

用 PIV 测量法研究燃气轮机叶轮与导叶轮间流体的速度场

(江苏石油化工学院) 赵亚滨

[摘要] 介绍燃气轮机第一级叶轮前圆盘空腔中的流体流动状态实验研究的实验装置、实验方法和实验结果。采用粒子成像技术(PIV)测量圆盘空腔内的速度场,分析了密封气流量大小对不同位置流场的影响,并对主流气进入空腔的临界参数和流场的关系进行研究。

关键词: 燃气涡轮; 实验; PIV 系统

中图分类号: TK477

1 介绍

为了提高燃气涡轮的热效率和降低燃料消耗,要求更高的燃气进口温度,而进口导叶与第一级叶轮区域的材料承受了最高的温度,因此,该区域是材料温度应力最大的区域,带有固定导叶的静盘和第一级叶轮(转盘)之间形成一狭窄的空腔。尽管已采取了机械密封环的方法防止主流进入空腔,但仍然有高温流体进入,这使已处于高应力状态下高速运转的转盘温度升高,对转盘的疲劳寿命产生负面影响。为此,采用静盘中心轴向吹入密封冷却气的方法改善转盘的受热状况。密封气进入空腔后沿径向流动,流过密封空隙后与主流气混合。当密封气的流量和压力达到一定值后,能较好地抑制主流气的进入。密封气的引入,使圆盘空腔中流体的流动状况较为复杂,有必要对其中的流场进行实验和理论研究,以便为下一代燃气发动机的设计提供数据。

实验研究是在建于美国亚里桑那州立大学的传热实验室里的燃气涡轮模型装置上进行的。装置外部由高强度透明有机玻璃制成,第一级叶轮有52个转动叶片,导轮上有59个静态导叶,在动、静圆盘的边缘分别镶有密封环,构成机械密封,主流气和密封气均由二台离心式鼓风机提供,风量可调。

本文主要介绍对圆盘空腔中的流体流动状态进行研究的实验装置、实验方法和实验结果。采用粒子成像技术(PIV)测量圆盘空腔内的速度场,分析了

密封气流量大小对不同位置流场的影响,并对主流气进入空腔的临界参数和流场的关系进行研究。

2 实验装置

本实验装置模拟燃气轮机进口段的几何和工作参数,用于进行液晶稳定态传热实验,PIV流场测量以及静态压力测量。

如图1,转盘直径40.3 cm,在转盘外周焊有52个叶片,转盘和叶片材料为铝。静盘由有机玻璃制成,59个导叶粘于静盘外周。转盘、静盘及叶片的几何尺寸和结构与实际燃气轮机相似。密封气由一离心式鼓风机(二次鼓风机)提供,由位于静盘中心处直径为3.81 cm的圆孔进入转盘空腔,流过密封间隙后汇入主流。转盘空腔的几何构造见图2。转盘与静盘的间距、密封间隙的几何尺寸均保持不变。有关实验的无因次参数如表1。

表1 实验参数与燃气轮机实际参数的比较

	实验	实际
流动参数		
旋转雷诺数	0.2—1.4E6	0.2E6—1.0E7
主流雷诺数	0.2—0.56E6	0.2E6—1.1E7
冷却气流量	1.0—3.0	1.0—50
冷却气对主流气密度比	1—1.5	1.5—1.8
导叶出口角	55	55—70
几何参数		
空腔间隙与半径比率	0.08	0.05—0.2
轴向密封距离与半径比	0.01	0.018—0.027
径向密封距离与半径比	0.01	0.0056—0.0138
凸台半径与半径比率	0.94	0.3—0.8

