

文章编号: 1000-8055(2009)07-1488-05

双排簸箕形气膜孔下游换热研究

郭 涛, 朱惠人, 许都纯
(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 对双排差排簸箕形气膜孔排下游的换热进行了实验研究, 测量了孔排下游的局部换热系数分布, 分析了孔排下游换热系数比的分布以及吹风比、气膜孔出流雷诺数和孔排距对平均换热系数比的影响。结果表明: 相对单排气膜孔出流的情况, 双排气膜孔下游换热有所增强, 但分布更均匀; 换热系数比随吹风比的增加先减小后增大, 在吹风比为 1.0 时达到最小; 双排气膜孔出流对换热的增强效果随孔排距的增加先增大后减小, 在孔排距为 $10D$ 时最大。

关 键 词: 簸箕形孔; 气膜冷却; 换热

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Investigation on film cooling heat transfer for double row dust-pan shaped holes

GUO Tao, ZHU Huiran, XU Dunchun

(School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Film cooling heat transfer for injection from single row and double row dust-pan shaped holes has been investigated experimentally. Distributions of heat transfer coefficients at downstream holes were measured. The effects on average heat transfer coefficient ratio by distribution of heat transfer coefficients, blowing ratio, Reynolds number of jet flow and distance between rows were analyzed. The Reynolds numbers of jet flow were between 5000 and 15000, the blowing ratios from 0.5 to 2.0, and the distances between rows were $5D$, $10D$ and $15D$. The results indicate that the heat transfer downstream the double row film cooling holes is enhanced and the distributions are more uniform as compared with the case of the flow injection from single row holes. The heat transfer coefficient ratio increases firstly and then decreases with the increase of blowing ratio; the lowest value is at the blowing ratio of 1.0. The heat transfer enhancement increases and then decreases with the increase of the distance between rows, and is highest when the distance between rows is $10D$.

Key words: dust-pan shaped holes; film cooling; heat transfer

气膜冷却是对燃气轮机高温部件表面进行冷却的有效方式。由于气膜孔出流对部件表面的覆盖和与主流的掺混, 气膜孔下游区域的流动和换热发生突变, 必须考虑换热分布规律的变化, 才能更准确的预测叶片表面相关区域的温度分布。文

献[1]研究了气膜孔形状对孔排下游的换热的影响; 文献[2]对单排簸箕形气膜孔下游的换热和冷却效率进行了研究。结果表明, 具有扩张形出口的扇形孔和簸箕形孔在孔中心线下游附近区域的换热系数较圆柱形孔小, 更有利于在相对较高的吹

收稿日期: 2008-07-13; 修订日期: 2008-12-30

作者简介: 郭涛(1976-), 男, 吉林四平人, 工程师, 硕士, 主要从事航空宇航推进器高温部件传热及冷却技术和传热实验方法研究。

风比下减小高温部件的热负荷; 相对于单个气膜孔, 排孔下游由于存在气膜孔出流之间的汇合, 对换热有增强作用. 在实际冷却结构中, 通常是多排气膜孔同时采用, 亦有较多学者对孔排间的相互影响进行了研究. 文献[3]的研究发现扩张型气膜孔在双排孔出流时具有较大优势. 文献[4]针对圆柱形和扇形气膜孔, 在较大排间距下(10*D*~30*D*)研究了吹风比对下游换热的影响, 研究表明下游气膜孔出流对换热影响更大, 排间距增大, 孔排下游换热减弱. 文献[5]针对圆柱形气膜孔, 研究了气膜孔倾角、孔间距和排布方式对单排和双排气膜孔下游换热分布的影响. 文献[6]针对双排圆柱形气膜孔, 研究了方位角对下游流动结构的影响. 本文将针对簸箕形气膜孔, 研究出流雷诺数、出流比、排间距等因素对双排气膜孔下游换热的影响规律.

1 实验装置

本研究在回流式风洞中进行, 实验系统如图 1 所示, 风洞矩形试验段尺寸为 2.2 m×0.5 m×0.27 m, 实验段进口前收缩比为 7.69:1, 实验段顶板和两侧板由有机玻璃制成, 底板装有气膜孔实验件, 换热测量区域位于实验件下游, 该区域底板为硬质塑料, 外侧有 100 mm 的保温层, 其导热系数约为 0.03~0.04 W/(m·K), 防止实验中的热损失. 风洞内侧测量区域上覆盖有串联连接的不锈钢电加热带, 保证实验时热流密度均匀. 考虑到对称性, 在中间孔下游半侧区域的加热带背面焊有直径 0.1 mm 的镍铬-镍硅热电偶 90 个. 风洞由变频器无级调速.

