

文章编号: 1000-8055(2010)10-2249-06

# 带 90°肋和双排出流孔通道换热特性的实验

郭 涛, 朱惠人, 许都纯  
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

**摘 要:** 采用瞬态液晶测试技术测量了带 90°肋和双排出流孔通道有出流壁面的换热分布, 研究了出流孔与肋的相对位置、通道雷诺数和出流比对换热的影响. 研究表明: 肋间换热分布受肋前壁面气流分离, 肋间气流再附着和出流的共同作用影响; 出流孔位置的改变不会对气流再附着的位置产生明显影响; 出流孔靠近上游肋时, 回流区的换热得到改善, 再附着区的换热被出流作用加强, 换热特性变好; 平均换热强化效果随雷诺数增大而减小, 随出流比增大呈增大趋势, 但增大幅度较小.

**关 键 词:** 肋; 出流; 冷却通道; 瞬态测试; 液晶

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

## Heat transfer investigation of the channels with 90° rib turbulators and double-row bleed holes

GUO Tao, ZHU Huiran, XU Dunchun

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

**Abstract:** The detailed heat transfer distributions of the wall with bleed holes in a channel with 90° rib turbulators and double-row bleed holes were measured by using transient liquid crystal technique. The effects of the relative positions of rib turbulators and bleed holes, channel Reynolds numbers and bleed ratios on heat transfer characteristics were studied. The results show that: the heat transfer distributions are affected by the combined effect of the flow separation, reattachment and bleeding; the heat transfer characteristics for the bleed holes near the upstream ribs are best because of the heat transfer improvement in back-flow region and heat transfer enhancement in reattachment region by bleed effect. For the case of the bleed holes near the downstream ribs, the heat transfer characteristics turn worse since higher heat transfer regions behind the holes are confined by ribs; the change of bleed hole location do not modify the position of the flow reattachment, but affect the heat transfer distribution and intensity in the region; the average heat transfer enhancement decreases with the growing Reynolds number, and slightly increases with the increase of bleed ratio.

**Key words:** rib turbulator; bleed; cooling channel; transient measurement;  
liquid crystal

为提高燃气涡轮发动机的推质比和循环效率, 涡轮工作温度越来越高. 必须采取有效的内部

和外部冷却技术使涡轮温度低于材料许用温度. 带肋和出流孔的通道是一种常用的冷却结构. 取

收稿日期: 2009-09-17; 修订日期: 2009-11-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2007CB707701)

作者简介: 郭涛(1976-), 男, 吉林四平人, 高级工程师, 博士, 主要从事航空宇航推进器高温部件传热及冷却技术和传热实验方法研究.

自压气机的冷却空气在通道内冷却涡轮叶片内壁的同时,一部分冷气由出流孔流出,在涡轮外表面形成气膜冷却以保护叶片不受高温燃气的破坏. 为正确设计此类通道,尤其对于验证用于叶片冷却系统设计的计算程序,需要详细掌握通道的强化换热机理并获得定量的实验数据.

针对带肋通道,许多研究工作研究了雷诺数和几何参数,比如通道的宽高比、肋高与通道当量直径之比(阻塞比)、肋距与肋高之比、肋的形状等,对换热特性的影响<sup>[1-4]</sup>. 有学者通过实验和数值模拟的方法研究了带肋通道内的换热分布<sup>[5-9]</sup>. 这些研究揭示了肋强化换热的机理和肋对流动特性的影响.

关于出流对强化换热的影响,文献[10]以实验方法研究了光滑壁通道内出流孔附近的换热分布,揭示了出流孔强化换热的机理.

针对带肋和出流孔通道,文献[11-12]研究了肋和出流孔共同作用下的流动特性. 文献[13]研究了不同的出流条件和肋与孔的相对位置对换热的影响. 文献[14]研究了肋的排布方式对换热的影响. 文献[15-16]针对变截面通道研究了通道内的流动和换热特性,以上研究所展现的流动和换热分布有助于加深对肋和出流共同作用下的强化换热机理的认识.

