

文章编号: 1000-8055 (2004) 02-0201-06

网格式肋化通道换热与总压 损失特性研究

张 勃¹, 吉洪湖¹, 张靖周¹, 高 潮¹, 王 鸣²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 沈阳发动机设计研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 通过两个实验模型, 对矩形网格式肋化通道的换热与总压损失特性进行了实验研究。模型通道的两个宽边是由铝板机械加工而成的肋化壁, 两个短边是由胶木板制成的绝热壁。肋化壁上肋与通道轴线所形成的锐角定义为肋向角 α 。第一个模型的两个宽边上的肋向角分别为 45° 和 -45° (简称 45/45 模型); 第二个模型两宽边的肋向角分别为 45° 和 -60° (简称 45/60 模型)。两个模型的肋宽与肋间距之比 $t/p = 0.25$, 肋间距与肋高之比 $t/e = 0.30$, 肋高与通道高度之比 $e/H = 0.50$, 即两个肋化壁的肋尖相互接触, 从而形成网格式通道。实验表明当雷诺数在 $0.5 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^5$ 范围内变化时, 网格式内冷通道换热效果比光滑通道提高了 5~9 倍, 但伴随的总压损失增加了 3 个数量级。

关键词: 航空、航天推进系统; 涡轮叶片; 肋化通道; 强化传热; 压力损失

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experimental Study of Heat Transfer and Total Pressure Drop of a Grid-Ribbed Rectangular Channel

ZHANG Bo¹, JI Hong-hu¹, ZHANG Jing-zhou¹,
Gao Chao¹, Wang Ming²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shenyang Aero-Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: The characteristics of heat transfer and total pressure drop of flow in an internally ribbed rectangular channel were studied experimentally by using two experimental models. The two larger sides of the models were made of ribbed aluminum plates; the two smaller sides were made of bakelite plates and treated as adiabatic surfaces. The acute angle between the ribs and the axis of the channel was defined as the rib angle. For the first experiment model, the rib angles for the two ribbed wall were 45° and -45° respectively, which was known as 45/45 model, and for the second experiment model, the rib angles were 45° and -60° respectively, named as 45/60 model. All ribbed plates had rib width to pitch ratios t/p of 0.25, rib width to height ratios t/e of 0.3, and rib height to channel height ratios e/H of 0.5. The ribs from each plate of the channel were in contact with each other in their tips, and oriented so as to form a grid pattern. The experimental Reynolds number was in the range of $0.5 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^5$. The experimental results showed that, in comparison to fully developed flow in a smooth pipe of equivalent hydraulic

收稿日期: 2003-05-27; 修订日期: 2004-01-01

基金项目: 航空科学基金资助项目 (No. 99C52023)

作者简介: 张勃 (1976-), 男, 江苏南京人, 南京航空航天大学能源与动力学院博士生, 主要从事传热传质及红外隐身研究。

diameter the Nusselt number inside the grid-ribbed rectangular channel was increased up to 5 to 9 times higher, and total pressure drop was enlarged by up to three orders of magnitude.

Key words: aerospace propulsion system; turbine blade; ribbed wall; total pressure loss; heat transfer enhancement

随着对航空发动机性能要求的提高, 涡轮叶片内部强化冷却技术得到了广泛重视与深入研究。在众多强化传热措施中, 肋化内冷通道是一种行之有效的办法。研究表明: 影响肋化通道换热效果的主要几何参数为: 肋向角 α , 肋高与通道当量直径之比 e/D_e , 肋间距与肋高之比 p/e 等。Liou T M 等人^[1,2]研究了垂直于通道轴线的肋的换热与流阻特性, 考查了 p/e , e/D_e 对通道换热与流阻的影响作用。得到了平均努塞尔数 $\overline{Nu}$ 及流动阻力系数 f 与各参数的关联式; Han J C 等人^[3,4]对包括肋向角 α 肋截面几何形状 (三角肋, 半圆柱肋, 矩形肋, 梯形肋等) 以及肋的排列方式 (交叉, 平行, V 型, $\wedge$ 型等) 在内的众多因素对通道换热与流阻的影响规律进行了系统的研究,

