

文章编号: 1002-8055(2009)11-2489-06

旋转对小间距扰流柱通道内的流动换热影响

张 丽, 朱惠人, 刘松龄

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 为了深入了解旋转对涡轮叶片尾缘扰流柱通道的流动换热的影响, 在静止实验研究的基础上, 用数值计算的方法研究了旋转情况下梯形小间距扰流柱通道内的流动结构和换热情况。数值计算结果表明: 1. 旋转时沿着径向静压逐渐升高, 靠近叶根处的流量变小, 而靠近叶片顶部的区段出流量变大。2. 在扰流柱区, 旋转时迎风面和背风面的端壁换热都略有增强, 但增强的幅度不超过 7%, 迎风面略高于背风面, 但差别不大。沿着径向换热逐渐升高, 靠近叶尖处的换热强而靠近入口叶根处的换热弱。

关 键 词: 冷却叶片; 扰流柱; 旋转; 数值计算

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Numerical simulation on flow and heat transfer in rotating channel with small spacing pin2fin arrays

ZHANG Li, ZHU Hui2ren, LIU Song2ling

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xian 710072, China)

Abstract: Numerical simulation was conducted to study the rotational effects on flow and heat transfer in pin2fin rotating ducts. The pin2fin is low and the chord2wise pin spacing is small. Numerical results show that rotation influences the pressure distribution and chord2wise ejection mass flow rate. In pin2fin rotating duct, the pressure increases gradually in the radial direction due to the effect of centrifugal force. The chord2wise ejection mass flow rate becomes smaller near the entrance and becomes larger near the radial exit. Rotation also influences the wall heat transfer, and enhances the pin2fin endwall heat transfer slightly. The heat transfer on the leading side of the duct is slightly higher than that on the trailing side.

Key words: cooling blade; pin2fin; rotating; numerical simulation

提高涡轮进口温度是增加发动机推力和功率的有效措施。要保证涡轮叶片在高温下可靠工作, 除了提高叶片材料的耐热性能之外, 另一种重要的途径就是通过先进的冷却技术来对涡轮叶片进行有效地冷却, 降低叶片的壁面温度, 以满足叶片的强度和寿命要求。叶片强度和寿命的计算依赖于叶片固体温度场的正确计算。而叶片固体壁温又是由外流燃气换热和内流冷气换热共同决定的。这样就必须确定冷气流经叶片内部各个环节

的流量、压力、冷气温度和传热系数。

短扰流柱排作为一种常用的强化换热的手段, 在航空发动机涡轮叶片尾缘冷却中有重要的应用。扰流柱区域的流动情况比较复杂, 如何比较精确地计算扰流柱区域的换热和阻力损失一直是进行叶片内部冷却通道设计的重要问题, 而为能准确计算扰流柱区, 就需要对这个区域的流动和换热情况有比较深入地了解。

国内外的许多文献对短扰流柱排的流动换热

收稿日期: 2009-04-25; 修订日期: 2009-08-25

基金项目: APTD 项目 (APT12120202203)

作者简介: 张丽 (1968-), 女, 河南漯河人, 副教授, 博士, 主要从事涡轮叶片内部冷却的实验与数值模拟研究。

进行了研究. 文献[1]对气体流过矩形扰流柱通道, 从弦向出流的情况进行了数值计算研究. 文献[2]采用与实际情况更为接近的梯形通道, 对扰流柱排的流动和换热进行了实验研究. 文献[3]比较研究了扰流柱截面形状的影响. 文献[425]针对一种具有特殊结构特点(柱间距小、柱高度小)的梯形扰流柱通道, 试验测量了通道的流量分配、压力分布和端壁换热.

实际的涡轮工作叶片是高速旋转部件, 其冷却通道以一定的角速度旋转, 与静止状态相比, 旋转状态下叶片内冷通道的流动换热研究尚不充足, 目前的工程计算一般是采用静止状态下得到的实验关联式来计算旋转叶片的流动和换热, 这将造成比较大的偏差. 为了更加精确地预测压降和换热, 设计更佳的内冷结构, 旋转状态下的换热研究受到了极大地重视. 吉洪湖^[6]通过实验研究了带扰流柱的旋转矩形通道在径向出流和尾缘出流情况下的换热, 结果表明, 旋转会增强叶片冷却通道内的换热.

