

文章编号: 1000-8055(2008)04-0611-06

不同横槽结构对气膜冷却效率影响的数值研究

章大海, 陈秋炆, 曾敏, 罗来勤, 张冬洁, 王秋旺
(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 在不同吹风比下, 对几种带有横槽的离散孔气膜冷却结构的流动过程和气膜冷却效率进行了数值模拟, 分析了在相同槽深的情况下, 宽槽、窄槽和斜槽对冷却效率的影响; 并将斜槽的模拟结果与异型孔的结果进行了对比。结果表明: 在横槽的作用下, 由于面积的突扩, 使得气膜孔射流向主流的穿透能力有所降低; 在横槽下游, 二次流能够更好地贴附壁面, 气膜冷却效率有一定的提高; 在低吹风比下, 斜槽冷却效果明显, 而在高吹风比下, 窄槽冷却效果较明显; 斜槽的气膜孔冷却效果优于异型孔; 宽槽内出现了横向涡, 窄槽内出现了涡锥, 斜槽内出现了反向涡对, 槽下缘处的固壁对冷却气流的横向扩散有重要作用。

关 键 词: 气膜冷却; 数值模拟; 横槽; 吹风比

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Numerical investigation on the effect of different transverse trench configurations on film cooling effectiveness

ZHANG Da hai, CHEN Qiu yang, ZENG Min,
LUO Lai qin, ZHANG Dong jie, WANG Qiu wang

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The flow fields and cooling effectiveness of the film cooling from a row of cylindrical angled holes embedded in different transverse slots configurations were investigated numerically in several blowing ratios, to reveal the effects of narrow trench, wide trench, and inclined trench with the same trench depth on the film cooling performance from the flowing mechanism. The simulation results of inclined trench model were compared with experimental data of shaped holes. It is found that, for the embedded holes, the jet injected into the slot loses momentum at the exit of the slot; the penetration of the film secondary flow into the cross flow is suppressed and the secondary flow is pushed downwards on to the surface, resulting in better coverage. At low blowing ratio, the inclined trench has superior cooling effect, while at high blowing ratio the narrow trench has superior cooling effect. A lateral vortex appears in the wide trench; a pair of taper vortex appear in the narrow trench; and a pair of counter rotating vortex appear in the inclined trench. The trailing edge wall of the trench plays an important role in the lateral diffusion of the cooling film.

Key words: film cooling; numerical simulation; transverse trench; blowing ratio

收稿日期: 2007-04-12; 修订日期: 2007-06-07

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(2007CB210107); 国家教育部“新世纪优秀人才支持计划资助”项目(No. NCET-04-0938)。

作者简介: 章大海(1978), 男, 山东枣庄人, 博士生, 主要从事燃气轮机热端部件传热与冷却技术的数值模拟与实验研究。

提高燃气透平的入口温度是提高燃气轮机运行效率的有效措施,相应地就必须采取更为有效的冷却方法对叶片等高温部件加以保护,以避免其受到高温腐蚀和灼伤^[1].气膜冷却是当前涡轮叶片实施热防护的一个重要措施.国内外学者对气膜冷却已经开展了较为广泛的研究^[2-5].在低温低速和稳态的情况下对气膜冷却的一些基本现象和主要影响因素进行系统的研究是气膜冷却研究中的一种重要方法.运用此种方法能够解释气膜冷却中两股气流的掺混和传热规律,建立和完善气膜冷却的流动模型.影响气膜冷却效果的因素众多,其中气膜孔形状对气膜冷却效率的影响尤为显著,因此长期以来针对气膜孔结构的优化一直是重要的研究内容.在常规的离散孔气膜冷却中,孔与孔之间的区域是被冷却的薄弱区域,在气膜孔出口处沿着与流动垂直的方向开一个横槽,可使气膜横向分布更均匀,显著改善槽下游被冷却表面的冷却效果^[6-8].鉴于国内对于将离散孔与缝槽相结合的研究相关报道较少,因此本文采用数值模拟的手段,从流动的机理揭示在气膜孔出口开有横槽时,宽槽、窄槽和斜槽对改善气膜冷却效率的影响.

