

文章编号: 1000-8055(2007)07-1138-04

变截面 U 形通道内肋高对换热特性影响的实验

刘湘云, 冼汀, 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: 采用实验方法研究了在定常状态下,肋的高度对横肋变截面 U 形通道内的换热特性的影响。通道内肋间距为 15 mm,肋的宽度均为 2 mm,肋的高度分别为 1, 1.5, 2 mm 和 2.5 mm。雷诺数在 12 000 到 56 000 之间变化,采用单元分析法,以相同形状的无肋通道作为基准,研究了肋的高度对肋间距为 15 mm 通道的换热效果及阻力影响,得到了包括几何参数在内的经验关联式。结果表明,有肋的通道换热都得到了增强;肋高度的变化对变截面蛇形通道换热的影响不是单调的,而是呈多峰分布;肋的高度对阻力系数的影响却是随着肋高的增大而增大的。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 变截面; 肋高; U 形通道; 换热

中图分类号: V231.1 文献标识码: A

Experimental study of heat transfer in snake-shaped variable cross section channels with different ribs heights

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

Abstract: The influence of the rib heights on heat transfer characteristics in U-shaped variable cross section channels was experimentally studied in the steady state. The design parameters include: relative roughness pitch 15 mm, rib width 2 mm, and relative roughness heights 1 mm, 1.5 mm, 2 mm, and 2.5 mm, respectively, and Renault number from 12 000 to 56 000. Based on ribless channel of the same shape, the influence of rib heights on heat transfer effect and resistance of a channel with 15 mm pitch was studied, so an empirical relational expression comprising geometrical parameters was obtained. The experimental results show that, the heat transfer of ribbed channel will be improved; the influence of the rib heights on the heat transfer of U-shaped variable cross section channel is not monotone, but distributed with multi peak values. The influence of rib heights on the resistance coefficient increases with the rib heights.

Key words: aerospace propulsion system; variable cross-section; rib heights; U-shaped channel; heat transfer

符 号 表		h_1	单元进口高度
D_{in}	通道入口水力直径	U_{in}	通道进口速度
D_{lin}	单元入口水力直径	U_1	单元进口速度
D_{out}	单元出口水力直径	α_1	单元平均换热系数, $\alpha_1 = q/(t_1 - t_{in})$
s/e	节距比	Re_1	单元进口雷诺, $Re_1 = U_1 D_{lin} / \gamma_1$
w_1	单元进口宽度	Nu_0	$0.023 Re_1^{0.8} Pr^{0.4}$

N_{u1}/N_{u0} 单元强化比

军用航空发动机从本世纪 30 年代末诞生以来,发展迅速,已在航空推进系统中特别在战斗机的推进系统中占主导地位. 目前已经研制成功并获广泛应用的军用喷气发动机已有三代,正在研制第四代. 第四代发动机的涡轮前温度比第三代提高了 500 ℃,达到了 1 850~1 950 K,因此导致涡轮叶片所受的热负荷大大增加. 目前,涡轮叶片材料所能承受的温度为 1 250~1 300 K,降低涡轮叶片金属表面的温度,以增加涡轮叶片的寿命成为研究的核心技术之一. 在涡轮叶片通道内部布置强化肋,可以使金属表面的热量更快地传到内部的冷却空气中. 此时,肋的布置形式,肋间距与肋高的比值,以及肋与流体流向的夹角等几何因素,对于叶片通道局部和整体的换热有很大的关系. Shou shing Hsieh 和 Srinath V. Ekkad^[1-2] 等人研究了静态下,带肋等截面回转通道的换热分布,认为通道内有规则的肋的分布,使得流体在壁面重新分离和附着,破坏了附面层,从而起到了强化换热的作用. 实验结果表明,肋与流体流向的夹角为 60°时,换热效果较好. 近年来也有文献研究梯形变截面带肋通道的换热情况^[3-5],从不同侧面对变截面通道内换热特性进行了研究. 本文以国内某型航空发动机涡轮叶片内部冷却通道为模型,将其简化为带肋的变截面双通道,更加接近真实叶片的几何形状,并着重研究了通道内肋的高度变化对通道换热特性的影响.