本文在文献[425]的静止试验研究基础上, 针对同样结构的扰流柱通道, 用数值计算来研究旋转对这种扰流柱通道内的流动和换热影响的规律. 本文所研究的扰流柱通道为收缩的梯形通道, 左侧无扰流柱区域的截面面积比较大, 扰流柱间距较小, 流动换热情况不同于已有文献所研究的情况. 本文的研究工作可以为以后的旋转实验研究和内部冷却通道流动换热工程计算的改进提供参考.

1 计算方法和计算模型

为了便于与静止情况下的实验结果进行对比, 选择与文献[4]实验段结构尺寸相同的计算模型. 计算域如图1所示. 扰流柱为叉排, 空气从叶片根部沿径向进入, 流过扰流柱排全部从弦向出口排出. 沿径向(y 方向)扰流柱为14排, 分为7段($N=7$), 每段包括2排扰流柱, 靠近入口为第1段, 距入口最远的为第7段. 沿弦向(x 方向)扰流柱为5列($M=5$). 扰流柱的高度直径比 $H/d=0.12\sim 0.17$, 扰流柱间距直径比 $S_x/d=1.1$, $S_y/d=2.2$. 其中 S_x , S_y 分别为沿弦向和径向的扰流柱间距, H 为扰流柱高度, d 为扰流柱直径. 详细的结构尺寸见文献[4].

计算网格采用网格处理器 Gambit 2.16 生成. 底面和柱面网格如图2所示. 整个计算域均采用六面体网格, 底面为四边形网格. 在靠近弦向出

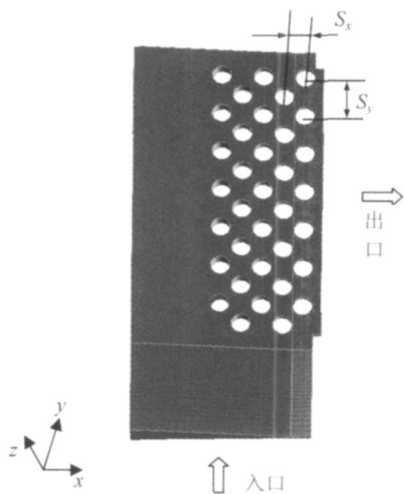


图1 计算域

Fig 1 Computational domain

口的扰流柱区域网格较密而左侧无柱区域的网格相对稀疏, 并且过渡均匀. 近端壁壁面网格加密, 经过计算, 扰流柱区近端壁第一层网格的 y^+ 约在1左右. 总网格数为105万, 扰流柱段网格数为98万.

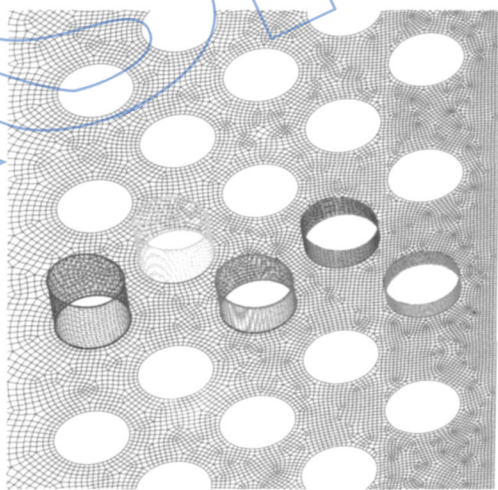


图2 计算网格

Fig 2 Computational grids

采用旋转参考坐标系, 设定旋转轴的原点和方向, 如图3所示, 旋转轴与 x 方向平行, 旋转角速度方向与 x 轴正向平行. 旋转轴到通道入口的距离与通道当量直径之比与实际叶片相同.

