

复合角双射流气膜冷却的研究

王 湛, 刘建军, 安柏涛, 张 超
(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190)

摘 要: 采用数值模拟方法, 研究了不同吹风比下孔排间距对复合角双射流气膜冷却特性的影响。结果表明, 较小的孔排间距形成的反肾形涡为上下结构且不对称, 冷却效果提高有限; 而较大的孔排间距有利于形成左右对称的反肾形涡, 能够在下游形成大面积的展向冷气覆盖, 同时射流更好地贴附于壁面, 大大提高了冷却效率; 并将该结构应用到某重型燃气轮机静叶上, 取得了良好的冷却效果。

关 键 词: 气膜冷却; 双射流; 孔排间距; 反肾形涡

中图分类号: TK474.7⁺1 文献标识码: A

引 言

气膜冷却作为一种重要的冷却手段, 在燃气透平中得到了广泛的应用。过去应用较多的是圆柱气膜孔, 但是当吹风比较大时容易使冷气脱离被冷却壁面, 从而降低冷却效果^[1~2]。Leylak 等人的数值计算表明^[3], 在气膜冷却射流的下游存在一对旋转方向相反的肾形涡, 该肾形涡会把主流卷入壁面附近, 随着射流动量的增大, 该肾形涡的强度也增大。为了降低圆柱孔的射流动量, 很多学者采用扩张型气膜孔来提高冷却效果^[4], 其中扇形扩张孔是典型的代表, 扩张孔的作用主要是降低了射流出口的动量, 减弱了肾形涡的强度, 使射流较好的附着在被冷却表面上。Gao 和 Han 等人的实验研究表明^[5~6], 对于叶片前缘气膜冷却, 在高吹风比下扩张孔的冷却效率要好于圆柱孔, 但是随着吹风比的增大, 射流与主流的掺混加剧, 冷却效率的下降也更迅速。同时, 扩张孔的加工制造也存在一定的困难^[7]。除了扩张孔外, 带有复合角的圆柱孔也是一种改进方式, 这种改进使得射流下游的一对肾形涡变成了单涡, 同时使射流在冷却表面的展向覆盖也有所增大, 不过仍然无法避免较大吹风比时射流脱离表面的现象。Bohn 等人提出了一种带有复合角的双排射流孔的改进方法^[8~10], 使得射流下游出现一对自旋方

向相反的反肾形涡, 这种涡可以使射流在较大的吹风比时仍然贴附于被冷却表面。李雪英等人对该双射流气膜孔和普通复合角气膜孔做了比较^[11], 肯定了该双射流方式的优点。韩昌等的实验研究表明^[12], 复合角双射流气膜冷却在中等吹风比时冷却效率高于扇形扩张孔。目前关于复合角双射流气膜冷却的研究当中, 都没有考虑孔排间距的影响。本研究主要通过改变孔排间距, 考察其对冷却效果的影响。

1 孔排间距对双射流冷却效果的影响

1.1 计算模型和边界条件

计算模型包括主流通道, 射流通道的和气膜孔 3 部分。如图 1 所示, 双射流气膜孔由两排复合角相反的气膜孔构成。考虑到展向(y 方向)的周期性, 计算区域选取前后两个气膜孔及其对应的主流和射流区域。其中, 气膜孔径 $d = 5 \text{ mm}$, 长径比 $L/d = 7$, 射流角 $\alpha = 30^\circ$, 复合角 $\beta = \pm 45^\circ$, 定义吹风比 $M = \rho_c V_c / \rho_m V_m$, 下角标 c 和 m 表示射流和主流, 绝热气膜冷却效率 $\eta = (T_m - T_{aw}) / (T_m - T_c)$, 其中 T_m 为主流恢复温度, T_c 为射流温度, T_{aw} 为绝热壁温。在所研究的算例当中, 所有的气膜孔出口中心的 y 坐标均为零。为了研究孔排间距的影响, 算例以所取孔排间距 s 分别为 $2.5d$, $3d$, $4d$ 和 $6d$ 。同时保证冷气流量相等, 扇形孔和双射流入口截面积应保持一致, 因此扇形孔入口直径 $D = \sqrt{2}d \approx 7.07 \text{ mm}$ 。

