

文章编号: 1000-8055(2006) 03-0528-05

非均匀横流作用下冲击射流冷却 的数值研究

谭 蕾, 张靖周, 谭晓茗

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 运用数值计算的方法对非均匀横流作用下冲击射流冷却的流动和传热过程进行了三维数值研究, 揭示出射流冲击孔和横流孔相对排列方式、射流雷诺数和横流雷诺数相对大小、射流孔中心至横流孔出口截面距离等因素对冲击射流冷却流动传热特性的影响。结果表明: 若保持总的冷却流量不变, 当横流雷诺数与射流雷诺数之比等于或大于 0.5 后, 有横流时的冲击射流冷却局部努塞尔数比无横流时有较为显著的下降; 在非均匀的横流作用下, 对于叉排和顺排方式, 由于射流和横流的相互作用, 壁面温度分布呈现出复杂的特征; 射流孔和横流孔呈顺排布置时, 峰值努塞尔数所对应的射流驻点区向下游偏移。

关键词: 航空、航天推进系统; 冲击冷却; 非均匀横流; 强化传热; 数值计算

中图分类号: V 233. 1; V 233. 2

文献标识码: A

Numerical Investigation of Jet Impingement Cooling with Non-Uniform Crossflow

TAN Lei, ZHANG Jing-zhou, TAN Xiao-ming

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: Three-dimensional numerical computation of the flow and heat transfer for the jet impingement cooling with non-uniform initial crossflow was conducted to investigate the effects of the jet-to-surface spacing, the impinging holes and crossflow holes arrangement, as well as the crossflow to jet Reynolds number ratio on the heat transfer characteristics. When the crossflow to jet Reynolds number ratios are equal or greater than 0.5, the jet impingement Nusselt numbers are obviously lower than that without crossflow under the same total cooling massflow rate. Under the action of non-uniform crossflow, the temperature distributions take complicated feature for both staggered and inline arrangements owing to the interaction of jet and crossflow. Compared to the case of staggered arrangement between jet holes and crossflow holes, the stations corresponding to peak Nusselt numbers for inline arrangement move downstream.

Key words: aerospace propulsion system; jet impingement; non-uniform crossflow; enhanced heat transfer; numerical calculation

射流冲击是一种极其有效的强化局部传热或传质的方法。由于射流冲击靶面所形成的在冲击

靶面上流动的边界层薄, 表面传热系数比常规的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。尽管针对射流冲击冷却已开展了大量的研究^[1~8], 但对于有初始横流的影响研究得尚不充分, 特别是对类似于火焰筒总静压进气冷却方式的非均匀初始横流作用下射流冲击冷却则更加缺乏研究。本文对非均匀初始横流作用下射流冲击冷却进行了数值研究, 分析了射流孔和横流孔的排列方式、横流雷诺数与冲击射流雷诺数的相对大小等因素对冲击冷却效果的影响。

1 计算模型

计算模型如图 1 所示。射流孔直径 d_j 取为 3 mm; 横流孔直径与射流孔直径之比 d/d_j 取为 1.5; 冲击靶面和射流孔板的间距 s/d_j 取为 3; 通道长度 l/s 取为 10; 射流孔和横流孔的孔间距 z_p/d_j 取为 5; 射流孔中心和横流进口平面的距离 x_n/d_j 分别取为 3 和 6。横流孔与射流孔的排列有叉排和顺排两种。

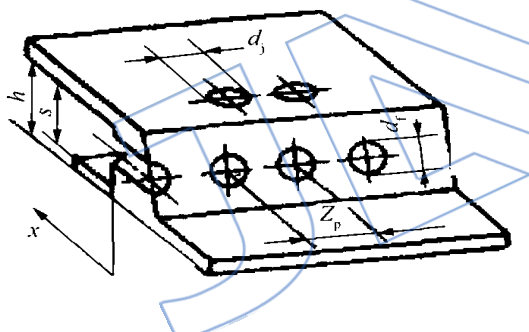


图1 计算模型结构
Fig. 1 Schematic physical model

为了便于比较分析, 本文还对无初始横流的半受限通道的冲击冷却进行了研究, 选取射流冲击雷诺数 $Re_j = 20\,000$ 。在有初始横流的计算中, 横流雷诺数与冲击射流雷诺数的相对大小分别取为 $Re_t/Re_j = 0.2, 0.5, 1, 1.5$ 和 2, 并保持总的冷却流量与无横流情形一致, 对应 5 种状况的射流雷诺数分别是无初始横流冲击冷却时的 77%, 57%, 40%, 30% 和 25%。

