

文章编号: 1000-8055(2007)10-1593-05

旋转半受限单孔冲击局部换热特性实验

毛军逵¹, 白云峰¹, 常海萍¹, 卜继兴²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 空军驻京西地区军代表室 北京 100074)

摘 要: 利用热膜法测量局部换热系数 Nu , 对旋转条件下半受限冲击射流的换热特性开展了实验研究. 通过改变冲击雷诺数 Re (20 000~35 000) 和旋转数 Ro (0~0.003 441) 等参数, 讨论了旋转状态对半受限单孔冲击换热特性的影响. 实验结果表明: 旋转显著影响了冲击靶面的局部换热系数分布规律. 在实验工况范围内, 靶面局部(平均) Nu 数均是先随着旋转数 Ro 的增加而增强, 后又随着旋转数 Ro 的增加而减小. 实验中还观察到同静止情况相似, 旋转条件下半受限冲击射流的冷却效果也是随着冲击 Re 的增加而不断提高.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 旋转; 冲击; 换热; 半受限

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experimental investigations on the local heat transfer coefficient of rotating single circular impingement in a half-limited space

MAO Jun kui¹, BAI Yun feng¹, CHANG Hai ping¹, PU Ji xing²

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Military Representation in Beijing, Beijing 100074, China)

Abstract: The local heat transfer coefficient Nu of rotating single circular impingement in a half-limited space was studied experimentally. Heated film and thermocouples were used to measure the temperature of target plate and the local heat transfer coefficient Nu was obtained. Jet Reynolds number (Re) of 20 000~35 000 and rotation number (Ro) of 0~0.003 441 were varied to study the heat transfer characteristic of impingement cooling applied under rotating condition. The results show that the Nu is affected greatly by rotation, and the distribution of Nu in rotating condition is quite different from that in stationary condition because of the centrifugal and coriolis forces. With Ro increasing, local and average Nu of target plate increases firstly and then decreases. And the Nu of single circular impingement increases with Re increasing, which is the same as that in stationary case.

Key words: aerospace propulsion system; rotating; jet impingement; heat transfer; half-limited mited

增加热力循环中的最高温度是提高热力循环效率的有效途径之一. 现代涡轮航空发动机中, 涡轮前的燃气温度已经远高于叶片金属材料的熔

点, 必须加以有效的冷却才能保证其安全、长期的工作. 冲击冷却由于其局部换热效果明显、结构简单等特点, 在航空发动机涡轮叶片的冷却设计中

收稿日期: 2006-09-13; 修订日期: 2007-01-30

基金项目: 国防基础科研资助项目(J1400D001)

作者简介: 毛军逵(1976), 男, 浙江杭州人, 副教授, 博士, 主要从事传热、传质研究.

得到了广泛的应用.

国内外学者对于静止条件下射流冲击冷却的流场结构和换热特性展开了详细的研究,相关研究表明冲击雷诺数以及几何尺寸等参数均显著影响了冲击冷却的换热效果^[1-4].对于旋转条件下的冲击射流, Metzger 和 Grochowsky^[5-6]用静止喷嘴冲击旋转加热的圆盘,来讨论运动产生离心力对传热效果的影响,研究结果表明离心力使得喷流充分扰动, Nu 数与偏心量 R/d 成正比, 并和旋转雷诺数的 0.5 次方成正比. Parsons 和 Han^[7], Parsons 等^[8]均通过研究旋转二平滑通道, 每一通道受到两直列圆形喷嘴冲击冷却, 来讨论旋转给冲击冷却带来的影响. 研究中发现旋转数增加到 0.002 8 时, 由于旋转引起离心力以及科氏力所造成的二次流的影响, 和静止条件相比 Nu 下降约为 15% ~ 20%. 从目前检索的资料来看, 对旋转条件下的半受限冲击射流的研究尚不够深入和细致. 本文通过实验研究的方法来分析旋转条

