

文章编号: 1000-8055(2007)10-1663-04

不同结构肋化通道对流换热特性的试验

李建华^{1,2}, 宋双文^{1,2}, 杨卫华^{1,2}, 张靖周¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;
2. 中国航动力机械研究所, 株洲 412002)

摘 要: 为了研究不同结构肋化通道冲击射流传热的传热特性, 设计了 4 种不同结构的肋化通道, 采用试验的方法分别对其传热特性进行了研究, 分析比较了不同的肋化结构和冲击雷诺数对传热特性的影响规律. 研究表明, 在冲击驻点区域的传热特性与粗糙肋区域有所不同, 具有 V 形结构肋化通道的传热性能较好.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 冲击射流; 粗糙肋; 传热; 试验研究
中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A

Study of convective heat transfer in channels with different geometrical ribs

LI Jian-hua^{1,2}, SONG Shuang-wen^{1,2},
YANG Wei-hua^{1,2}, ZHANG Jing-zhou¹

(1. College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. China Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: In order to study the heat transfer characteristics of channels with different ribs, 4 kinds of channels with different ribs were designed and the heat transfer characteristics of them were experimentally studied; the influence of different ribs and the impingement Re on their heat transfer characteristics were analyzed. The results show that the heat transfer characteristic at the region of stagnation point is different from that at rib region, and the heat transfer characteristic of channel with V-shape ribs is better than others.

Key words: aerospace propulsion system; impingement jet; rough rib; heat transfer; experimental study

随着航空发动机推重比的不断提高, 发动机热端部件所承受的温度越来越高, 因此对发动机热端部件进行可靠的冷却是保障发动机安全可靠工作的关键之一. 冲击粗糙肋对流换热是一种高效的冷却方式, 广泛应用于航空发动机热端部件的热防护中. 从 20 世纪 60 年代开始, 国外对这种冷却方式进行了广泛的研究. 文献[1-3]对带有肋

片的通道内的对流换热特性进行了试验研究. 文献[4]探讨了冲击孔和粗糙肋相对位置对局部换热特性的影响. 但上述研究大多以横直粗糙肋为研究对象, 对其他形式的粗糙肋的冲击对流换热研究还不够多. 为此, 本文设计了 4 种不同结构的粗糙肋, 对其传热特性进行了研究.

收稿日期: 2007-03-26; 修订日期: 2007-08-05

作者简介: 李建华(1964-), 男, 湖南平江人, 中国航空动力机械研究所研究员, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事航空发动机总体设计与试验的研究.

1 试验系统及试验件

1.1 试验系统

详细的试验系统说明参见文献[5]所述,本文在此不再赘述.

1.2 试验段

试验段主要由冲击孔板、冲击靶板、定距垫片、肋片以及绝热板组成,如图 1 所示.冲击孔板为单排孔,孔的直径 $d = 2\text{ mm}$,孔间距与孔径之比 $Y_n/d = 3$,冲击孔的中心平面距通道封闭一侧壁面的距离为 3 倍冲击孔直径.冲击靶板为 0.01 mm 厚的康铜膜,采用直流电源供电以提供恒热流密度的边界条件.共有 4 种不同形式的肋片,如图 2 所示.肋片为等截面肋片,肋高 e 、宽 e 均为 1 mm ,用 502 胶粘于康铜膜上,肋间距 $p = 8e$.为了

保证冲击靶板不被气流冲坏以及绝热边界条件,在康铜膜的外侧附以 5 cm 厚的有机玻璃.冲击靶板和冲击孔板之间的距离可以通过调整垫片厚度改变.冲击靶板上的温度分布用红外热像仪拍摄,对红外图像进行处理后得到需要的温度场.