2 数学方法

在笛卡尔直角坐标系 (x, y, z) 中, 记各自对应的速度分量为 u, v, w 。三维流动的稳态、不可压、常物性流动的时均输运守恒方程为^[9]:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} (\rho u \Phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \Phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \Phi) \right] = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \right] + S^\Phi$$

式中: ρ 为流体的密度, Γ^Φ 和 S^Φ 分别表示变量 Φ 所对应的有效扩散系数和源项。

本文采用区域湍流模化方法, 即在核心区采用标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型, 在近壁区采用低雷诺数两方程模型^[10]。

局部努塞尔数和努塞尔数定义为:

$$h = \frac{q}{T_w - T_j} \quad Nu = \frac{hd}{\lambda_j}$$

式中: q 为冲击靶面热流密度, T_w 为壁面温度, T_j 为射流温度。

进口边界: 给定射流孔入口和横流入口的速度和温度 ($T_w = 300\text{ K}$), 进口的湍流动能和湍流动能耗散率取为: $k_{in} = 0.03u_w^2$, $\epsilon = k_{in}/0.005d$ (d 为射流孔或横流孔的直径)。

对称边界: 沿展向的速度分量为零, 其它参数沿展向的一阶导数为零。

固体边界: 速度为无滑移条件, 射流冲击板和横流进口板为绝热条件, 冲击靶面为恒热流边界条件, 热流密度为 $5\,000\text{ W/m}^2$ 。

出口条件: 所有参数沿流向的一阶导数为零。

湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型, 在近壁区采用非平衡的壁面函数法进行处理。方程采用二阶迎风格式进行离散, 收敛的标准是判断相对残差小于 10^{-5} 。

3 结果与分析

3.1 流场和温度场

图 2 为 $Re_t/Re_j = 1, x_n/d_j = 6$ 时, 射流孔相对横流孔呈顺排、叉排排列两种布置下, 在射流孔中心平面的速度矢量局部分布。

由于射流和非均匀横流的相互作用, 一方面横流对冲击射流及冲击靶面后形成的壁面射流造成影响, 另一方面冲击射流对于横流在某种意义上起到了“扰流”的效果, 因此两者的相互作用所形成的流动特征将是十分复杂的。相对于射流孔与横流孔呈顺排布置方式而言, 射流孔与横流孔叉排时, 冲击射流受到初始横流的作用较弱, 能够垂直地冲击到靶面上, 而当射流孔与横流孔顺排时, 冲击射流在初始横流的作用下呈现向下游偏