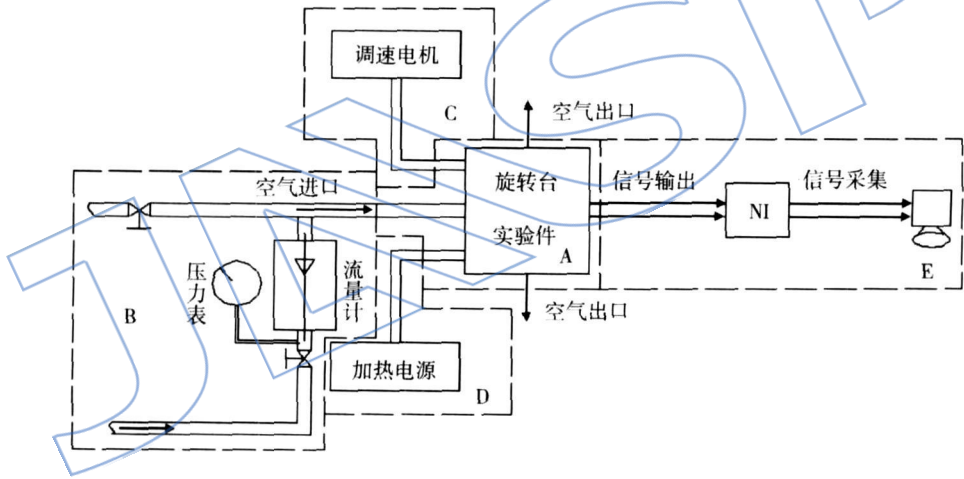
件下半受限冲击冷却的换热特性, 来加深对叶片内部冲击冷却的理解.

1 实验装置及实验件

1.1 实验装置

图 1 和图 2 分别为实验系统图和旋转盘的结构图. 整套实验系统包括实验段、冷却空气供给系统、动力系统、信号采集系统以及加热系统. 其中试验段为一个直径为 800 mm 的转盘, 由变频调速电机带动, 最高转速为 3 000 r/min. 冷却空气由压机机提供, 其流量通过浮子流量计来测量.

实验中使用可控硅整流器提供大电流、低电压的加热方式, 通过强电引入装置——碳刷将电流从静止的供电设备引入到旋转实验台, 电流通过紧贴实验件的康铜膜, 由康铜膜产生的热量实现对实验件加热. 实验中所采用的康铜膜, 厚度为 0.01 mm, 温度系数为 $50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 电阻率为 $0.48 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} (20^\circ\text{C})$.



A 实验段, B 冷气供给系统, C 动力系统, D 加热系统, E 信号采集系统

图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental facility

实验中通过一个旋转盘构造出离心力场, 将实验件安装在转盘内, 如图 2 中所示. 利用空心轴引入冷却气体, 进入实验件后通过转盘上的两个出口直接流向大气. 热电偶的测温信号通过滑环引电器, 传递到采集系统. 详细的实验误差分析请参见文献[9].

1.2 实验件及实验工况

实验件采取单孔轴向进气(正 x 方向), 单方向径向出气(正 y 方向), 冲击孔轴线和靶面的交点定义为原点($z = 0, y = 0$). 具体的热电偶埋设位置和试验件结构如图 3 和图 4 所示.

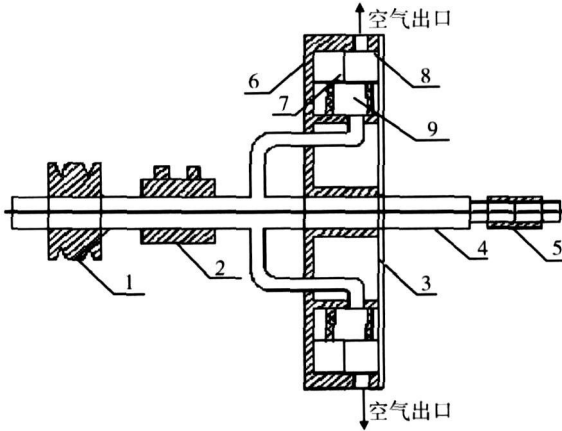
表 1 实验工况参数表

Table 1 Flow and structure parameters

参数名称	参数变化范围
旋转 Ro 数	0, 0.000 688, 0.001 376, 0.002 065, 0.002 753, 0.003 441
冲击雷诺数 Re	20 000, 25 000, 30 000, 35 000
热流密度 $q/(W/mm^2)$	4 669. 6
冲击孔直径 d/mm	4
冲击间距 H/mm	8