根据 Bohn 的结论^[8~10], 小吹风比的情况下该射流结构的优点不明显, 因此算例选取 $M = 1.0$ 和 $M = 1.5$ 两种较大的吹风比。主流和射流进口处均给定速度、温度和湍流度(5%), 主流出口处给定静压。通过改变射流进口的速度实现不同的吹风比。湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 两方程模型。计算采用商业软件 CFX11.0。

收稿日期: 2010-10-18; 修订日期: 2010-11-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)基金资助项目(2007CB210108)

作者简介: 王 湛(1981-), 男, 山东济南人, 现就读于中国科学院研究生院博士研究生。

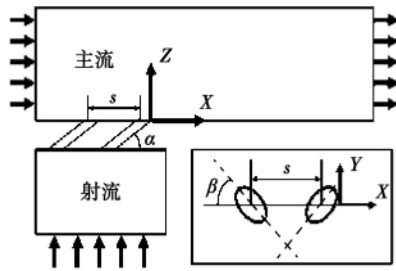


图 1 计算域和双射流气膜孔示意图

Fig. 1 Calculation domain and schematic drawing of a dual jet flow air film hole

1.2 计算结果及分析

图 2 是计算得到的不同孔排间距、不同吹风比时壁面的绝热气膜冷却效果分布云图,图 3 则是冷气下游沿展向平均的冷却效果的对比图,其中横坐标为 x/d 。可以看出,随着孔排间距的增大,气膜冷却效果整体上也增大。当吹风比 $M = 1.0$ 时,冷却效果是随着孔排间距单调递增的,但是整体的冷却效果与 $M = 1.5$ 时相比都比较低,展向平均最大值只是略高于 0.2,冷气在下游形成的是一条细长的冷却带,展向扩散较弱如图 2 所示。而当吹风比 $M = 1.5$ 时,冷却效果明显增大很多,在展向上也有明显的扩散,覆盖面积比 $M = 1.0$ 时大得多,整体上展向平均值均大于 0.15;随着孔排间距从 $3d$ 增大到 $4d$,冷却效果提高的幅度较大,尤其是从气膜孔出口到 $30d$ 之间的区域;随着孔排间距从 $4d$ 增大到 $6d$,冷却效果的提高幅度主要集中在气膜孔出口到 $20d$ 之间的区域,再往下游发展,冷却效果反而比孔排间距 $4d$ 时略低。扇形孔的情形和双射流不同,由于出口截面增大,射流的速度变化较小。随着吹风比的增大,冷却效果只是略有改善,而且气膜有效度始终是单调递减的。而且在下游形成的始终是细长冷却带,只是比吹风比 1.0 时的双射流的冷却带稍宽一些,但是展向扩展不明显。气膜有效度较大的区域是下游 $x/d < 10$ 的范围内,特别是气膜孔出口附近。

图 4 表示吹风比 $M = 1.5$ 时,不同流向截面 ($x = -2d, 5d, 10d$) 的速度矢量(顺流向看)对比和绝热气膜冷却效果的等值线图。扇形孔下游形成了一对自旋方向相反的肾形涡,如图 4(b)和图 4(c)所示,这和文献 [3] 中提到的圆柱孔下游的肾形涡相似,但是两个涡之间的距离更远一些,这是由于扇形孔出口截面扩张导致的。随着向下游的流动,肾形涡将主流卷入壁面附近,同时肾形涡也逐渐抬离

了壁面,冷却效率也因此逐渐降低。

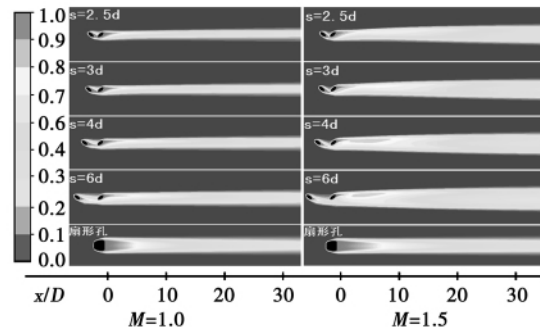


图 2 不同孔排间距时壁面绝热气膜冷却效果云图及其与扇形孔对比

Fig. 2 Cloud atlas showing the wall surface adiabatic air film cooling effectiveness at different hole-row spacings

