

文章编号: 1000-6893(2004)04-0343-05

带肋回转变截面通道内换热特性的实验研究

邓宏武, 魏 巍, 丁水汀, 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)

Experimental Investigation of Heat Transfer in a Turnover Variable Cross-section Channel with Ribs

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

(College of Energy and Power Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘要: 用实验方法研究了某航空发动机涡轮叶片内部带肋变截面 180° 回转通道壁面的换热特性, 分析了上下带 60° 平行斜肋和带 60° 交叉肋两种分布形式对换热的影响。实验结果表明: 通道的努赛尔数随着雷诺数的增加而增大。在低雷诺数下两者的通道平均换热效果是相近的; 在高雷诺数下交叉肋通道平均换热效果好于平行斜肋通道。变截面通道的壁面温度分布没有严格的以肋间距为周期的变化规律; 交叉肋通道壁面温度沿流体流向的梯度要比平行肋通道的小。

关键词: 燃气轮机; 冷却叶片; 热传导实验; 变截面; 回转通道

中图分类号: V235.113 **文献标识码:** A

Abstract: An experiment is performed on a facility with 180° turnover variable cross-section channel with ribs which is built based on the inner structure of the real turbine blade of an aero-engine. Heat transfer characteristics for the upper and lower surfaces with 60° parallel or crossed ribs are investigated. The results show that Nu number for the channel increases with Re number. The two rib configurations give similar heat transfer characteristics at low Re number and the interleaving rib configuration shows better characteristics than the parallel rib one at high Re number. The distribution of wall temperature is not consistent with the periodic arrangement of the ribs. The stream wise wall temperature gradient for the crossed rib one is lower than that for the parallel rib one.

Key words: gas turbine; cooling blade; heat transfer test; variable cross-section; turnover channel

航空发动机提高推重比的主要措施之一是提高涡轮前气流温度, 由此涡轮叶片的冷却技术就成为研究的热点。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。在国外 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是有较大差别的。对交叉肋回转通道的研究目前国内还很少, 而在国外交叉型肋的冷却通道在叶片设计中已应用。本文以某型航空发动机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, 实验研究带 60° 交叉肋(下面简称交叉肋)和带 60° 平行斜肋(下面简称平行肋)变截面 180° 回转通道的内表面换热特性。

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, 将其内部冷通道简化成两边带肋的变截面 180° 回转通道。通道由气流进口通道、90° 拐弯段和出口通道三段组成, 其中带肋表面在进口通道和出口通道保持沿流向均匀逐渐缩小, 而两侧表面在进口通道和出口通道沿流向分别为均匀逐渐扩大和均匀逐渐缩小。实验模型大体由五部分组成, 分别为上盖板、下盖板、U 型外隔板、内隔板以及用于进口气流整流段。交叉肋通道实验段简图如图 1 所示。

上下盖板由硬铝做成, 厚度均为 1mm, 盖板内侧表面为带肋表面。上下表面肋高均为 2mm, 肋间距均为 20mm, 肋展向同流体主流方向呈 60° 夹角; 上下板的肋方向相对, 从而在气流通道内形成

收稿日期: 2003-07-11; 修订日期: 2004-02-16

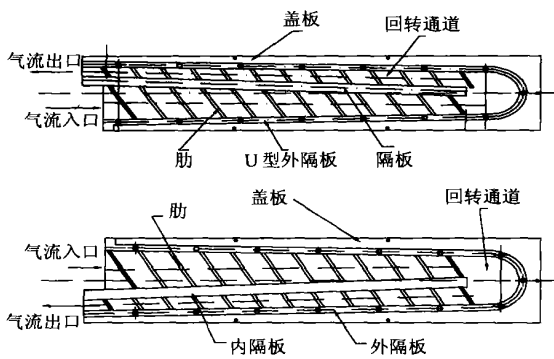


图1 实验模型结构(分别为上下盖板)

