

旋转对气冷涡轮内部流场影响的 PIV 测量

袁 锋, 竺晓程, 杜朝辉

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030)

摘 要:采用 PIV 测速技术分别对旋转和不旋转两种情况下的气冷涡轮内部流场进行实验测量, 研究旋转对气冷涡轮内部流场的影响。同时改变吹风比 ($M=1.5, 2$), 研究不同射流吹风比对涡轮流场的影响。实验结果表明, 冷却孔射流下游附近存在明显的尾迹区域。旋转情况下涡轮内部流场中存在的离心力、哥氏力的作用使射流与主流的掺混流场结构改变。与静止涡轮叶栅流场相比, 旋转对叶片压力面侧流场的影响明显大于吸力面。同时, 吹风比增大使射流与主流掺混流场区域以及射流尾迹区的范围扩大。

关 键 词: 旋转气冷涡轮; PIV 测量; 吹风比; 流场

中图分类号: TK474. 7; TP606 文献标识码: A

前 言

气冷涡轮内部流场由于喷射冷气的引入, 使其流场结构变得更加复杂, 尤其是采用离散孔喷射冷气时, 导致了一种极为复杂的三维流场结构^[1]。射流对主流及射流间的流动结构对涡轮气膜冷却效率、气动性能等影响较大, 了解射流与主流的掺混机理有助于在气膜冷却中抑制射流对主流的穿透, 减弱高温主流对叶片的直接冲刷, 提高冷却效率。

近年来, 国内外研究者对冷气掺混流场和绝热气膜冷却效率进行了大量的实验研究。由于客观实验条件的限制, 许多实验研究都是基于平板、曲面和平面叶栅来进行的。Shi Honghui 采用直丝和单斜丝热线对平板射流与主流掺混的流场进行了实验研究^[2]。Thole K 和 Ajersch P 等人分别采用 LDV 技术对平板射流与主流掺混流场进行了实验测量^[3~4], 研究不同冷却孔出口形状、吹风比对流场的影响。Marc D. Polanka 采用 LDV 对透平叶片前缘主流和射流掺混的复杂流场进行了实验研究^[5]。Stefan Bemsdorf 采用非接触式 PIV 测速技术对平板射流与主流掺混流场进行实验测量^[6], 研究不同的孔形状、

射流角度和吹风比情况下流场结构的变化。

徐红洲用 X 型双丝热线探头对平板上扇形孔射流下游流场进行了测量^[7]。陈浮利用气动探针测量和墨迹显示方法^[8], 对不同实验方案下吸力面带气膜冷却的某型涡轮导向叶栅流场结构进行了实验研究。

涡轮在旋转时, 其内部流场结构和叶片的换热特性与静止叶栅或平板是明显不同的。在旋转状态下, 存在着离心力、哥氏力以及非等温场下的浮升力, 在这些力的作用及相互作用下, 叶片内部的流动和换热是相当复杂的。在旋转状态下研究气冷叶片的流场和换热的难度远远高于静止状态的研究, 目前国内外只有少量的实验研究是在涡轮旋转状态下完成的。本文采用非接触式 PIV 测速技术, 对气冷涡轮内部流场在不旋转和旋转两种情况下进行实验测量, 研究旋转对气冷涡轮内部流场结构的影响。同时改变孔射流吹风比, 研究不同吹风比对流场的影响。

1 实验装置及 PIV 测试技术

1.1 实验装置

图 1 是 PIV 测量实验装置示意图。实验设备主要由低速直流式风洞、PIV 系统、涡轮和小孔射流供气系统等几部分组成。实验所用的低速风洞中部加有整流格栅, 用来减少主流紊流度。利用全数字变频调速器(变频器的变频范围为 0~50 Hz)调节轴流风机的转速来达到所需的主流速度, 该风洞的稳定风速范围为 0.5~15 m/s。