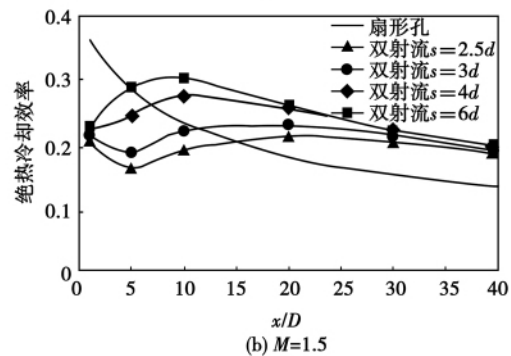
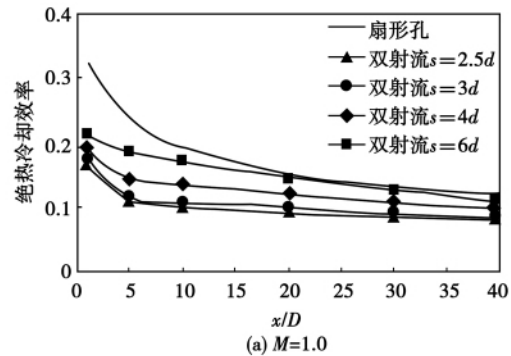


图 3 不同孔排间距时展向平均绝热气膜冷却效果分布及其与扇形孔对比

Fig. 3 Distribution of the average adiabatic air film cooling effectiveness along the aspect direction at different hole-row spacings

双射流所形成的涡也是一对涡,但是旋转方向和扇形孔相反。从图 4(a) 中看出,由于前排孔射流和主流存在 45° 夹角(前排孔的射流朝右),主流对射流有一个向左的力,因此射流形成了一个逆时针的单涡。随后遇到后排孔的射流(朝左),形成了一

个顺时针的单涡,两个涡叠加形成了反肾形对涡。同时还可以看到,孔排间距对反肾形涡有较大的影响。当孔排间距 $s/d = 2.5$ 和 3 时,前排孔的射流还没有完全发展,就遇到后排孔的射流,图 4 (b) 所示的 $x/d = 5$ 位置处,后排孔将前排孔的射流推离壁面,同时前排孔也将后排孔的射流压制在壁面上,形成了上下的一对涡。虽然这样能够使后排孔的气流贴附于壁面上,避免了普通圆柱孔的冷气吹离现象,但是也使前排孔的射流无法对壁面形成有效的保

护;图 4 (c) 的 $x/d = 10$ 处,前排孔的射流出现了回到壁面的趋势,但是此时因冷气与主流掺混其冷却能力已有损耗。而增大孔排间距至 $s/d = 6$ 时,前排孔的射流在遇到后排孔射流之前就已经得到充分发展,遇到后排孔射流之后,两股射流合在一起形成近似左右对称的一对涡,如图 4 (c) 所示,射流较好地贴附在壁面上,而且在展向上的覆盖也加强了,因此提高了气膜冷却效果。

