

文章编号: 1000-8055(2010)03-0521-05

涡轮叶片弦中区扰流柱强化换热实验

张镜洋, 常海萍

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对涡轮叶片弦中区扰流柱支撑冲击导管的冷却结构建立实验模型, 研究了随冲击雷诺数, 横流射流密流比, 冲击孔靶间距与冲击孔径比等参数的改变, 叶片内壁面的换热特性变化规律. 并与传统的弦向肋支撑冲击导管冷却结构的光滑壁面换热特性进行对比, 重点研究了弦中区扰流柱的强化换热特性. 结果表明: 弦中区扰流柱明显降低了叶片前缘和前排冲击产生的初始横流削弱换热的负面作用, 前缘或前排冲击产生的初始横流可以有效地增强其后部的换热努塞尔数, 扰流柱支撑结构所表现出的换热效率优于传统的大间距弦向肋支撑结构.

关 键 词: 涡轮叶片; 扰流柱; 冲击冷却; 冷却技术; 换热特性

中图分类号: V231. 1

文献标识码: A

Experiment about heat transfer characteristic of midchord region of turbine blade with pin-fin arrays

ZHANG Jing-yang, CHANG Hai-ping

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on midchord region model of turbine blade whose impinging tube is supported by pin-fin arrays, the heat transfer rules of the wall with pin-fin was acquired, and then the heat transfer characteristic was compared with that of the model whose tube is supported by rib along the flow direction. Various impinging Reynolds numbers, density flow ratios of initial cross flow to impinging jet flow and impinging distance to impinging jet hole diameter were analyzed. The results show that: pin-fin arrays could decrease the negative influence of the initial cross flow on the heat transfer and the initial cross flow could strengthen the efficiency of heat transfer of the region after the cross flow. The heat transfer efficiency of the model with pin-fin arrays is higher than the model with rib along the flow direction.

Key words: turbine blade; pin-fin array; impinging cooling; cooling technology; heat transfer characteristic

伴随着航空工业的迅猛发展, 航空发动机推质比的不断增加, 势必使得涡轮前温度大幅提高, 高温环境下高负荷工作的涡轮叶片的冷却技术也就成为了航空工业的关键技术之一. 目前国内外众多学者致力涡轮叶片高效冷却技术的研究, 各种复合冷却结构设计也层出不穷, 冷却空气流动非常复杂(如图 1 所示), 尤其是在叶片弦中区内

部, 前缘冲击产生的初始横流和弦中区的冲击射流同时作用叶片内表面. Florschuetz, Metzger^[1]和常海萍、张净玉^[2]等的研究已经明确表明有初始横流和冲击同时作用时光滑靶面冷却效率低于只有冲击时的冷却效率, 初始横流削弱冲击换热. 为了有效解决前缘初始横流和前排冲击产生的横流带来削弱换热的负面作用, 工程上对冲击导管

收稿日期: 2009-03-13; 修订日期: 2009-07-20

作者简介: 张镜洋(1981-), 男, 山东威海人, 博士生, 研究领域为传热传质. E-mail: zhangjingyang2001@tom.com

(如图 1 所示隔流板)的内部支撑进行了新的设计,采用离散扰流柱支撑代替传统大间距弦向肋支撑(2 种支撑方式如图 2 所示),增大对流换热面积,增强湍流度,从而强化横流换热. 目前对于涡轮叶片扰流柱强化换热的研究大多数还是针对于尾缘通道^[3-6]冲击柱面和层板扰流柱^[7-12]通道内流动换热特性研究,而弦中区冲击带初始横流流动状况下的扰流柱研究鲜见文献发表. 本文针对导向叶片扰流柱支撑冲击导管冷却结构建立实验模型,研究了在冲击雷诺数,横流射流密流比和冲击孔靶间距与冲击孔径比等参数改变的情况下,叶片内壁面的换热规律,并与大间距弦向肋支撑的光滑靶面换热努塞尔数变化规律进行了对比,