1 计算模型

1.1 物理模型及边界条件

图 1 为计算模型示意图,考虑到在 Y 方向为一排孔,且沿 Y 方向流动具有周期性的特征,故取出中间一个孔所在的区域为计算对象(如图 1 所示).文献[9]中指出,必须要考虑到固体平板的导热才能较精确的预测冷却效果,因此本文采用流固耦合的技术对整场进行模拟,计算区域包括主流通道,固体平板和射流通道.在气膜冷却的研究中,绝热气膜冷却效率是一个反映冷却效果的重要参数,因此为了近似模拟绝热情况,固体平板采用木材,其中木材的导热系数为 $0.173\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,采用理想不可压缩气体.模拟区域的剖面图如图 2 所示,其具体尺寸列于表 1.

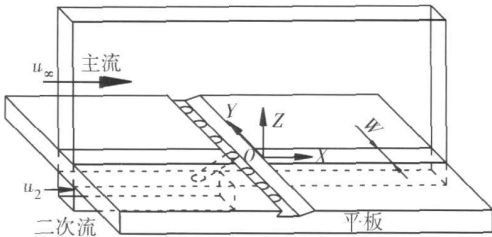


图 1 计算模型
Fig. 1 Computational model

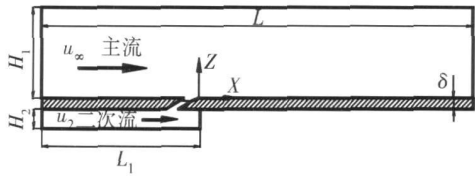


图 2 模型剖面尺寸
Fig. 2 Cross sectional dimension

- (1) 主流进口为速度进口,采用 $1/7$ 指数分布规律^[10],平均速度取为 26 m/s ,主流雷诺数 $Re_D=8\,223.5$,温度为 333.15 K ,湍流强度取 2.7% ;
- (2) 二次流进口为均匀速度进口,吹风比 M 分别取为 $0.5, 1.0$ 和 1.5 三种,温度为 293.15 K ;出口认为各变量梯度为零;其中,吹风比 M 定义式如下:
- $$M = \frac{\rho_2 u_2}{\rho_\infty u_\infty} \tag{1}$$
- 式中, ρ_2, ρ_∞ 分别为射流来流密度和主流来流密度, kg/m^3 ; u_2, u_∞ 分别为射流来流速度和主流平均注入速度, m/s .
- (3) 主流通道上壁面和射流通道下壁面以及固体平板的下表面均采用无滑移、绝热边界条件; Y 方向为 0 压力梯度,采用周期性边界条件.

表 1 模型具体尺寸

Table 1 Dimensions of the computational model	
尺寸	数值
L	$70D$
W	$3D$
L_1	$26D$
H_1	$14D$
H_2	$3D$
δ	$1.67D$

采用 Fluent 分离隐式求解器进行稳态计算,各物理量的离散采用二阶迎风格式.收敛的标准是判断各物理量的相对残差小于 10^{-6} .为比较横槽对冷却效率的影响,计算中采用了三种不同结构的横槽,如表 2 所示.坐标原点的选择: X 方向的起始点在距主流入口 26 倍孔径位置处,即为宽槽和斜槽的下边缘,距窄槽下边缘为 1.4 倍孔径, Y 方向的起始点为圆孔的中心, Z 方向的起始点为固体上壁面,如图 1 所示.

1.2 网格划分

如图 3 所示,采用分块网格技术进行网格划分.在气膜孔附近的小部分区域采用非结构化网

格, 在其它区域采用结构化网格. 根据流动的特征, 在主流通道内采用等比数列的网格划分, 即从底面向顶面和从气膜孔向两侧网格逐渐变疏. Y 坐标轴方向采用均分网格. 采用结构化网格的区域网格数约为 $275 \times 18 \times 85$.