上述研究针对的多为通道中有一排出流孔的情况,在实际的涡轮叶片冷却通道中,涡轮前缘部分带肋通道的出流孔往往不只是一排. 在叶片气膜孔的加工中,由于加工误差也可能导致孔位置偏离肋距中间. 针对此类情况,本文测量了带肋和双排出流孔通道有出流壁面的换热分布,重点分析了出流孔位置、通道入口雷诺数和通道总出流比对换热特性的影响.

采用瞬态液晶测量传热系数的技术已广泛用于全表面换热测量. 文献[5-6, 10, 12-14]均采用该技术测量详细的换热分布. 本文亦采用该技术进行实验研究.

1 实验装置

实验装置简图如图 1 所示. 气流从风机流出,经管路和入口稳定室消除压力波动后进入实验段. 在入口稳定室和实验段之间装有快速加热器用于气流加热. 加热后的气流在实验通道内向后流动的同时,一部分气流经出流孔流出. 实验通道出口和出流孔出口装有出口稳定室和出流收集腔用以保证稳定的出口条件. 主流及出流孔的出流

流量由其后的阀门和流量计调节和测量. 实验段采用有机玻璃制成. 安装后使风洞有良好的气密性以保证测量数据的准确.

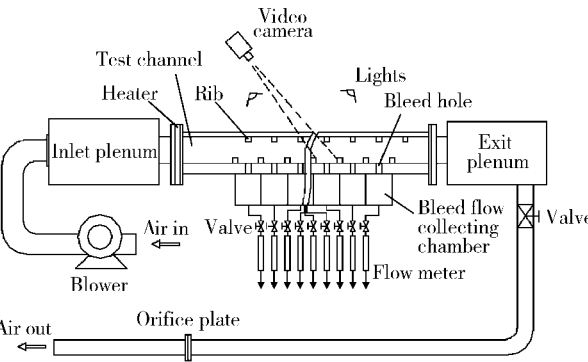


图 1 实验装置  
Fig. 1 Schematic of test facility

实验通道的几何结构如图 2 所示,截面为矩形,宽高比为 2.5 ( $202.5\text{ mm} \times 81\text{ mm}$ ),两侧壁光滑,上下壁面各有 10 根肋,交错布置,肋间距与肋宽的比为 10,肋截面宽高比为 1 ( $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ). 图 3 为肋与出流孔几何结构示意图,在下壁面每两肋之间开有两个出流孔,出流孔直径  $d=9\text{ mm}$ ,孔排距为  $10d$ ,肋间两孔的中心连线与肋平行. 出流孔可分别位于两肋中间、后肋上游(距后肋  $1/4$  肋距)和前肋下游(距前肋  $1/4$  肋距). 两出流孔距侧壁的距离分别为  $5d$  和  $7.5d$ . 出流孔与下壁面夹角为  $35^\circ$ ,与主流夹角为  $90^\circ$ ,长径比为 6.1. 每两肋之间的出流孔共用一个出

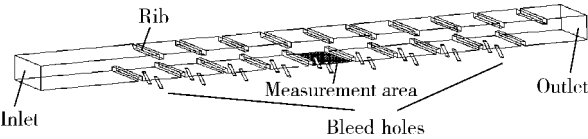


图 2 实验通道  
Fig. 2 Model of test channel

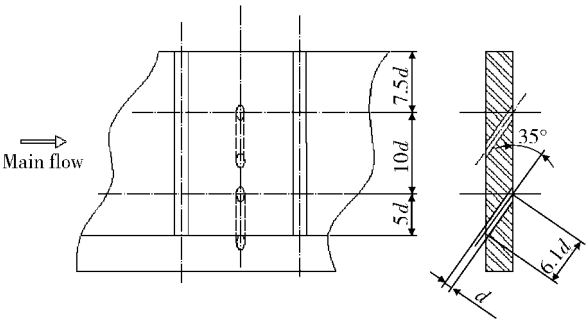


图 3 肋和出流孔几何特征  
Fig. 3 Configuration of rib turbulators and bleed holes

流收集腔. 换热测量区域位于有出流壁面第 5 根和第 6 根肋之间.