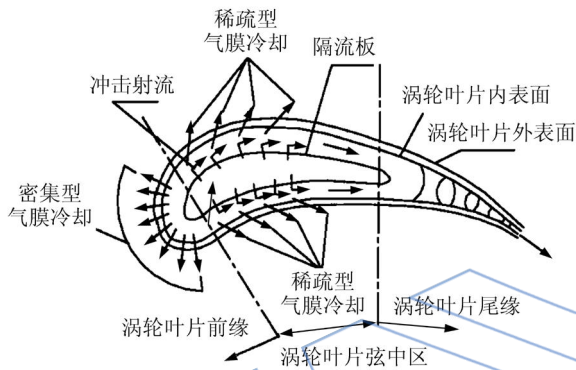


图 1 叶片冷却机构示意图
Fig. 1 Cooling structure of turbine blade

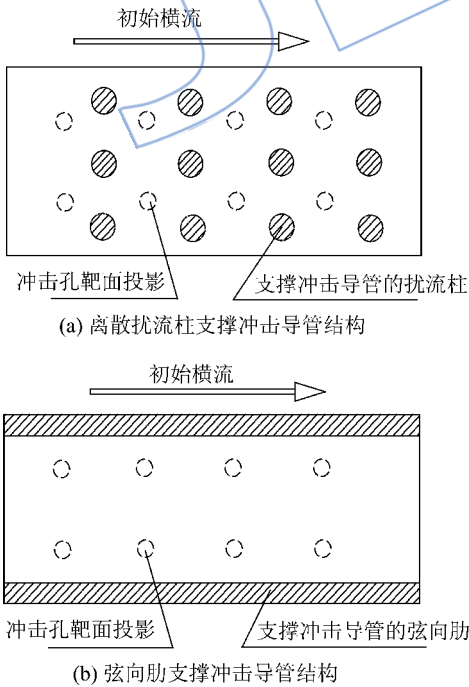


图 2 叶片内壁冲击冷却结构示意图
Fig. 2 Projection of cooling structure in inner wall of blade

从而得到扰流柱支撑冲击导管结构的换热强化特性,为涡轮导向叶片弦中区冷却结构的精确设计提供重要的参考.

1 实验模型

建立实验模型如图 2~图 5(图 3、图 4 为实验件照片)所示,冲击孔板为 4 排 2 列冲击孔,冲击靶板带 4 行 3 列扰流柱,扰流柱可拆卸形成弦向肋支撑的光滑靶面. 冷却空气通过冲击导管上的阵列射流孔冲击到带有扰流柱的靶面(叶片冷气侧壁面)上,通过调节冲击进口空气流量来调节冲击雷诺数 Re_i . 模拟前缘冲击对弦中区形成的初始横流通过横流入口沿流向到达靶面区域(如图 3),通过调节横流进口流量来调节横流射流密流比 G/G_i ,最后所有流量通过横流出口流出. 通过改变扰流柱的高度和冲击孔板和靶板之间绝热石棉垫片高度来实现对参数 z_n 的改变.