转盘由2.24kW的变频电机通过皮带驱动,转速可以达到5000 r/min。主流通道是由内直径43.8 cm,宽2.7 cm所构成的环形通道。进口安装了

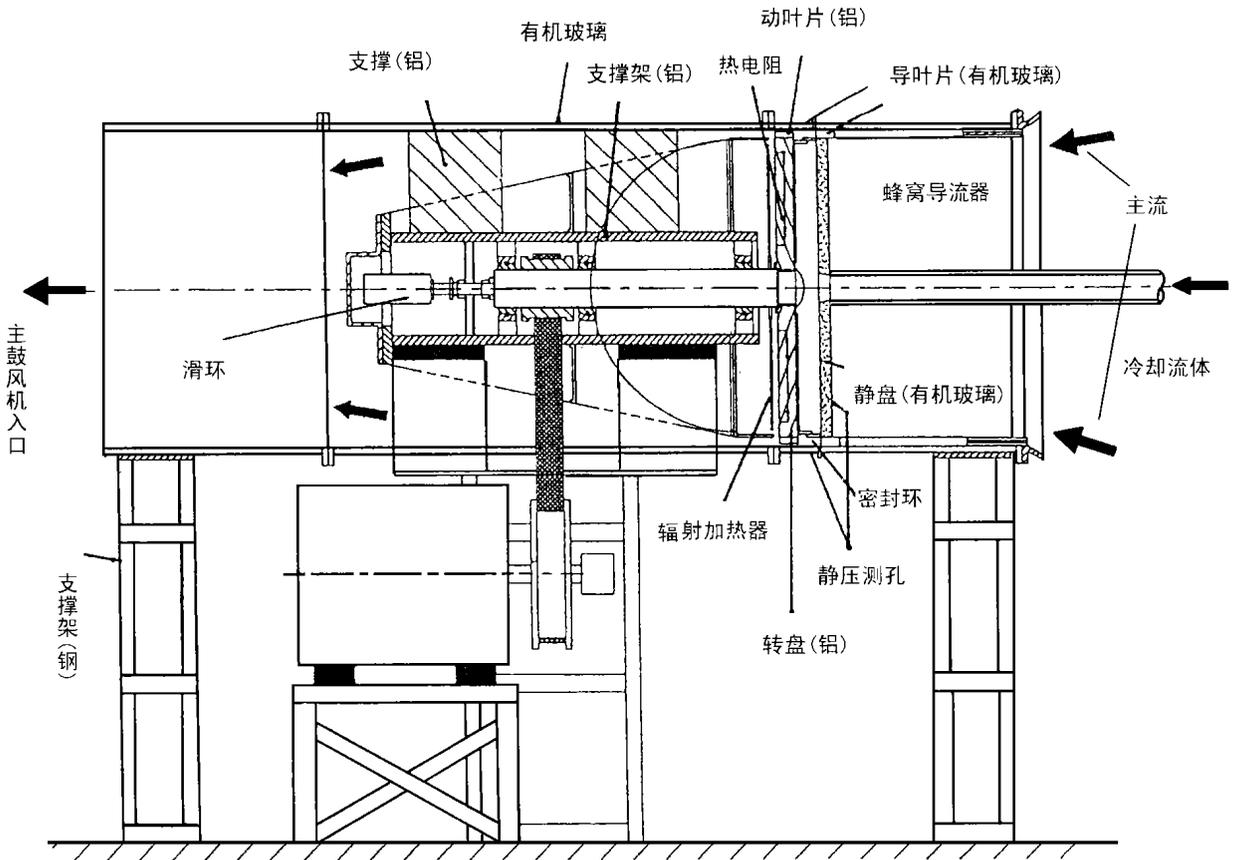


图 1 实验装置示意图

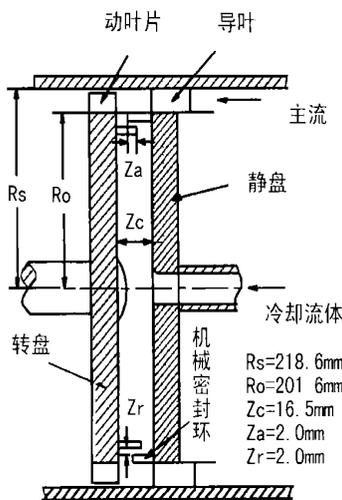


图 2 圆盘空腔示意图

11.4 cm 长的蜂窝状导流器，以均布流体。主流由 22.4 kW 的离心风机在吸入侧产生，风机转速变频可调，主流流量可以达到 $0.94 \text{ m}^3/\text{s}$ 。流量由设在主鼓风机前的毕托管，通过数字压力传感器测量，数据由 Data 6000 采集和处理。对应于可

