

全气膜冷却叶片表面换热系数和冷却效率研究

张宗卫, 朱惠人, 刘聪, 孟庆昆

(西北工业大学动力与能源学院, 710072, 西安)

摘要: 为了研究全气膜冷却涡轮导叶叶片的换热特性, 采用瞬态液晶技术获得了叶片全表面的高分辨率换热系数和冷却效率. 实验在三叶片两通道放大模型中完成, 叶栅进口雷诺数是 1.0×10^5 . 叶片前缘有8排复合角孔, 压力面有21排轴向角孔, 吸力面有24排轴向角孔. 气膜孔排由2个供气腔供气, 前腔二次流与主流的质量流量比为4.56%, 后腔为4.67%. 结果表明: 受叶栅通道涡作用, 气膜出流在吸力面呈聚敛状, 在压力面则呈发散状. 气膜出流受气膜孔角度影响, 气膜孔下游的换热系数和冷却效率都较高. 叶片前缘受到冲击, 换热强, 冷却效率低; 叶片吸力面冷却效率维持在0.4左右, 压力面维持在0.35左右. 该全气膜冷却叶片气膜覆盖效果较好, 冷却效率和换热系数分布均匀, 是一种较好的冷却结构.

关键词: 换热; 导叶; 复合角; 轴向角; 全气膜冷却; 液晶

中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)07-0103-05

Heat Transfer Coefficient and Film Cooling Effectiveness on a Full-Film Cooling Vane

ZHANG Zongwei, ZHU Huiren, LIU Cong, MENG Qingkun

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The high-resolution heat transfer coefficient and the film effectiveness measurements on a full-film cooling nozzle guide vane with compound and axial angle holes were obtained using a transient liquid crystal technique. The tests were performed in a scaled-up, two-passage cascade at an inlet Reynolds number of 1.0×10^5 . There are eight rows of compound angle cylinder film holes around the leading edge, 21 rows of axial angle cylinder holes on the pressure side, and 24 rows of axial angle cylinder holes on the suction side. The holes are fed from two internal plenum with a mass flow ratio of 4.56% in the first plenum and 4.67% in the second plenum. The results show that the film cover region shrinks on the suction side and expands on the pressure side due to the influence of passage vortex. The heat transfer coefficient and the film cooling effectiveness are higher in the near hole region. The heat transfer coefficient is higher and the film cooling effectiveness is lower near the leading edge. The film cooling effectiveness is about 0.4 on the suction side and about 0.35 on the pressure side, respectively.

Keywords: heat transfer; vane; compound angle; axial angle; full-film cooling; liquid crystal

在现代高性能航空发动机中, 涡轮入口温度已经远高于叶片材料的熔点, 为了提高发动机的热效率, 必须采用有效的冷却措施对叶片进行冷却. 在现

有燃气轮机高温部件的冷却方式中, 广泛应用于涡轮叶片内部或外部的强化换热手段有扰流肋、扰流柱、冲击冷却、内表面凹坑、促旋插片和气膜冷却

等^[1]. 目前气膜冷却大多局限于气膜孔孔型、布局等基础研究^[2-3], 对叶片整体换热特性的研究较少. 国外 Guo 等^[4]使用薄膜热流计获得了涡轮叶片局部换热系数和冷却效率, Wayne 等^[5]比较了叶片吸力面上不同气膜孔型的冷却特性, Dhungel 等^[6]使用红外瞬态测试技术研究了不同气膜孔型的换热特性; 国内白江涛等^[7]使用液晶瞬态测试技术得到了涡轮叶片全表面气膜冷却特性.

为了深入了解全气膜冷却叶片表面换热特性, 为涡轮叶片设计提供参考数据, 本文使用瞬态液晶测试技术研究全气膜冷却叶片换热特性, 得到了高分辨率叶片全表面换热系数和冷却效率数据. 相对于热电偶、薄膜热流计, 液晶测试属于非接触测量技术, 具有布置方便、不破坏实验件表面、能得到全表面温度场分布的优点, 且能在外形复杂的实验件表面喷涂使用. 目前, 多数红外热像仪分辨率较低, 热色液晶胶囊微粒直径约为 $20\ \mu\text{m}$ ^[8], 理论上 $1\ \text{cm}^2$ 内有 500×500 个有效点, 本实验使用 4 台高清 CCD 摄像机同时进行联合拍摄, 数据处理后可以得到 300 万像素的高分辨率换热特性分布云图, 能更详细地了解涡轮叶片换热特性分布细节.

