

文章编号: 1000-8055(2006)06-0984-05

旋转条件下半封闭空间内多孔冲击平均 换热特性实验

杨 敏^{1,2}, 常海萍², 吴培光³

(1. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016; 3. 第二炮兵司令部工程部, 北京)

摘 要: 通过实验研究了冲击雷诺数 Re_j 、旋转雷诺数 Re_ω 、以及冲击孔的排列方式、冲击孔到靶板之间的距离等参数, 对旋转条件下半封闭空间内多孔冲击平均换热特性的影响。实验结果表明: 随着冲击雷诺数的增大, 多孔冲击的平均 Nu 数显著提高; 随着旋转雷诺数的增大, 平均 Nu 数稍有提高, 但变化幅度不大; 冲击孔的排列方式对平均换热效果也有一定的影响, 叉排式稍优于顺排式; 并且实验得出, 冲击孔到靶板之间的距离为 4 倍冲击孔直径时多孔冲击平均换热效果最佳。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 冲击; 冷却; 换热特性; 旋转

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Experimental investigation of the rotating multiple jets impingement heat transfer characteristic in semi-limited space

YANG Min^{1,2}, CHANG Haiping², WU Peiguang³

(1. College of Aeronautic Science & Technology,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. College of Energy & Power Engineering,

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

3. Department of Engineering, Headquarters of the Second Artillery, Beijing)

Abstract: The effects of jet Reynolds number(Re_j), rotation Reynolds number(Re_ω), the jet-holes array and the distance of jet-to-plate on multiple jets impingement cooling were studied by experiments. The results show that: (1) The average Nu number of heat transfer of multiple jets impingement cooling increases significantly with the increasing of jet Reynolds number but have less increment with that of rotation Reynolds number. (2) The jet-holes array has certain effect on the average heat transfer of multiple jets impingement, cross jet-hole array is somewhat better than that of the ordinal array. (3) When the distance of jet-to-plate is four times the jet-hole diameter, the average heat transfer effect of impingement cooling is the best.

Key words: aerospace propulsion system; impingement; cooling; heat transfer charac-

收稿日期: 2005-12-12; 修订日期: 2006-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276027); 国防基础科研资助项目(J1400D001)

作者简介: 杨敏(1979), 女, 山东单县, 北航博士后, 研究方向: 传热与传质, 涡轮叶片冷却, 低温制冷技术。

teristics; rotation

随着航空发动机技术的飞速发展, 涡轮叶片冷却技术对发动机的研制和发展至关重要, 多种多样的冷却结构和冷却技术层出不穷, 大大促进了发动机性能的不断提高。其中, 冲击冷却技术因其可获得极高的局部冷却效果, 被广泛应用于涡轮叶片前缘、叶盆和叶背上。自 60 年代以来, 国内外学者对于冲击冷却技术展开了大量的研究, 但大多限于静止条件下的冲击冷却^[1-7], 旋转条件下的研究相对较少^[8-10]。本文参考静止条件下冲击冷却技术相关参数的最佳匹配, 通过实验的方法, 研究旋转条件下半封闭空间内多孔冲击平均换热特性, 为今后涡轮叶片的冷却结构设计提供一定的参考。

1 实验装置和试验件

实验研究所用的旋转实验装置如图 1 所示。整套装置主要包括动力系统、加热系统、测试系统、冷空气进气系统和旋转盘腔等组成, 其中旋转盘腔的直径为 800 mm。各系统的详细情况, 以及试验件的安装位置如图 1 所示。

本文参考静止条件下多孔冲击冷却几何参数的最佳匹配范围^[5,6], 设计了如图 2 所示的试验件, 通过实验研究旋转条件下半封闭空间内多孔冲击冷却平均换热特性。针对于冲击孔的排列方式的不同, 设计了两种冲击孔板, 叉排式和顺排

