

文章编号: 1000-8055(2004) 05-0640-05

不同肋间距变截面回转通道内的 流阻和换热特性

刘湘云, 耿汀, 陶 智, 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: 实验选取航空发动机涡轮叶片中段内部冷却通道为研究对象, 对横肋变截面回转通道内不同肋间距的气流流动阻力和换热特性进行了实验研究。通道进口雷诺数在 7 000 到 60 000 范围内。实验结果表明, 随着雷诺数的增加, 不同节距比通道阻力系数降低; 不同节距比对通道阻力系数和通道平均努塞数的影响呈多峰分布。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 变截面; 节距比; 换热

中图分类号: V 231. 1

文献标识码: A

Characteristic of Flow Resistance and Heat Transfer in a Turnover Variable Cross-Section Channel with Different Rib Pitches

LIU Xiang-yun, DING Shui-ting, TAO Zhi, XU Guo-qiang
(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: Experimental investigation of a turnover variable cross sectional area channel with transverse ribs of different pitch has been carried. Specimen used is the mid-span section of an actual aero-engine turbine blade. It is aimed at studying the flow resistance and heat transfer characteristics of the channel with different rib pitch to rib height ratios. The inlet Reynolds Number is ranged from 7 000 to 60 000. Experimental results show that with the increase of inlet Reynolds Number, the flow resistance coefficient decreases. The effect of rib pitch to rib height ratio on the averaged flow resistance coefficient and the averaged Nusselt numbers reveals a multiple peak distribution.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengine; variable cross-section;
rib pitch to height ratio; heat transfer

随着航空发动机的发展, 发动机涡轮叶片内部带肋通道的换热特性的研究得到广泛关注^[1~3]。其通道大都是采用的等截面矩形通道。近来也有人研究变截面带肋通道的换热情况^[4~6], 但其研究的只是在单一的肋间距和肋高下的情

况。本文以某型航空发动机实际涡轮叶片中段的内部冷却通道为模型, 并将其简化为带肋变截面回转通道, 研究了在两个肋高比情况下, 不同肋间距对通道换热和流阻的影响。

1 实验装置

本文采用的带肋变截面回转通道中, 上下表面肋的布置为沿流向等距离分布, 且肋与流向的夹角为 90° ; 肋的形状为矩形, 肋宽度相等, 都为 2 mm 。通道主要由气流进口通道 拐弯段和出口通道三部分组成。实验模型结构见图 1 所示。通道带肋上下表面面积在进口通道和出口通道沿流向保持均匀渐缩, 而侧壁(U 型外隔板)在进口通道沿流向为均匀渐扩, 出口通道为均匀渐缩。模型与实际叶片通道的实际尺寸比例为 $4:1$ 。

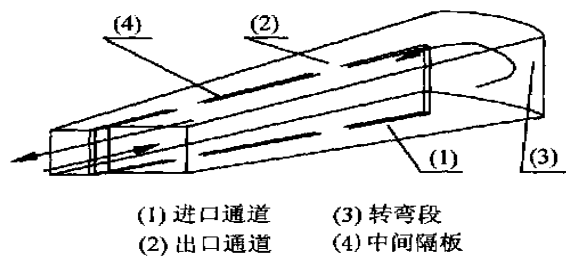


图 1 变截面通道简图
Fig.1 Sketch of the channel

实验台装置示意图如图 2 所示。图中叉表示温度测点, 竖线表示压力测点。通道内的空气来自经过稳压后的压缩空气。空气的流量由转子流量计(1)测量, (2)为温度计, (3)为压力计, 流体沿程压力由水排测压计(6)测得, 壁面温度采用 NiCr- NiSi 热电偶测量, 由并联的 ADAM-4018 通道数据采集模块组(7)采集, 传输给计算机(8)。