1 实验装置与测量方法

1.1 实验装置

实验系统如图 1 所示. 整个风洞系统分为主流系统和二次流系统两个部分. 主流系统由离心风机、稳压储气罐、阀门、稳定段、收缩段、加热器、实验段等组成. 主气流由离心风机提供, 经稳压储气罐、阀门后进入实验台稳定段. 气流在稳压腔内减速稳压, 经收缩段加速降低湍流度之后进入瞬态加热器; 加热后的气流进入实验段, 通过实验段后由出流段排往大气. 二次流由罗茨风机提供, 通过浮子流量计前的阀门调节气流流量到实验工况需要的流量, 气流经加热器加热到合适的温度后供到实验叶片内通道, 然后通过叶片表面气膜孔喷出至实验段. 实验前, 二次流通过两组电磁阀控制, 排入大气. 实验过程中, 4 台 CCD 摄像机与温度采集器同时采集数据, 并将数据传入计算机.

实验段采用三叶片两通道布局, 中间叶片开有气膜孔用于实验测量, 两侧叶片仅使用叶盆、叶背曲线型面, 不加工成叶片形状. 实验采用相似原理, 对叶栅通道、叶片实验件放大了 2.35 倍进行实验研究. 叶片气膜孔分前后两腔供气, 两内腔结构及位置如图 2 所示. 叶片采用光固化快速成型工艺加工, 材

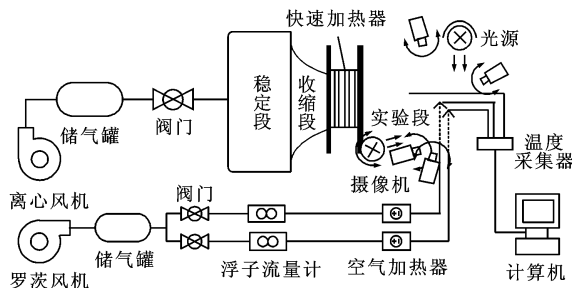


图1 实验系统示意图

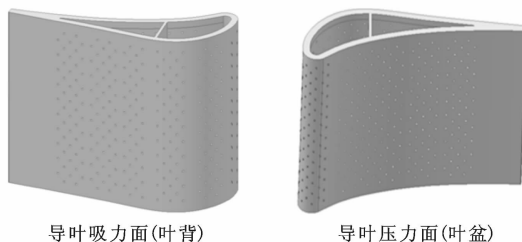


图2 叶片模型

料为光敏树脂, 型号为 DSM 14120.

实验叶片弦长 $D=164.04\ \text{mm}$, 叶片表面按压力面、吸力面弧长与叶片弦长之比 S/D 、叶片高度与弦长之比 H/D 规整后展开如图 3 所示. 叶片前缘位置即 $-0.2 < S/D < 0.1$ 的范围内布置有 8 排复合角气膜孔, 在叶片压力面和吸力面分别布置有 21 排和 24 排轴向角气膜孔.

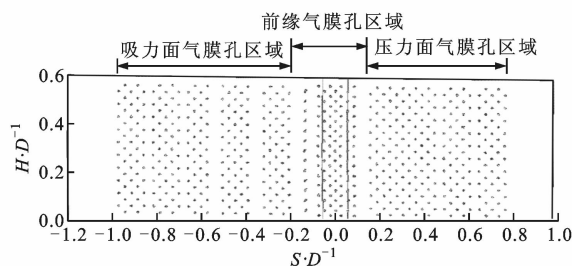


图3 叶片表面展开图

图 4 是复合角孔和轴向角孔示意图. 由于有机玻璃通道曲面交接处透光性不好, 在叶片 $S/D = -0.55$ 位置附近, 摄像机捕捉不到液晶颜色变化, 相应位置冷却效率和换热系数缺失.