式, 分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示。从两图也可以看到冲击靶板上热电偶的埋设位置。从图 2(c) 中可以看到静止条件下冲击射流在半封闭空间内的流动方向。图 2(d) 为多孔冲击射流的试验件照片, 从图中可以看到冲击孔板和靶板的相对位置, 并且可以通过将冲击孔板放置不同的槽来改变冲击间距, 从而讨论冲击间距对平均换热特性的影响。实验中采用电加热方式, 通过加热膜提供热量。

2 实验结果分析

2.1 实验工况

实验主要研究冲击雷诺数 Re_j 、旋转雷诺数 Re_ω 、冲击孔的排列方式、冲击孔到靶板之间的距离等参数对旋转条件下半封闭空间内多孔冲击射流平均换热特性的影响, 为此设计了如表 1 所示的实验工况。相关参数的定义:

- 冲击雷诺数: $Re_j = \rho v_j d / \mu$
- 旋转雷诺数: $Re_\omega = \omega d^2 / \nu$
- 平均换热系数: $h = q / (T_b - T_f)$
- 平均努谢尔数: $Nu = hd / \lambda$

其中: v_j 冲击孔冷空气进口速度, 冲击孔直径 $d = 2\text{ mm}$ 为特征尺寸, T_f 和 T_b 分别为冷却空气进口温度和冲击靶板的平均温度。

