

文章编号: 1000-8055(2010)10-2273-06

出流方式对阵列冲击换热的影响

王克菲, 朱惠人, 李中洲, 许都纯
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 采用瞬态液晶技术测量了阵列冲击靶面的局部传热系数. 获得了冲击雷诺数为 5 000, 10 000, 15 000, 20 000, 25 000 时三种不同出流方式时的靶面传热系数分布规律. 结果表明: 双侧出流时, 靶面的平均传热系数比单侧出流要高; 不同方式的单侧出流, 由于产生的横流强弱作用不同, 所以靶面的平均传热系数也有所不同. 不同出流方式时, 靶面的局部传热系数均随冲击雷诺数的升高而升高.

关 键 词: 涡轮; 冲击; 换热; 出流方式; 瞬态液晶

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Influence of exit flow type on heat transfer of array impingement

WANG Ke-fei, ZHU Huiren, LI Zhong-zhou, XU Duchen

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A transient liquid crystal technique was used to measure the local heat transfer coefficients on a target surface with array impingement hole. The effects of jet Reynolds number (5000, 10000, 15000, 20000, 25000) and three different exit flow types on the heat transfer coefficients were also investigated. Results show that, the average heat transfer coefficient of target plate with double-sided flow is higher than that with single-sided flow; due to the different strengths of crossflow, the heat transfer coefficients on the target plate are also different. For each exit flow type, the local heat transfer coefficient increases with the jet Reynolds number over entire impingement target plate.

Key words: turbines; jet impingement; heat transfer; exit flow type; transient liquid crystal

随着发动机技术的不断进步, 涡轮进口的温度也越来越高, 为有效地保护热端部件, 必须采用有效的冷却方式. 冲击换热是对涡轮叶片内部通道冷却的有效方式之一, 冲击换热对提高局部的传热系数具有极大潜力, 其冲击形成的高速气流特别适用于局部高温的区域. 对于冲击换热国内外已经有了很多相关的研究^[1-6]. Huang Y 等^[7]研究了横流作用对冲击换热的影响. Bailey J C 等^[8]研究了孔间距和冲击距对阵列冲击换热的影响. 张靖周等^[9]研究了不同的冲击孔排列方式以及不同的横流比对阵列冲击换热的影响. 公开发表的文献中集中研究冲击孔的排列方式、冲击距

和横流作用对冲击换热的影响, 关于不同的出流方式对冲击换热的影响研究较少. 本文基于涡轮叶片端壁区域, 采用瞬态液晶测量技术研究了出流方式和雷诺数对阵列冲击换热特性的影响. 同时对冲击通道的流场进行了数值模拟, 以便能够深入了解由于不同的出流方对冲击靶面换热特性的影响, 为冲击换热冷却的设计提供参考信息.

1 实验装置及测试方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 主要有压缩机、加热

收稿日期: 2009-09-16; 修订日期: 2010-05-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB70770)

作者简介: 王克菲(1984-), 男, 河南平顶山人, 硕士生, 主要从事航空发动机高温部件的传热与冷却技术研究.

器,测试段,真空泵几部分组成,进口的浮子流量计 1 可以调节流动参数雷诺数,出口的浮子流量计 2 可以控制气膜孔出流与侧向出流的流量. 开始实验时,气流通过加热器后先通过电磁阀 2 旁通,等气流加热到需要的温度再切换到电磁阀 1 流经测试段,本实验考虑了 3 种不同的出流方式,第一种是气流冲击完之后全部从气膜孔流出,第二种是全部从侧向通道流出,第三种是从气膜孔

和侧向通道各流出一半,流量通过浮子流量计 2 调节. 冲击孔是一个平行四边形的阵列分布,一共 96 个冲击孔,孔直径为 2.2 mm,本实验测量前 7 列冲击孔(从左往右)所对应的靶面区域的传热系数,后 5 列冲击孔对应的靶面上开有 25 个直径为 3.2 mm 的气膜孔,冲击距为 10 mm. 图 2 为阵列冲击孔和气膜孔的几何结构,测试段结构如图 3 所示.