轴线与壁面的夹角为 30°, 簸箕形底面与圆柱轴线夹角为 15°. 气膜孔间距为 6*D*. 排间距 *D_w* 分别为 5*D*, 10*D* 和 15*D*. 测试区域的位置和坐标系如图 2 中阴影部分所示, 测量区域的坐标原点位于图中所示气膜孔出口下沿的中点.

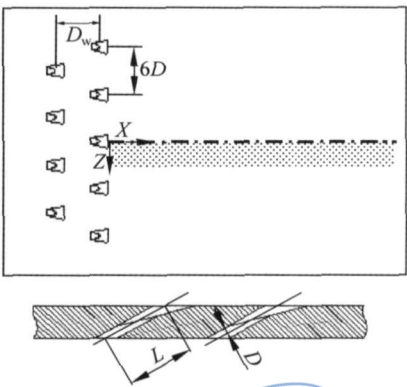


图 2 簸箕形孔排及孔形示意图
Fig 2 Configuration of hole rows and hole shape

气膜孔出流从主流取出, 通过实验件下方的稳压箱经气膜孔射入主流, 以保证主流和出流的温度一致以及气膜孔入口压力均匀. 气膜孔出流量由浮子流量计测量.

实验时, 给实验件下游壁面上的加热钢带通直流电加热, 气膜孔出流与主流温度相同且低于壁面 15 °C 左右, 此时, 局部换热系数定义为

$$H_{i,j} = \frac{q_{w,i,j} - q'}{t_{w,i,j} - t_{aw}} = \frac{q_{w,i,j} - q'}{t_{w,i,j} - t_{\infty}} \tag{1}$$

其中 $q_{w,i,j}$ 是根据电加热功率确定的热流密度, q' 为壁面导热和钢带辐射引起的热损失, t_{aw} 为绝热壁温, t_{∞} 为主流温度, 实验中主流温度与气膜孔出流温度相同, 因而有 $t_{aw} = t_{\infty}$.

出流雷诺数定义为

$$Re_2 = \frac{\rho_2 U_2 D}{\mu} \tag{2}$$

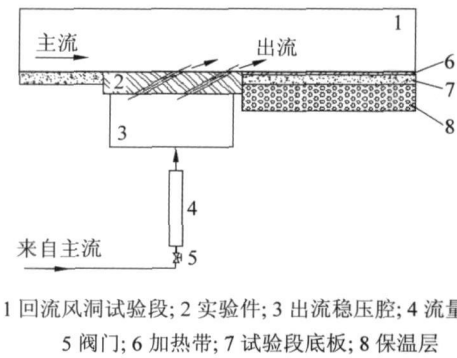
吹风比定义为

$$M = \frac{\rho_2 U_2}{\rho_{\infty} U_{\infty}} = \frac{U_2}{U_{\infty}} \tag{3}$$

式中 ρ_2 和 ρ_{∞} 分别为气膜孔出流和主流的密度, U_2 和 U_{∞} 为气膜孔出流和主流的速度. 不考虑压缩性, 认为 $\rho_2 = \rho_{\infty}$. μ 为动力黏性系数.

2 实验结果及分析

实验研究工况为: 气膜孔出流雷诺数 $Re_2 = 5000 \sim 15000$, 吹风比 $M = 0.5 \sim 2.0$ 为使结果



1 回流风洞试验段; 2 实验件; 3 出流稳压腔; 4 流量计;
5 阀门; 6 加热带; 7 试验段底板; 8 保温层

图 1 实验系统图
Fig. 1 Sketch of the test facility

气膜孔实验件结构如图 2 所示. 簸箕形孔的长径比 $L/D = 6$, 圆柱部分直径 $D = 15 \text{ mm}$, 圆柱

更具有普遍性,将结果表示为换热系数比 H/H_0 的形式,即:有气膜孔出流时的换热系数 H 与无气膜孔出流时的换热系数 H_0 的比值, H_0 由实验测出.

2 1 换热系数比的分布

图 3 和图 4 分别是气膜孔出流雷诺数 $Re_2=10000$ 、吹风比 $M=0.7$ 和 1.5 时,单排和双排(排间距 $D_w=5D$)气膜孔下游换热系数比 H/H_0 的分布.在本文所进行实验中,在高吹风比和低吹风比工况下,换热系数比的分布规律有所不同.单排气膜孔出流状态下,低吹风比时,如图 3(a)所示,气膜孔排下游中心线附近靠近气膜孔出口处换热系数比小于 1,呈深沟状向下游延伸,深度逐渐变浅,这表明低吹风比时,气膜孔排的出流较好的覆盖在表面.由于速度相对较低,对主流扰动较小,在气膜孔下游远离中心线处换热系数较无出流情况提高不大.随着吹风比的提高,如图 3(b)所示,

气膜孔出口下游换热系数比的深沟状分布依然存在,由于出流更深的进入主流,对主流的扰动和掺混增强,气膜孔下游的换热系数比无出流情况有所提高,靠近气膜孔出口处的换热系数比提高更大,且沿 Z 方向偏离气膜孔时换热系数比先增大后减小,这一高值区域是出流产生的涡旋影响最为强烈的区域.