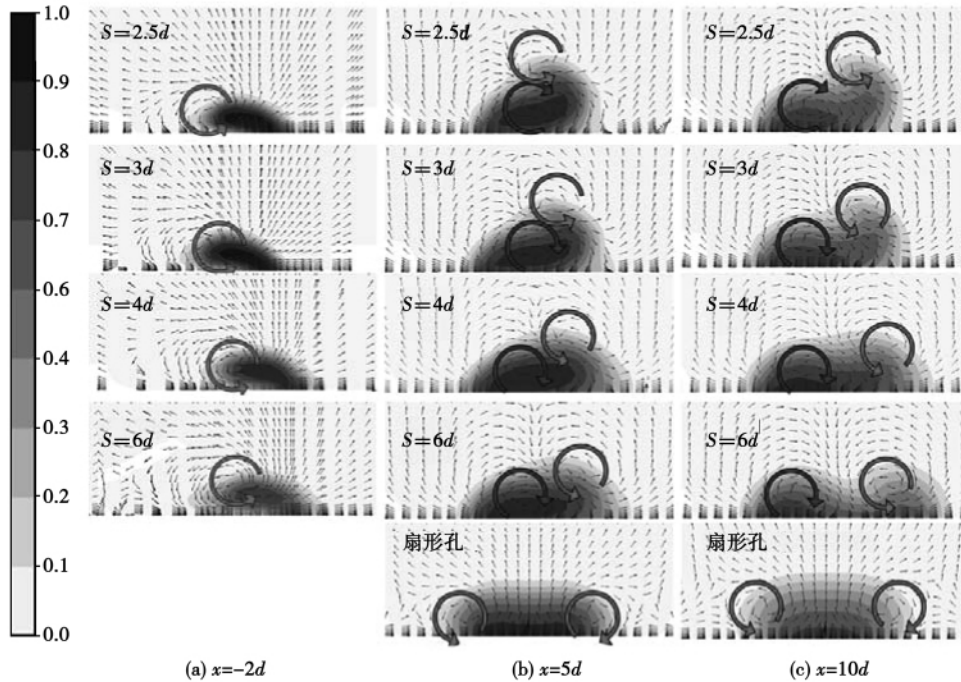


图 4 流向不同截面速度矢量图

Fig. 4 A drawing showing velocity vectors flowing to various sections

2 双射流气膜孔在燃气轮机导叶上的应用

燃气轮机进口导叶前缘通常采用多排孔气膜冷却,图 5 给出国产某重型燃气轮机第 2 ~ 5 排孔构成的冷却结构,对该叶片吸力面分别取孔排间距 s 为 $3d$ 和 $6d$ 进行比较研究。

研究方案如图 6 所示,分别是圆柱孔、扇形孔和双射流孔,孔排间距 s 分别为 $3d$ 和 $6d$ 。其中方案 2 中的扇形孔进口直径和方案 1 的圆柱孔直径相等 ($D = 0.8 \text{ mm}$) 和平板算例相似,双射流孔的孔径 d 为圆柱孔孔径 D 的 $1/\sqrt{2}$,以保证入口截面积、流量和吹风比相等。为了避免其它孔的影响,计算域仅包含主流和冷气腔以及第 1 和第 6 排孔。湍流模型采用 $k - \epsilon$ 两方程模型,边界条件具体设置是,在叶

栅主流进口给定总温、流量、流动方向和湍流度 10%,主流出口给定平均静压;在射流进口给定总温、流量、流动方向和湍流度 1%。

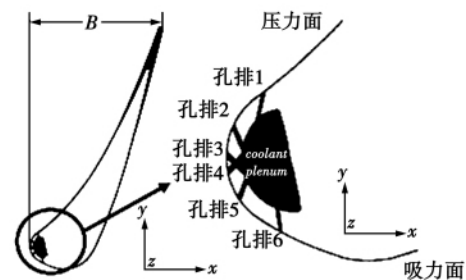


图 5 导叶前缘气膜冷却布置

Fig. 5 Air film cooling arrangement at the leading edge of guide blades

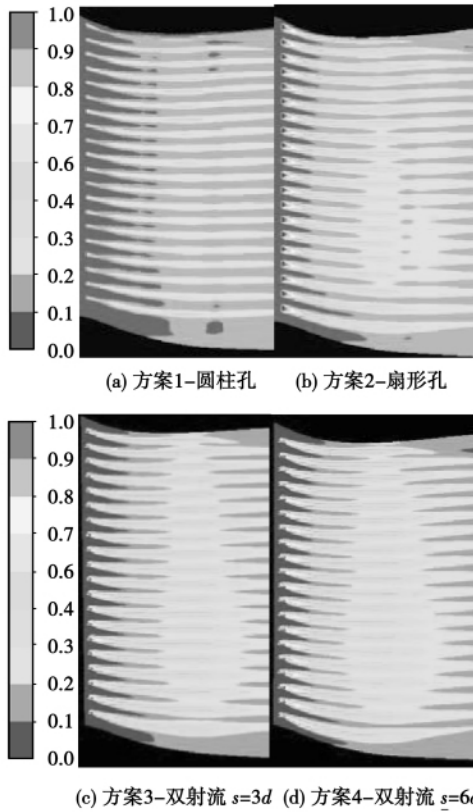


图 6 叶片吸力面气膜冷却效果云图

Fig. 6 Cloud atlas showing the air film cooling effectiveness on the suction surface of blades