表 2 4 种不同的几何结构配置
Table 2 Four different configurations

名称	结构 A	结构 B	结构 C	结构 D
俯视图				
侧视图				
说明	倾斜圆柱孔	窄槽	宽槽	斜槽

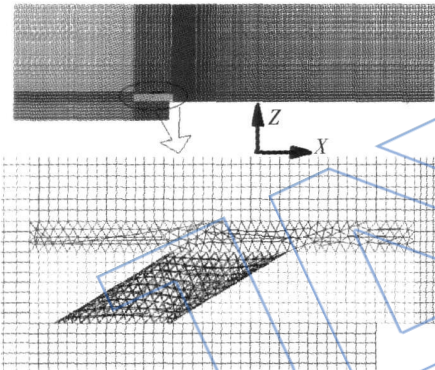


图 3 结构 D 网格示意图
Fig. 3 Grid of configuration D

2 模型验证

文献中, 很多研究者对单排倾斜圆柱孔的气膜冷却特性进行了研究, 由于缺少实验数据来验证本文对开槽气膜孔冷却效果的模拟结果, 因此本文对文献[11]中单排倾斜圆柱孔的模型在吹风比为 0.5 的工况进行了模拟, 并与其实验结果^[11]和理论模拟结果^[12]进行了对比. 图 4 示出了横向线平均冷却效率的对比结果, 从图中可以看出, 本文的模拟结果与文献中的实验和模拟结果均符合良好, 由于本文的目的不是研究不同湍流模型的影响, 且在文献[9]和文献[13]中均提到用 **Realizable $k-\epsilon$** 模型能提供最好的预测结果, 因此本文将用 **Realizable $k-\epsilon$** 模型进行模拟研究. 其中, 绝热气膜冷却效率 η 的定义式如下:

$$\eta = (T_{\infty} - T_{aw}) / (T_{\infty} - T_2) \tag{2}$$

式中, T_{aw} 为绝热壁面温度, **K**; T_2 为冷却射流束温度, **K**; T_{∞} 为主流束温度, **K**. 平均绝热气膜冷却效率 $\bar{\eta}$ 的定义式如下:

$$\bar{\eta} = \frac{1}{S} \int_{-S/2}^{S/2} \eta dy \tag{3}$$

式中, S 为相邻孔中心距, 本文中取为 3 倍孔径.

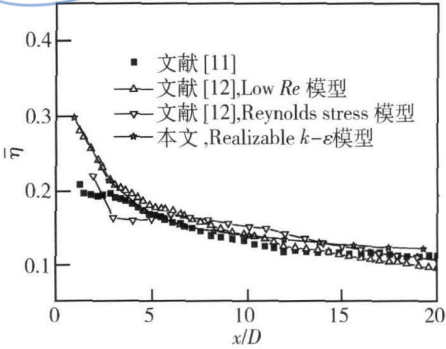


图 4 计算方法的验证
Fig. 4 Validation of the computational method

3 计算结果分析

3.1 横槽的作用效果

图 5 为 4 种结构分别在吹风比 $M = 0.5$ 和 $M = 1.5$ 的条件下的冷却效率计算结果. 可以看出, 在低吹风比 ($M = 0.5$) 下, 结构 D 较高冷却效率等值线的分布要密一些, 而结构 A 的等值线分布比较狭窄, 结构 B 等值线的分布比较宽. 在高吹风比 ($M = 1.5$) 下, 结构 B 中的区域基本被较高的冷却效率值所覆盖, 而结构 A 中只有在靠近气

膜孔出口的区域才得到了一定的冷却保护. 与不开槽的情况相比, 在整个绝热壁面上, 开槽后结构 B、C、D 的冷却气膜的影响区域均有不同程度的扩大, 两孔之间的区域也得到了较好的保护, 因此横槽可以带来更高的冷却效率.