转的特征。

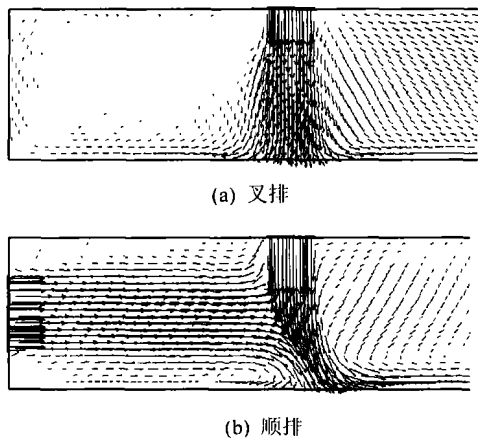


图2 射流孔中心平面流场分布

Fig.2 Velocity vector in centerline section of jet hole

图3 为 $Re_t/Re_j=0.2, x_n/d_j=3$,射流孔相对横流孔呈顺排、叉排排列时,在冲击靶面上的温度分布。

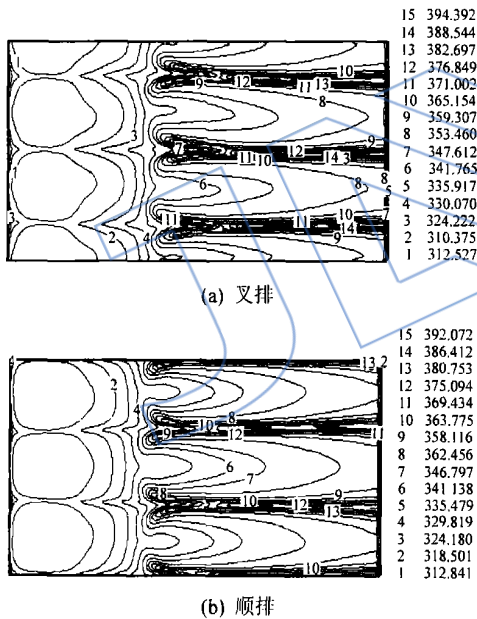


图3 冲击靶面温度分布
($Re_t/Re_j=0.2, x_n/d_j=3$)

Fig.3 Temperature distributions at the target surfaces
($Re_t/Re_j=0.2, x_n/d_j=3$)

从图中可以看出: 两种不同的排列方式对换热产生的影响区别并不十分明显, 说明在横流和冲击射流的相互作用中, 由于横流雷诺数相比冲击射流雷诺数较小, 使得冲击射流在流动和换热过程中基于主导地位。

图4 为 $Re_t/Re_j=1, x_n/d_j=3$,射流孔相对横流孔呈顺排、叉排排列时,在冲击靶面上的温度分布。

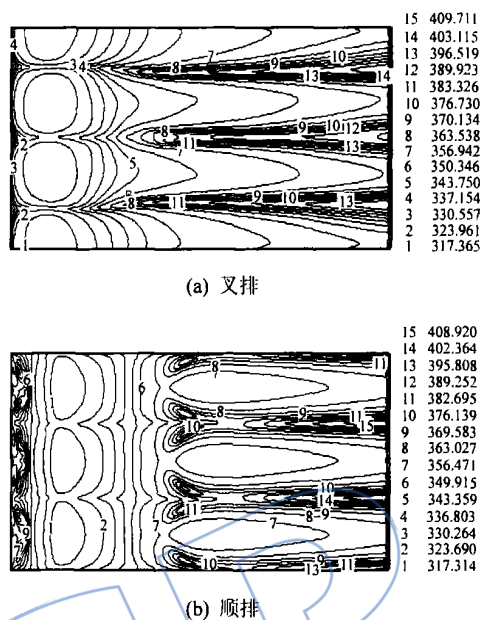


图4 冲击靶面温度分布
($Re_t/Re_j=1, x_n/d_j=3$)

Fig.4 Temperature distributions at the target surfaces
($Re_t/Re_j=1, x_n/d_j=3$)

从图中可以看出以下几个特征:

(1) 当 $Re_t/Re_j=1$ 时, 相对于叉排方式, 顺排时壁面最低温度所对应的驻点区位置向下游偏移, 冲击射流在驻点区对应的温度基本相当, 但在顺排时呈近似椭圆形的驻点区形状受到压缩而面积略小, 显然这是由于冲击射流前缘受到初始横流直接“撞击”并向下游偏转所导致的;

(2) 在壁面射流区域, 顺排的温度分布与叉排呈现较大的区别, 出现了温度等值线环, 这可能是射流相对于横流所起到的扰流作用引起的。对于叉排, 横流从两射流孔之间的“收缩-扩张”通道流过, 使得壁面射流向相邻射流孔和上游方向的流动受到制约, 导致壁面射流向内收缩并向下游流动。对于顺排, 由于射流直接与横流相撞向下游偏转, 横流绕过“射流柱”后与偏转的射流形成混合, 一方面使得两射流孔之间大部分区域的壁面射流得到增强, 另一方面, 也使得两射流孔之间局部区域的壁面射流受到削弱而形成局部温度较高的区域。

