2010年 11月 北京航空航天大学学报 November 2010
第36卷 第11期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol. 36 No. 11

大小孔交替排列对气膜冷却效率的影响

刘晓红 罗 翔 陶 智

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室，北京 100191)

摘 要：采用数值模拟方法研究了大小气膜孔交替排列(均匀排列的圆柱形单孔两侧分别开设一个平行的小孔)情况下的流动和换热，并与常规的圆柱形单孔结构进行对比，分析大小气膜孔交替排列提高冷效的机理，研究大小孔的孔径比对气膜冷却效果的影响规律. 结果发现：在圆柱形单孔两侧分别设置一个平行的辅助小孔，大小孔冷气射流的肾形涡相互干涉，导致主气膜孔下游的肾形涡的尺度和强度与圆柱形单孔相比均有明显降低，气膜冷却效果明显改善. 相同冷气量下，小孔孔径越大，分配的冷气流量越大，对主孔冷气射流的干涉作用越强，气膜冷却效果改善越明显；当小孔孔径 $d_2=4$ mm 时，气膜冷却结构类似常规的离散圆柱形气膜孔，气膜冷却效果开始下降.

关 键 词：气膜冷却；绝热冷效；射流；肾形涡

中图分类号：V 231.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)11-1271-04

Effects of cylindrical hole accompanied with anti-vortex holes on film cooling effectiveness

Liu Xiaohong Luo Xiang Tao Zhi

(National Key Laboratory on Aero-Engines, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The primary focus was to further understand the flow and heat transfer aspects of a special film cooling hole arrangement where the main film cooling hole was accompanied by two parallel anti-vortex jet holes. The cooling effectiveness and the interaction between the main hot stream and the coolant jets were simulated and compared with the standard single hole arrangement. It is found that the presence of anti-vortex jets decreased the size and the strength of the counter-rotating vortex pair of the main coolant jet and so is its mixing with the main hot stream. The surface film effectiveness value is improved as expected. A bigger diameter of anti-vortex holes means more obvious improvement of film cooling.

Key words: film cooling; adiabatic effectiveness; jet; counter-rotating vortex pair

提高燃气涡轮的效率和推重比的关键是提高涡轮前温度，从而应该采取合理的冷却措施保护涡轮叶片等高温部件. 目前为止最行之有效的冷却方式之一是气膜冷却. 影响气膜冷却效果的因素有很多，气膜孔的形状、排列方式、流动参数等等[1]. 其中，孔形气膜冷却一直是研究者关心的重点. 经大量的研究证实，适当改进气膜孔的进出口形状和在气膜孔出口附近设置漩涡扰动结构均可以在一定条件下提高气膜冷却效果，但同时也带来了不可忽视的流动损失，而且部分气膜冷却结构的机械加工难度大，不适宜直接应用到工程设计中. 文献[2－3]在2007年提出一种分叉形气膜冷却结构，并对其进行了初步的数值模拟和实验研究. 由于该结构的基本结构单元是圆柱形孔，大大降低了机械加工的难度，同时还保证了气膜孔下游较高的冷却效果. 本文在分叉形气膜孔的基础上进行改进，在均匀排列的圆柱形单孔两侧分别开设一个平行的辅助小孔，在保证气膜孔下游

收稿日期：2009-10-26

作者简介：刘晓红(1982－)，女，黑龙江肇东人，博士生，lxiaohong@buaa.edu.cn.

的贴壁效果的同时，进一步降低了机械加工的难度. 文中针对该结构开展了初步的三维数值模拟研究，获得了该结构提高气膜冷却效果的机理，以及随小孔几何参数的变化规律. 结果证实：在单孔两侧辅以平行的辅助小孔，在一定条件下可以改善圆柱形单孔的气膜冷却效果.

1 计算模型

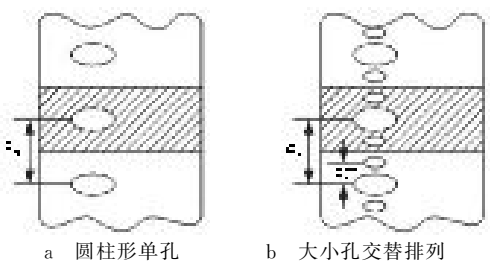
物理模型如图1所示. 大孔孔径 $d=4$ mm，流向倾角 $\alpha=30°$，无展向倾角，孔长 $L/d=6$，主流进口与气膜孔出口中心距离为 $10d$，主流出口与气膜孔出口中心距离为 $30d$，气膜孔展向间距 $P/d=3$.