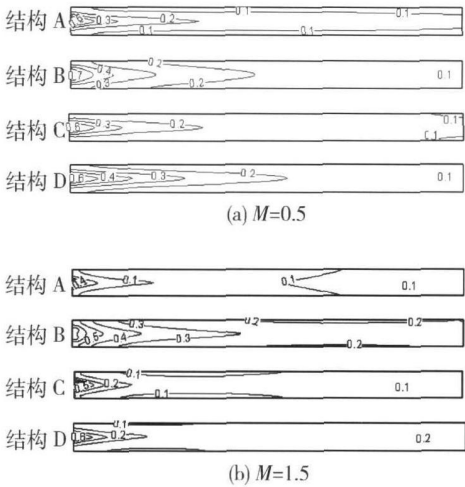


图 5 局部冷却效率 η 分布 ($Z=0$)

Fig. 5 Distribution of local film effectiveness ($Z=0$)

图 6 为这 4 种结构沿气膜孔出口下游横向线平均绝热壁面冷却效率 $\bar{\eta}$ 分布. 可以看出, 与不开槽相比, 开横槽后, 气膜孔出口下游的冷却效率均有不同程度的改善, 在低吹风比 ($M=0.5$) 下, 结构 D 有一定的冷却优势, 在高吹风比 ($M=1.5$) 下结构 B 的冷却优势较明显. 宽槽结构 C 相对于不开槽的结构 A, 其冷却效率也有了一定程度的提高.

图 7 示出了 4 种不同的结构在吹风比 $M=1.0$ 时, 分别在 $x/D=1$ 和 $x/D=10$ 位置处, 横向的气膜冷却效率 η 分布图. 从图中可以看出, 结构 B 曲线分布比较平缓, 从而说明其冷却气流在横向上分布的比较均匀. 结构 D 与不开槽的结构 A 相比, 其冷却效率分布曲线维持了原有的抛物线分布, 但整体上均有了一定程度的提高.

3.2 模拟结果与异型孔的对比

异型孔由于其开口处的扩张角导致冷却气流沿着横向和流动方向铺展的更开, 因此其冷却效果比单纯的倾斜圆柱孔要好^[14]. 为了比较开槽和异型孔的优劣, 本文将结构 D 的模拟结果与文献[14]的实验结果进行了对比, 如图 8 所示. 为了使开槽的结构和异型孔的结构具有可比性, 异型孔出口的前倾角和侧倾角均为 10° , 本文结构 D 的出口前倾角也是 10° , 文献[14]中异型孔的结构与本文模型结构 D 的主要区别参见图 9. 从图

8 中可以看出, 开槽的气膜孔比异型孔有较大的冷却优势, 而且从加工角度来说, 开槽比异型孔容易加工.

