

文章编号: 1000-8055(2009)06-1270-05

半封闭通道射流冲击孔流量系数的实验

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: 对半封闭通道射流冲击孔的流量系数进行了实验研究, 针对单排、双排冲击孔结构, 在变化各种几何参数及流动参数的情况下, 较为系统地获得了射流孔展向间距与射流孔直径之比、射流孔流向间距与射流孔直径之比、射流冲击间距与射流孔直径之比、射流孔倾角等因素对于流量系数随射流雷诺数的变化曲线。通过对比分析, 讨论了各种因素对流量系数的影响。

关 键 词: 射流冲击; 半封闭通道; 流量系数; 实验研究

中图分类号: V233.1; V233.2

文献标识码: A

Experimental investigation on discharge coefficient of jet impingement holes within 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: An experimental investigation for determining the discharge coefficient of jet impingement holes within semi-enclosed channel was performed. According to the jet impingement configurations with single row or double row holes, the effects of the holes arrangement and flow parameter on the discharge coefficient were considered, such as: the span holes pitch-to-diameter ratio, the streamwise holes pitch-to-diameter ratio, the impingement distance-to-diameter ratio, the jet oblique angle and the jet Reynolds number. Comparatively, the above factors on the discharge coefficient were discussed.

Key words: jet impingement; semi-confined channel; discharge coefficient; experimental research

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^[1-12], 但对于半封闭通道的冲击冷却研究却不够充分, 特别是对冲击孔流量系数的研究更为缺乏。在有些应用场合下, 射流冲击发生在半封闭的通道内, 掌握这种冲击孔的流量系数对设计恰当的冷气流量就显得非常重要了。本文对半封闭通道单、双排孔流量系数进行了试验, 研究流动参数、几何参数冲击孔流量系数的影响规律。

收稿日期: 2008-05-30; **修订日期:** 2008-10-24

基金项目: 航空科学基金 (03C52019)

作者简介: 张泽远 (1980—), 男, 吉林长春人, 硕士生, 主要从事传热研究。

1 实验系统

试验系统如图 1 所示. 空气经过压缩机压缩, 经流量计进入稳压箱, 再进入集气室, 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靶板, 最后经半封闭通道出口排入大气.

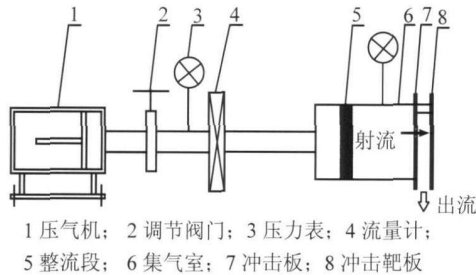


图 1 试验系统图
Fig.1 Experimental system

冲击射流孔布置分单排、双排孔两种方式(图 2), 孔直径为 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.

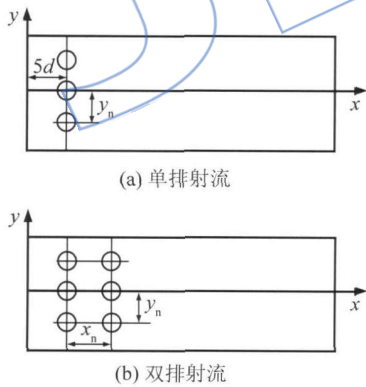


图 2 射流冲击孔板示意图
Fig.2 Schematic structure of jet impingement

在本文实验研究中, 冲击射流雷诺数 Re_j ($Re_j = u_j d / \nu$) 范围为 10 000~35 000. 冲击孔的流量系数为实际通过小孔气流量 m 与相同情况下理论流量 m_i 之比^[13]

$$C_d = \frac{m}{n\pi d^2 \sqrt{2\rho(p^* - p_0)}/4}$$

式中 m 为流经射流孔的实际流量, 由精度为 2.5

级的 L ZB-50 型浮子流量计测量; n 为射流孔的数目, d 为射流孔的直径, ρ 为射流的密度; p^* 和 p_0 分别为射流孔入口总压和半封闭通道出口静压, 射流孔入口总压由射流集气腔室内的总压探针测量, 半封闭通道出口静压取为实验环境下的大气压力(出流直接排入环境大气).

2 实验结果及分析

2.1 单排孔 z_n/d 的影响

图 3 示出了在几种 y_n/d 的条件下, 不同冲击间距与孔径比 z_n/d 对于流量系数的影响曲线.