1.2 PIV 测试技术

实验所使用的二维 PIV 测量系统由丹麦的 Dantec 公司生产。图 2 是实验测量的 PIV 系统装置图,

从图中可以看出 PIV 图像拍摄系统由激光源、CCD 相机和处理器等组成。实验采用两台独立激光器, 可以很方便地选择两个激光脉冲之间的时间间隔, 时间间隔可以达到微秒级, 扩大了速度测量的范围。在实验中, 必须保证两台激光器形成的片光源有良好的重合度, 以保证测量在同一测量区域上, 而且强度最好相近。本实验采用 Kodak Megaplug ES 1.0 互/自相关数字相机, 分辨率为 1018×1008 像素。在相机镜头前还加上一个标准的 60 mm 镜头 (Nikon Micro Nikkor 60/2.8), 在实际测量中, 调节镜头就可以保证 CCD 相机的焦平面和被测量平面一致。实验的示踪粒子采用烟雾发生器产生的油烟粒子, 其对流场的干扰小, 跟随性强, 且光的散射性能较好。

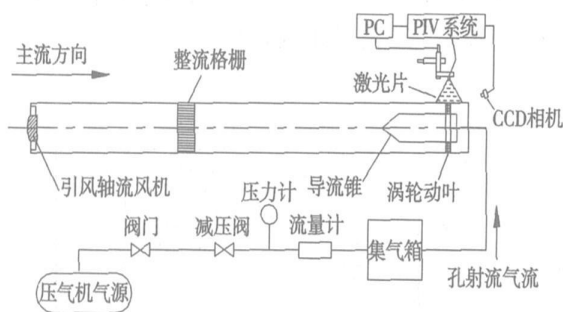


图 1 气冷涡轮流场实验装置示意图

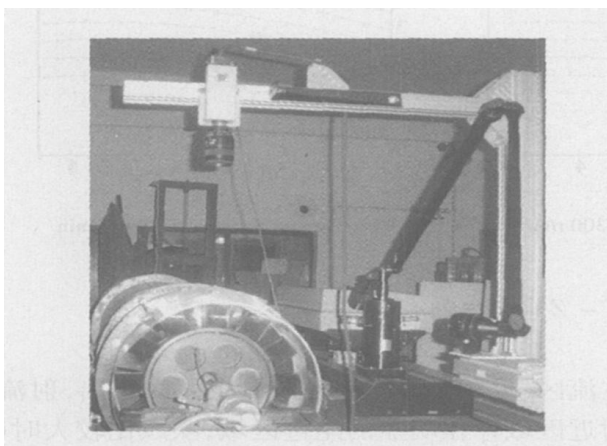


图 2 PIV 测量装置

在 PIV 图像处理技术中, 一般将 CCD 相片划分成许多方形小区域, 即查询区 (Interrogation area), 图像的相关处理实际上是在每一块查询区进行的, 得到每一块查询区所有示踪粒子的平均速度。所有查询区的速度构成一个完整流动区域的速度场。为获得示踪粒子在两次曝光间隔内的位移, 需要获取

CCD 相机两次曝光时刻的示踪粒子图像进行相关处理, 目前较常用的信号处理技术是采用快速傅立叶变换的互相关技术。速度矢量图中速度矢量的数目取决 CCD 相机中像素数目以及所采用的查询区大小。完全独立的速度矢量数目为:

$$\frac{NO_{row}}{N_{int}} \times \frac{NO_{col}}{N_{int}} \quad (1)$$

其中: NO_{row} 、 NO_{col} —CCD 相机底片上水平方向和垂直方向上的像素总数目; N_{int} —方形查询区边长方向上覆盖的像素数目。 N_{int} 的选择受到速度变化范围和测量空间分辨率的限制。

一般对于自相关模式, N_{int} 取 64 个像素, 而对于互相关模式, N_{int} 取 32 个像素。因此对于分辨率相同的 CCD 相机, 采取互相关模式要比自相关模式能获得更多的速度矢量, 从而可以提高测量流场的空间分辨率。

在实际处理时, 为了充分利用查询区的边界信息, 一般将查询区域重叠布置。实验中采用推荐值在行列方向的重叠值都取 25%, 则速度矢量数目为:

$$\frac{NO_{row}}{(1-25\%)N_{int}} \times \frac{NO_{col}}{(1-25\%)N_{int}} \quad (2)$$