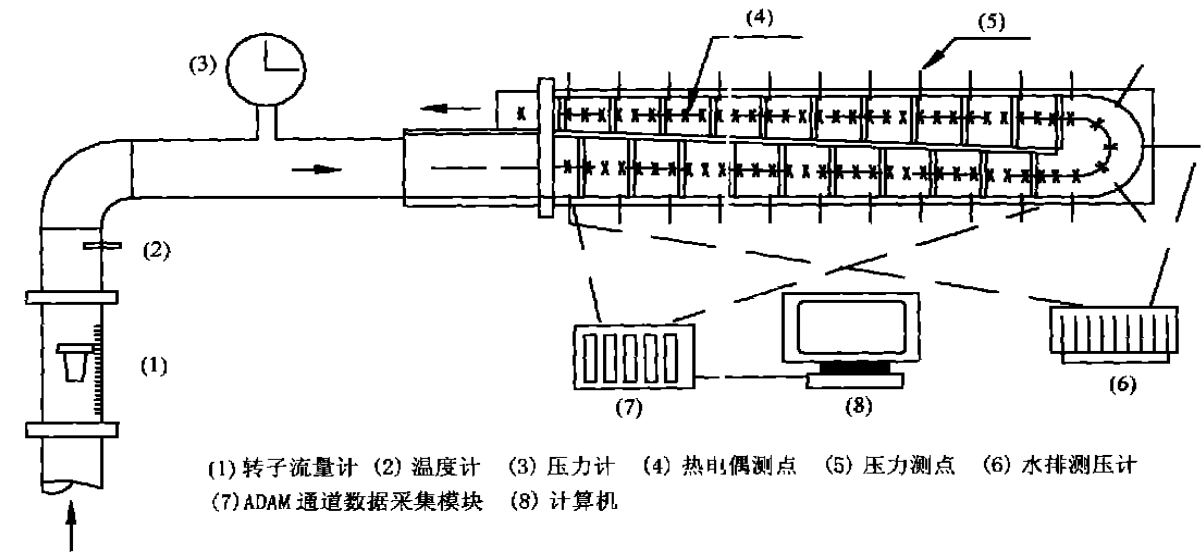


图 2 实验台装置示意图
Fig.2 Experimental setup

1.1 加 热

采用电加热的方式对带肋的上下表面进行加热。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, 保证等热流的边界条件。

1.2 热电偶布置

壁面温度采用 NiCr- NiSi 热电偶测量。在连续的两个肋之间均匀布置 3 个热电偶测点(图 2 中叉所示), 回转段布置 5 个测点, 测点焊接在流道的中心线位置。肋间距越小, 热电偶数量越多。

2 实验数据分析方法

为了计算通道内局部努塞数, 按照边界连续性原则, 以肋为特征, 将通道分成若干单元, 使得每一个单元的中心包含一个肋, 转弯段作为一个独立的单元。因此, 通道平均努塞数为单元局部努塞数按面积加权的值。

为了描述变截面通道, 定义无量纲参数如下: 节距比 $s \triangleq s/e$, 为肋间距 s 与肋高 e 的比值; 高径比 $e \triangleq e/D_{in}$, 为肋高于通道入口水力直径之比, 其中 D_{in} 为通道进口水力直径, 均为 16.4 mm ; 通道进口高宽比 $\alpha = h_{in}/w_{in}$, 通道出口高宽比 $\beta = h_{out}/w_{out}$, 阻塞比 $f = D_{out}/D_{in}$; D_{out} 为通道出口水力直径; 长径比 $l \triangleq x/D_{in}$, 为肋的位置与通道入口水力直径之比。描述通道内的单元时, 除了以上所述参数, 如节距比 s/e 、高径比 e/D_{in} 。这里 D_{in} 为单

元进口水力直径、阻塞比、长径比 $l''=x''/D_{in}$,还有单元进口高宽比 $\alpha''=h''_{in}/w''_{in}$,单元出口高宽比 $\beta''=h''_{out}/w''_{out}$ 。表1为所进行的实验列表。首先进行的第一序列为相同肋高比 e/D_{in} 为0.123时,4个不同肋间距时的实验;第二序列为同一肋高比 e/D_{in} 为0.153时,4个不同肋间距时的实验。

表 1 实验列表

Table 1 The runs of the experiment		
序号	s/e	e/D_{in}
1	7.5	0.123
2	10	0.123
3	12.5	0.123
4	15	0.123
5	6	0.153
6	8	0.153
7	10	0.153
8	12	0.153

2.1 通道阻力系数

通道阻力系数 ξ_e 定义为:

$$\xi_e = \frac{P_{cin} - P_{cout}}{(1/2)\rho_{in} \times U_{in}^2}$$

式中, P_{cin} , P_{cout} 和 ρ_{in} 分别为通道进口处、出口处空气有效压力和通道进口处空气密度。通道进口速度 U_{in} 由通道进口处空气的质量流量 m 得出:

$$U_{in} = \frac{m}{\rho_{in}A_{in}}$$

式中: A_{in} 为通道入口截面积。

2.2 通道平均努塞数

如前所述,通道分为若干单元,单元局部努塞数 N_{wl} 为:

$$N_{wl} = hD_l/R_a$$

式中: h 为单元换热系数, D_l 为单元进口处的水力直径, R_a 空气的导热系数。

通道平均换热努塞数 N_u 为单元局部努塞数按面积加权得出:

$$N_u = \sum N_{wl}A_l/A$$

式中: A_l 为单元带肋面的表面积, A 为整个通道带肋面的表面积。

3 实验结果及分析

由于通道截面面积的变化,通道内部流动状况不同于以往研究的等截面通道。图3是通道内

从进口段开始到出口段沿程各个单元的高宽比分布情况。图中可以看出,高宽比在进口段逐渐增大,出口段逐渐减小。

图4为 $e/D_{in}=0.123$ 时,不同肋间距对通道阻力系数的影响,横坐标为通道进口雷诺数。图中可以看出,通道阻力系数随雷诺数增加而减小。这是由于影响变截面通道流动阻力的因素除了节距比 s/e ,进、出口高宽比,阻塞比,还有高径比 e/D_{in} ,以及雷诺数等,因此,在不同雷诺数下,通道阻力系数呈现不规则的变化。当节距比为12.5时,通道阻力系数最大;节距比为15时,通道阻力系数最小。