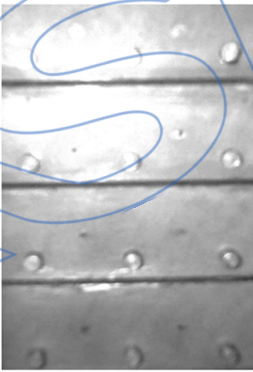


图 3 冲击靶板
Fig. 3 Cooling target

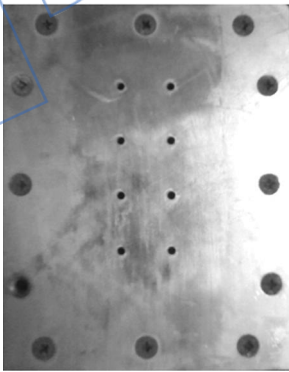


图 4 冲击孔板
Fig. 4 Impinging tube

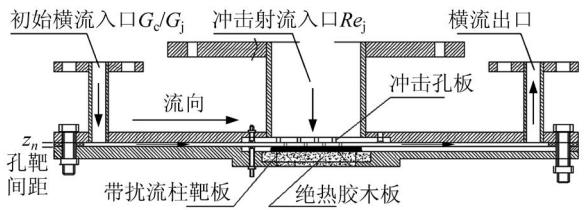


图 5 实验模型
Fig. 5 Experimental model

冲击靶板如图 6 所示,为了讨论冲击靶面沿流向局部平均换热特性,将靶板平均分为 4 个部分,每部分使用导热系数较大紫铜加工,与扰流柱排一起形成局部的换热单元,沿靶面展向布 3 支热电偶,如图 7 所示,每个换热单元之间使用石棉垫进行隔热,换热单元中心沿流向的坐标为 x_n ($n = 1, 2, 3, 4$),其无因次坐标定义为 X_n ($X_n = x_n/d_n$,

d_n 为冲击孔直径). 实验中使用厚度均匀、电阻率随温度变化很小康铜膜作发热元件, 绝缘后安装在靶板底部, 形成等热流边界.

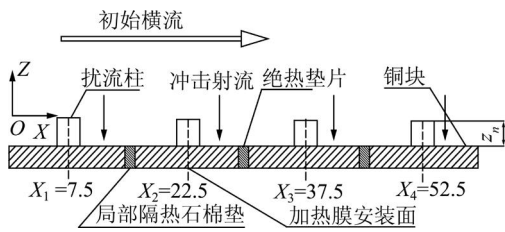


图 6 带扰流柱冲击靶板示意图
Fig. 6 Impinging target with pin-fin arrays

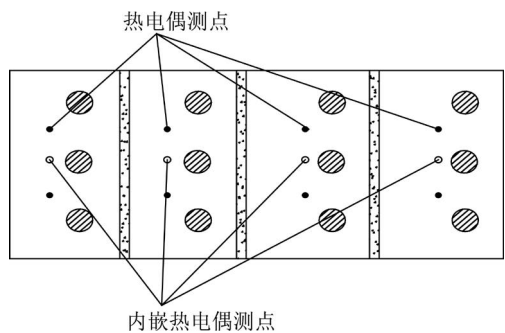


图 7 热电偶测点分布图
Fig. 7 Distribution of thermocouples

本实验所研究的换热准则关系式如下:

$$Nu = f(Re_j, G_c/G_j, Z_n)$$

冲击雷诺数 $Re_j = u_j d_n / \nu$;

横流射流密流比 $G_c/G_j = (\rho u)_c / (\rho u)_j$;

冲击孔靶间距与冲击孔径比 $Z_n = z_n / d_n$

表 1 实验工况

Table 1 Conditions of research

参数		数值				
Re_j	0	7 000	10 000	150 000	20 000	
G_c/G_j	0	0.1	0.3	0.5		
Z_n	1	3	4			

2 数据处理

2.1 流向局部努塞尔数定义

$$Nu_i = \frac{(Q/4 - Q_{loss}/4) d_n}{A_i (T_{wi} - T_f) \lambda} \quad (1)$$

$$Q_{loss} = -\lambda A (T_o - T_w) \quad (2)$$

式中 Q 为总加热量 (W); Q_{loss} 为总散热量 (W); A_i 为单块紫铜换热单元面积 (m^2), A 为整个靶面

积 (m^2); λ 为空气导热系数 ($W/(m \cdot K)$); λ 为胶木板导热系数 ($W/(m \cdot K)$); T_{wi} 为单块换热单元 3 支热电偶测点平均温度 (K); T_f 为流体的进口平均温度 (K); T_w 为靶面所有热电偶测点平均温度, T_o 为胶木板外漏热监测热电偶平均温度.