表 1 实验模型参数

参数	数值
涡轮入口风速/ $m \cdot s^{-1}$	7
涡轮出口静压/kPa	101.3
冷却孔径 D /mm	2
冷却孔间距 S/D	3
冷却孔射流角度/ $^\circ$	90
吹风比 M	1.5, 2
主流气体温度/K	290
射流气体温度/K	290

1.3 实验叶片模型参数及测量位置

实验的涡轮叶片模型采用某型号涡轮叶片, 如图 3 所示。叶片压力面和吸力面各开了一排 (3 个) 冷却孔, 具体实验参数见表 1。孔射流的吹风比 M 定义为:

$$M = \frac{\rho_j \bar{v}_j}{\rho_0 \bar{v}_0} \quad (3)$$

其中: ρ_j 、 ρ_0 —孔射流和涡轮叶片入口气流的平均密度; \bar{v}_j 、 \bar{v}_0 —孔射流和涡轮入口气流的平均速度。

以 50% 叶高处 (即中间孔圆心) 为零点, 在 $Y-Z$ 坐标平面上沿叶片径向取 7 个测量面 ($X/D = -1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5$), 测量面垂直叶片表

面如图 3 所示。

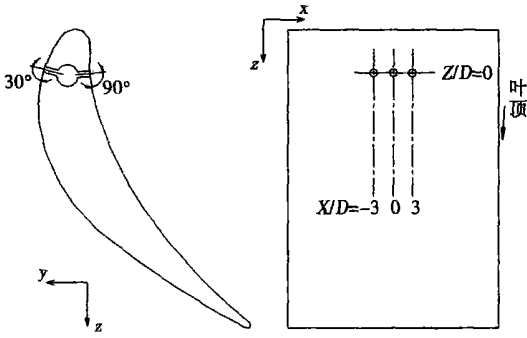


图 3 实验叶片和小孔位置

2 实验结果与分析

图 4 给出了涡轮叶片吸力面不同叶高位置 (X/D

$D=0, 1.5$) 的 $Y-Z$ 面上的速度矢量图, 同时比较了涡轮不旋转 (0 r/min) 和旋转 (300 r/min)、不同吹风比 ($M=1.5, 2$) 情况下流场的变化。在 $X/D=0$ 处, 可以明显看到射流与主流的掺混情况。

比较图 4(a) 和图 4(b), 旋转使得吸力面侧孔射流速度略微减小, 与主流的掺混区域范围也较不旋转情况下小。这是由于旋转涡轮内部流场中存在离心力、哥氏力的作用及其相互作用。离心力方向是和旋转轴 (z 轴) 相垂直的远离轴心的径向方向。哥氏力方向是角速度矢量方向和速度矢量方向叉乘方向的相反方向, 如图 5 所示。在流速一定的情况下, 随着转速 n 的增大, 哥氏力作用就越强。在涡轮叶片气腔内部, 冷却气流进气的径向速度 (x 方向) 会产生 $-y$ 方向的哥氏力, 这个方向的哥氏力把流体推向压力面, 导致压力面孔射流出口流量略有增加, 而吸力面孔射流流量相应减少。

