

DOI: 10.19666/j.rlfed.202307117

双叉排气膜孔交互作用对气膜冷却效率影响

林泽钦¹, 温涛², 王宇清³

(1. 华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 广东理工职业学院机器人学院, 广东 中山 528400;

3. 太原理工大学机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

[摘要] 采用高精度红外热像仪测量了平板气膜冷却效率, 比较了双叉排孔和单排孔气膜冷却效率, 分析了孔间的相互作用, 以及吹风比 ($M=0.65, 1.00, 1.50$) 和密度比 ($DR=1.0, 1.5$) 对气膜冷却效率的影响; 同时还采用数值计算方法比较了气膜冷却下的流场。结果表明: 单排气膜孔冷却效率随着吹风比的增加而降低, 但是双叉排气膜孔冷却效率大大提高, 且随着吹风比的增加而增加, 但是在展向气膜覆盖效果变差; 增加密度比可以提高气膜冷却效率, 但是双叉排孔和吹风比的影响相对密度比更大; 双叉排孔相比于单排孔, 冷却气流在孔下游形成了反肾形涡, 较好抑制了气膜吹离。

[关键词] 涡轮叶片; 气膜冷却; 冷却效率; 双叉排气膜孔; 流动与传热

[引用本文格式] 林泽钦, 温涛, 王宇清. 双叉排气膜孔交互作用对气膜冷却效率影响[J]. 热力发电, 2024, 53(2): 78-85.
LIN Zeqin, WEN Tao, WANG Yuqing. Effect of double rows of film holes interaction on film cooling efficiency[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(2): 78-85.

Effect of double rows of film holes interaction on film cooling efficiency

LIN Zeqin¹, WEN Tao², WANG Yuqing³

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Electrical and Mechanical College, Guangdong Polytechnic Institute, Zhongshan 528400, China;

3. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The cooling efficiency of flat film was measured using a high-precision infrared thermal imager, and the film cooling efficiency between double-cross-row holes and single row holes is compared. The interaction between film holes and the influence of blowing ratio ($M=0.65, 1.0, 1.5$) and density ratio ($DR=1.0, 1.5$) on the cooling efficiency was analyzed. Moreover, the flow field with film cooling was compared using numerical calculation methods. The results show that, with the increase of the blowing ratio, the cooling efficiency of the single row holes decreases while that of the double-cross-row holes improved greatly, but the film coverage effect at the spanwise direction deteriorates. Increasing the density ratio will improve the cooling performance. However, the influence of double rows of film holes and blow ratio is much higher on the cooling effectiveness, compared with the density ratio. For the double rows of film holes cooling, the cooling jet forms a reverse kidney-shaped vortex downstream of the holes, which will prevent the jet blowing away from the cooling wall.

Key words: turbine blade; film cooling; cooling efficiency; double rows of film holes; flow and heat transfer

为了提高涡轮效率, 需要尽可能提高涡轮透平初温, 目前该温度甚至已经达到了 2 000 K 左右, 远远超过了涡轮叶片材料可承受的温度范围, 因此亟需高效的叶片冷却技术^[1]。气膜冷却是使用最广泛的叶片冷却技术之一^[2], 它是一种外部冷却方法,

冷却气体从叶片内部通过壁面的小孔喷出并覆盖在叶片外表面上, 形成一层保护膜, 起到阻隔高温燃气的作用。

常见的气膜冷却结构是多个离散气膜孔等间距周期性排布成 1 列, 且叶片表面往往是由多列气

收稿日期: 2023-07-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFE0206900)

Supported by: National Key Research and Development Program (2018YFE0206900)

第一作者简介: 林泽钦 (1989), 男, 博士, 主要从事燃气轮机方面的科研和教学工作, lz-qinfeng@163.com。

通信作者简介: 温涛 (1990), 男, 硕士, 工程师, 主要从事机器人智能制造系统方面的科研和教学工作, twen@gdrtvu.edu.cn。

膜孔组成,尤其是在前缘位置^[3]。大量气膜冷却研究是基于平板单个气膜孔型的几何优化和参数优化,包括孔型、孔间距、孔径和吹风比等^[4-9]。基于平板多排气膜孔的研究最早由 Han 等人^[10]进行。他们研究的是平板双叉排气膜孔结构的冷却效率,并比较了蒸汽和空气射流下的冷却效率。其中,气膜孔倾角为 35°,孔间距 P/D 及孔排距 S/D 均为 2.5。之后很多学者开展了双排气膜孔冷却研究^[11-14]。张鸣远等^[15]针对平板双叉排气膜孔冷却,研究了吹风比对射流贴壁性的影响。结果表明吹风比大于 0.6 时,前后排气膜孔的射流都先后发生脱壁现象,但后排射流在前排气膜作用下很快出现再附着现象。宋波等^[16]实验研究了多斜孔的排布方式对气膜冷却效率的影响,结果表明采用叉排方式布置气膜孔可以提高气膜层的均匀性,从而提高气膜冷却效率。Jubran 等人^[17]测量了错排的简单圆孔和带复合角的圆孔的气膜冷却效率和换热系数,得出错排的孔比顺排的孔有更高的气膜冷却效率。王浪等^[18]采用 PSP 技术研究不同吹风比和密度比下单排孔与 2 排孔的气膜冷却效果,得出对于圆孔的气膜冷却,在低吹风比时,第 2 排孔基本不受第一排孔影响;在高吹风比时,由于前排孔出气对主流的推举作用,后排孔更容易吹离,冷却效果变差。