2 测试方法

液晶颜色随温度而改变的特性可用于测量研究表面的温度. 测试开始前, 在研究表面喷涂黑色底漆作为色彩捕捉的背景, 在其上喷涂测温的窄带液晶. 采用瞬态实验技术确定局部传热系数. 其原理是: 当流经研究表面的气流温度突然变化, 例如在短时间内被加热, 研究表面温度由于对流换热而开始升高. 壁面温度随时间变化的过程与实验件和气流的初始温度、气流被加热后的温度、实验件材料的物性以及传热系数有关. 如果实验件材料的物性、实验件和气流的初始温度已知, 传热系数可由非稳态导热理论利用壁面温度和气流温度随时间的变化过程计算. 在很短的实验时间内, 计算可采用式 (1) 的一维半无限大导热方程<sup>17)</sup>

$$t_w(\tau) = t_0 + (t_g - t_0) \times \left[ 1 - \exp\left(\frac{h^2 \tau}{\rho c \lambda}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h \sqrt{\tau}}{(\rho c \lambda)^{1/2}}\right) \right] \quad (1)$$

为满足一维半无限大假设, 所允许的最大测量时间由式 (2) 计算

$$\tau \leq \frac{\rho c \delta^2}{16 \lambda} \quad (2)$$

其中  $t_w$  为壁面温度, 由液晶测量,  $t_0$  为实验件和气流的初始温度,  $t_g$  为加热后的气流温度,  $\tau$  为测试时间, 通过拍摄液晶颜色变化的视频帧确定,  $\rho$ ,  $c$ ,  $\lambda$  分别是实验件材料的密度、质量热容和导热系数,  $h$  为表面传热系数,  $\delta$  为壁面厚度.

本项研究中, 测试壁面厚度为 30 mm, 考虑到热气流进入出流收集腔后壁面两侧均发生换热, 采用半厚度作为计算参数, 所允许的最大测量时间为 130 s.

通道入口的快速加热器可使气流温度在 1 s 内升高 40 °C. 测试区域上游装有高频响热电偶测量气流温度随时间的变化. CCD (charge coupled device) 摄像机和照明光源位于测试区域上方并与研究表面呈一定角度以避免上壁面的肋对视野的遮挡. 考虑到拍摄角度和光照条件均会对液晶的颜色-温度关系产生影响, 在与实验条件相同的拍摄条件下对液晶进行了校准, 以保证壁温测量的准确性.

在测试开始前, 调节主流和出流至目标工况, 实验件壁温和气流温度均匀且等于室温. 摄像机开机, 数采系统开始记录气流温度后, 打开快速加

热器开关, 气流被迅速加热, 壁面温度开始升高. 加热器工作的同时, 摄像机视野内的指示灯熄灭, 以此指示测试开始时刻. 反映壁面温度变化的液晶颜色变化被摄像机记录, 液晶颜色图像在实验结束后由颜色-温度关系转化为壁面温度分布. 由于摄像机拍摄帧频固定, 自实验开始到每一帧图像所代表的温度分布所经历的时间可由指示灯熄灭至该帧的帧数计算, 并由式 (1) 计算传热系数.

实验件和气流初温由精确校准的热电偶测量, 测量误差为  $\pm 0.3$  °C. 壁面温度由窄带液晶测量, 其颜色-温度关系在与实验相同的拍摄和光照条件下由热电偶校准, 考虑液晶测温的重复性误差为 0.1 °C, 液晶测温总测量误差为  $\pm 0.4$  °C. 实验时间由摄像机拍摄帧频确定, 研究中所用帧频为 25 帧/s, 时间误差为  $\pm 0.04$  s. 根据文献[18]的计算方法, 本文传热系数的不确定度约为 8%.

3 结果和讨论

研究中各参数定义如下:

通道进口雷诺数  $Re$  定义为

$$Re = \frac{\rho_{\infty} U_{\infty} D_e}{\mu} = \frac{(m_{in}/A_c) D_e}{\mu} \quad (3)$$

其中  $U_{\infty}$  为通道进口处的平均速度,  $D_e$  为通道的当量直径,  $\mu$  为空气的动力黏度,  $\rho_{\infty}$  为通道入口处的空气密度,  $m_{in}$  为通道进口的质量流量,  $A_c$  为通道截面积.