Fig. 1 Illustration of facility

上下交错的肋形式。内外隔板由不锈钢制成,进口段用电木做成,进口段进口处与供气管道相连,出口段与外界环境相通。实验通道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,实验证明在实验范围内可以保证良好的密封性。对于平行斜肋通道,上下盖板上的“肋”有相同的倾斜方向,从而在气流通道内形成平行斜肋的形式。

本实验是在静止状态下研究回转通道的换热特性。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,为避免热电偶对实验件通道内气流的影响,将热电偶焊接在壁面的外侧。为降低由此产生对温度测量的影响,盖板被设计的很薄(1mm),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表面的温度。温度测点的分布是按照在连续的 2 个肋之间布 3 个热电偶来分布的,拐弯段也按照相同的间距布置热电偶,测点被焊接在通道的中线。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。

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 0.2mm 的不锈钢片加工成的宽为 2mm 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。

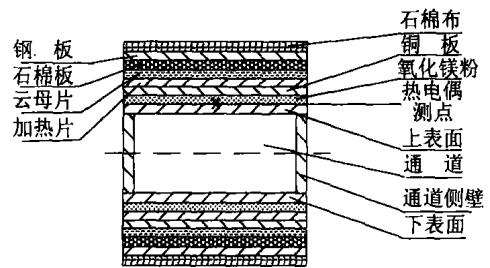


图2 实验模型装配示意图

Fig. 2 Details of test section elements

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(见图 3,图 4),分别研究各个换热单元的平均努赛尔数 Nu_{lav} 。

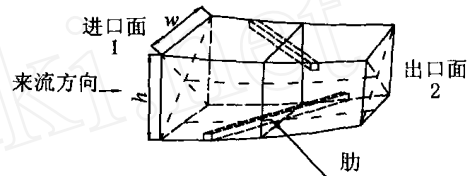


图3 交叉肋通道的换热单元

Fig. 3 Cell of the channel with crossed ribs

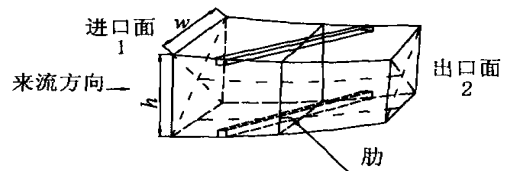


图4 平行斜肋通道的换热单元

Fig. 4 Cell of the channel with parallel ribs

(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

$$Re_{in} = \frac{\rho_0 D_{in} U_{in}}{\mu_0}$$

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} 为气流进口速度; D_{in} 为通道的入口水力直径; A_{in} 为通道并口面积。

气流进口速度可由质量流量 m 计算,可得

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

由此得雷诺数的计算公式

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

(2)通道进口雷诺数的计算 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

$$= \frac{q}{t_w - t_0}$$

其中: t_w 为通道内各处的壁面温度; t_0 为通道气流进口温度。

整个通道带肋面的平均换热系数的计算公式为

$$av = \frac{q}{\bar{t} - t_0}$$

式中: \bar{t} 是通道带肋面的壁面平均温度。由于是变截面通道, 每个测点所代表的区域面积各 A_i 不相同, 因而 \bar{t} 是全通道壁面相应温度的面积加权平均值,

$$\bar{t} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n t_{wi} A_i$$

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努赛尔系数 Nu_{lav} 。其定义如下:

$$Nu_{lav} = \frac{_{lav} D_{lin}}{lin} = \frac{q D_{lin}}{(t_{lav} - t_{lin}) lin}$$

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; $_{lav}$ 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; lin 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_{lin} 。

通道的平均努赛尔数 Nu_{av} 的计算公式为

$$Nu_{av} = \frac{_{av} D_{lin}}{lin}$$

定性温度为通道入口的气流温度 t_0 。

2 实验结果及分析

图5给出了实验件通道截面沿流程的变化。从图中可以看出, 进口段截面积逐渐增加, 接近转弯段时截面积略微有所降低; 转弯段截面积变化最大, 先很快增加, 后减小; 出口段整个截面积递减较快。