由于工程应用中常需要预测多排喷射位置下游的气膜冷却效率,预测常采用数值仿真方法^[19-23]或者采用经验公式计算。其中最经典的经验公式是 Sellers 的叠加定律^[24]。Saumweber 等人^[14]测量了平板上双排和单排气膜孔(包括圆柱型气膜孔和扇形气膜孔)的冷却效率,还采用 Sellers 的叠加方法进行

实验数据的验证。针对叠加计算准确性,李彬等^[25]实验研究了 Sellers 叠加计算方法在阵列气膜冷却方式中的应用。该叠加定理针对槽型气膜冷却准确性更高,对于离散气膜孔,更适用于顺排的多排气膜孔。朱惠人等^[26]通过实验研究了双排叉排簸箕形气膜孔的气膜冷却效率,对比研究了单排孔与双排孔气膜冷却效率分布的特点及双排孔气膜冷却效率的叠加算法。结果表明较高吹风比下,应用传统的气膜冷却效率的叠加算法,即根据单排孔冷却效率计算的双排孔的冷却效率会产生很大偏差。

为了分析双叉排气膜孔之间的交互作用对气膜冷却效率的影响,本文采用高精度红外热像仪测量比较双叉排气膜孔和单排气膜孔的绝热气膜冷却效率受吹风比和密度比的影响,吹风比的范围为 0.65、1.00、1.50 和 2.00;选择空气和二氧化碳作为射流,因此密度比分别为 1.0 和 1.5;还采用数值计算方法分析了 2 种孔排下的流场结构,研究吹风比和密度比影响冷却效率的机理。

1 实验研究

1.1 实验系统介绍

首先设计并搭建了进行平板气膜冷却实验平台,对绝热平板气膜冷却效率进行测量。实验系统示意如图 1 所示,主要由主流和射流 2 路气路组成。其中主流气路主要包括空气压缩机(空压机)、电加热器、整流段和实验段以及一些阀门和测量表。整流段中含有收缩段和扩张段以及中间的蜂窝网整流器。图 2 为实验系统实物。为了减少热损失,整个主流管道外包裹了保温层。

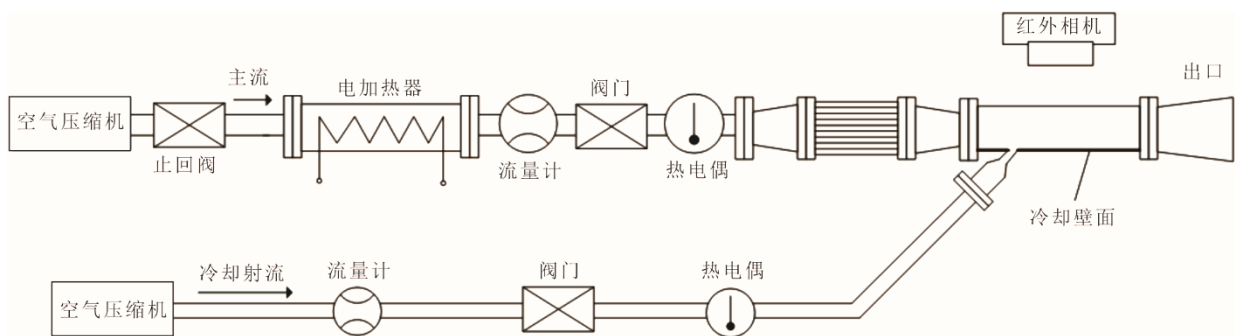


图 1 实验系统原理示意

Fig.1 Schematic of the experimental system

实验段为有机玻璃制成的矩形通道,通道的横截面为 50 mm×80 mm,长 500 mm。底面被冷却壁面为带气膜孔的平板,材料为树脂材料,采用 3D

打印制作,导热系数约为 0.19 W/(m·K),可近似视为绝热平板。为了测量绝热气膜的冷却效率,需要建立尽可能接近绝热的热边界条件。平板上的双叉

排气膜孔为2排等间距气膜孔，每排孔的孔间距为 $3D$ 。第1排气膜孔距离进口 20 mm ，有2个气膜孔；第2排气膜孔与前排气膜孔距离为 $3D$ ，包含3个气膜孔；所有气膜孔的孔径 $D=5\text{ mm}$ 。气膜孔轴与平板平面之间的夹角为 30° 。图3为带气膜孔平板实物照片。

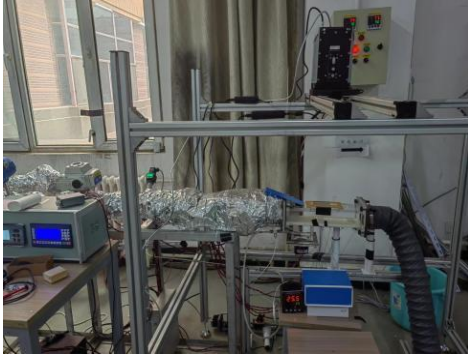


图2 实验系统
Fig.2 Photo of the experimental system

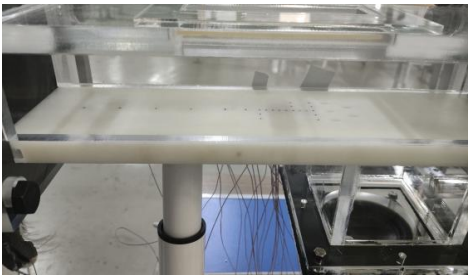


图3 带气膜孔平板
Fig.3 Photo of the plane with film holes

绝热平板的表面温度采用高频高精度红外热像仪和热电偶测量。测量时红外热像仪固定在实验段正上方，透过氟化钡窗片正对气膜冷却壁面，红外热像仪通过流场中布置的热电偶进行温度校准。16根热电偶布置在平板表面的中线上测量紧邻壁面的气流温度。为最大限度降低对流场的影响，热电偶孔径应尽可能小。选用直径仅为 0.65 mm 的T型热电偶，并且安装时与壁面表面齐平，以降低对流场的影响。同时记录红外图像和热电偶温度。实验中主流温度为 333 K ，速度为 5 m/s ，湍流度 12% ；射流温度为 293 K ，吹风比 $M=\rho_c U_c / \rho_\infty U_\infty = 0.65, 1.00, 1.50$ ，密度比 $DR=\rho_c / \rho_\infty = 1.0, 1.5$ 。

