

文章编号: 1000-8055(2008)09-1678-06

半封闭肋化通道射流冲击的实验

谭 蕾^{1,2}, 张靖周², 杨卫华²

(1. 南京航空航天大学 航天学院, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 运用红外热像测试技术对半封闭肋化通道单排孔射流冲击进行了热像显示实验, 揭示出射流雷诺数、冲击间距、肋型排布方式对传热特性的影响规律, 并开展了冲击孔流量系数的研究. 结果表明: 在本文研究范围内, 冲击间距与孔径比 $Z_n/d=1$ 时壁面射流区换热效果最好; V 型肋化通道在壁面射流区获得了最佳换热效果; 冲击孔流量系数随雷诺数增加而变大; 在其它工况相同的情况下, V 型顺流肋化通道内冲击孔流量系数最大.

关 键 词: 冲击冷却; 粗糙肋; 强化传热; 热显示; 流量系数

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experimental research on jet impingement inside semi-confined rib-roughed channel

TAN Lei^{1,2}, ZHANG Jing-zhou², YANG Wei-hua²

(1. College of Astronautics,

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

2. College of Energy and Power Engineering,

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

Abstract: Thermal visualization of jet impingement inside semi-confined rib-roughed channel was tested by thermograph to investigate the effects of impinging Reynolds number, jet-to-surface spacing as well as the ribs arrangement on heat transfer characteristics. The discharge coefficient for jet impingement was also analyzed. Results show that the impingement cooling effectiveness of ribbed surface is affected extremely by the jet-to-surface spacing, and the best effectiveness is achieved under the jet-to-surface space equaling to 1; the rib pattern also exerts great impact on cooling effectiveness, in present research the V-shaped ribs have best performance; the discharge coefficient is enhanced with the increase of impinging Reynolds number and the best result is obtained in V-up channel.

Key words: impingement cooling; rib; enhanced heat transfer; thermal visualization; discharge coefficient

射流冲击是一种极其有效的强化局部传热或传质的方法^[1], 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. 尽管射流冲击在驻点区获得了相当好的冷却效果^[2-5], 但是单孔冲击的有效范围仅在 4 倍冲击孔直径范围内^[5], 壁面射流区的冷却效果并不十分理想, 采用肋化通道

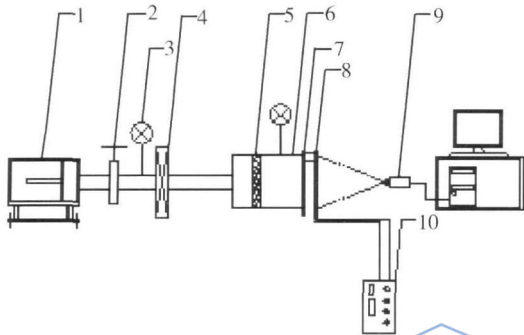
收稿日期: 2007-08-01; 修订日期: 2007-11-07

作者简介: 谭蕾(1982-), 女, 湖北宜城人, 硕士生, 研究方向: 传热与传质. E-mail: tanlei@nuaa.edu.cn

使得壁面射流区的换热得以提高成为了可能^[6-10]。本文运用红外热像测试技术对半封闭肋化通道单排孔射流冲击冷却进行了热像显示实验,分析了流动参数、几何参数对换热特性以及冲击孔流量系数的影响规律。

1 实验模型

实验系统如图 1 所示。空气经过压缩机压缩,经流量计进入稳压箱、冲气室,冲击气腔室内装有整流网使气体流动均匀,其侧面开有静压力测量孔和气流温度测量孔;然后气流经过冲击孔板垂直冲击到换热靶板,最后经半封闭通道出口排入大气。



1 压气机; 2 调节阀; 3 压力表; 4 流量计; 5 整流网;
6 稳压箱; 7 冲击板; 8 冲击靶板; 9 红外热像仪; 10 加热器

图 1 实验系统图
Fig. 1 Experimental system

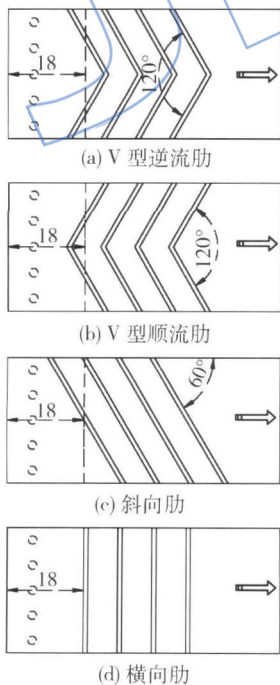


图 2 冲击靶板示意图

Fig. 2 Rib-roughed target surfaces

如图 2 所示,冲击射流孔为单排孔,第 1 排孔的中心平面距通道封闭一侧壁面距离保持为 5 倍的射流孔直径。肋化段采用了 4 种不同的肋型:V 型逆流肋,V 型顺流肋,斜向肋和横向肋。