图6、图7是两种不同形式带肋通道在壁面热流密度相近的情况下的壁面温度分布图。图中明显地表现出了肋的扰流作用: 变截面通道壁温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。另外, 虽然不能从图6、图7的温度高低判断两种形式通道换热的差异, 但2张图清楚地表明了两种通道壁面温度分布的梯

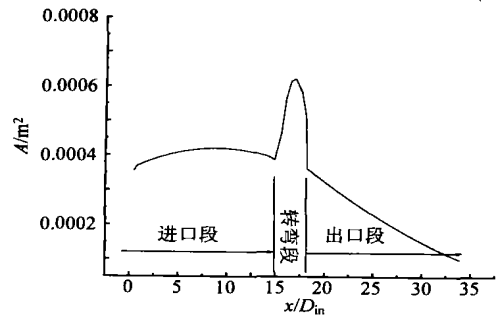


图5 通道截面面积沿流程的变化曲线

Fig.5 Variation of sectional area with x/D_{in}

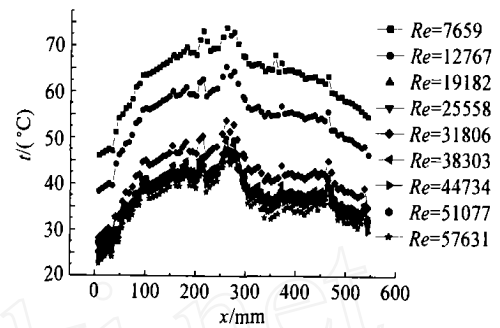


图6 交叉肋通道的壁面温度分布

Fig.6 Distribution of wall temperatures in channel with crossed ribs

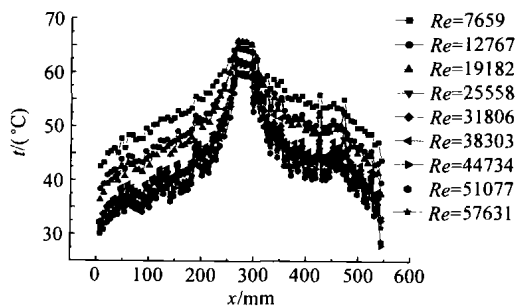


图7 平行斜肋通道的壁面温度分布

Fig.7 Distribution of wall temperatures in channel with parallel ribs

度情况不同。在交叉肋通道中壁面的温度梯度要比平行肋通道的小, 有利于减小由温度梯度而产生的热应力, 这在实际的叶片设计中是很有意义的。与等截面通道不同的是, 从变截面通道的壁面温度分布中难以找到严格的以肋间距为周期的变化规律。通道的每个单元之进口水力直径 D_{lin} 、阻塞比 F (单元出、进口水利直径之比)、高宽比 K (单元长度和进口水利直径之比) 因为通道截面的变化而各不相同, 造成了通道内各截面气流流速等换热决定因素的处处变化, 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]。

本文以“肋”为基本特征将整个通道分为若干换热单元,为了更好的考察每个换热单元的换热特性,在此引入一个概念:强化比,其表达式为: Nu_{lav}/Nu_0 ,其中: Nu_{lav} 为通道局部努赛尔数; Nu_0 为由 Dittus Boelter 紊流换热关联式得到的努赛尔数。图 8~图 10 分别给出了在高、中、低入口雷诺数下,两种肋型通道沿程的换热强化比的分布。从图中可以看出在中、低雷诺数下:在通道入口段,平行斜肋通道的换热强化比要高于

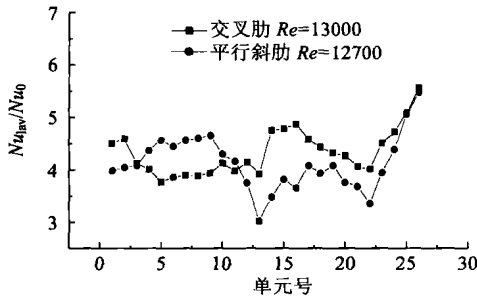


图 8 在低雷诺数下通道内单元换热强化比的沿程分布
Fig. 8 Comparison of Nu_{lav}/Nu_0 for channels with two kinds of ribs, low Re number