2.2 靶面整体平均努塞尔数定义

$$Nu = \frac{\sum_{i=1}^4 Nu_i}{4} \quad (3)$$

其中 Nu_i 为单块铜块流向局部平均努塞尔数.

3 试验结果分析

3.1 冲击雷诺数 Re_j 的影响

如图 8 所示, 随冲击雷诺数 Re_j (7 000 ~ 20 000) 的增大不论光滑靶面还是扰流柱靶面的平均努塞尔数 Nu 都逐渐增大, 但是扰流柱靶面平均换热努塞尔数高于光滑靶面 (忽略大间距弦向肋微小的换热贡献), 且平均努塞尔数 Nu 增大的更快. 这主要因为在初始横流不变的条件下, 随冲击雷诺数的增大, 弦中区前排冲击增强了后部的横流流量, 对于大间距弦向肋支撑结构的光滑靶面而言这种初始横流的增大削弱了后排冲击换热, 而对于带扰流柱的靶面而言虽然削弱了后排的冲击, 但是强化了后排扰流柱换热, 并且冲击雷诺数越大, 前排冲击对后部的横流贡献越大, 强化作用越强, 所以随雷诺数的增大, 扰流柱靶面的平均努塞尔数 Nu 增大的比光滑靶面快.

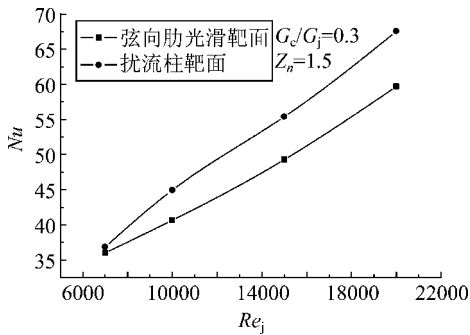


图 8 努塞尔数 Nu 随冲击雷诺数 Re_j 变化曲线
Fig. 8 Rules of Nu for various Re_j

3.2 横流射流密流比 G_c/G_j 的影响

如图 9 所示, 随横流射流密流比的增加 (G_c/G_j 从 0 到 0.5 变化), 带扰流柱靶面平均努塞尔数 Nu 逐渐提高, 而弦向肋光滑靶面 (忽略大间距弦向肋微小的换热贡献) 平均努塞尔数 Nu 逐渐

下降,并且带扰流柱靶面平均努塞尔数普遍高于光滑靶面,随横流射流密流比的增大,这种差距从5%到30%逐渐拉大.从图中可以看出无扰流柱时,初始横流削弱弦中区换热,而有扰流柱时强化换热.产生这种现象主要是由于有了扰流柱的参与使得横流流动湍流度增大,换热面积增加,横流横掠柱面增强换热.虽然初始横流削弱了当地冲击换热效率,但是由于扰流柱增强了横流的对流换热比重,从而使得带扰流柱靶面整体的平均努塞尔数随初始横流的增大而逐渐增大,表现出了与光滑靶面换热效率降低的趋势相反的换热规律,并且初始横流越大,光滑靶面与扰流柱靶面换热努塞尔数差距越大的强化作用越突出.

