

文章编号: 1000-8055(2000) 03-0286-05

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

吉洪湖¹ 王宝官¹ 王代军² 邓化愚²
¹(南京航空航天大学 二系,江苏 南京 210016)
²(燃气涡轮研究院,四川 成都 510500)

摘要: 本文用实验的方法模拟研究了涡轮叶片内部径向出流的矩形冷却通道出口节流及安装角对通道换热特性的影响。实验模型为带叉排扰流柱阵列的矩形直通道。为了研究通道出口节流面积比的影响,共采用了 3 个模型,其通道出口面积 A_0 与通道本身的横截面积 A 之比分别为 0.067, 0.38 和 1.0。为了研究矩形通道的安装角 α 对旋转通道的传热影响,采用了 α 分别为 0 和 20 度的两个模型。实验考察了雷诺数 Re 和转动数 Ro 等参数对传热特性的影响。

关键词: 叶片; 旋转; 传热
自由词: 扰流柱; 矩形通道
中图分类号: V 231.1 文献标识码: A

1 引言

随着对航空发动机性能的要求越来越高,对涡轮叶片冷却效率的要求也在不断提高,叶片的冷却结构也变得越来越复杂。为了设计出更合理的冷却结构,有许多问题需要进行系统的深入研究。例如文献[1~3]分别对带扰流柱阵列的矩形旋转通道的几个传热问题进行了实验研究。其中文献[1]研究了旋转对径向出流的直通道的换热的影

响;文献[2]讨论了扰流柱排列参数对传热的影响;文献[3]描述了尾缘出流对通道传热特性的影响。与文献[1~3]相同本文采用正交旋转(通道轴线与转轴垂直)径向出流的带扰流柱阵列的矩形直通道模型,研究了通道出口节流面积比(通道出口面积 A_0 与通道无扰流柱处横截面积 A 之比)对传热的影响;并研究了矩形通道的安装角 α (由通道出口向旋转轴观察, α 为矩形通道的长边与转轴的夹角)对旋转通道的传热的影响。

表 1 实验模型的几何参数

模型类型	模型号	S_n/d	S_p/S_n	A_0/A	$\alpha/(^\circ)$
出口节流模型	5			1.0	
	7	8.0	2.0	0.067	0
	8			0.38	
安装角模型	1	6.5	1.2	1.0	0
	9	6.5	1.2	1.0	20

口节流面积比不同外,其余几何参数都相同。模型 1 和 9 除了安装角不同外其余几何参数均相同。换热系数根据公式 $h = q/(T_w - T_B)$ 确定,其中热流量 q ,壁面温度 T_w 的测量及气流的平均温度

2 实验模型及数据处理

本实验所用的实验装置在文献[1]中已作了

收稿日期: 1999- 07- 02; 修订日期: 1999- 10- 16

作者简介: 吉洪湖(1957-),男,南京航空航天大学二系教授,博士

T_B 的计算采用与文献[1]相同的方法。局部努塞

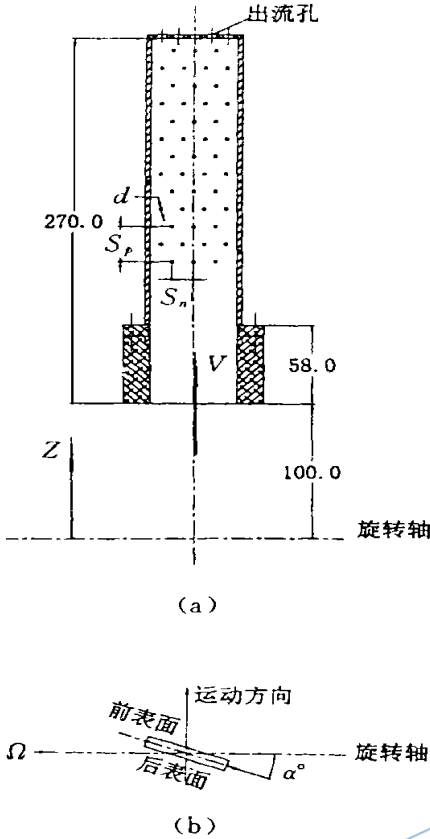


图 1 (a) 扰流柱的排列, 出流孔的设置;
(b) 模型通道的安装角 α 及模型前、后表面的定义(顶视图)