通道总出流比  $M$  定义为所有出流孔出流的总质量流量与通道进口的质量流量之比, 简称出流比, 即

$$M = \left( \sum m_i \right) / m_{in} \quad (4)$$

其中  $m_i$  为通过第  $i$  个出流孔出流的质量流量.

努塞尔数定义为

$$Nu = \frac{h \cdot D_e}{\lambda} \quad (5)$$

其中  $\lambda$  为空气的导热系数.

实验的通道入口雷诺数为 30 000, 60 000, 90 000 和 120 000, 总出流比为 0.09, 0.14, 0.18 和 0.22. 换热特性以强化传热系数表示, 具体为测量的努塞尔数  $Nu$  与充分发展的管流努塞尔数  $Nu_0$  之比.  $Nu_0$  由  $Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.33}$  计算.

3.1 出流孔位置对换热分布的影响

根据对相关研究的综合分析, 带肋和出流孔通道有出流壁面附近的主要流动特征如图 4 所示, 流动跨过扰流肋, 在肋间再次附着在壁面, 再附着区上游为回流区, 再附着区之后的气流贴壁

向下游流动. 出流孔附近, 受孔的抽吸作用影响, 孔上游的气流加速进入孔内. 孔上方的流动向壁面偏转, 在孔下游形成对壁面的冲击或斜冲击. 肋间的流动受到下游肋的阻挡后与壁面分离, 向上升起, 同时在肋前诱导出指向壁面的角涡. 带肋有双排出流孔通道壁面的换热分布是上述流动特征共同作用的结果, 出流孔与肋的相对位置不同, 各因素相互作用的方式和对换热的贡献有所区别, 形成不同的换热分布特征.

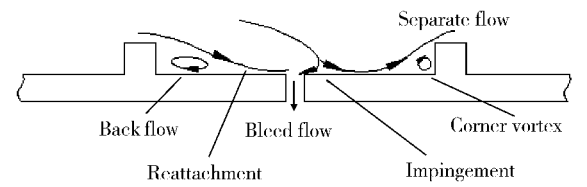


图 4 带肋有出流壁面附近的流动特征

Fig. 4 Flow near the wall with ribs and bleed holes

图 5 是三种出流孔与肋相对位置情况下形成的换热分布. 由于不同雷诺数和出流比情况下, 相邻两肋间的换热分布规律类似, 图中展示的是雷诺数  $Re=90\,000$ , 通道总出流比  $M=0.22$  时的结果, 以下均以此为例进行分析.

出流孔位于相邻两肋中间时, 如图 5 (a) 所示, 在出流孔前后, 出流作用使换热得到强化, 但孔前后的强化换热机理并不相同, 在孔前, 出流使流动加速, 边界层变薄, 换热增强, 而孔后, 出流使孔上方气流向壁面偏转, 在紧靠孔下游区域形成

冲击或斜冲击是换热得到强化的原因. 在孔后的冲击滞止点之后, 边界层重新发展, 换热强化程度逐渐减小. 肋间的中间略靠上游位置, 受分离气流再附着的影响, 在流动再附着区域形成较强的换热. 再附着区的上游, 为回流流动, 再附着区下游, 气流贴壁流动, 边界层重新生成, 均使换热在再附着区上下游位置逐渐减弱. 在肋前, 流动分离所诱导角涡顺时针旋转, 使肋前紧靠肋附近的流动方向指向壁面, 该区域换热增强. 而肋后回流受肋阻挡逐渐升起, 使肋后换热较小. 由于出流孔位于气流再附着形成的高换热区内, 在出流和气流再附着的作用下, 肋间高换热区在出流孔前后分别向上下游扩展, 并且孔后的换热强化区域大于孔前, 肋间换热较强区域的形状在孔间呈弯月形, 在孔外侧则偏向上游.

