particle Image Velocimetry) Method** [刊, 汉] / LIANG Chen, LI Wei-shun, SUN Shu-lan (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 9~12

A PIV (particle image velocimetry) method is employed to measure the velocity distribution in a complicated internal cooling channel of the first-stage rotating blades of a gas turbine. The test rig, test method and results are described along with an analysis of the cooling-air flow conditions and its distribution modes. **Key words:** gas turbine, cooled blades, particle image velocimetry system, tests

汽轮机组回热系统故障诊断知识的模糊处理及诊断研究 = **An Investigation on the Fault Diagnostic-knowledge Fuzzy Treatment and the Diagnosis of the Regenerative Heating System of a Steam Turbine Unit** [刊, 汉] / LU Xu-xiang, LI Lu-ping (Power Engineering Department, Changsha University of Electric Power, Changsha, China, Post Code: 410077), HU Nian-su (Power and Mechanical College under the Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(1). — 13~16

A knowledge database of typical fault-sample modes and real-time fault modes for the regenerative heating system of a steam turbine has been set up based on the recognition of common faults and symptoms specific to the regenerative heating system of a thermal power plant. This was accomplished through the use of fuzzy mathematics knowledge and related theories with regard to the various change directions and degrees of the fault symptom parameters of the regenerative heating system, using different variation grades and thresholds. Meanwhile, by utilizing a radial base-function network based on a MATLAB environment established was a fault diagnostic model for the regenerative heating system. Moreover, a neural network model has been verified through the simulation of typical faults by a power plant simulator. Practice indicates that