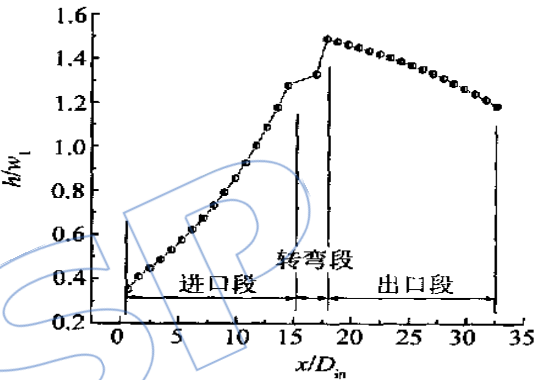


图 3 通道按单元的高宽比沿程分布
Fig. 3 Distribution of height to width ratios along the channel

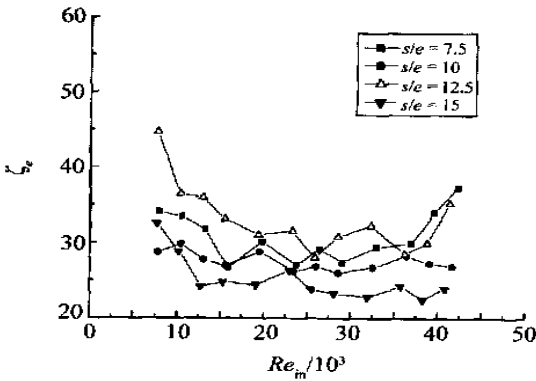


图 4 不同肋间距对通道阻力系数的影响
($e/D_{in}=0.123$)

Fig. 4 Effect of different rib pitches on flow resistance coefficient for channels with $e/D_{in}=0.123$

图5为 $e/D_{in}=0.123$ 时,不同肋间距对通道平均努塞数的影响。图中,随着雷诺数的增加,通道平均努塞数也增大。节距比为7.5时,通道的换

热效果最好;当节距比为 10 在大雷诺数时, 通道的换热效果最差, 在小雷诺数时, 换热效果与其余节距比时相当。造成这种现象的原因可能是由于通道的几何因素和肋的综合作用, 使得不同肋间距条件下, 某些通道换热增强。

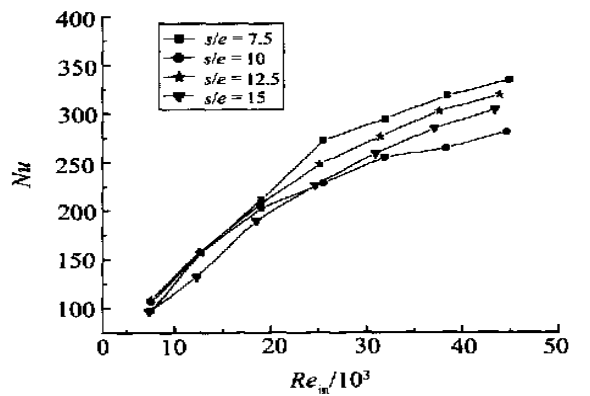


图 5 不同肋间距对通道平均努塞数的影响
($e/D_{in}=0.123$)
Fig. 5 Effect of different rib pitches on spanwise-averaged Nusselt Number for channels with $e/D_{in}=0.123$

图 6 为 $e/D_{in}=0.153$ 时, 不同肋间距对通道阻力系数影响的比较图。随着通道进口雷诺数的增加, 阻力系数逐渐减小, 但波动逐渐增大。可以看出, 节距比为 12 时, 通道的阻力系数最小; 当节距比为 10, 在小雷诺数时, 其通道阻力系数较节距比为 6 时的阻力系数小, 在大雷诺数时, 其通道阻力系数比其余节距比时都大。

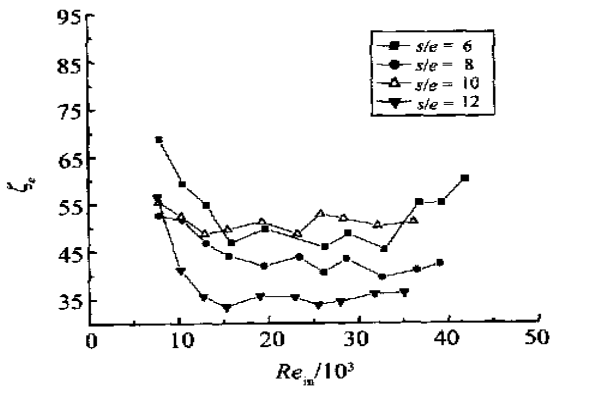


图 6 不同肋间距对通道阻力系数的影响
($e/D_{in}=0.153$)
Fig. 6 Effect of different rib pitches on flow resistance coefficient for channels with $e/D_{in}=0.153$