为了研究旋转对冲击冷却效果的影响, 主要考虑以下几个参数: 旋转 Ro 数($Ro = \omega d / u$, ω 为

旋转速度, d 为冲击孔直径, u 为冲击进口相对速度), 冲击雷诺数 Re ($Re = \rho u d / \mu$, ρ 为冷却空气密度, μ 为冷却空气黏性系数). 由于实验条件的限制, 设定以下工况, 具体见表 1.



1 皮带轮, 2 碳刷, 3 蒙皮, 4 空心轴, 5 滑环引电器
6 旋转盘, 7 实验件, 8 加热膜, 9 稳压腔
图 2 旋转盘结构示意图
Fig. 2 Schematic of rotating plate

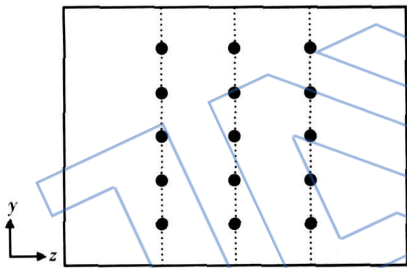


图 3 热电偶埋设位置示意图(yz -平面)
Fig. 3 Positions of embedded thermocouples

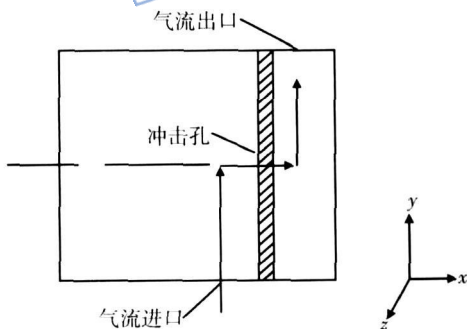


图 4 Schematic of the test section
Fig. 4 试验件结构示意图

2 实验结果分析

2.1 冲击雷诺数 Re 的影响

本文使用局部 Nu 来衡量冲击冷却的换热效果, 具体定义为 $Nu = q \cdot d / [(T_w - T_f) \cdot \lambda]$, 其中 q

为等热流壁面的加热量, T_w 为壁面的静温, T_f 为进口冷却气体的温度. 图 5 和图 6 分别为静止和旋转状态下, 冲击靶板流向中心线上 ($z = 0$) 局部换热系数 Nu 随冲击 Re 的变化图.

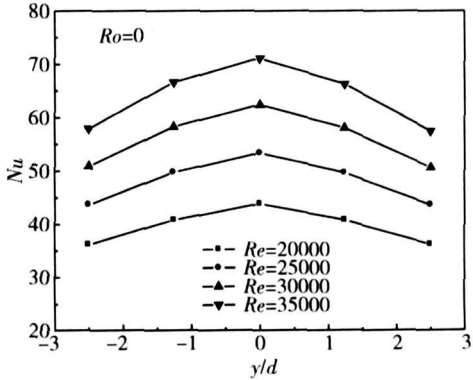


图 5 静止状态($Ro=0$)局部 Nu 随 Re 变化图
Fig. 5 Local Nu varying with Re in the case of $Ro=0$

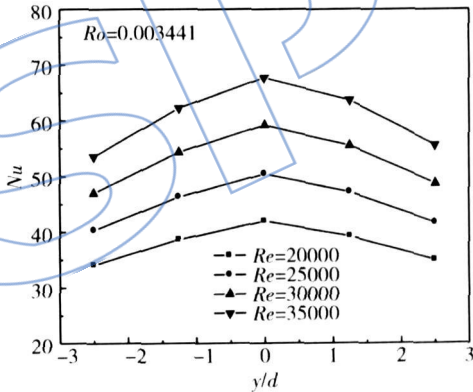


图 6 旋转状态($Ro=0.003441$)局部 Nu 随 Re 变化图
Fig. 6 Local Nu varying with Re in the case of $Ro=0.003441$

