旋转数对凸表面气膜冷却影响的实验分析

赵振明 吴宏伟 丁水汀 徐国强

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院，北京 100191)

摘 要：采用圆弧模型，测量了旋转状态下凸表面气膜冷却效率 η_{ad} 和换热系数 h_f 的分布规律，重点研究旋转数 $Rt=\omega D/u_\infty$ 对气膜冷却的影响. 叶片表面温度采用先进的液晶测温技术进行测量. 结果表明：①在旋转离心力和哥氏力的共同作用下，气膜轨迹向高半径方向发生了明显的偏移，并且转速越高偏移角度越大；②旋转使得气膜冷却效率降低，换热系数上升；③在旋转状态下，气膜发生了分离再附壁的现象.

关 键 词：气膜冷却；曲率；旋转；实验

中图分类号：V 231.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)07-0838-04

Experimental investigation of rotation number effect on film cooling over a convex surface

Zhao Zhenming Wu Hongwei Ding Shuiting Xu Guoqiang

(School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Experimental study was conducted to investigate the influence of rotation number ($Rt=\omega D/u_\infty$) on the film cooling performance over a convex surface. Measurements of film cooling effectiveness η_{ad} and heat transfer coefficient h_f were presented for single film hole. Thermochromic liquid crystal (TLC) was used to obtain the temperature distributions on the curved surface. The results show that ① an obviously deflection occurs under the rotating condition;② with the increase of rotation number, the film cooling effectiveness decrease while the heat transfer coefficient increase;③ a reattachment phenomenon can be observed in the rotating condition.

Key words: film cooling; curved surface; rotating; experiment

气膜冷却是将一股冷却空气从内部通过离散孔或缝槽喷出到需要保护的高温固体表面，使该表面附着一层冷却剂薄膜，以保护气膜孔附近及其下游区域. 气膜冷却是一个复杂的流体掺混过程，气膜的出流会使主流的流场以及主流与固体壁面之间的换热发生剧烈的变化. 因此，深入研究气膜冷却的掺混机理及影响因素具有十分重要的意义. 文献[1]总结了 2004 年以前有关航空发动机涡轮叶片气膜冷却的研究成果.

对于涡轮叶片气膜冷却，表面曲率是影响气膜冷却效果的重要因素. 为此，国内外学者开展了许多有价值的研究.

文献[2]对凸表面气膜冷却的流动及换热进行了详细的实验研究. 文献[3]采用简单的平板和圆弧模型对凹凸表面和平表面的气膜冷却进行了数值研究并同文献[4]所作的平板实验结果进行了对比. 文献[5]首先采用数值模拟的方法对旋转状态下气膜冷却的轨迹和覆盖区域进行了研究.

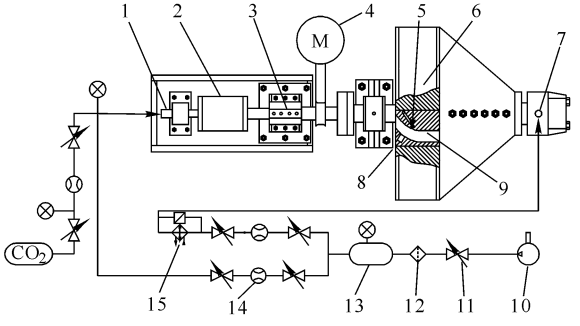
然而从公开发表的文献可以看出，针对旋转状态下涡轮叶片气膜冷却的研究相对较少，而有关旋转弯曲表面气膜冷却的实验数据更是十分缺乏. 为此，本文采用圆弧模型，对不同旋转数下凸表面的气膜冷却效率和换热系数的变化规律进行了详细的实验研究，并采用先进的稳态液晶测温方法得到了旋转状态下的气膜轨迹.

收稿日期：2008-06-18

作者简介：赵振明(1980－)，男，北京人，博士生，laozhao1980@163.com.

1　实验装置与测量方法

实验在北京航空航天大学航空发动机气动热力重点实验室的多功能旋转外换热实验台上完成.图 1 为实验台结构示意图.实验台由实验段,动力系统,供气系统及测试系统等部分组成.有关实验台的详细信息可参考文献[6].



1—冷气入口;2—旋转测试系统;3—引电装置;4—电机;5—气膜孔;6—实验段;7—主流入口;8—CCD 相机;9—主流通道;10—压气机;11—阀门;12—过滤器;13—稳压箱;14—流量计;15—主流加热装置.