1.2 实验结果分析

评价气膜冷却效率的参数采用绝热气膜冷却效率 η ：

$$\eta = \frac{T_{aw} - T_\infty}{T_c - T_\infty} \quad (1)$$

式中： T_{aw} 为绝热壁面温度； T_∞ 为主流的进口总温； T_c 为冷却射流的进口总温。

1.2.1 绝热气膜冷却效率受吹风比的影响

图4为单排气膜孔冷却、密度比 $DR=1.0$ 时3种吹风比下平板的绝热气膜冷却效率 η 的云图。图4中，横坐标 X/D 和纵坐标 Y/D 分别为气膜平板流向坐标 X 、展向坐标 Y 与气膜孔直径 D 的比值。由图4可见：在单排气膜孔冷却作用下，在孔出口处有较高的冷却效率，但是在下游位置随着射流的抬高并与主流发生掺混和侧向耗散，冷却效率迅速下降，中间孔下游的气膜冷却效率较旁边两孔的下游冷却效率值较高；增大吹风比，气膜冷却效率整体在减小，说明吹风比最佳值为 0.65 ；继续增大吹风比到 1.50 时，可以看到在 $X/D > 10$ 的位置展向冷却效率明显增加，说明射流在出口处脱离壁面而在这个位置重新附着在壁面上。

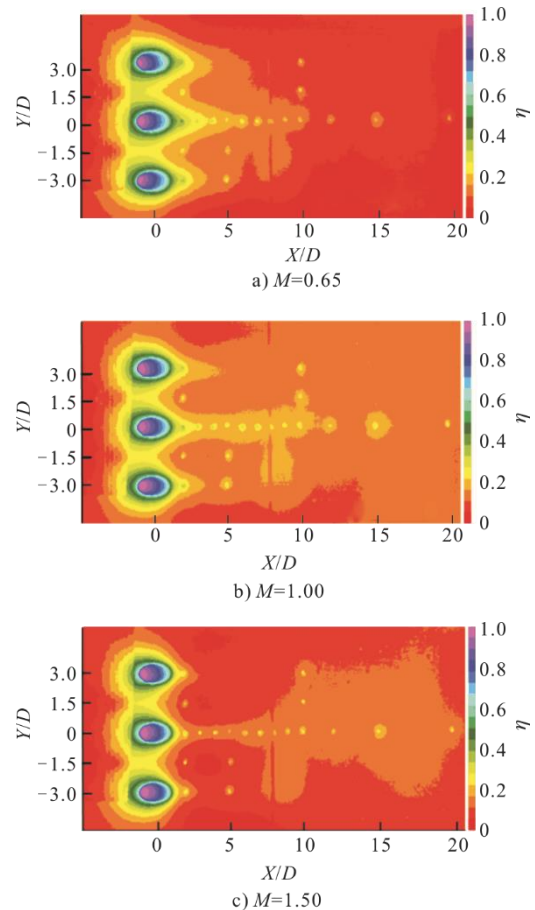


图4 实验测量单排气膜孔冷却效率云图 ($DR=1.0$)
Fig.4 Experimental measured contour of film cooling efficiency with single row of film cooling holes ($DR=1.0$)

图5为双叉排气膜孔冷却、密度比 $DR=1.0$ 时4种吹风比下平板的绝热气膜冷却效率云图。

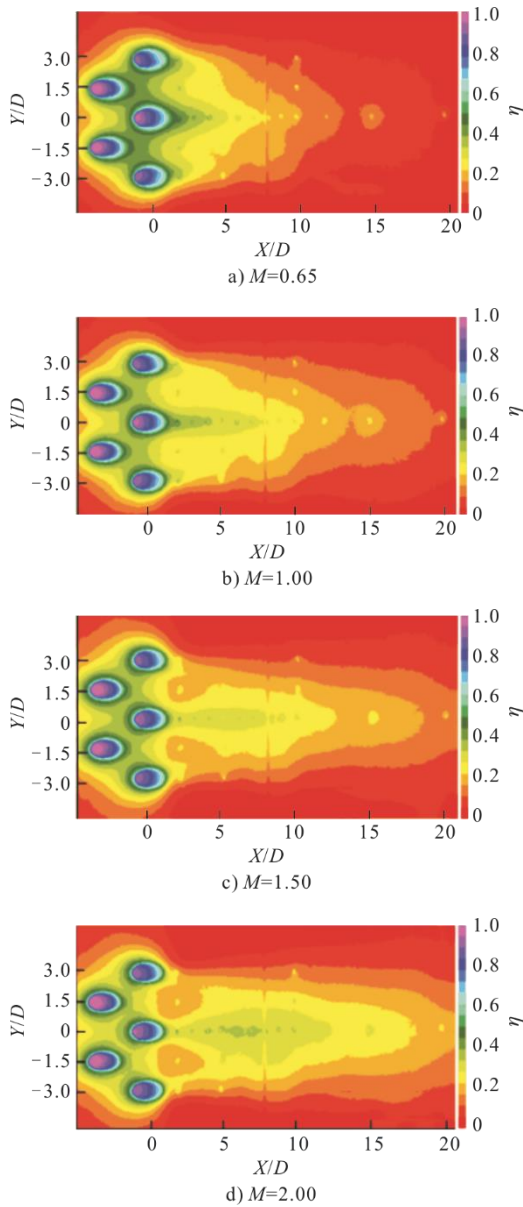


图 5 实验测量双叉排壁面气膜孔冷却效率云图 (DR=1.0)
Fig.5 Experimental measured contour of film cooling efficiency with double rows of film cooling holes (DR=1.0)