文中研究了两种气膜孔排列方式：圆柱形单孔和大小孔交替排列(见图2). 大小气膜孔平行排列，小孔孔径为 d_2，大小孔展向间距为 P_1. 计算网格采用结构化六面体网格，近气膜孔区域采用O型网格，壁面附近采用边界层贴体网格，总网格数为100万，并进行了网格无关解计算.

主流进口为速度进口，$U_\infty=50$ m/s，$T_\infty=353$ K；冷气进口 $T_2=293$ K，速度大小由吹风比 $M=\rho_2U_2/\rho_\infty U_\infty$ 确定，其中 ρ_∞，U_∞ 为主流进口处的密度和流速，ρ_2，U_2 为冷气在冷气腔内气膜孔进口处的密度和流速；出口边界取压力出口，出口静压为0 Pa；固体壁面为绝热无滑移边界条件；展向的两个侧面为周期性边界条件. 本文选用 Realizable k-ε 湍流模型[4]，近壁面处采用壁面函数法进行处理，各方程的离散采用二阶迎风差分格式，方程离散收敛残差小于 10^{-5}.



图1 物理模型简图



a 圆柱形单孔 b 大小孔交替排列

图2 气膜孔排列方式

文中用到的气膜冷却效果评价参数为绝热气膜冷却效率(简称：冷效) η：

$$\eta=\frac{T_\infty-T_{aw}}{T_\infty-T_c} \tag{1}$$

其中，T_∞ 为主流温度；T_{aw} 为绝热壁温；T_c 为冷气温度.

文中的计算工况见表1.

表1 计算工况 mm

工况	d	d_2	P_1
圆柱形单孔	4		
工况1	4	1	4
工况2	4	2	4
工况3	4	3	4
工况4	4	4	5

2 计算结果与分析

2.1 计算方法验证

为了验证本文计算方法的准确性，将圆柱形单孔在 $M=0.6$，密度比为1.586时的计算结果与文献[5]和文献[6]的结果进行了对比，见图3. 结果发现本文的计算结果与文献的计算结果基本符合，并且规律一致.

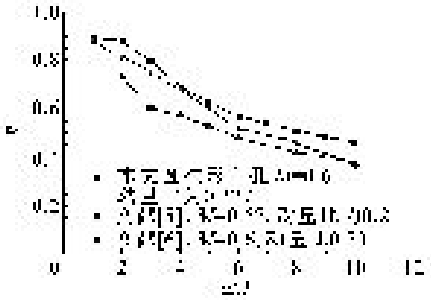


图3 本文计算结果与文献进行对比

2.2 大小孔交替排列提高冷却效果的机理分析

本文对比了圆柱形单孔和大小孔交替排列两种结构在不同 M 下的绝热冷效分布，见图4、图5，图中 $x/d=0$ 为气膜孔中心，$x/d=1$ 为气膜孔出口的下边缘. 圆柱形单孔，除 $M=2.0$ 以外，相同 M 下，冷效随着无量纲距离 x/d 的增加很快降低并逐渐趋于平缓；$M=2.0$ 时，气膜孔下游的冷效先减小再缓慢增加. 冷效最高出现在 $M=0.5$ 左右，随着 M 的增大，冷效单调降低，结论与现有文献基本一致. 大小孔交替排列，绝热冷效与相同 M 下的圆柱形单孔相比有很大提高. 低 M 下，随无量纲距离 x/d 的增加，主气膜孔下游的中心线冷效和展向平均冷效逐渐减小直至平板尾缘. 高 M 下，近气膜孔区域的冷效随 M 增加逐渐减小，而远离气膜孔区域的冷效随 M 增加先增大再减小. M 越大，大小孔交替排列对圆柱形单孔的气

膜冷却效果改善越明显.