调的最大空气流量，主流气压力降为 4.62 kPa。密封气由 2.24 kW 的离心鼓风机（二次鼓风机）提供。在静盘进口和鼓风机之间安装有调节阀，以调节密封气流量。当主风机运行时，由于主流的泵吸作用，

即使二次风机不运行，也能产生 $0.0245 \text{ m}^3/\text{s}$ 的密封气。在二次鼓风机进口处还装有加热器和水冷却器，用于调节密封气的温度。在离开圆盘空腔的转盘一侧，装有辐射加热器，以获得希望的转盘温度。加热由 PID 控制，4 个热电阻埋设在转盘内以测量转盘温度，其中一个热电阻用于温度控制反馈。

3 PIV 系统

流场中的紊流结构是瞬态的，但这种结构在流场的不同位置会重复出现，定性和定量测量整个流

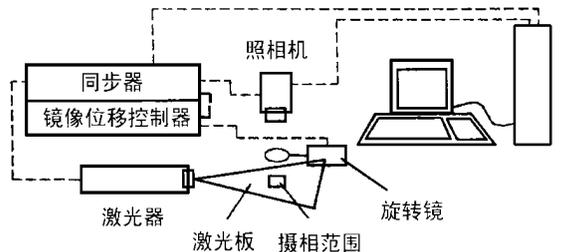


图 3 PIV 原理示意图

场中的速度场将有助于确定紊流结构。

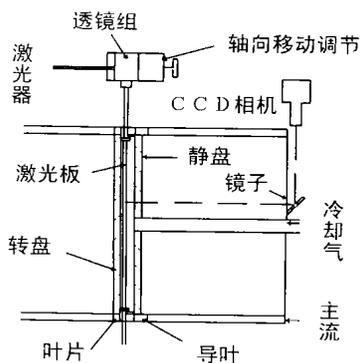
PIV 是一种光学测量技术,能同时测量流场中一个切面上,一定范围内的速度流场,应用范围从低速流动到超声速流动。PIV 包括三步过程,见图 3。第一,两台激光器在极短时间间隔内分别产生二激光束,激光束通过光学透镜后转变为 1 mm 左右厚的光板。光板照亮分散在流体中的粒子,二次闪亮的时间间隔是可变的,取决于所测量流体的速度,在与光板垂直的方向,相机拍下被照亮的流体粒子。由于二次光板出现的时间间隔小于相机的曝光时间,所以,在同一底片上记录有二次照亮的粒子。为了便于粒子运动方向的判别,采用镜相位移的方法,在二次闪亮之间利用平镜的旋转,人为地增加照片上同一粒子的位移量。第二,照片处理。用自动关联的统计方法对照片中粒子位移进行分析,得到速度矢量。所涉及的计算机系统和软件由 TSI 提供。第三,速度场的展示。瞬态速度场由带箭头的矢量表示。

PIV 系统的硬件由下列几部份组成。

3.1 激光器

采用 Spectra-Physics GCR-200 (Nd: YAG) 激光器,其单一激光输出的峰值能量为 200 mJ。

3.2 透镜装置



光板由光束通过一个 -50 mm 的凹透镜和一个 750 mm 的凸透镜后产生。透镜能承受高能量 YAG 激光。凹透镜决定了光板的高度,凸透镜决定了光板的厚度,如图 4。为

