

文章编号: 1000-8055(2009)02-0340-07

应用瞬态液晶测量技术研究层板内部换热特性

孔满昭, 朱惠人, 原和朋
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 应用窄带瞬态液晶测量技术对放大型层板结构的内壁面(靶面、冲击面、扰流柱面)进行了详细的换热系数测量. 由获得内表面换热系数分布来深入分析复杂层板结构内部强化换热机理. 实验研究结果表明: 应用先进瞬态液晶测量技术能够获得复杂层板结构内部表面的换热系数分布, 获得信息量大; 层板内表面换热系数随着冲击雷诺数的增大而线性增加; 内表面平均换热系数随着通道高度增加而减小.

关 键 词: 瞬态窄带液晶; 涡轮叶片; 层板; 换热系数; 扰流柱

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Research on heat transfer characteristic of lamilloy internal surfaces using transient liquid crystal technique

KONG M an zhao, ZHU H u r en, YUAN H e peng

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

Abstract: Experiment was carried out to describe the heat transfer coefficient distribution of inner surfaces (target plate, impingement plate and pins) of large scale lamilloy configuration model by utilizing the narrow-band transient liquid crystal technique (TLC). The mechanism of heat transfer intensification was also interpreted. The result shows that: heat transfer coefficient distribution of inner surfaces of lamilloy can be obtained by using the TLC technique and more detail information are also available; heat transfer coefficient of inner surface is linearly increased with growing Reynolds number and gradually reduced with the higher channel.

Key words: narrow-band transient liquid crystal; turbine blade; lamilloy; heat transfer coefficient; pin

航空发动机推重比的不断提高对涡轮叶片的冷却提出了更高的要求. 层板冷却技术是目前最有发展前景的冷却技术之一. 多孔层板技术综合了射流冲击冷却、内部强化对流换热、外部气膜冷却等多种高效冷却方式, 具有需要冷气量少、冷却效率高的优点, 是我国下一代航空发动机关键的冷却技术之一. 目前, 美、俄、英、日等国家已经对层板冷却进行过深入实验研究, 铸造的层板涡轮叶片已经进入实际应用阶

段^[1]. Funazaki 等人^[2-4]研究了层板冷却结构的内部表面换热特性研究, 应用热色液晶瞬态测量技术和数值计算方法, 研究不同通道高度下, 靶面和扰流柱面换热系数的分布规律. 国内对于层板的研究尚处于起步阶段, 郁新华等^[5-6]进行了放大型层板流阻特性研究, 发展了层板冷效计算方法. 全栋梁^[7-9]等多种层板结构的整体冷效、流阻进行了详细的实验以及数值计算研究. 本文应用先进的非接触式, 瞬态液晶测量

收稿日期: 2008-01-17; 修订日期: 2008-04-29

基金项目: 国家“973”项目 (2007CB707701)

作者简介: 孔满昭 (1978-), 男, 广东佛山人, 博士生, 主要从事航空发动机高温部件冷却技术实验与数值模拟研究.

技术对某结构层板内表面进行了详细换热系数测量实验。

1 实验方法和实验件

液晶是一种热色物质, 在特定的温度范围内, 液晶随着温度地变化值呈现出不同的颜色。本文所使用的液晶变色范围在 34~ 36 ℃, 在这个温度变化过程中, 液晶经历了由红-绿-蓝的变色过程。对液晶进行精确的标定可以得到液晶颜色变化(用色度值表示) 与温度之间的对应关系。将液晶喷涂在固体壁面, 用加热气流经过壁面时, 壁面的温度发生变化, 在其表面的液晶经历一个颜色变化过程。根据液晶色度值与温度值的标定曲线, 可以得到某一时刻壁面温度分布情况。在满足一维半无限大理论下, 在喷有液晶的物面上有一个阶跃的温升 T_g , 知道壁面初始温度 T_i 、液晶测量的壁面温度 T_w , 实验经历的时间, 换热系数 h 可用以下公式计算

$$\frac{T_w - T_i}{T_g - T_i} = 1 - \exp\left[\frac{h^2 t}{\rho_c k}\right] \operatorname{erfc}\left[h \sqrt{\frac{t}{\rho_c k}}\right] \quad (1)$$