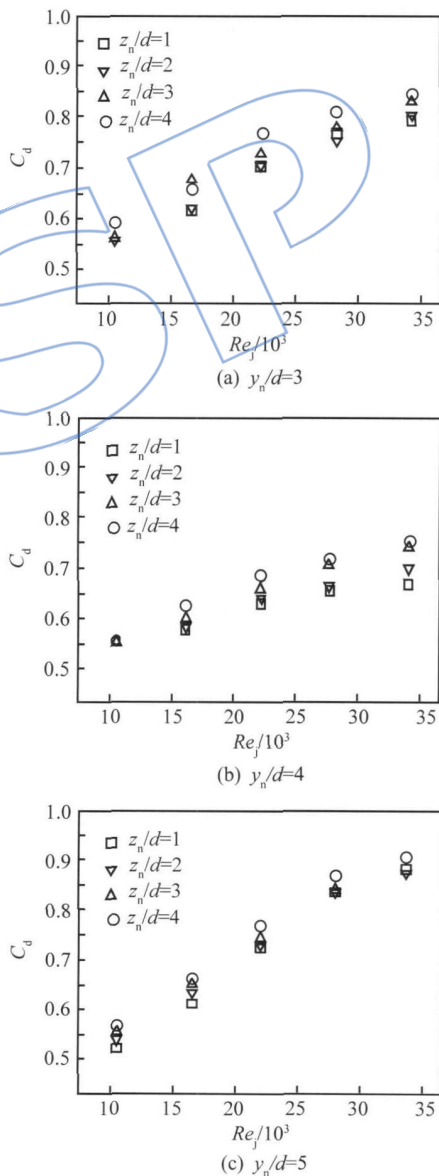


图 3 不同 z_n/d 下 C_d 随 Re_j 的变化曲线
Fig.3 C_d vs Re_j under different z_n/d

可以看出, 半封闭通道射流冲击流量系数 C_d

随着射流冲击雷诺数 Re_j 的增加而呈增加趋势,这是由于冲击雷诺数的增大使射流孔内气流摩擦损失的影响相对减弱,导致流量系数增大.总体上,随着冲击间距比 z_n/d 的减小,流量系数 C_d 呈现下降的趋势.在相对较小的射流孔展向间距比(如 $y_n/d=3$)和高射流冲击雷诺数下,冲击间距比对于流量系数的影响较为明显.

2.2 单排孔 y_n/d 的影响

图 4 示出了在几种 z_n/d 的条件下,不同射流孔展向间距与孔径比 y_n/d 对于流量系数的影响.

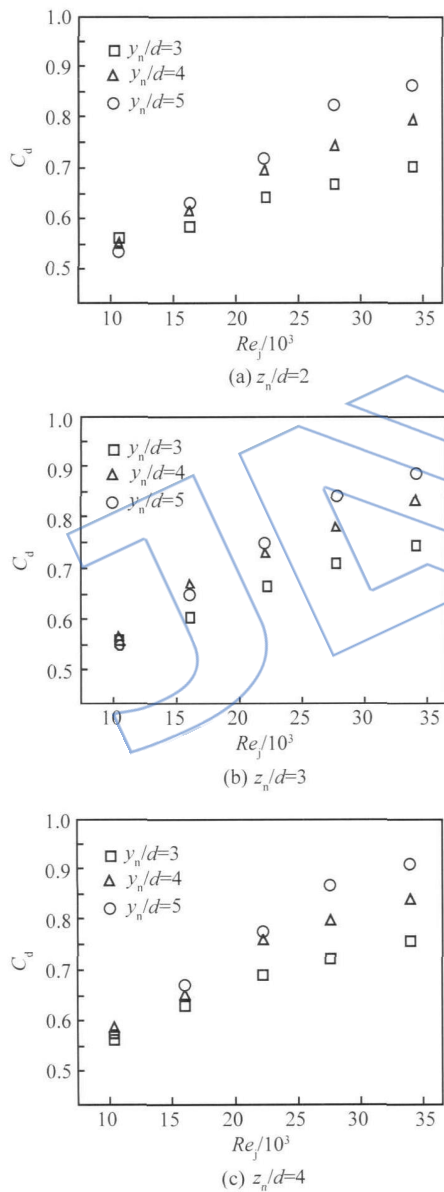


图 4 不同 y_n/d 下 C_d 随 Re_j 的变化曲线
Fig. 4 C_d vs Re_j under different y_n/d

可以看出,半封闭通道射流冲击流量系数 C_d 随着射流孔展向间距比 y_n/d 的增加而呈增加趋

势,这是由于射流孔展向间距比 y_n/d 减小,造成射流出流在通道内的掺混损失增加,从而导致流量系数减小.相对于射流冲击间距,射流孔展向间距对于流量系数的影响更为重要,且在高射流冲击雷诺数下更为显著.