从图 5 可以看到，该双叉排结构的前后排射流孔展向交错排列。冷却效率在气膜孔出口附近最高，然后沿着下游流动方向逐渐降低。双叉排气膜孔的气膜冷却效率随着吹风比的增加而增加。当吹风比从 0.65 增加到 1.00 时，气膜在下游覆盖距离增加。当吹风比 M 增加到 2.00 时，中心孔下游即中心线上的冷却效率最高，气膜覆盖的距离最长；而两侧边缘的气膜孔下游的冷却效率明显减小，这是由于圆柱型气膜孔后射流流场中有明显的外卷肾型对涡结构，射流的三维性强。小吹风比时前后排射流间的对涡相互作用较弱，但是随着吹风比增大，肾型对涡范围扩大，前后排气膜间作用强烈，

后排气膜的贴壁性在前排射流作用下将明显改变。

与单排气膜孔冷却相比，双叉排气膜孔冷却在高吹风比下的冷却效率明显高于单排气膜孔，这说明由于气膜的叠加效应，第 1 排的射流将迫使第 2 排射流靠近壁面，双排孔相邻孔二次射流间的相互作用和融合，主流更不易从射流之间或下部通过，从而增强了对壁面的保护作用，因此大大提高了气膜冷却效率。

图 6a)和图 6b)分别为单排和双叉排气膜孔冷却时、不同吹风比下壁面中心线上绝热冷却气膜效率沿流向分布曲线。

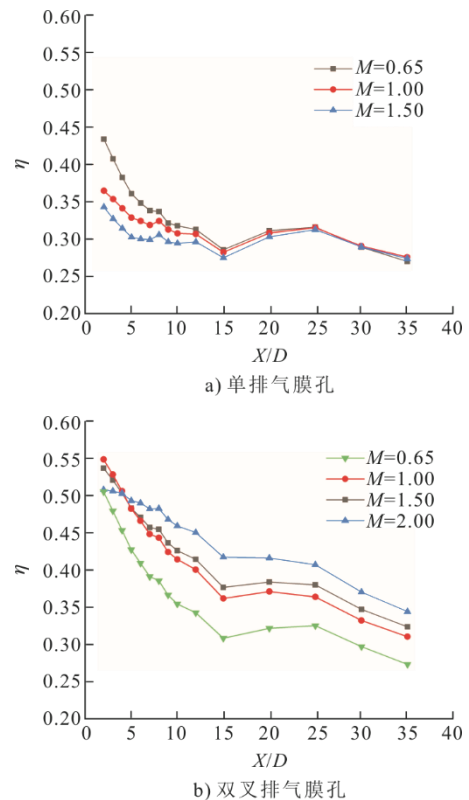


图 6 壁面中线上绝热气膜冷却效率
Fig.6 Film cooling efficiency at the mid-line of the plane

由图 6 可以看出，单排孔气膜冷却时， η 的值迅速下降，至 $X/D=15$ 以后开始略微上升，到 $X/D=20$ 以后重新开始下降。这是由于冷气射流从气膜孔中射出后由于其较大的纵向速度分量，从而具有更大的主流穿透力；射流首先会抬升飞离壁面，而后在主流的作用下，随着流动的推进在下游再一次附着在壁面，从而使得冷却效率曲线表现出先降低而后升高的趋势。在 $X/D < 15$ 的位置，冷却效率随着吹风比的增加而降低；但是在 $X/D > 15$ 之后的下游，3 种吹风比下冷却效率几乎重合。双叉排气膜孔冷却时，在气膜孔下游，随着距离的增加，气膜冷却

效率迅速下降,在 $X/D=15$ 的位置时下降速度开始变得缓慢。从 0.65 增大到 2.00 时,气膜孔下游的绝热气膜冷却效率随着吹风比的增加而提高。在紧邻气膜孔的位置 $X/D<5$,当吹风比增加至 2.00 时,冷却效率出现明显的下降。

1.2.2 绝热气膜冷却效率受密度比的影响

为了分析射流与主流密度比对双叉排和单排气膜冷却效率的影响,冷却射流采用空气和二氧化碳 2 种气体作为冷却介质,因此密度比 DR 分别为 1.0 和 1.5。图 7 为密度比 $DR=1.5$ 时 3 种不同吹风比下单排气膜孔下游气膜冷却效率云图。对比图 7 和图 4 可知,高密度比冷却下的气膜冷却效果更好。此外,由图 7 还可以看出,冷却效率也随吹风比的增加而降低,最佳吹风比为 0.65,且在最佳吹风比 0.65 时,高密度比下气膜展向覆盖效果更好。