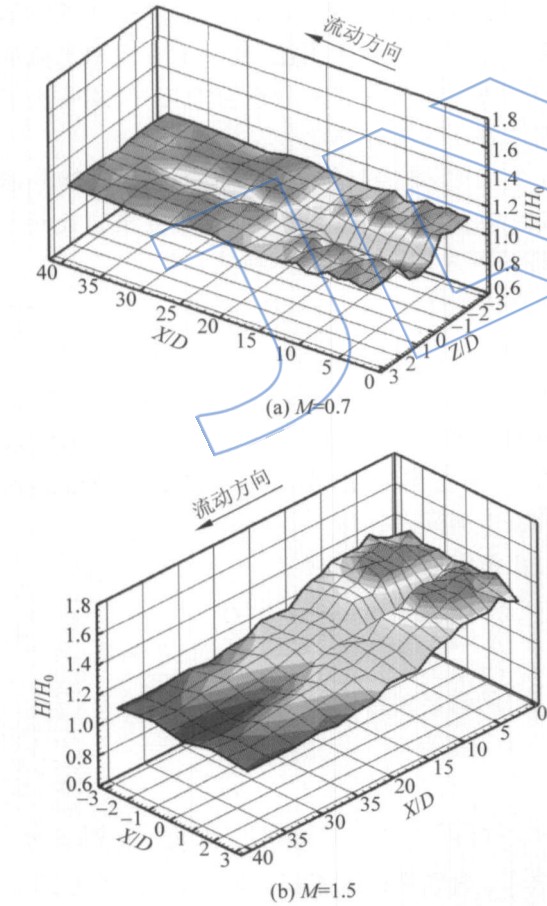


图 3 单排孔下游换热系数比的分布($Re_2=10000$)
Fig 3 Heat transfer ratio distributions at the downstream of single row film cooling holes ($Re_2=10000$)

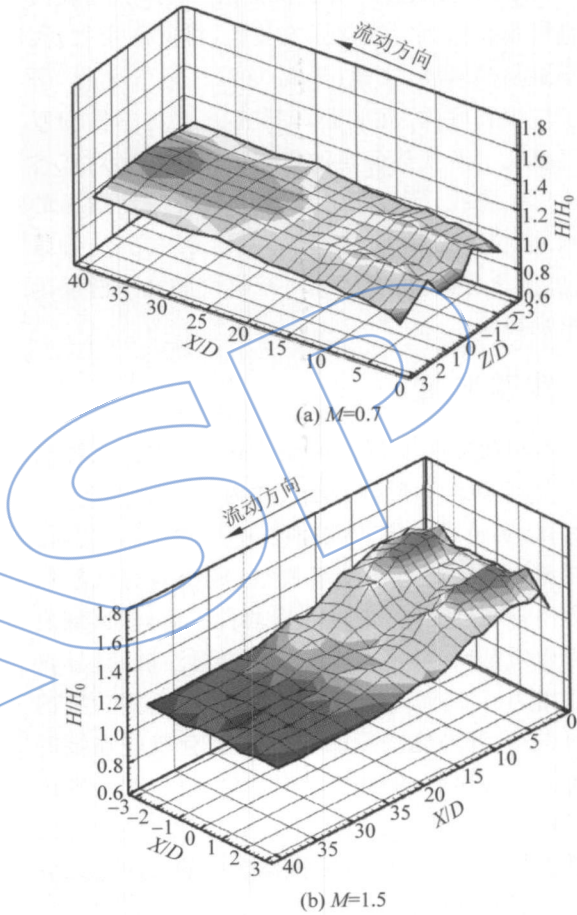


图 4 双排孔下游换热系数比的分布
($D_w=5D, Re_2=10000$)

