

文章编号: 1000-8055(2009)06-1264-06

密集型阵列冲击射流换热特性实验

王 磊, 张靖周, 杨卫华

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 设计了多种不同几何参数的阵列射流冲击孔实验件, 利用红外热像仪对其冲击冷却进行了热像显示实验, 获得了冲击射流雷诺数和几何参数对局部对流换热特性的影响规律。结果表明: ①对流换热系数随着射流雷诺数 Re_j 的增加而逐渐增大; ②随着孔间距的或者冲击间距的增大, 冲击冷却的对流换热效果逐渐减弱; ③当孔间距与孔径之比在 3~5 时, 顺排阵列射流的强化换热效果优于叉排, 而当孔间距与孔径之比为 2 时, 在阵列射流上游叉排布置的强化换热效果优于顺排, 而在下游则顺排布置的强化换热效果占优。

关 键 词: 冲击冷却; 阵列射流; 强化对流换热

中图分类号: V233.1

文献标识码: A

Experimental research on heat transfer characteristics of denser jet array impingement

WANG Lei, ZHANG Jing-zhou, YANG Wei-Hua

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Several jet array impingement experimental models with different holes spacing were designed to investigate the effects of impinging jet Reynolds number and geometry parameters on the local heat transfer enhancement by using the transient Infrared thermography method. The results show that: (1) the heat transfer coefficient increases with the increasing of impinging jet Reynolds number, (2) the heat transfer enhancement becomes weaken when the jet holes spacing or jet impinging distance increase, and (3) in the case of jet holes spacing ratio arranged from 3 to 5, the heat transfer enhancement for inline jet array is higher than that of staggered jet array, but in the case of jet holes spacing ratio is 2, the heat transfer enhancement for the inline jet array is higher in the front jet rows but lower in the rear jet rows compared with staggered jet array.

Key words: impingement cooling; jet array; convective heat transfer enhancement

射流冲击是一种极其有效的强化局部传热的方法。由于射流冲击在靶面上形成很薄的流动边界层, 对流换热系数比常规对流换热要高出几倍甚至一个量级, 因此冲击冷却在现代燃气涡轮发动机的热端部件 (诸如涡轮叶片、火焰筒和涡轮机匣等) 的强化冷却中被广泛采用。国内外许多学者对冲击冷却进行了研究, 取得了一些很有意义的

研究成果。文献[1-3]实验研究了单孔射流冲击的换热特性, 结果表明冲击冷却的有效范围为 4 倍冲击孔直径, 冲击间距与射流孔直径之比为 2 时换热效果最好。文献[4-11]对具有初始横流的多排孔射流冲击冷却局部对流换热特性进行了数值计算与实验验证, 研究表明射流孔阵顺排布置较叉排布置换热效果好, 文献[12]重点研究了射流

收稿日期: 2008-05-30; 修订日期: 2009-01-12

基金项目: 航空科学基金(03C52019)

作者简介: 王磊(1975-), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 主要从事传热研究。

孔阵的疏密程度对流动和换热系数的影响,结果发现孔间距较大时各股射流之间影响很小,而孔间距较小时各股射流间影响较大,具有明显的狭缝射流特性. 尽管目前对阵列射流冲击冷却的换热特性已进行了大量研究,但针对射流孔间距与射流孔直径之比很小的致密型多孔阵列射流冲击冷却的换热特性的研究却不够充分,为此,本文针对射流孔间距与射流孔直径之比在 2~5 范围内的阵列射流冲击冷却的传热特性进行了实验研究,试图对比分析密集型阵列射流与常规阵列射流在冲击冷却换热特性上的差异.

1 实验件及实验系统

1.1 实验系统

冷却气流来自于空气压缩机,通过阀门调节至所需的流量,具体数值由浮子流量计测量. 冷却空气经由稳流空腔稳定后,通过射流孔板后冲击到靶板,经过冲击换热后沿单方向流出(图 1). 实验采用 0.01 mm 厚的康铜膜作为恒热流壁面,加热量由 $Q = IU$ 计算出,加热电压 U 和加热电流 I 分别由电压表和电流表测出. 加热膜粘贴在聚丙烯塑料板上,塑料板外侧覆盖绝热性能好的石棉片. 为了便于红外热像仪拍摄温度图像,在塑料板上开设 70 mm × 50 mm 的红外测量窗口. 加热时,热稳定状态通过热电偶监测,一旦达到热稳定状态,用红外热像仪拍摄冲击靶面的温度场.