图5 为 $Re_t/Re_j=2, x_n/d_j=3$,射流孔相对横流孔呈顺排、叉排排列时,在冲击靶面上的温度分布

布。

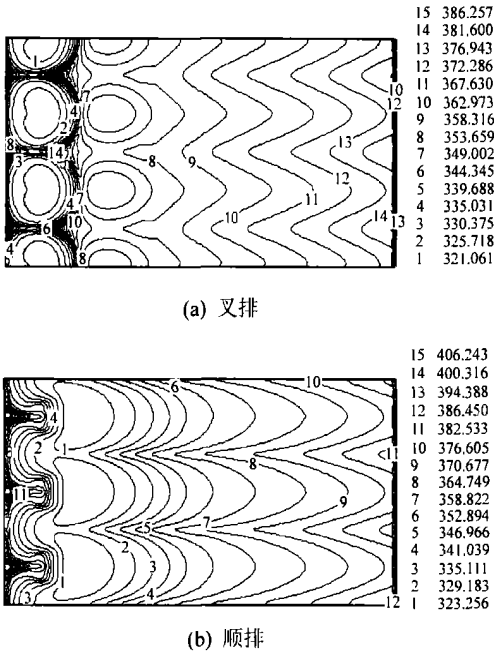


图5 冲击靶面温度分布 ($Re_t/Re_j=2, x_n/d_j=3$)
Fig.5 Temperature distributions at the target surfaces ($Re_t/Re_j=2, x_n/d_j=3$)

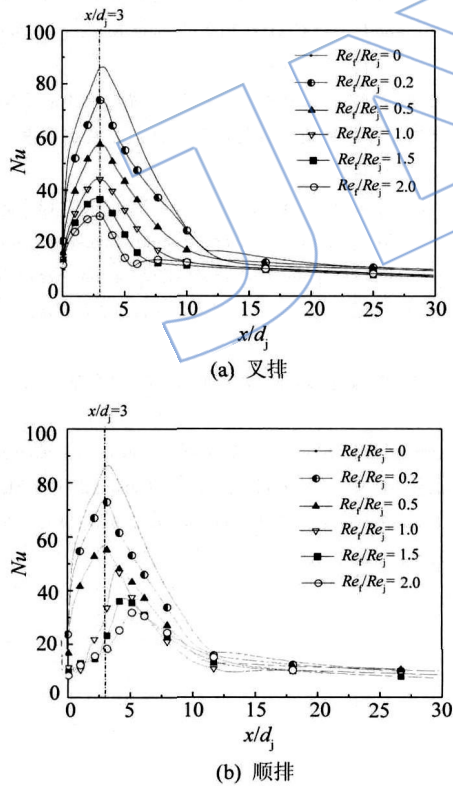


图6 冲击靶面平均努塞尔数分布 ($x_n/d_j=3$)
Fig.6 Average Nusselt number distributions at target surfaces ($x_n/d_j=3$)

与 $Re_t/Re_j=1$ 相比, 冲击靶面上温度分布的特征有很大的差别。此时在叉排方式下, 壁面射流区也出现了等温线环; 而在顺排方式下, 冲击射流所引起的驻点区温度特征已不明显。造成这种差异的原因可能是横流与冲击射流的速度比相对于 $Re_t/Re_j=1$ 要提高很多, 横流和冲击射流在相互作用中的主导地位发生了变化, 横流的作用似乎更为突出。在叉排布置时, 横流从两射流孔之间流过后, 迫使冲击射流冲击壁面后形成的壁面射流难以向下游发展, 而是和横流相互作用形成贴壁流动, 因此在射流驻点后产生局部“高温带”; 在顺排方式下, 冲击射流被横流阻断而与横流混合形成贴壁流动。

3.2 努塞尔数分布

若将沿通道出口方向的局部努塞尔数进行展向加权平均, 可以得到冲击靶面沿通道出口方向平均努塞尔数的分布情况。图6给出了在 $x_n/d_j=3$, 几种 Re_t/Re_j 比值下, 冲击靶面平均努塞尔数的分布。

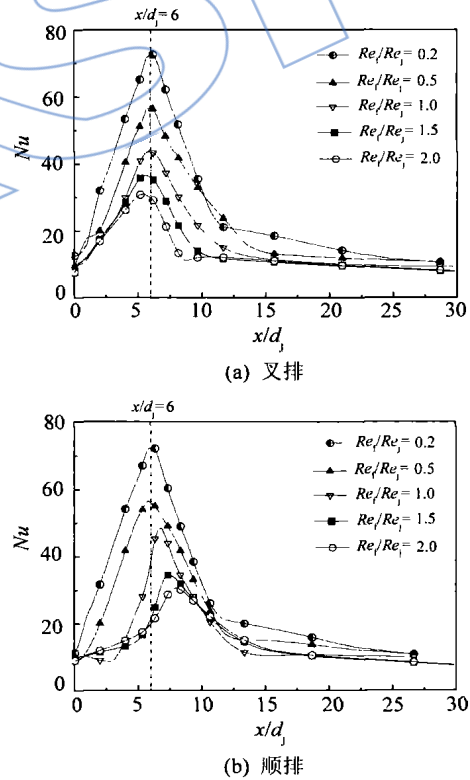


图7 冲击靶面平均努塞尔数分布 ($x_n/d_j=6$)
Fig.7 Average Nusselt number distributions at target surfaces ($x_n/d_j=6$)