吉洪湖等^[5]研究了矩形通道中加扰流柱时的流场与换热特性。

本文研究的网格式内冷通道是一种非常规的肋化通道, 是在常规肋化通道 ($e/H < 0.5$) 基础上将肋高 e 增大至通道高度的一半 ($e/H = 0.5$) 而形成的, 如图 1 所示。这种冷却结构已在国外某型发动机涡轮叶片上得到了应用。但迄今为止, 尚未见关于这类通道的换热与压损特性的公开报道。本文针对这种通道的换热与压损特性进行了实验研究。

1 实验系统与数据处理

本实验装置如图 2 所示。由压气机提供的高压冷却气流, 首先通过孔板流量计对其流量 G 进行测量后, 然后进入稳压腔稳压, 该腔的横截面

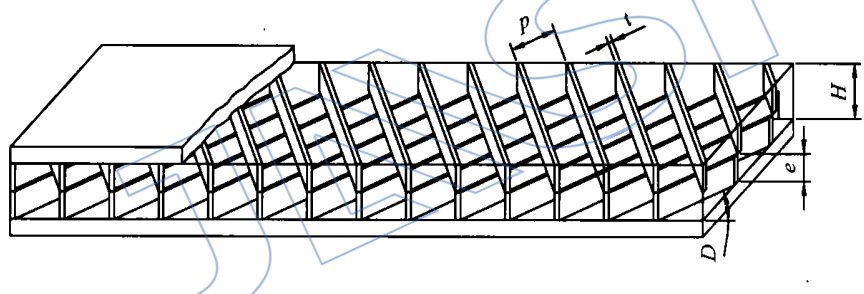
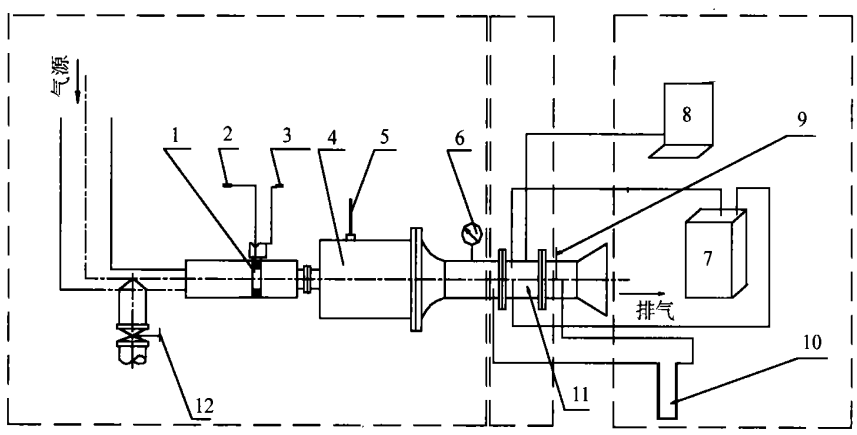


图 1 网格式肋化通道 ($e/H = 0.5$) 示意图
Fig. 1 Sketch of grid-ribbed channel



1 孔板流量计 2 压力传感器 3 压差传感器 4 稳压腔 5 温度计 6 静压表 7 硅整流器
8 模型热电偶信号采集计算机 9 出口温度热电偶 10 实验件压差水排 11 实验件 12 排气阀门

图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Sketch of flow system and experimental rig