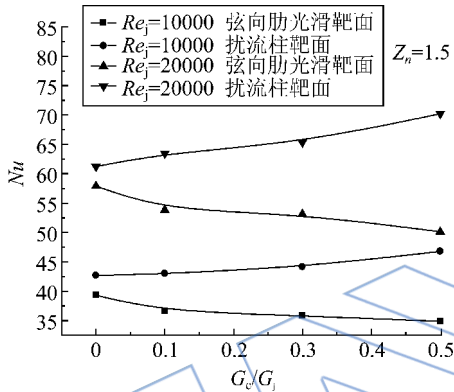


图9 努塞尔数 Nu 随横流射流密流比 G_c/G_j 变化
Fig.9 Rules of Nu for various G_c/G_j

图10中为带扰流柱靶面流向局部努塞尔数 Nu_{li} 随横流射流密流比的变化规律,除了 $X_n = 7.5$ 时先略下降后上升外, $X_n = 22.5, 37.5$ 和 52.5 时局部努塞尔数 Nu_{li} 都是逐渐升高的,沿流向随 X_n 的增大,流向局部努塞尔数 Nu_{li} 逐步提高.由于有初始横流携带 $X_n = 7.5$ 处上方射流向下游偏转,而其上游又无冲击,从而导致换热能力先略微下降然后随横流对流换热的增强又逐步上升,而沿流向由于有射流流量不断的强化横流流量以及扰流柱的扰动使得湍流度逐渐增加的综合原因,使得沿流向 X_n 增大,流向局部努塞尔数 Nu_{li} 逐步提高.这也进一步说明,扰流柱使得即使前排冲击流量形成了对后排冲击的初始横流也能强化后排的换热.

综合图5、图6和图7得到的结论可以看到,随着冲击的增强和随着初始横流的增强,离散扰流柱结构都有效的解决了前缘产生的初始横流和弦中区前排产生的初始横流对换热的负面作用,离散扰流柱支撑结构强化换热优于大间距弦向肋

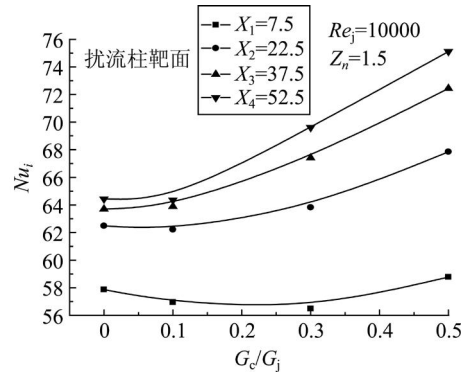


图10 局部努塞尔数 Nu_{li} 随横流射流密流比 G_c/G_j 变化曲线
Fig.10 Rules of Nu_{li} for various G_c/G_j

支撑结构,并且前缘和前排冲击产生的横流越大这种优势越明显.

3.3 冲击孔靶间距与冲击孔径比 Z_n 的影响

如图11中所示,随冲击孔靶间距与冲击孔径比 Z_n ($Z_n = 1, 3, 4$) 的增大,代表弦向肋支撑结构的光滑靶面平均努塞尔数 Nu 先增大后减小,最佳间距比约为3~4,这个规律已经广泛被广大学者所认同^[1-2],而扰流柱靶面的平均努塞尔数逐渐增大,在工程实际应用的参数范围内 ($Z_n = 1 \sim 4$) 表现出与传统弦向肋支撑靶面不同的换热规律,这主要是因为,随冲击孔靶间距与冲击孔径比 Z_n 的逐渐增大,横流射流密流比又不变化的情况下,虽然冲击冷却效率先增大后逐渐减弱,但是支撑扰流柱的高度增加,使得换热面积增大,通道内扰流柱柱面换热的比重增强,因而对流换热增强,使得整体的换热努塞尔数 Nu 呈现出逐渐增大的态势.

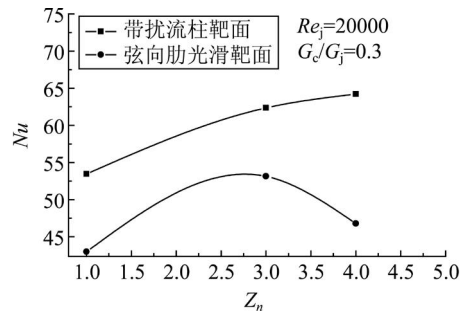


图11 局部努塞尔数 Nu_{li} 随 Z_n 变化曲线
Fig.11 Rules of Nu_{li} for various Z_n

4 结 论

实验过程中实验误差在7%的范围内.本文研究主要得到以下主要结论:

1) 本研究证明了扰流柱支撑冲击导管结构可以有效的解决前缘冲击和前排冲击产生的初始横流对弦中区换热的负面作用;