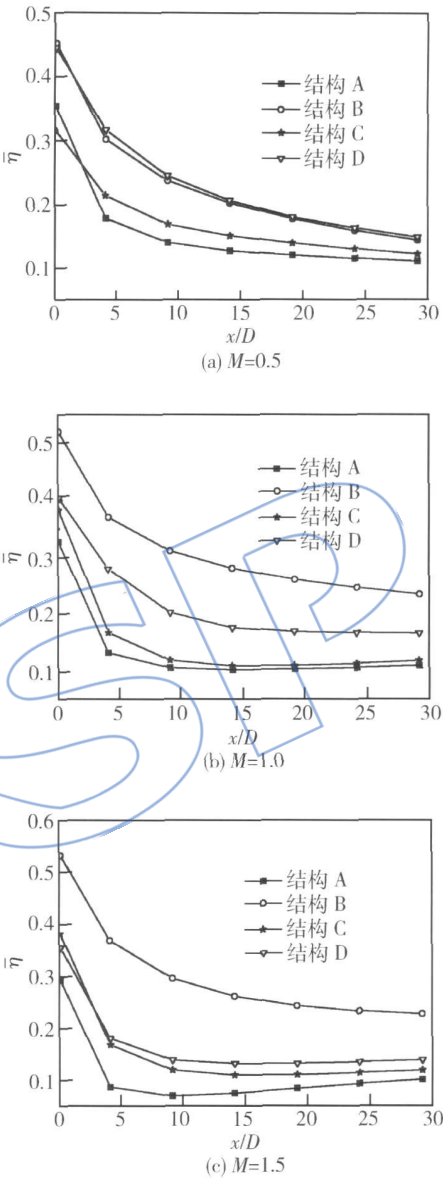


图 6 横向线平均冷却效率分布 ($Z=0$)

Fig. 6 Lateral averaged film cooling effectiveness ($Z=0$)

3.3 横槽的作用机理

壁面冷却效率直接由冷气流的运动状况以及运动过程中的扩散所决定, 图 10 为 4 种结构在吹风比 $M=1.0$ 时, 位于气膜孔下游 1 倍孔径处, 垂直于主流截面上的局部速度矢量和温度分布. 可以看到对于倾斜圆柱孔结构 A, 在绝热壁面上部形成两个明显的反向涡对, 反向涡对的卷吸使得两侧的热气流掺杂到冷气流中, 从而使得冷却气流的覆盖面较窄. 在倾斜离散圆柱气膜孔结构 A 的基础上, 在射流出口处开横槽后, 结构 B,

C, D 的反向涡对的强度得到一定程度的抑制, 主要是由于射流在进入横槽后, 射流通流面积的突扩, 使得其动量降低, 从而气膜出流向主流的垂直穿透能力有所降低, 并且由于射流本身流动的扩散和被主流压着贴附壁面, 从而导致较好的冷却效果. 比较这四种工况可以看出, 在气膜孔出口开横槽后, 结构 **B** 的冷却气流得横向扩散最明显, 从而冷却效果最好, 结构 **D** 次之, 该现象与图 5 (b), 图 6(b) 和图 7 (a) 的结论都相符合.

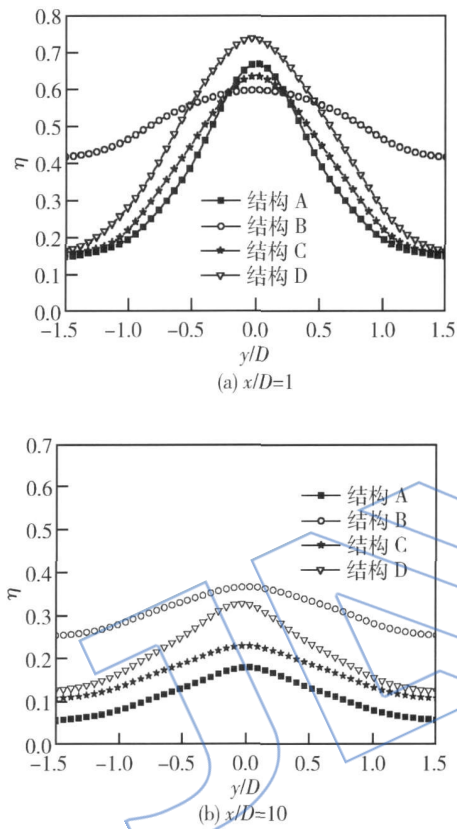


图 7 横向冷却效率分布 ($M=1.0$)
Fig. 7 Distribution of cooling effectiveness in lateral direction ($M=1.0$)

