

尾迹对涡轮动叶气膜冷却影响的三维非定常数值模拟

袁 锋¹ 张才稳¹ 黄海舟¹ 竺晓程²

(1. 湖北省电力公司电力试验研究院 动力研究所 湖北 武汉 430077;

2. 上海交通大学 机械与动力工程学院 上海 200030)

摘 要: 采用数值计算的方法,对带有前导静叶的旋转涡轮动叶流场和气膜冷却效率进行了三维非定常数值模拟,研究了静叶非定常尾迹对涡轮动叶气膜孔周围流场及冷却效率的影响。结果表明,在不同的动、静叶相位,尾迹的存在改变了涡轮动叶入口来流的周向分布,对射流和主流的掺混流场产生了周期性的影响,使得压力面不同时刻的气膜冷却效率存在一定的波动,而吸力面气膜冷却效率的波动则相对较小。

关 键 词: 燃气轮机; 非定常尾迹; 涡轮动叶; 气膜冷却; 流场; 数值模拟

中图分类号: TK472 文献标识码: A

引 言

涡轮作为燃气轮机的核心部分,成为世界各国燃气轮机设计者研究的重点。提高涡轮机性能的一个重要途径是增加涡轮进口温度,但这要受涡轮叶片材料的限制,采用气膜冷却技术则是解决这一问题的重要方法。近几十年来,国内外研究者对气膜冷却技术进行了大量的实验研究和数值计算^[1]。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,对于涡轮动叶的气膜冷却,特别是对带有前导静叶的涡轮动叶气膜冷却的研究则相对较少。由于涡轮动叶的气膜冷却效果会受到静叶非定常尾迹的影响,因此研究非定常尾迹对动叶气膜冷却流场及冷却效率的影响很有必要。

Mehendale 和 Han 等人实验研究了非定常尾迹对平面叶栅气膜冷却效率的影响^[2],Shuye Teng 和 Dong Kee Sohn 等人利用尾迹发生器和热线技术研究了非定常尾迹对透平叶片吸力面气膜孔周围的气膜冷却效率的影响^[3]。文献[4]采用二维非定常数值模拟研究了尾迹对气膜冷却的影响,发现尾迹会使冷却气流的流向发生很大的改变,笔者采用 PIV 和 LDV 测速技术对气冷涡轮吸力面和压力面侧冷却射流与主流的掺混流场进行了实验研究^[5~6]。本研究采用

数值计算的方法,对带有前导静叶的涡轮动叶气膜冷却进行三维非定常数值模拟,研究静叶非定常尾迹对动叶气膜周围流场及绝热冷却效率的影响。

1 数值计算方法

随着网格生成技术及计算方法的发展,已有越来越多的研究者通过求解三维 N-S 方程来研究气膜冷却的特性。本研究采用商业软件 Numeca,湍流模型选用 S-A 方程,以守恒形式的有限体积法进行空间离散,采用中心差分格式,时间采用四阶显式 Runge-Kutta 求解方法。采用了多重网格和隐式残差平均化技术,内循环收敛残差取 10^{-4} ,收敛步数 300 步。

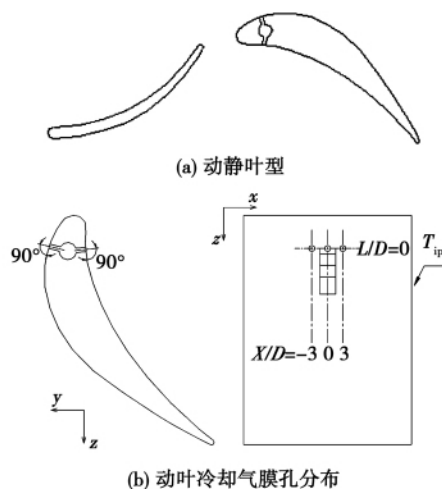


图 1 涡轮动叶模型及坐标示意图

Fig. 1 Model for turbine rotor blades and schematic drawing of coordinates

图 1 是带有前导静叶的涡轮动叶模型及坐标系示意图,为了研究静叶尾迹对动叶气膜冷却的影响,在动叶压力面和吸力面各开一排(3 个)气膜冷

收稿日期:2010-08-24; 修订日期:2010-09-12

作者简介:袁 锋(1978-),男,湖北襄樊人,湖北省电力试验研究院动力研究所,博士。

却孔, 孔径 $D = 2 \text{ mm}$, 孔间距为孔径的 3 倍。图 1 中 L 为沿叶片表面距离冷却孔中心的位移, X 为沿叶片径向距离中间孔中心的位移, Y 为沿叶片周向距离叶片表面位移, Z 为叶片轴向。在划分网格时, 涡轮动叶第一层网格 y^+ 值取 1, 气膜孔及其周围网格采用局部加密处理, 网格总数在 100 万左右。气膜孔局部网格如图 2 所示。

