

文章编号: 1000-8055(2004) 05-0645-05

带交叉肋变截面回转通道内换热的实验研究

魏 喆, 邓宏武, 陶 智, 承汀, 徐国强
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 以航空发动机涡轮叶片内部回转通道为设计原型, 实验研究了三种不同入口宽高比的带 60°交叉肋变截面 180°回转通道壁面的换热特性。分析了几何无因次参数和气流雷诺数对通道带肋表面换热的影响。结果表明: 通道壁面的换热效果是随着进口雷诺数的增大而增加的, 其分布趋势基本一致; 对于不同宽高比的通道, 低雷诺数时通道平均换热效果是基本相同的, 在高雷诺数时宽高比小的通道要好于宽高比大的通道, 而换热系数在整体通道上的分布情况基本相同。

关键词: 航空、航天推进系统; 交叉肋; 回转通道; 宽高比; 换热

中图分类号: V 231.1

文献标识码: A

Experimental Investigation of Heat Transfer in Turn-Over Variable Cross-Section Channels with Interleaving Ribs

WEI Zhe, DENG Hong-wu, TAO Zhi,
DING Shui-ting, XU Guo-qiang

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: Measurements has been carried out on a 180°turnover variable cross-section channel with 60°interleaving ribs. The design of the channel inner configuration was referred to an actual aero-engine turbine blade. Heat transfer characteristics were investigated at three different inlet widths to heights ratio channels. The influence of non-dimensional parameters on heat transfer of the surfaces with ribs was analyzed. The results show that at high Reynolds number, the channels with large width to height ratio have better average heat transfer effect, but at low Reynolds number, the effect does not vary much with width to height ratio. Heat transfer coefficient distribution in the whole channel is basically the same for all the cases studied.

Key words: aerospace propulsion system; interleaving ribs; turnover channel; aspect ratio; heat transfer

航空发动机提高推重比的主要措施之一是提
高涡轮前燃气温度, 所以涡轮叶片的冷却技术就

成为航空发动机传热学的研究热点。当今采取比
较多的涡轮叶片内部冷却方式是利用绕流柱排和

强化肋等。Srinath V Ekkad 和 Je-Chin Han 等^[1,2]对不同几何参数下带肋回转通道进行了静态实验研究,研究表明不同几何参数下通道的换热效果有较大差别。从国内外文献来看,关于带交叉肋通道的换热研究还比较少见。针对带交叉肋通道内换热特性研究较少的情况,本文实验研究了三种不同入口宽高比下带 60°交叉肋变截面 180°回转通道壁面的换热特性。

1 实验模型、设备及数据处理

1.1 实验装置

以某型航空发动机高压涡轮叶片为实验件设计原型,将其内部冷却通道简化为上下表面带肋的变截面 180°回转通道,研究其静止状态下的换热特性。通道由气流进口通道、拐弯段和出口通道三段组成,其中进出口通道沿气流方向为均匀渐缩。实验模型大体由五个部分组成,分别为上盖板、下盖板、U 形外隔板、内隔板以及用于进出口气流整流段。三个实验件只是内外隔板的高度不同(即:实验通道的高度不同),其他参数不变,这样就形成了三种不同入口宽高比的通道。实验段简图如图 1 所示。

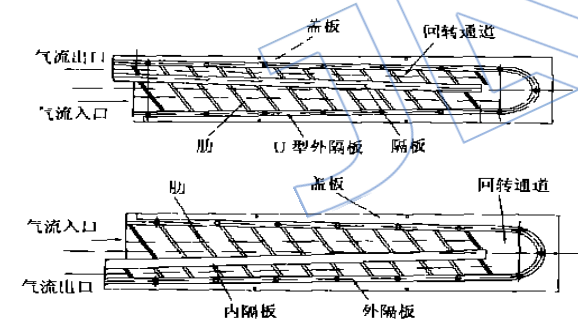


图 1 实验模型结构(分别为上下盖板)

Fig.1 Illustration of facility

上下盖板由硬铝做成,厚度均为 1 mm,盖板内侧表面为带肋表面,肋高均为 2 mm,肋间距 L 均为 20 mm,肋和主流方向有 60°夹角,上下板的肋方向相对,从而在气流通道的内形成上下交叉的肋形式。内外隔板由不锈钢制成,三个实验件的隔板高度分别为 10.8、8.8、6.8 mm。进出口段用电木做成,进出口段进口处与供气管道相连,出口段与外界环境相通。实验件的各部分用螺钉连接组合在一起,在盖板和隔板接合面用中性硅酮密封胶密封。实验过程中,将出口面积封堵上一半,通过比较堵口和未堵口时通道内的压力变化情况,可以检测实验模型的密封性能。实验证明,在实验