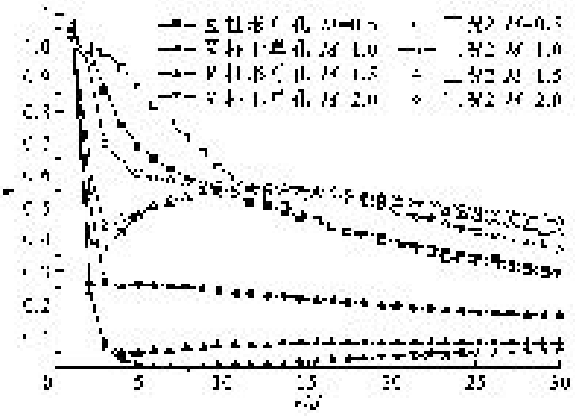


图 4　中心线冷效

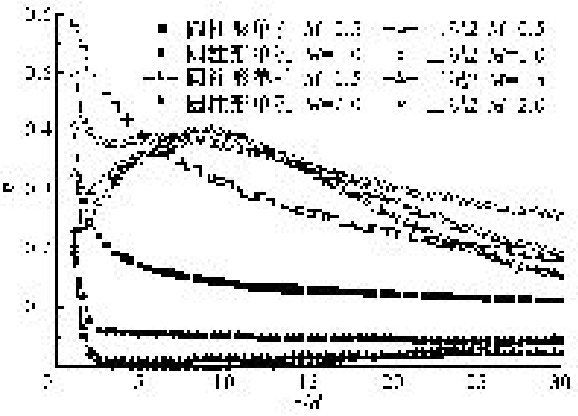


图 5　展向平均冷效

经研究证实,气膜冷却射流在与主流的作用过程中形成了 4 类大尺度的涡系结构:剪切涡、马蹄涡、尾迹涡和肾形涡[7].其中,肾形涡控制气膜冷却射流的流动状态,是影响气膜冷却效果的关键因素.本文以工况 2、$M=1.0$ 的计算结果为例,分析大小孔交替排列提高气膜冷却效果的机理.

图 6 为 $M=1.0$,气膜孔下游 4 个垂直于主流截面($x/d=2$,$x/d=5$,$x/d=8$,$x/d=12$)的流线图.图 7 为 $M=1.0$,主气膜孔下游的涡量分布情况.圆柱形单孔,在 $x/d=2$ 处肾形涡刚刚形成,尺度较小;在 $x/d=2\sim5$ 区域内,肾形涡的尺度和中心高度很快增大,射流与主流的掺混更加充分,解释了冷效从气膜孔出口开始很快减小的原因;在 $x/d=5\sim12$ 区域内,肾形涡的尺度变化不大,冷效也趋于平缓.肾形涡的涡量在紧邻气膜孔处为最大值,随着 x/d 的增加,涡量迅速减小,肾形涡对主流的卷吸作用和对射流的向上抬升作用均减弱,但此处的冷气已经与主流掺混,冷却品质已大大降低,所以冷效仍然呈降低趋势.当 $x/d>10$ 时,涡量几乎不再变化,冷效也趋于平缓.相同冷气量下,由于小孔射流的干涉作用,大小孔交替排列的主孔肾形涡的尺度与圆柱形单孔相比明显减小,冷气与主流的掺混减弱,中心线冷效明显提高;肾形涡的强度(涡量)也明显减小,在涡量峰值处,主孔肾形涡的涡量降低了 1/3 左右,对主流的卷吸作用减弱,避免射流冲破主流脱离壁面,提高冷却效果;另一方面,辅助小孔的存在引起冷气流量的分配,从主孔流出的冷气流量与圆柱形单孔相比明显减少(甚至可达到 50% 左右),主孔吹风比大大减小,冷却效果提高.同时,小孔的冷气射流增加了气膜孔下游冷气的展向覆盖宽度,展向平均冷效提高.所以,一定条件下,大小气膜孔交替排列方式可以有效地提高气膜冷却效果.



a　圆柱形单孔



b　工况 2

图 6　气膜孔下游、垂直于主流截面的流线图

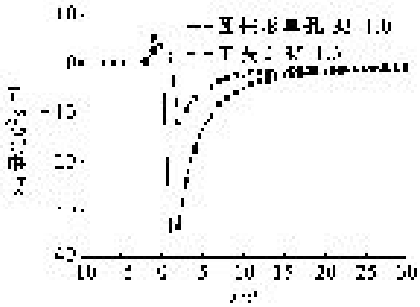


图 7　气膜孔下游肾形涡的涡量(x 分量)

2.3　大小孔交替排列绝热冷效随小孔孔径变化

本文还比较了相同冷气流量下,小孔孔径对冷却效果的影响,如图 8、图 9 所示.明显看出:大小孔的展向间距相同时,随着小孔孔径的增加,中

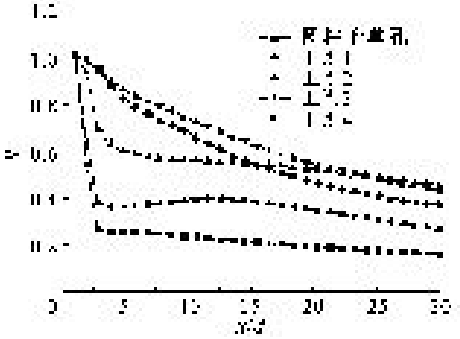


图 8　中心线冷效

心线冷效和展向平均冷效均有所提高，气膜冷却效果的改善越明显；但并不是无限制增加，当小孔孔径 $d_2>3$ mm 时，气膜冷却效果开始下降.