积是实验模型进口面积的 8.9 倍, 从而使得气流以较均匀的速度进入实验模型。在模型通道的进出口两端中心轴线处分别设置了总压管用于测量气流的压力变化。

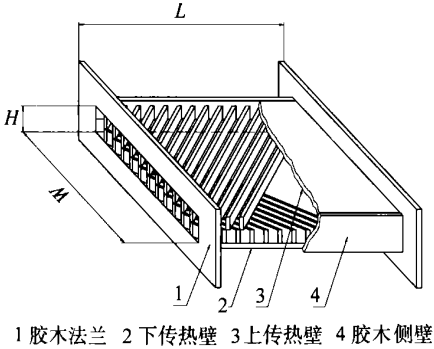


图 3 (a) 模型结构图

Fig. 3 (a) Sketch of grid-ribbed channel

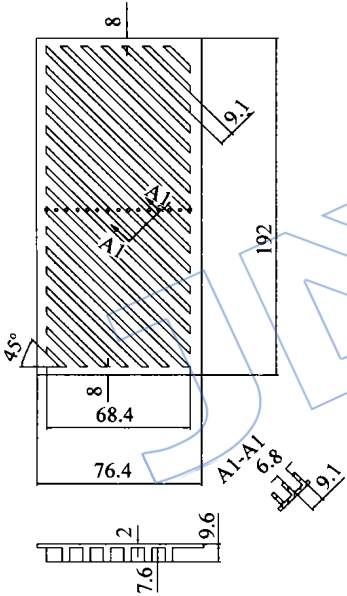


图 3 (b) 肋化铝板结构图

Fig. 3 (b) Top and front view of ribbed wall

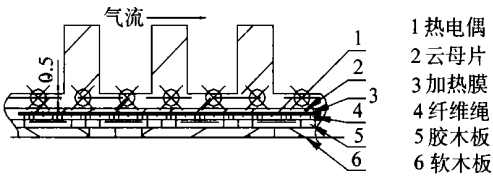


图 3 (c) 模型加热、保温及温度测量点布置

Fig. 3 (c) Arrangement of heating insaition and thermal couple locations

本文采用了两个实验模型, 如图 3-a 所示, 它们的主要几何参数均为: 长 (L) = 68.4 mm, 宽 (W) = 187 mm, 高 (H) = 15.2 mm, 通道的两

个长边是由铝板加工而成的肋化板 (如图 3 (b)), 两个短边是用胶木板制成的绝热壁, 为了减小肋化板向上下游管道的传热, 模型与上下游相接的法兰均由胶木板制成。肋与通道轴线形成的锐角为肋向角 α 。第一个实验模型的两块肋化板的肋向角分别为 45° 和 -45° , 简称为 45/45 模型; 另一个模型的两块肋化板的肋向角分别为 45° 和 -60° , 简称 45/60 模型。图 3 (c) 示意地表示出了模型板的加热、散热防护以及热电偶测温点的布置情况。热电偶布置在肋化板中心轴线上如图 3 (b) 中小圆圈所示。为肋间与肋下间隔布置。肋化铝板由铺设在其背面的加热膜通电加热, 在加热膜外又铺设多层保温材料, 经估算, 模型向周围的散热损失约为 2.1%, 可以忽略。

本文中各测量点的换热系数按 $h_x = Q / [S \cdot (T_{wx} - T_f)]$ 计算, (式中 Q 为肋化壁向冷却流体的总散热量, 在热损失很小时就等于硅整流器提供的加热量, S 为加热膜面积), 壁面局部温度 T_{wx} 由热电偶测得, 气流温度 T_f 则近似地假定在实验段内气流温度沿通道方向线性变化, 并通过实验段进、出口气流温度与加热量 Q 确定。

局部努塞尔数定义为:

$$Nu_x = h_x D_e / \lambda_x \quad (1)$$

上下肋化板的平均努塞尔数分别为:

$$\overline{Nu}_1 = \overline{h}_1 D_e / \overline{\lambda}, \quad \overline{Nu}_2 = \overline{h}_2 D_e / \overline{\lambda} \quad (2)$$

通道平均努塞尔数计算式为:

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{Nu}_1 \cdot (T_{w1} - T_f) + \overline{Nu}_2 \cdot (T_{w2} - T_f)}{T_{w1} + T_{w2} - 2T_f} \quad (3)$$

其中, D_e 为通道进口无肋处的当量直径, $\lambda_x, \overline{\lambda}$ 分别为测量点截面上和通道平均的气流导热系数, $T_{w1}, T_{w2}, \overline{h}_1, \overline{h}_2, \overline{Nu}_1, \overline{Nu}_2$ 分别为组成模型的两肋化壁的平均壁温, 平均换热系数和平均换热努塞尔数。雷诺数定义为 $Re = UD_e / \nu$, 其中, ν 的定性温度为通道气流进口与出口温度的平均值, 流速 $U = G / \rho A$, A 为模型矩形进口截面面积 (187 mm $\times$ 15.2 mm)。

为了和光滑管道充分发展紊流的努塞尔数 Nu_{FD} 进行比较, 实验引进了换热强化比^[4]:

$$\frac{\overline{Nu}}{Nu_{FD}} = \frac{\overline{h} D_e / \overline{\lambda}}{0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}} \quad (4)$$

网格式肋化通道中, 压力损失是一个重要参数, 模仿管流流动阻力系数的定义, 本文引入了总压损失系数^[6]:

$$f = [\Delta p^* / (1/2) \rho U^2] (D_e / L) \quad (5)$$

其中, Δp^* 为模型进出口两端中心轴线上的总压降。光滑管中充分发展紊流的摩擦阻力系数为 $f_{FD} = 0.046 Re^{-0.2}$, 为了便于比较, 本文引入了阻力增大比^[4]:

$$\frac{f}{f_{FD}} = \frac{f}{0.046 Re^{-0.2}} \quad (6)$$

为了综合评定网格式肋化通道强化换热与压损增大的特性, 实验引进了综合肋化效率 η ^[7]:

$$\eta = \frac{\overline{Nu}/Nu_{FD}}{f/f_{FD}} \quad (7)$$

2 实验结果分析

图 4 显示了 45/45 模型在不同雷诺数时, 局部努塞尔数之比 Nu_x/Nu_{FD} 随 x 的变化规律 ($x=0$ 为通道进口截面)。可以看出, 在 $x/D_e < 1.25$ 时, Nu_x/Nu_{FD} 随着 x/D_e 增大而减小, 而在 $x/D_e > 1.25$ 后, Nu_x/Nu_{FD} 随 x/D_e 增大而上升。与文献 [2] 中相同, 实验模型进口与出口处, 换热出现峰值。

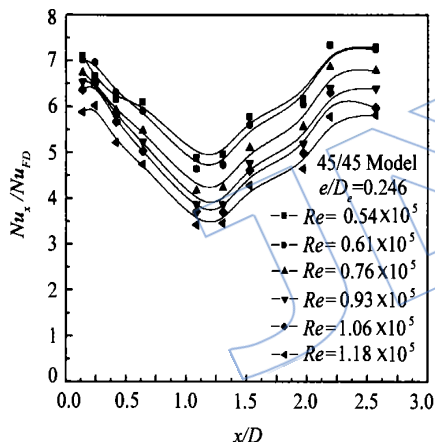


图 4 局部 Nu_x/Nu_{FD} 随通道轴向距离的变化

Fig. 4 Effect of axial distance on Nu_x/Nu_{FD} distributions along the centerline

图 5 反映了模型平均努塞尔数 $\overline{Nu}$ 随着雷诺数 Re 的变化规律。两个模型的 $\overline{Nu}$ 均随 Re 的增大而增大, 45/45 模型的努塞尔数与 45/60 模型的努塞尔数分别达到了 1200 和 1600 左右。