图 6、图 7 给出的是四种方案叶片吸力面的绝热气膜冷却效果分布和展向平均气膜冷却效果的对比。可以看出,在叶片的吸力面,后三种方案的冷却效果都比方案 1 有较大提升。从整体上看,气膜冷却效果分布呈带状,说明冷气径向流动的趋势不明显。从图中也可以看出,后三种方案也有不同的地方,其中方案 2(扇形孔)的气膜冷却效率总体趋势是沿流向越来越低,冷却效果最高的区域集中在气膜孔附近,沿流向冷却效果降低得较为迅速,只有在下游 $60d$ 左右的区域略有升高。而方案 1、3 和 4 中,在前 $60d$ 的区域内冷却效果都是逐渐升高的,在 $60d$ 附近达到最大值。而采用双射流孔的方案 3 和 4,前 $60d$ 区域内冷却效果的绝对值较方案 1 整体上高 0.1 左右,虽然在气膜孔出口 $0 \sim 20d$ 范围内比方案 2 低,但是在 $20 \sim 80d$ 的范围内比方案 2 高 0.05 左右。增大孔排间距后,方案 4 在冷气下游前 $60d$ 的区域内,平均冷却效率较方案 3 高 $0.02 \sim 0.05$,尤其是在气膜孔附近的下游区域; $60d$ 之后的区域二者的平均冷却效果曲线基本重合。因此从整体来看,方案 4 的冷却效果最好。

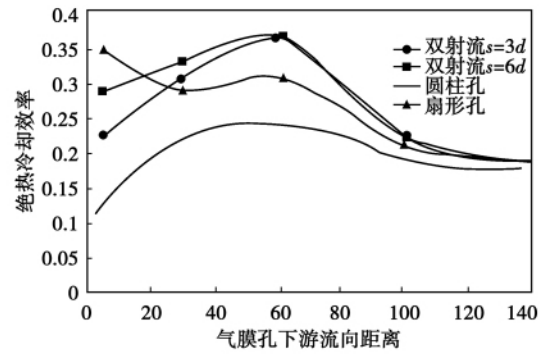


图 7 叶片吸力面气膜冷却效果分布

Fig. 7 Distribution of the air film cooling effectiveness on the suction surface of blades

3 结 论

本研究采用数值模拟方法,首先在平板上研究了双射流气膜冷却的特性,以及射流孔排间距对气膜冷却效果的影响,然后将双射流孔应用到某燃气轮机进口导叶上,分析了双射流孔在压力面和吸力面的不同冷却效果。

(1) 当吹风比较小时,双射流的优势没有发挥出来,下游的展向覆盖较小,冷却效率不高。吹风比较大时,增大双射流孔排间距,有利于形成左右对称的反肾形涡,使射流更好的贴附于壁面,同时扩展了下游展向的覆盖,提高冷却效率;

(2) 在不同的吹风比时,扇形孔都表现出较好的冷却效果,但是冷气主要集中在气膜孔出口附近,下游展向覆盖稍差一些,而且沿流线方向冷却效率衰减更快。

(3) 在靠近前缘的吸力面,由于主流的顺压加速效应,6倍排间距的双射流孔能够有效的覆盖较远的区域,而且整体气膜冷却效果最好。扇形孔的气膜冷却效果也比较高,但沿流向衰减较快。

参考文献:

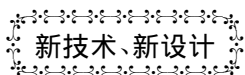
[1] HAN J, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. Taylor & Francis Books, Inc. 2000.

[2] SINHA A, BOGARD D, CRAWFORD M. Film-cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable Density ratio [J]. ASME Journal of Transaction, 1991, 113: 442 - 449.

[3] LEYLEK J, ZERKLE R. Discrete jet film cooling: A comparison of computational results with experiments [J]. ASME Journal of Transaction, 1994, 116: 358 - 368.

[4] BUKER R. A review of shaped hole turbine Film-cooling technology [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2005, 127: 441 - 453.