尔数定义为 $Nu \equiv hD/\lambda$, 其中通道的当量直径 $D \equiv 4A/C$, C 为 A 对应的周长。本文中各无因次参数中的物性参数由通道进口处气流温度定性。

3 实验结果分析

3.1 出口节流面积比 A_0/A 对换热的影响

图 2 给出了静态时模型 5, 7, 8 的努塞尔数 Nu_s 沿轴向的分布。图中的 3 组曲线分别对应于 $Re(\equiv PVD/\mu) = 12000, 25000$ 和 45000 。首先可以看出, 随着雷诺数 Re 的增大各个模型的总体换热水平是不断提高的。在雷诺数为 12000 时, 3 个模型的 Nu_s 的分布在通道的大部分区域是重叠的, 只是在 $Z/D > 21$ 以后才出现差别, 并且该差别随着 Z/D 的继续增大越来越明显, 在通道的出口处达到最大。这表明在 $Re = 12000$ 时通道出口节流仅影响出口附近区域的流动和传热。由 $Re = 12000$ 的实验曲线的最后一个测点可明显地看出, $A_0/A = 0.067$ 的模型 7 即节流面积比最小的模型, Nu_s 最高; 而 $A_0/A = 1.0$ 的出口无节流的

模型 5 的 Nu_s 最小。这种趋势在雷诺数增加至 25000 和 45000 时变得更加明显。并且此时 3 个模型的实验结果不再仅仅是在出口附近存在差异, 而是在整个通道内有明显的差别。以上结果表明: 在相同的雷诺数时由于通道出口结构不同, 通道内的流场就不相同, 这必然导致通道内温度场不同以及努塞尔数 Nu_s 的差异。

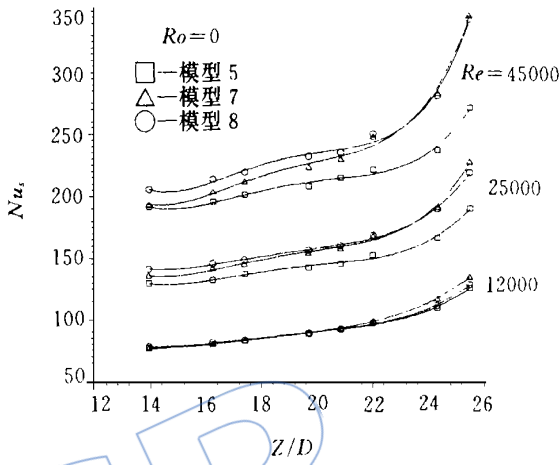


图 2 静态时模型 5, 7, 8 换热特性

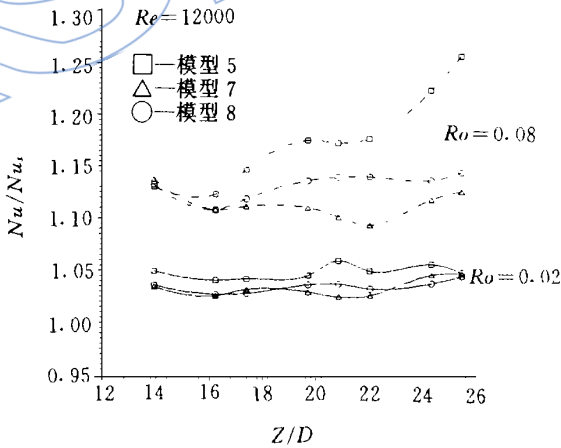


图 3 模型 5, 7, 8 的 Nu/Nu_s 沿轴向分布的比较
($Re = 12000$, 前表面)