出流孔靠近下游肋时形成的换热分布如图 5 (b) 所示, 气流再附着区, 出流孔附近和肋前的高换热强化区依然存在, 并且气流再附着形成的较高换热强化区域的位置并未随出流孔位置的改变而改变, 只是使孔上游对应的再附着区的强化换热效果强于再附着区的其他区域, 形成哑铃形的较高换热强化区域, 说明出流孔位置的改变只改变了再附着区展向的速度分布, 但不会对气流再附着的位置产生明显影响. 与出流孔在中间的情况相比, 孔后的高换热区域受肋的阻挡而减小. 由于出流孔移向下游不会使肋后和孔间的较低换热强化区域的流动情况发生明显改变, 其换热分布

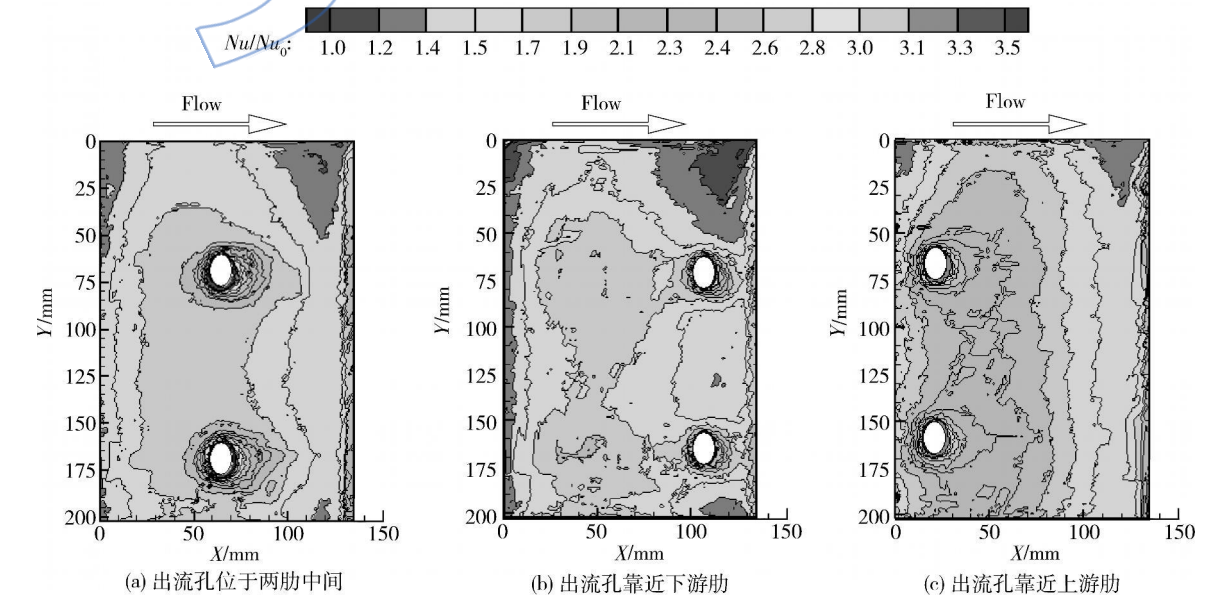


图 5 不同出流孔位置形成的换热分布( $Re=90\,000$ ,  $M=0.22$ )

Fig. 5 Detail heat transfer distributions produced by different holes locations ( $Re=90\,000$ ,  $M=0.22$ )

情况未得到改善.

出流孔靠近上游肋时, 如图 5(c) 所示, 气流再附着形成的高换热区域的位置与前述两种情况相比, 仍未发生明显改变. 出流孔位于回流区内, 出流的强化换热作用使回流区和肋后的换热明显加强, 出流孔后的强化换热区域与气流再附着形成的强化换热区域叠加, 使再附着区的换热也有所加强, 孔间的较低强化换热区域减小.

3.2 雷诺数对平均换热特性的影响

根据换热分布的测量结果, 整理得到了不同出流孔位置时, 测量区域的平均强化传热系数随雷诺数的变化. 在各出流比下, 雷诺数对平均换热特性的影响呈现相同的规律, 以下以出流比  $M = 0.22$  的情况为例进行分析, 如图 6 所示, 相同雷诺数下, 三种出流孔位置形成的几何布局中, 出流孔靠近上游肋时平均换热强化效果最好, 出流孔位于两肋中间时次之, 出流孔靠近下游肋时最差, 原因在于出流孔靠近上游肋时改善了回流区和肋后较差换热区域的换热, 并且孔后的强化换热效果使再附着区的换热进一步加强. 而出流孔靠近下游肋时, 不仅未改善肋后和孔间等原有换热较差区域的换热, 还使孔后高换热区的影响范围受到肋的限制, 平均换热效果变差.