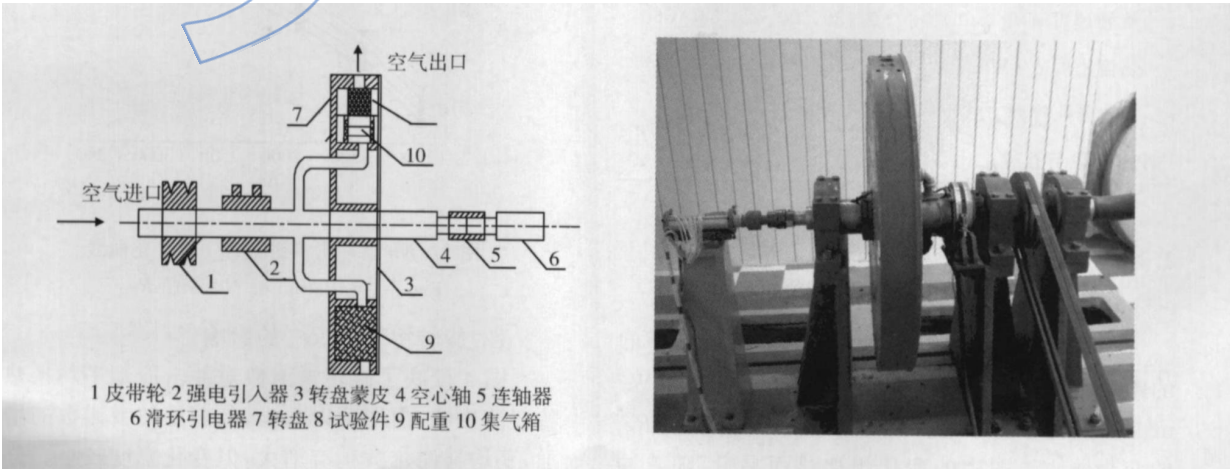


图 1 旋转实验装置示意图和照片
Fig. 1 Cross section through the rotating test facility

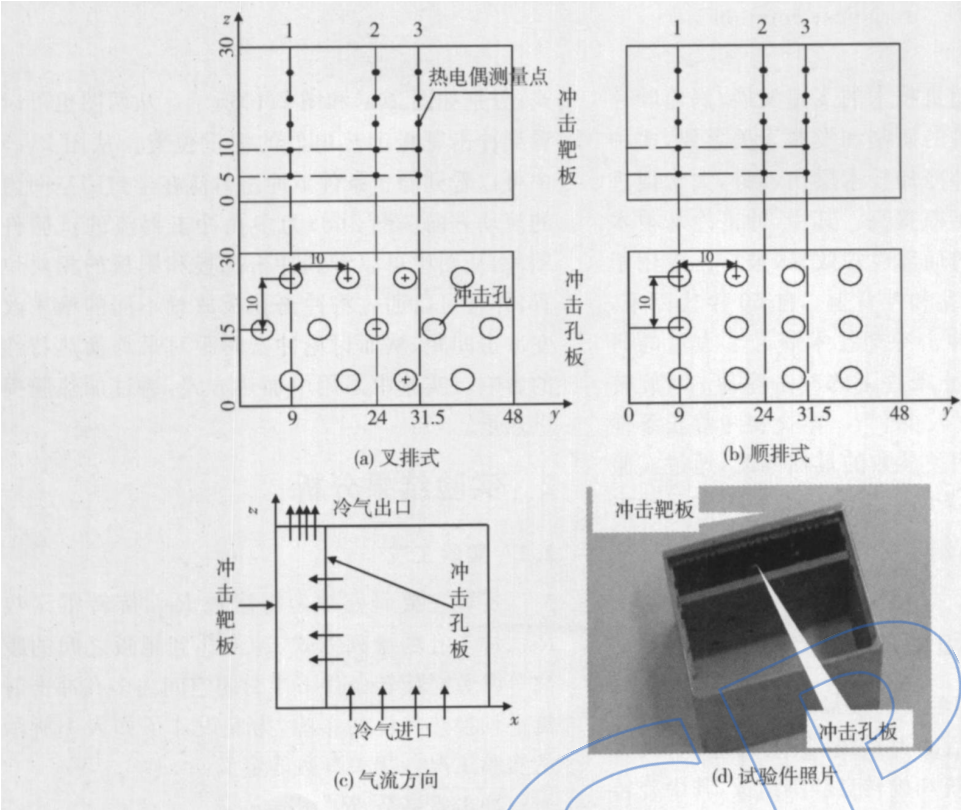


图 2 试验件结构模型
Fig. 2 Configurations of impingement cooling experimental model

表 1 实验工况 Table1 Experimental conditions	
参数名称	参数变化范围
冲击雷诺数 Re_j	9 403.1~ 37 612.4
旋转速度 $n/(\text{r}/\text{min})$	0, 180, 300, 420, 540, 660
热流密度 $q/(\text{W}/\text{m}^2)$	2280~ 59 600
冲击孔排列方式	顺列式, 叉列式
冲击间距与孔径之比 X_n	2, 4, 6

2.2 平均换热特性

(1) 冲击雷诺数 Re_j 的影响

图 3 是冲击孔为顺排式、冲击孔到靶板之间的距离为 4 倍冲击孔直径, 热流密度为 $25\,300\text{ W}/\text{m}^2$ 时, 多孔冲击平均努谢尔数随冲击雷诺数 Re_j 的变化曲线。图中的变化规律显而易见, 随着冲击雷诺数的增大, 平均努谢尔数不断提高, 增加幅度非常明显。这是因为冲击雷诺数的增大, 单位时间内流入冲击孔的冷却空气流量增加, 因而平均换热效果增强。由此表明, 冲击雷诺数对旋转条件下多孔冲击射流平均换热特性具有显著的影响。

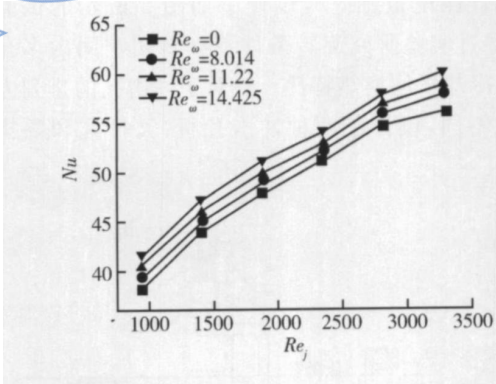


图 3 Nu 随冲击雷诺数 Re_j 的变化曲线
Fig. 3 Variation of Nu with Re_j

(2) 旋转雷诺数 Re_ω 的影响

图 4 反映了旋转雷诺数对冲击冷却平均换热特性的影响, 由图可以看出, 随着旋转雷诺数的增加, 平均努谢尔数稍有增大, 但变化幅度较小。分析原因: 与静止条件下相比, 旋转产生的离心力和哥氏力使冲击射流的冷空气在半封闭空间内发生扰动, 从而增强了冲击冷却的平均换热效果。随着转速的进一步提高, 离心力的不断增大, 将使射流的流动方向发生偏转, 但由于实验条件的限制, 本文的旋转速度相对不高(不超过 $660\text{ r}/\text{min}$), 且

