

文章编号: 1000-8055(2006) 01-0061-04

不同流动角对变截面双通道内 换热特性实验

张利民, 刘湘云, 耿汀, 陶 智, 徐国强
(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘要: 研究了变截面双通道内肋的角度对通道换热的影响, 并且与光滑变截面通道进行了比较。实验模型中, 矩形肋对称布置在上下两个表面, 肋与来流的角度按两种布置。实验结果表明, 带强化肋通道的换热效果比不带肋通道的换热效果增强 50% 左右; 与以往研究结论带有 60° 平行肋的通道换热效果大于带 90° 肋的通道的换热效果的结论不同, 结果显示, 当通道肋高比为 0.092 时, 带有 90° 平行肋的通道换热效果大于带 60° 肋的通道的换热效果。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 变截面; 肋高比; 双通道; 换热
中图分类号: V 231 文献标识码: A

Experimental Study of Heat Transfer Characteristics inside Two-Pass Variable Cross-Section Channels with Different Rib Angles

ZHANG Li-min, LIU Xiang-yun, DING Shui-ting,
TAO Zhi, XU Guo-qiang
(National Key Laboratory on Aero-Engines,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The effect of the rib-angle orientation on heat transfer distribution was experimentally studied inside two-pass variable cross-section channels. The heat transfer distributions for ribbed channels were compared with channels without ribs. Ribs with rectangular cross-section were arranged symmetrically on two opposite walls. Analysis of the experimental results may lead to the following conclusions: the heat transfer effect of the channel with ribs is 50% higher than that of the channel without ribs. The 60° ribs were not necessarily the optimum option as published in the literature. Tests show that 90° ribs produce a higher heat transfer for the relative roughness height of 0.092.

Key words: aerospace propulsion system; variable cross-sectional channel;
relative roughness of height; two-pass channel; heat transfer

随着航空发动机技术的发展, 现代航空发动机涡轮叶片的内部结构形式也越来越复杂。冷却

空气从叶片内部若干 180° 回转通道和直通道流过, 通过流动的冷却空气与叶片壁面的热交换, 将

热量带走,从而使涡轮叶片温度降低,达到冷却目的。冷却通道的截面通常做成矩形,通道中布置一些肋或气膜孔。关于带肋回转通道的换热规律国外已经作了大量的研究,其中有光滑通道、带肋通道中肋的布置形式^[1~3]的换热规律等。研究认为,在等截面通道内,带有60°平行肋通道的换热大于带有90°肋通道的换热效果。近年来也有文献研究梯形变截面带肋通道的换热情况^[4,5],其研究重点为梯形变截面通道与矩形等截面通道换热的比较,实验是在一种肋的角度下进行的。在变截面通道内,肋的角度对通道换热效果的影响是否与等截面通道换热效果一致,还没有相关报道。本文以航空发动机涡轮叶片内部冷却通道为模型,将其简化为带有肋的变截面双通道,更加接近真实叶片的几何形状,并着重研究了通道内肋的角度对通道换热的影响。

1 实验装置以及实验方法

实验中,通道由上、下带肋板,中间隔板,外隔板以及进口整流管装配而成。带有不同角度肋的通道内部剖面结构见图1所示。通道分为第一通道,转弯段和第二通道3部分。通道中扰流肋对称布置在两个表面上,另外两个面为光滑表面。通道中肋的宽度相同,都为2 mm。

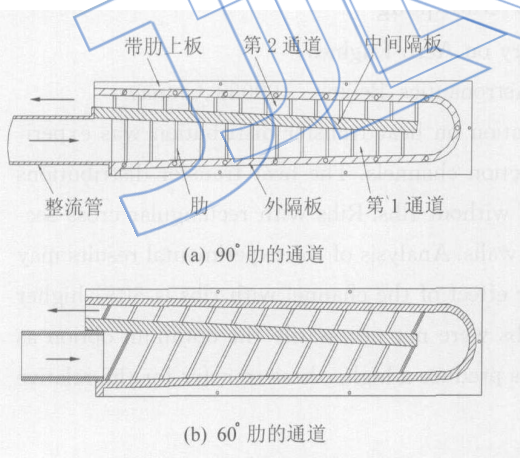


图1 带有不同角度肋的通道

Fig. 1 Channels with different rib angles

图2为通道沿程截面积示意图。在进口第一通道,通道截面积逐渐增加,接近转弯段时,截面积稍有下降;进入转弯段后,截面积很快增加,在转弯段顶点达到最大值,随后很快减小;在出口段,截面积逐渐减小。由于第一通道截面积变化较小,局部雷诺数在第一通道变化较为平缓;第二通道为渐缩通道,随着流动继续发展,雷诺数逐步增