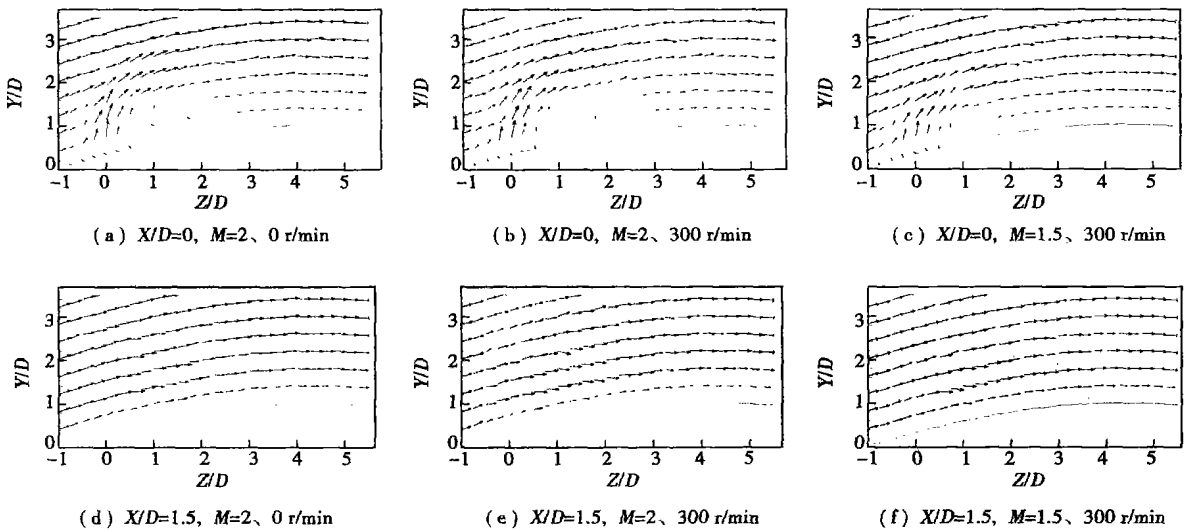


图 4 吸力面不同叶高位置 ($Y-Z$) 的速度矢量

$X/D=1.5$ 处于两孔中间区域, 在涡轮不旋转情况下, 该处 $Y-Z$ 面流场速度矢量方向受射流影响较小, 如图 4(d) 所示。在涡轮转速为 300 r/min 时, 由于旋转产生的离心力和哥氏力作用使射流产生径向方向的速度分量, 对 $X/D=1.5$ 处 $Y-Z$ 面上的速度分布也产生了影响, 如图 4(e) 所示, 孔下游附近局部区域的流场发生了变化。

比较不同吹风比 ($M=1.5, 2$) 情况下 $Y-Z$ 面流场的变化, 如图 4(b) 和图 4(c) 所示。吹风比越大, 射流与主流掺混区域的范围越大, 射流更多的进

入主流区 (见图 4(b))。从图中还可以看出, 射流下游附近区域存在明显的尾迹区域, 吹风比较大时 ($M=2$), 尾迹区域的范围也较大, 孔下游 3 倍孔径范围内受到射流尾迹的影响明显。比较图 4(e) 和图 4(f), 在 $X/D=1.5$ 处, 射流的影响范围和强度也随着吹风比的减小而减少。

图 6 是叶片压力面在不同叶高位置 ($X/D=0, 1.5$) 的 $Y-Z$ 面上的速度矢量图。如上述对吸力面的分析, 旋转状态下涡轮内部流场中存在的离心力、哥氏力的作用及其相互作用对压力面侧流场的影响

则比较明显, 如图 6(a)和图 6(b)、图 6(d)和图 6(e)所示。

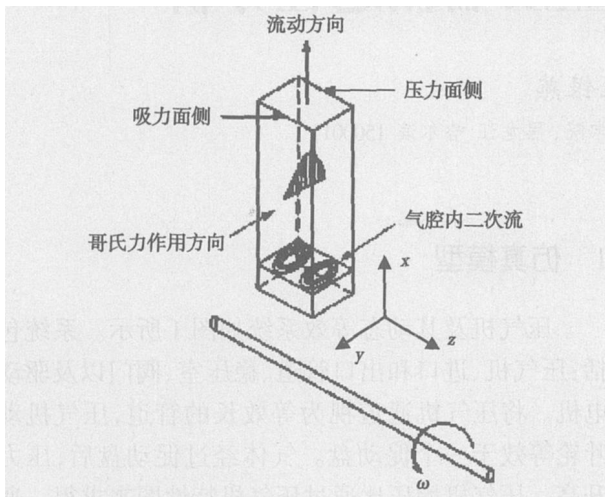


图 5 旋转系下叶片气腔内哥氏力作用示意图

当涡轮转速为 300 r/min 时, 在叶片内部的射流空气中, 旋转产生的哥氏力把射流流体推向压力

面, 导致压力面孔射流出口流量较不旋转时略有增加, 与涡轮不旋转时相比, 射流对主流的影响区域增大, 如图 6(a)和图 6(b)所示。在两射流孔中间区域 ($X/D=1.5$), 旋转对该处流场的影响也比吸力面更为明显(见图 6(d)和图 6(e)), 在 $0 < Z/D < 3$ 和 $-4 < Y/D < -1$ 区域, 可明显看到射流对主流的影响, 该区域流体的速度在远离叶片压力面方向上 ($-Y$ 方向) 增大, 旋转使得射流更多的进入主流区而不是贴附壁面流动。这一点与 Dring R. P 和 Takeishi K 的结论一致^[9-10], 他们对旋转状态下涡轮叶片表面温度和绝热冷却效率的实验测量得出, 旋转对压力面的影响比吸力面更为显著, 旋转时压力面冷却效率明显降低, 而吸力面的变化并不明显。