1.2 测量方法及误差分析

本实验采用窄带液晶测量叶片表面温度, 通过瞬态实验多次测量求解换热系数和冷却效率. 热色液晶瞬态测量技术在国内外已发展得较为成熟, 并有广泛的应用, 文献^[8]对其原理和方法做了详细的介绍. 本实验采用的窄带液晶型号为 SPN/R25C1W.

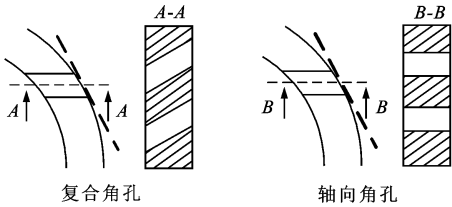


图 4 复合角孔和轴向角孔示意图

换热系数和冷却效率的定义为

$$h = q / (T_{aw} - T_w) \quad (1)$$

$$\eta = (T_{aw} - T_g) / (T_c - T_g) \quad (2)$$

式中: h 为当地换热系数; q 为热流量; T_{aw} 为绝热壁温; T_w 为壁面温度; η 为冷却效率; T_g 为主流温度; T_c 为二次流温度。

本实验通过两次瞬态实验求得换热系数和冷却效率两个待求量,属于双参数传热实验. 根据文献[9]的相关研究,计算得出本实验中换热系数不确定度为 6%;当 $\eta=0.1$ 时,冷却效率不确定度为 15%,当 $\eta=0.7$ 时,冷却效率不确定度为 3%。

2 实验结果与讨论

2.1 实验工况

实验工况采用叶栅入口雷诺数 Re_{in} 和质量流量比 K 确定. 实验雷诺数采用端壁台阶面之前的通道速度和叶片弦长定义

$$Re_{in} = \rho V_g D / \mu \quad (3)$$

式中: ρ 为气流密度; μ 为气流的动力黏性系数; V_g 为叶栅前 200 mm 处的速度. 质量流量比为二次流通过叶片表面气膜孔流出的质量流量与主流质量流量之比

$$K = m_c / m_g \quad (4)$$

式中: m_c 为二次流质量流量; m_g 为主流质量流量. 由于叶片分前后两个腔供气,因此定义 K_1 为前腔质量流量比, K_2 为后腔质量流量比. 本实验中, $Re_{in}=100\ 000$, $K_1=4.56\%$, $K_2=4.67\%$ 。

2.2 换热系数与冷却效率测量结果

图 5 是叶片冷却效率云图与展向平均值的分布图,冷却效率的显示范围为 0~0.6. 由图可知:在各个工况下,吸力面上越往下游,气膜覆盖的范围越小,射流轨迹呈聚敛状;在压力面上,越往下游,气膜覆盖范围越大,射流轨迹呈发散状. 这是由叶栅通道中的通道涡造成的. 图 6 给出了文献[10]通过流场显示技术得到的叶栅通道中通道涡系统的示意图. 受 V_p 旋转方向的影响,吸力面的气膜出流向叶片

中部卷吸聚拢,叶栅通道的高温气流被卷至叶片吸力面根部,这使得吸力面气膜覆盖区域减小,靠近叶根区域的气膜冷却效率降低. 相应地,受 V_p 和压力面马蹄涡分支 V_{ph} 旋转方向的影响,压力面气膜孔出流朝叶根叶尖方向发散,气膜覆盖区域逐渐增大。

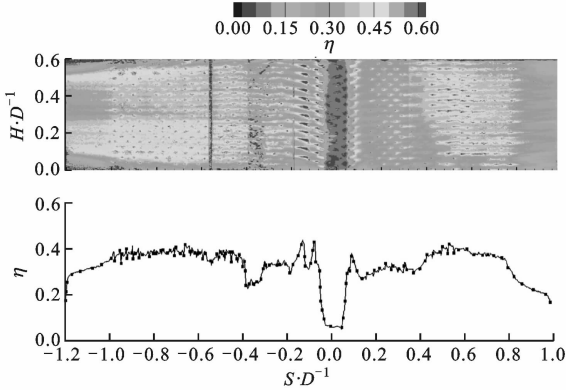


图 5 冷却效率分布图($Re_{in}=100\ 000$)