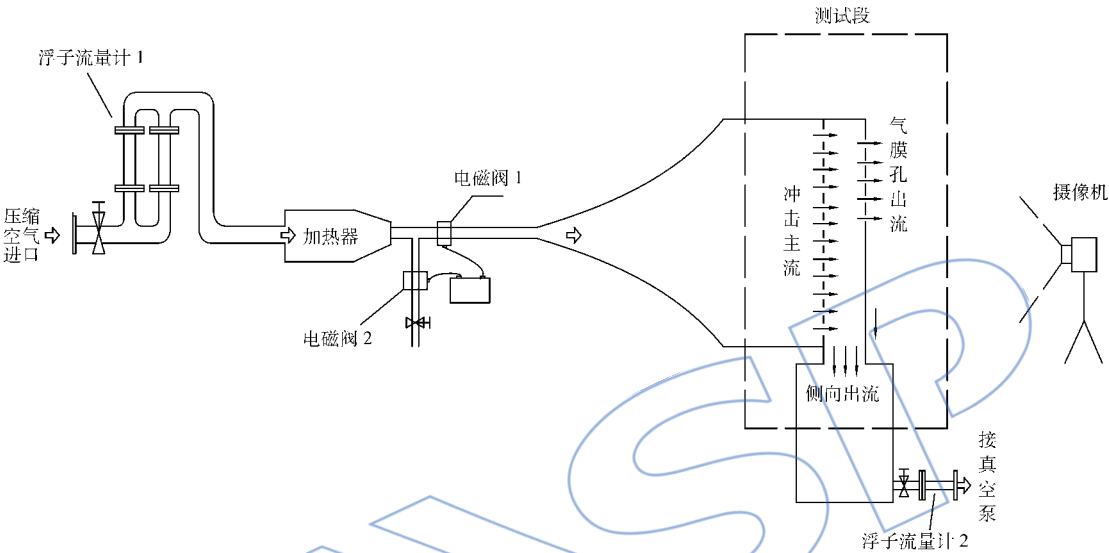


图 1 实验系统示意图
Fig. 1 Schematic of experimental facility

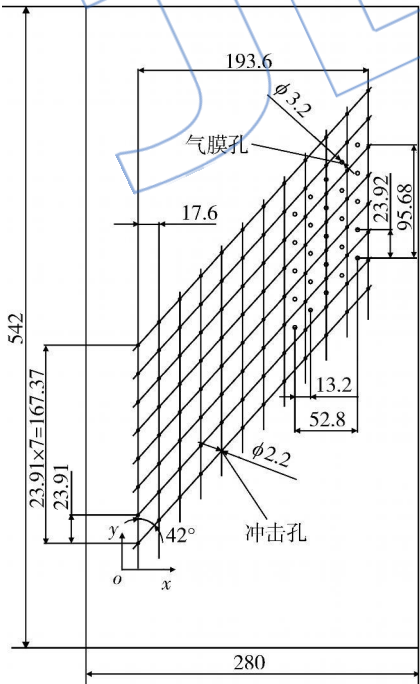


图 2 阵列冲击孔和气膜孔的几何结构(单位: mm)
Fig. 2 Schematic diagrams of the array impingement holes and film holes (unit: mm)