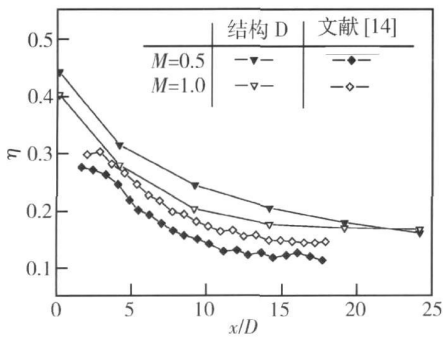


图 8 本文模拟结果与文献[14]异型孔实验结果比较
Fig. 8 Comparison between the present simulation and available experiment^[14]

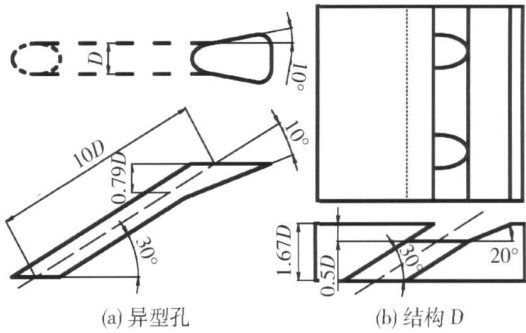


图 9 异型孔^[14]与结构 D 的结构区别
Fig. 9 Structure difference between the shaped hole^[14] and configuration D

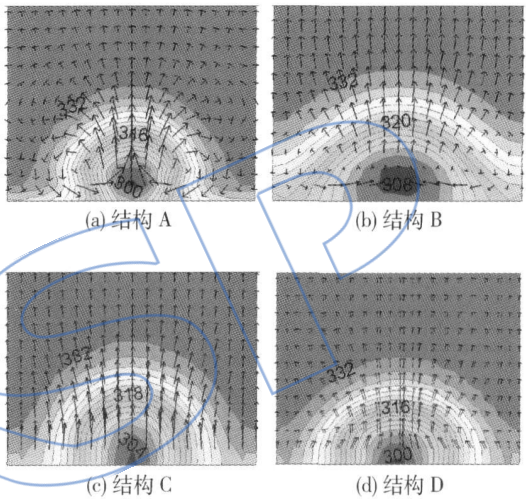


图 10 局部速度矢量和温度分布 ($M=1.0, X=1$)
Fig. 10 Velocity vectors and temperature contours ($M=1.0, X=1$)

图 11 示出了开横槽后的三种结构在 $M=1.0$ 时, 在气膜孔出口横槽内的三维流线图, 从图中可以看出主流和气膜孔射流的交互作用. 对于结构 **B**, 可以看出在横槽的上缘, 有一对反向旋转的三维涡锥, 在结构 **C** 宽槽的上缘, 有一个横向涡, 在结构 **D** 斜槽的上缘, 有一对反向旋转的三维涡对; 所以结构 **B** (窄槽) 和 **D** (斜槽) 的涡结构均有利于冷却气流在横槽内的扩散; 而结构 **C** (宽槽) 的横向涡的旋转方向不利于冷却气流向两侧的扩散. 同时, 由于结构 **B** 窄槽下缘的垂直固壁会阻碍冷却气流的流动, 使得部分冷却气流向两侧流动, 从而有利于冷却气流的横向扩散. 而结构 **C** 的下边缘垂直固壁由于离气膜孔有一定距离, 所以冷却气流的横向扩散不明显. 结构 **D** 的下边缘是一个倾斜壁面, 上缘处气膜孔两侧的三维涡对导致冷却气流向两侧扩散, 覆盖较宽的被冷却表面.

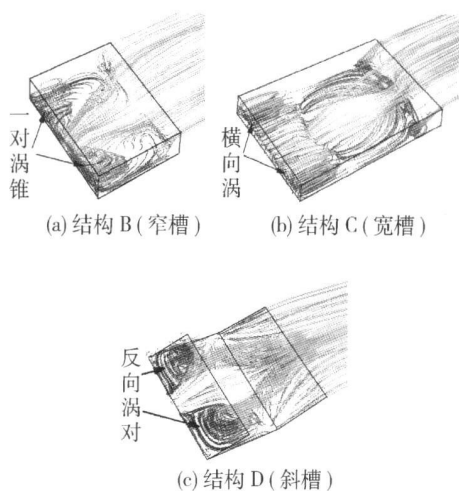


图 11 三维局部流线图

Fig. 11 Three dimensional streamline chart

4 结 论

本文运用数值模拟的方法,采用流固耦合的技术对几种开有横槽的离散孔气膜冷却结构,在不同吹风比下的流动过程和冷却效率进行了数值研究,并从流动机理的角度揭示了不同的横槽结构对改善气膜冷却效率的影响.结果表明:

(1) 横槽可使气膜冷却效率得到不同程度的提高,在低吹风比下,斜槽具有一定的冷却优势,在高吹风比下,窄槽具有较明显的冷却优势;

(2) 开斜槽的气膜孔比异型孔有较大的冷却优势,而且容易加工;

(3) 由于射流和主流的交互作用,在宽槽内出现了横向涡,窄槽内出现了涡锥,斜槽内出现了反向涡对;涡锥和反向涡对有利于冷却气流横向的扩散;而横向涡的旋转方向不利于冷却气流向两侧的扩散;

(4) 槽下缘处的固壁对冷却气流的横向扩散有重要作用.

参考文献:

- [1] 葛绍岩,徐靖中.气膜冷却[M].北京:科学出版社,1985.
- [2] 陆D,李凌波,姜培学,等.气膜冷却平板通道的数值模拟[J].热能动力工程,2005,20(4):411-413.
- LU Ben, LI Lingbo, JIANG Peixue, et al. Numerical simulation of a gas film cooled flat plate channel[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(4): 411-413.

- [3] 李永康,张靖周,姚玉.利用三角形突片改善气膜冷却效率的数值研究[J].航空动力学报,2006,21(1):83-87.
- LI Yongkang, ZHANG Jingzhou, YAO Yu. Numerical investigation on improvement of film cooling effectiveness using delta shaped tabs[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 83-87.
- [4] Nasir H, Ekkad S V, Acharya S. Effect of compound angle injection on flat surface film cooling with large streamwise injection angle[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2001, 25(1): 23-29.
- [5] Koc I, Parmaksizoglu C, Cakan M. Numerical investigation of film cooling effectiveness on the curved surface[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(9): 1231-1246.
- [6] Wang T, Chintalapati S, Bunker R S, et al. Jet mixing in a slot[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 22(1): 1-17.
- [7] Bunker R S. Film cooling effectiveness due to discrete holes within a transverse trench[R]. ASME Paper GT2002-30178, 2002.
- [8] Lu Y, Nasir H, Ekkad S V. Film cooling from a row of holes embedded in transverse slots[R]. ASME Paper GT2005-68598, 2005.
- [9] Shiet M, Kassab A J. Film cooling effectiveness from a single scaled up fan shaped hole a CFD simulation of adiabatic and conjugate heat transfer models[R]. ASME Paper GT2005-68431, 2005.
- [10] Mahjoob S, Rahni M T. Parameters affecting turbulent film cooling Reynolds averaged Navier Stokes computational simulation[J]. AIAA J. Thermophysics and Heat Transfer, 2006, 20(1): 92-100.
- [11] Di A, Ding P P, Chen P H. The selection criterion of injection temperature pair for transient liquid crystal[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2001, 44(7): 1389-1399.
- [12] Miao J M, Wu C Y. Numerical approach to hole shape effect on film cooling effectiveness over flat plate including internal impingement cooling chamber[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2006, 49(5): 919-938.
- [13] Immarigeon A, Hassan I. An advanced impingement/ film cooling scheme for gas turbines numerical study[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2006, 16(4): 470-493.
- [14] Yu Y, Yen C H. Film cooling effectiveness and heat transfer coefficient distributions around diffusion shaped holes[J]. ASME J. Heat Transfer, 2002, 124(5): 820-827.