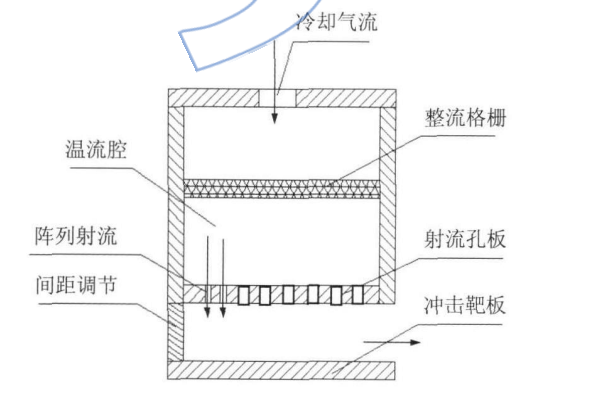


图 1 实验段示意图
Fig. 1 Schematic of test section

1.2 射流冲击孔板

实验中分别采用顺排和叉排两种射流孔板(图 2),孔径 $d = 2\text{ mm}$,射流孔阵列排间间距 x_n 和列间间距 y_n 与射流孔直径之比如表 1 所示. 射流冲击距离 z_n 通过调整冲击靶板和射流孔板之

间的间距加以改变.

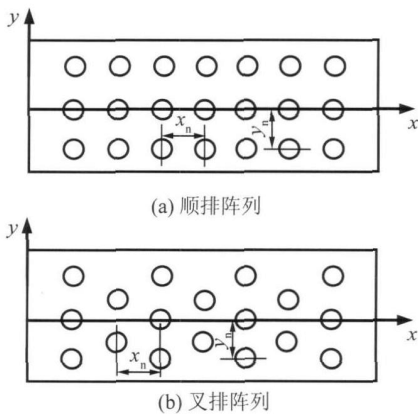


图 2 射流冲击孔板示意图
Fig. 2 Schematic structure of jet impingement array

表 1 实验件几何结构			
Table 1 Geometry parameters of the jet impinging plate			
模型	x_n/d	y_n/d	z_n/d
顺排	2~5	2~5	2~4
叉排	2~5	2~5	2~4

2 实验数据的测量及处理

2.1 实验数据的测量

冷却空气的体积流量由位于稳压箱前的 LBZ 系列浮子流量计(精度:1~2.5 级)测出,冷却空气的温度由位于冲击孔板前 20 mm 处的铜-康铜热电偶测量. 硅整流器上输出的电压、电流分别由电压表和电流表测量. 在正对冲击靶板红外测量窗口的正方放置红外热像仪,热像仪的温度分辨率为 0.15 °C,使用红外处理软件,对红外图像进行详细处理,可得到冲击靶面的温度场. 由于红外热像仪会受到所测物体表面发射率、实验件测量窗口等因素影响,需要对红外热像仪进行标定. 因在在实验前,利用铜-康铜热电偶对红外热像仪进行标定,使用最小二乘法对红外热像仪所测温度 (T_i) 和铜-康铜热电偶所测温度 (T) 进行拟合,得到两者之间的关系式为

$$T = -13.76 + 1.46 T_i - 0.00528 T_i^2 \quad (1)$$

2.2 实验数据的处理

在本文中,冲击冷却换热系数按排平均和面平均两种方法定义

1) 排平均换热系数 h_i 的定义为

$$h_i = \frac{IV}{A(T_{wi} - T_j)} \tag{2}$$

2) 面平均换热系数 h_r 定义为

$$h_r = \frac{IV}{A(T_{wr} - T_j)} \tag{3}$$

式中 A, I, V 分别为靶板的面积及输入的电流和电压, T_j 为射流温度; T_{wi} 为排平均温度, 即第 i 条测量线上各点的平均温度(如图 3(a) 所示), T_{wr} 为面平均温度, 即第 r 排射流作用区域的面平均温度(如图 3(b) 所示). 基于排平均换热系数 h_i 和面平均换热系数 h_r 的努塞尔数 Nu_i 和 Nu_r 表达为

$$Nu_i = \frac{h_i d}{\lambda} = \frac{IV d}{A \lambda (T_{wi} - T_j)} \tag{4}$$

$$Nu_r = \frac{h_r d}{\lambda} = \frac{IV d}{A \lambda (T_{wr} - T_j)} \tag{5}$$

式中 d 为冲击孔的直径, λ 为冷却空气的导热系数.

