

旋转状态下带肋 U 形通道内换热的实验研究*

邓宏武, 张 炜, 陶 智

(北京航空航天大学 动力系, 北京 100083)

摘 要: 用实验方法研究了涡轮叶片内带肋 U 形通道在旋转状态下的前缘、后缘及两侧面局部换热系数分布。结果表明, 在旋转状态下此通道的努塞尔数随雷诺数的增大而增大。在进气直通道的后缘和出气直通道的后缘, 努塞尔数随旋转数的增加而增加; 在进气直通道的后缘和出气直通道的后缘, 努塞尔数随着旋转数的变化出现几次反复。随着浮力数的增加, 通道的平均努塞尔数是下降的。U 形通道在旋转状态下的流动换热规律比静态下的复杂的多。

关键词: 燃气轮机; 冷却叶片; 热传导试验; 传热; 旋转流体; 热流测量

中图分类号: V235.113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2000) 01-0026-04

Experimental investigation on heat transfer within a rotating ribbed serpentine passage

Deng Hongwu, Zhang Wei, Tao Zhi

(Dept. of Jet Propulsion, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Experiments were conducted to study the heat transfer characteristics of a rotating ribbed serpentine passage. The passage has a squared cross section. Results show that Nusselt number Nu increases with the increase in Reynolds number Re . Increasing the Rotation number tended to increase Nu on the trailing side in the inlet passage and the leading side in the outlet passage, while on the leading side in the inlet passage and the trailing side in the outlet passage Nu decreased. The average Nu decreases with the increase in Buoyancy number.

Subject terms: Gas turbine; Cooling blade; Heat transfer test; Heat transfer; Rotating fluid; Heat flow measurement

1 引言

在现代燃气轮机的研究中, 涡轮叶片内流 U 形冷却通道的换热研究工作开展的很多。但是, 大部分研究是在静态下进行的, 在涡轮叶片真正工作的旋转系下进行得很少。国际上, Bariua S N^[1]等人研究了旋转管流的流场、压力场和温度场。Morris F T^[2]等人分别研究了圆形、矩形、正方形等截面的光滑壁面通道的旋转换热特性。Zhang Y 和 Chiou J^[3]研究了带肋矩形截面蛇形通道的换热特性, Hsieh S S 和 Liu W J^[4]研究了两面光滑、两面带肋的双通道方管的旋转换热特性。国内在这方面的研究很少, 王武^[5]对光滑方形截面直通道做了实验研究。

本实验对旋转状态下的带肋 U 形回转通道进行了研究。为简化问题, 在研究中将叶片内冷通道横截

面假设为正方形并做适当放大, 但仍然保留通道内环肋。通过控制方程的无因次分析, 在几何相似的基础上控制旋转系对流换热过程的无因次准则数为雷诺数 Re , 旋转数 Ro , 浮力数 Bo , 普朗特数 Pr 以及无因次轴向位置 x/D_h 。限于篇幅关系, 推导细节不在此累述, 具体的分析见文献 [6]。实验中, 表示物性的无量纲数 Pr 基本上为常数, 所以, 局部努塞尔数可表示为

$$Nu = f(Re, Ro, Bo, x/D_h)$$

以上各无因次准则数的定义为: 换热面的局布努塞尔数 $Nu = \alpha D_h / \lambda_0$; 雷诺数 $Re = \rho_0 U_0 D_h / \mu_0$; 旋转数 $Ro = \Omega D_h / U_0$; 浮力数 $Bo = (\Delta \rho / \rho) Ro^2 R / D_h$; 密度比数 $\Delta \rho / \rho = (\rho_0 - \rho_w) / \rho_0 = (T_w - T_0) / T_w$ 。其中, $\alpha = q / (T_w - T_0)$ 为通道内壁面的局布换热系数, q 为通道内壁面的热流密度; 常规的水力直径 D_h

* 收稿日期: 1999-03-17; 修订日期: 1999-06-24。

作者简介: 邓宏武(1973-), 男, 博士生, 研究领域: 传热传质。电话: 010-82317438, E-mail: denghw@ns.ngl.buaa.edu.cn。

为特征尺度; 进口温度 T_0 为定性温度; 进口平均速度 U_0 为定性速度; ρ_w, T_w 为换热面气流密度和壁面温度。

2 实验模型及实验设备

2.1 实验模型

实验模型件本身主要可以分为三部分:

(1) 外层的壳体, 由硬铝制成, 可以固定内部的 U 形管, 是整个实验模型受力件。

(2) U 型管, 如图 1 所示, 由八个独立的短管相互连接而成的方形截面。每个短管分为两段, 每段的四个内壁上分别开槽, 每个槽都插入小铜块。铜块的带肋面为管内的换热面, 背面为加热面。通道内截面边长为 13 mm, 管内每隔 12 mm 有一道 2 mm 高的环肋。

(3) U 形通道与铝壳之间塞满岩棉, 能起到很好的绝热作用, 以避免过多热量损失。

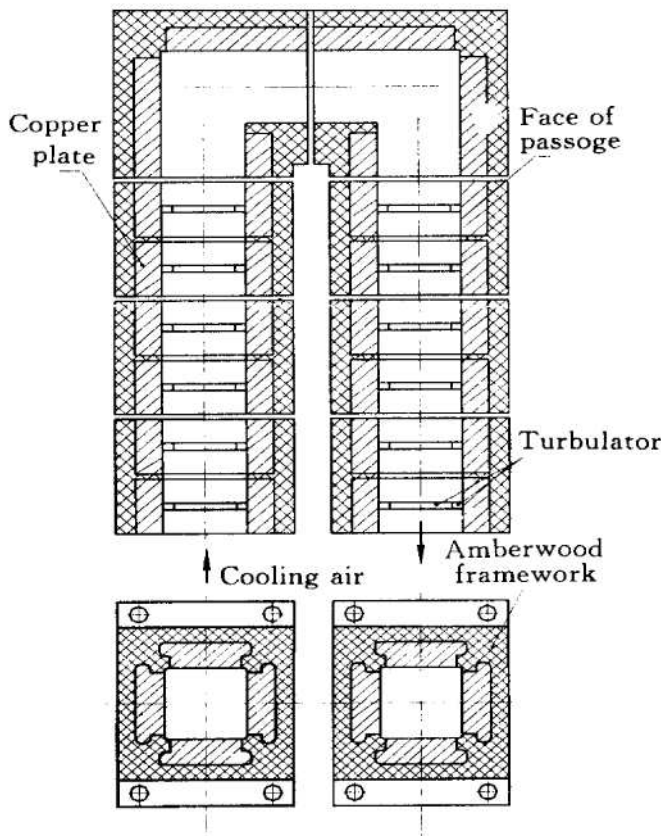


Fig. 1 Illustration of serpentine passages

2.2 旋转换热实验台

实验在北京航空航天大学教研室的高速综合旋转换热实验台上进行。实验冷却气由外部气源提供, 用差压法测量; 实验温度数据信号由两个温度采集板进行采集和放大, 再由两个 42 通道的滑环引电器从

转动部分引出, 通过数据采集板进行数据采集。经过实验台整体温度标定测试, 温度最终采集系统精度为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.3 加热及热损失估计

本实验的加热方法为镍铬电阻丝加热, 整个加热模型为等热流条件。实验中铜块的热损失主要是指热通过铜块背面的保温材料传导损失的热量。保温材料由贴在铜块背面的 5 mm 环氧酚醛玻璃布棒和 3 mm 岩棉组成, 其导热系数分别为 $0.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $0.035\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。通过外壳测点温度即可求出热损失 q_{loss} , 由实验数据计算有 $q_{\text{loss, max}} \leq 12\%$ 。当然, 实验通道内紧贴的两铜块之间也有热量的传递, 但其之间温差不大, 又有 2 mm 的环氧酚醛玻璃布棒绝热和接触热阻的作用, 则此热传递可以忽略。

3 实验结果分析

在旋转通道内冷却气流会受到离心力、哥氏力和浮升力的影响以及环肋的作用。因此, 通道内冷却气流流动和换热特性非常复杂, 通道内各个换热面的换热规律各不相同。图 2 是通道各面的定义及各种力作用方向的简图。