加。

图3为实验台装置示意图,通道进口空气来自经过稳压后的压缩空气,通道进口流量有浮子流量计(1)测得;进口温度、进口压力分别由温度计(2)、压力表(3)测得;测量温度采用布置在实验件表面的NiCr-NiSi热电偶,在连续的两个肋之

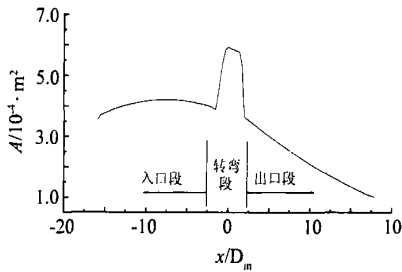


图2 通道沿程截面积示意图

Fig. 2 Distributions of cross-section area along the channel

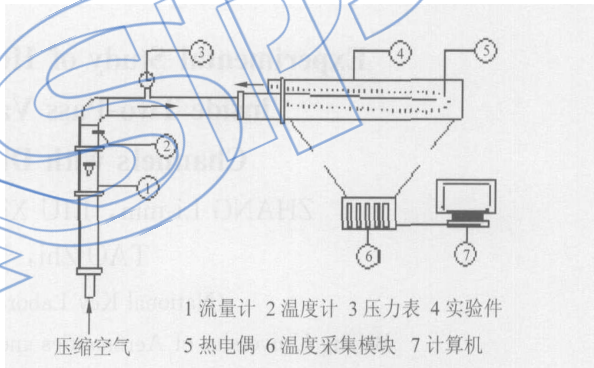


图3 实验台装置

Fig. 3 Experimental Setup

间均匀布置3个热电偶测点,转弯段布置5个测点,测点布置在流道的中心线位置。所测温度由(6)通道数据采集模块组采集,通过RS485转RS232接口,传输给计算机(7)。带肋上下壁面加热采用电加热的方式。加热片与带肋表面之间用涂有导热绝缘硅胶的铜板隔离,保证加热片加热均匀,加热片外面用云母片、石棉板、及石棉布包裹,减少热量散失,保证了等热流的边界条件。

2 实验结果及分析

2.1 实验分析方法

由于通道截面积是变化的,通道内沿程雷诺数是变化的,需要采用局部努塞数,以反映局部换热效果。本文按边界连续性原则,将通道划分成若干特征单元,划分原则为每个单元包含一个完

整的肋, 转弯段作为一个独立的单元来分析。

(1) 单元平均努塞数的定义:

$$Nu_1 = \frac{\alpha \cdot D_{in}}{\lambda_{in}} \tag{1}$$

这里, D_m 为单元进口水力直径; α 是单元的平均换热系数:

$$\alpha_1 = \frac{q}{t_1 - t_{1in}} \tag{2}$$

其中, q 和 t_1 分别为热流密度和单元的带肋面按面积加权的单元平均壁面温度, t_{1in} 为单元进口处空气的温度。

(2) 通道平均努塞数的定义:

$$Nu = \frac{\left(\sum \alpha_1 A_1 \right) / \left(\sum A_1 \right) D_{in}}{\lambda_{in}} \tag{3}$$

这里 A_1 为单元带肋面的表面积。

(3) 单元雷诺数的定义:

$$Re_1 = \frac{U_1 D_{in}}{\gamma_1} \tag{4}$$

这里: U_1 为单元进口处的气流速度, γ_1 单元进口处空气的运动粘性系数。

文中描述实验工况的雷诺数为通道进口雷诺数。

另外, 通过对控制方程及单值性条件的无量纲化, 可以得到以下关系式:

$$Nu_1 = f \left[Re_1, \frac{D_{1out}}{D_{1in}}, \frac{e}{D_{1in}}, \frac{l}{D_{1in}} \right] \tag{5}$$