- [5] GAO Z H ,HAN J C. Film-cooling on a gas turbine blade pressure side or suction side with compound angle shaped holes [J]. ASME ,Journal of turbomachinery , 2009 , 131: 011019. 1 - 011019. 11.
- [6] GAO Z H ,HAN J C. Influence of film-hole shape and angle on showerhead film cooling using PSP technique [J]. ASME ,Journal of Heat Transfer , 2009 , 131: 061701. 1 - 061701. 11.
- [7] THOLE K ,GRITSCH M ,SCHULZ A. Flowfield measurement for film cooling holes with expanded exits [R]. IGTI Turbo Expo ,Paper 96 - GT - 174 ,1996.
- [8] KUSTERER K ,BOHN D. Double-jet ejection of cooling air for improved film-cooling [R]. ASME Paper ,GT - 2006 - 90854 2006.
- [9] KUSTERER K ,BOHN D. Double-jet film-cooling for highly efficient film-cooling with low blowing ratios [R]. ASME Paper ,GT - 2006 - 90854 2006.
- [10] KUSTERER K ,BOHN D. Influence of blowing ratio on the double-jet ejection of cooling air [R]. ASME Paper ,GT - 2007 - 27301 2007.
- [11] 李雪英 ,任 静 ,蒋洪德. 双射流气膜冷却的性能研究 [C]// 中国工程热物理年会会议论文集 ,082002 2008.
LI Xue-Ying ,REN Jing ,JIANG Hong-De. Study of the performance of dual-jet-flow air film cooling [C]// Proceedings of Chinese Society of Engineering Thermophysics Serial Number 082002 2008.
- [12] 韩 昌 ,李 佳 ,李雪英 等. 基于压力敏感漆 (PSP) 的双射流气膜冷却技术研究 [C]// 中国工程热物理年会会议论文集 ,092090 2009.
HAN Cang ,LI Jia ,LI Xue-ying et al. Study of dual-jet-flow air film cooling technology based on a pressure sensitive paint [C]// Proceedings of Chinese Society of Engineering Thermophysics Serial Number 092090 2009.



Flex Efficiency* 50 联合循环动力装置

据《Gas Turbine World》2011年5~6月刊报道,美国GE Energy能源公司最近推出其Flex Efficiency* 50型联合循环动力装置,该装置包含十个关键部件:燃气轮机、汽轮机、余热锅炉、发电机、循环水冷凝器、母线导管、空气进口装置、升压变压器、配电中心、离合器组成。

技术数据(50 Hz)

整套装置

净输出功率 ,MW

510

联合循环效率

61% +

NO_x排放(在15% O₂下)

30 ~ 50 mg/m³

CO 排放

30 mg/m³

燃料

天然气和馏出油

燃气轮机

型号

9FB

ISO条件下简单循环净额定输出功率 ,MW

338

排气流量 ,kg/s

745

排气温度 ,°C

623

燃烧室型号

DLN2.6 +

汽轮机

型号 进口

109D-14 三压再热 三缸

高压汽轮机蒸汽压力/温度 ,MPa/°C

15.2/585

发电机

型号

W28

输出功率 ,MW

550

电压 ,kV

21

余热锅炉

类型

三压 再热锅筒

控制系统

型号

具有 OpFlex* 的 Mark ,Vle 装置控制器

装置的运行能力:

- 在不影响效率或寿命的情况下,可在30 min内完成热启动;
- 在符合排放要求的情况下,可以每分钟51 MW的速度提高输出功率。

(吉桂明 摘译)

燃气轮机无焰燃烧技术的研究进展 = **Advances in the Study of Gas Turbine Flameless Combustion Technology** [刊, 汉] MAO Yan-hui, XU Gang, FANG Ai-bing (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190), HOU Le-yi (Research Center of Nanjing for Electromechanical Engineering Projects, Nanjing, China, Post Code: 210002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(5). - 501 ~ 506

The flameless combustion in gas turbines is characterized by its distributed flame, low pressure fluctuations and low pollution emissions etc. The authors summarized the influence of the temperature of the oxidization agent, oxygen concentration and flue gas circulation rate on the flameless combustion effectiveness as well as adaptability of flameless combustion to multi-fuels. Combustion models applicable for numerically simulating flameless combustion were given and the influence of the residence time of the product and sizes of the combustion chamber on the pollutant emissions was summed up. A summarization and feasibility analysis were performed of the flameless combustion chambers for gas turbines appeared worldwide and the base and application study on flameless combustion of liquid fuels were pointed out to be the focus for future studies. **Key words:** gas turbine, flameless combustion, low pollution emissions, distributed flame

