

文章编号: 1000-8055(2006)04-0626-5

半封闭通道射流冲击换热特性的实验

张泽远, 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: 运用红外热像仪测试技术对半封闭通道单、双排孔射流冲击冷却进行了热像显示试验, 总结了各种流动参数和几何参数对局部换热特性的影响规律: 对于单排垂直射流, 冲击冷却效果随冲击雷诺数的增加、孔间距与直径比的减小而得到提高, 冲击间距比为 2 时换热效果最好; 冲击孔中心线向通道封闭一侧倾斜后, 射流冲击冷却的范围变窄, 当冲击间距比大于 2 时驻点区的对流换热能力明显降低; 对于双排冲击射流, 在较小的冲击射流雷诺数和较大的冲击间距比下, 后排射流的冲击换热效果要逊于前排射流。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 冲击冷却; 数值计算; 对流换热

中图分类号: V233.1; V233.2

文献标识码: A

Convective heat transfer of jet impingement inside semi-confined channel

ZHANG Ze-yuan, ZHANG Jing-zhou, YANG Wei-hua

(College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: The thermal image visualization of jet impingement cooling with single or double rows of holes inside the semi-enclosed channel were revealed by using infrared camera and then the impingement cooling heat transfer coefficients were deduced. The effects of flow and geometric parameters on convective heat transfer coefficients were obtained. The results show that: for a single row normal impingement, the impingement cooling effectiveness is enhanced with the increase of impinging Reynolds number or the decrease of hole spacing to diameter ratio, and the best effectiveness is achieved under the jet-to-surface spacing equals to 2; when the jet is oblique to the confined wall, the cooling effectiveness is weakened especially when the jet-to-surface spacing ratio is greater than 2; for double rows of holes with normal impingement cooling, the cooling effectiveness of rear row jets is weaker than the front row jets at lower impinging Reynolds number or larger jet-to-surface spacing.

Key words: aerospace propulsion system; impingement cooling; numerical calculation; convective heat transfer

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, 对流换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。对于冲击-逆向对流-气膜复合冷却的火焰筒结构而言, 火焰筒壁面冷气侧的冲击冷却实质

收稿日期: 2005-09-23; 修订日期: 2006-01-05

基金项目: 航空科学基金资助项目 (编号 03C52019)

作者简介: 张泽远 (1980-), 男, 吉林长春人, 南京航空航天大学能源与动力学院硕士生, 主要从事燃烧与传热研究。

上是半封闭通道的冲击冷却,即冲击射流从冲击孔板喷出,冲击到换热靶面后形成壁面射流沿通道单方向流出。尽管针对射流冲击冷却的流动换热特性已开展了大量的研究^[1-8],但对于半封闭通道的冲击冷却研究却不够充分,特别是对局部换热特性的研究更为缺乏。本文运用红外热像仪测试技术对半封闭通道单、双排孔射流冲击冷却进行了热像显示试验,研究流动参数、几何参数对换热特性的影响规律。

1 试验系统及装置

试验系统如图1所示。空气经过压缩机压缩,利用除湿器分离出空气中的水分,以保证压缩空气的干度,分离后的空气经过流量计进入稳压箱,再进入冲气室,在冲击气腔内装有整流网,以使气体流动均匀;再经过冲击孔板而垂直冲击到换热靶板,最后经半封闭通道出口排入大气。

冲击射流孔布置分单排、双排孔两种方式,孔的直径为2 mm。单排孔沿展向的孔间距与孔径之比 Y_n/d 取值范围为3~5;双排孔呈顺排布置,沿展向的孔间距与孔径之比 Y_n/d 取值范围与单排孔相同,沿流向的孔间距与孔径之比 X_n/d 也取为3~5;单排射流孔和双排射流的第一排孔的中心平面距通道封闭一侧壁面的距离均保持为5倍的射流孔直径。冲击靶板用红外有机玻璃制成,对红外热像仪拍摄的热像图精度无影响。靶板内侧敷设康铜膜用于提供恒热流加热的边界条件,冲击靶板和冲击孔板之间的距离可以通过调整垫片厚度,冲击间距与孔径之比 Z_n/d 变化范围为1~4。