其中 $\rho_c k$ 为有机玻璃热物理特性, 分别表示有机玻璃密度、比热容和导热系数。气流温度变化通常都经历一个逐渐温升的一个过程。上述方程(1) 改变成以下形式

$$T_w - T_i = \sum_{i=1}^N U(t - \tau_i) \Delta T_g, \quad \Delta T_g = T_{g,i} - T_{g,i-1} \quad (2)$$

$$U(t - \tau_i) = 1 - \exp\left[\frac{h^2}{\rho_c k}(t - \tau_i)\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{h \sqrt{(t - \tau_i)}}{\sqrt{\rho_c k}}\right] \quad (3)$$

用测量气流温度 T_g 随时间而变化的方法, 将时间 τ 和 ΔT_g 的步长变化代入求壁温方程, 换热系数就可由上述方程组确定。关于液晶测量原理的更多信息请参考文献[3-4]。

图1 为实验系统图。鼓风机气源依次经过调节阀门、流量计和加热器; 在瞬态换热实验开始前, 气流由旁通管排出, 旁通出口装有热电偶监控气流温度, 当气流温度满足实验要求时, 实验开始, 电磁阀切换(旁通关闭, 气流切换至实验段)、温度数据采集系统以及 CCD 摄像机同步工作。被测实验件表面液晶颜色变化完毕, 实验即结束。实验气流温度的高低决定了瞬态实验时间长短, 通过控制气流温度高低来控制实验时间。

图2 给出了层板实验件结构图以及液晶测

量方案。实验件为一个冲击单元, 由一个冲击孔、4 个扰流柱以及 4 个 1/4 气膜孔组成。实验件具体尺寸在表 1 中给出, 其中 D_{in} 为冲击孔直径、 D_{out} 为气膜孔直径、 S 为实验件宽度、 D_p 为扰流柱直径、 H_i 为冲击板厚度、 H_p 为扰流柱高度、 L 为层板高度。有机玻璃制成的实验件保证了有很好的透光性以使用摄像机拍摄。

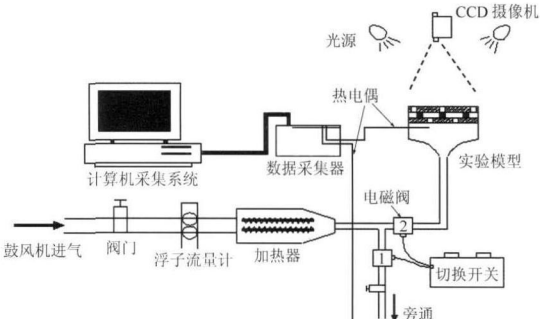


图1 层板换热实验系统图
Fig. 1 Heat transfer experimental scheme of lamilloy

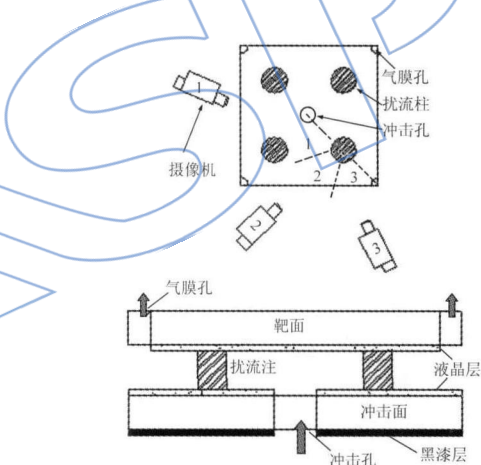


图2 实验方案以及层板实验件结构
Fig. 2 Experimental scheme and model configuration of lamilloy

表1 层板实验件几何参数
Table 1 Geometry parameter of lamilloy experimental model

D_{in}/mm	D_{out}/D_{in}	S/D_{in}	D_p/D_{in}	H_i/D_{in}	H_p/D_{in}	L/D_{in}
30	1	6.0	0.667	0.667	0.5	1.83
					1.0	2.33
					1.5	3.17