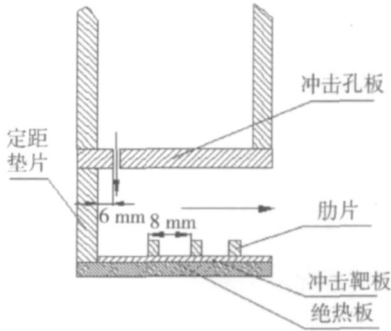


图 1 试验段示意图
Fig.1 Schematic of test section

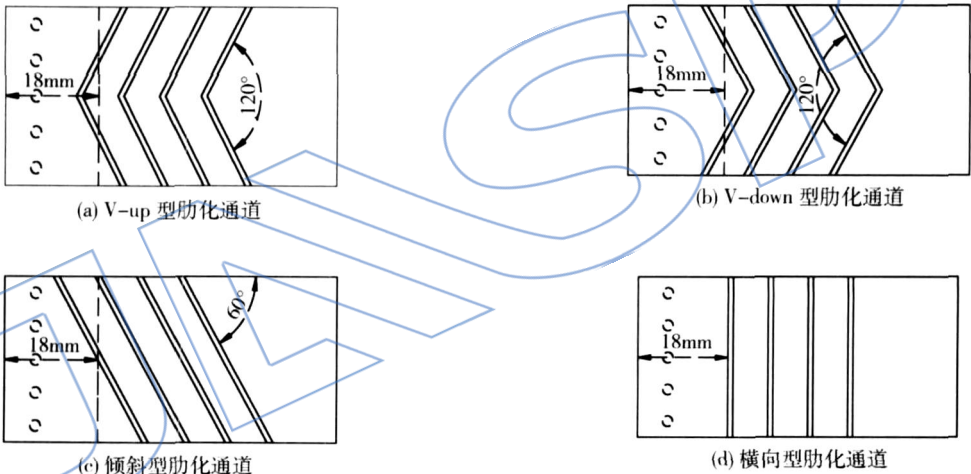


图 2 不同肋片结构示意图
Fig.2 Schematic of ribs

2 试验数据的处理及误差分析

2.1 数据处理

冲击雷诺数为

$$Re_j = U_f d / \nu \tag{1}$$

式中 ν 为冲击气体的运动粘度, U_f 为冲击射流的速度, d 为冲击孔的直径.

沿靶面相邻冲击孔圆心取线性温度积分,来作为靶板冲击孔的平均温度,即

$$\overline{T_s} = \frac{\int_0^L T dl}{L} \tag{2}$$

则

$$Nu = \frac{(IV - Q_{loss}) d}{A (T_s - T_j) \lambda} \tag{3}$$

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, Q_{loss} 为通过绝热板的散热损失. Q_{loss} 主要包括靶板外表面散热 Q_l 和外露加热膜的热辐射 Q_r 及自然对流换热 Q_c ,详细的计算方法参见文献[6]所述.

2.2 误差分析

误差传递公式为

$$\Delta Y(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial x_1}\right)^2 \Delta x_1^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_2}\right)^2 \Delta x_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_n}\right)^2 \Delta x_n^2} \tag{4}$$

式中 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别为独立变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 绝对误差.

由公式(1),(3)和(4),根据测量仪器的精度,最后得出对流换热系数的相对误差范围为 $\pm 4.3\%$ 。详细的计算方法参见文献[6]所述。

3 试验结果及分析

3.1 冲击雷诺数对换热特性的影响

图 3 示出了 $Z_n/d=1$ 时,不同肋片形式下冲击雷诺数对 4 种不同结构肋片传热特性的影响。从图中可以看出:(1)无论何种肋片结构,平均努塞尔数 Nu 随着冲击雷诺数 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流速的增加,提高了流体的扰动,增强了靶板的换热,同时,由于在冲击驻点位置气流扰动最剧烈,因此在冲击驻点区换热效果最强;(2)肋上平均努塞尔数 Nu 较大,肋间较小。这是由于粗糙肋的存在,增大了换热面积,并可以在一定程度上增加气体流动的扰动,增强换热效果;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。

3.2 冲击间距对换热特性的影响

图 4 示出了冲击 $Re=30\,000$ 时,不同肋片形式下冲击间距对传热特性的影响规律。可以看出,

在整个换热区域内传热特性有两个明显不同的区域。在冲击驻点区域,当冲击间距 $Z_n/d=1,2$ 时,由于冲击间距的变化对冲击射流的扰动影响不大,使得冲击射流驻点区的换热效果相差不大;而当 $Z_n/d=3$ 时,由于冲击间距的增大降低了冲击射流的流速,从而使得在此冲击间距下冲击驻点区域的换热效果要比其他两种情况要差。而在肋化通道区域, $Z_n/d=1$ 时换热最好,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 Z_n/d 变大时,粗糙肋的相对粗糙高度降低,使扰动强化换热作用降低,从而换热效果变差。