2 实验条件

本文主要分析射流雷诺数、肋排的排布方式、冲击间距这几个因素对冲击换热效果的影响规律,主要参数如表 1。

表 1 几何参数、流动参数工况表
Table 1 Flow and geometric parameters

	符号和单位	参数变化范围
冲击孔直径	d/mm	2
冲击射流雷诺数	Re_j	6 000~30 000
展向孔间距	Y_n/mm	$3d$
冲击间距	Z_p/mm	$(1\sim3)d$
条形肋宽	l/mm	1
条形肋高	e/mm	1
肋间距	p/mm	$8e$

实验中采用可控硅整流器供电,冲击靶板内侧敷设康铜膜,由康铜膜产生的热量实现恒热流加热的边界条件;冲击靶板和冲击孔板间距的调整通过改变垫片厚度得以实现;冲击靶板的温度分布图象由红外热像仪获得。

在本文的实验研究中,冲击射流雷诺数、冲击靶板对流换热系数和努塞尔数定义为

$$Re_j = 4W_m / n\pi d\rho v$$

$$h = IV / A (T_w - T_j)$$

$$Nu = hd / \lambda$$

式中 W_m 为实验用冷却空气的质量流量, n 为实验用冲击孔板的孔数, ρ 为冷却空气在工作压力和工作温度下的密度, v 为冷却空气的运动黏度, IV 为电热膜的功率, A 为电热膜的面积, T_w 为冲击靶板的温度, T_j 为射流的温度。

冲击孔流量系数为实际通过冲击孔气流量与相同情况下理论流量之比,本文中

$$C_D = 4W_m / [n\pi d^2 \rho (2\Delta p / \rho)^{0.5}]$$

式中 Δp 为冲击孔板的静压力损失。

3 结果与分析

3.1 冲击靶面温度场显示和分析

图 3 为冲击射流在冲击间距与射流孔径之比 $Z_n/d=1$ 、射流雷诺数 $Re_j=30\,000$ 时,相同的冷气进口温度、相同的加热功率下 4 种肋化通道冲击靶面的温度分布。可以发现:①在冲击射流正对

位置出现了低温区,同时在其周围形成了温度较低的环形等温线;在壁面射流区,由于粗糙肋的扰动作用,冲击靶面的温度得到了明显降低;②从冷却均匀性、冷却范围两方面进行比较,均有 V 型肋化通道的冷却效果优于其它,主要归结于在 V 型肋化通道内产生了两个方向的二次流;③两种 V 型肋化通道进行比较可以发现,在 V 形肋顶点附近,V 型逆流肋的冷却效果逊于 V 型顺流肋,其原因在于:V 型逆流肋化通道内,二次流的出现产生了两种相反的影响,一方面,二次流向 V 形肋顶点靠拢,与轴向气流相互影响引起了气流额外扰动,从而增强了换热;另一方面,二次流与轴向气流掺混,导致轴向气流温度上升,又从一定程度上削弱了换热.