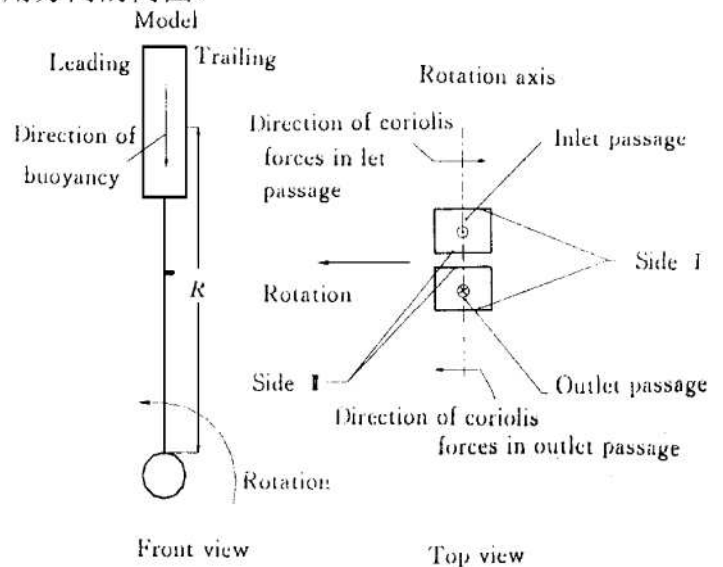


Fig. 2 Front and top view of model passage orientation

对于旋转通道换热实验数据的处理, 一般把实验所得的 Nu 与具有相同当量直径的静态光滑圆管充分发展紊流平均努塞尔数 Nu_∞ 进行比较, 这里 $Nu_\infty = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$ 。下面分别讨论进口雷诺数 Re , 旋转数 R_o , 浮力数 B_o 等条件改变时, 通道各面的换热特性的变化规律。

3.1 雷诺数 Re 的影响

图 3 为反映平均努塞尔数 Nu 和雷诺数 Re 关系

的几种典型工况图。可见，平均努塞尔 Nu 随雷诺数 Re 的增大而增大；而且对相同 Re 数进气直通道的换热明显优于出气直通通道。其他工况及局部努塞尔数和雷诺数的关系同样如此。由于同静态时大体相同，故此不再赘述。

3.2 旋转数 Ro 的影响

在变转速实验的结果中，图 4 表示 $Re = 28 \times 10^3$, $\Delta\rho/\rho = 0.21$ 时 I 侧面的换热特性曲线，其趋势比较明显， Nu 随 Ro 的增加而增大。II 侧面的换热特性与此相类似，可见旋转作用加强侧面的了换热。这一点在前后缘换热面的换热特性中也有体现。

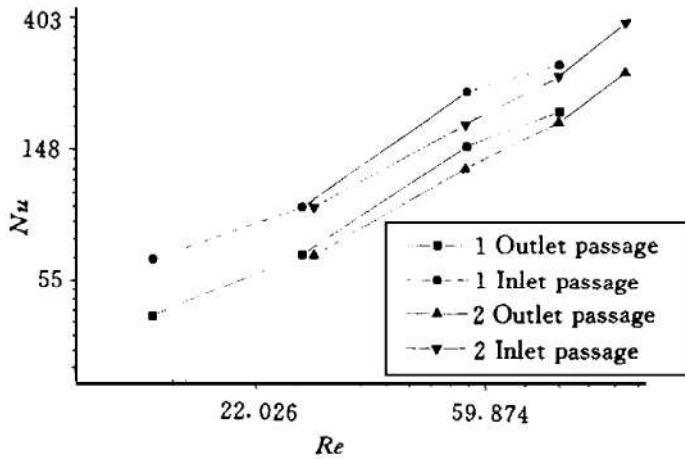


Fig. 3 Average Nu variation with Re

- 1) $Ro = 0.032$, $Bo = 1.56 \times 10^{-3}$
- 2) $Ro = 0.022$, $Bo = 2.29 \times 10^{-4}$

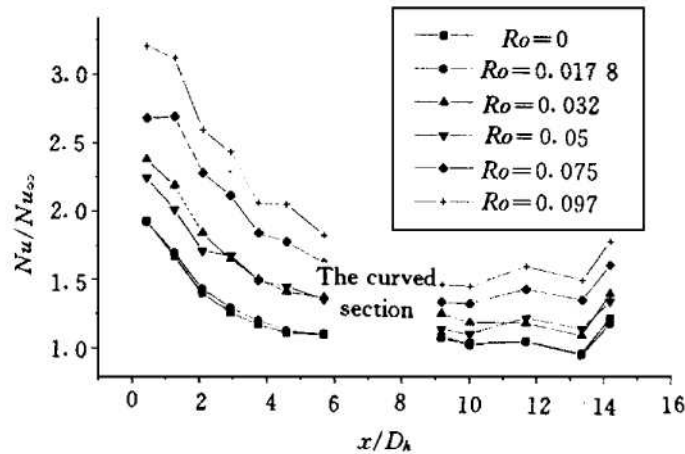


Fig. 4 Nu/Nu_{∞} variation with rotation number on Side I
($Re = 28 \times 10^3$, $\Delta\rho/\rho = 0.21$)