图 4 PIV 系统布置图

为了让光板在圆盘空腔中的位置可调,设计了三维空间可移动装置,以测量不同位置的流场,还使光板的腰部处于所要测量区域的中心,获得较好的测量效果。

3.3 照相机

采用 Kodak Megaplus 1.4 i 照相机,它具有 1317 × 1035 的高分辨率。

3.4 镜相位移系统

镜相位移系统利用镜面的旋转,人为地使粒子在流动方向上产生一附加位移,这位移在以后的图

像处理时将被减去。旋转平镜置于测量面与相机之间,同步器启动相机快门,触发平镜旋转,第一激光器工作,平镜继续旋转,第二激光器工作,相机快门关闭。这样,产生的附加位移:

$$\Delta x = 2wM\Delta tR$$

式中, w : 平镜转动角速度;

M : 成像放大系数;

Δt : 两激光器发光的时间间隔;

R : 平镜转动轴至实际光板平面的距离。

3.5 同步器

同步器用来控制和协调 PIV 实验的过程,它接受计算机的指令,控制激光器,镜像位移系统及照相机动作的先后次序。

3.6 粒子发生器

粒子发生器用于产生 1 μm 左右直径的粒子,粒子分散在流体中,随流体流动。粒子的流动状况代表了流体的运动状况。粒子在流体中的浓度可调,以获得最佳的图像。

3.7 软件

INSIGHT 软件(TSI)功能是控制 PIV 各硬件部分的协调工作,储存和分析图像,显示流场。

图 4 为 PIV 系统布置图。

4 实验参数的选择及实验过程

4.1 实验参数的选择

根据实验装置的布置和几何尺寸,为了保证激光光板的高度并聚焦于研究的区域,选择了 750 mm 的透镜的 -50 mm 的凹透镜。采用镜相位移系统的转动幅度参数为 6,转动频率为 6,转动波形为三角形,转动方向为负。相机曝光参数选 5.6。同步器上设定两台激光器发光的时间间隔为 10 μs。光器重复工作的时间间隔参数为 5。调整转盘旋转速度为 2000 r/min (对应 20.3 Hz)。主鼓风机调至 59.5 Hz。对应主流流量占 0.92 m³/s。冷流体的流量分别调为 0.002, 0.005, 0.024 m³/s。

4.2 标定

标定是保证 PIV 测试精度的重要环节。包括激光光板位置的标定,镜相位移的标定和图形拼裁的标定。

光板位置的标定首先是保证两个激光器工作所产生的光板重叠,以确保多数粒子二次出现在同一张底片上。方法是用感光纸粘在转盘外围的固定边缘上,覆盖一半感光纸,挡住一激光板的光路,让激

光器闪光,在感光纸上留下一条细线,然后,覆盖另一半感光纸,挡住另一激光板,在感光纸上又留下另一条细线。取下感光纸,检查两条细线是否在连接处重叠,如不重叠,调整激光发射器内的调节螺丝,直到重叠为止,另外,根据感光纸上留下的感光线相对于参考线的位置来标定光板的空间位置,以保证光板平面平行于转盘表面。

镜相位移的标定是用于确定位移量的多少,以便在以后计算速度时将该附加的位移量减去。方法是用一回形针粘在转盘表面上,针尖伸出与表面垂直,让二次激光脉冲照亮针尖,在计算机屏幕上留下两个亮点,这两点之间的距离就是位移量。测量时,取得 10 组读数,然后取平均值。

图形拼裁的标定:由于每张照片仅能摄取 $63.5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的范围,而转盘半径 195 mm 需要 6 张照片才能满足要求,在拼裁这 6 张照片时,需确定各照片之间的界线,方法是在转盘表面上粘上毫米方格纸,每一定间隔用数码标记,确定 6 张照片的位置,然后分别摄取该 6 张照片,打印后找出对应各照片的交界线,以便实验时的照片按此界线拼裁,得到完整的流场。