图2 中下图箭头表示了气流的流动方向, 被加热气流由冲击孔直接冲击靶面, 然后经过扰流柱从气膜孔排出。需要测量的表面包括靶面、

冲击面以及扰流柱面. 图 2 中表明了液晶喷涂方案, 液晶层的厚度约为 10~ 50 μm , 在进气板面喷上黑漆以保证良好光学性能, 以便能准确捕捉液晶的颜色变化过程. 液晶的显示过程使用 3CCD 摄像机对对其进行全程记录. 测量靶面和冲击面换热系数是独立进行的, 测量靶面时, 冲击面不喷液晶, 反之亦然. 对于扰流柱面的换热测量相对复杂. 4 个扰流柱所在位置是对称的, 也就是说所有扰流柱换热情况是一样的, 同时每个扰流柱也可以分为两半对称的换热区域 (以经过冲击孔和气膜孔的中心线为分界), 实验中只对其中一个喷有液晶的 180° 扰流柱面进行测量. 左图中把圆柱形扰流柱划分为 3 个区域, 从三个不同方向使用 3 个摄像机分别获得部分曲面的换热系数分布, 然后经过曲面还原获得半个曲面 (180°) 的扰流柱面换热系数分布. 根据圆形扰流柱的对称性, 将得到的结果镜像就可以获得一个完整扰流柱面的换热系数分布. 曲面还原技术参考文献[10].

图 3 给出了两条液晶的标定曲线, 从图中可以看出两条标定曲线基本重合, 说明颜色变化有稳定性. 在 35~ 36 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围, 色度值与温度值基本上是线性对应关系. 液晶在这个范围的颜色变化过程, 都有与其一一对应的温度值, 根据液晶的颜色变化以获得壁面的温度. 而在这个温度范围之外, 色度值与温度值就不存在对应关系了. 标定液晶的意义就在于获得色度值和温度值对应的线性关系, 以便准确测量表面换热系数. 图 4 中给出了某次实验的温度变化曲线. 横坐标表示实验时间, 纵坐标表示气流温度值. 气流温度经历了一个逐渐上升的过程, 应用多段阶跃的式 (2) 和式 (3) 处理求解换热

系数.

要满足一维半无限大理论, 对实验时间有严格要求, 实验时间必须满足

$$t \leq \frac{l^2}{16\alpha_c k}$$

其中 $l=20\text{ mm}$ 为壁面厚度, 根据公式实验的时间应小于 240 s.

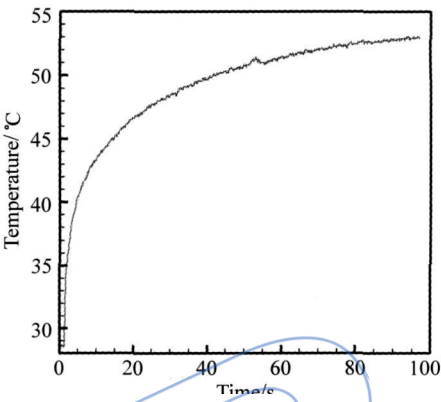


图 4 来流气体温度变化曲线
Fig. 4 Curve of inlet air temperature

2 实验工况定义

实验中改变冲击孔雷诺数 Re 获得多次实验结果进行分析. 雷诺数 $Re = \rho D_{in}/\mu$, 其中 ρ 为气流密度, v 为冲击孔平均速度, μ 为动力粘性系数, 实验雷诺数范围由 20 000~ 75 000.