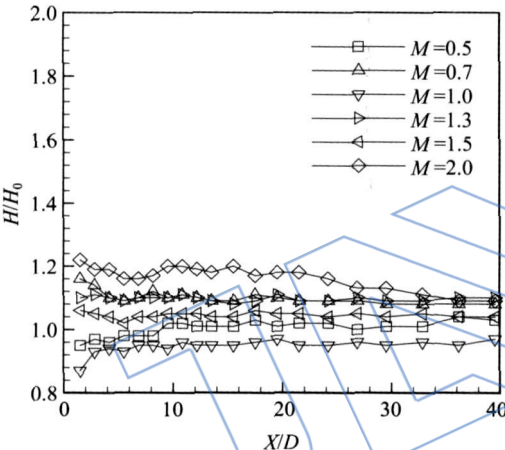
Fig 4 Heat transfer ratio distributions at the downstream of double row film cooling holes ($D_w=5D, Re_2=10000$)

双排气膜孔出流时,如图 4 所示,由于上下游两排气膜孔差排布置,下游气膜孔孔间位置($Z/D=\pm 3$)恰好对应上游气膜孔出口的中心线,相对单排气膜孔出流的情况,该位置附近的换热系数比有所降低.在上游气膜孔出口中心线($Z/D=\pm 3$)附近和下游气膜孔出口中心线($Z/D=0$)附近两个低换热系数比区域的影响下,下游气膜孔孔排出口附近的换热系数比 H/H_0 与单排气膜孔出流的情况相比显著降低.由于双排气膜孔出流对

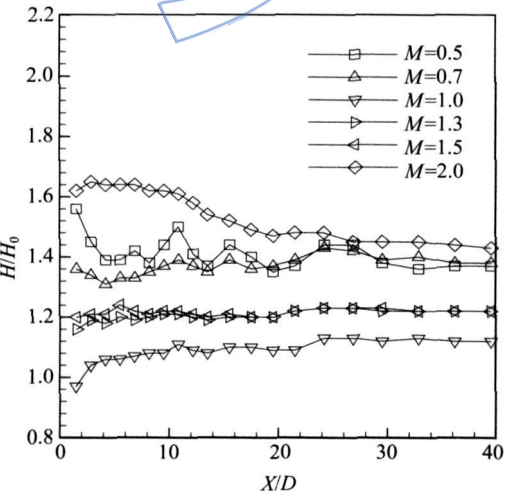
下游扰动增强, 使主流与出流较快掺混, 换热系数比也在 Z 方向较快趋于一致.

2.2 吹风比的影响

图 5 是出流雷诺数 $Re_2 = 15000$ 时, 不同吹风比下 Z 方向平均换热系数比在 X 方向变化的情况. 无论出流是单排还是双排, 换热系数比在吹风比 $M = 2.0$ 时最大, $M = 1.0$ 时最小. 吹风比由小到大变化时, 换热系数比 H/H_0 先减小, 在 $M = 1.0$ 时最低, 其原因主要是气膜出流形成的低换热区的影响范围随吹风比的增大而增大. $M > 1.0$ 后, 吹风比继续增大, H/H_0 随之增大, 原因在于大吹风比下, 出流更深的进入主流, 对壁面上方气流的扰动增强, 从而增强了换热. 双排出流与单排出流的不同在于: 各吹风比下, 双排出流时 H/H_0 的 Z 向平均值较单排出流大.



(a) 单排气膜孔出流



(b) 双排气膜孔出流 ($D_w = 10D$)

图 5 吹风比对换热的影响 ($Re_2 = 15000$)
Fig 5 Effect of blowing ratio on heat transfer
($Re_2 = 15000$)

2.3 出流雷诺数的影响

需要指出的是: 当吹风比保持不变时, 出流速度提高, 主流速度按比例提高. 出流雷诺数对于单、双排孔出流的影响规律类似, 以孔排距 $D_w = 10D$, $M = 0.5$ 的情况为例, 如图 6 所示, 出流对换热的影响一直向下游延续. 这主要是由于上游孔排出流增强了对主流的扰动造成的; 在 $X/D > 10$ 后, H/H_0 基本保持不变; 随出流雷诺数的提高, 换热系数比增大. 出流雷诺数对单、双排气膜孔出流影响的差别仅在于: 单排出流时, $X/D > 10$ 后 H/H_0 保持在 1 附近, 即出流的影响只出现在气膜孔附近, 而双排出流时相应区域 H/H_0 较大, 出流影响范围较远.