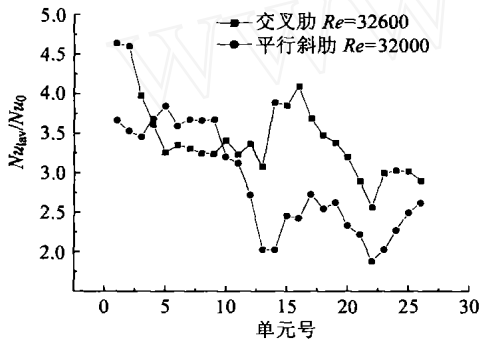


图 9 在中雷诺数下通道内单元换热强化比的沿程分布
Fig. 9 Comparison of Nu_{lav}/Nu_0 for channels with two kinds of ribs, middle Re number

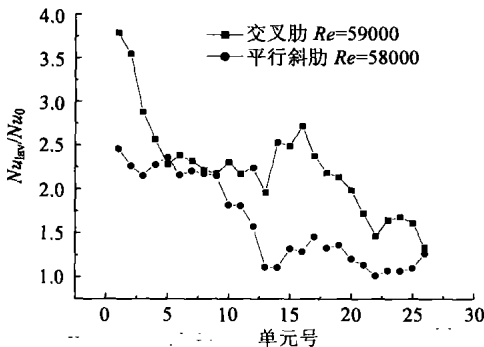


图 10 在高雷诺数下通道内单元换热强化比的沿程分布
Fig. 10 Comparison of Nu_{lav}/Nu_0 for channels with two kinds of ribs, high Re number

交叉肋通道;在通道转弯段,二者的强化比都出现下降的趋势;在出口段,通道经过转弯段的变化交叉肋通道的强化比要比平行斜肋通道的高出很多;这是由于低雷诺数下在进口段,通道的高宽度比较大,肋对换热的影响要小于流动对换热的影响,而平行斜肋通道的流动要好于交叉肋通道所以平行斜肋通道换热好于交叉肋;在转弯段截面变化很大,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,由于高宽比减小的很大,所以肋对换热的强化作用得到较大的增加,因而交叉肋通道的换热好于平行斜肋。而在较高雷诺数下,交叉肋整个通道的强化比都要高于平行斜肋通道,这表明在较高雷诺数下交叉肋通道的换热效果要明显好于平行斜肋。总之,在流动充分发展的情况下,不同型的肋对换热的影响体现的更多一些。

图 11 给出了两种肋型通道平均努赛尔数随通道入口雷诺数变化的趋势,从中可以看出随着雷诺数的增大二者通道平均努赛尔数都是增大的,在低雷诺数下二者的通道平均努赛尔数相差很小,几乎是重合的;而当雷诺数大于 25000 后交叉肋的换热明显加强,其通道平均努赛尔数明显大于平行肋的通道平均努赛尔数。由此可以看出交叉肋通道的平均换热要好于平行斜肋通道的换热。

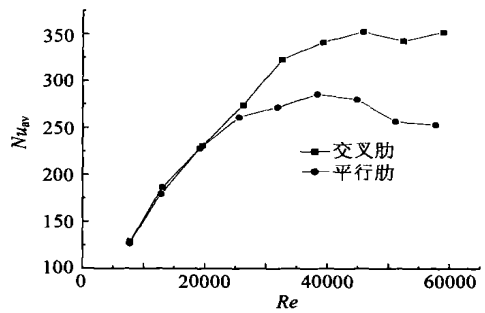


图 11 在两种肋型通道中 Nu_{av} 随 Re 的变化
Fig. 11 Comparison of Nu_{av} for tow kinds of channels with Re number

3 结论

对于 60° 交叉肋和平行肋回转通道:

(1) 交叉肋通道壁面温度沿流程分布的温度梯度要比平行斜肋通道的小。

(2) 雷诺数低时,平行斜肋通道进口段的换热效果好于交叉肋通道,交叉肋通道出口段的换热效果好于平行斜肋通道;在高雷诺数时,交叉肋通道进出口段的换热都要好于平行斜肋。