均努塞数的影响, 横坐标为通道进口雷诺数。图中, 节距比为 10 时通道的换热效果最好, 节距比为 12 时, 换热效果最差。节距比为 6 和 8 时, 通道换热效果相当。对照图 6 的阻力系数图可知, 在高径比 $e/D_{in}=0.153$ 时, 不同节距比中阻力系数最大的通道对应的换热效果最好; 阻力系数最小的通道对应的换热效果最差。

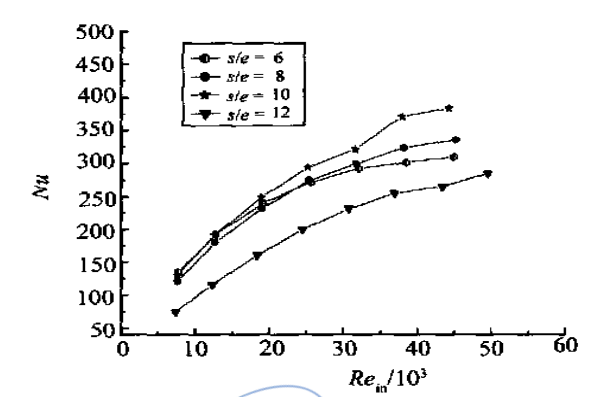


图 7 不同肋间距对通道平均努塞数的影响
($e/D_{in}=0.153$)
Fig. 7 Effect of different rib pitches on spanwise-averaged Nusselt Number for channels with $e/D_{in}=0.153$

总结通道的有效阻力系数和通道的几何结构、通道的进口雷诺数的关系。可以得到:

$$\xi_e = f(f, l', e', \alpha, \beta, Re_{in})$$

通道平均努塞数准则:

$$Nu = f(f, l', e', \alpha, \beta, Re_{in})$$

根据以上分析的准则关系式以及实验中得到的阻力系数分布、平均努塞数的数据, 可对实验数据进行回归拟合, 得到变截面通道阻力系数和平均努塞数的经验公式, 对涡轮叶片的设计提供依据。

4 结 论

各通道内沿程阻力系数随雷诺数变化波动较大; 且随着雷诺数的增加, 通道阻力系数逐渐减小; 当肋高与入口水力直径比为 0.123 时, 节距比为 7.5 时的通道换热效果最好, 节距比为 10 时的换热效果最差; 节距比为 12.5 时通道阻力最大, 节距比为 15 时通道阻力系数最小; 当肋高与入口水力直径比为 0.153 时, 节距比为 10 时的通道换热效果最好且其通道阻力也最大, 而节距比为 12 时的通道换热效果最差, 阻力系数也最小。综合分析认为, 节距比对通道阻力系数和通道平均努塞

数的影响呈多峰分布。

参考文献:

[1] Han J C. Heat Transfer and Friction in Channels with Two Opposite Rib Roughened Walls[J]. *A S M E Journal of Heat Transfer*, 1984, 106: 774– 781.

[2] Srinath V Ekkad, Je-Chin Han. Detailed Heat Transfer Distributions in Two-Pass Square Channels with Rib Turbulators [J]. *In. J. Heat Mass transfer*, 1997, 40: 2525– 2537.

[3] Karwa R, Solanki S C, Saini J S. Heat Transfer Coefficient and Friction Factor Correlations for the Transitional Flow Regime in Rib-Roughened Rectangular Ducts [J]. *A S M E Journal of Heat Transfer*, 1999, 42: 1597– 1615.

[4] Srinath V Ekkad, Gautam Pamula, et al. Detailed Heat Transfer Measurements inside Straight and Tapered Two-Pass Channels with Rib turbulators [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, 22: 155– 163.

[5] 刘浪, 丁水汀, 陶智, 等. 带肋变截面回转通道内沿程有效压力分布特性的实验研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 353– 357.

LIU Lang, DING Shui-ting, TAO Zhi, et al. An Experimental Study of Efficient Pressure Distribution in a Turn-over Channel with Ribs[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(3): 353– 357.

[6] 戚磊, 丁水汀, 陶智, 等. 带肋变截面回转通道内换热特性的实验研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5): 629– 633.

QI Lei, DING Shui-ting, TAO Zhi, et al. An Experimental Study of Flow Performance in a 180 °Turn-over Channel with Ribs[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(5): 629– 633.