表 2 为大小孔冷气流量分配情况. 图 10 为主气膜孔下游肾形涡的涡量分布情况. 图 11 为气膜孔下游的不同截面的流线图. 当孔径比较小时（$d_2=1$ mm），从小孔流出的冷气流量很小（还不及总流量的 10%），小孔射流产生的肾形涡尺度和强度都很小，而且小孔与主孔的相对展向距离（$P_1/d_2=4$）较大，所以，小孔射流对主孔的冷气射流的干涉作用微乎其微，气膜冷却效果改善最不明显. 随着 d_2 的增加，主孔的冷气流量减少，吹风比降低，并逐渐接近圆柱形单孔的最佳吹风比，在近气膜孔区域，主孔气膜出流形成的肾形涡的强度减弱，冷却效果增强；在气膜孔下游，主孔肾形涡的尺度随主孔吹风比的减小而减小，射流与主流的掺混减弱，冷却空气品质提高，冷却效果提高. 同时，小孔的冷气流量增加，吹风比增加，冷气射流形成的肾形涡对主孔射流的干涉作用逐渐增强，促进气膜冷却效果的提升. d_2 越大，小孔射流冷气对壁面的展向覆盖宽度增加，展向平均冷效越高. 本文计算范围内，$d_2>3$ mm 时，气膜冷却结构类似常规的离散圆柱形气膜孔，气膜冷却效果开始下降.

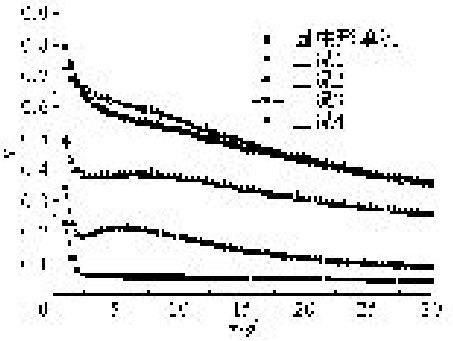


图 9 展向平均冷效

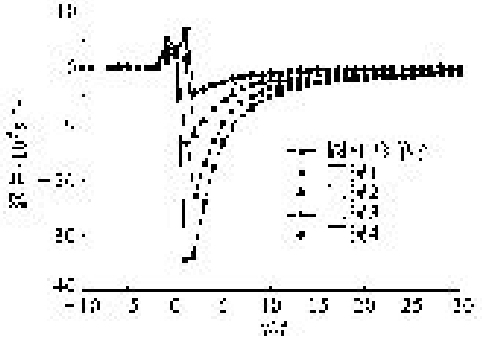


图 10 主气膜孔下游肾形涡的涡量（x 分量）



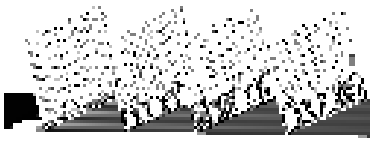
a 工况 1



b 工况 2



c 工况 3



d 工况 4

图 11 气膜孔下游、垂直于主流截面的流线图

表 2 大小孔冷气流量分配 %

工况	主孔冷气流量	小孔冷气流量
工况 1	90.3	9.7
工况 2	67.9	32.1
工况 3	47.6	52.4
工况 4	33.3	66.7

3 结 论

本文对大小气膜孔交替排列情况下的流动和换热进行了三维数值模拟，分析气膜孔下游肾形涡的相互作用过程对气膜冷却效果的影响，并与普通圆柱形单孔的计算结果进行对比. 分析了大小气膜孔交替排列提高冷效的机理，研究了大小孔的孔径比对气膜冷却效果的影响规律，验证了这种气膜孔排列方式在一定条件下改善气膜冷却效果的可行性.

相同冷气量下，在单孔两侧辅以平行的辅助小孔，一定条件下可提高中心线冷效 0.1～0.3，同时，由于两侧伴随小孔的存在，冷气的展向覆盖宽度明显增加，展向平均冷效提高 0.15～0.45. 原因是：在两侧小孔射流的干涉作用下，主气膜孔下游的肾形涡的尺度和强度与圆柱形单孔相比均明显降低，减弱射流与主流的掺混和射流脱离壁面的能力，冷气贴壁能力增强，提高冷却效果. 同时，冷气流量的分配，也是气膜冷却效果提高的原因之一. d_2 的大小严重影响大小孔的冷气流量分配，一定范围内，d_2 越大，气膜冷却效果的改善越明显；当 $d_2=4$ mm 时，气膜冷却结构类似常规的离散圆柱形气膜孔，气膜冷却效果开始下降.