3 换热系数误差分析

文献[11]中对窄带瞬态液晶测量换热系数实验进行详细的误差分析研究. 其得到的误差公式: $\left(\frac{P_h}{h}\right) = \Phi_h \left(\frac{P_T}{\theta_{aw}}\right)$, h 为换热系数, P_h 为换热系数不确定度, Φ_h 是与换热系数相关的函数, 文献中叫放大因子, P_T 温度不确定度, $\theta_{aw} = T_{aw} - T_i$,

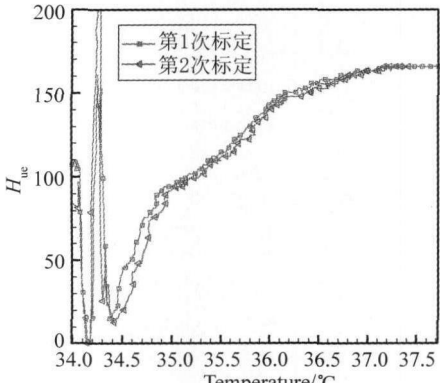


图 3 液晶校准曲线
Fig. 3 TLC calibration curve

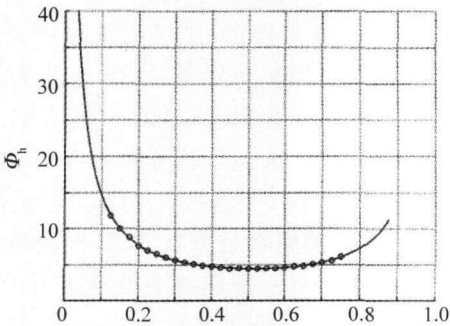


图 5 Φ_h 与 Θ 的关系曲线^[11]
Fig. 5 Relationship of Φ_h and Θ

$\Theta = \frac{T_w - T_i}{T_{aw} - T_i}$, 液晶测量壁面温度以及热电偶测量气流温度的误差为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 图 5 中整理出了 Φ 和 Θ 关系曲线, 根据该公式以及图 5, 确定本实验的换热系数误差 $\left[\frac{P_h}{h}\right] \leq 5\%$.

4 实验结果及分析

以雷诺数 $Re=60\,000$ 为例, 给出了靶面、冲击面和扰流柱的换热系数分布云图.

图 6 给出了三个不同通道高度下的靶面换热系数云图分布. 气流从冲击孔直接冲向靶面, 气流经历了滞止、转向、加速的流动过程. 高径比 $H_p/D_{in}=0.5$ 的图中看到, 在正对冲击孔中心位置, 气流的射流冲击作用, 该区域有很高的换热系数, 正中心是换热系数的最大值, 向四周逐渐较小. 同时注意到图中扰流柱之间的 a 区域, 该地区局部换热升高, 这是典型的射流冲击二次峰值现象. 而在靠近冲击中心的扰流柱根部, 图中 b 区域, 由于扰流柱阻挡, 气流在扰流柱跟前同样形成冲击现象, 局部换热系数很高, 但气流很快从扰流柱两侧分流向气膜孔, 该高换热区域较小. 而在扰流柱背面的 c 区域, 扰流柱对气流的阻挡, 该区域为气流分离区, 换热系数较低. 而远离冲击中心靠近壁面的 d 区域, 气流同样不能有效冲击该区域, 局部换热系数较低. 同时值得注意的是: 在靠近冲击孔的 4 个扰流柱根部的局部高换热区, 换热系数值并不相等, 同样, 扰流柱之间出现的二次换热系数峰值同样存在差别, 这主要由进口气流均匀性引起的, 冲击孔进口气流不能做到绝对均匀, 造成了内部换热系数的细微差别, 这同时表明了瞬态液晶测量技术的获取壁面换热系数分布的能力非常强, 能够捕捉到换热系数的细微差别. 高径比 $H_p/D_{in}=1.0$ 和 $H_p/D_{in}=1.5$ 的靶面换热系数分布云与高径比 $H_p/D_{in}=0.5$ 分布特征基本一致, 同样是冲击中心换热系数最高; 扰流柱背面以及四周端壁存在局部低换热系数区. 以下几点差别是值得注意的: ①射流冲击的二次峰值现象随着通道高度的增加, 二次峰值逐渐消失, 在高径比 $H_p/D_{in}=1.0$ 时, 二次峰值现象已经很微弱了; ②高径比 $H_p/D_{in}=1.0$, 冲击中心区域的换热系数值是最高的; ③随着高径比的增加, 四周端壁(d 区域)的低换热区域逐渐消失了, 说明随着通道高度增加气流更好的覆盖整个靶面.