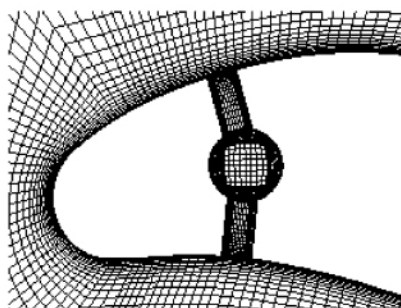


图 2 动叶气膜孔网格划分

Fig.2 Schematic drawing of rotor blade air film hole grid

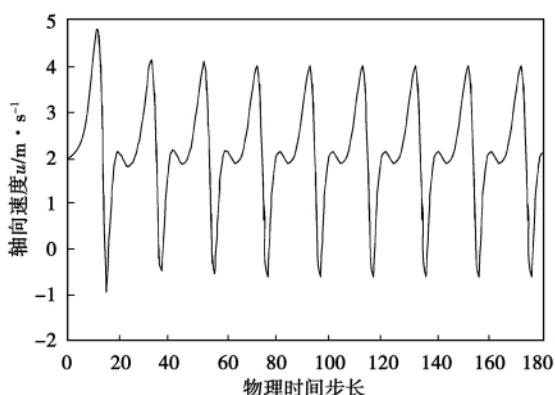


图 3 压力面气膜孔附近某点轴向速度随物理时间步的变化

Fig.3 Change of the axial speed at a point nearing an air film hole on the pressure surface with physical time step

2 计算结果与分析

计算进口条件给定主流入口质量流量、温度和气流方向; 出口条件给平均静压; 气膜孔进口同样给定质量流量、温度和气流方向。叶片周向为周期性边界, 端壁和叶片型面为无滑移绝热边界, 射流孔的进出口都为交接面, 孔壁为无滑移的绝热边界, 供气腔的端壁和两侧壁也为无滑移的绝热边界。

气膜冷却的吹风比 M 定义为:

$$M = \rho_c v_c / \rho_2 v_2 \quad (1)$$

式中: ρ_c, ρ_2 —冷却气体和动叶入口流体的平均密度; v_c, v_2 —冷却气体和动叶入口流体的平均速度。

气膜绝热冷却效率 η 定义为:

$$\eta = (T_1 - T_s) / (T_1 - T_2) \quad (2)$$

式中: T_1, T_2 —主流和冷却射流的温度; T_s —绝热壁温。

在压力面和吸力面气膜冷却吹风比 $M = 2.0$ 工况下进行计算。计算 9 个周期后, 叶轮内部各参数得到较好的周期性变化, 图 3 是压力面气膜孔附近位置一点轴向速度随物理时间步的变化, 在计算两个时间周期以后, 计算结果呈较好的周期性变化。

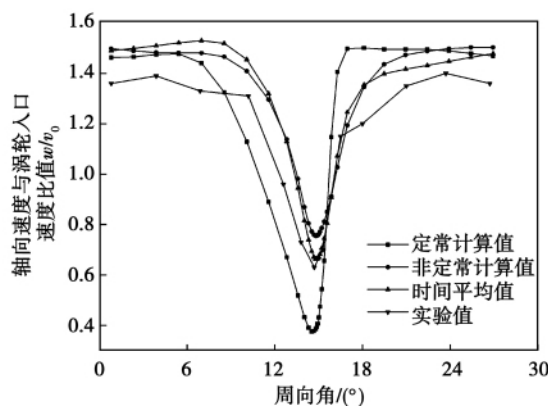


图 4 同一相位静叶出口相对速度值周向分布 (50% 叶高)

Fig.4 Circumferential distribution of relative speed value at the outlet of stator blades at a same phase (50% of blade height)