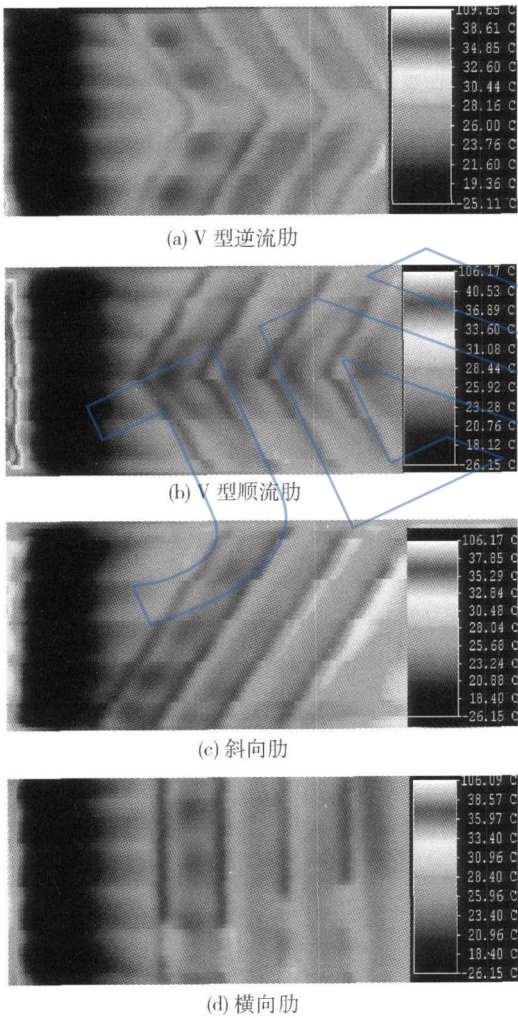


图 3 冲击靶板温度分布红外热像显示
Fig. 3 Thermal visualization of temperature distributions at target surfaces

3.2 冲击靶面换热特性

图 4 是冲击射流在冲击间距与射流孔径之比

$Z_n/d=1$ 时,冲击靶面展向平均努塞尔数随雷诺数的变化曲线.从图中可以看出:①展向平均努塞尔数随着冲击雷诺数 Re_η 的增加而增加,这是由于其它条件不变的情况下,冲击雷诺数的增大意味着冷却流量的增加,从而增强冷却效果,且在冲击驻点区换热效果最强;②在横向型肋化通道内,壁面射流区的换热得到了明显改善,粗糙肋的存在,增大了换热面积,并在一定程度上增强了气流的扰动,使得换热效果得到提高,但粗糙肋离冲击孔位置较远,其存在并不能影响到冲击射流的驻点区;③随着冲击雷诺数 Re_η 的增加,粗糙肋的强化换热效果愈加明显.

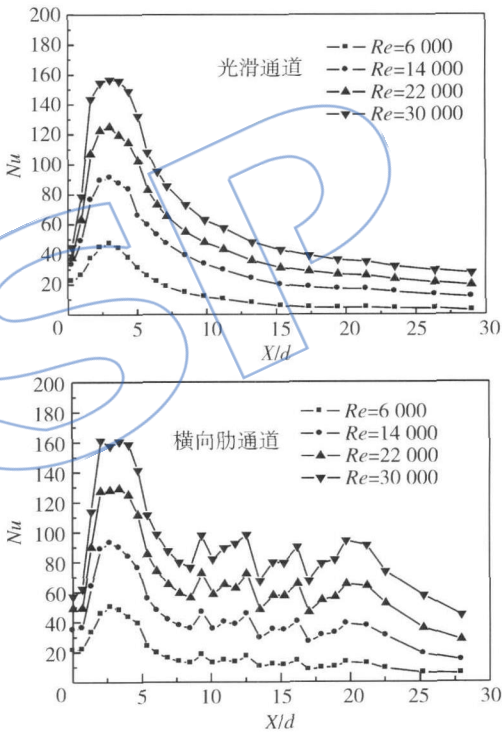


图 4 冲击靶板展向平均努塞尔数分布
Fig. 4 Average Nusselt number distributions at target surfaces

图 5 是在改变冲击间距 Z_n/d 的情况下,测得的肋化通道中冲击靶面展向平均努塞尔数的分布曲线.可以看出:在冲击间距与射流孔径之比为 1~3 的变化范围内, $Z_n/d=2$ 时冲击射流驻点区的冷却换热效果最好;肋化通道部分,冲击间距 $Z_n/d=1$ 时壁面射流区换热最好,这是由于 Z_n/d 的变化,改变了冲击腔内粗糙肋的相对粗糙程度,当冲击间距变大,粗糙肋的相对粗糙度降低,扰动强化换热作用降低,从而换热效果变差.