4.3 实验过程

按选定的参数,调整同步器、相机、镜相位移控制器及计算机软件的参数选项。

启动主鼓风机,二次鼓风机及转盘马达,使其转速或风量达到设定值。操作计算机,按标定的 6 个位置各拍 8 张照片,将照片取名后存入硬盘。轴向位置取三个,分别是离开转盘 3 mm 、 7 mm 和 13.5 mm 。数据处理时,首先选择对速度矢量的分析及显示的要求,然后得到整个照片的速度场,存入 vec 文件。用 Data Show 软件将每一位置的 8 张照片进行平均,存入 ave 文件。有时,由于轴向速度过大或粒子密度不够等原因,照片的局部会出现非正常零速度,必须除去后再取平均。

用 excel 软件打开同一截面上的 6 张 ave 文件,按图形拼裁的标定结果,将 6 张照片的速度矢量数据进行拼裁,得到整个截面的速度矢量数据文件。最后,用 tecplot 画出截面的速度场。

5 实验结果及讨论

采用上述的 PIV 实验方法,获得了圆盘空腔中离开转盘 3 mm 、 7 mm 和 13.5 mm 截面上速度流场。冷却流体流量为 $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$ 的情况下,离开转盘 3 mm

截面上,中心附近径向流速较大,达 18 m/s ,离开中心区域后,径向速度减小,受转盘的影响,周向速度增大,靠近边缘时,合成速度为 5 m/s 。离开静盘 3 mm 中心附近有较强的向心流,达 7.5 m/s 。由径向速度分量,在 $r < 120 \text{ mm}$ 为向心流动, $r > 160 \text{ mm}$ 为离开中心的流动。对离开转盘 7 mm 截面上的流场,因为该截面处于向心流和离心流回路的中间区域,流场较为复杂。冷却流体流量 $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ 的情况与 $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$ 相比,靠近转盘处的径向流速大大降低,静盘侧向心流的速度也大大减小,但是,向心流区域延伸至密封环以外,这表明,这种流场下,主流流体可以通过密封环进入圆盘空腔。图 5、图 6 分别为两种冷却流体流量下的速度流场分布。通过多次实验表明,冷却流体流量在 $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右是主流进

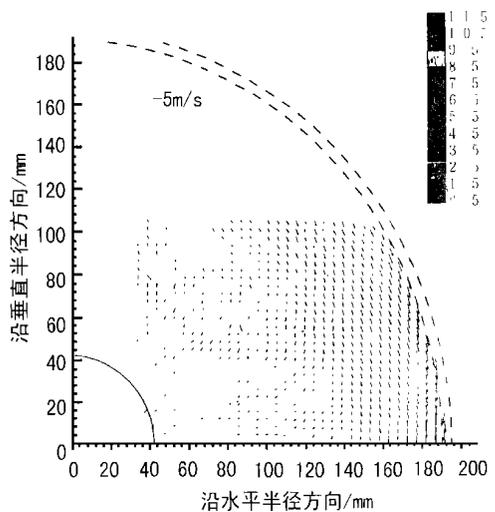


图 5 离开转盘 13.5 mm 截面上的速度流场(冷却流体流量 $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$)

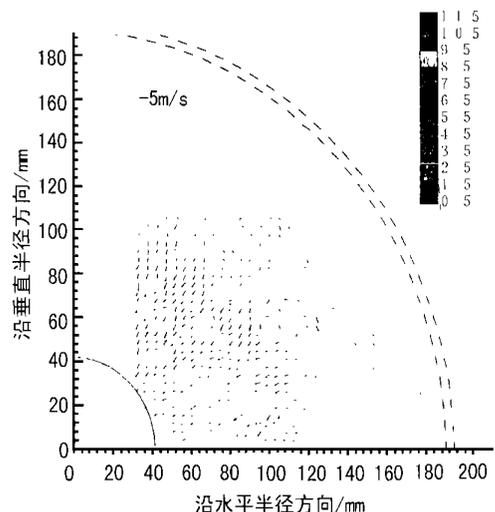


图 6 离开转盘 13.5 mm 截面上的速度流场(冷却流体流量 $0.024 \text{ m}^3/\text{s}$)