（下转第 1280 页）

6 结 论

1）并联机构的整机刚度与所受外载荷和动平台的位姿参数有关；

2）并联机构的整机刚度主要受支链刚度与铰链刚度的共同影响；

3）在大载荷的作用下，尤其当并联机构动平台运动在工作空间边界处时，由简化刚度模型与完整刚度模型所求得的机构动平台位姿偏移量差值较大，最大差值甚至相差1倍.

参考文献（References）

[1] Gosselin C. Stiffness mapping for parallel manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(3): 377－382

[2] EI-Khasawneh B S, Ferreira P M. Computation of stiffness and stiffness bounds for parallel link manipulators[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(2): 321－342

[3] 王世军，黄玉美. 并联机床支链刚度及载荷的确定方法[J]. 西安理工大学学报，2004，20(2)：117－121
Wang Shijun, Huang Yumei. Determination method of branch stiffness and load for parallel machine tool[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2004, 20(2): 117－121(in Chinese)

[4] Huang Tian, Zhao Xingyu, Whitehouse D J. Stiffness estimation of a tripod-based parallel kinematic machine[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(1): 50－58

[5] Anatol P, Damien C, Philippe W. Stiffness analysis of over-constrained parallel manipulators[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(5): 966－982

[6] 陈吉清，兰凤崇. Stewart并联机构瞬时刚度分析与应用[J]. 南京理工大学学报，2007，31(4)：482－486
Chen Jiqing, Lan Fengchong. Instantaneous stiffness analysis and application in Stewart parallel machine tools[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(4): 482－486(in Chinese)

[7] Chen J, Lan F. Instantaneous stiffness analysis and simulation for hexapod machines[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16(4): 419－428

[8] 赵铁石，赵延治，边辉，等. 空间并联机构连续刚度非线性映射[J]. 机械工程学报，2008，44(8)：20－25
Zhao Tieshi, Zhao Yanzhi, Bian Hui, et al. Continuous stiffness nonlinear mapping of spatial parallel mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 20－25(in Chinese)

[9] 曾宪菁. 球面并联机构运动学设计理论与方法[D]. 天津：天津大学机械工程学院，2001
Zeng Xianjing. The kinematics design of spherical parallel manipulator[D]. Tianjin: School of Mechanical Engineering, Tianjin Unversity, 2001(in Chinese)

[10] 黄真，赵永生，赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京：高等教育出版社，2006：29－30
Huang Zhen, Zhao Yongsheng, Zhao Tieshi. Advanced spatial mechanism[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 29－30(in Chinese)

[11] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京：清华大学出版社，2000：66－72
Cai Zixing. Robotics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 66－72(in Chinese)

（编 辑：文丽芳）

（上接第1274页）

参考文献（References）

[1] 韩介勤，桑地普·杜达，斯瑞纳斯·艾卡德. 燃气轮机传热和冷却技术[M]. 西安：西安交通大学出版社，2005：87－163
Han J Q, Dutta S, Ekkad S V. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005: 87－163 (in Chinese)

[2] Dhungel A, Lu Y P, Phillips W, et al. Film cooling from a row of holes supplemented with anti-vortex holes[R]. ASME Paper GT2007-27419, 2007

[2] Heidmann J D, Ekkad S V. A novel anti-vortex turbine film-cooling hole concept[R]. ASME Paper GT2007-27528, 2007

[4] Silieti M, Kassab A J, Divo E. Film cooling effectiveness: comparison of adiabatic and conjugate heat transfer CFD models[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(12): 2237－2248

[5] Schmidt D L, Sen B, Bogard D G. Film cooling with compound angle holes: adiabatic effectiveness[J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118(4): 807－813

[6] Sinha A, Bogard D G, Crawford M. Film cooling effectiveness downstream of a single row of holes with variable density ratio[J]. Journal of Turbomachinery, 1991, 113(3): 442－449

[7] 张燕. 横流冲击射流漩涡结构的实验和数值研究[D]. 上海：上海大学，上海市应用数学和力学研究所，2005
Zhang Yan. Experimental and numerical investigations on the vertical structures of an impinging jet in crossflow[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Mathematics, Shanghai University and Mechanics, 2005(in Chinese)

（编 辑：张 嵘）