1 实验装置以及实验方法

本文研究模型的最大特点是通道截面积是变化的,模型更加精确地反映了真实叶片的几何形状. 实验装置图见图 1 所示. 装置图分为空气系统,数据采集系统,和实验件部分. 其中,空气系统由一组压缩机,稳压箱组成,供给通道压缩空气作为冷却空气. 数据采集系统为一组 Adam4018 通道数据采集器并联而成,用来采集一定流量、压力下,实验件表面的温度. Adam4018 一端与焊接在实验件表面的热电偶连接,另一端与计算机相连,通过软件将采集的数据保存和转换为温度以供分析处理.

实验件主要由气流第一通道、转弯段和第二通道三部分组成. 为了加工方便,试验件设计成带肋的上、下盖板, U 形外隔板和中间隔板以及绝热整流管五部分,实验件模型内部剖面见图 2. 模型尺寸与实际涡轮叶片通道尺寸比例为 4: 1.

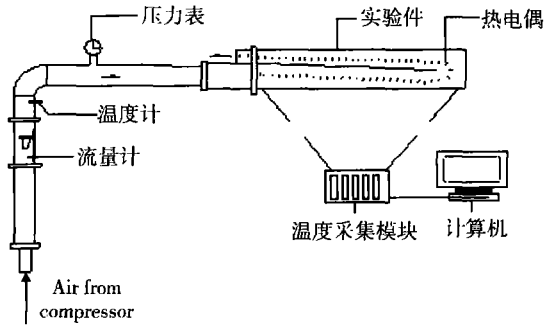


图 1 实验台装置
Fig. 1 Experimental setup

通道截面为变化的截面,其截面变化见图 3.

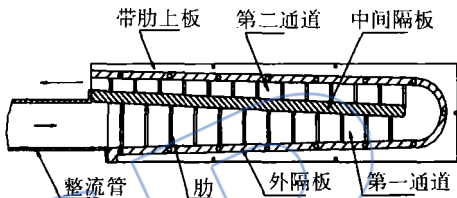


图 2 实验件模型内部剖面图
Fig. 2 Sketch map of the experimental channels with ribs

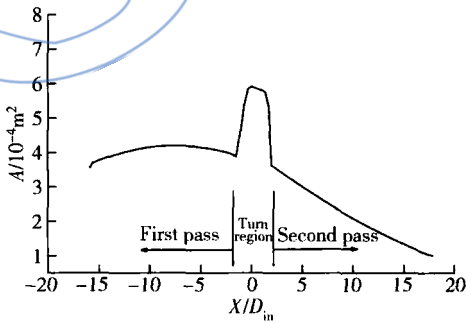


图 3 通道沿程截面积示意图
Fig. 3 Distributions of cross section area along the channel

实验采用电加热的方式对带肋的上、下表面进行加热,以模拟实际叶片所承受的高温状态,加热片采用厚度为 0.2 mm 的不锈钢片 (1Cr18Ni9Ti) 加工成的宽为 2 mm 的蛇形窄条. 加热片与带肋表面之间用涂有导热绝缘硅胶的铜板隔离,以保证等热流的要求,其背面用云母片、石棉板、及石棉布包裹,以保证绝热的要求.

焊接在盖板外表面上的 NiCr-NiSi 热电偶为在连续的两个肋之间布置 3 个热电偶,转弯段布置 5 个热电偶,测点焊接在流体通道的中心线位置. 考虑到如果热电偶焊接在盖板的带肋面上,则不可避免的会对流场有影响,而且布线也非常复

杂,因此本实验设计为将热电偶焊接在盖板的外表面. 由于盖板的厚度很薄,而且采用导热性能很好的硬铝制成,在本实验的热流密度条件下,盖板两面的温差小于 0.05℃,完全可以用盖板外表面的温度来代替内壁的壁温. 实验模型的入口水力直径为 16.3 mm.

2 实验结果及分析

由于通道截面面积变化,考虑实验结果的通用性,以肋为基本特征将通道划分成若干换热单元(图 4),即肋置于单元的中间. 实验结果中的单元雷诺数单元努赛数均指的是如图 4 所示单元进口雷诺数和单元平均努赛数.