2.3 单排孔倾角的影响

图 5 示出了在冲击孔垂直和射流孔向通道出流方向倾斜 30° 时流量系数变化曲线.由于射流孔向通道出流方向倾斜,导致射流冲击间距增加,且在通道封闭一侧引起的回流强度减弱,因此在小的冲击间距比和高射流雷诺数下,倾斜射流孔的流量系数较垂直射流孔有较为明显的升高,而在冲击间距较大或低射流雷诺数下,这一影响就很微弱了.

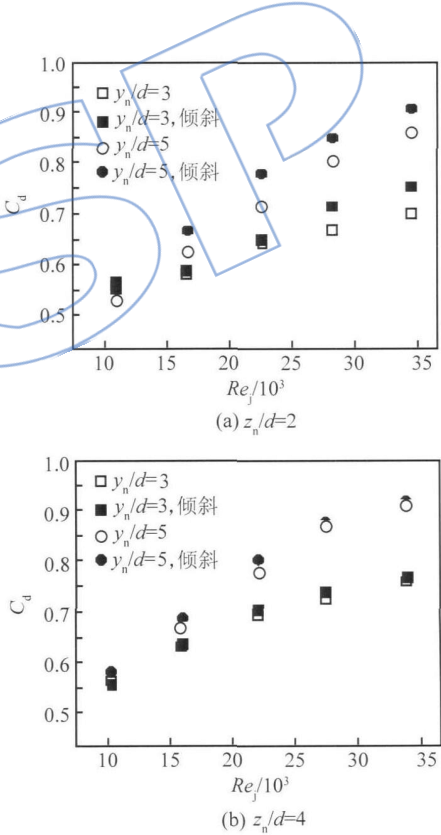


图 5 冲击孔垂直和倾斜时 C_d 随 Re_j 的变化曲线
Fig. 5 C_d vs Re_j for normal hole and inclined hole

2.4 双排孔的影响

图 6 是单排孔和双排孔流量系数的对比.从图中可以看到:在相同射流雷诺数下,单排冲击孔流量系数较双排大.由于双排孔射流数目增加,前后两排射流孔出流之间形成掺混,导致通道内的流动损失加剧而使流量系数下降,在高射流雷诺数下的影响尤为显著.

图 7 是双排孔 ($y_n/d = 4, x_n/d = 4$) 在冲击间距 z_n/d 为 1~4 范围内,流量系数随射流雷诺数的变化曲线.可以看出,与单排射流孔相比,冲击间距比对双排射流孔流量系数的影响要大,这是由于前后排射流孔出流形成的掺混,在小射流冲击间距比下的作用更为显著.

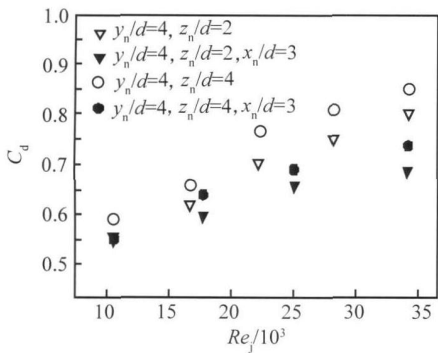


图 6 单排孔和双排孔 C_d 随 Re_j 的变化曲线
Fig. 6 C_d vs Re_j for single row hole and double rows hole

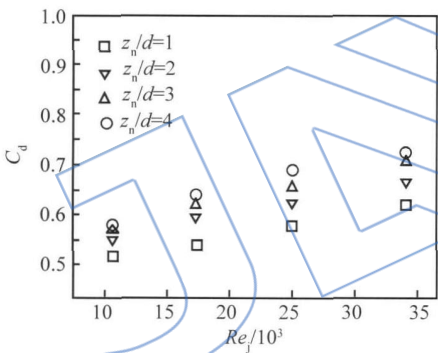


图 7 不同 z_n/d 下 C_d 随 Re_j 的变化曲线
($y_n/d = 4, x_n/d = 4$)
Fig. 7 C_d vs Re_j under different z_n/d
($y_n/d = 4, x_n/d = 4$)