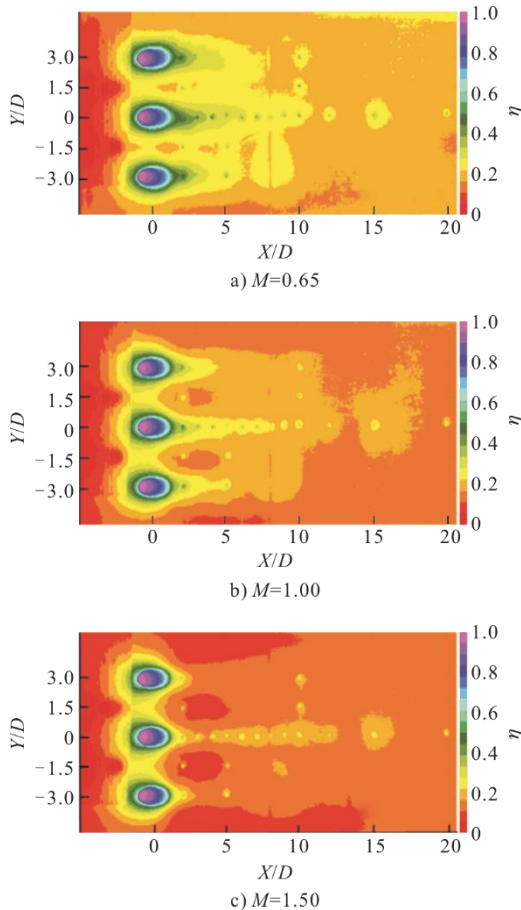


图 7 实验测量单排气膜孔冷却效率云图 ($DR=1.5$)
Fig.7 Experimental measured contour of film cooling efficiency with single row of film cooling holes ($DR=1.5$)

图 8 为 $DR=1.5$ 时 4 种不同吹风比下双叉排壁面气膜孔下游气膜冷却效率云图。由图 8 可见,随着吹风比的增加,气膜孔附近的冷却效率降低,但

是下游的气膜覆盖距离提高,且展向覆盖效果降低。可以发现,在双叉排气膜孔冷却下,密度比对气膜冷却效率的影响较弱,即 $DR=1.5$ 的结果与 $DR=1.0$ 的结果差别不大,说明双叉排孔结构降低了密度比对气膜冷却效率的影响。但是另一方面,吹风比对冷却效率的影响要大于密度比。

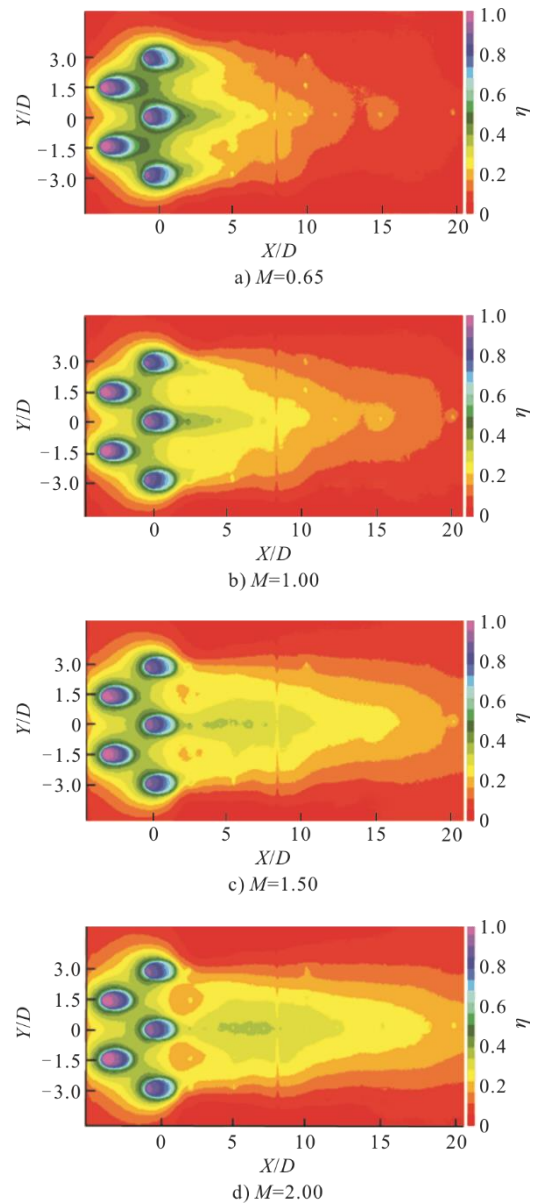


图 8 实验测量双叉排气膜孔冷却效率云图 ($DR=1.5$)
Fig.8 Experimental measured contour of film cooling efficiency with double rows of film cooling holes ($DR=1.5$)

2 CFD 数值研究

2.1 数值计算方法

采用 ANSYS FLUENT 计算了双叉排气膜孔冷却下的流场结构。计算模型与实验模型保持一致,结果如图 9 所示。采用分块网格技术进行网格划分,

对射流孔使用 O 型网格,并在壁面附近网格进行了边界层加密,保证壁面附近 $y^+ < 1$ 。经过网格无关性验证,最终确认网格数量为 1 910 184。计算域网格划分如图 10 所示。