与无初始横流时的情况相比, 在保持总的冷却流量不变的条件下, 当 $Re_t/Re_j \geq 0.5$ 后, 有初始

横流进气方式在射流驻点附近的区域内,冷却效果比无初始横流时有显著的下降,这主要是由冲击射流速度降低所引起的;在离开大约10倍射流冲击孔直径的下游,初始横流的影响趋于消失。

在有初始横流作用下,横流孔与射流孔的相对排列位置对冲击冷却效果以及下游的对流换热有一定的影响。与叉排方式相比,顺排时的驻点相对叉排向下游偏移,在冲击孔与横流进口截面之间区域的强化传热效果明显降低,但在射流冲击孔下游得到较为明显的改善;随 Re_t/Re_j 的增大,射流对应的驻点区域对流换热强度下降,但在射流孔下游一定距离后的壁面射流区, Re_t/Re_j 的影响几乎不存在。同时,可以发现,在 $Re_t/Re_j=2$ 时,叉排方式在临近射流驻点下游出现一努塞尔数低值,这是在射流驻点后产生局部“高温带”所引起的。

图7给出了在 $x_n/d_j=6$,几种 Re_t/Re_j 比值下,冲击靶面平均努塞尔数的分布。

可以发现,相对于 $x_n/d_j=3$ 的情况,射流孔相对横流孔的距离增大带来的影响主要体现在射流孔与横流孔之间的区域,而在峰值努塞尔数出现位置的下游,影响似乎并不大。

4 结 论

(1) 若保持总的冷却流量不变,当横流雷诺数与射流雷诺数之比等于或大于0.5后,有横流时的冲击射流冷却局部努塞尔数比无横流时有较为显著的下降。

(2) 有横流时,顺排方式峰值努塞尔数所对应的位置向下游偏移,在射流冲击孔上游换热恶化,但在下游区域的换热得到了有效的改善。

(3) 在非均匀的横流作用下,由于射流和横流的相互作用,叉排和顺排方式的壁面温度分布呈现出复杂的特征。

(4) 射流孔相对横流孔的距离增大所带来的影响主要体现在射流孔与横流孔之间的区域,而

在峰值努塞尔数出现位置的下游,影响微弱。

参考文献:

- [1] 顾维藻, 神家锐, 马重芳. 强化传热[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [2] Jambunathan K, Lai E, Moss M A, Button B L. Review of Heat Transfer Data for Single Circular Jet Impingement [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1992, 13(2): 106~115.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Chen Wanbing, Chang Haiping. 3-D Numerical Simulation of Impinging Jet Cooling with Initial Crossflow[R]. *ASME Paper 99-GT-256*, 1999.
- [6] Ashforth-Frost S, Jambunathan K. Numerical Prediction of Semi-Confined Jet Impingement and Comparison with Experimental Data [J]. *International Journal of Meth-Fluids*, 1996, 23(3): 295~396.
- [7] Zhang Jingzhou, Li Liguu. High Resolution Heat Transfer Coefficient Measurement for Jet Impingement Using Thermochromic Liquid Crystals [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2001, 14(4): 205~209.
- [8] 张靖周, 李永康, 谭晓茗, 李立国. 阵列射流冲击冷却局部对流换热特性的数值计算与试验验证[J]. *航空学报*, 2004, 25(4): 339~342.
- Zhang Jingzhou, Li Yongkang, Tan Xiaoming, Li Liguu. Numerical Computation and Experimental Investigation on Convective Heat Transfer Characteristics for Jet Array Impingement [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2004, 25(4): 339~342.
- [9] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1992.
- [10] Launder B E, Sharma B I. Application of the Energy-Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc [J]. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1974, 1: 131~134.