范围内可以保证良好的气体密封性。

实验中冷却介质为压缩空气,空气流量由浮子流量计测量。温度由 NiCr-NiSi 热电偶测量,为了避免实验件通道内气流对热电偶的影响,将热电偶焊接在壁面的外侧,为了尽量降低由此产生对温度测量的影响,盖板被设计的很薄(1 mm),而且采用导热性能很好的硬铝制成,在本实验的参数范围内,盖板两面的温差小于 0.05℃,完全可以用盖板背面的温度来代替通道内壁面的温度。温度测点的分布是按照在相邻的两个肋之间布置 3 个热电偶,拐弯段也按照相同的间距布置热电偶,测点被焊接在流体通道的中线。实验所测得的温度信号由 ADAM-4018 通道数据采集模块组采集热电偶的热电势,后经电脑换算为相应的温度数据记录下来。

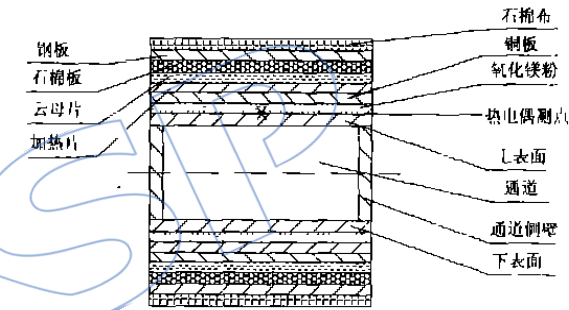


图 2 实验模型装配示意图

Fig.2 Details of test section elements

本实验采用电加热的方式对带肋表面进行加热,加热片是利用厚度为 0.2 mm 的不锈钢片加工成的宽为 2 mm 的蛇形窄条。在加热片与被加热表面间安装有涂绝缘导热硅胶的薄铜片以及云母片,从而保证等热流密度加热的要求。加热片的外面以及实验件侧面用玻璃棉和石棉布包裹,并放置在专门设计的保温箱中以保证绝热的要求。实验模型装配示意图如图 2。

1.2 实验数据处理

由于本实验研究对象的通道截面面积是连续变化的,因此在处理数据时,按照连续性原则,以“肋”为基本特征将通道分成若干换热单元,分别研究各个换热单元的平均努赛尔数 Nu_{ld} 。

1.2.1 通道进口雷诺数的计算

通道的进口雷诺数表征了气流流量的大小,其定义公式为:

$$Re_{in} = \rho_0 \cdot D_{in} \cdot U_{in} / \mu_0$$

其中, ρ_0 为通道入口气体密度; μ_0 为通道入口气

体的动力粘性系数,其定性温度采用气流的进口温度 T_0 ; U_{in} 为气流进口速率; D_{in} 为通道的入口水力直径; A_{in} 为通道进口面积。

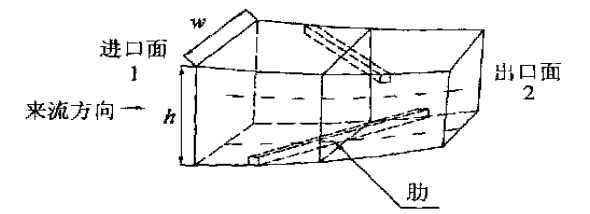


图 3 换热单元示意图

Fig. 3 Cell of channel with crossed ribs

气流进口速度由气流的进口质量流量 $\dot{m}$ 计算,有:

$$U_{in} = \frac{\dot{m}}{\rho_0 \cdot A_{in}}$$

则可得雷诺数的计算公式:

$$Re_{in} = \frac{\dot{m} \cdot D_{in}}{\mu_0 \cdot A_{in}} = \frac{4\dot{m}}{\mu_0 \cdot C_{in}}$$

1. 2. 2 换热系数和努塞尔特数的计算

实验中整个回转通道的壁面各处的局部换热系数的计算公式为:

$$\alpha = \frac{q}{T_w - T_0}$$

其中, T_w 为通道内各处的壁面温度。

整个通道带肋面的平均换热系数的计算公式:

$$\alpha_w = \frac{q}{T_w - T_0}$$

式中, T 是通道带肋面的壁面平均温度。每个测点所代表的区域面积各 A_i 不相同,因而 T 是全通道壁面相应温度的面积加权平均值:

$$T = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n T_{wi} A_i$$

由于本实验是研究变截面通道带肋面的换热,因此将通道分成若干单元,分别考察每一单元的平均换热系数 Nu_{lav} 。其定义如下:

$$Nu_{lav} = \frac{\alpha_{av} \cdot D_{lin}}{\lambda_{in}} = \frac{q \cdot D_{lin}}{(t_{lav} - t_{lin}) \lambda_{in}}$$