通道旋转时, 各模型的换热特性用旋转时的努塞尔数 Nu 与静态时的 Nu_s 之比值来表示。图 3 给出了模型 5, 7, 8 的前表面的 Nu/Nu_s 沿通道轴向的分布。可以看出, 旋转引起了换热的提高, 并且随着转动数 $Ro(\equiv \Omega D/V)$ 的提高 Nu/Nu_s 是提高的。在 $Ro = 0.02$ 时, 3 个模型在整个通道的各点的换热能力大约都比静态时增加了 3~5%, 其中出口无节流的模型 5 的增加量最高, 约为 5% 左右。当 $Ro = 0.08$ 时, 各模型的换热能力与

静态时相比至少提高了 10%。此时,在通道进口附近这 3 个模型的增加量相差不多,大约都为 13%,当 $Z/D > 16$ 后,三者的区别相当明显。与 $Ro = 0.02$ 类似的是在 $Ro = 0.08$ 时无出口节流的模型 5 的 Nu/Nu_s 仍是最大,到通道出口时,其换热几乎比静态时增加了 25%;而模型 7 和模型 8 在出口附近的换热比静态时的增加量仍维持在 12~13% 左右。这表明:出口面积越大, Nu/Nu_s 随 Z/D 的升高越大。

图 4 给出了这 3 个模型的后表面的 Nu/Nu_s 沿轴向分布的比较。总体来讲,后表面的 Nu/Nu_s 与前表面有类似的曲线但具体数值接近或略高于前表面的对应值。

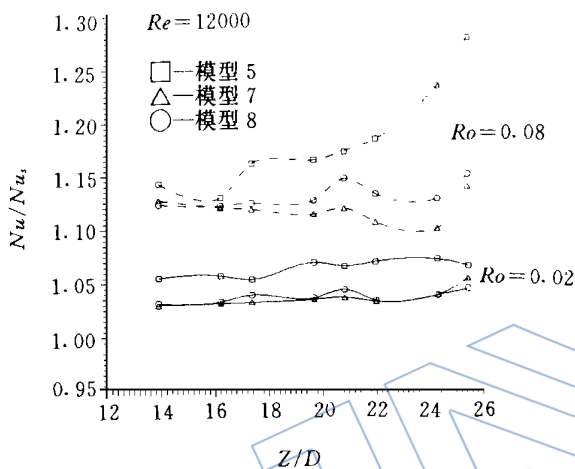


图 4 模型 5, 7, 8 的 Nu/Nu_s 沿轴向分布的比较
($Re = 12000$, 后表面)

虽然雷诺数 Re 和转动数 Ro 的增加都会引起传热的增加,但相对来讲这 3 个模型对 Re 和 Ro 的增加的反映程度是不同的。比较图 2~图 4 可见,出口无节流的模型 5 对 Ro 的增加反映强烈,但对 Re 的增加则最迟钝;相反的是出流口面积最小的模型 7 对 Ro 的增加反映不强烈,但对 Re 的增加则反映明显。类似的现象在文献[2]中也已观察到了。

综上所述,在本实验所采用的 1.0, 0.38 和 0.067 三个 A_o/A 值中,模型 8 对应的 0.38 对静态时的换热比较有利,但是旋转引起的传热的增加量是 $A_o/A = 1.0$ 的模型 5 最好。

3.2 模型安装角 α 对旋转通道对流换热的影响

以上的实验是在安装角 $\alpha = 0$ 的条件下进行的,而实际叶片中矩形(或近似矩形)冷却通道的安装角往往不为 0。下面将通过模型 1 和模型 9 的实验讨论安装角的变化对传热特性的影响。