冲击雷诺数 Re 的定义为

$$Re = u_i d / \nu \tag{6}$$

式中 u_i 为冷却空气的射流速度, ν 为冷却空气的运动粘度. 本文的研究范围为 $Re = 5000 \sim 30000$.

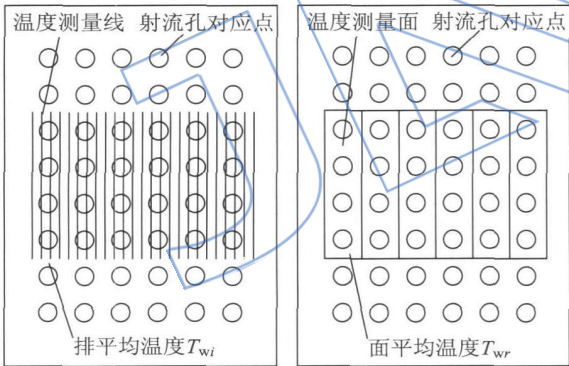


图 3 排平均和面平均温度定义示意图
Fig. 3 Definition of average temperature

3 实验结果及分析

3.1 冲击雷诺数 Re 的影响

图 4(a) 至图 4(c) 示出了冲击 Re 数对各排射流面平均 Nu_r 数的影响规律, 图 5(a) 至图 5(c) 示出了冲击 Re 数对各排射流排平均 Nu_i 数的影响规律. 可以看出, 在相同的冲击位置, 努塞尔数随冲击雷诺数增加而增大, 但在不同的几何条件下, 努塞尔数的增幅有所不同. 当 $x_n/d = y_n/d \geq 3$ 时, 随着射流冲击雷诺数的增加, 努塞尔数近乎线

性增加; 但在射流孔特别致密的条件下 ($x_n/d = y_n/d = 2$), 随着射流冲击雷诺数的增加, 努塞尔数增加的速率越来越慢, 当 $Re > 13000$ 左右时, 射流冲击雷诺数的增加对努塞尔数的影响已很微弱. 这种差别的原因在于, 射流孔间距较大时, 各股射流之间相互影响较小, 从而造成冲击靶面的努塞尔数随射流冲击雷诺数的增加而明显增大; 而孔间距较小时, 各股射流彼此影响较大, 气体在射流过程中彼此掺混, 且这种掺混随着射流冲击雷诺数的增加而逐渐增强, 从而影

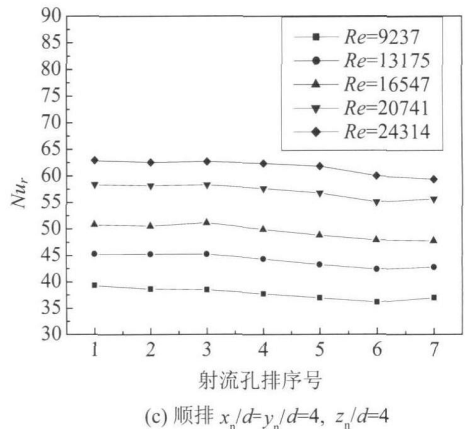
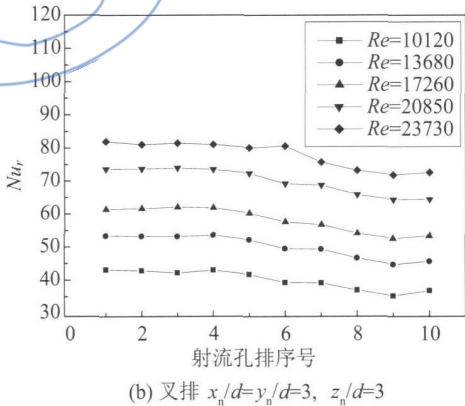
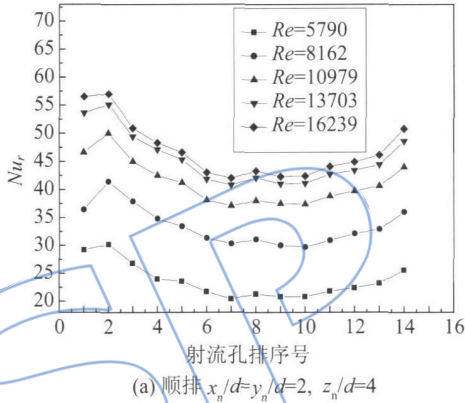
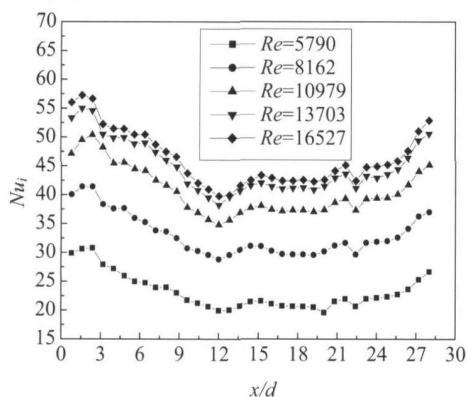