图 1　实验台结构示意图

图 2 为实验件三维示意图,图 3 为结构示意图.实验采用夹布胶木材料的圆弧模型,气膜孔位于高度方向中心线上,孔径 $D=4$ mm,流向倾角 30°,展向倾角 90°.在气膜孔下游喷涂宽幅液晶测量叶片表面温度场.图 4 为液晶的标定曲线.由于采用稳态液晶测温技术,实验中为被测试表面提供了充足的稳定时间,使该表面达到近似恒定的温度场.而后采用高像素 CCD 相机捕捉液晶图片,得到被测试表面的温度分布.实验中其它温度数据均采用铜-康铜热电偶进行测量.为模拟绝热壁面边界条件,实验件背面采用黏贴绝热材料的方法进行绝热处理,同时实验台四周也采取绝热措施以减少热损失对实验的影响.

对于换热系数的实验,采用在实验件表面黏贴碳浆加热膜的方法来提供等热流边界条件,碳浆加热膜表面热流密度通过:

$$q=\frac{I^2R}{A} \tag{1}$$

进行计算.其他测试方法与冷却效率实验相同.

实验中固定主流雷诺数 $Re_D=\rho u_\infty D/\mu=4\,798$,旋转数 $Rt=\omega D/u_\infty=0,0.01,0.015\,9$,吹风比 $M=\rho_\infty u_\infty/\rho_c u_c=0.4$ 和 1.2,密度比 $D_R=\rho_\infty/\rho_c=1.02$.

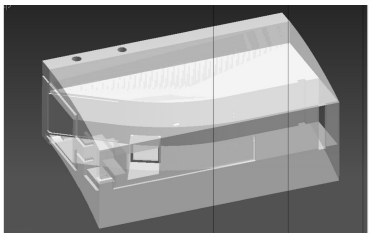
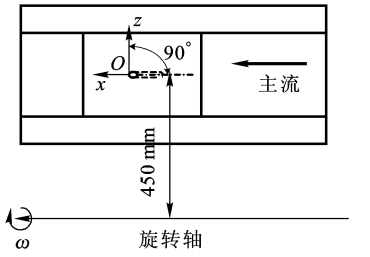


图 2　实验件三维模型



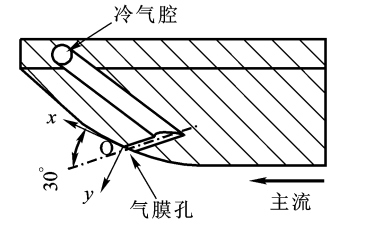


图 3　实验件结构示意图

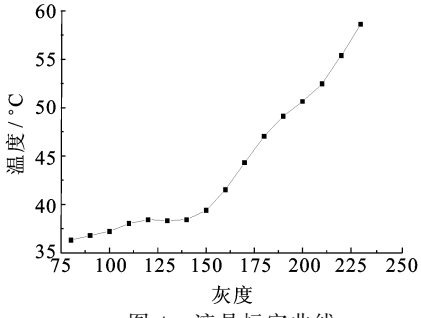


图 4　液晶标定曲线

文中冷却效率和换热系数的定义式分别为

$$\eta_{ad}=\frac{T_g-T_{aw}}{T_g-T_c} \tag{2}$$

$$h_f=\frac{q}{T_{aw}-T_w} \tag{3}$$

式中,T_g 为主燃气温度;T_{aw} 为绝热壁面温度;T_c 为冷气温度.

根据误差传递公式

$$\Delta\eta_{ad}=\sqrt{\left[\frac{T_{aw}-T_c}{(T_g-T_c)^2}\right]^2(\Delta T_g)^2+\left(\frac{1}{T_g-T_c}\right)^2(\Delta T_{aw})^2+\left[\frac{T_g-T_{aw}}{(T_g-T_c)^2}\right]^2(\Delta T_c)^2} \tag{4}$$

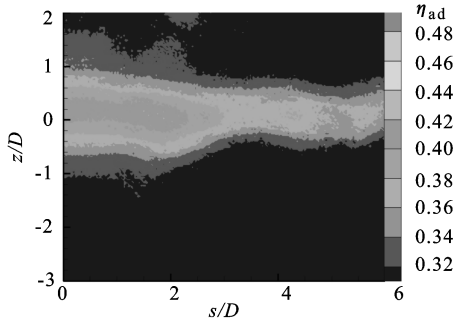
$$\Delta h_f=\sqrt{\left[\frac{q}{(T_{aw}-T_w)^2}\right]^2(\Delta T_{aw})^2+\left(\frac{1}{T_{aw}-T_w}\right)^2(\Delta q)^2+\left[\frac{-q}{(T_{aw}-T_w)^2}\right]^2(\Delta T_w)^2} \tag{5}$$

可得气膜冷却效率的平均实验误差为10.7%,换热系数的平均实验误差为15.0%.