在理论上,安装角的不同不会影响这两个模型的静态换热。本研究的实验也得到了这样的结果,这说明在本实验中没有因为模型的安装而引起实验的误差。

旋转对这两个模型的换热特性的影响由图 5 和图 6 给出。图 5(a) 给出了当 $Re = 12000$ 时模型 1 和 9 在 $Ro = 0.02$ 和 0.08 时,通道前表面的 Nu/Nu_s 沿轴向的分布。首先可以观察到 3 个现象:(1) 在相同转动数 Ro 时,模型 1($\alpha = 0^\circ$) 的换热特性优于模型 9($\alpha = 20^\circ$);(2) 在转动数 Ro 由 0.02 提高至 0.08 时,2 个模型的换热特性都有明显的提高;(3) 对于 $\alpha = 20^\circ$ 的模型 9,在 $Ro = 0.02$ 和 Z/D 较大时,通道旋转时的换热能力比静态时低,除此以外的其他状态旋转都使换热能力有所提高。对于通道的后表面在相同的实验条件下也可观察到以上的 3 个现象(图 5(b)),并且模型 1 后表面由旋转引起的传热能力的提高比前表面要高许多。例如,在 $Ro = 0.02$ 时模型 1 前表面换热能力比静态时最大增加约为 4%,后表面约为 10%;在 $Ro = 0.08$ 时的对应值分别为 17% 和 30%。但模型 9 前后表面由于旋转引起的努塞尔数的提高则相差不大,在 $Ro = 0.08$ 时 Nu/Nu_s 均在 8% 左右,在 $Ro = 0.02$ 时均有小于 1 的现象。总的来说,在 $Ro = 0.02$ 和 0.08 时模型 1($\alpha = 0^\circ$) 的 Nu/Nu_s 在大部分区域内随 Z/D 是上升的,但模型 9($\alpha = 20^\circ$) 随 Z/D 的增大 Nu/Nu_s 是明显波状起伏的,在相当大的区域内是下降的。为了进一步观察这些现象,图 6 给出了 $Re = 8000$ 时前后表面的类似的实验结果,此时转动数最大值提高至 0.1。当 $Re = 8000$ 和 $Ro = 0.1$ 时,模型 1 后表面出口点的换热比静态时增加了约 47%,而模型 9 此时的增加量只有 16% 左右,低于模型 1 在 $Ro = 0.06$ 时的增加量。此时可更清楚地看出模型 9 后表面 Nu/Nu_s 随 Z/D 的增大有明显的下降,而前表面 Nu/Nu_s 仅略有下降。

以上这些现象主要归因于安装角的不同导致了通道内前后表面在旋转状态时所受压力状态的不同,并导致二次流的形成,从而改变了壁面的换热状态。当 $\alpha = 0$ 时由于旋转而引起的流体所受的哥氏力的方向垂直指向通道的后表面,即后表面为高压面前表面为低压面,高压面边界层不稳定有利于换热。而 $\alpha = 20^\circ$ 时哥氏力的方向与通道后表面成一个夹角,相对来说哥氏力的作用小于 $\alpha = 0$ 时的情况,也就是说,此时哥氏力引起的换热的增加量要小一些。