如图 6 为冲击间距与射流孔径之比 $Z_n/d=1$ 的情况下,不同肋型的肋化部分平均努塞尔数与

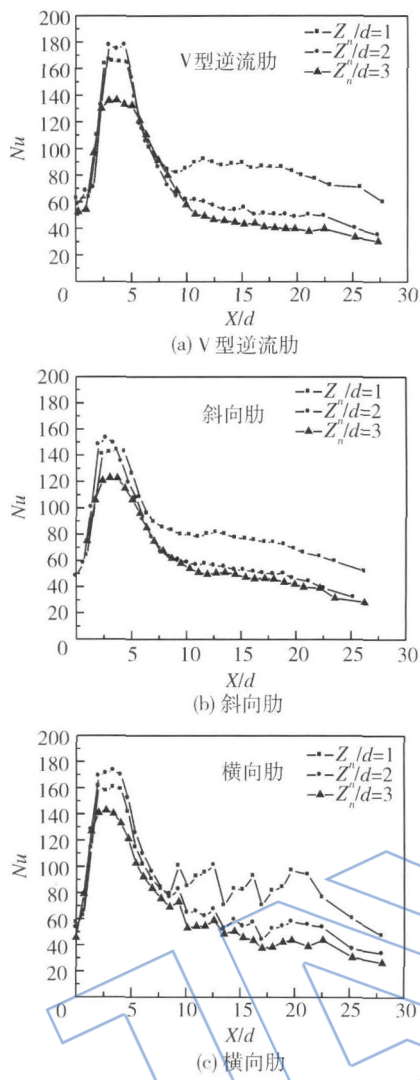


图 5 不同冲击间距下冲击靶板展向平均努塞尔数分布

Fig.5 Average Nusselt number distributions under different jet-to-surface spacing equals

光滑通道在相同区域的平均努塞尔数之比随雷诺数的变化曲线.从图中看出:①相对光滑通道,V型排布使得肋化通道在壁面射流区的换热效果得到了较大的改善,尤其是V型逆流肋;②当射流雷诺数增大到一定程度,肋化段的强化换热曲线趋于水平,这是由于在肋化通道内,凸出于层流底层的粗糙单元引起扰动,导致了涡的产生,从而出现热量的转移,随着射流雷诺数不断增大,层流底层变得越来越薄,相对粗糙单元其厚度可视为趋于定值,因此涡的出现而造成的能耗也可近似认为达到定值,这也就预示着充分粗糙段的开始.

3.3 冲击孔流量系数

图 7 为改变冲击间距与孔径比 Z_n/d ,冲击孔流量系数 C_D 随 Re_j 的变化曲线.从图中可以看

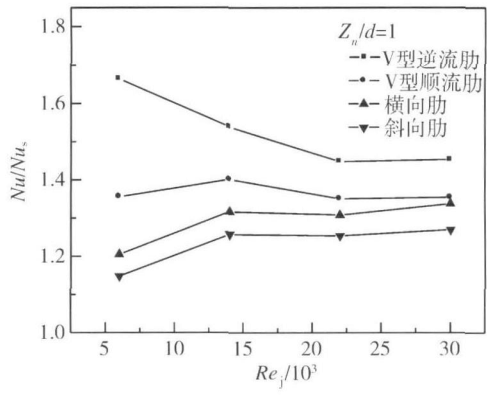


图 6 Nu/Nu_s 随雷诺数的变化曲线
Fig.6 Nu/Nu_s distributions at target surfaces

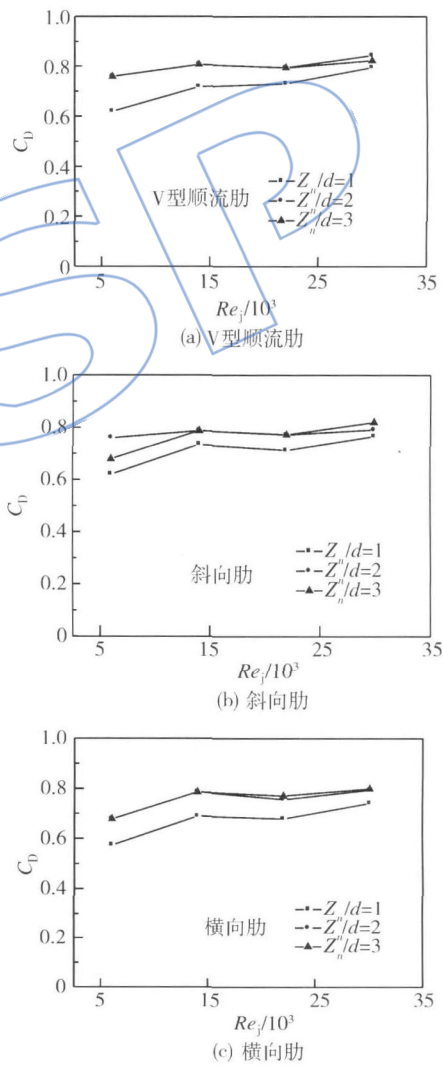


图 7 不同冲击间距下冲击孔流量系数随雷诺数变化曲线
Fig.7 Discharge coefficient distributions under different jet-to-surface spacing equals