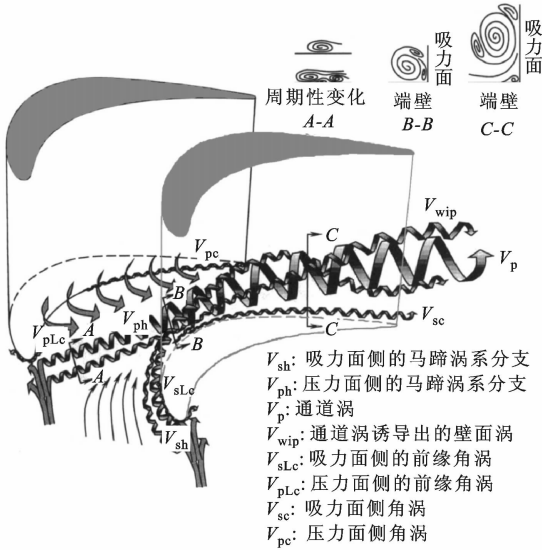


图 6 叶栅通道涡系示意图[10]

从图 5 中可以看出,前缘附近 $-0.2 < S/D < 0.12$ 区域的局部高冷却效率区域倾斜向上,其他区域的局部高冷却效率区域水平向前. 这是因为该区域采用复合角气膜孔,出口方向倾斜向上,气膜出流有从叶根向叶尖流动的分速度. 气膜出流与主流掺混后,出流倾斜向上. 叶片表面前缘位置的冷却效率相对较低,这是因为前缘位置气膜孔受叶栅气流冲击作用影响明显,出流流量较少,气膜覆盖效果相对较差,冷却效率相应较低. 在 $-1 < S/D < -0.2$ 即吸力面气膜孔区域,冷却效率基本维持在 0.4 附近. 在 $0.12 < S/D < 0.76$ 即压力面气膜孔区域,冷却效

率维持在 0.35 附近,并且沿 S/D 增加略微增大.在 $S/D < -1$ 和 $S/D > 0.76$ 即吸力面和压力面最后一排气膜孔之后的无气膜孔位置,冷却效率逐渐减小.叶栅通道主流沿叶片表面从前缘向尾缘流动,压力面与吸力面轴向角气膜孔出流和叶栅主流掺混后,轴向角气膜孔下游局部区域的气流沿主流流动方向流出.

图 7 为叶片换热系数云图与展向平均值分布图,换热系数显示范围为 $50 \sim 200 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. 在叶片前缘附近即 $-0.2 < S/D < 0.12$ 的区域,由于叶栅气流的冲击作用,叶片前缘区域换热系数较高;在前缘两侧,随着冲击作用的削弱,换热系数降低.在叶片轴向孔区域,由于气膜孔出流强烈扰动的影响,换热系数较高,并且分布较为均匀.吸力面换热系数略高于压力面,这是因为气流在吸力面速度较高,换热较强.在叶片尾缘无气膜孔位置即 $S/D < -1$ 和 $S/D > 0.76$ 的区域,如文献[7]中描述,随着到前缘距离的增加,叶栅主流的冲击作用减弱,换热有削弱的趋势;同时,壁面附近气流速度增大,壁面换热系数有上升的趋势.当无气膜作用时,二者综合作用,导致叶片尾缘附近表面换热先降低后升高.