在压力面侧, 不同吹风比 ($M=1.5, 2$) 对 $Y-Z$ 面流场的影响如图 6(b)、(c)所示, 与吸力面侧类似, 吹风比减小 ($M=1.5$) 使得射流对主流的穿透区域明显减小(见图 6(c))。同样, 在压力面孔射流下游附近产生明显的尾迹区, 尾迹区域的范围随着吹风比的减小而减小。

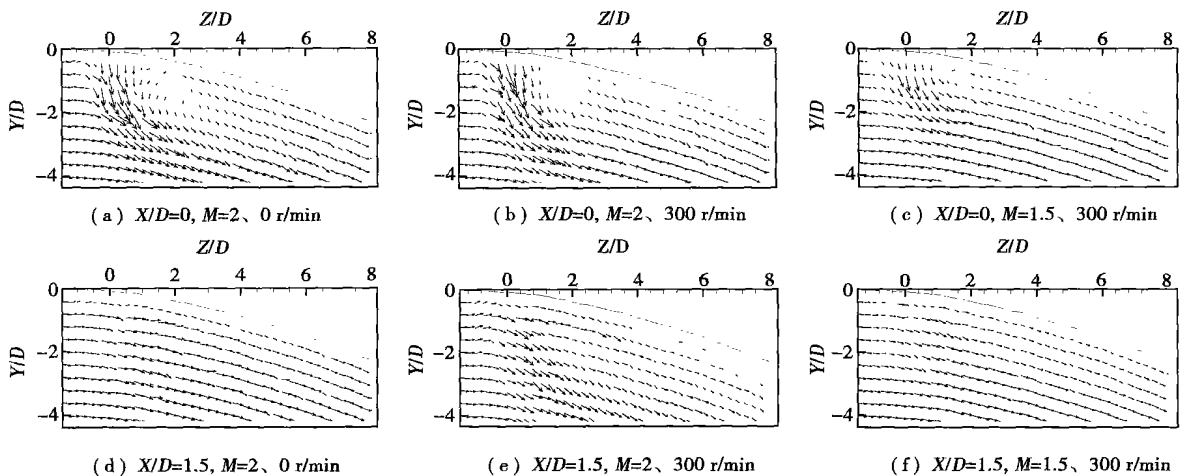


图 6 压力面不同叶高位置 ($Y-Z$) 的速度矢量

3 结 论

采用非接触式 PIV 测速技术, 对旋转和不旋转两种情况下的气冷涡轮内部流场进行了实验测量, 同时改变孔射流吹风比, 研究不同吹风比对流场的影响。实验结果表明:

(1) 采用非接触式 PIV 测速技术, 测量得到涡轮叶片吸力面和压力面侧射流与主流的掺混流场以

及冷却孔射流下游附近存在的尾迹区域;

(2) 旋转状态下, 涡轮内部流场中存在离心力、哥氏力的作用及其相互作用, 但这些作用力对叶片压力面和吸力面侧流场的影响并不一样。旋转对叶片压力面侧流场的影响明显大于吸力面;

(3) 吹风比增大, 射流更多的进入主流区域, 射流下游尾迹区域范围也相应扩大。

(下转第 128 页)

动,其振幅分别为 5 000 r/min、0.122 MPa 和 7.11 kg/s,稳压室压力振幅为 0.028 7 MPa。与转动惯量较大(见图 7)时相比,转速振幅增加了 21.7 倍,出口压力增加了 110%,流量增加了 17%。其转速振幅变化较大,是因为转动惯量减少。由图 12 可知,喘振频率为 4.6 Hz,总的谐波失真度%THD 为 26.34。