计算模型为定常、不可压. 入口给定均匀速度和温度. 弦向出口给定静压和温度, 端壁和柱面为无滑移壁面条件. 端壁换热边界给定迎风面和背风面的热流密度, 均为 1000 W/m^2 . 采用 FLUENT 6.2 中的分离隐式求解器进行计算, 速度、

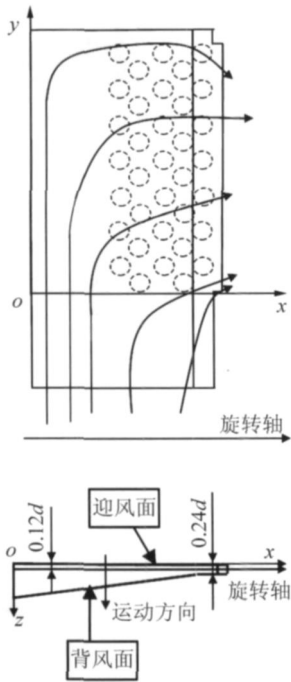


图 3 旋转轴及通道几何示意图
Fig 3 Rotating axis and pin2fin duct

温度、湍动能和湍流耗散率的离散格式采用二阶精度的迎风格式, 并对连续方程、动量方程、k 方程和 E 方程都实施亚松弛处理以保证控制方程组

的收敛, 松弛因子在迭代计算的过程中逐步调整. 在计算时, 为了改善求解过程的稳定性, 用比较小的转速开始求解, 然后慢慢地增加转速, 入口速度也从比较小的速度开始求解, 然后逐渐增加.

在本文中, 雷诺数定义为

$$Re=\frac{\dot{m}}{A_{min}}\#\frac{d}{L}\tag{1}$$

努塞尔数定义为

$$Nu= h@d/K\tag{2}$$

总压系数定义为

$$f=\frac{Sp}{\frac{1}{2Q}\left[\frac{\dot{m}}{A_{min}}\right]^2}\tag{3}$$

其中 $\dot{m}$ 为弦向出口流量即总流量, 为 7 段弦向流量的和; L 为动力黏度; A_{min} 为弦向出口处最窄截面面积; h 为表面传热系数; K 为气体导热系数; Sp 为入口和弦向出口的总压差; Q 为气体密度.

表 1 表示出静止情况下不同湍流模型数值计算结果与实验结果的对比($Re=70\,000$), 无论是压力分布还是端壁换热, Realizable k2E 模型的计算结果与实验结果比较接近, 所以采用 Realizable k2E 湍流模型.

表 1 各湍流模型计算得到的总压系数和端壁换热的比较
Table 1 Comparison between the pressure2drop coefficient and the Nusselt number

实验结果		Standard k2E	RNG(renormalization group) k2E	Realizable k2E	SST(shear2stress transport) k2X
总压系数	0.686	0.663	0.594	0.675	0.626
相对误差/ %		3.35	13.4	1.6	8.7
端壁平均 Nu	284.3	217.2	212.0	230.3	223.1
相对误差/ %		23.6	25.4	18.9	21.5

2 计算结果分析

2.1 静止情况下数值计算结果与实验结果的对比

图 4 给出了扰流柱排的总压系数 f 的数值计算结果与文献 4 实验结果的比较. 从图中可以看出, 计算得到的总压系数随着雷诺数增加而下降, 与实验得到的结果一样, 从数值上来看, 总压系数的计算值和实验值也符合得比较好, 计算与实验的偏差很小(相对误差为 5.6%). 图 5 给出了端壁平均努塞尔数的数值计算结果与文献[5] 实验结果的比较, 从图中可以看出, 计算得到的端壁平

均努塞尔数随着雷诺数的增加而增加, 变化趋势与实验结果一致, 计算值低于实验值. 从以上的比较可以看出, 总压系数的计算结果与实验结果总体符合得比较好, 说明数值模拟可以得到比较准确的流动特性. 端壁换热的计算结果与实验结果从规律上比较一致, 但在数值上存在一定的偏差.

2.2 旋转对压力分布的影响

用旋转数 Ro 来描述旋转的影响. 旋转数 Ro 表示流体旋转引起的哥氏力与惯性力之比, 定义为

$$Ro=\frac{X D_h}{u_0}\tag{4}$$

其中 u_0 为通道入口平均速度; X 为旋转角速度; D_h 为通道入口的水力直径.