分配联箱气液两相流流型对垂直并联管分配特性的影响

(东北电力学院) 程卓明 周云龙

[摘要] 对垂直U型并联管系统低质量流量的流量分配特性进行了理论和实验研究, 获得气相和气液两相质量流量分配特性, 以及各分支管的流型记录。分析了分配联箱中流型对流量分配以及各分支管中流型的影响。

关键词: 气液两相流; 并联管; 流量分配

中图分类号: O 359

1 引言

影响气液两相流在垂直并联上升管中的分配特性的因素有很多, 且这种综合影响异常复杂。在高质量流量下, 分配联箱和汇集联箱中的工质压力的变化对并联管的流量分配有直接的影响^[1]。但是对质量流量比较小的工况, 分配联箱中的流型对各相分配的影响就相对较大了^[2]。至今为止, 对这方面的研究还很少。

本文通过实验研究了U型联接系统分配联箱中流型对流量分配及相分配的影响, 并对实验结果进行了归纳和分析。

收稿日期: 1998-08-27

收修改稿: 1998-10-12

入圆盘空腔的临界流量。

6 结论

(1) 本实验装置较好地模拟实际燃气轮机第一级叶轮前的几何结构和运行参数。

(2) 运用PIV实验测试技术, 结合装置的实际情况, 设计PIV的调节机构, 选择实验参数, 获得了圆盘空腔内不同截面上的流场, 在数据处理方法及流场显示方法上作了有益的改进。

(3) 实验结果显示, 密封冷却流体的流量, 圆盘空腔内的流场及主流进入空腔的发生, 三者之间有着密切的联系, 当冷却流体的流量接近 $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 主流就开始有少量进入空腔, 静盘侧流场的向心流也延伸至密封环。

2 实验系统及测量方法

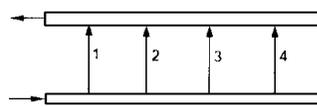


图1 实验并联管系统

全部实验是在东北电力学院流体力学实验室空气-水两相流实验系统上进行的。本实验系统

是根据Harwell的四管布置测量系统^[4]设计的。

试验参数范围如下:

压力 $P=0.1 \sim 0.25 \text{ MPa}$

温度 $T=14 \sim 22 \text{ }^\circ\text{C}$

气相体积流量 $Q_g=0.6 \sim 30 \text{ m}^3/\text{h}$

液相体积流量 $Q_l=0.06 \sim 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$

实验设备尺寸:

分配/汇集联箱内径 $D=21 \text{ mm}$

分支管长度 $l=1.2 \text{ m}$

分支管内径 $d=15 \text{ mm}$

取压环室间距离 $l'=0.85 \text{ m}$

实验测量的参数: 空气体积流量、水体积流量、

(4) 研究结果为计算机模拟圆盘空腔中的流场提供了实验数据。

参考文献

- [1] Landreth C C and Adrian R J. Measurement and refinement of velocity data using high image density analysis in partial image velocimetry. Appl. of Laser Anemometry to Fluid Mech., Springer Verlag, 1989, 535.
- [2] Raffel M and Komperhens J. Theoretical and experimental aspects of imageshifting by means of a rotating mirror system for partial image velocimetry. Meas. Sci Technol. 1994 (6): 795~808.
- [3] Roy R P, Agarwal V, Devasenathipathy S, He J, Meier L B, Kim Y W, Howe J and Ho K. A study of the flow field and convective heat transfer in a model rotor-stator cavity. To be presented in the ASME winter conference 1997.
- [4] Waggot J, Bhavnani S H, Khodadadi J M and Goodling J S. An experimental study of fluid flow in disk cavities. ASME Journal of Turbomachinery, 1992, 114, 454~461.