图 7 给出了三个不同通道高度下的冲击面

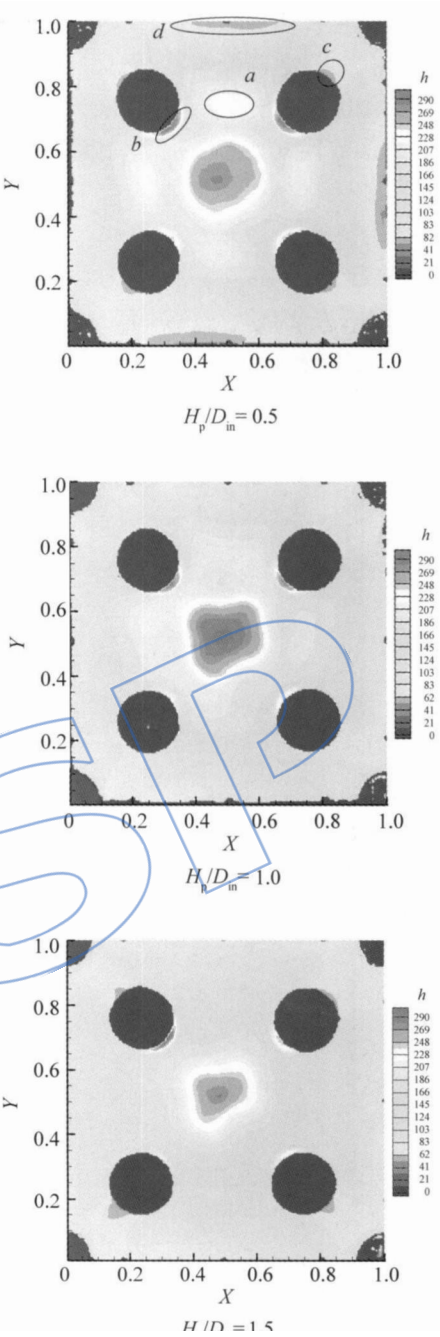


图 6 $Re=60\,000$, 靶面换热系数云图

Fig. 6 $Re=60\,000$, heat transfer coefficient distribution of target plates

换热系数云图分布. 从图中可以明显看到, 随着通道高度的增加, 冲击面的换热系数整体下降. 从高径比 $H_p/D_{in}=0.5$ 的冲击面云图看, 在靠近冲击孔的扰流柱根部, 存在月牙形状的高换热带, 该区域换热强烈, 甚至接近气流直接冲击靶面中心的换热效果, 这是由于扰流柱对靶面冲击气流阻挡形成强烈反卷涡反冲到冲击面所造成的. 在冲击面的其它区域, 换热系数相对较低, 特别在气膜孔投影位置(图中 e 区域), 气流脱离冲击面从气膜

孔排出, 该区域换热系数较低. 随着通道高度的增大, 冲击面换热系数降低明显, 而且换热系数的高低分布规律也明显地改变. 高径比 $H_p/D_{in}=0.5$ 时, 高换热系数区域集中在扰流柱附近区域, 而高径比 $H_p/D_{in}=1.0$ 时, 高换热区位于扰流柱附近以及四周端壁区域, 当 $H_p/D_{in}=1.5$ 时, 高换热系数只存在于四周端壁. 不同通道高度下, 冲击面换热系数不同的分布特点说明了在不同通道高度下, 层板通道内的流动状态有一定改变. 该结构的

内部通道中, 存在两种反卷涡结构, 一是扰流柱的阻挡形成的反卷涡, 另一种是通道端壁阻挡而形成的反卷涡, 如图 8 给出了运用商业软件 Fluent 计算得到通道内粒子示踪图, 说明了反涡 1、反涡 2 的形成位置. 在通道较低时, 反涡 1 比反涡 2 强烈得多, 所以高换热区域在扰流柱附近, 随着通道高度增加, 反涡 2 的强度不断增强, 甚至超过了反涡 1 的强度, 所以高换热区域从扰流柱附近向端壁区域移动.