图 4 Re 对 Nu_r 的影响
Fig. 4 Influence of Re on Nu_r

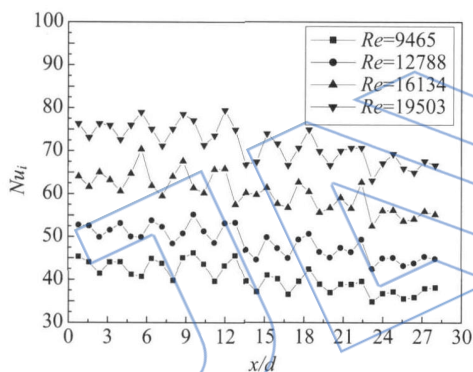
响了流体冲击靶面的速度,使得努塞尔数随射流冲击雷诺数增加而增加的幅度逐渐减小。

3.2 相对孔间距和冲击间距的影响

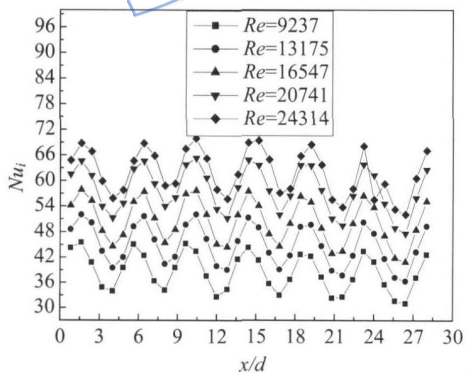
由图 4 可以发现,在 $x_n/d = y_n/d \geq 3$ 时,沿射流冲击靶面后的壁面射流流动方向,各排射流面平均努塞尔数 Nu_r 基本保持不变,后缘几排射流的 Nu_r 略低。



(a) 顺排 $x_n/d=y_n/d=2, z_n/d=4$



(b) 叉排 $x_n/d=y_n/d=3, z_n/d=3$



(c) 顺排 $x_n/d=y_n/d=4, z_n/d=4$

图 5 Re 对 Nu_i 的影响

Fig. 5 Influence of Re on Nu_i

值得注意的是,在本文研究的参数范围内,当射流孔特别致密时,射流阵列中部的对流换热强度要弱于前缘或后缘的对流换热效果(图 4(a)),

其原因在于前排射流形成的横流作用对于对流换热具有双重影响:横流可能造成后排射流偏转而削弱射流驻点区域的对流换热,但它也增加了壁面射流的流量而有助于提高对流换热能力。后缘射流虽受到前排射流的横流影响,但横流流量的增加对强化对流换热强度的作用却更加显著。

另一个值得注意的现象,在 $x_n/d = y_n/d \geq 3$ 时,沿射流冲击靶面后的壁面射流流动方向,各排射流排平均努塞尔数 Nu_i 随 x/d 呈现较为明显的波动,波峰大约对应着射流的驻点区域, Nu_i 最大,波谷则对应着相邻两排射流驻点之间的换热薄弱区域, Nu_i 最小。随着 x_n/d 和 y_n/d 的减小,波动的幅度有所减弱,特别当 $x_n/d = y_n/d = 2$ 时,似乎已看不出 Nu_i 波动的趋势(图 5(a))。这是由于射流孔间距较小时,相邻射流之间的相互掺混加强所引起的。

图 6 示出了孔间距对换热特性的影响规律。可以看出,在冲击雷诺数基本相同的情况下,随着 $x_n/d, y_n/d$ 的增大,努塞尔数逐渐减小。原因在于,相对孔间距越大,加热膜表面受射流冲击的区域就越小,从而使得冲击靶面的平均对流换热系数逐渐减小。