上式中, D_{lin} 是该单元的入口水力直径; t_{lin} 是该单元气流的进口温度, α_{av} 和 t_{lav} 分别是该单元带肋面的平均对流换热系数和壁面平均温度; λ_{av} 是单元进口气体的导热系数,其定性温度采用的也是该单元进口温度 t_{lin0} 。

通道的平均努塞尔特数 Nu_{av} 的计算公式为:

$$Nu_{av} = \alpha_v \cdot D_{in} / \lambda_0$$

2 实验结果及分析

本实验研究的对象有三个主要特点:

- (1) 实验件气流通道截面沿气流流向是变化的,并为 180° 回转通道;
- (2) 通道内表面为上下交叉的肋形式;
- (3) 对比研究了三个不同入口宽高比实验件的换热特性。

图 4 给出了三个实验件通道截面沿流程的变化。入流通道截面面积为线性减小,在拐弯段,截面面积先急剧增大后急剧降低,在出流通道,截面面积为线性减小的趋势。 W 和 H 分别是通道进口宽和高; w 和 h 分别是换热单元的进口宽和高。

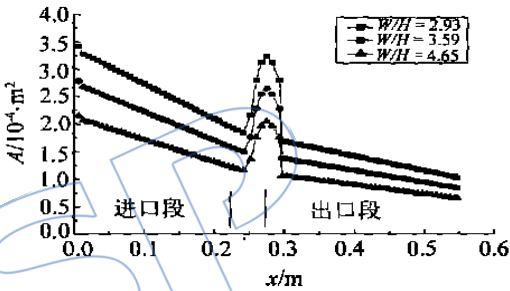


图 4 通道截面的变化趋势图

Fig. 4 Variation of Sectional Area with x

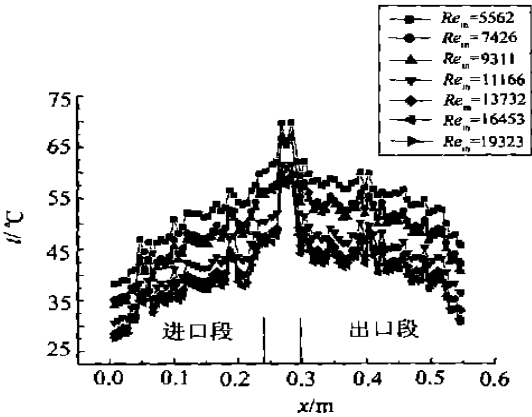


图 5 通道壁面温度的分布

($W/H = 4.65$)

Fig. 5 Distribution of wall temperatures in channel

($W/H = 4.65$)

在实验验证的进口雷诺数的范围内,三个不同通道带肋面的壁面温度变化规律基本相同。从图 5 可以看出由于肋的扰流作用,变截面通道壁面温度呈复杂略带锯齿状分布。这是由于,肋的存在破坏了边界层的形成或充分发展,强化了换

热;同时,也正因为肋的存在,气流中产生了很多旋涡,有些地方因旋涡的存在削弱了当地的换热,因此当地的壁面温度较高。同带平行直肋和带平行斜肋的通道的呈锯齿状分布的壁面温度不同,交叉肋壁面的温度变化更加复杂,这是因为上下壁面肋交叉的存在使得通道截面变化较大,使得冷气流变化较大,从而使壁面换热变得复杂。但是从与带平行肋通道的实验结果比较看,带交叉肋的通道存在使得壁面的温度变化幅度减小的趋势,拉平了壁面温度。这样有利于降低由于温差而产生的热应力。与等截面通道不同的是,从变截面通道的壁面温度分布中找不到严格的以肋间距为周期的变化规律,这是因为通道截面是连续变化的,每个截面的入口水力直径 D_{in} 、阻塞比 F 、宽高比 K 各不相同,因而通道各截面的气流流速等换热的决定因素是处处变化的,破坏了因截面不变而保持的以肋间距为周期的温度变化规律^[3,4]。