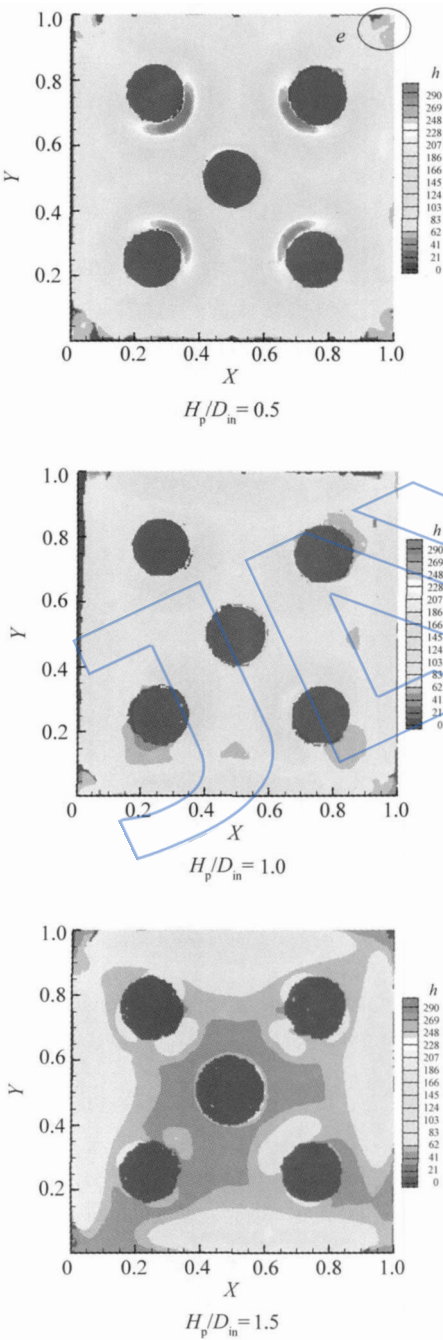


图 7 $Re=60\,000$, 冲击面换热系数云图
Fig. 7 $Re=60\,000$, heat transfer coefficient distribution of impingement plates

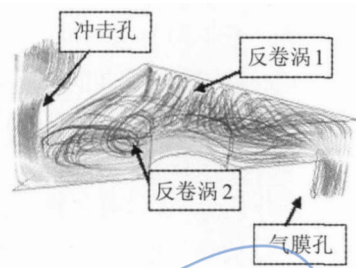


图 8 粒子示踪图
Fig. 8 Particle trace

图 9 给出了三种通道高度下的扰流柱面换热系数分布云图. 为了展示整个扰流柱面的换热系数分布, 图中通道高度 $H_p/D_{in}=1.0$, $H_p/D_{in}=1.5$ 给出了同一个扰流柱两个角度方向(图中 A、B)的换热系数分布云图. 图中圆柱上部与靶面相接, 而下部与冲击面相接; 正对冲击孔的半边柱面定义为迎风面(Windward), 靠近气膜孔的半圆柱面为背风面(Leeward).