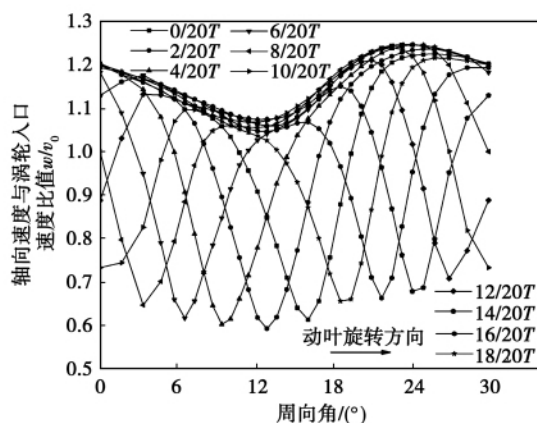


图 5 不同时刻涡轮动叶入口相对速度值周向分布 (50% 叶高)

Fig.5 Circumferential distribution of relative speed value at the outlet of turbine rotor at different times (50% of blade height)

图 4 给出了距离静叶出口 5 倍孔径处 50% 叶高位置相对速度的周向时均值分布, 并与在同一相位的定常计算、非定常计算和实验测量结果进行了对比。由相对速度值的大小变化可以看出, 数值计

算与实验测量结果的变化趋势基本一致。在速度亏损区, 实验结果与非定常计算的时均值比较接近, 其次是非定常计算中同一相位的结果, 定常计算结果的误差较大。

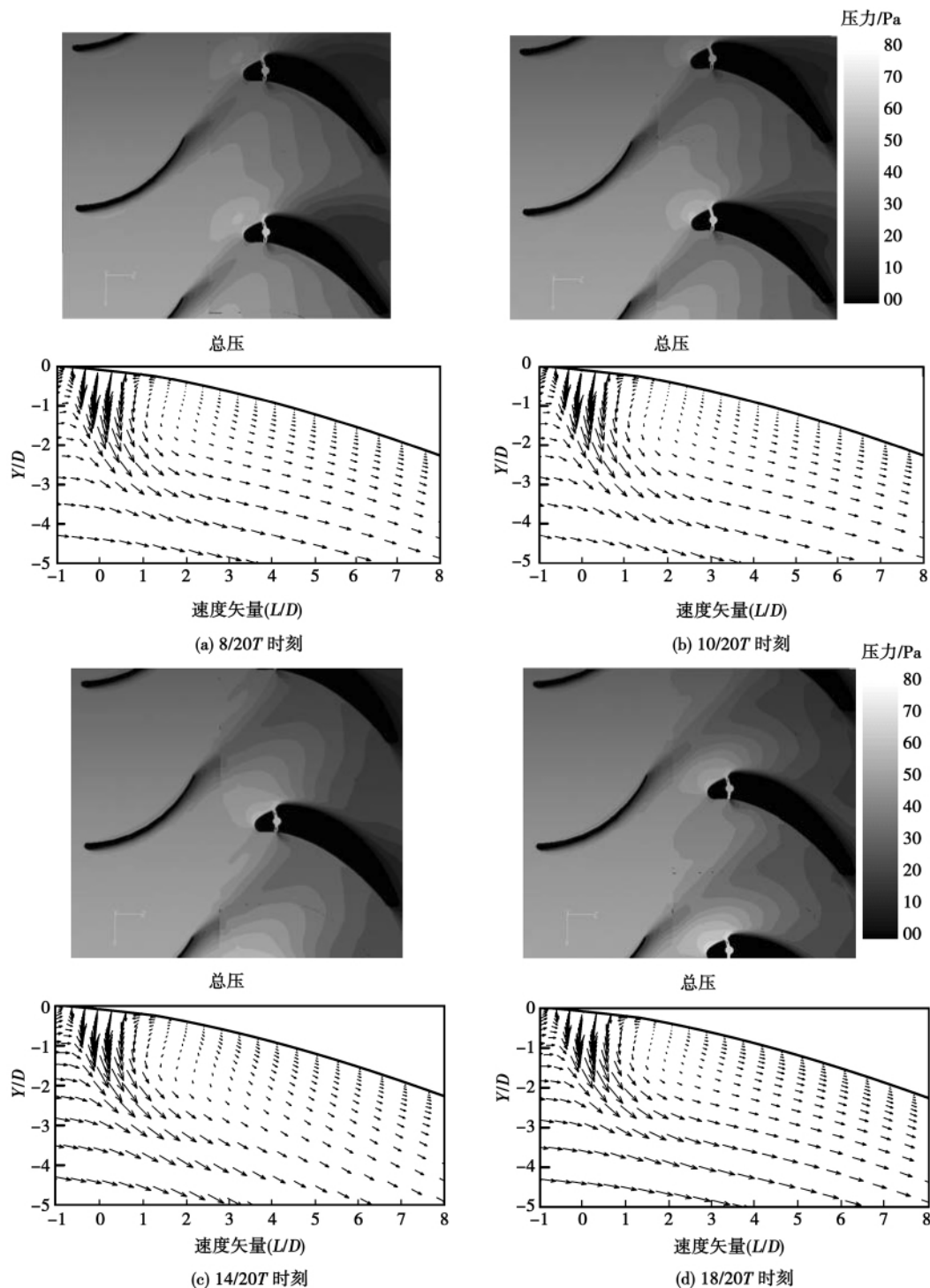


图 6 不同时刻压力面侧孔附近总压和速度矢量

Fig. 6 Total pressure and speed vector nearing the side holes on the pressure surface at different times