对于每个换热单元的平均努赛尔特数 Nu_{lav} , 可以用三个无量纲几何变量来描述换热单元, 分别是换热单元的阻塞比 $F = D_{in}/D_{out}$ 、换热单元入口的宽高比 $K = w/h$ 和无量纲的长度 $G = L/D_{in}$ 。由于在本实验中肋间距是常量, 因此 G 为常量。在本实验中, 气流在逐渐缩小的通道中流速逐渐加快。图 6 和图 7 分别给出回转通道入口宽高比为 $W/H = 4.65$ 的实验件, 进出口段单元平均努赛尔特数随雷诺数的变化。从图中可以看到, 随着单元雷诺数的增加单元平均努赛尔特数也是增加的。但是在进口段雷诺数较低宽高比的变化对单元平均努赛尔特数的影响并不明显, 这是由于在低雷诺数下在进口段, 通道的宽高比较大, 肋对换热的影响要小于气流量对换热的影响。因此在入

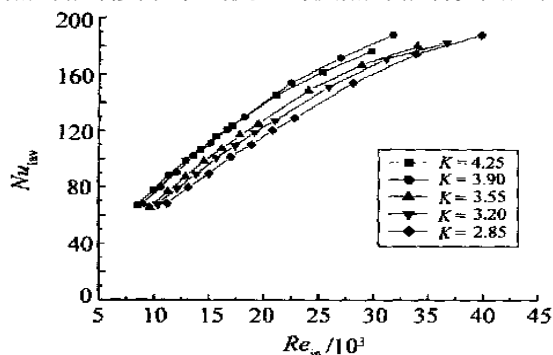


图 6 进口段 Nu_{lav} 随 Re_{in} 变化

($W/H = 4.65$)

Fig. 6 Variation of Nu_{lav} with Re_{in} in inlet passage

($W/H = 4.65$)

口通道, 宽高比对单元平均努赛尔特数影响较小。在出口段由于宽高比减小的很大, 所以肋对换热的强化作用得到较大的增加。在较高雷诺数下通道表面的流动获得充分的发展, 肋对换热的影响体现的更多一些。因此宽高比对换热产生的影响体现的更多一些^[4,5]。

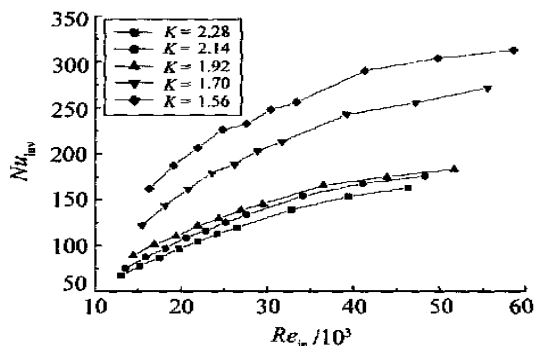


图 7 出口段 Nu_{lav} 随 Re_{in} 变化

($W/H = 4.65$)

Fig. 7 Variation of Nu_{lav} with Re_{in} in outlet passage

($W/H = 4.65$)

为了更好的考察每个单元的换热特性在这里引入一个概念: 强化比, 其表达式为:

$$Nu_{lav}/Nu_0$$

其中: Nu_{lav} 为通道局部努赛尔特数, Nu_0 为 Dittus Boelter 紊流换热关联式。

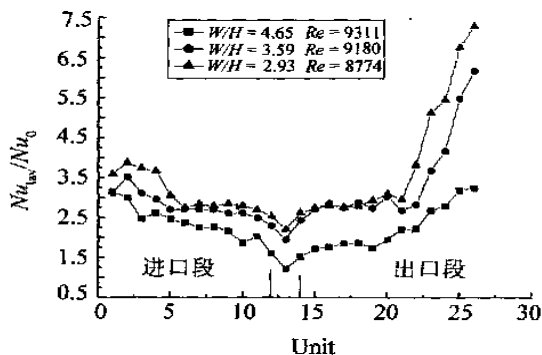


图 8 三种通道强化比的分布 (较小 Re_{in})

Fig. 8 Comparison of Nu_{lav}/Nu_0 for Channels

with different W/H

(Low Re_{in} number)

图 8~图 10 分别给出了在三种入口雷诺数下, 三种不同进口宽高比的通道沿流程的换热强化比的分布。从图中可以看出相同雷诺数下在通道整体宽高比小的通道强化比要稍好一些, 三个通道强化比的变化趋势是一致的。在入口段强化比有一个略微下降的趋势, 在转弯段强化比最小,