从图 9 中可以看到, 存在部分坏点, 缺少了部分实验数据, 这主要是由于在柱面喷涂液晶、测量光线、以及拍摄角度等引起的. 但总体上看, 换热系数分布合理, 不影响去理解整个柱面的换热情况. 柱面换热系数有一共同特点, 在迎风面区域换热系数较高, 特别是与靶面相接的区域, 气流沿靶面流动冲击扰流柱面, 该区域换热系数很高. 而在背风面整体换热系数较低. 高径比 $H_p/D_{in}=1.0$ 和 $H_p/D_{in}=1.5$ 时, 柱面换热系数分布规律相似. 从图 9 $H_p/D_{in}=1.0$ 中, A 图的左下角(a 区域)存在局部高换热系数区域, 这是由于反涡 2 作用下形成的, 但在高径比 $H_p/D_{in}=0.5$ 时, 不存在这样的局部高换热区, 其原因是通道高度低, 气流速度高, 把反涡 2 推向了下游而没能作用在扰流柱面上.

图 10 给出了不同通道高度、不同冲击雷诺数下, 靶面、冲击面以及扰流柱面的平均换热系数分布规律. 内表面平均换热系数都随着冲击雷诺数

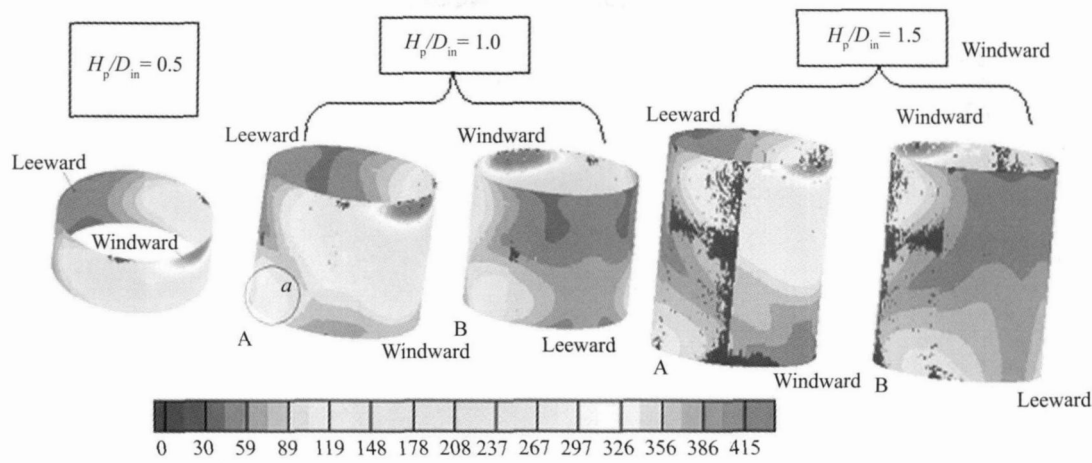


图 9 $Re=60000$, 扰流柱面换热系数云图

Fig. 9 $Re=60000$, heat transfer coefficient distribution of pins surfaces

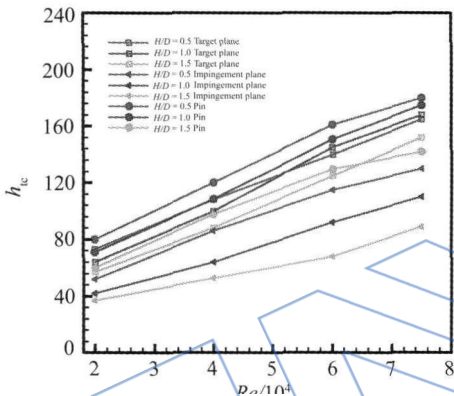


图 10 层板内壁面平均换热系数分布

Fig. 10 Average heat transfer coefficient distribution of lamelloy inner surfaces

的增加而增大, 而且近似与线性的增加关系. 在同一个雷诺数、同一通道高度下, 扰流柱面的平均换热系数最高, 靶面次之, 而冲击面平均换热系数最低; 对于靶面来说, 通道高度的改变, 其表面平均换热系数值差别不大; 但对于冲击面来说, 通道高度的改变, 其表面平均换热系数明显改变, 通道高度越高, 平均换热系数越小; 通道高度的改变同样扰流柱面平均换热系数分布, 通道高度越矮, 平均换热系数越大.