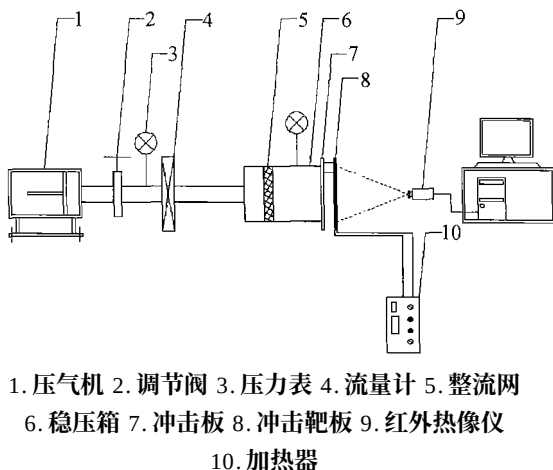


图1 试验系统图

Fig.1 Experimental system

冲击靶板上的温度分布图像用红外热像仪拍

摄,热像仪的温度分辨率为0.15℃。使用红外处理软件,对红外图像进行详细处理,得到需要的温度场。

在本文实验研究中,冲击射流雷诺数 Re_j 取为10 000~35 000。冲击靶面的对流换热系数和努塞尔数定义为

$$h = \frac{IV}{A(T_s - T_j)} \quad Nu = \frac{hd}{\lambda}$$

式中: IV 为电热膜的加热功率, A 为电热膜的面积。 T_s 为冲击靶面的温度, T_j 为射流的温度。电热膜的加热功率测量仪表误差不超过1%,加热膜的面积测量误差不超过0.1%,靶板加热膜的环境热损失经过修正后不超过3%,靶板加热膜和冲击射流空气的测温误差均不超过0.5%, h 及 Nu 的误差均不超过6%。

2 结果与分析

2.1 单排冲击孔实验结果分析

图2为不同孔间距与直径比 Y_n/d 下,在冲击间距比 $Z_n/d = 2$ 时,沿展向的平均努塞尔数 Nu 随 Re_j 的变化曲线。从图中可以看出,努塞尔数随着冲击雷诺 Re_j 的增加而增加,这主要是由于在其他条件不变的情况下,冲击射流雷诺数的增大就意味着冷却流量的增加,从而增强换热表面的冷却效果。还可以看出单排冲击孔沿流向冲击的有效范围在5~6倍冲击孔直径范围内。

同时通过比较不难发现,随着 Y_n/d 的增大,沿展向的平均努塞尔数 Nu 呈下降趋势。这主要是由于孔间距与直径比 Y_n/d 的减小,相邻射流之间的相互作用增强,使得每一股射流所对应的驻点区域的换热强度提高(图3),从而冷却效果也就更好。

图4是射流垂直和倾斜时的对比。从图中可以看出,冲击孔有 $\phi = 30^\circ$ 倾斜角时冲击冷却范围变窄,冲击的有效范围在3~4倍冲击孔直径范围内。

图5是在孔间距与直径比 $Y_n/d = 4$,冲击雷诺数 $Re_j = 16\ 194$ 时,不同冲击间距与孔径比 Z_n/d 下,沿展向的平均努塞尔数 Nu 随 Re_j 的变化曲线。在冲击间距与孔径之比为1~4的变化范围内, $Z_n/d = 2$ 时的冲击冷却换热效果要好于其它三种冲击间距比,而 $Z_n/d = 4$ 时的冲击冷却换热效果则最差。

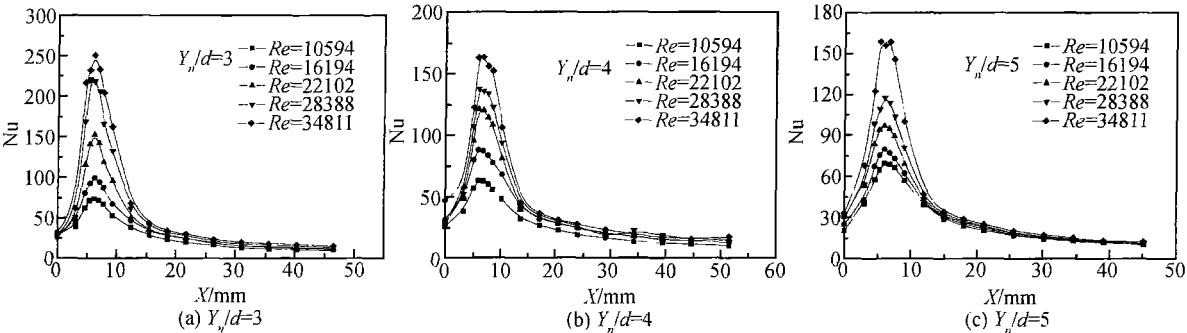


图 2 不同孔间距与直径比 Y_n/d 下沿展向平均 Nu 随 Re_j 的变化曲线 ($Z_n/d=2$)