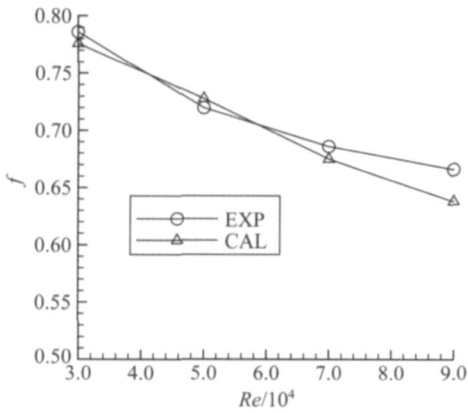


图 4 总压系数计算值和实验值

Fig. 4 Comparison between the calculated and measured pressure-drop coefficient f

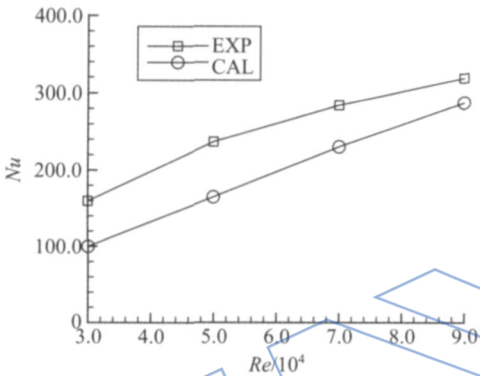


图 5 端壁平均努塞尔数的计算值和实验值

Fig. 5 Comparison between the calculated and measured Nusselt number

针对 $Re=70000$ 工况, 根据所研究的实际转子叶片的转速和结构尺寸, 取旋转数 $R_o=0.021, 0.038, 0.075, 0.11$ 分别进行了计算。

图 6 给出了计算得出的静止和 $R_o=0.11$ 情况下端壁的静压分布, 图中的压力为当地的静压与出口静压之差, 单位为 Pa。由于静止时迎风面和背风面的压力分布相同, 所以只给出迎风面的静压分布, 如图 6(a) 所示, 对于 $R_o=0.11$, 则分别给出了迎风面和背风面的静压分布, 如图 6(b), 6(c) 所示, 迎风面与背风面定义见图 3。从图中可以看出: ① 静止坐标系下, 沿着径向端壁静压基本不变, 静压变化主要发生在弦向, 而在旋转时端壁静压分布有着不同的特点, 沿着径向静压变化较剧烈, 是逐渐升高的, 沿着弦向静压逐渐下降, 但是不同的位置弦向压降不同, 旋转半径越大压降越大。造成沿径向压力升高是离心力作用的结果。② 旋转时迎风面和背风面的静压分布相差不大。

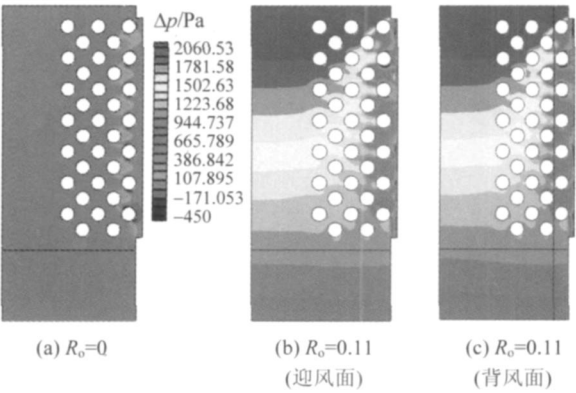


图 6 旋转对端壁静压分布的影响

Fig. 6 Endwall pressure distribution in the pin2fin duct with and without rotation

2.1.3 旋转对流量分配的影响

图 7 为静止和不同旋转数情况下的弦向出流量的分布比较, 纵坐标为每段弦向出流量与总弦向出流量之比。从图中可以看出, 随着旋转数的提高, 靠近入口的弦向流量变小而靠近叶片顶部的出流量变大, 这主要是因为离心力的作用使得沿着径向静压逐渐升高, 而出口静压都相同, 这样靠近叶片顶部的弦向压差大出流量也就大, 靠近入口的弦向压差小, 相应的出流量也就小。