出:在不同的肋化通道内,均有冲击孔流量系数 C_D 随着冲击雷诺数 Re_j 的增加而呈线性增加趋势,这

是由于冲击雷诺数 Re_j 增大,射流孔内气流摩擦损失的影响相对减小,流量系数增大;在冲击间距与孔径之比 Z_n/d 为 1~3 的范围内,冲击间距的改变对冲击孔流量系数的影响并不十分明显。

图 8 为不同肋型的肋化通道内,冲击孔流量系数 C_D 随 Re_j 的变化曲线。通过比较不难发现:在冲击间距与孔径之比 Z_n/d 为 1~3 的范围内,均有 V 型顺流肋通道内冲击孔流量系数最大,冷却气流的流向与 V 型肋的倾斜方向一致,流速增加;相同情况下 V 型逆流肋的流量系数最小,主要是由于朝向 V 型肋顶点的二次流与轴向气流相互掺混,引起了气流额外扰动,降低了气流流动速度,从而流量系数变小。

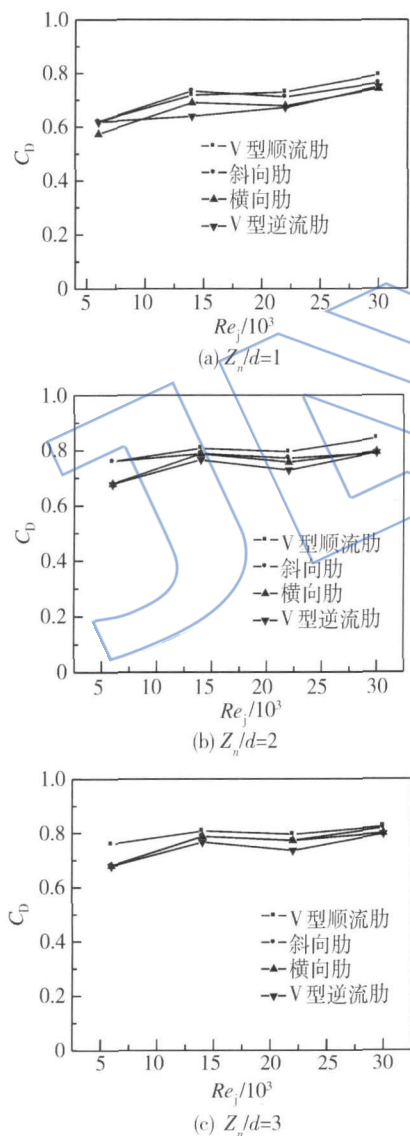


图 8 不同肋化通道内冲击孔流量系数随雷诺数变化曲线

Fig. 8 Discharge coefficient distributions inside different rib-roughed channel

4 结 论

- 1) 相对于光滑通道,肋化通道内壁面射流区的换热得到了明显改善。
- 2) 在冲击驻点区和壁面射流区,换热能力均随射流雷诺数的增加而明显提高。
- 3) 冲击间距对肋化部分的换热影响较大,在本文研究范围内, $Z_n/d=1$ 时壁面射流区的换热效果最好。
- 4) V 型排布使得肋化通道在壁面射流区获得了最佳换热效果。
- 5) 在不同的肋化通道内,冲击孔流量系数均随射流雷诺数的增加而变大,冲击间距对流量系数的影响并不大。
- 6) 对于不同肋型的肋化通道,在其它工况均相同的情况下,V 型顺流肋的流量系数最大。

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] 张靖周, 李永康, 谭晓茗. 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. 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. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] Tanda G. Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shape broken ribs[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 229-243.
- [7] Karwa R. Experimental study of augmented heat transfer and friction in asymmetrically heated rectangular ducts with ribs on the heated wall in transverse, inclined, V-

- continuous and V-discrete pattern[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 30(2):241-250.
- [8] Han J C, Glicksman L R, Rozenow W M. An investigation of heat transfer and friction for rib-roughened surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21:1143-1156
- [9] Han J C, Park J S. Developing heat transfer in rectangular channels with rib turbulators[J]. Journal of Heat & Mass Transfer, 1988, 31(1):183-195.
- [10] Kim H M, Kim K Y. Design optimization of rib-roughened channel to enhance turbulent heat transfer[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 5159-5168.

JALSP