Fig. 2 The average Nu vs Re_j with different hole space to diameter ratio

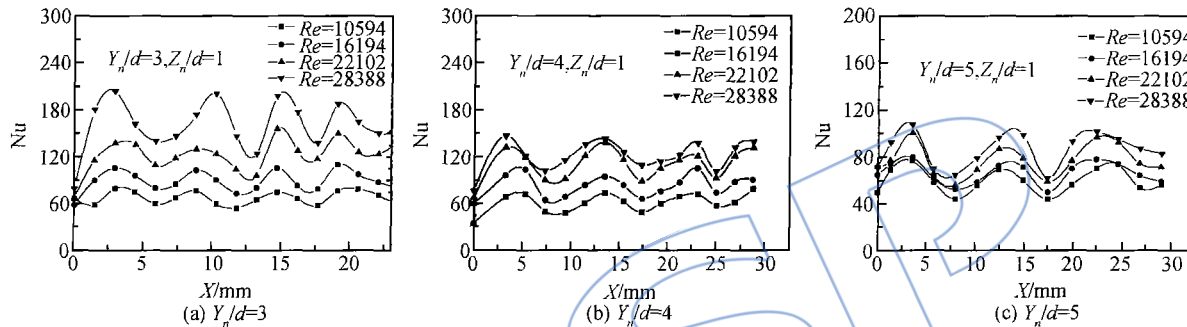


图 3 不同孔间距与直径比 Y_n/d 下射流孔展向上的局部努塞尔数 Nu 的分布

Fig. 3 The local Nu varies with different hole space to diameter ratio

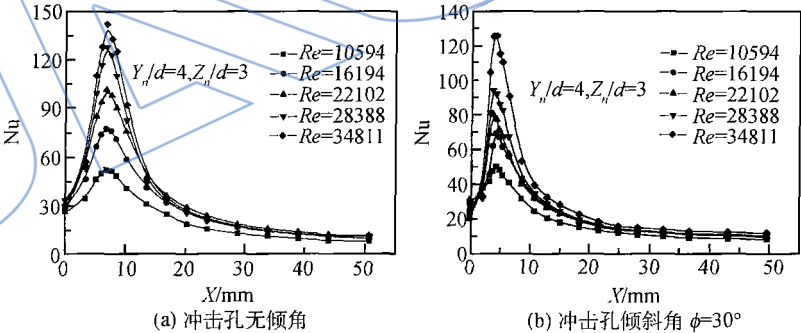


图 4 冲击间距与直径比 $Z_n/d=3$ 时 Nu 随 Re_j 的变化曲线

Fig. 4 The average Nu vs Re_j when the jet-to-surface spacing equals $Z_n/d=3$

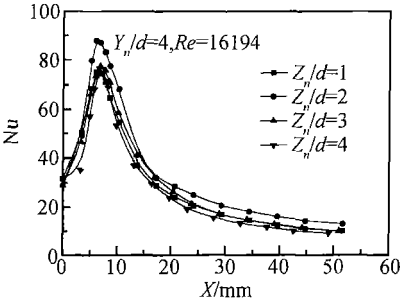


图 5 不同冲击间距与直径比 Z_n/d 下沿展向平均 Nu 随 Re_j 的变化曲线

Fig. 5 The average Nu vs Re_j with different jet-to-surface spacing equals

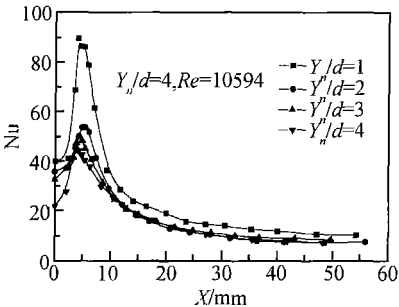


图 6 冲击孔倾斜角 $\phi=30^\circ$ 时沿展向平均 Nu 随 Re_j 的变化曲线

Fig. 6 The average Nu vs Re_j when the jet inclining angle $\phi=30^\circ$

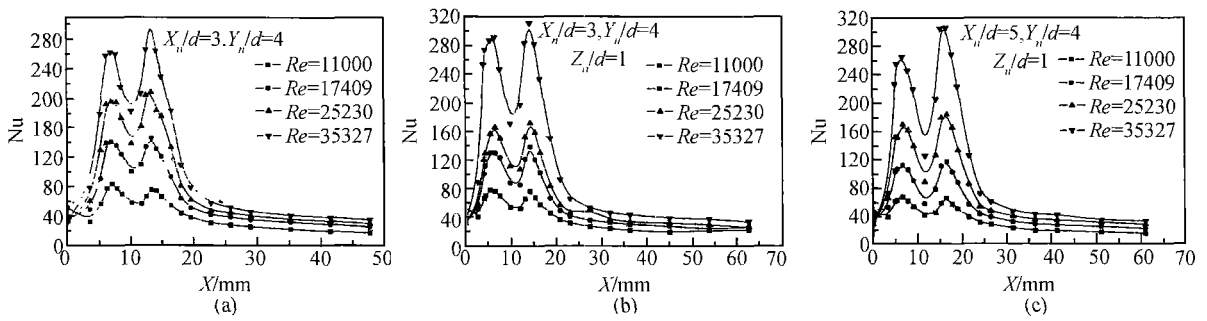


图 7 不同流向孔间距与直径比 X_n/d 在同一冲击间距下测得的 Nu 随 Re_j
Fig. 7 The average Nu vs Re_j with different hole hole space to diameter ration