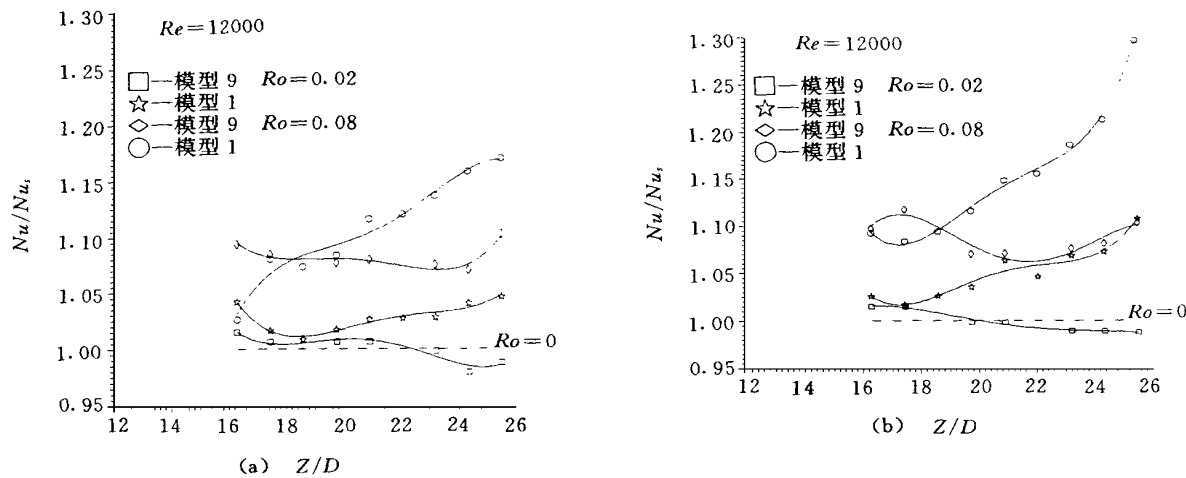


图 5 模型 1 和模型 9 的 Nu/Nu_s 沿轴向分布的比较($Re=12000$; (a) 前表面; (b) 后表面)

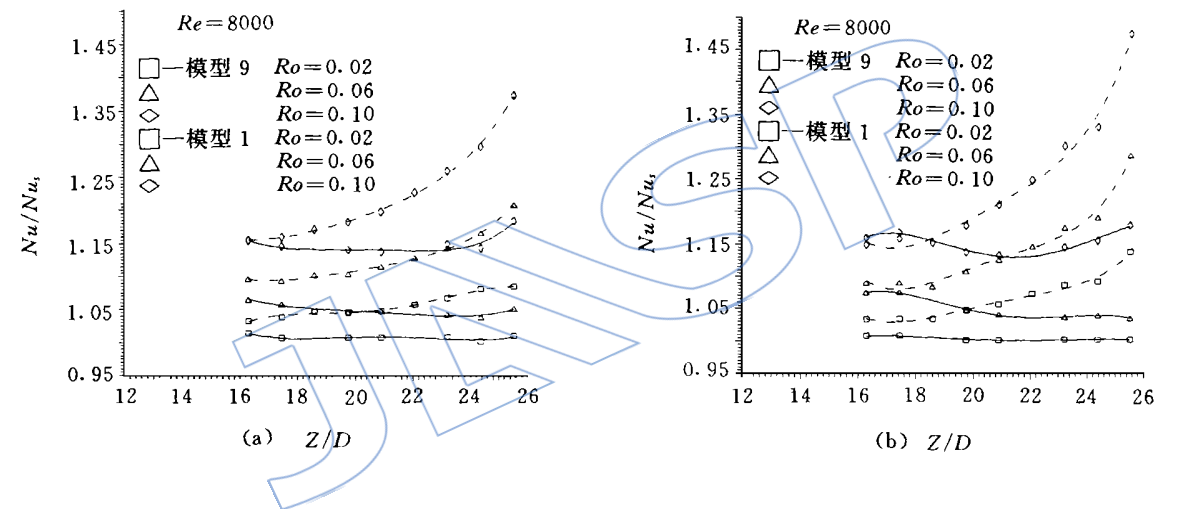


图 6 模型 1 和模型 9 的 Nu/Nu_s 沿轴向分布的比较($Re=8000$; (a) 前表面; (b) 后表面)

4 结 论

对于径向出流带扰流柱阵列的直通道, 出口节流实验有以下结论:

- (1) 在静止状态, $Re=12000$ 时, 出口节流仅影响通道出口附近的传热特性, 在该区域 A_o/A 越小的通道 Nu_s 越高。随着 Re 的增大各模型的 Nu_s 均提高, 各模型之间的 Nu_s 的差别不再仅仅限于出口区域而是扩展到整个通道。
- (2) 旋转时, 换热能力比静态时有提高, 并且随着 Ro 的提高相对静态的换热能力的增加量增高。
- (3) Ro 的提高使 A_o/A 大的通道的换热增加量大于 A_o/A 小的通道。