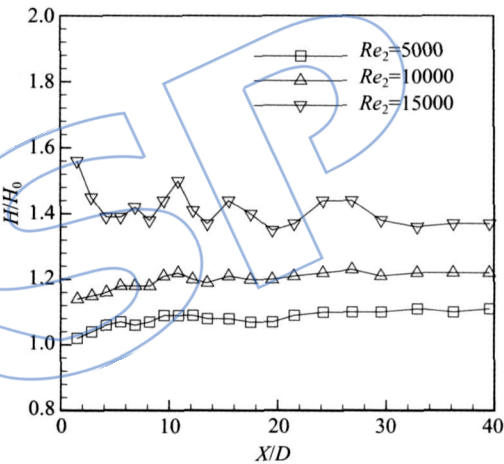


图 6 出流雷诺数对换热的影响
($D_w = 10D$, $M = 0.5$)

Fig. 6 Effect of jet flow Reynolds number on
heat transfer
($D_w = 10D$, $M = 0.5$)

2.4 孔排距的影响

图 7 是 $Re_2 = 15000$, $M = 0.5$ 时孔排距对换热的影响. 孔排距增加, 换热系数比先增大, 后减小. 单排孔和孔排距为 $15D$ 时换热系数比处于较低水平, 孔排距为 $5D$ 和 $10D$ 时换热系数比相对较高. 这说明双排孔对换热的增强作用高于单排孔. 增强作用的大小取决于双排气膜孔出流的相互影响和与主流的掺混情况. 上游气膜孔排的存在使下游气流扰动增强, 换热随之增强. 当排距较小时, 上游气膜孔出流之间, 以及与主流之间的掺混和扰动尚未充分发展, 对下游换热增强较弱, 排距增大, 上游出流使得下游气膜孔出流上方扰动增强, 出流与主流掺混增强使换

热增强效果加大. 当排距较大时, 上游气膜孔排对下游换热的影响十分有限, 此时换热情况与单排孔出流时类似.

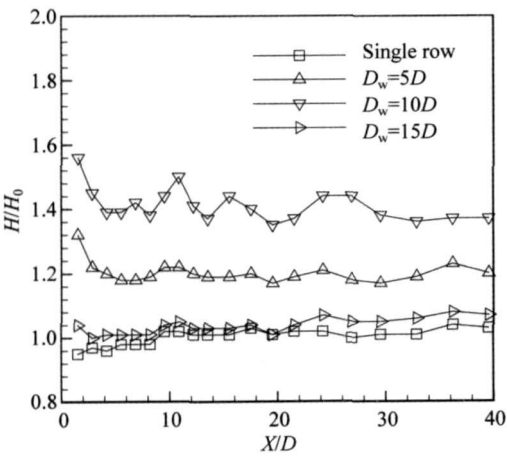


图 7 排间距对换热的影响($Re_2=15\,000$, $M=0.5$)

Fig 7 Effect of hole row distances on heat transfer
($Re_2=15\,000$, $M=0.5$)

3 结 论

- 1) 相对于单排气膜孔出流, 双排簸箕形气膜孔差排布置会使下游换热系数比在 Z 方向上趋于平缓. 同时使换热较单排孔时有所增强.
- 2) 对于本文所研究的工况, 双排气膜孔出流时, 换热系数比随吹风比和出流雷诺数的变化规律与单排孔的情况类似. 换热系数比在 $M=1.0$ 时最小, $M=2.0$ 时最大. 换热系数比随出流雷诺数的提高而增大.

3) 双排气膜孔出流会使下游换热系数比提高, 这种影响在排间距为 $10D$ 时最显著, 排间距继续增大, 影响减小.

参考文献:

- [1] 朱惠人, 许都纯, 郭涛, 等. 气膜孔形状对排孔下游换热的影响[J]. 航空动力学报, 2001, 16(4): 360-364
ZHU Huiren, XU Duchun, GUO Tao, et al. Effect of film cooling hole shape on heat transfer[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(4): 360-364 (in Chinese)
- [2] 朱惠人, 许都纯, 刘松龄, 等. 簸箕形排孔气膜冷却实验研究[J]. 航空学报, 1997, 18(5): 536-538
ZHU Huiren, XU Duchun, LIU Songling, et al. film cooling experimental investigation of a row of dust pan shaped holes[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1997, 18(5): 536-538 (in Chinese)
- [3] Chen P H, Hung M S, Ding P P. Film cooling performance on curved walls with compound angle hole configuration[J]. Annals of The New York Academy of Sciences, 2001, 934: 353-360.
- [4] Saumweber C, Schulz A. Interaction of film cooling rows: Effect of hole geometry and row spacing on the cooling performance downstream of the second row of holes[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2004, 126(1): 237-246
- [5] Yuen C H N, Martinez Botas R F. Film cooling characteristics of row of round holes at various stream wise angles in a crossflow: Part II—Heat transfer coefficients[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 5017-5035
- [6] Ahn J, Jung I S, Lee J S. Film cooling from two rows of holes with opposite orientation angles: Injectant behavior and adiabatic film cooling effectiveness[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24: 91-99