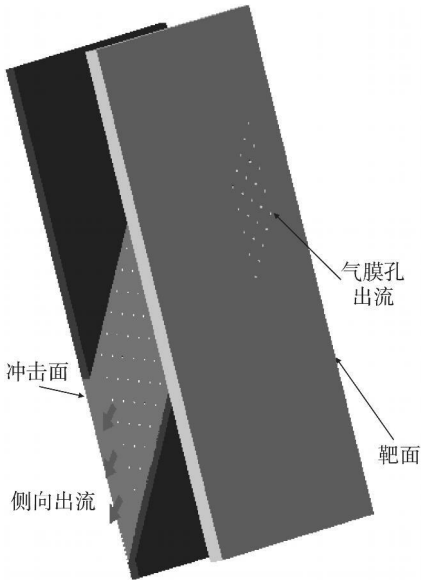


图 3 测试段结构图
Fig. 3 Schematic of the test section

1.2 测试方法及误差

本文实验采用瞬态液晶测量技术对靶面进行传热系数测量. 瞬态液晶测量技术在国外已发展

的较为成熟, 并有广泛的应用^[24], 国内也取得了初步进展^[10]. 本文采用的热色液晶为 R35C1W 型, 即显色范围在 35~ 36 ℃, 环境温度在 15 ℃ 左右, 主流温度范围为 40~ 70 ℃.

基于第三类边界条件下的一维半无限大瞬态导热解析解

$$\frac{T_w(t) - T_0}{T_g(t) - T_0} = 1 - \exp(\beta^2) \operatorname{erfc}(\beta) \quad (1)$$

其中 $\beta = h \left(\frac{t}{\rho c \lambda} \right)^{1/2}$. T_0 为平板初始温度, T_w 为平板测量面壁面温度, T_g 为气流温度. ρ, c, λ 分别为平板材料的密度、比热容和导热系数. 真实的实验中, 用热电偶采集气流温度 T_g 的变化过程, 并用摄像机记录液晶的显色变化过程, 从液晶的显色变化可以得到每个时刻的壁面温度 T_w 的分布, 把 T_0, t, T_w, T_g 代入式(1)就可以得到表面传热系数 h 的分布.

本文研究中的主要参数定义如下: 冲击雷诺数 $Re = \rho V_j d / \mu$, 为 5 000~ 25 000, 努塞尔数 $Nu = hd / \lambda$, 其中 ρ, μ 及 λ 分别为空气的密度, 动力黏度和导热系数, d 为冲击孔直径, V_j 定义为 96 个冲击孔的平均速度, 平均努塞尔数 Nu_{av} 为靶面各点努塞尔数的平均值.

本文实验中, 冲击气流温度 T_g 测量误差为 0.2 K, 时间测量误差为 0.1 s, 靶板材料的物性 ($\rho c \lambda$) 不确定度为 5%, 根据文献[11]中方法计算得到传热系数测量的最大不确定度为约为 7.3%.

2 实验与计算结果分析

2.1 实验结果分析

图 4 给出了第 1 种出流方式下 $Re = 5\,000, 15\,000$ 时, 靶面局部努塞尔数的分布云图, 可以看出在两种不同雷诺数下, 靶面的局部努塞尔数分布规律基本是一致的, 与文献[12]吻合. 由于冲击形成的高速射流, 在冲击驻点区域形成强换热区域, 由于关闭侧向出流通道阀门, 气流冲击完之后全部从气膜孔流出, 这样沿气膜孔出流方式, 下游的冲击驻点区域受到上游的横流影响, 从云图上也可以看出, 下游冲击驻点区域的局部努塞尔数分布云图有向下游偏扫尾的趋势, 上游冲击驻点区域的局部努塞尔数分布云图则表现为相对比较规则的圆形分布. 随着雷诺数的升高, 靶面的局部努塞尔数整体都有所升高. 进口段流场, 可能分布不均匀, 每个孔的流动状态不可能完全一样, 这也

会造成每个冲击孔周围的传热系数不可能完全一致, 这也正是实际情况的客观反映. 图 5 给出了 5 种雷诺数情况下, 沿气膜孔出流方向的平均努塞尔数变化情况, 任意雷诺数下, 平均努塞尔数呈现周期性变化, 冲击驻点区域最高, 附近区域换热强度迅速下降, 所以冲击换热适应于局部高温地区的换热. 随着雷诺数的升高, 周期性分布的规律基本上保持不变, 只是换热强度随着雷诺数的升高而升高.