图 5, 6 表示 $Re = 28 \times 10^3$, $\Delta\rho/\rho = 0.21$ 时前缘面及后缘面的换热特性曲线。蛇形通道内壁前缘面的换热特性比较复杂， Nu 随 Ro 的变化规律并不明显。前缘面各处的 Nu/Nu_{∞} 随 Ro 的变化规律并不相同：在进口直通通道内， Nu/Nu_{∞} 随 Ro 的增大共变化规律是先降后升，在 $Ro = 0.05$ 处降至最低，并低于静止

状态下的 Nu/Nu_{∞} 值； $Ro > 0.05$ 以后， Nu/Nu_{∞} 随 Ro 值的增加而增加。在出口直通通道部分， Nu/Nu_{∞} 随 Ro 的变化规律一致，都是随 Ro 的增加而同步增长。对于通道内壁后缘面，进口直通通道内各处的 Nu/Nu_{∞} 均随着 Ro 的增加而增加。由于哥氏力的影响， Nu 增加很快，即使在低转速 $Ro = 0.0178$ 时，平均 Nu/Nu_{∞} 也接近静止时 Nu/Nu_{∞} 的 1.4 倍，当转速增加到 $Ro = 0.075$ 时 Nu/Nu_{∞} 数超过低转速时的 2 倍。在出口段直通通道内， Nu/Nu_{∞} 的变化规律同样是随 Ro 的增加先降后升。

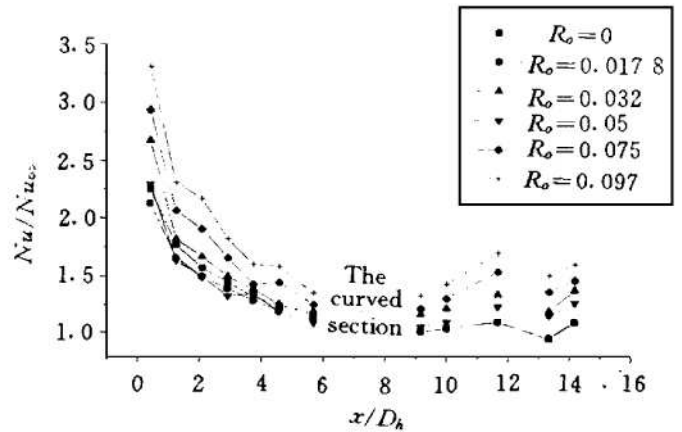


Fig. 5 Nu/Nu_{∞} variation with Ro on Leading side
($Re = 28 \times 10^3$, $\Delta\rho/\rho = 0.21$)

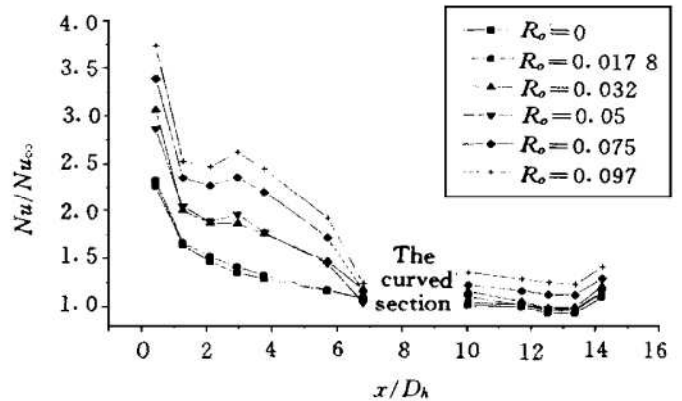


Fig. 6 Nu/Nu_{∞} variation with Ro on Trailing side
($Re = 28 \times 10^3$, $\Delta\rho/\rho = 0.21$)

对于蛇形通道的前后缘壁面，图 7 给出了后缘面努塞尔数与前缘面努塞尔数的比值 Nu_{ul}/Nu_{ld} 随 x/D_h 变化的趋势。由图中可以看出，在第一个直通通道内，后缘 Nu_{ul} 高于前缘 Nu_{ld} ，进入第二个直通通道后，情况正好相反。后缘 Nu_{ul} 与前缘 Nu_{ld} 比值随 Ro 的变化规律为：进气直通通道内，主气流引起的哥氏力方向指向后缘换热面，加强了后缘换热而减弱了前缘的换热，故此比值随 Ro 的增加而增加；在出气直通通道内，