图 5 给出了涡轮动叶入口处 50% 叶高位置非定常计算得到的不同时刻相对速度值周向分布。从

相对速度值的变化可以看出, 尾迹在周向方向对动叶入口处相对速度的影响。在尾迹区, 不同时刻的

相对速度均出现了明显的亏损,最大下降值达 40% 左右。选出非定常计算一个周期内比较有代表性时刻的计算结果(包括总压和相对速度矢量等)进行

讨论,研究静叶非定常尾迹对涡轮动叶流场及气膜冷却效率的影响,并进行分析。

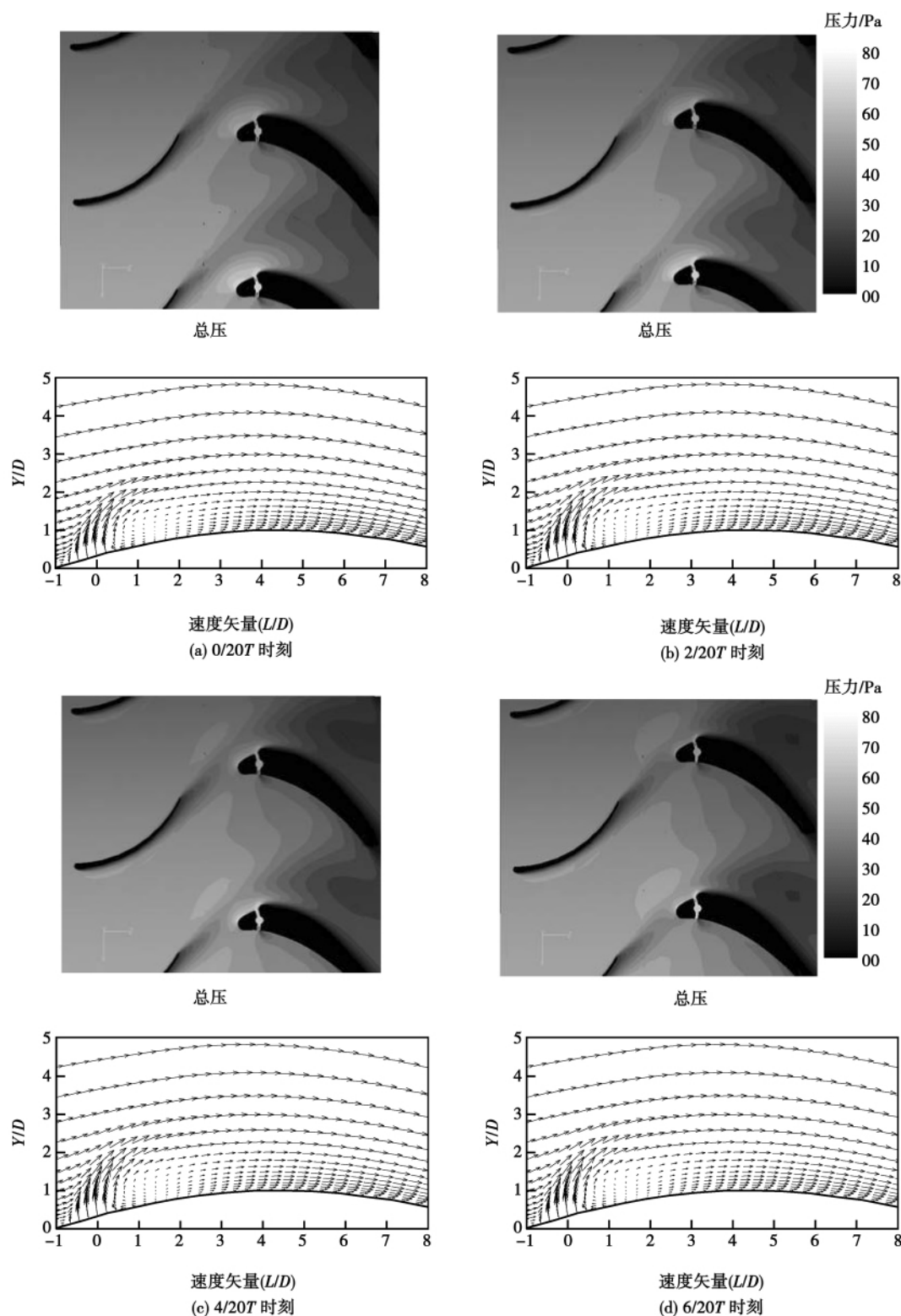


图 7 不同时刻吸力面侧孔附近总压和速度矢量

Fig. 7 Total pressure and speed vector nearing the side holes on the suction surface at different times

图6给出了冷却射流吹风比 $M = 2.0$ 时,不同时刻 ($8/20T$ 、 $10/20T$ 、 $14/20T$ 和 $18/20T$) 涡轮压力面侧冷却孔附近的总压 (图上所标数值为当地总压与涡轮动叶出口背压的差值,即 $P_t - P_0$) 和速度矢量。通过总压分布,可以看到尾迹在这四个时刻的作用区域,不同时刻下尾迹逐渐扫过压力面的冷却射流孔。从图中可以发现,尾迹对涡轮动叶压力面侧射流与主流的掺混流场存在一定的影响。