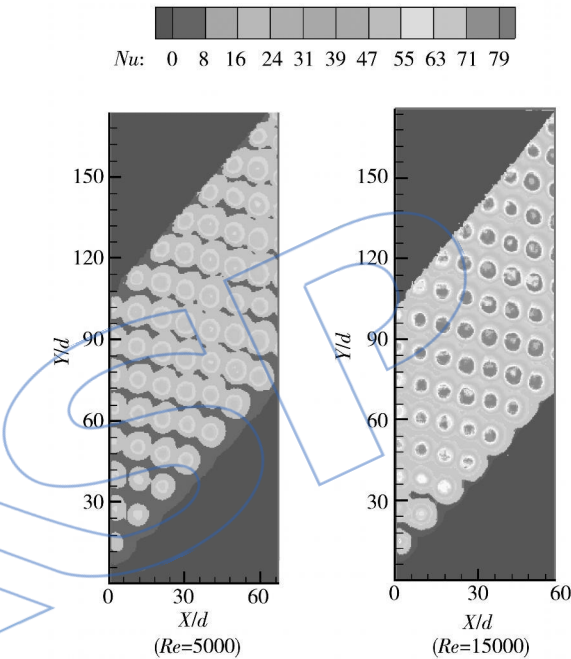


图 4 冲击靶面局部努塞尔数分布

Fig. 4 Impingement target surface local Nusselt number distributions ($Re = 5\,000, 15\,000$)

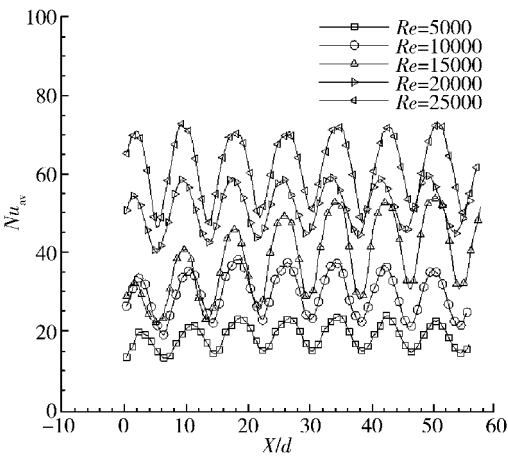


图 5 雷诺数对沿气膜孔出流方向平均努塞尔数的影响
Fig. 5 Effect of Reynolds number on spanwise averaged Nusselt number distributions

图 6 给出了 $Re=15000$ 时,第 2,3 种出流方式时的靶面局部努塞尔数分布云图,可以看出在第 2 种出流方式时(气流全部从侧向出流,如图 6(a)所示),在侧向出流通道的下游 X/d 较小的地方,冲击气流受到上游通道横流的影响很强,从云图上可以看出大部分冲击驻点区域受到横流的影响,因此驻点附近区域的局部努塞尔数分布向侧向通道出口方向有扫尾偏移的趋势.第 3 种出流方式时(气流量从侧向通道和气膜孔各流出一半,如图 6(b)所示),冲击驻点区域要比第 2 种出流方式时的换热特性有所增强,这是由于气流冲击完之后,向侧向出流方向和气膜孔出流方向都有扩散,这样横流的作用等于被削弱,冲击驻点区域受到的影响相对较弱,冲击形成的高速气流直接冲击靶面较强,这样冲击驻点区域的局部努塞尔数就有所提高.与 $Re=15000$ 时的第 1 种出流方式(如图 4, $Re=15000$)相比较可以看出,第 1 种出流方式时,7 列冲击孔冲击驻点区域的传热系数也受横流的影响,但是与第 2 种出流方式相比较,第 1 种出流方式下受横流影响相对较弱,这是因为第 1 种出流方式下,横流主要来自测量区域的 7 列冲击孔,而后 5 列冲击孔形成的横流对其影响较小.第 2 种出流方式下,气流冲击完之后全部从侧向通道出流,这样测量区域全部位于横