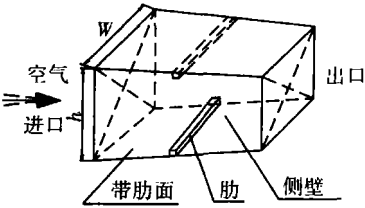


图 4 换热单元示意图

Fig.4 The sketch map of the region

图 5 是其中一个带肋面的通道划分示意图. 实验模型肋与流向的夹角为 90°, 简称横肋(HL). 实验模型中肋的宽度均为 2 mm. 本文进行了肋间距 s 为 15 mm, 肋高 $e=1$ mm, 1.5 mm, 2 mm 和 2.5 mm 的换热实验. 通道的换热单元均以肋为中心进行划分. 沿程换热单元总数为 35 个,其中进口段为 1~16 号,第 17 号为转弯段,出口段为 18~35 号,见图 5.

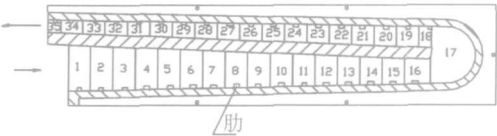


图 5 通道单元划分示意图(带肋面)

Fig.5 The principle of the region division

由于通道内的空气是常物性,普朗特数 Pr 为常数. 综合控制方程,边界条件和初始条件,通道内的温度场不仅取决于通道内气流速度、压力等,而且与换热单元的几何形状有关,单元努塞数有如下表达式

$$Nu_1 = f\left(Re, \frac{D_{lout}}{D_{lin}}, \frac{w_1}{h_1}, \frac{e}{D_{lin}}\right) \quad (1)$$

这里,定义阻塞比 $\bar{f} = D_{lout}/D_{lin}$,单元的宽高比 $\bar{w} = w_1/h_1$,肋高比 $\bar{e} = e/D_{lin}$. 努赛数关系式简化

为

$$Nu_1 = f(Re, \bar{f}, \bar{w}, \bar{e}) \quad (2)$$

本实验同时对于和图 5 所示通道形状完全相同,但通道内不带肋的情况进行了实验. 简称为光滑无肋通道(No rib). 在实验结果分析中,以光滑无肋通道为基准,带肋通道的单元努塞数 Nu_1 与光滑通道的单元努塞数 Nu_s 的比值作为纵坐标,横坐标为通道的相对位置与通道进口水力直径的比值 X/D_{lin} ,其中,负值为第一通道,0 为转弯段,正值为第二通道. 见图 6,图 7.

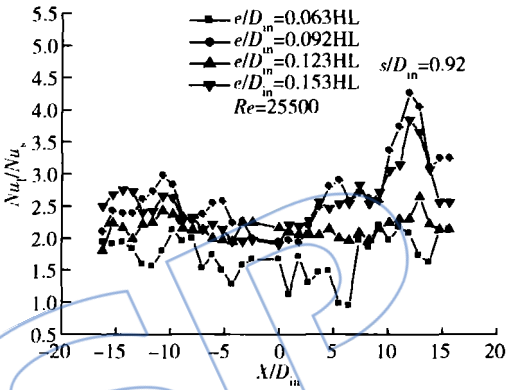


图 6 不同肋高比单元换热特性沿程分布(Re=25500)

Fig.6 The distribution of the Nusselt numbers along the channel(Re=25500) with different rib heights

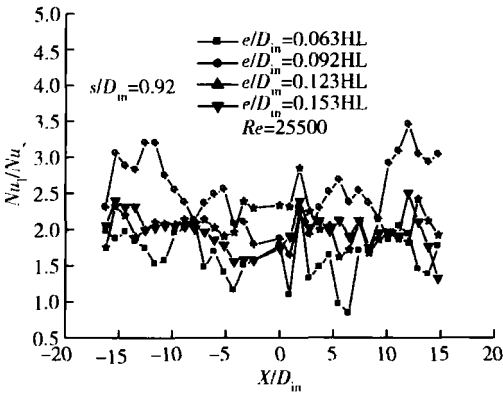


图 7 不同肋高比单元换热特性沿程分布(Re=51000)

Fig.7 The distribution of the Nusselt numbers along the channel(Re=51000) with different rib heights

图 6,图 7 分别为不同肋高比通道单元努塞数与光滑通道努塞数比值(强化比)分布比较,采用强化比 Nu_1/Nu_s , 去除了通道结构本身的影响,突出了不同肋高的影响. 在雷诺数较小时,第一通道的强化比分布较为平坦,在经过转弯段后,由于转弯段产生的二次流影响,使得通道内紊流

进一步得到发展,第二通道的强化比明显增加;雷诺数为 51 000 时,流动得到完全发展,第一和第二通道内的强化比的分布变化的总体水平相当.图 8 是不同肋高比通道(包含无肋(Without rib)光滑通道)阻力系数随雷诺数的分布比较,可以看出,肋高比越大,相同雷诺数条件下,阻力系数也越大.图 9 为不同肋高比通道换热性能比较图,纵坐标采用强化比与阻力系数比值 $(Nu_l/Nu_s)/(\xi/\xi_0)^{1/3}$,可以看出,纵坐标的值都大于 1.表明四种肋高形式都增强了换热效果,同时从曲线分布趋势,说明肋高比对通道换热效果的影响不是单调的,而是呈现出多峰分布的特征.