由于选取的吹风比 M 较大,射流脱离叶片表面,在不同时刻下的数值计算结果可以发现冷却射流发生了“上扬”现象。随着上游尾迹扫过,射流“上扬”的程度逐渐减弱。

图7给出了不同时刻 ($0/20T$ 、 $2/20T$ 、 $4/20T$ 和 $6/20T$) 涡轮动叶吸力面侧冷却射流孔附近的总压和速度矢量。通过总压分布,可以看到尾迹在这四个时刻的作用区域,不同时刻下尾迹逐渐扫过吸力

面的射流孔。由于吸力面前缘叶片曲率较大,流动存在明显加速过程,非定常尾迹对吸力面侧冷却射流孔附近流场的影响较弱。

为了更直观的说明上面的观点,在图8中分别给出了上述几个不同时刻,涡轮动叶压力面和吸力面侧射流孔下游 $L/D = 1.0$ 位置 $X-Y$ 平面上的涡量图 ($\times 10^{-3}$),涡量的方向垂直于被测平面,与实验测量得到的结果类似^[6],压力面和吸力面侧均有明显的反向涡对。在 $10/20T$ 和 $14/20T$ 时刻,压力面侧射流孔周围受到静叶尾迹的影响,射流有所“上扬”,掺混区形成的反向涡对离叶片壁面相对较远一些。在吸力面侧,当尾迹作用在吸力面叶片前缘附近时,吸力面侧冷却射流有略微“上扬”现象,但反向涡对的变化不如压力面明显,这与吸力面射流孔所处的位置有关,该处受尾迹的直接影响较小。