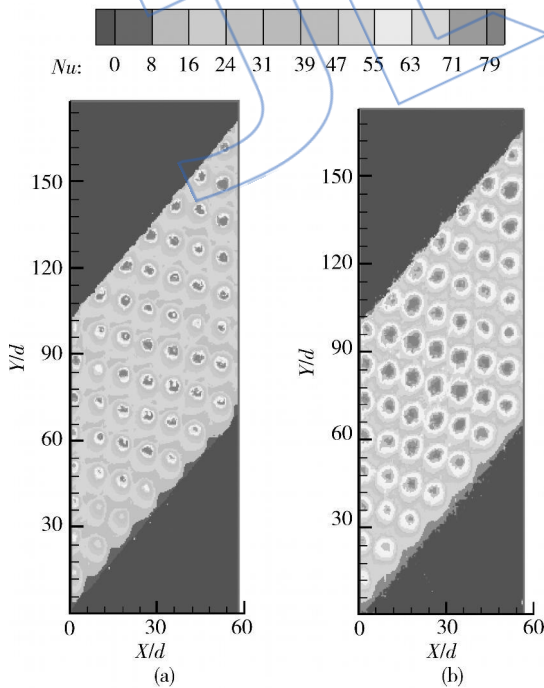


图 6 不同出流方式时的局部努塞尔数分布
Fig. 6 Detailed local Nusselt number distributions for different flow exit types

流通道的下游区域,后 5 列冲击孔冲击完之后的横流对前 7 列冲击区域影响较大,随着横流作用的增强,冲击的作用被削弱,所以换热效果相对较低.图 7 给出了 $Re=15000$ 时,3 种不同出流方式沿气膜孔出流方向的平均努塞尔数变化趋势.可以看出,第 3 种出流方式时,平均努塞尔数相对较高,第 2 种出流方式时,平均努塞尔数相对较低.

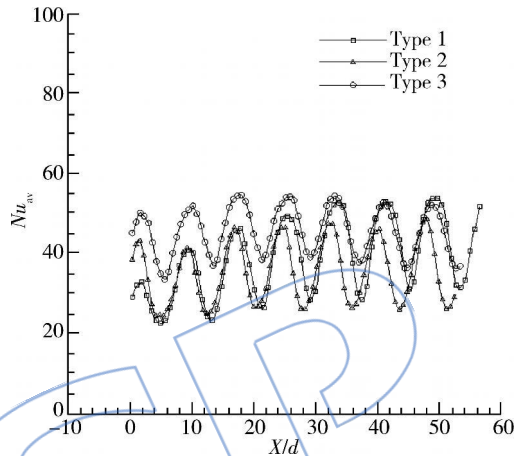


图 7 出流方式对平均努塞尔数的影响
Fig. 7 Effect of flow exit type on spanwise averaged Nusselt number distributions

2.2 数值计算结果分析

用数值模拟方法对流动和换热进行分析,本文采用标准 $k-\epsilon$ 模型,近壁面采用增强型壁面函数法,用流动特性分析传热系数的分布规律.图 8 给出了雷诺数 $Re=15000$,三种不同出流方式时,第 1 列与第 7 列冲击孔通道流向截面的速度分布,可以看出三种不同的出流方式,产生的横流作用强弱也是不同的,第 2 种出流方式时,横流的作用明显最强,冲击气流发生的偏移较为明显,特别是位于侧向通道出口的第 1 列冲击孔,冲击作用被严重削弱,与前面分析的换热特性将被减弱也相对应.每一种出流方式时,不同列之间受横流影响的作用也不一样,总的来说处于冲击通道上游的相对来说受横流影响较小,而处于下游的,由于沿着出流通道横流作用逐渐增强,与冲击气流相遇时,在近靶面地方形成强烈的涡,正是这种涡的作用削弱了冲击效果.图 9 给出了靶面局部努塞尔数分布的计算结果.由于受网格限制的因素,在 Y/d 方向上只取正中心的两排冲击孔作为计算区域.由图 9 可以看出横流的作用对局部努塞尔数的影响也比较明显,第 2 种出流方式时局部努

塞尔数相对较小, 第 3 种出流方式时相对较大. 这与实验结果也是吻合的.