2) 扰流柱支撑冲击导管冷却结构平均努塞尔数比光滑靶面(大间距弦向肋支撑冲击导管结构)高出约5%到30%,前缘和前排产生的横流越大,扰流柱的强化作用越突出;

3) 在实验研究的参数范围内($Z_n = 1 \sim 4$),随冲击孔靶间距与冲击孔径比的增大扰流柱靶面平均努塞尔数逐渐增大,异于传统的弦向肋支撑结构。

参考文献:

- [1] Florschuetz L W, Metzger D E. Heat transfer characteristics for jet array impingement with initial crossflow[R]. ASME 83-GT-28.
- [2] 张净玉. 冲击粗糙表面复合冷却参数优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1998.
ZHANG Jingyu. The research of various optimizational cooling parameters from rib roughened surface within arrays of circular jet [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1998. (in Chinese)
- [3] Matsumoto R, Kikkawa S, Senda M. Effect of pin fin arrangement on endwall heat transfer[J]. JSME International Journal, Series B, 1997, 40(1): 142-151.
- [4] 向安定, 张丽, 刘松龄. 有射流冲击的短扰流柱排内柱面的传热实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2002, 11(4): 586-589.
XIANG Anding, ZHANG Li, LIU Songling. Heat transfer experiment of around a row of short cylinders with jet impingement [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2002, 11(4): 586-589. (in Chinese)
- [5] Chyu M K. Heat transfer and pressure drop for shot pin fin arrays with pin-endwall fillet [J]. Trans. ASME J. Heat Transfer, 1990, 112: 362-367.
- [6] Lau S C, Han J C. Turbulent heat transfer and friction in pin fin channels with lateral flow ejection[J]. Journal of Heat Transfer, 1989, 111: 51-58.
- [7] 吉洪湖, 王宝官. 叉排扰流柱阵列排列参数对旋转矩形通道对流动换热特性的影响[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 231-236.
JI Honghu, WANG Baoguan. The rules of heat transfer and fluid of rectangular tube for various parameters of pin fin arrays with staggered arrangement [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(3): 231-236. (in Chinese)
- [8] 朱惠人, 许都纯. 不同直径及形状的短扰流柱群的流阻及换热[J]. 航空动力学报, 2002, 17(2): 246-249.
ZHU Hui ren, XU Duchun. Heat transfer and pressure drop of short pin-fin array with different diameter and shape [J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(2): 246-249. (in Chinese)
- [9] 董素艳, 刘松龄, 苏红桢. 扰流柱排内换热的实验研究[J]. 航空动力学报, 1999, 14(1): 95-99.
DONG Suyan, LIU Songling, SU Hongzhen. The heat transfer experiment of inner pin-fin array [J]. Journal of Aerospace Power, 1999, 14(1): 95-99. (in Chinese)
- [10] 陶智, 吕东, 丁水汀, 等. 扰流柱直径对倾斜出气孔层板内流动和换热影响的数值研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(4): 540-546.
TAO Zhi, LÜ Dong, DIN Shuiting, et al. Numerical study on the influences of pin-fin diameter on the flow resistance and heat transfer of leaning vent hole lamilloy [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(4): 540-546. (in Chinese)
- [11] 闻杰, 于兆吉, 吴宏. 竖直平板自然对流强化换热的实验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(3): 411-414.
WEN Jie, YU Zhaoji, WU Hong. Experimental study in natural convection heat transfer enhancement [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(3): 411-414. (in Chinese)
- [12] 杨成凤, 张靖周, 谭晓茗. 水滴形叉排扰流柱阵列矩形通道内流动和换热数值模拟[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 362-365.
YANG Chengfeng, ZHANG Jingzhou, TAN Xiaoming. Numerical simulation of flow and heat transfer in rectangular channel with staggered arrays of droplet type pin fins [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 362-365. (in Chinese)