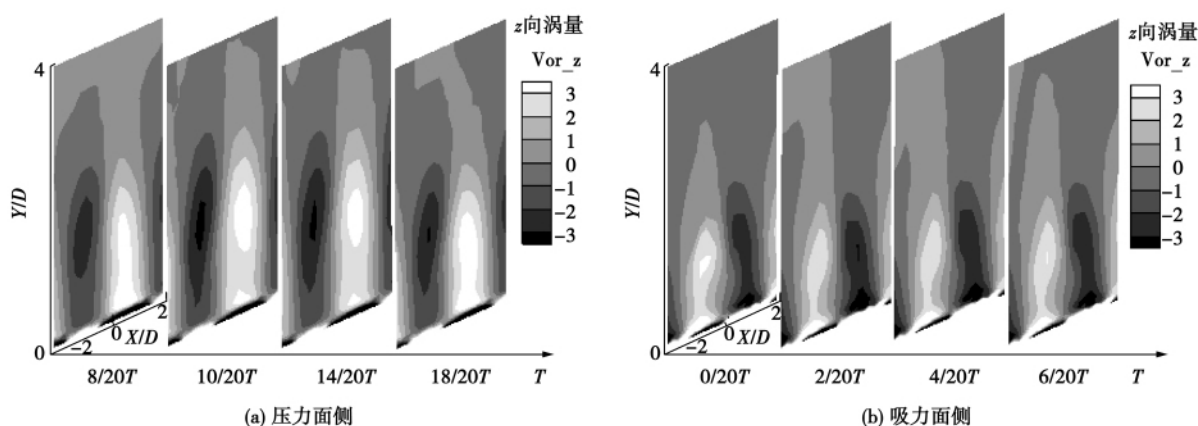


图8 不同时刻射流孔下游 $X-Y$ 平面涡量图 ($L/D = 1.0$)

Fig. 8 $X-Y$ plane vortex contour drawing at the downstream of the jet flow holes at different times ($L/D = 1.0$)

涡轮气膜冷却的设计最关心的就是叶片的壁面温度,由于动、静叶间的非定常效应,涡轮动叶表面的温度是随时间变化的。从已有的参考文献来看,大部分动叶气膜冷却的实验是在定常情况下(单排动叶栅)采用圆柱等模拟上游尾迹进行的,由于采用圆柱来模拟尾迹,没有考虑到上游静叶栅对流动周向分布的影响,只有对在叶片驻点附近的射流现象研究比较适合。

图9给出了冷却射流吹风比 $M = 2.0$ 时,几个不同时刻涡轮动叶压力面和吸力面沿孔中心线 ($X/D = 0$) 下游的气膜冷却效率值,同时将非定常的时均结果与定常计算结果进行了对比。由于所取的射流吹风比 M 较大 ($M = 2.0$),在叶片压力面和吸力

面,射流进入主流后又逐渐被主流压制回叶片表面附近流动,在 $L/D < 4.5$ 附近,射流附着到叶片表面,孔下游附近气膜冷却效率均呈现“先降后升”的变化趋势,图9(a)给出的不同时刻压力面侧冷却效率云图也证实了这一点。从图9可以看出,在压力面,不同时刻的叶片表面气膜冷却效率存在一定的变化,特别是在 $5.0 < L/D < 15.0$ 区域,气膜冷却效率随时刻的变化存在较大的波动。在吸力面,气膜冷却效率值在不同时刻的波动比较小。由于静叶尾迹的存在使得涡轮动叶入口来流的周向分布发生变化,周期性地影响了冷却射流和主流的掺混流场,所以在实际的涡轮设计中,必须考虑上游尾迹的影响。

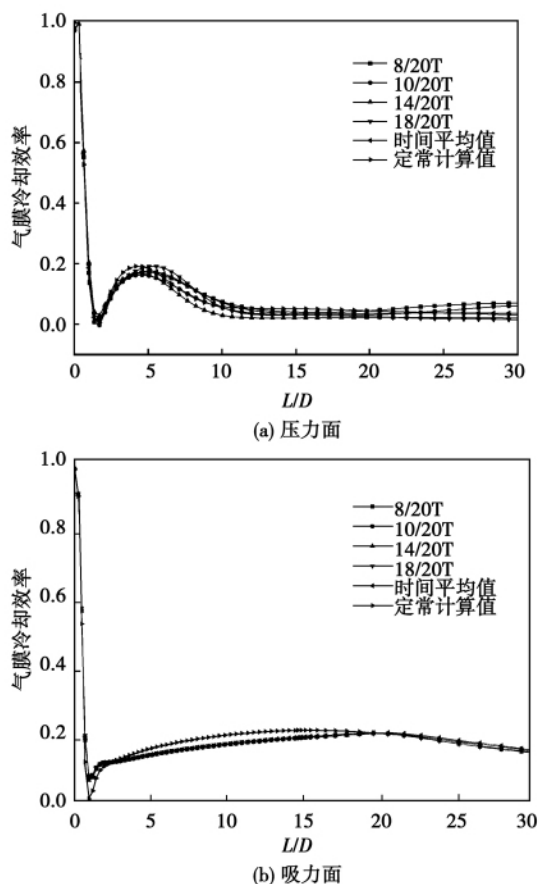


图9 不同时刻动叶表面的气膜冷却效率($X/D=0$)