其中, D_{1out} , D_{1in} , l 分别为单元出口水力直径, 单元进口水力直径, 单元入口中心线与肋中心线的距离。 D_{1out} , D_{1in} 范围为 0.095~1.05; l/D_{1in} 范围为 0.61~0.80; e/D_{1in} 范围为 0.37~1.21; Re 的范围为 10 000~50 000。综合分析几个无量纲参数认为, 单元肋高比 e/D_{in} 和雷诺数 Re 变化范围较大, 对单元努赛数影响较大。结果分析中强化比 Nu/Nu_0 中的分子 Nu_0 取等入口水利直径的圆管的努赛数, 这样处理减少了同时取实验结果(与取光滑通道的 Nu 作为分子进行结果分析对比) 进行对比带来的误差。

2.2 实验结果及分析

本实验在肋间距与肋高的比值(即节距比)为 10 时, 对于不同的通道肋高比, 研究了带有 60 肋和带有 90 肋的通道的换热特性, 并且与不带肋的光滑通道进行了对比。

图4的(a)和(b)给出了肋高比为0.092 时, 雷诺数为7 100 和32 000 时, 带有90 肋和带有60 肋的通道单元强化比比较。横坐标中, X/D_{in} 的负数

表示第一通道的单元, $X/D_{in} = 0$ 表示转弯段单元, X/D_{in} 的正数表示第二通道的单元。在进口段, 强化比变化幅度较大, 随着流动逐步发展, 接近转弯段时, 强化比逐渐增大。流体经过转弯段时, 由于离心力和惯性力的作用, 在转弯段附近会形成二次流和附加的二次流。因而, 在第二通道开始区域, 强化比升高。在第二通道随着流动进一步发展, 二次流影响减弱, 强化比逐渐减小。另外, 随着通道进口雷诺数的增加, 通道沿程强化比逐渐减小。这是由于随着通道进口雷诺数的增加, 流动得到了完全发展, 由转弯段引起的二次流作用逐步减弱。图中可以看出, 带肋通道的换热效果明显大于光滑通道的换热效果; 带有 90 肋的通道沿程换热效果高于带有 60 肋的通道换热效果。这点与以往等截面通道内的研究结论^[1~3], 即 60 肋的换热效果大于 90 肋的换热效果结论不同。这是由于在以往的研究中, 截面为等截面, 肋高比是恒定的。在本实验研究的通道内, 如前所述, 单元肋高比变化范围较大, 肋的角度和肋高比综合作用对通道内换热效果的影响产生的。

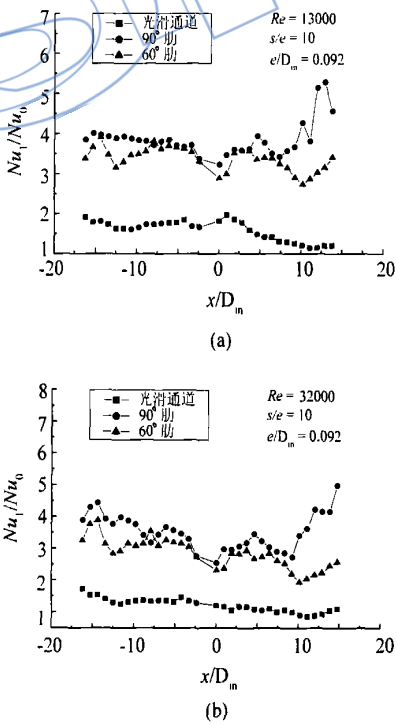


图4 肋的角度对通道内单元强化比的影响

Fig.4 Effect of rib angle on region Nusselt number ratios for ribbed channels

在变截面通道内, 其他肋高比情况下, 肋的角度影响是否一致, 我们作了进一步的实验。图5 的(a)和(b) 分别是通道肋高比为 0.123 时, 带有 90 °

肋和带有 60 肋的通道单元强化比分布比较。图中,带肋通道的换热效果比光滑通道的换热效果增加50%左右;带有60 肋的通道换热效果高于带有 90 肋的通道换热效果。这个结论与以往研究的^[1~3]结论一致。说明等截面的部分结论仍然可以应用于变截面通道。