尾迹对涡轮动叶气膜冷却影响的三维非定常数值模拟 = **Three-dimensional Unsteady Numerical Simulation of the Influence of the Wake on the Air-film Cooling of the Rotating Blades of a Turbine** [刊, 汉] YUAN Feng, ZHANG Cai-wen, HUANG Hai-zhou (Power Research Institute, Hubei Provincial Electric Power Experiment Academy, Wuhan, China, Post Code: 430077), ZHU Xiao-cheng (College of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(5). - 507 ~ 512

By using a numerical calculation method, a three dimensional unsteady numerical simulation was performed of the flow field and air-film cooling efficiency of rotating blades of a turbine with pre-guide stator blades. In this connection, the influence of the unsteady wake of the stator blades on the flow field around the air-film holes of the rotating blades of the turbine and the cooling efficiency was also studied. It has been found that at different phase positions of the rotor and stator blades, the presence of the wakes changes the distribution of the incoming flow from the inlet of the rotor blades of the turbine along the circumferential direction and produces a periodical influence on the mixing and diluting flow field of the jet and main flow, forcing the air-film cooling efficiency of the pressure surface fluctuated to a certain extent at different times while that of the suction surface fluctuated to a relatively small extent. **Key words:** gas turbine, unsteady wake, rotating turbine blade, air-film cooling, flow field, numerical simulation

复合角双射流气膜冷却的研究 = **Study of the Air-film Cooling of a Dual-jet-flow with a Composite Angle** [刊, 汉] WANG Zhan, LIU Jian-jun, AN Bai-tao, ZHANG Chao (Engineering Thermophysics Research Institute,

Chinese Academy of Sciences , Beijing , China , Post Code: 100190) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2010 26(5) . - 513 ~ 517

By using a numerical simulation method , studied was the influence of the hole-row spacing on the air-film cooling characteristics of a dual jet flow with a composite angle at different air ratios. It has been found that the reverse kidney shaped vortex formed by a relatively small hole-row spacing is of a upper and lower structure and unsymmetrical and the improvement of the air-film cooling effectiveness is limited while a relatively large hole-row spacing is favorable for forming a right and left symmetrical reverse kidney shaped vortex , capable of forming a large area cooling air coverage along the chord direction at the lower reaches and meanwhile making the jet flow attached to the wall surfaces better , thus greatly enhancing the cooling efficiency. Such a structure was applied in the stator blades of a heavy-load gas turbine and a good cooling effectiveness was achieved. **Key words:** air-film cooling , dual jet flow , hole-row spacing , reverse-kidney-shaped vortex

微型燃气轮机 CW 原表面回热器芯体内传热及阻力特性分析 = **Analysis of the Heat Transfer and Flow Resistance Characteristics Inside the Core Body of a Cross Wavy Primary Surface Recuperator in a Micro Gas Turbine** [刊 汉] / GUI Xiao-hong , LIANG Shi-qiang (Engineering Thermophysics Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Beijing , China , Post Code: 100190) , YAN Run-sheng , CHENG Yan-jun (Light Industry Environmental Protection Research Institute , Beijing , China , Post Code: 100089) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(5) . - 518 ~ 522

With a 3-D periodically fully developed numerical calculation model for a cross wavy (CW) primary surface recuperator in a micro gas turbine being established , analyzed were the heat transfer and flow resistance characteristics inside the core body. Moreover , the influence of the mass flow rate and temperature on the heat quantity exchanged and the pressure drop was determined and the empirical correlation formula among the in-plate flow resistance , heat transfer factors , Nusselt number and Reynolds number of the CW primary surface recuperator was given. The heat transfer and flow resistance performance analytic results show that with an increase of the Reynolds number , the heat transfer coefficient of the recuperator core unit will increase and the heat transfer quantity will gradually increase. With a rise of the temperature at the inlet of the LP high temperature flue gas side , the extent of the increase in heat transfer quantity will grow. The recuperative degree of the recuperator core unit will decrease with an increase of the Reynolds number and the temperature of the gas at the inlet. **Key words:** Micro gas turbine , CW (cross wavy) primary surface recuperator , heat transfer , flow resistance , periodically full development

燃气机热泵部分负荷特性的实验研究 = **Experimental Study of the Partial Load Characteristics of a Gas-engine-driven Heat Pump** [刊 汉] / LIU Huan-wei , YANG Zhao , WANG Ming-tao (Thermal Energy Research Institute , Tianjin University , Tianjin , China , Post Code: 300072) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(5) . - 523 ~ 527