(静 编)

observed when the blade spacing ratio has a variation interval of 2.5 ~ 3.0. **Key words:** pulverized coal concentrator, mound body, louver, resistance characteristics

火电厂水力输灰系统阻垢防垢研究 = **A Study of Scale Inhibition and Prevention for a Thermal Power Plant Wet-ash Transportation System** [刊, 中] / Chen Yafei, Gao Xiang, Fang Mengxiang, et al (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

Discussed in this paper are the scale prevention measures for an ash water transportation system and the scale inhibition mechanism of scale inhibiting agents. An experimental study of scale inhibition and prevention was conducted of a kind of utility boiler-fired coal with ash rich in CaO, addressing such a variety of topics as the scale characteristics and scale inhibition rate when scale inhibitors of various formulas are adopted, and the scale inhibition and prevention effectiveness when steel/rubber combination pipes and ash water precipitation tank are employed. A comparison analysis has also been performed with respect to different kinds of methods used. **Key words:** wet ash transportation, scale, scale inhibition and prevention

各向异性散射介质的辐射传热分析 = **An Analysis of Radiation Heat Transfer in Isotropically and Anisotropically Scattering Media** [刊, 中] / Xing Huawei, Ruan Jian, Zheng Chuguan (Central China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

With the use of a combined Monte-Carlo and Zone method of numerical calculation (called MCZ method for short) an analysis was conducted of the radiation heat transfer in isotropically and anisotropically scattering media. For convenience of comparison an one-dimensional slab system is employed. With the help of specially prepared programs calculated respectively are the hemispherical reflectivity and transmissivity of isotropically scattering absorbing media and linear phase-function anisotropically pure scattering media as well as the radiation heat transfer in flat slabs of linear phase-function anisotropically scattering absorbing media. Fairly satisfactory conclusions were obtained. **Key words:** hemispherical reflectivity, hemispherical transmissivity, MCZ method, isotropical scattering, anisotropical scattering, phase function

用 PIV 测量法研究燃气轮机叶轮与导叶叶轮间的速度场 = **A Study of the Velocity Field Between a Gas Turbine Runner and Guide Vane Wheel with the Use of PIV Measurement Method** [刊, 中] / Zhao Yabin (Jiangsu Petrochemical Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

A test rig for the experimental research of fluid flow condition inside the cavity ahead of a gas turbine first stage blade wheel is described along with the test method and results. Particle imaging technology was employed to measure the velocity field inside the disk cavity. Analyzed is the effect of the magnitude of seal gas flow rate on the flow field at various locations. Also studied is the relationship between the critical parameters of main flow into the cavity and the flow field. **Key words:** gas turbine, experiment, PIV system

分配联箱气液两相流流型对垂直并联管分配特性的影响 = **The Effect of Gas/Liquid Two-phase Flow Pattern in a Distribution Header on the Distribution Characteristics of Vertical U-Junction Pipe System** [刊, 中] / Cheng Zhuoming, Zhou Yunlong (Northeast Power Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1999, 14 (4). -

A theoretical and experimental study was conducted of the flow distribution characteristics of low-mass flow in a vertical U-junction parallel-connected pipe system. Obtained were the distribution characteristics of gas phase and gas/liquid two-phase mass flow rate as well as the flow pattern record of various branch pipes. Also analyzed is the effect of flow pattern in distribution headers on the flow distribution and the flow pattern in various branch pipes. **Key words:** gas/liquid two-phase flow, parallel pipes, flow distribution

双调风燃烧器锅炉燃烧参数优化的试验研究 = **An Experimental Study on the Optimization of Combustion Parameters of a Dual Air-Register Burner Boiler** [刊, 中] / Hu Jianguo, Huang Yuming, et al (Zhejiang Provincial