3 结 论

(1) 为了研究压气机喘振,延伸了压气机喘振线左边的特性曲线,建立了压气机系统动态模型。本文建模方法具有通用性,可用于预测压气机喘振,并且能满足压气机动态性能实时仿真的需要。

(2) 压气机喘振由实际系统的结构形状来决定。增加稳压室容积,将增加压气机转速的振幅、延长喘振周期;缩小转动惯量,也将增加压气机转速振幅,缩短喘振周期;但对压气机的流量振幅和稳压室的压力振幅改变不大。

(3) 采用了快速傅立叶变换和谐波分析来检测压气机喘振。计算结果表明:压气机系统喘振频率主要集中在 3~10 Hz。该方法计算量较少、实时性好,易于实现在线检测。

参考文献:

[1] MOORE F K, GREITZER E M. A theory of post-stall transients in axial compression systems. part I: development of equations[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1986, 108: 68-76.

[2] FINK D A, CUMSTY N A, GREITZER E M. Surge dynamics in a free-spool centrifugal compressor system[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1992, 114: 321-332.

[3] JAN TOMMY GRAVDAHL. Modeling and control of surge and rotating stall in compressors[D]. Norway: Norwegian University of Science and Technology, 1998.

[4] FRANCISCUS P T WILLEMS. Modeling and bounded feedback stabilization of centrifugal compressor surge[D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2000.

[5] CORINA H J MEULEMAN. Measurement and unsteady flow modelling of centrifugal compressor surge[D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2002.

[6] THEOTOKATOS G, KYRIATOS N P. Diesel engine transient operation with turbocharger compressor surging[R]. 2001 Sae World Congress, 2001-01-1241.

[7] SCHMITZ M B, FITZKY G. Surge cycle of turbochargers; simulation and comparison to experiment[s]. Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, GT2004-53036.

[8] 王云辉, 刘敏, 孙聿峰, 等. 湿压缩对压缩系统失速后瞬态响应得影响分析[J]. 热能动力工程, 2003, 18(1): 67-70.

[9] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988.

[10] GALINDO J, SERRANO J R, GURDIOLA C, et al. Surge limit definition in a specific test bench for the characterization of automotive turbochargers[J]. Experimental Thermal and Fluid Science 2006 30: 449-462.

[11] 赵红怡, 张常年. 数学信号处理及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 北京工业出版社, 2002.

[12] 马良玉, 段巍, 王兵树, 等. 轴流风机通用性能数学模型[J]. 热能动力工程, 2001, 16(2): 195-198.

(编辑 渠源)

(上接第 123 页)

参考文献:

[1] FRIC T F, ROSHKO A. Structure of the near field of the transverse jet //Proceedings of 7th Symposium on Turbulent Shear Flows [C]. 1989. 351-376.

[2] SHI HONGHUI, KENJI KIRIYAMA, MOTOYUKI ITOH. Hot wire measurement of turbulent boundary layer on a film cooling plate with diffusion holes[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2001(2): 15-23.

[3] THOLR K, GRITSCH M, SCHULZ A, et al. Flowfield measurements for film-cooling holes with expanded exits[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120: 327-335.

[4] AJERSCH P, ZHOU J M, KETTLERS, et al. Multiple jets in a crossflow [J]. Detailed Measurements and Numerical Simulations, 1997, 119: 331-342.

[5] MARC D FOIANKA, CUTBIRTH J MMICHAEL, BOGARD DAVID

G. Three component velocity field measurements in the stagnation region of a film cooled turbine vane[J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124: 445-452.

[6] STEFAN BERNSDORT, MARTIN G ROSE, REZA S ABHARI. Modeling of film cooling- part I: experimental study of flow structure[J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128: 141-149.

[7] 徐红洲, 王尚锦, 刘松龄, 等. 气膜冷却流场的实验研究和数值模拟的分析[J]. 推进技术, 1998, 19(2): 47-53.

[8] 陈浮, 宋彦萍, 王仲奇. 吸力面上气膜冷却对涡轮叶栅流场影响的实验研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(2): 161-65.