从图 5 中曲线分布可以看出, 局部 Nu 基本呈对称分布, 在冲击孔正对的靶板位置存在换热系数 Nu 的峰值. 并且随着冲击 Re 的不断变大, 冲击靶面上局部 Nu 数逐步增加. 这是由于射流中心区域流体快要到达冲击靶面时, 会突然减速并在到达壁面后速度减小到零. 流体和靶面之间发生强烈的冲击和碰撞, 产生极强的扰动, 流场中存在着很强的动量变化, 造成靶面中心滞止区域的换热强度最高. 在逐渐远离滞止区的壁面流动区域, 附面层逐渐发展起来, 厚度增加, 换热被削弱, 局部换热 Nu 数逐渐降低.

在旋转条件下, 如图 6 中所示的 $Ro=0.003441$ 时, 冲击靶面的局部 Nu 数仍然是随着冲击 Re 的增加而不断提高, 但此时局部 Nu 的分布不再是对称分布, 而是在冲击靶板中心到气流出口

这部分区域内 Nu 数存在一定的提高。

旋转状态下,冲击射流离开冲击孔后不再沿着冲击孔的中轴线运动,而是在离心力和哥氏力的共同作用下发生了偏转,从而造成冲击的滞止区位置发生偏移。在试验中,整个冲击腔绕正 x 轴方向旋转,离心力方向为正 y 方向。当冲击射流离开冲击孔,进入冲击腔内后,在离心力的作用下,将向 y 正向偏转。此时冲击腔内空气的相对运动和旋转方向之间就存在了相应的夹角,从而产生正 z 方向的哥氏力。

为了进一步了解旋转状态下,半受限冲击射流受离心力和哥氏力的影响,本文采用数值模拟对部分试验工况开展了仿真。具体的数值计算方法请参见文献[9-10]。图 7 和图 8 分别为数值模拟得到的冲击靶面局部 Nu 分布图和截面 A 上的相对速度分布图。

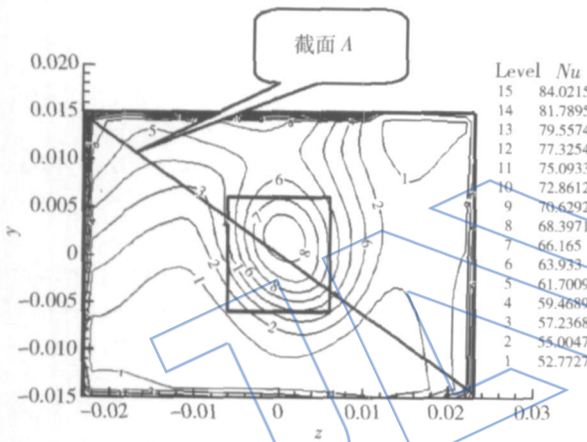


图 7 靶面局部 Nu 计算结果($Re=20\,000, Ro=0.003\,441$)

Fig. 7 Local Nu on target plate in the case of $Re=20\,000, Ro=0.003\,441$ (Numerical Result)

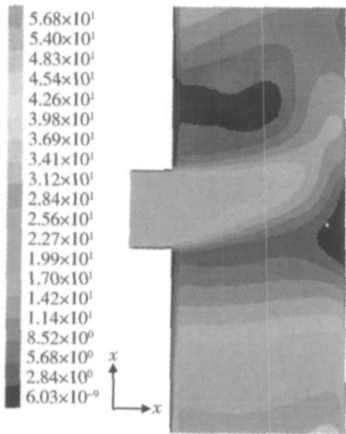


图 8 截面 A 相对速度计算结果($Re=20\,000, Ro=0.003\,441$)

Fig. 8 Relative velocity of surface A in the case of $Re=20\,000, Ro=0.003\,441$ (Numerical Result)