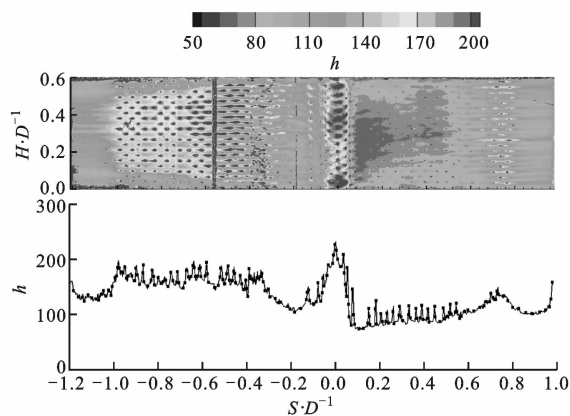


图 7 换热系数分布图($Re_m = 100\ 000$)

3 结 论

本文通过瞬态液晶测试技术,获得了全气膜冷却叶片冷却效率和换热系数的高分辨率分布云图及其展向平均曲线图,主要结论如下.

(1)受叶栅通道涡作用,气膜出流在吸力面呈聚敛状,在压力面则呈发散状.气膜孔下游的换热系数和冷却效率都较高.

(2)叶片前缘附近由于受到来流直接冲击,冷却效率最低,换热系数最高.在前缘复合角孔射流和来

流的共同作用下,气膜出流倾斜向上.

(3)在叶片吸力面、压力面气膜孔区域,冷却效率和换热系数分布均匀,射流沿轴向角出口方向喷出.吸力面气膜孔区域的冷却效率维持在 0.4 附近,压力面气膜孔区域的冷却效率维持在 0.35 附近.

(4)在无气膜孔区域即叶片尾缘位置,叶片表面冷却效率沿尾缘降低,叶片表面换热系数沿尾缘先降低后升高.

(5)除叶片前缘部分外,该全气膜冷却叶片气膜覆盖效果好,冷却效率和换热系数分布均匀,是一种较好的冷却结构.

参考文献:

- [1] 曹玉璋,陶智,徐国强,等.航空发动机传热学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005:4-15.
- [2] NA S, SHIH T I. Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp [J]. Journal of Heat Transfer, 2007,129(4): 464-471.
- [3] 张宗卫,朱惠人,杜小琴,等.带 60° 肋和出流孔的矩形通道端壁换热特性研究[J].西安交通大学学报,2010,44(5):116-119.
ZHANG Zongwei, ZHU Huiren, DU Xiaoqin, et al. Investigations of endwall heat transfer in the rectangular passage with 60 -degree ribs and suction holes[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(5): 116-119.
- [4] GUO S M, LAI C C, JONES T V, et al. The application of thin-film technology to measure turbine-vane heat transfer and effectiveness in a film-cooled, engine-simulated environment [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1998,19(6):594-600.
- [5] WAYE S K, BOGARD D G. High-resolution film cooling effectiveness comparison of axial and compound angle holes on the suction side of a turbine vane[J]. Journal of Turbomachinery, 2007,129(2):202-211.
- [6] DHUNGEL A, LU Y, PHILLIPS W, et al. Film cooling from a row of holes supplemented with antivortex holes[J]. Journal of Turbomachinery, 2009,131(2):21007-21010.
- [7] 白江涛,朱惠人,张宗卫,等.叶片全表面换热系数和冷却效率的实验测量[J].西安交通大学学报,2010,44(11):92-97.
BAI Jiangtao, ZHU Huiren, ZHANG Zongwei, et al. Measurements of heat transfer coefficient and film cooling effectiveness distribution on a vane using transient liquid crystal technique [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(11):92-97.

[8] IRELAND P T, JONES T V. Liquid crystal measurements of heat transfer and surface shear stress[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(7): 969-986.

[9] 白江涛, 朱惠人, 刘存良. 双参数传热实验的液晶瞬态测量不确定度分析[J]. 航空动力学报, 2009, 24(9):1945-1951.

BAI Jiangtao, ZHU Hui ren, LIU Cunliang. Analysis

of uncertainties in two-parameter transient heat transfer measurements with liquid crystal[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(9):1945-1951.

[10] WANG H P, OLSON S J, GOLDSTEIN R J, et al. Flow visualization in a linear turbine cascade of high performance turbine blades[J]. Journal of Turbomachinery, 1997, 119(1):1-8.

(编辑 荆树蓉)