[9] DRING R P, BLAIRM F, JOSLYN H D. An experimental investigation of film cooling on a turbine rotor blade[J]. Journal of Engineering for Power, 1980, 102: 81-87.

[10] TAKEISHI K, AOKI S, SATO T, et al. Film cooling on a gas turbine rotor blade[J]. Journal of Turbomachinery, 1992, 114: 828-834.

(编辑 渠源)

低温热能发电的研究现状和发展趋势 = **The Latest Research Findings Concerning Low-temperature Heat Energy-based Power Generation and its Development Trend** [刊, 汉] / GU Wei, WENG Yi-wu, WENG Shi-lie (College of Mechanical and Power Engineering under Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030), CAO Guang-yi (College of Electronic Information under Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 115 ~ 119

The utilization of low-temperature heat energy is of major significance because of its rich variety and huge quantity available worldwide. The current research results of low-temperature heat-energy power-generation technology are described along with its development trend. The above-mentioned technology is mainly used for solar-energy cogeneration systems, industrial waste heat-based power generation, geothermal power generation as well as power generation by utilizing biomass energy and ocean temperature difference etc. Nowadays, the research on low-temperature heat energy power generation has been mainly focused on working medium thermophysical properties, environmental protection performance and cycle optimization. The effective methods employed to raise the low-temperature and high-temperature heat energy power-generation efficiency involve research on the following cycles: hybrid working medium cycle, Kalina cycle, recuperative and ammonia-absorption type refrigeration cycle. In addition to the above, system optimized control based on finite time thermodynamics etc. was also studied. **Key words:** low-temperature heat energy, organic matter Rankine cycle, thermal power generation

旋转对气冷涡轮内部流场影响的PIV测量 = **PIV Measurements of the Impact of Rotation on the Flow Fields in a Gas-cooled Turbine** [刊, 汉] / YUAN Feng, ZHU Xiao-cheng, DU Zhao-hui (College of Mechanical and Power Engineering under Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 120 ~ 123, 128

Experimental measurements have been performed of the flow fields in an air-cooled turbine by using PIV (Particle Image Velocimeter) speed measurement technology under both rotating and non-rotating conditions to study the impact of rotation on the flow fields in the air-cooled turbine. In the meantime, the impact of different jet-flow air blowing ratios on the flow fields in the turbine was also studied by changing the air blowing ratio ($M=1.5, 2$). The test results show that there exists an evident wake zone near the downstream of the cooling hole jet-flow. Under the rotating condition, the centrifugal and Coriolis force present in the flow fields inside the turbine has changed the mixing-dilution flow field configuration of the jet flow and main stream. Compared with the flow fields in a stationary turbine cascade, the impact of rotation on the flow fields at the blade pressure side is obviously larger than that at the blade suction side. Meanwhile, an increase in air blowing ratio will expand the area of mixing-dilution flow field zone of the jet-flow and main stream and the jet-flow wake zone area. **Key words:** rotary air-cooled turbine, PIV (Particle Image Velocimeter) measurement, air blowing ratio, flow field

压气机动态模型的建立及喘振过程分析 = **Establishment of a Dynamic Model for a Compressor and Analysis of the Surge Process** [刊, 汉] / WANG Wei-cai, WANG Yin-yan (College of Power and Energy Source Engineering under Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(2). — 124 ~ 128

In environment SIMULINK, a dynamic mathematical model for a compressor has been established. To simulate the compressor surge and rotating stall phenomenon, the characteristics chart of the compressor was extended to a negative flow zone with the time delay of gas passing through the compressor being taken into consideration. The compressor surge process has been simulated and the pressure signals of the compressor have undergone a fast Fourier transformation. The compressor surge has also been tested. The simulation results show that the model can forecast the oscillation frequencies of pressure, flow rate and rotating speed as well as relevant amplitudes during the compressor surge. Structural parameters such as the rotating inertia of the compressor system and the volume of the pressure stabilizing chamber etc. may influence the surge characteristics. The model displays good dynamic regulation characteristics and can be used for a compressor control system, offering benefits of a wider-ranging practical applicability. **Key words:** compressor, dynamic model, surge, fast Fourier transformation