主气流引起的哥氏力方向指向前缘换热面,加强了前缘换热而减弱了后缘的换热,故此比值随 Ro 的增加而减少。

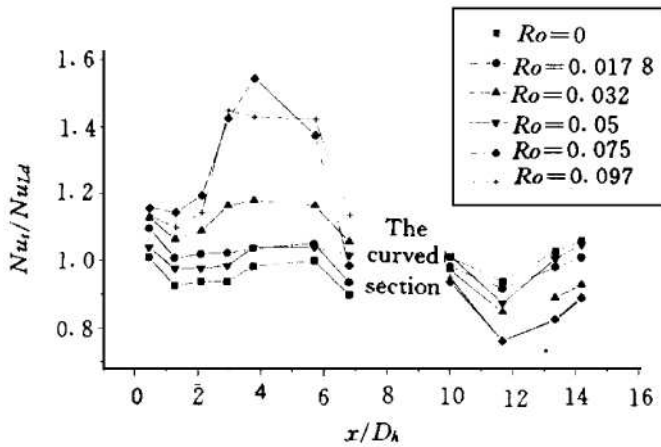


Fig. 7 Ratio of Nu on trailing side to that on leading side
($Re = 28 \times 10^3$, $\Delta\rho/\rho = 0.21$)

3.3 浮力数 B_o 的影响

反映浮升力的无量纲数 B_o 数的变化对蛇形通道的旋转换热也有影响。从理论上讲,浮升力始终指向旋转轴,它将降低进气直管的换热而加强出气直管的换热。由于通道内换热的复杂性,实际情况如图 8 所示,随着 B_o 数的增加,在进气直通道平均换热系数是下降的,在出气直通道平均换热系数基本不变。所以,随着 B_o 数的增加,通道的平均换热努塞尔特数 Nu 是下降的。

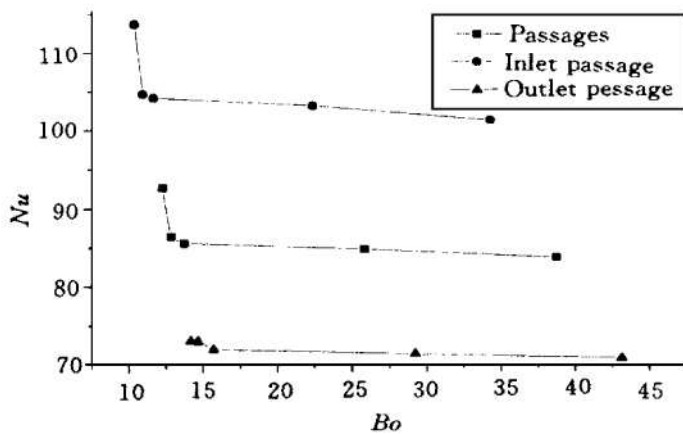


Fig. 8 Nu variation with B_o
($Ro = 0.02$, $Re = 27 \times 10^3$)

本实验的实验范围为 $12.5 \times 10^3 \leq Re \leq 110 \times 10^3$, $0 \leq Ro \leq 0.097$, $0 \leq B_o \leq 0.093$, 上面讨论的是其中一部分。其他的工况反映的基本趋势是一样的,限于篇幅不再讨论。由于测量方面的原因,U型通道的弯管段换热特性以后再研究。

4 结 论

旋转状态下:回转通道的努塞尔数 Nu 随雷诺数 Re 的增大而增大。回转通道两个侧面的努塞尔数 Nu 随旋转数 Ro 的增大明显增大。在进气直通道的后缘和出气直通道的后缘,努塞尔数 Nu 随旋转数 Ro 的增加而增加;在进气直通道的后缘和出气直通道的后缘,努塞尔数 Nu 随旋转数 Ro 的增加先降再升。随着浮力数 B_o 的增加,通道的平均努塞尔数 Nu 是下降的。

参 考 文 献

- 1 Sarua S N. Secondary flow in a rotating pipe [C]. Proc R Society A, 1954-1955, 227: 133.
- 2 Morris Fukada T, Nakayama W. Convective heat transfer in a rotating radial circular pipe (2nd report) [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1971, 14: 1807~1824.
- 3 Zhang Y, Chiou J. Local heat transfer distribution in a rotating serpention rib-roughened flow passage [J]. Transactions of the ASME, Journal of heat transfer, 1993, 115: 560~567.
- 4 Hsieh S S, Liu W J. Heat transfer coefficients in an orthogonally rotating two-pass channels with two opposite ribbed walls [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1995, 117: 69~78.
- 5 王 武. 模拟涡轮叶片内部冷却通道的方管 and 收缩管的旋转模型的对流换热研究 [D]: [学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 1996.
- 6 张 炜. 旋转状态下 180° 回转通道内流动和换热的实验研究 [D]: [学位论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.

(责任编辑: 史亚红)