在出口段强化比是一个增长的趋势。这是由于在低雷诺数下在进口段, 通道流通截面较大, 肋对换热的影响要小于流动对换热的影响; 在转弯段截

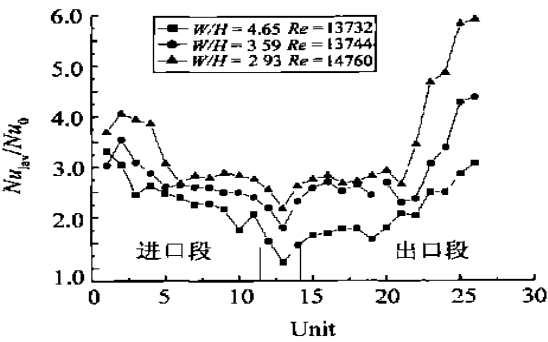


图 9 三种通道强化比的分布 (较小 Re_{in})
Fig. 9 Comparison of Nu_{av}/Nu_0 for Channels with Different W/H (Low Re_{in} number)

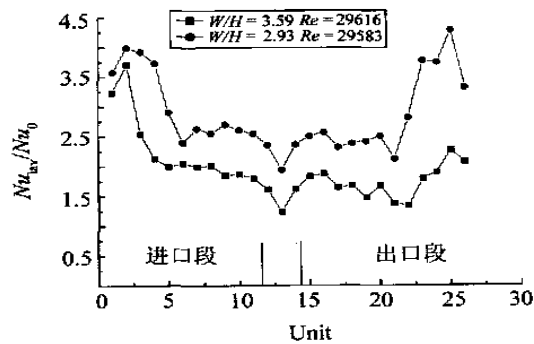


图 10 两种通道强化比的分布 (较大 Re_{in})
Fig. 10 Comparison of Nu_{av}/Nu_0 for Channels with different W/H (High Re_{in} number)

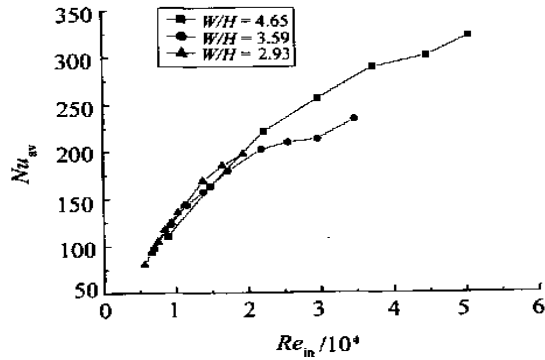


图 11 通道平均努赛尔特数随进口雷诺数的变化
Fig. 11 Variation of Nu_{av} with Re_{in}

面变化很大, 同时没有强化肋, 流体由于通道扩张而减速, 附面层变厚所以换热效果变差; 在出口段由于通道收缩很快, 当地气流流速相应大幅增加, 因此强化比有一个大的增加。

图 11 给出了相同通道入口宽度、相同肋高、肋宽和相同肋间距, 不同通道入口宽高比回转通道全通道平均努赛尔特数随雷诺数变化的对比。可以看出, 随着雷诺数的增大通道平均努赛尔特数是增大的。但是不同宽高比在低雷诺数时, 通道平均努赛尔特数是基本相同的。也就是说, 在低雷诺数下宽高比的不同对通道平均努赛尔特数影响是有限的。而在高雷诺数下, 流动充分发展时肋对换热的影响体现的更加明显, 本实验范围内宽高比小的通道换热效果要好于宽高比大的通道。

3 结 论

对于带 60 交叉肋的回转通道:

- (1) 壁面温度沿流程呈现局部升高和降低式波动变化;
- (2) 壁面的换热效果是随着进口雷诺数的增大而增加的, 不同工况下壁面的努赛尔特数分布趋势基本一致;
- (3) 对于三种不同通道入口宽高比的通道, 在低雷诺数时通道平均努赛尔特数是基本相同的, 在高雷诺数时宽高比小的通道换热效果要好于宽高比大的通道。

参考文献:

[1] 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(11): 2525- 2537.

[2] Srinath V Ekkad, Yizhe Huang, Je-Chin Han. Detailed Heat Transfer Distributions in Two-Pass Square Channels with Rib Turbulators and Bleed Holes[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, 41: 3781- 3791.

[3] 杨世铭. 传热学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.

[4] 戴有为. 对流传热分析[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1989.

[5] 顾维藻, 涂建平, 刘文艳, 等. 涡轮叶片内冷却通道的流阻与换热实验研究[J]. *航空动力学报*, 1995, 10(3): 225- 228.

GU Wei-zao, TU Jian-ping, LIU Wen-yang, et al. Investigation on Flow Resistance and Heat Transfer in Cooling Passages Gas Turbine Blade[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1995, 10(3): 225- 228.