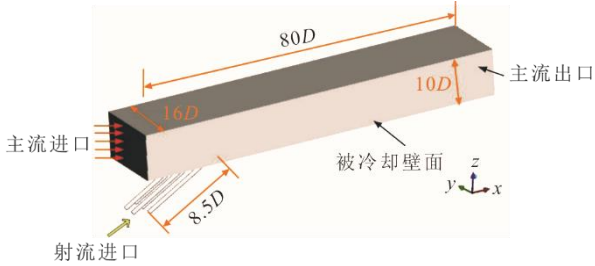


图 9 数值计算模型
Fig.9 Numerical geometry model

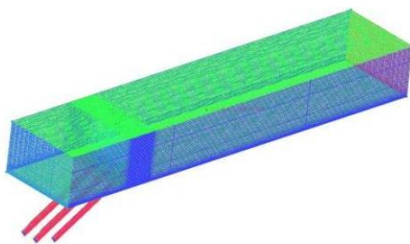


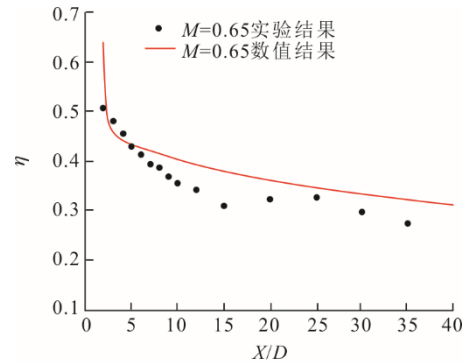
图 10 计算域网格划分
Fig.10 Meshing of the computational domain

计算的主流进口为速度进口边界条件,湍流强度为 12%。主流出口为压力出口。射流为速度进口边界条件,具体数值与实验工况保持一致。湍流模型选择了 SST $k-\omega$ 模型,选择压力速度耦合的 SIMPLE 算法,压力项、动量方程、能量方程由二阶迎风差分格式进行离散。

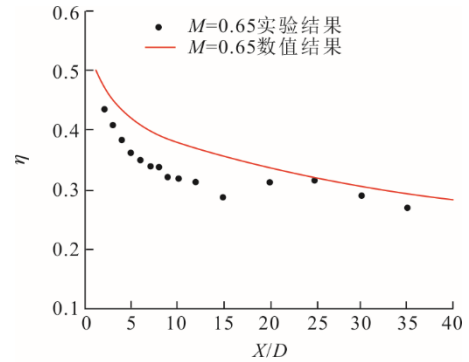
2.2 数值计算结果验证

选用吹风比为 0.65 的计算结果与实验数据进行比较。图 11a)和图 11b)分为单排和双叉排气膜孔下游中线上气膜冷却效率实验结果与数值计算结果的对比。

总体来看,二者吻合较好,数值计算结果比实验值略高。另外实验结果表明,在 $X/D=15\sim 25$ 的区域发生了射流的再附着,但是数值计算结果没有捕捉到射流附着壁面的过程。这可能是由于:数值计算的边界条件中壁面为光滑壁面,且主流进口边界条件为均匀流速而不是充分发展的速度边界层,因此壁面附近的主流速度偏高,射流很难穿透主流附着在壁面上;而在真实流动中,主流进口为充分发展的速度边界层,壁面边界层内速度较低且由于壁面阻力等原因越来越低,射流将附着在壁面上从而提高了该处的冷却效率。



a) 双叉排孔



b) 单排孔

图 11 计算与实验结果对比

Fig.11 Comparison of numerical and experimental results

2.3 数值结果分析

为了分析实验结果,研究了单排孔气膜冷却效率下游的流场结构,选取距离气膜孔下游 $X/D=1.5$ 和 $X/D=4.0$ 的截面位置分析其温度场和流场。2 个选定截面位置示意如图 12 所示。

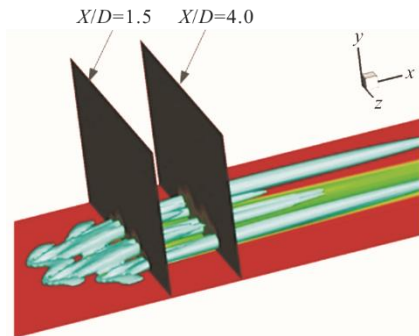


图 12 截面位置示意

Fig.12 The locations of the selected cross-sections

图 13 为单排气膜孔冷却下 $X/D=1.5$ 截面上温度场和流线。图 13 采用无量纲温度着色。由图 13 可以看到:在射流出口位置形成了 2 个对称的反向旋转涡对;在 3 种吹风比下,随着吹风比的增加,射流逐渐脱离壁面,距离壁面越来越高,因此气膜的覆盖效果逐渐减弱,冷却效率将随着吹风比的增加而降低。

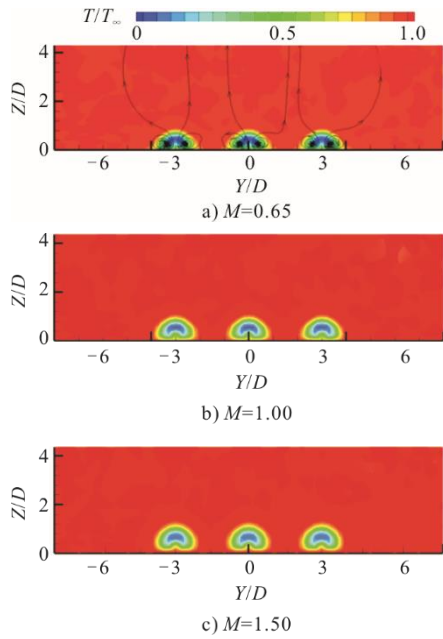


图 13 $X/D=1.5$ 截面上温度场和流线 (单排孔)
Fig.13 Temperature and streamline at section of $X/D=1.5$ (single row of film holes)