为了清楚的表示出冲击滞止区的偏移,在冲击靶板中心 $3d$ 的区域内用一个正方形标识出来,如图 7 所示。显然从图中可以观察到,旋转状态下,冲击斑(即滞止区)不再位于冲击靶板的中心,而是向正 y 和正 z 方向发生偏移。

图 7 中的斜线表示和 yz 平面相垂直的截面 A。从图 8 中可以清楚的发现,在离心力和哥氏力的共同作用下,冲击射流在离开冲击孔之后发生了弯曲,从而造成冲击斑(即滞止区)的位置也发生偏移。因此试验中观察到旋转状态下,从冲击靶板中心到气流出口这部分区域内局部 Nu 数存在一定程度的提高,如图 6 所示。

2.2 旋转 Ro 数的影响

图 9 和图 10 分别为相同 Re ($Re=20\,000, 25\,000$),不同的旋转 Ro 数工况下,冲击靶面上沿流向中心线上局部 Nu 的分布图。

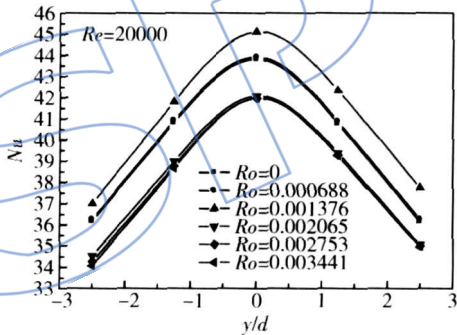


图 9 靶面局部 Nu 随 Ro 变化规律($Re=20\,000$)
Fig. 9 Local Nu on target plate varying with Ro in the case of $Re=20\,000$

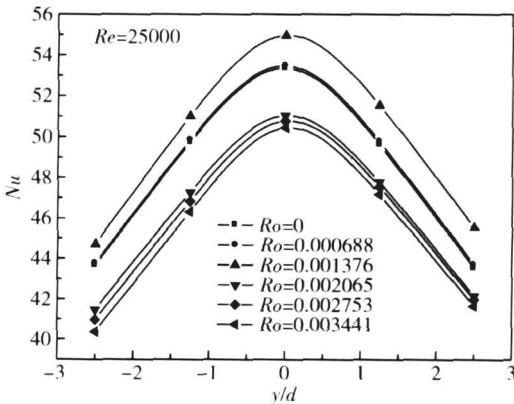


图 10 靶面局部 Nu 随 Ro 变化规律($Re=25\,000$)
Fig. 10 Local Nu on target plate varying with Ro in the case of $Re=25\,000$

从图 9 和图 10 中可以看到,在本文实验设定工况范围内,冲击靶面局部换热系数 Nu 随旋转

Ro 数的变化并非单调. 在不同的冲击 Re 情况下, 当旋转 Ro 数增加, 如 Ro 数从 0 变化为 0.001 376 时, 靶面的局部 Nu 数逐渐变大. 但是当旋转 Ro 数继续变大后, 如 Ro 数从 0.001 376 变化为 0.003 441, 冲击靶面局部 Nu 数却逐步降低.

这是由于当旋转 Ro 数很低, 即旋转速度较小的时候, 它的提高只会增加壁面流体的扰动, 增强冲击射流在壁面上的混合并强化局部的换热效果, 从而导致冲击靶面上局部 Nu 随着旋转 Ro 数的增加而不断变大. 试验中当旋转速度进一步提高, 即旋转 Ro 数继续增加后, 旋转产生的离心力和哥氏力, 会导致冲击射流在离开冲击孔后发生弯曲, 从而使冲击射流偏离靶板, 此时反而会导致靶板表面的换热效果降低, 因此从图 9 和图 10 中可以发现, 在不同的冲击 Re 数条件下, 冲击靶面的局部 Nu 数均是随着 Ro 数的提高, 先增加而随后降低.