(3) 两种通道的平均努赛尔数都是随着进口雷诺数的壁面增大而增加的。在较低雷诺数下二者的通道平均努赛尔数基本相当,但是随着雷诺数的增加交叉肋的通道平均努赛尔数要明显比平行斜肋高。这表明在实验范围内,交叉肋通道的整体换热效果要好于平行斜肋通道。

参 考 文 献

- [1] 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(11): 2525 - 2537.
- [2] Ekkad S V, Huang Y Z, Han J C. Detailed heat transfer distributions in two-pass square channels with rib turbulators and bleed holes[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1998, 41(23): 3781 - 3791.

- [3] Han J C. Heat transfer and friction in channels with two opposite rib roughened walls[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1984, 106(): 774 - 781.
- [4] 戴有为. 对流传热分析[M]. 北京:兵器工业出版社, 1989. 132 - 133.
(Dai Y W. Analysis of convection heat transfer [M]. Beijing: The Public House of Ordnance in Technology, 1989. 132 - 133.)

作者简介:



邓宏武(1973 -) 男,陕西咸阳人,北京航空航天大学工程热物理系博士后,2002年获得航空宇航推进理论与工程专业博士学位,2001年赴香港科技大学化工系短期工作。主要从事旋转换热和冷冻干燥等方面研究, E-mail: Deng. yy @263.net, 电话: 010-82324545。

(责任编辑:刘振国)

学术活动

第六届全国实验流体力学学术会议在太原召开

第六届全国实验流体力学学术会议于2004年4月19日至22日在太原市召开。会议由中国力学学会和中国空气动力学学会主办,由北京航空航天大学承办,山西省科学技术厅和山西省科技基金发展总公司协办。有来自全国各地70余名代表出席了会议,山西省副省长梁滨、副秘书长郭慧民、省科学技术厅廉毅敏副厅长等出席了开幕式并致了欢迎词。

本届会议共录取论文87篇,内容包含基本流动和微尺度流动的实验研究、飞行器空气动力实验研究,生物、环境与工业流体等的实验研究、流体测试技术和仪器设备研究等许多重要方面,反映了我国实验流体力学研究和实验技术研究的丰富的成果和最新进展,其中15篇论文被推荐在“实验流体力学”上发表,9位论文被评为优秀论文。崔尔杰、乐嘉陵、Kwing - so Choi、李素循、魏庆鼎、林志兴、申功炘、夏克青、王立秋、康琦等10位学者做了大会特邀报告,给与会代表以很大启发。

闭幕式中,会议主席魏庆鼎教授代表与会全体成员向给予会议巨大支持的庄逢甘院士、崔尔杰院士、乐嘉陵院士、胡文瑞院士以及应邀做了精彩大会报告的国内外学者,特别是远道而来的英国诺丁汉大学 Choi Kwun-So 教授以及香港大学王立秋教授、香港中文大学夏克青教授表示衷心的感谢;向给予会议支持和提供了优良环境的协办单位以及为筹备会议做了大量复杂细致工作的承办单位表示了谢意。力学学会理事长崔尔杰院士指出,这次会议不仅有传统研究领域的研究成果,而且扩展到许多新的边缘的跨学科领域,如环境、生物、建筑、微流体等等。但仍需要更多的创新,特别是原始创新工作。要使我国的实验流体力学有更好的发展,关键是大力培养和造就一批年轻的优秀的实验流体人才。王晋军教授代表新的实验流体力学专业组充分肯定了上一届专业组的突出成绩,同时表示要继续搞好国内外学术交流、信息交流,为促进我国实验流体研究的发展、促进年轻的实验流体人才的成长,踏实工作。最后,大会宣布:2005年8月将在成都召开第八届国际流体控制、测量和显示学术会议;2007年召开第七届全国实验流体力学学术会议。

第六届全国实验流体力学学术会议组委会