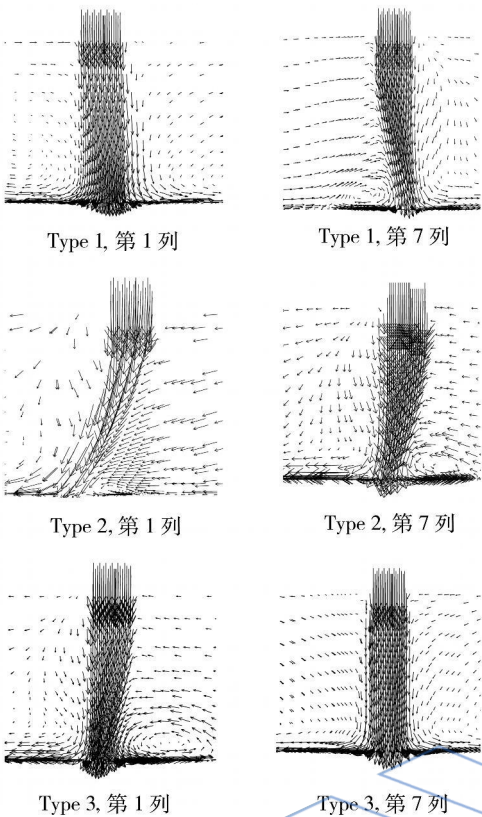


图 8 通道流向截面速度矢量局部分布计算结果
Fig. 8 Calculation results of local velocity distribution

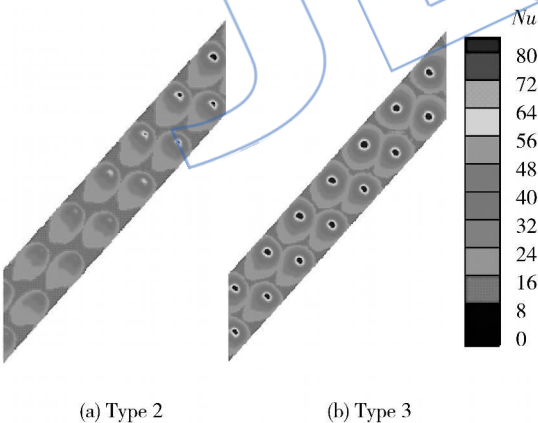


图 9 靶面局部努塞尔数的计算结果
Fig. 9 Calculation results of impingement target surface local Nusselt number distributions

2.3 平均换热分析

图 10 给出了 3 种不同出流方式时冲击靶面的平均努塞尔数随雷诺数的变化曲线, 实线表示实验结果, 虚线表示计算结果. 可以看出, 任意出流方式时, 靶面的平均努塞尔数均随雷诺数的升

高而升高, 最高雷诺数与最低的相比平均努塞尔数增加了 2~ 3 倍左右. 而且第 3 种出流方式时, 靶面的平均努塞尔数是最高的, 第 1 种出流方式靶面的平均努塞尔数次之, 第 2 种出流方式时靶面的平均努塞尔数是最低的, 这与前面的局部换热分析也是一致的, 从计算结果上来看, 计算结果同样遵循这样的规律, 只是在数值上实验结果稍微偏高, 这可能是由于通道流动情况很复杂, 所选取的湍流模型很难完全模拟实际的情况, 所以数值上会有所偏差, 就平均努塞尔数而言, 大约相差 10% ~ 15% .