图 14 为双叉排气膜孔冷却下 $X/D=1.5$ 截面上的流场和温度场。可以看到, 前排 2 个气膜孔的射流在下游位置也形成了 2 个肾形涡, 这 2 个涡压迫后排气膜孔射流贴在壁面, 阻止其吹离壁面。因此双排孔相比于单排孔, 冷却气流在孔下游形成了反肾形涡, 较好抑制了气膜吹离。随着吹风比的增加, 这种抑制作用逐渐增强, 因此气膜冷却效率随着吹风比的增加而增加。图 15 为 $X/D=4$ 截面上的无量纲温度场。对比图 15 和图 14 可以看到, 当射流流动至下游位置逐渐抬高并脱离壁面, 在前排气膜孔的压迫下, 后排冷却射流的贴壁性仍然较好。

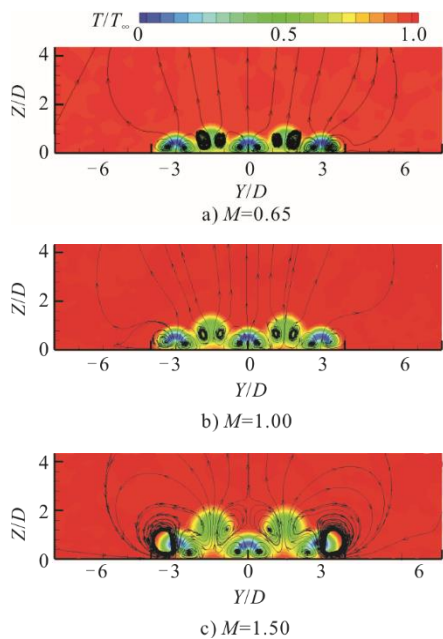


图 14 $X/D=1.5$ 截面上温度场和流线 (双叉排孔)
Fig.14 Dimensionless temperature and streamline at section of $X/D=1.5$ (double rows of film holes)

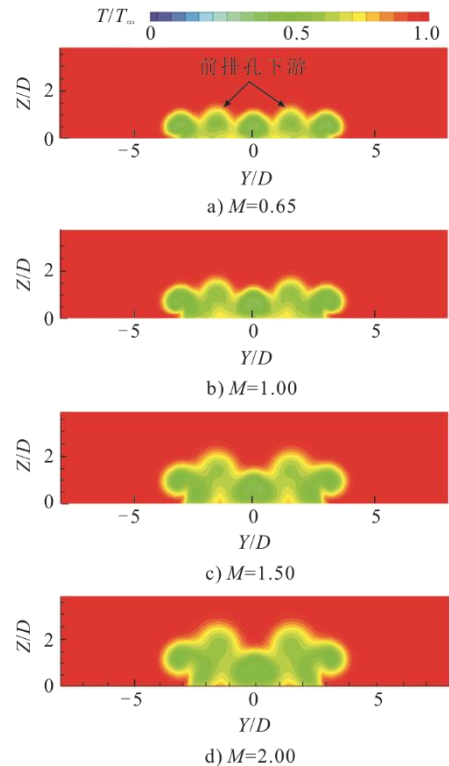


图 15 $X/D=4.0$ 截面上温度云图 (双叉排孔)
Fig.15 Dimensionless temperature at section of $X/D=4.0$ (double rows of film holes)

图 16 为双叉排孔冷却时 $M=2.0$ 时平板壁面无量纲温度和极限流线。可以看到, 由于前排气膜孔的阻挡, 主流在气膜孔两侧发生弯曲, 并形成肾形涡对, 因此第 2 排边缘气膜孔射流上游的主流流动方向向外侧弯曲, 使得气膜孔下游外侧的冷却效率大大降低。

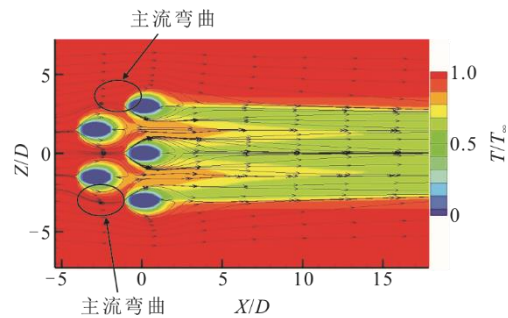


图 16 平板壁面无量纲温度和极限流线 (双叉排孔)
Fig.16 Dimensionless temperature and limit streamline of the plane (double rows of film holes)

3 结 论

1) 单排气膜孔冷却效率随着吹风比的增加而降低,但是双叉排气膜孔冷却效率大大提高,且随着吹风比的增加而增加,但是在展向气膜覆盖效果变差。

2) 增加密度比可以提高气膜冷却效率,但是双叉排孔影响相对密度比更大。另外在高吹风比下,2种密度比在单排和双叉排孔冷却下都差别较小,说明吹风比对冷却效率的影响也大于密度比。