5 结 论

- 1) 运用窄带瞬态液晶测量技术, 能够获得层板内部表面全表面的换热系数分布云图, 对于设计合理内部结构层板提供了有效的实验手段.
- 2) 通道高度的改变对靶面换热系数分布影响不明显, 但对冲击面的换热系数分布有重要影响; 通道高度越高, 内表面平均换热系数越小.

- 3) 随着冲击雷诺数的增加, 内表面平均换热系数呈线性增加趋势, 具有工程应用价值.
- 4) 扰流柱面平均换热系数是最高的, 扰流柱在层板通道中所起的作用不容忽视.

参考文献:

[1] 桂忠楼, 张鑫华, 钟振纲, 等. 高效冷却单晶涡轮叶片制造技术的发展[J]. 航空工程与维修, 1998, 232(2): 11-13. GUI Zhonglou, ZHANG Xinhua, ZHONG Zhengang, et al. Manufacture technology development of the single crystal blades and vanes with highly effective cooling [J]. Aviation Engineering and Maintenance, 1998, 232(2): 11-13. (in Chinese)

[2] Funazaki K, Imamatsu N, Yamawaki S. Heat transfer measurements of an integrated cooling configuration designed for ultrahigh temperature turbine blades [C]//Proceedings of the International Gas Turbine Congress. Kobe: [s. n.], 1999, 2: 833-839.

[3] Funazaki K, Tarukawa Y, Kudo T, et al. Heat transfer characteristics of an integrated cooling configuration of ultrahigh temperature turbine blades: experimental and numerical investigations[R]. ASME Paper 2001-GT-0148.

[4] Funazaki K, Hachiya K. Systematic numerical studies on heat transfer and aerodynamic characteristics of impingement cooling devices combined with pins[R]. ASME Paper 2003-GT-38256.

[5] 郁新华, 董志锐, 刘松龄. 层板模型流阻特性的研究[J]. 推进技术, 2000, 21(4): 47-50. YU Xinhua, DONG Zhirui, LIU Songling. Study for flow resistance characteristics of the modelled laminated porous wall [J]. Journal of Propulsion Technology, 2000, 21(4): 47-50. (in Chinese)

[6] 郁新华, 全栋梁, 刘松龄. 层板结构冷却有效性的研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5): 615-622. YU Xinhua, QU AN Dongliang, LIU Songling. Investigat

tion of the cooling effectiveness of lamilloy[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5): 615-622. (in Chinese)

[7] 全栋梁,刘松龄,李江海. 多孔层板冷却有效性的研究[J]. 航空动力学报,2004, 19(4): 520-524.

QUAN Dongliang, LIU Songling, LI Jianghai. Experimental investigation of cooling effectiveness of laminate porous plates[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(4): 520-524. (in Chinese)

[8] 全栋梁,李江海,刘松龄. 雪花型层板结构冷却特性的数值模拟研究[J]. 热科学与技术,2004, 3(1): 55-59.

QUAN Dongliang, LI Jianghai, LIU Songling. Numerical investigation of cooling characteristics in lamilloy with snowflake design [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004, 3(1): 55-59. (in Chinese)

[9] 全栋梁,刘松龄,李江海. 层板冷却特性的实验与数值模拟研究[J]. 推进技术,2004, 25(2): 134-138.

QUAN Dongliang, LIU Songling, LI Jianghai. Experimental and numerical investigation of the cooling characteristics in a laminate porous plate[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(2): 134-138. (in Chinese)

[10] 刘高文,郭一丁. 红外热成像仪温度场测量的几何信息还原[J]. 红外技术,2004, 26(1): 56-59.

LIU Gaowen, GUO Yiding. Reestablishment of geometric information in surface temperature measurements with infrared thermography[J]. Infrared Technology, 2004, 26(1): 56-59. (in Chinese)

[11] YAN Youyou, Owen J M. Uncertainties in transient heat transfer measurements with liquid crystal[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23: 29-35.