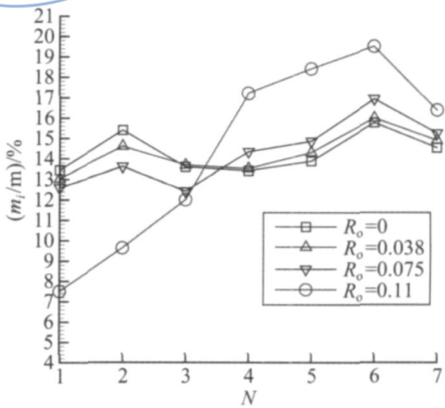


图 7 不同 R_o 的弦向出流量分配

Fig. 7 Mass flow rate distribution

2.1.4 旋转对端壁换热的影响

从上面的分析可以看出, 旋转对于扰流柱通道的流动结构有着一定的影响, 因而对端壁的换热也会产生影响。图 8 给出了 $R_o=0$ 和 $R_o=0.11$ 时端壁努塞尔数分布, $R_o=0$ 时迎风面和背风面的努塞尔数分布非常近似, 所以只给出迎风面的分布图, 对于 $R_o=0.11$ 则分别给出迎风面和背风面的分布。

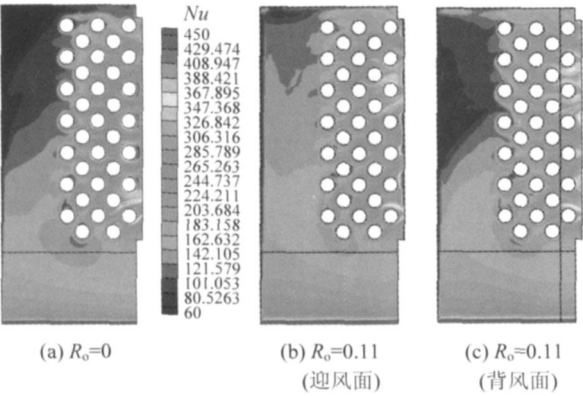


图 8 静止和旋转时端壁努塞尔数分布
Fig. 8 Endwall heat transfer distribution in the pin2fin duct with and without rotation

流体旋转时,除了受到离心力的作用,还会受到哥氏力的作用,哥氏力总是作用在垂直于流体流动的方向上,大小取决于径向和周向速度分量.对于径向外流产生的哥氏力方向指向迎风面(如图 3 所示),流体微团受哥氏力作用将向迎风面偏移.

从图 8 中对比可以看出:¹ 在入口段, $R_0=0.11$ 时的迎风面和背风面换热差别不大,比静止略强.因为进口段较短,靠近进口处气流速度分布比较均匀,哥氏力引起的二次流较弱,对换热影响小,所以迎风面和背风面换热差别不大.² 在无扰流柱的区域, $R_0=0.11$ 时的迎风面和背风面换热差别比较明显,迎风面的换热要比背风面强.这主要是哥氏力的作用使得靠近迎风面径向速度偏大,这使得迎风面换热加强.与静止情况相比,旋转时迎风面的换热得到增强,背风面的换热相差不大,平均努塞尔数略有降低,但分布不同.³ 在扰流柱区, $R_0=0.11$ 迎风面和背风面换热在前 4 列比较接近,在第 5 列扰流柱后尤其是靠近弦向出口附近,迎风面的换热强于背风面.与静止相比,无论是迎风面还是背风面, $R_0=0.11$ 的换热都略强,第 5 列柱后的低换热区变小,靠近叶片顶部的换热要明显比根部强,这是因为靠近叶片顶部的出流量大而靠近根部的出流量小.

为了进一步了解旋转数对扰流柱区端壁换热的影响,图 9 给出了不同旋转数下径向各段的换热分布,纵坐标为旋转状态下段平均努塞尔数与同条件下静止状态段平均努塞尔数之比 Nu/Nu_s ,如图 1 所示,扰流柱通道沿径向分为 7 段,每段包括 2 排扰流柱,每段端面(迎风面或背风面)的面积平均努塞尔数即为段平均努塞尔数.