3) 双叉排孔相比于单排孔,冷却气流在孔下游形成了反肾形涡,较好抑制了气膜吹离。

【参 考 文 献】

- [1] WANG W, GAO J, SHI X, et al. Cooling performance analysis of steam cooled gas turbine nozzle guide vane[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 62: 668-679.
- [2] BUNKER R S. A review of shaped hole turbine film cooling technology[J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2005, 127: 441-453.
- [3] ANDERSON J B, WINKA J R, BOGARD D G, et al. Evaluation of superposition predictions for showerhead film cooling on a vane[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(4): 041010.
- [4] ZHANG J Z, ZHANG S C, WANG C H, et al. Recent advances in film cooling enhancement: a review[J]. *Chinese Journal of Aeronautics* 2020, 33(4): 1119-1136.
- [5] 张魏, 李广超, 寇志海, 等. 冷气横流对单入口和双出口孔射流冷却效率影响[J]. *热力发电*, 2016, 45(3): 64-69.
ZHANG Wei, LI Guangchao, KOU Zhihai, et al. Influence of coolant crossflow on film cooling effectiveness of one-inlet and double-outlet injection holes[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(3): 64-69.
- [6] 于飞龙, 肖俊峰, 高松, 等. 猫耳气膜孔冷却性能数值模拟[J]. *热力发电*, 2018, 47(9): 48-55.
YU Feilong, XIAO Junfeng, GAO Song, et al. Numerical study on cooling performance of Nekomimi film holes[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(9): 48-55.
- [7] 李广超, 陈钰恺, 张魏, 等. 宽口扇形孔射流气膜冷却效率研究[J]. *热力发电*, 2016, 45(4): 60-64.
LI Guangchao, CHEN Yukai, ZHANG Wei, et al. Investigation on film cooling effectiveness of fanned hole with broad outlet[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(4): 60-64.
- [8] YU Y, YEN C H, SHIH T I P. Film cooling effectiveness and heat transfer coefficient distributions around diffusion shaped holes[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2002, 124(5): 820-827.
- [9] 张玲, 祝健, 石景开, 等. 多因素影响下平板气膜冷却效果的数值模拟[J]. *热力发电*, 2015, 44(6): 68-71.
ZHANG Ling, ZHU Jian, SHI Jingkai, et al. Orthogonal simulation of multi-factor influenced film cooling efficiency[J]. *Thermal Power Generation*, 2015, 44(6): 68-71.
- [10] HAN J C, MEHENDALE A B. Flat plate film cooling with steam injection through one row and two rows of inclined holes[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1986, 108(1): 137-144.
- [11] ZHU H, GUO T, XU D. Investigation of film cooling and superposition method for double row dustpan-shaped holes[J]. *Heat Transfer-Asian Research*, 2008, 37(4): 208-217.
- [12] LIGRANI P M, RAMSEY A E. Film cooling from span wise-oriented holes in two staggered rows[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(3): V004T09A028.
- [13] LIU Y, RAO Y, YANG L, et al. Flow and heat transfer characteristics of double-wall cooling with multi-row short film cooling hole arrangements[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 165: 106878.
- [14] SAUMWEBER C, SCHULZ A. Interaction of film cooling rows: effects of hole geometry and row spacing on the cooling performance downstream of the second row of holes[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2004, 126(2): 237-246.
- [15] 张鸣远, 陈学俊, 邹福康, 等. 双排叉排孔气膜冷却特性研究(二)绝热有效温比[J]. *航空动力学报*, 1990, 5(1): 6-10.
ZHANG Mingyuan, CHEN Xuejun, ZHOU Fukang, et al. Study on the cooling characteristics of double row fork vent air membrane (II) adiabatic effective temperature ratio[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1990, 5(1): 6-10.
- [16] 宋波, 林宇震, 刘高恩, 等. 不同排列方式多斜孔壁气膜冷却绝热温比研究[J]. *航空动力学报*, 1999, 14(1): 91-94.
SONG Bo, LIN Yuzhen, LIU Gaoen, et al. Study on the adiabatic temperature ratio of polyoblique pore wall air film cooling in different arrangements[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1999, 14(1): 91-94.
- [17] JUBRAN B A, MAITEH B Y. Film cooling and heat transfer from a combination of two rows of simple and/or compound angle holes in inline and/or staggered configuration[J]. *Heat and Mass Transfer*, 1999, 34(6): 495-502.
- [18] 王浪, 李雪英, 任静, 等. 两排圆孔的气膜冷却特性[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(5): 1082-1086.
WANG Lang, LI Xueying, REN Jing, et al. Flow characteristics and superposition rule of two rows of round holes[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(5): 1082-1086.
- [19] KIROLOS B, POVEY T. An energy-based method for predicting the additive effect of multiple film cooling rows[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(12): 122607.
- [20] FOROUTAN H, YAVUZKURT S. Numerical simulations of the near-field region of film cooling jets under high free stream turbulence: applications of RANS and hybrid URANS/LES[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2015, 137: 011701.
- [21] XU Zhipeng, ZHU Hui ren, LIU Cunliang, et al. Film cooling effectiveness superposition calculation of double-row injection holes on turbine vane[J]. *Journal of Thermal Science*, 2022, 31(6): 2424-2437.
- [22] LYNCH S P, THOLE K A, KOHLI A, et al. Computational predictions of heat transfer and film-cooling for a turbine blade with nonaxisymmetric endwall contouring[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(4): 041003.
- [23] LEE K D, KIM K Y. Numerical study on film-cooling performance of a novel shaped hole[C]//*International Symposium on Fluid Machinery and Fluids Engineering (ISFMFE 2012)*, 2012.
- [24] SELLERS J P. Gaseous film cooling with multiple injection stations[J]. *AIAA Journal*, 1963, 1(9): 2154-2156.
- [25] 李彬, 胡正义, 林宇震, 等. Sellers 叠加模型在多孔阵列冷却方式中的应用研究[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 1999, 12(2): 39-42.
LI Bin, HU Zhengyi, LIN Yuzhen, et al. Application of Sellers superposition model in multi holes cooling[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 1999, 12(2): 39-42.
- [26] 朱惠人, 郭涛, 许都纯. 双排簸箕形孔气膜冷却效率及其叠加算法[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(5): 814-819.
ZHU Hui ren, GUO Tao, XU Duchun. Film cooling and superposition method for double row dust-pan shaped holes[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2006, 21(5): 814-819.

(责任编辑 刘永强)