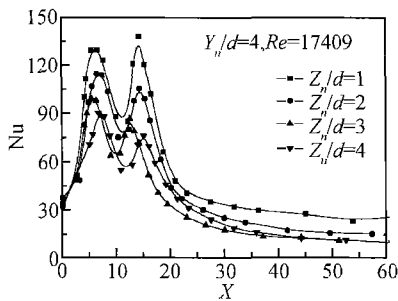


图 8 同一孔间距与直径比 X_n/d 在不同冲击间距与直径比 Z_n/d 下测得的
 Nu 随 Re_j 的变化曲线
Fig. 8 The average Nu vs Re_j with different jet-to-surface spacing equals

图 6 是孔间距与直径比 $Y_n/d=4$, 冲击雷诺数 $Re_j=16\ 194$ 时, 冲击孔中心线向通道封闭一侧倾斜 $\phi=30^\circ$, 不同冲击间距与孔径比 Z_n/d 下沿展向的平均努塞尔数 Nu 随 Re_j 的变化曲线。当 $Z_n/d=1$ 时, 峰值对流换热系数明显高于其它的冲击间距比, 且随着冲击间距比 Z_n/d 的增大, 平均努塞尔数 Nu 逐渐降低, 在冲击驻点附近的凸起“高帽”变窄。这是由于射流向通道受限一侧倾斜后, 一方面射流对靶面的冲击距离延长, 冲击间距比越大, 冲击距离延长的程度越大; 另一方面, 射流冲击靶面后, 在通道受限一侧形成的回流强度增强, 对冲击射流的影响加剧, 使得冲击冷却的换热效果降低。

2.2 双排冲击孔实验结果分析

图 7 是在 $Y_n/d=4$, $Z_n=1$ 时, 不同纵向孔间距与直径比 X_n/d 的展向平均努塞尔数 Nu 随 Re_j 的变化曲线。从图中可以看出: (1) 展向平均努塞尔数 Nu 随着冲击雷诺数 Re_j 的增加而增加; (2) 流向孔间距与直径比 X_n/d 的增加使冲击冷却范围变大, 但在两排孔之间区域的对流换热

系数有所下降; (3) 前排射流在冲击靶面后形成壁面射流, 对于后排射流而言起到了非均匀横流的作用。这股非均匀的“横流”和后排射流相互作用, 既有壁面射流强化传热的因素, 也有导致射流偏转削弱换热的因素, 因此使得沿流向第二排孔对应的展向平均努塞尔数与前排孔相比, 呈现复杂的相对关系。一般地, 在较小的冲击射流雷诺数和较大的冲击间距比下, 后排射流的冲击换热效果要逊于前排射流(图 8), 其原因在于, 后排射流向靶面的穿透能力相对较弱, 受前排壁面射流形成的“横流”影响而易于发生偏转; 相反地, 在较大的冲击射流雷诺数和较小的冲击间距比下, 后排射流向靶面的穿透能力强, 不易在前排壁面射流作用下发生偏转, 反而对前排壁面射流形成“扰流”作用, 后排射流的冲击换热效果要略优于前排射流。

3 结论

本文针对单排、双排射流在半封闭通道内的冲击冷却特性进行了实验研究, 结果表明:

- (1) 对于单排垂直射流, 冲击冷却效果随冲击雷诺数的增加、孔间距与直径比的减小而得到提高, 冲击间距比为 2 时换热效果最好。
- (2) 冲击孔中心线向通道封闭一侧倾斜后, 射流冲击冷却的范围变窄, 当冲击间距比大于 2 时驻点区的对流换热能力明显降低。
- (3) 对于双排冲击射流, 孔排间距与直径比的增加使冲击冷却范围变大, 但在两排孔之间区域的对流换热系数有所下降。
- (4) 在较小的冲击射流雷诺数和较大的冲击间距比下, 后排射流的冲击换热效果要逊于前排射流。

参考文献：

- [1] 顾维藻. 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] 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.
- [5] Chen Wanbing, Chang Haiping. 3-D numerical simulation of impinging jet cooling with initial crossflow[R]. *ASME Paper* 99-GT-256, 1999.
- [6] Jambunathan K, Lai E, Moss M A, et al. Review of heat transfer data for single circular jet impingement[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1992, 13(2): 106-115.
- [7] 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.
- [8] 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试验验证[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.