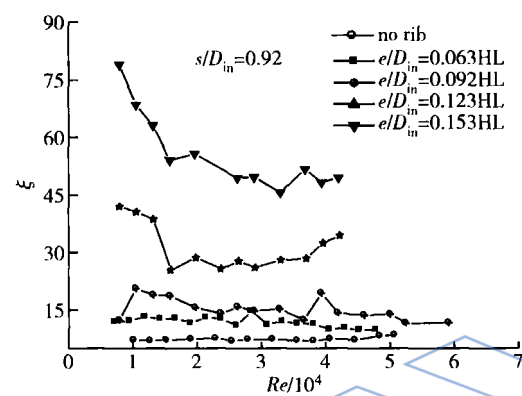


图 8 不同肋高比通道平均阻力系数的比较
Fig. 8 The comparison of the resistance coefficient with different rib heights

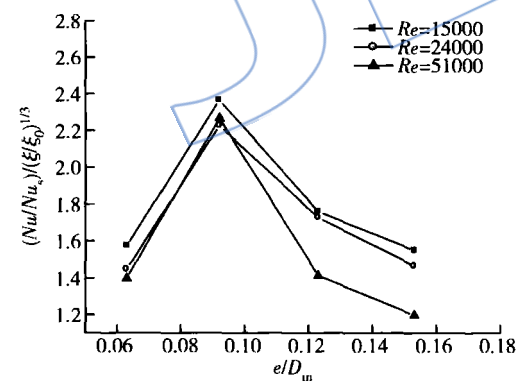


图 9 不同肋高比通道换热性能比较
Fig. 9 The comparison of the heat transfer characteristics of channels with different rib heights

分析实验结果,得以下单元经验关联式
$$Nu_l = 0.384Re_l^{0.59}\bar{f}^{-2.67}\bar{w}^{0.083}(1+\bar{e})^{3.11}$$
其中,定性尺度为单元进口水力直径,定性速度为单元进口速度,定性温度为单元进口温度.单元雷诺数适用范围:7 610~ 87 959,阻塞比 $\bar{f}$ 范围:0.958~ 1.025;宽高比 $\bar{w}$ 范围:0.629~ 2.133;肋高比 $\bar{e}$ 范围:0.048 7~ 0.179 7.从经验关联式的指数可以看出,肋高比的指数最大为 3.11,其次为阻塞比的指数,雷诺数的指数小于光滑圆管的 0.8 次方.可见,由于本文研究的通道结构较复杂,除了雷诺数对通道换热的影响外,几何因素对换热性能的影响也很大.

3 结 论

实验研究了肋的高度对通道内单元平均努赛数和通道平均分布的影响.通过实验分析,得到了包括几何参数在内的经验关联式.研究表明:所有带肋的通道换热都得到了增强;影响变截面通道单元换热特性的因素有雷诺数、阻塞比、肋高比和单元宽高比;其中,肋高比对通道内单元努赛数的影响不是单调的;肋高比对通道内阻力系数的影响却是随着肋高比的增大而增大的.

参考文献:

[1] Hsieh S S, Hong Y J. Heat transfer coefficients in an orthogonally rotating duct with turbulators[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1995, 71: 69-78.

[2] Ekkad S V, Han J C. Detailed heat transfer distributions in two pass square channels with rib turbulators[J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1997, 40: 2525-2537.

[3] Ekkad S V, Pamula G, Shantiniketanam M, et al. Detailed heat transfer measurements inside straight and tapered two pass channels with rib turbulators[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2000, 22: 155-163.

[4] 刘湘云,丁水汀,陶智,等.不同肋间距变截面回转通道内流阻与换热特性[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 640-644.

LIU Xiangyun, DING Shuiting, TAO Zhi, et al. The characteristic of the flow resistance and the heat transfer in turnover cross channel with different rib pitches[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 640-644.