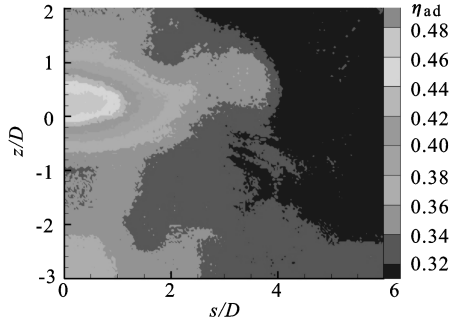
2 结果与分析

2.1 旋转状态下的气膜覆盖区域

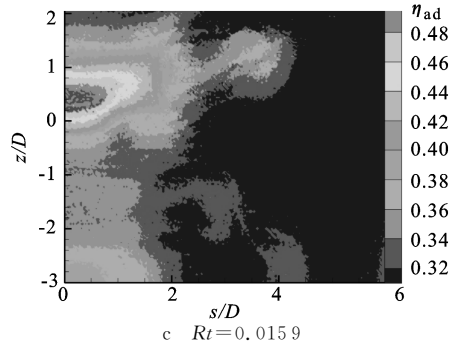
图5为不同旋转数下气膜 η_{ad} 的二维等值线图.其中 s/D(展开弧长)和 z/D(展向距离)为无量纲值.由图5中可以清楚地看到对于静止状态,气膜覆盖区域分布基本对称,并且随 s/D 的增加,主流对冷气的作用越来越明显,使得 η_{ad} 逐渐降低.对于旋转状态,受旋转离心力和哥氏力的共同作用气膜明显向高半径方向偏转.由于在凸表面上哥氏力的方向与离心力相同,起到了强化偏转的作用,因此随着旋转数的提高,气膜沿 z 方向的偏转程度也相应增加.



a $Rt=0$



b $Rt=0.01$



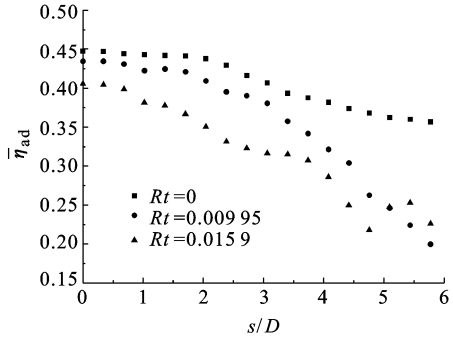
c $Rt=0.0159$

图5 气膜冷却效率的二维等值线图($M=0.4$)

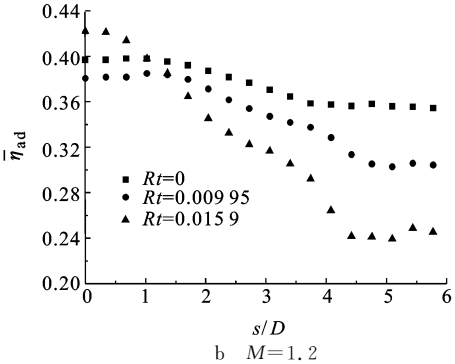
2.2 旋转数对气膜冷却效率的影响

图6为不同旋转数时展向平均的气膜冷却效率 $\bar{\eta}_{ad}$ 随 s/D 的分布规律.

由图6a可以清楚地看到,当 $M=0.4$ 时,对于不同的旋转数,$\bar{\eta}_{ad}$ 随 s/D 的增加都呈下降的趋势,这是因为随着冷气向下游的扩散和发展,其冷却能力逐渐降低,与主流的掺混也逐渐加强.不同的是,对于静止状态,η_{ad} 下降的趋势较缓,并且数值也相对较高,证明此时气膜可以较好的贴附壁面.当旋转数增加时,如图6a中的 $Rt=0.01$ 和 0.0159,η_{ad} 从气膜孔出口处便开始急剧下降,这是因为旋转导致了气膜的分离.对于旋转数最大的 $Rt=0.0159$,η_{ad} 在 $s/D=4.8$ 左右的位置有所上升,而后继续下降,证明此时气膜发生了再附壁.对于 $Rt=0.01$ 的工况,在 $s/D=0\sim6$ 的范围内没有看到再附壁现象的发生.此外,从图6a还可以看到,随着旋转数的增加,气膜 η_{ad} 下降.这可能是由于旋转加剧了主流与冷气的掺混,降低了冷气的冷却能力.