Fig.9 Air film cooling efficiency of rotor blade surface at different times($X/D=0$)

3 结 论

本研究采用数值模拟的方法,对带有前导静叶的涡轮动叶气膜冷却进行三维非定常数值计算,研究了静叶非定常尾迹对动叶气膜孔周围流场及气膜冷却效率的影响,得出以下结论:

(1) 在不同的动、静叶相位,动静叶相互作用的尾迹强度存在一定的波动,尾迹的存在改变了涡轮动叶入口来流的周向分布,对射流和主流的掺混流场产生周期性的影响,使得压力面不同时刻的气膜冷却效率值存在一定的波动。

(2) 在吸力面,由于冷却孔所处的叶片前缘曲率较大,流动存在明显的加速,使得不同时刻下吸力面气膜冷却效率值的波动较小。

(3) 上游尾迹没有直接对射流孔的流场发生作用,但尾迹的存在使得涡轮入口来流的周向分布发生变化,周期性地影响射流和主流的掺混,所以在冷却涡轮的实际设计中,必须考虑上游尾迹对涡轮气

膜冷却效果的影响。

参考文献:

- [1] 葛绍岩,刘登瀛,徐靖中,等.气膜冷却[M].北京:科学出版社,1985.
GE Shao-yan, LIU Deng-ying, XU Jing-zhong, et al. Air film cooling[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [2] MEHENDALE A B, HAN J C, OU S. Unsteady wake over a linear turbine blades cascade with air and CO_2 film injection: Part II - effect on film effectiveness and heat transfer distribution[J]. Journal of turbomachinery, 1994, 116(10): 730-737.
- [3] SHUYE TENG, DONG KEE SOHN, HAN JE-CHIN. Unsteady wake effect on film temperature and effectiveness distributions for a gas turbine blade[J]. Journal of Turbomachinery, 2000, 122(10): 340-347.
- [4] 蒋雪辉,赵晓路.非定常尾迹对气膜冷却影响的数值研究[J].工程热物理学报, 2005, 26(2): 322-324.
JIANG Xue-hui, ZHAO Xiao-lu. Numerical study of the influence of the unsteady wake on air film cooling[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(2): 322-324.
- [5] 袁 锋,竺晓程,杜朝辉.旋转对气冷涡轮内部流场影响的 PIV 测量[J].热能动力工程, 2007, 22(2): 120-123.
YUAN Feng, ZHU Xiao-cheng, DU Zhao-hui. PIV Measurements of the impact of rotation on the flow fields in an air-cooled turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(2): 120-123.
- [6] 袁 锋,吴亚东,竺晓程,等. LDV 实验测量气冷环形涡轮叶栅内部流场[J].热能动力工程, 2007, 22(6): 596-600.
YUAN Feng, WU Ya-dong, ZHU Xiao-cheng, et al. Experimental measurement of the flow field in an air-cooled annular turbine cascade by using LDV (laser-Doppler velocimetry) [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(6): 596-600.

• 书 讯 •

燃烧学导论:概念与应用

本书是被国际上广泛采用的燃烧学教材,清晰地讲解了燃烧理论及其应用知识,反映了近年来燃烧科学新的研究发展趋势。本书的最大特色是注意从学生学习的要求出发,语言深入浅出,同时有大量的例题、思考题、习题和训练题,并在配书光盘中提供计算程序软件,能使读者在认知的情况下,进一步提高解决实际问题的能力,最终使读者对于燃烧学方面的知识做到会学、会用、会想。本书还提供了大量的参考文献,为深入研究和应用提供了很好的帮助。全书共 16 章,介绍了燃烧的概念、燃烧及热化学、化学平衡的概念及应用、传质分析、化学动力学、燃烧中重要的化学反应、反应系统的热化学分析、反应流中的简化守恒方程、层流预混及扩散火焰、液滴蒸发和燃烧、湍流基础和湍流火焰(湍流预混火焰、湍流扩散火焰)、固体(煤)燃烧和污染排放、燃烧中的爆燃现象。

本书可作为能源动力、汽车、航天航空类专业及相关专业本科生和研究生燃烧学的教材,也可作为相关领域科研人员的参考书。

2011 年 5 月 10 日出版

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,