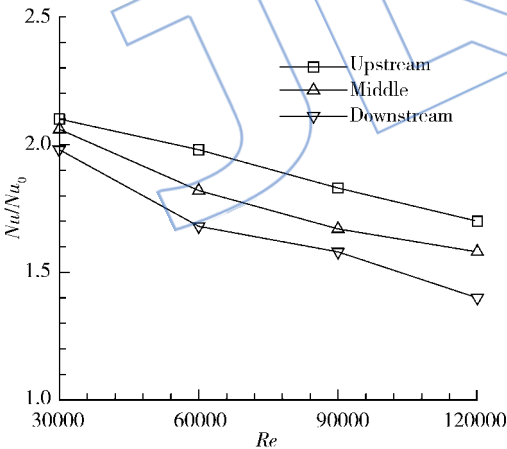


图 6 平均强化传热系数随雷诺数的变化( $M = 0.22$ )  
Fig. 6 Effect of the  $Re$  on  $Nu/Nu_0$  ( $M = 0.22$ )

在三种几何布局中, 平均强化换热效果均随雷诺数的增大而减小, 原因在于: 雷诺数增大时, 流动更加趋近于充分的湍流, 肋和出流作用对流动的扰动程度相对减小, 气流扰动增强换热的程度减小, 使平均强化传热系数减小.

3.3 出流比对平均换热特性的影响

在研究范围内的各雷诺数下, 出流比对平均

换热特性的影响规律相同, 以下以雷诺数  $Re = 90000$  的情况为例进行分析, 如图 7 所示, 相同出流比下, 出流孔位靠近上游肋时换热特性最好, 出流孔位置移向下游时, 平均换热特性变差, 其原因与 3.2 节所述相同.

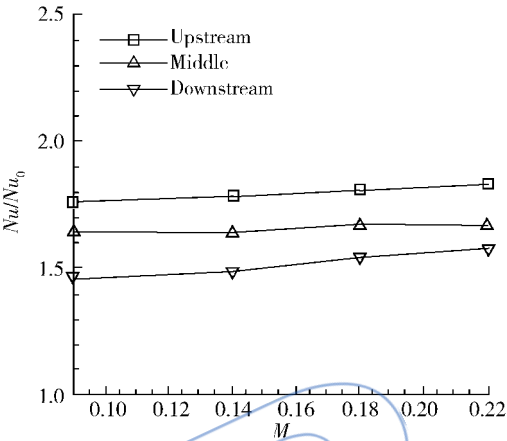


图 7 平均强化传热系数随出流比的变化( $Re = 90000$ )  
Fig. 7 Effect of the  $M$  on  $Nu/Nu_0$  ( $Re = 90000$ )

在三种几何布局中, 平均强化传热系数均随出流比的增加呈增加的趋势, 但增加的幅度很小. 原因在于: 出流比增加, 出流对孔前后的换热增强作用增大, 使总的强化换热效果增大, 但同一几何布局下, 出流比增大对换热的增强效果主要体现在出流孔附近区域, 这一区域与全部肋间区域相比, 所占比例较小, 因此对平均换热强化效果的贡献也较小.

4 结 论

本文利用瞬态液晶测试技术测量了带 90° 肋和双排出流孔通道有出流壁面肋间的换热分布, 研究了出流孔位置、通道入口雷诺数和通道总出流比对换热特性的影响, 根据所研究参数范围内的测量结果, 可得出以下结论:

- 1) 带 90° 肋和双排出流孔通道的换热强化是肋前壁面气流分离, 肋间气流再附着和出流共同作用的结果. 出流孔位置的改变会使三种因素对换热的影响发生改变, 形成较大区别的换热分布.
- 2) 出流孔附近的换热被强化, 出流和再附着的共同作用使肋间高换热区在孔上下游得到扩展.
- 3) 出流孔靠近上游肋时, 回流区的换热得到改善, 再附着区的换热被出流作用加强, 换热特性最好. 出流孔靠近下游肋时, 出流孔后的高换热区