a $M=0.4$



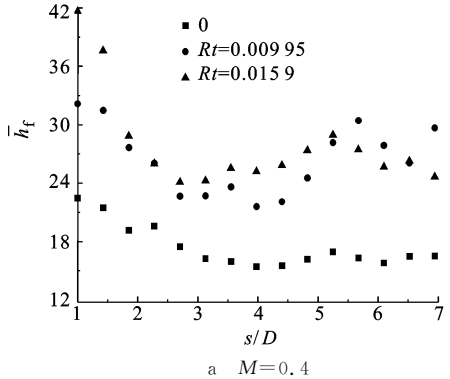
b $M=1.2$

图6 不同旋转数时 $\bar{\eta}_{ad}$ 的分布规律

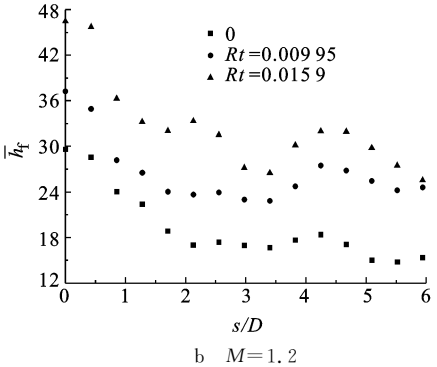
对比图6a和图6b可见,在不同吹风比下旋转对气膜 η_{ad} 分布的影响基本相同,只有在临近气膜孔出口范围内略有差别.当 $M=1.2$ 时,对于静止状态,η_{ad} 下降较平缓,且数值较高($Rt=0.0159$ 的 $0\sim1D$ 范围内除外),证明此时气膜能够相对较好的贴附壁面.而当旋转数增大时,η_{ad} 下降趋势较明显,且在 $4.5D$ 以后有局部上升的趋势,证明此时气膜发生了分离再附壁.

2.3　旋转数对换热系数的影响

图 7 为不同旋转数时展向平均的气膜冷却换热系数 $\overline{h}_f$ 随 s/D 的分布规律. 由图 7a 可见,对于 $M=0.4$ 的实验结果,静止状态时 h_f 随 s/D 的增加单调下降;而旋转状态时,h_f 的数值随 s/D 的增加呈先下降后上升再下降的变化趋势,其波谷出现在 $s/D=3$ 左右的位置,波峰出现在 $s/D=4.5$左右的位置. 正如 2.2 节所分析的,在静止时,气膜能够较好的贴附壁面,因此随着流向距离的增加,边界层得到充分的发展,使得 h_f 逐渐降低;而在旋转状态下,气膜发生了分离再附壁,此时在滞止区内 h_f 较低,而后逐渐上升,并且在再附壁点达到峰值. 此外,随着旋转数的增加,h_f 也有所上升,这主要是旋转使得气膜与主流掺混增强的结果.



a　$M=0.4$



b　$M=1.2$

图 7　不同旋转数时 $\overline{h}_f$ 的分布规律

由图 7b 可见,当 $M=1.2$ 时,实验所得的换热系数的分布规律同 $M=0.4$ 时的结果基本相同. 造成此种分布的主要原因同此前的分析一致,在此不再重述.

3　结　论

本文采用实验的方法对不同旋转数下弯曲表面的气膜冷却效率和换热系数进行了详细的研究,主要结论如下:①在旋转离心力和哥氏力的共同作用下,气膜轨迹向高半径方向发生了明显的偏移,并且转速越高偏移角度越大. ② 旋转使得气膜分离的趋势增强,同时主流与冷气之间的掺混也随之加强,在此情况下,随转速的升高气膜冷却效率降低,而换热系数上升. ③静止状态下气膜在 $M=0.4$ 和 1.2 时附壁性都较好,而对于旋转状态,气膜发生了分离再附壁的现象.

参考文献(References)

[1] 韩介勤,桑地普. 杜达,斯瑞纳斯. 艾卡德著. 燃气轮机传热和冷却技术[M]. 程代京,谢永慧译. 西安:西安交通大学出版社,2005:87－171
Han J C, Dutta S, Ekkad S V. Gas turbine heat transfer and cooling technology [M]. Translated by Cheng Daijing, Xie Yonghui. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005: 87－171 (in Chinese)

[2] Lutum E, Wolfersdorf J V, Semmler K, et al. An experimental investigation of film cooling on a convex surface subjected to favorable pressure gradient flow [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 939－951

[3] Lin Y L, Shih T I-P. Film cooling over flat, convex, and concave surfaces [R]. AIAA-99-0344, 1999

[4] Kohli A, Bogard D G. Adiabatic effectiveness, thermal fields, and velocity fields for film cooling with large angle injections [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1997, 119: 352－358

[5] 陶智,杨晓军,丁水汀,等. 旋转状态下曲率对气膜与主流掺混区域的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2007, 33(2): 132－135
Tao Zhi, Yang Xiaojun, Ding Shuiting, et al. Curvature effects on the film cooling with the rotation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2): 132－135(in Chinese)

[6] Tao Z, Yang X J, Ding S T, et al. Experimental study of rotation effect on film cooling over the flat wall with a single hole [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32: 1081－1089

(责任编辑:张　嵘)