(1) 除了安装角 $\alpha=20^\circ$ 的模型 9 在 $Ro=0.02$ 和 Z/D 较大时通道旋转时的换热能力比静态时低以外, 其他状态旋转都使换热能力有所提高。并且随着 Ro 的提高, $\alpha=0^\circ$ 和 20° 的 2 个模型的换热特性都有明显的提高。

(2) 在转动数 Ro 相同时, $\alpha=0^\circ$ 的通道的换热特性优于 $\alpha=20^\circ$ 的通道。

(3) $\alpha=0^\circ$ 时随着 Z/D 的增加 Nu/Nu_s 是增加的; 而对 $\alpha=20^\circ$ 的通道在 $Re=8000$ 和转动数 $Ro<0.06$ 时随着 Z/D 的增加 Nu/Nu_s 是下降的, 在 $Ro=0.1$ 时随 Z/D 的增大前表面的 Nu/Nu_s 在出口区域略有上升, 而后表面的 Nu/Nu_s 则呈起伏波状变化。在 $Re=12000$ 时上述现象更加明显。

(4) 总体来说, 旋转引起的后表面的换热相对

静止状态的增加量大于前表面。

参 考 文 献

- 1 王代军, 吉洪湖, 王宝官. 带有叉排扰流柱阵列的旋转矩形通道的对流换热实验研究[C]. 重庆: 中国工程热物理学会传热传质学学术会议, 论文编号 973083, 1997

- 2 吉洪湖, 王宝官, 王代军, 邓化愚. 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[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 231– 236
- 3 吉洪湖, 王宝官, 王代军, 邓化愚. 涡轮叶片尾缘出流对带叉排扰流柱阵列的内冷通道传热特性的影响[J]. 航空动力学报, 1999, 14(3): 237– 241

(责任编辑 杨再荣)

The Effects of Tip End Ejection Area Ratio and Installation Angle on Heat Transfer of Orthogonally Rotating Rectangular Duct with Staggered Pin Fins

Ji Honghu¹, Wang Baoguan¹, Wang Daijun², Deng Huayu²

¹(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

²(Gas Turbine Establishment, Xindu 610500, China)

Abstract: An experimental research was conducted on orthogonally rotating rectangular ducts with staggered pin fin array and radial outward throughflow, to determine the effects of the duct tip end ejection area ratio and installation angle on the heat transfer of the duct. In order to study the effect of ejection area ratio (the ratio of the tip end ejection area A_0 to the area of the cross section of the duct A) three models were used with A_0/A equal to 0.067, 0.38 and 1.0 respectively. For the investigation of the effect of installation angle α , two models with α equal to 0 and 20 degree were tested. The effects of Reynolds number Re , rotation number Ro and other relevant parameters on heat transfer were also investigated.

Key words: blades; rotating; heat transfer

(The Chinese text of the following abstract is printed in PP282– 285)

Transient Heat Transfer Characteristics of Shrouded Rotating Disk with Variation of Rotating Speed

Luo Xiang, Wang Jianning, Xu Guoqiang

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A gas turbine disk was simplified to be a shrouded rotating disk system with central cooling air inflow, the disk was heated at rim. Transient heat transfer characteristics of the disk were investigated experimentally as the rotating speed was varied. The disk diameter was 400 mm and its maximum rotating speed was up to 3000 r/min. The results show that the rate of temperature vs time at large radius is greater than that at small radius. Averaged Nusselt number enlarges with the increase of Rotational Reynolds number. There are no significant difference in averaged Nusselt number between the stepwise abrupt variation and linear variation in the rotating speed.

Key words: rotation speed; rotating disk; heat transfer; flow