图 6 比较了本实验与 Han J C 等人^[4]的实验结果。(图中 // 表示形成通道的两板上的肋是相互平行的, $\times$ 表示两板上的肋不平行)。Han J C 等人的实验是针对常规肋化通道的, 其中, $e/D_e = 0.0625$, $e/H = 0.0625$ (本实验模型的 $e/D_e = 0.246$, $e/H = 0.5$)。网格式肋化通道的换热强化比是常规肋化通道的 2.5 倍至 3 倍, 是光滑管流的 5 倍至 8.5 倍 (相近雷诺数条件时)。

网格式肋化通道强化换热的同时加大了通道的总压损失。从图 7 看出, 45/45 模型的总压损失系数在 4~5 之间, 而 45/60 模型则在 7.5 以上。

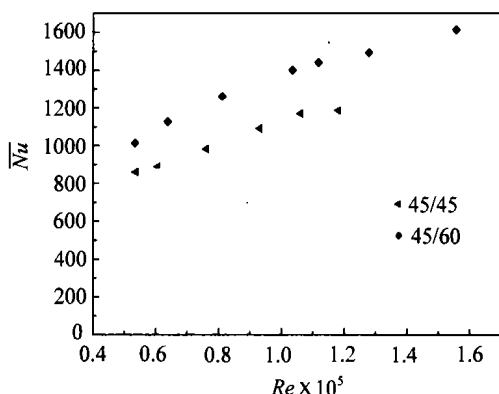


图 5 $\overline{Nu}$ 随 Re 数的变化

Fig. 5 Effect of Reynolds number on average Nusselt number distributions

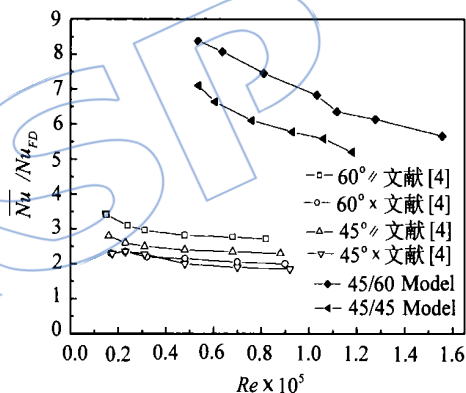


图 6 网格式与常规的肋化通道 $\overline{Nu}/Nu_{FD}$ 的比较

Fig. 6 Comparison of average Nusselt number of grid-ribbed channel with conventional ribbed channel

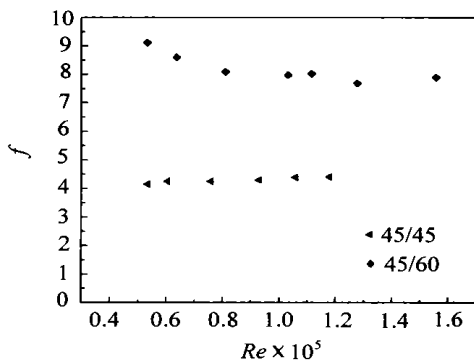


图 7 总压损失系数 f 随 Re 数的变化

Fig. 7 Effect of Reynolds number on total pressure loss distributions

同时也可以看出 45/45 模型的总压损失随着 Re

是略微上升的, 这是由于网格式通道的总压损失不仅仅是由于壁面摩擦引起的, 通道的阻塞以及大量的涡存在, 也是引起总压损失的重要原因。

图 8 中给出了两个网格式通道模型的阻力增大比与常规肋化通道的比较。45/60 模型总压损失大约是 45/45 模型的两倍。图 9 给出了网格式肋化通道综合肋化效率与常规肋化通道的比较结果, 网格式肋化通道的 η 值在 0.004~0.009 之间, 45/45 模型的肋化效率好于 45/60 模型。而常

规肋化通道的 η 介于 0.25 与 0.65 之间(由 Han J C^[4] 的 Nu/Nu_{FD} 与 f/f_{FD} 的对应数据计算而得)。网格式肋化通道的综合肋化效率小于常规肋化通道。