为了进一步分析冲击靶面的换热系数随旋转 Ro 数的变化规律, 并避免壁面效应对结果的干扰, 本文选取了靶面中心 $3d$ 范围内区域内的平均 Nu 来开展研究. 图 11 为平均 Nu 数随着旋转 Ro 数的变化规律.

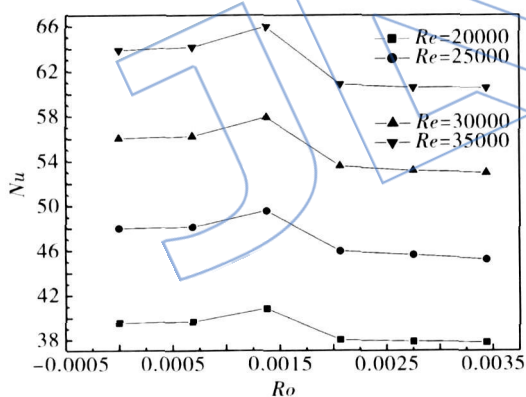


图 11 靶面平均 Nu 随 Ro 变化规律

Fig. 11 Average Nu on target plate varying with Ro in the case of different Re

从图 11 中可以看出, 同图 9~ 图 10 中局部 Nu 随旋转 Ro 数的变化规律相似. 当旋转 Ro 数的增加, 壁面平均 Nu 均是先增加后又减小. 总体的趋势是壁面平均 Nu 随着旋转数 Ro 的增加而减小. 随着旋转数从 0 增加到 0.003 441, 平均 Nu 分别减小了 4.446 8%, 5.827 1%, 5.497 2%, 5.211 8%.

3 总 结

本文利用热膜法研究了旋转条件下的半受限单孔冲击射流, 讨论了冲击 Re 数、旋转 Ro 数等参数对冲击靶面局部 Nu 数和 $3d$ 范围内平均 Nu 数的影响, 研究结果表明:

(1) 同静止情况下冲击射流相似, 旋转条件下的冲击冷却也是随着冲击雷诺数的增加, 靶面平均 Nu 和局部 Nu 不断变大;

(2) 随着旋转 Ro 数增加, 冲击靶面的局部 Nu 数和 $3d$ 范围内的平均 Nu 数并非单调变化. 当 Ro 较小时, 旋转使得冲击射流流场的扰动增加, 提高了冲击射流的冷却效果. 随着 Ro 数的变大, 由于离心力和哥氏力的作用, 冲击射流发生弯曲, 偏离了冲击靶面, 此时冲击冷却效果反而降低.

参考文献:

- [1] Gardon R, Akfirat J C. The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics in impinging jets [J]. Journal of Heat and Mass Transfer, 1965, 8(9): 1261-1272.
- [2] Goldstein R J, Timmers J F. Visualization of heat transfer from arrays of impinging jets [J]. Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 25(12): 1857-1868.
- [3] Goldstein R J, Sobolik K A, Seol W S. Effect of entrainment on the heat transfer to a heated circular air jet impinging on a flat surface [J]. Journal of Heat Transfer, 1990, 112(3): 608-611.
- [4] Jambunathan K, Lai E, Moss M A, et al. A review of heat transfer data for single circular jet impingement [J]. Int. Journal of Heat and Fluid flow, 1992, 13(2): 106-115.
- [5] Metzger D E, Grochowsky L D. Heat transfer between an impingement jet and a rotating disk [J]. Journal of Heat Transfer, 1977, 99(4): 663-667.
- [6] Metzger D E, Bunker R S, Bosch G. Transient liquid crystal measurement of local heat transfer on a rotating disk with jet impingement [J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(1): 52-59.
- [7] Parsons J A, Han J C. Rotation effect on jet impingement heat transfer in smooth rectangular channels with heated target walls and radially outward cross flow [J]. Journal of Heat and Mass Transfer, 1998, 41(13): 2059-2071.
- [8] Parsons J A, Han J C, Lee C P. Rotation effect on jet impingement heat transfer in smooth rectangular channels with four heated walls and radially outward cross flow [J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(1): 79-85.
- [9] 白云峰. 旋转条件下冲击冷却数值模拟及实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988.