从图 9 中可以看出:¹ 总的来说,旋转时的迎风面和背风面的端壁换热都略有增强,但是增强的幅度比较小, $R_0=0.075$ 时迎风面的换热 Nu/Nu_s 平均为 105%,背风面的换热 Nu/Nu_s 平均为 104%.² 迎风面的换热强于背风面,但是 Nu/Nu_s 值相差不大.³ 沿着径向 Nu/Nu_s 逐渐升高,尤其是 $R_0=0.11$ 时,靠近叶尖处的换热强而靠近进口叶根处的换热弱.根据前面的分析,在扰流柱区域的流动主要为弦向流动,产生的哥氏力较小,所以迎风面和背风面的 Nu/Nu_s 值相差不大.离心力的作用使得沿着径向出流量分布发生变化(如图 7),这样靠近叶片顶部的出流量大而靠近入口的出流量小,这就使得靠近叶尖处的换热增强而靠近进口叶根处的换热减弱.

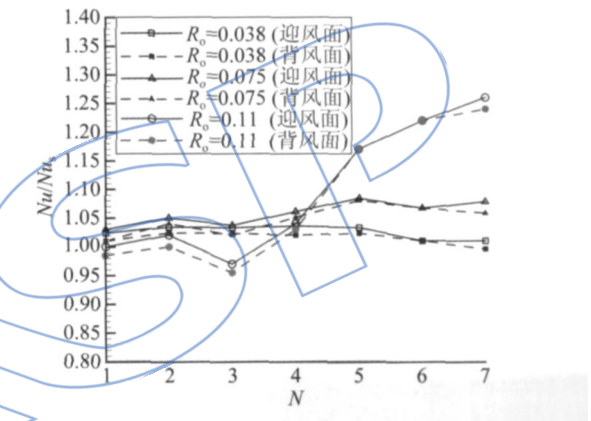


图 9 不同 R_0 的段平均努塞尔数
Fig. 9 Nusselt number along radial direction

3 结 论

- 1) 旋转对扰流柱通道的静压分布有着显著的影响.静止坐标系下,沿着径向端壁的静压基本不变,静压变化主要发生在弦向,而在旋转时,由于离心力的影响,沿着径向静压逐渐升高.
- 2) 旋转对扰流柱通道的弦向出流量分布有着显著的影响.随着旋转数的提高,靠近入口的区段的流量变小,而靠近叶片顶部的区段出流量变大.
- 3) 旋转对扰流柱通道端壁的换热分布有一定的影响.在无扰流柱的区域,迎风面和背风面换热差别比较明显,旋转使迎风面的换热得到增强.在扰流柱区,旋转时的迎风面和背风面的端壁换热都略有增强,但增强的幅度不超过 7%.沿着径向换热逐渐升高,靠近叶尖处的换热强而靠近进口叶根处的换热弱.

参考文献:

[1] 张丽, 刘松龄. 有弦向出流的短扰流柱排流动与换热数值计算 [J]. 推进技术, 2004, 25(4): 3072310
ZHANG Li, LIU Songling. Numerical study on heat transfer and pressure drop in pin2fin channels with lateral flow ejection [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(4): 3072310 (in Chinese)

[2] Hwang J J, Lui C C. Measurement of endwall heat transfer and pressure drop in a pin2fin wedge duct [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2002, 45: 8772889

[3] Sahiti N, Lemouedda A, Stojkovic D, et al. Performance comparison of pin fin in2duct flow arrays with various pin cross2sections [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 11761192

[4] 张丽, 朱惠人, 刘松龄, 等. 变流向梯形通道内短扰流柱排的流量分配试验 [J]. 航空动力学报, 2006, 21(3): 5185211

ZHANG Li, ZHU Huiren, LIU Songling, et al. Experimental investigation on flow in pin2fin trapezoidal duct [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(3): 5185211 (in Chinese)

[5] 张丽, 朱惠人, 刘松龄, 等. 短扰流柱排端壁的平均换热实验 [J]. 推进技术, 2008, 29(5): 523526
ZHANG Li, ZHU Huiren, LIU Songling, et al. Experiments on heat transfer in trapezoidal channel with short pin2fin arrays [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(5): 523526 (in Chinese)

[6] 吉洪湖, 王宝官. 正交旋转径向出流带扰流柱的矩形通道出口节流及安装角对传热的影响 [J]. 航空动力学报, 2000, 15(3): 2902296
JI Honghu, WANG Baoguan. The effects of tip end ejection area ratio and installation angle on heat transfer of orthogonally rotating rectangular duct with staggered pin fins [J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(3): 2902296 (in Chinese)