3 结 论

(1) 当 x/D_e 小于 1.25 时, 局部 Nu_x/Nu_{FD} 随着 x/D_e 增大而减小, 而在 x/D_e 大于 1.25 后, 则随 x/D_e 增大而上升。实验观察到在模型进口与出口处, 换热出现峰值。

(2) 45/60 模型的换热效果好于 45/45 模型, 网格式通道的换热效果是光滑通道的 5~8.5 倍, 达到常规肋化通道的 2.5~3 倍。

(3) 45/60 模型的总压损失系数大于 45/45 模型, 达到 7.5 以上, 约为 45/45 模型的两倍。模型阻力增大比达到 3 个数量级, 比常规肋化通道增加很大。

(4) 本文得到的网格式肋化通道的综合肋化效率 $[\overline{Nu}/Nu_{FD}]/[f/f_{FD}]$ 的值在 0.004~0.009 之间, 模型 45/45 的综合肋化效率好于模型 45/60。网格式肋化通道的综合肋化效率小于常规肋化通道。

参考文献:

[1] Liou Tong-Miin, Hwang Jenn-Jiang. Effect of Ridge Shapes on Turbulent Heat Transfer and Friction in Rectangular Channel [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1992, 36 (4): 931- 940.

[2] Liou T-M, Hwang J-J. Turbulent Heat Transfer Augmentation and Friction in Periodic Fully Developed Channel Flows [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1992, 114: 56- 64.

[3] Han J C, Glicksman L R, Rohsenow W M. An Investigation of Heat Transfer and Friction for Rib-Roughened Surfaces [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1978, 21: 1143- 1156.

[4] Han J C, Zhang Y M. Augmented Heat Transfer in Square Channels with Parallel, Crossed, and V-Shaped Angled Ribs [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1991, 113: 590- 596.

[5] 吉洪湖, 王宝宫, 王代军, 等. 叉排扰流柱排列参数对旋转矩形通道对流换热特性的影响. 航空动力学报, 1999, 14 (3): 231- 236.

[6] 邢宗文. 流体力学基础 [M]. 北京: 西北工业大学出版社 1992.

[7] 顾维藻, 神家锐, 马重芳, 等. 强化换热 [M]. 北京: 科学出版社 1990.

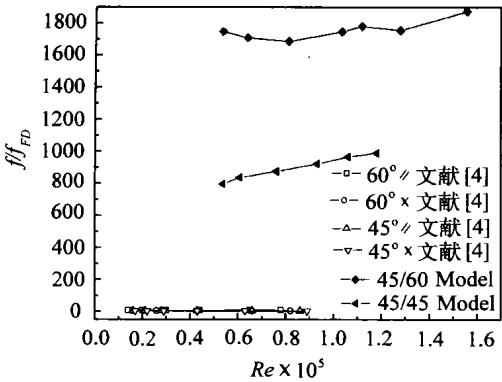


图 8 网格式肋化通道总压损失系数与常规肋化通道摩擦系数的 f/f_{FD} 的比较

Fig. 8 Comparison of total pressure loss factor of grid-ribbed channel with friction factor of conventional ribbed channel

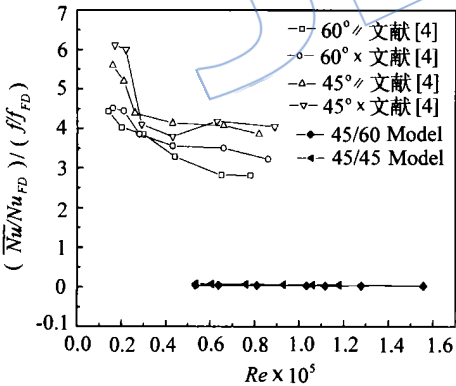


图 9 网格式肋化通道总压损失系数与常规肋化通道综合肋化效率的 η 的比较

Fig. 9 Comparison of comprehensive rib coefficient η of grid-ribbed channel with conventional ribbed channel