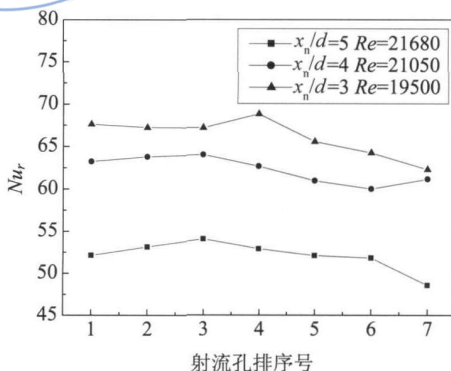


图 6 x_n/d 和 y_n/d 对 Nu_r 的影响 ($z_n/d = 3$)

Fig. 6 Influence of x_n/d and y_n/d on Nu_r ($z_n/d = 3$)

图 7 示出了冲击间距比 z_n/d 的变化对 Nu_r 的影响。可以看出,在相同的冲击位置, Nu_r 数随着冲击间距的增大而减小,在实验参数范围内,最佳相对冲击间距为 2,随着相对冲击间距的增加换热效果变差。这是因为有限空间内的射流,射流内的压强是变化的,随着射程的增大,压强增大,同时射流中各截面的动量也是随冲击间距的增加而减少的,所以 z_n/d 较小时,到达壁面的射流气体动量较大,射流速度较大,换热效果就较好。

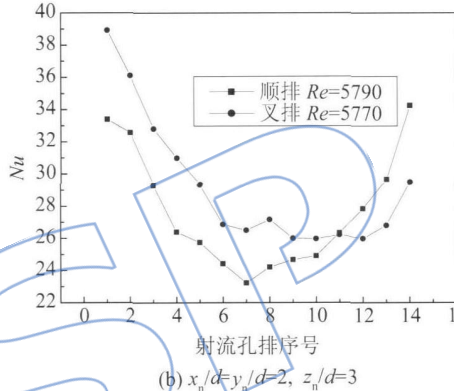
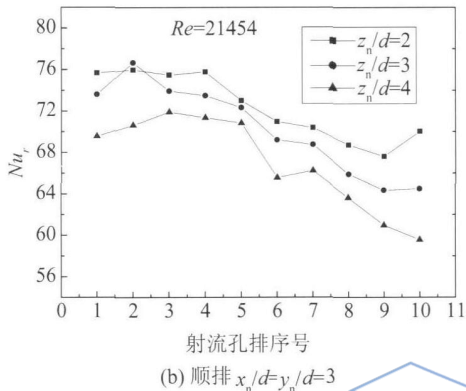
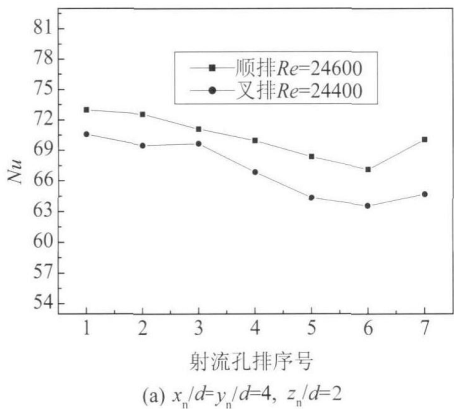
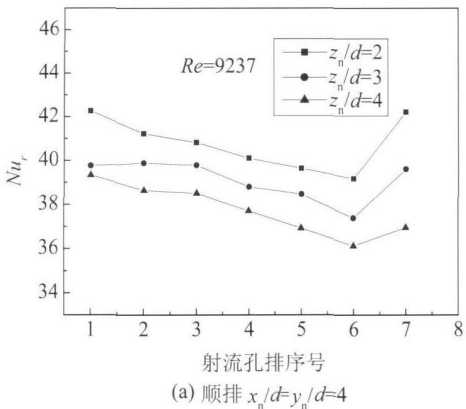