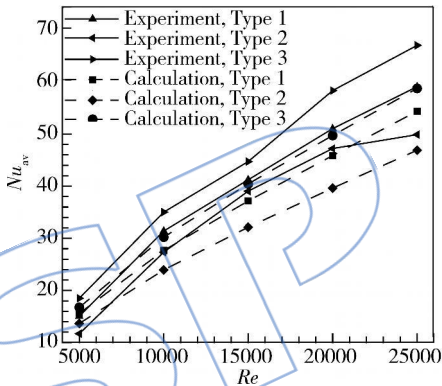


图 10 冲击靶面平均努塞尔数随雷诺数变化图
Fig. 10 Impingement target surface average Nusselt number varying with Reynolds number

3 结 论

总结本文实验结果, 主要有以下结论:

- 1) 局部努塞尔数和平均努塞尔数均随雷诺数的升高而升高, 三种不同出流方式时, 雷诺数从 5000~ 25000 的靶面平均努塞尔数增加了大约 2~ 3 倍.
- 2) 三种不同出流方式对测量区域造成的横流强弱作用是不同的, 导致冲击靶面的换热特性也有所不同. 本实验的结构中, 横流作用对传热系数总的效果是削弱的, 第 2 种出流方式对测量区域造成的横流作用最强, 冲击换热强度相对较弱, 第 3 种出流方式对测量区域造成的横流作用最弱, 冲击换热强度相对较强.

参考文献:

[1] Goldstein R J, Behbahani A L. Impingement of a circular jet with and without cross flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 25(9): 1377-1382.
[2] Uysal U, Chyu M K, Cunha F J. Heat transfer on internal

- surface of a duct subjected to impingement of a jet array with varying jet holes size and spacing[R]. ASME Paper 2005 GT-68106, 2005
- [3] Kercher D M, Tabakoff W. Heat transfer by a square array of round air jets impinging perpendicular to a flat surface including the effect of spent air[J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1970, 12(1): 73-79.
- [4] Taslim M E, Setayeshgar L. An experimental evaluation of advanced leading edge impinging cooling concepts[R]. ASME Paper 2000 GT-0222, 2000.
- [5] O'Donovan T S, Murray D B. Fluctuating fluid flow and heat transfer of an obliquely impinging air jet[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25-26): 6169-6179.
- [6] Gillespie D R H, Wang Z, Ireland P T. Full surface local heat transfer coefficient measurements in a model of an integrally cast impingement cooling geometry[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(1): 92-99.
- [7] Huang Y, Ekkad S V, Han J C. Detailed heat transfer distribution under an array of orthogonal impinging jets[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1998, 12(1): 73-77.
- [8] Bailey J C, Bunker R S. Local heat transfer and flow distribution for impingement jet arrays of dense and sparse extent[R]. ASME Paper 2002-GT-30472, 2002.
- [9] 张靖周, 李永康, 谭晓茗, 等. 阵列射流冲击冷却局部对流换热特性的数值计算与实验研究[J]. 航空学报, 2004, 25(4): 339-342.
- ZHANG Jingzhou, LI Yongkang, TAN Xiaoming, et al. Numerical computation and experimental investigation on local convective heat transfer characteristics for jet array impingement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(4): 339-342. (in Chinese)
- [10] 朱惠人, 郭涛, 张丽. 液晶瞬态技术测量带侧向流绕流柱通道端壁换热[J]. 推进技术, 2007, 28(6): 620-623.
- ZHU Huiren, GUO Tao, ZHANG Li. Measurements of endwall heat transfer in pin fin array duct with lateral flow by using transient liquid crystal technique[J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(6): 620-623. (in Chinese)
- [11] Yan Y, Owen J M. Uncertainties in transient heat transfer measurements with liquid crystal[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23(1): 29-35.
- [12] Damerow W P, Murtaugh J C, Burgraf F. Experimental and analytical investigation of the coolant flow characteristics in cooled turbine airfoils[J]. NASA-CR-12088, 1973.