3.3 不同肋型对换热特性的影响

图 5 为冲击间距 $Z_n/d=1$ 时不同肋化通道形式对传热特性的影响。从图中看出:V-down 的传热效果最好,其次为 V-up,横向与倾斜肋条的传热效果较差。分析原因,主要是因为 V 型肋片排布产生了两个方向的二次流,使得冲击气流沿靶面的扰动加剧,从而强化了在靶面的换热。同时,V 型肋片也增大了冲击靶面的换热面积,从而也增强了换热。由以上分析可知,具有 V 型肋片的冲击对流换热特性要好于横肋和斜肋形式,因此如果要增强冲击换热,采用 V 型肋片较好。

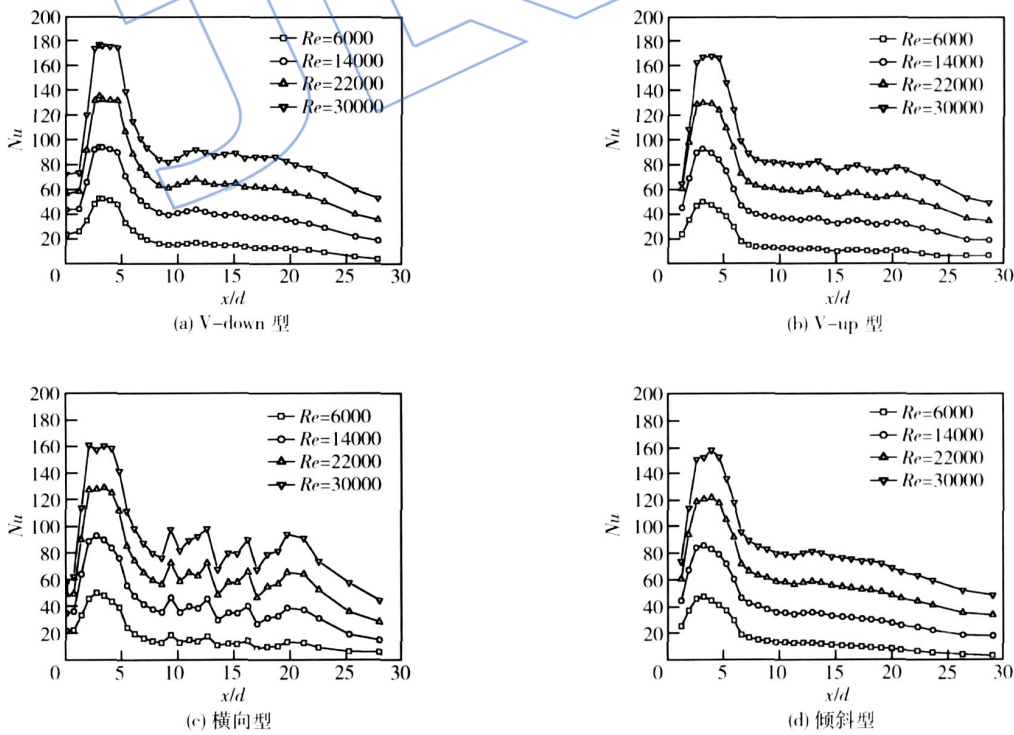


图 3 冲击 Re_j 对传热特性的影响
Fig. 3 Effect of Re_j on Nu

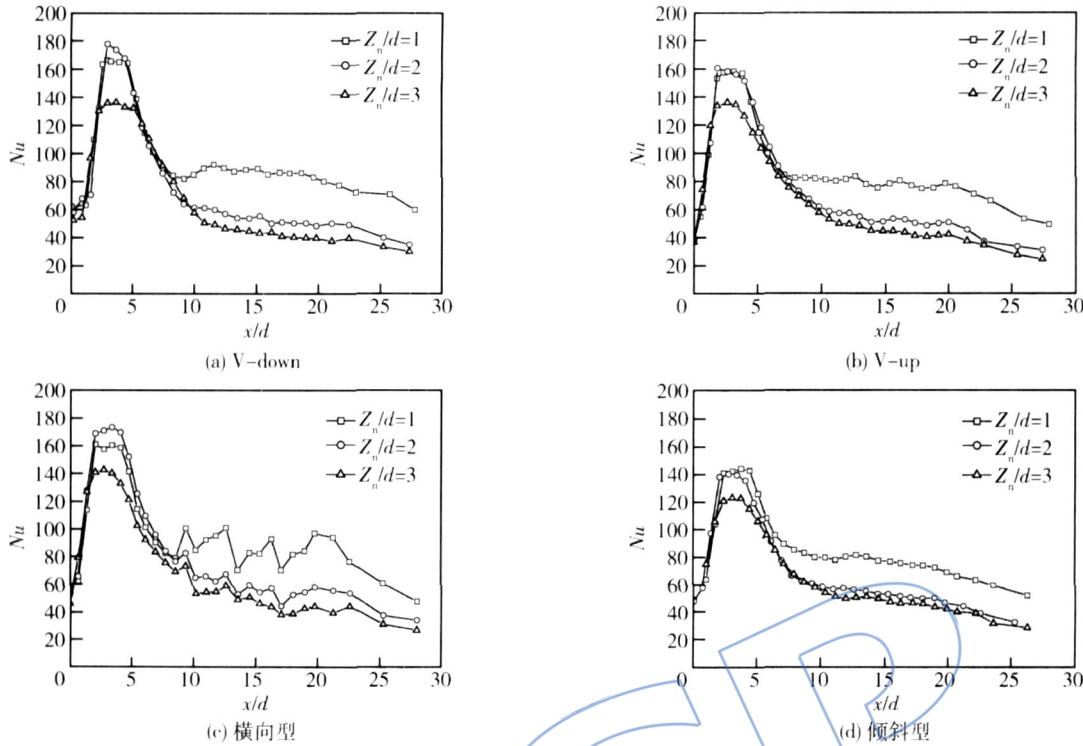


图 4 冲击间距 Z_n/d 对 Nu 的影响
Fig. 4 Effect of Z_n/d on Nu

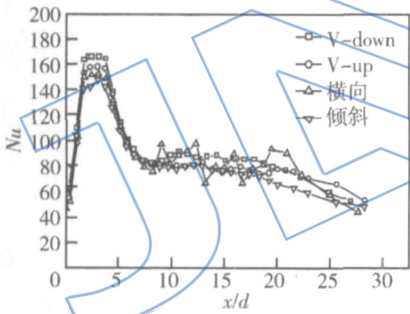


图 5 肋型对换热特性的影响 ($Z_n = 1, Re = 30\ 000$)
Fig. 5 Effect of different ribs on Nu
($Z_n = 1, Re = 30\ 000$)

4 结 论

本文针对单排射流孔在不同形式的半封闭肋化通道内的对流换热特性进行了试验研究,得到了如下结论:

- (1) 在冲击驻点区和壁面射流区,传热效果均随雷诺数的增加而明显改善;
- (2) 冲击间距对肋化部分的换热效果影响较大,在本文研究范围内, $Z_n/d = 1, 2$ 时冲击射流驻点区的冷却换热效果相差不大,且明显优于 $Z_n/d = 3$ 的情况,而在肋化通道部分, $Z_n/d = 1$ 时换热最好;
- (3) 在 4 种肋型的肋化通道中, V-down 的换

热效果最好。
参考文献:

[1] Andrews G E, Hussain C I. Full coverage impingement heat transfer: The influence of crossflow[R]. AIAA 87-2010.

[2] Wang Z, Ireland P T, Köhler S T, et al. Heat transfer measurements to a gas turbine cooling passage with inclined ribs [J]. ASME J. of Turbomachinery, 1998, 120(1) : 63-69.

[3] Ekkad S V, Han J C. Detailed heat transfer distributions in two-pass square channel with rib turbulators[J]. Int. J. of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(11) : 2525-2537.

[4] CHANG Haiping, ZHANG Jinyu, HUANG Taiping. Impingement heat transfer from rib roughened surface within arrays of circular jet: The effect of relative position between the hole and the rib initial crossflow[R]. ASME, 97- GT-331.

[5] 张泽远,张靖周,杨卫华. 半封闭通道射流冲击换热特性的试验[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4) : 626-630.

ZHANG Zeyuan, ZHANG Jingzhou, YANG Weihua. Experiment study of convective heat transfer of jet impingement inside semi-confined channel [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4) : 626-630.

[6] 张泽远. 半封闭通道内冲击射流换热特性和流量系数的试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

ZHANG Zeyuan. Experiment study of convective heat transfer and discharge coefficient of jet impingement inside semi-confined channel[D]. Nanjing: Master Degree Thesis of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.