受到限制, 换热特性最差。

4) 出流孔位置的改变不会对气流再附着的位置产生明显影响, 但会使该区域换热的分布和强度发生改变。

5) 雷诺数和出流比对换热分布的影响不大, 只对具体数值产生影响; 雷诺数增大, 平均强化传热系数减小; 出流比增大, 平均强化传热系数呈增大趋势, 但增大幅度较小。

## 参考文献:

- [1] Han J C. Heat transfer and friction in channels with two opposite rib roughened walls[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1984, 106(4): 774-781.
- [2] Taslim M E, Li T, Spring S D. Measurements of heat transfer coefficients and friction factors in passages rib roughened on all walls[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(2): 564-570.
- [3] Han J C. Heat transfer and friction in rectangular channels with rib turbulators[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1988, 110(2): 321-328.
- [4] Korotky G J, Taslim M E. Rib heat transfer coefficient measurements in a rib roughened square passage[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(2): 376-385.
- [5] Wang Z, Ireland P T, Kohler S T, et al. Heat transfer measurements to a gas turbine cooling passage with inclined ribs[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(1): 63-69.
- [6] Chanteloup D, Juaneda Y, Bolcs A. Combined 3D flow and heat transfer measurements in a 2 pass internal coolant passage of gas turbine airfoils[J]. Journal of Turbomachinery, 2002, 124(4): 710-718.
- [7] Chen Y, Nikitopoulos D E, Hibbs R, et al. Detailed mass transfer distribution in a ribbed coolant passage with a 180° bend[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000, 43(8): 1479-1492.
- [8] Cho H H, Lee S Y, Wu S J. The combined effect of rib arrangements and discrete ribs on local heat/mass transfer in a square duct[R]. ASME Paper 2001-GT-0175, 2001.
- [9] Saha A K, Acharya S. Unsteady RANS simulation of turbulent flow and heat transfer in ribbed coolant passages of different aspect ratios[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(23-24): 4704-4725.
- [10] Byerley A R, Jones T V, Ireland P T. Internal cooling passage heat transfer near the entrance to a film cooling hole: experimental and computational results[R]. ASME Paper 92-GT-241, 1992.
- [11] 陆D, 姜培学. 带肋气膜冷却平板的数值模拟研究[J]. 工热物理学报, 2005, 26(5): 844-846.  
LU Ben, JIANG Peixue. Numerical investigation of the heat transfer for a film cooled flat plate[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(5): 844-846. (in Chinese)
- [12] Chanteloup D, Bolcs A. Flow characteristics in two leg internal coolant passages of gas turbine airfoils with film cooling hole ejection[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2002, 124(3): 499-507.
- [13] Thurman D, Poinsett P. Experimental heat transfer and bulk air temperature measurements for a multipass internal cooling model with ribs and bleed[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2001, 123(1): 90-96.
- [14] Ekkad S V, Huang Y, Han J C. Detailed heat transfer distributions in two pass square channels with rib turbulators and bleed holes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(23): 3781-3791.
- [15] 张广礼, 丁水汀, 陶智, 等. 气膜出流条件下回转通道换热特性实验研究[J]. 推进技术, 2004, 25(1): 32-35.  
ZHANG Guangli, DING Shuiting, TAO Zhi, et al. An experimental study of heat transfer characteristics in turn over channel with ribs and film cooling[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(1): 32-35. (in Chinese)
- [16] 张鹏, 丁水汀, 陶智, 等. 气膜出流条件下回转通道流动特性的实验研究[J]. 推进技术, 2004, 25(1): 48-50.  
ZHANG Peng, DING Shuiting, TAO Zhi, et al. An experimental study of flow characteristics in turnover channel with ribs and film cooling[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(1): 48-50. (in Chinese)
- [17] 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.
- [18] Yan Y, Owen J M. Uncertainties in transient heat transfer measurements with liquid crystal[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2002, 23: 29-35.