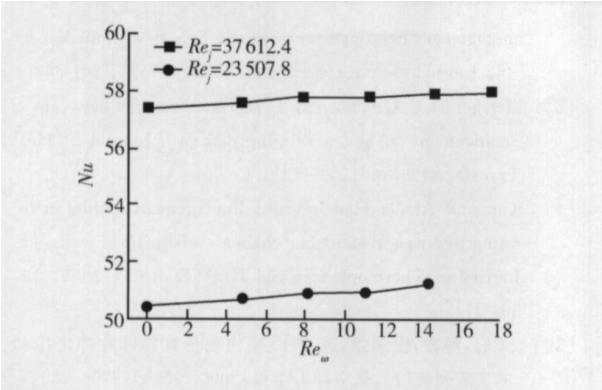


图 4 Nu 随旋转雷诺数 Re_ω 的变化曲线

Fig. 4 Variation of Nu with Re_ω

试验件的结构尺寸较小, 所以旋转对于平均换热效果的影响并不显著。这与白云峰^[1]在低转速下通过数值模拟得到的结论是一致的。

(3) 孔的排列方式的影响

从图 5 中冲击孔的排列方式不同时平均换热效果的比较不难看出, 冲击孔为叉排式时平均换热效果优于顺排式的。但是, 叉排式的优势并不是十分明显, 从图中可以看出最大差距不超过 5%。由此可知, 冲击孔的排列方式对旋转条件下冲击冷却的平均换热效果具有一定的影响, 叉排式稍占优势, 但在本文实验条件下二者的差距并不明显。

(4) 冲击孔到靶板之间距离的影响

图 6 反映了冲击距离对平均换热效果的影响。由图清晰地看到, 冲击距离为 4 倍冲击孔直径时, 旋转条件下冲击射流平均换热效果最好。由图得知冲击间距对旋转条件下多孔冲击平均换热特性具有一定的影响, 冲击距离太大, 由于旋转的影响使气流的方向发生偏移, 与冲击靶板还没充分接触即从出口流出, 因而并不能达到最佳换热效果。但冲击间距太小, 冲击射流的速度相对较大, 因而冲击到靶板上的冷却气流将会产生反弹, 从而削弱了冲击射流的换热效果。因此, 冲击间距对旋转条件下半封闭空间内多孔冲击射流平均换热特性具有一定的影响, 并且在本文实验条件下得出冲击距离为 4 倍冲击孔直径时平均换热效果最佳。

3 结 论

本文通过实验对旋转条件下半封闭空间内多孔冲击冷却平均换热特性进行了深入研究, 得出如下结论:

(1) 冲击雷诺数 Re_j 对旋转条件下半封闭空

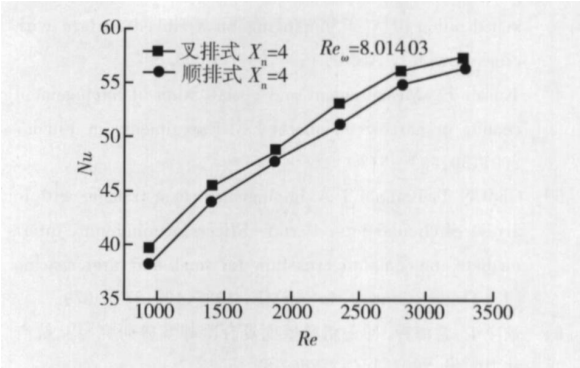


图 5 冲击孔排列方式对平均换热效果的影响

Fig. 5 Influence of Nu on the jet holes array

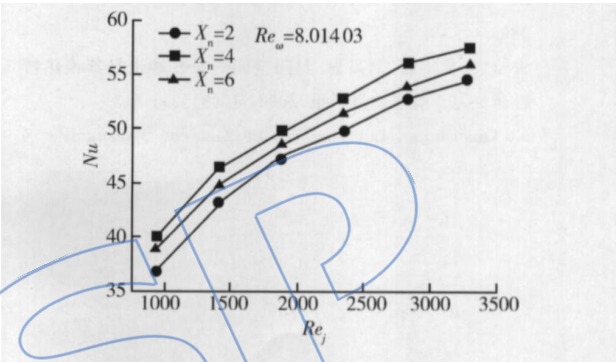


图 6 冲击间距 X_n 对平均换热效果的影响

Fig. 6 Influence of Nu on X_n

间内多孔冲击冷却平均换热特性具有显著的影响, 并且随着冲击雷诺数 Re_j 的增大, 平均换热效果逐渐增强。

(2) 在本文实验条件下, 随着旋转速度的增加, 多孔冲击射流的平均换热效果稍有增强, 但影响幅度不大, 这与低转速下数值模拟得到的结论是一致的。

(3) 实验研究表明, 冲击孔的排列方式不同时冲击射流平均换热效果也有所不同, 叉排式稍优于顺排式。

(4) 在本文实验工况下, 研究得知冲击孔到靶板之间的距离为 4 倍冲击孔直径时, 旋转条件下多孔冲击的平均换热效果最佳。

参考文献:

[1] Sparrow E M, Goldstein R J, Rouf M A. Effect of nozzle surface separation distance on impingement heat transfer for cross flow [J]. Transations of the ASME, Journal of Engineering for Power, 1975: 528-533.

[2] Florschuetz L W, Tseng H H. Effect of nonuniform geometries on flow distributions and heat transfer characteristics for arrays of impinging jets[R]. ASME, 84-GT-156.

[3] Chang Hai ping, Zhang Jing-yu, Zhang Dar lin, et al. Flow

- visualization of a jet impinging on a ribbed surface with cross flow [R], ASME 1996, 96 TA-003.
- [4] Kaiser E. Measurement and visualization of impingement cooling in narrow channels [J], Experiments in Fluids, 2001, 30: 603~ 612.
- [5] Obot N T, Trabold T A. Impingement heat transfer with in arrays of circular jets: Part 1- Effects of minimum, intermediate and complete crossflow for small and large spacing [J]. Transactions of the ASME, 1987, 109: 872~ 879.
- [6] 张净玉, 常海萍. 冲击粗糙壁面复合冷却实验研究 [J]. 航空动力学报, 2001, 16(4): 386~ 389.
- Zhang Jing yu, Chang Hai ping. Experimental investigation on impingement heat transfer from rib roughened surface [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(4): 386~ 389.
- [7] 许全宏, 林宇震, 刘高恩. 封闭空间内单孔冲击局部换热特性研究 [J]. 航空动力学报, 2002, 17(3): 341~ 343.
- Xu Quan hong, Lin Yu zhen, Liu Gao en. Investigation of impingement heat transfer of single hole in a limited space [J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 17(3): 341~ 343.
- [8] Metzger D E, Grochowsky L D. Heat transfer between an impingement jet and a rotating disk [J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 101: 526~ 531.
- [9] Kumar V Akella, Han Jie Chin. Impingement cooling in rotating two pass rectangular channels with ribbed walls [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1999, 13: 364~ 371.
- [10] 吴宏, 陶智, 徐国强, 等. 带气膜出流的旋转叶片冲击冷却的实验研究 [J]. 航空动力学报, 2000, 15(4): 375~ 380.
- Wu Hong, Tao Zhi, Xu Guo qiang, et al. Experiments of impingement cooling in leading edge of rotating blades with outflow film [J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(4): 375~ 380.
- [11] 白云峰. 旋转条件下冲击冷却数值模拟与实验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.