图 8 是不同流向间距比双排孔 ($y_n/d = 4$) 在冲击间距比 $z_n/d = 3$ 时,流量系数随射流雷诺数的变化曲线,从图可以看出,在射流孔流向间距比变化范围内 ($x_n/d = 3 \sim 5$),射流孔流向间距比对流量系数的影响并不显著,沿流向孔间距与直径比 $x_n/d = 4$ 时,流量系数相对要略低一些.分析其原因,当前后两排孔间距较小时,封闭通道一侧形成的回流有可能削弱了前后两排射流孔出流之间形成的掺混作用;当前后两排孔间距较大时,前后两排射流孔出流之间形成的掺混作用也有所降低.由此造成流量系数复杂的变化规律.

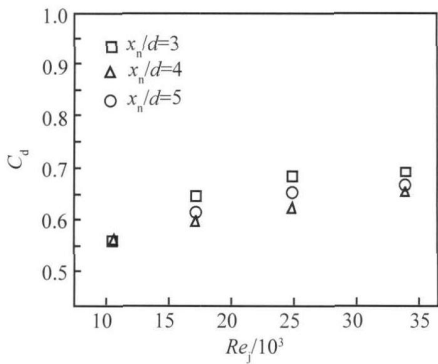


图 8 不同 x_n/d 下 C_d 随 Re_j 的变化曲线
($y_n/d = 4, z_n/d = 3$)
Fig. 8 C_d vs Re_j under different x_n/d
($y_n/d = 4, z_n/d = 3$)

3 结 论

- 1) 半封闭通道射流冲击流量系数 C_d 随着射流冲击雷诺数 Re_j 的增加而呈增加趋势.
- 2) 随着冲击间距比 z_n/d 的减小,流量系数 C_d 呈现下降的趋势.在相对较小的射流孔展向间距比和高射流冲击雷诺数下,冲击间距比对于流量系数的影响较为明显.
- 3) 随着射流孔展向间距比 y_n/d 的增加,流量系数 C_d 呈增加趋势.相对于射流冲击间距,射流孔展向间距对于流量系数的影响更为重要,且在高射流冲击雷诺数下更为显著.
- 4) 当射流孔向通道出流方向倾斜,在小的冲击间距比和高射流雷诺数下,流量系数较垂直射流孔有较为明显的升高,而在冲击间距较大或低射流雷诺数下,这一影响就很微弱了.
- 5) 在相同射流雷诺数下,单排冲击孔流量系数较双排大.与单排射流孔相比,冲击间距比对双排射流孔流量系数的影响要大.在射流孔流向间距比变化范围内 ($x_n/d = 3 \sim 5$),射流孔流向间距比对流量系数的影响并不显著,沿流向孔间距与直径比 $x_n/d = 4$ 时,流量系数相对要略低一些.

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] 许全宏,林宇震,刘高恩. 封闭空间内单孔冲击局部换热特性研究[J]. 航空动力学报,2002,17(3): 341-343.

XU Quanhong, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. Investigation of impingement heat transfer of single hole in a limited space[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3): 341-343. (in Chinese)

- [3] Florschuetz L W, Metzger D E, Su C C. Heat transfer characteristics for jet array impingement with initial cross-flow[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] 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.
- [6] 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.
- [7] 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)
- [8] ZHANG Jingzhou, LI Ligu. High resolution heat transfer coefficient measurement for jet impingement using thermochromic liquid crystals[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2001, 14(4): 205-209.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 张泽远, 张靖周, 杨卫华. 半封闭通道射流冲击换热特性的实验[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 626-630.
ZHANG Zeyuan, ZHANG Jingzhou, YANG Weihua. Convective heat transfer of jet impingement inside semi-confined channel[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 626-630. (in Chinese)
- [12] Hay N, Lampard D. Discharge coefficient of turbine cooling holes: a review[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(3): 314-319.
- [13] 刘海涌, 孔满昭, 刘松龄, 等. 射流冲击对短通道出流孔流场影响的实验研究[J]. 推进技术, 2005, 26(5): 408-412.
LIU Haiyong, KONG Manzhao, LIU Songling, et al. Experimental investigation of flow fields in outlet hole of a short channel with jet impingement[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(5): 408-412. (in Chinese)