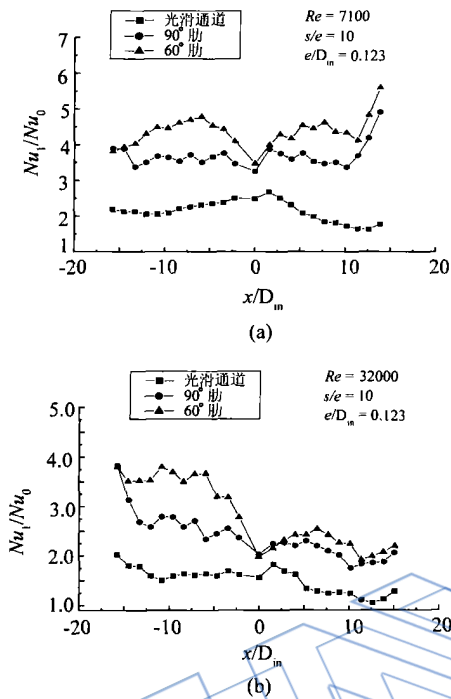


图5 肋的角度对通道内单元强化比的影响
Fig. 5 Effect of rib angle on region average Nusselt number ratios for ribbed channels

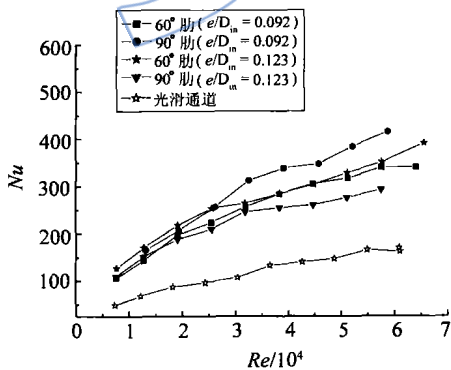


图6 肋的角度对通道平均努赛数的影响
Fig. 6 Effect of rib angle on the average Nusselt number ratios of the channels

从图 6 和图 7 的通道平均努赛数和通道阻力随的分布曲线,肋高比 0.092 时,90 肋的阻力小于 60 肋的阻力,换热却大于 60 肋的换热。可以认

为:在变截面通道内,肋高比和肋的角度对通道

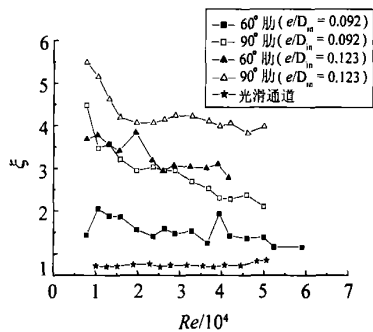


图7 通道阻力受肋的角度的影响
Fig. 7 Effect of rib angle on the flow resistance of the channels

换热的影响相互平衡的结果,使得其换热效果不同于以往等截面通道的换热效果。

4 结 论

在变截面通道内,对于相同节距比,两种肋高比条件下,改变肋的流动角进行了实验,并且与光滑通道进行了比较。通过分析实验结果,可以得出以下结论:

- (1) 带强化肋通道的换热效果比光滑通道的换热效果增加50%左右。
- (2) 以往研究的带有 60 平行肋的通道换热效果大于带 90 肋的通道的换热效果这个结论,并不是在所有形式的通道内适用。在变截面通道内,当肋高比为 0.092 时,带有 90 平行肋的通道换热效果大于带 60 肋的通道的换热效果。

参考文献:

- [1] Chandra P R, Han J C, Lau S C. Effect of Rib Angle on Local Heat/Mass Transfer Distribution in a Two-Pass Rib-Roughened Channel[J]. *ASME Journal of Turbo-machinery*, 1988, 110: 233~241.
- [2] Han J C, Zhang P. Effect of Rib-Angle Orientation on Local Mass Transfer Distribution in a Three-Pass Rib-Roughened Channel[J]. *ASME Journal of Turbo-Machinery*, 1991, 113: 123~130.
- [3] Srinath V Ekkad, Je-Chin Han. Detailed Heat Transfer Distributions in Two Pass Square Channels with Rib Turbulators[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1997, 40: 2525~2537.
- [4] Srinath V Ekkad, Gautam Pamula, Manoj Shantiniketanam. Detailed Heat Transfer Measurements Inside Straight and Tapered Two-Pass Channels with Rib Turbulators[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, 22: 155~163.