图 7 相对冲击间距 z_n/d 对 Nu_r 的影响
Fig. 7 Influence of z_n/d on Nu_r

图 8 射流孔顺排与叉排布置的影响
Fig. 8 Comparison of in-line array and staggered array

3.3 射流孔顺排与叉排布置的影响

图 8 示出了在射流冲击 Re 数基本相同的情况下,冲击孔排列形式对 Nu_r 的影响规律.可以明显看出,在 $x_n/d = y_n/d$ 介于 3~5 范围时,顺排的强化换热效果好于叉排,特别是沿阵列射流下游顺排的优势更为显著(如图 8(a)),主要原因在于:顺排的孔排之间的区域对于前几排射流孔中喷射出的气流起到了分流的作用,使大部分的横向气流沿着孔排之间流动阻力最小的通道流过,削弱了它对后排各股射流的迎面影响,这样,处在前面的射流,一方面对后面的射流带来了有限的横流作用,另一方面,它又遮挡了来自上游的迎面横流的影响,保护了射流冲击作用的发挥,因此,在孔间距较大时,顺排射流孔的传热效果要好于叉排射流孔;但当 $x_n/d = y_n/d = 2$ 时,在阵列射流的上游,叉排的冲击换热效果好于顺排,而在阵列射流的下游顺排好于叉排(如图 8(b) 所示),这说明,在射流孔布置很密时,由于射流气体之间的交互影响,流场分布非常复杂,靶面温度分布与射流孔布置较稀时有很大不同.

4 结 论

- 1) 射流冲击雷诺数对阵列射流冲击冷却有很大的影响.当 $x_n/d = y_n/d \geq 3$ 时,随着射流冲击雷诺数的增加,努塞尔数近乎线性增加;但在 $x_n/d = y_n/d = 2$ 时,随着射流冲击雷诺数的增加,努塞尔数增加的速率越来越慢,当 $Re > 13000$ 左右时,射流冲击雷诺数的增加对努塞尔数的影响已很微弱.
- 2) 孔间距对阵列射流冲击冷却有很大的影响.在 $x_n/d = y_n/d \geq 3$ 时,沿射流冲击靶面后的壁面射流流动方向,各排射流面平均努塞尔数 Nu_r 基本保持不变,后缘几排射流的 Nu_r 略低;当在 $x_n/d = y_n/d = 2$ 时,射流阵列中部的对流换热强度要弱于前缘或后缘的对流换热效果,各排射流排平均努塞尔数 Nu_i 随 x/d 波动的现象趋于消失.
- 3) 在 $x_n/d = y_n/d$ 介于 3~5 范围时,顺排的强化换热效果好于叉排,特别是在阵列射流下游顺排的优势更为显著;在 $x_n/d = y_n/d = 2$ 时,在阵列射流上游,叉排的冲击换热效果好于顺排,

而在阵列射流下游则顺排的冲击换热效果好于叉排.

参考文献:

- [1] 顾维藻, 神家锐, 马重芳, 等. 强化传热[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] Florschuetz L W, Isoda Y. Flow distributions and discharge coefficient effects for jet array impingement with initial crossflow[J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105(3): 296-303.
- [3] Florschuetz L W, Metzger D E, Su C C. Heat transfer characteristics for jet array impingement with initial crossflow[R]. ASME Paper 83-GT-28, 1983.
- [4] Huber A M, Viskanta R. Effect of jet-jet spacing on convective heat transfer to confined, impinging arrays of axisymmetric air jets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1994, 37: 2859-2869.
- [5] Kim K, Camci C. Fluid dynamics and convective heat transfer in impinging jets through implementation of a high resolution liquid crystal technique[J]. International Journal of Turbo and Jet Engines, 1995, 12(1): 1-19.
- [6] Van Treuren K, Wang Z, Ireland P, et al. Detailed measurements of local heat transfer coefficient and adiabatic wall temperature beneath an array of impingement jets[J]. Journal of Turbomachinery, 1995, 116(2): 369-374.
- [7] CHEN Wanbing, CHANG Haiping. 3-D numerical simulation of impinging jet cooling with initial crossflow[R]. ASME Paper 99-GT-256, 1999.
- [8] Huang Y, Ekkad S V, Han J C. Detailed heat transfer distributions under an array of orthogonal impinging jets[J]. AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1998, 12(1): 73-78.
- [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] ZHANG Jingzhou, LI Liguang. High resolution heat transfer coefficient measurement for jet impingement using thermochromic liquid crystals[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14(4): 205-209.
- [11] Wang T, Lin M J, Bunker R S. Flow and heat transfer of confined impingement jets cooling using a 3-D transient liquid crystal scheme[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 4887-4903.
- [12] Bailey J C, Bunker R S. Local heat transfer and flow distributions for impinging jet arrays of dense and sparse extent[R]. ASME Paper GT-2002-30473, 2002.