

孔间距对气膜冷却效率影响的数值模拟

许卫疆, 朱惠人

(西北工业大学动力与能源学院, 710072, 西安)

摘要: 为了研究动量比、湍流度和密度比对圆柱形气膜孔流动的影响规律, 采用数值模拟方法, 研究了圆柱形气膜孔的冷却效率和流量系数, 并与实验值进行了对比. 结果表明: 随着动量比的增大, 二次流在气膜孔出口处逐渐偏离叶片; 气膜孔出口下游存在一个高速区域, 这一区域的速度随动量比的增大而减小; 在湍流度和密度比保持不变的情况下, 随着动量比增加, 冷却效率的计算值随着气膜孔中心至测量点的叶片表面长度的增加在总体上呈逐渐减小的趋势; 在低密度比下, 湍流度对冷却效率影响不大; 当密度比为 1.5 时, 湍流度的不同导致冷却效率产生显著差异, 密度比越小, 冷却效率越低; 在气膜孔出口处, 冷却效率的数值计算值与实验值存在一定的差异. 数值模拟的结果能够定性地反映气膜孔的流动特性.

关键词: 孔间距; 动量比; 湍流度; 冷却效率

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0101-05

Numerical Simulation of the Impact of Ratio of Hole Space on Gas-Film Cooling Effectiveness

XU Weijiang, ZHU Huiren

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

Abstract: Cooling effectiveness and discharge coefficients of cylindrical gas-film cooling holes were numerically investigated to determine the effects of momentum ratio, density ratio, and turbulence on flow in the holes. The results show that with the increase of momentum ratio, the second flow deviates from the blade at the outlet of the gas-film hole and the velocity in a high velocity zone decreases. Moreover, the cooling effectiveness decreases with the increase of dimensionless length at fixed turbulence and density ratio. In addition, the effect of turbulence on the cooling effectiveness is slight at the low density ratio. The different turbulence causes significant change of the cooling effectiveness and the cooling effectiveness decreases with the decrease of density ratio when density ratio to 1.5. There is an obvious difference between the numerical value and experimental value of the cooling effectiveness at the outlet of the gas-film hole.

Keywords: hole space; momentum ratio; turbulence; cooling effectiveness

要提高燃气涡轮的效率和比推力, 最为有效的措施就是提高燃气涡轮的入口温度, 这时燃气的温度水平要远远超过叶片材料的许用温度, 因此必须采取冷却措施对涡轮叶片加以保护, 以使其免受高温腐蚀或损伤^[1]. 航空发动机中常用的冷却措施有气膜、冲击、尾缘劈缝、绕流注冷却等, 对涡轮叶片实

施热防护的一个常用措施就是采用气膜冷却技术, 即温度较低的空气从高压涡轮叶片表面和端壁上的大量气膜孔及劈缝中喷射出来覆盖在叶片表面形成保护性气膜. 优化冷却孔的形状、布置方式以及运行参数是气膜冷却研究的主要目的.

随着计算机技术的发展, 采用数值模拟的方法

研究叶片气膜冷却过程具有越来越重要的作用^[2-4]. 本研究采用数值模拟的方法研究不同孔间距下叶片前缘气膜孔二次流流动对冷却效率的影响,以找到合理的孔间距与动量比的匹配. 气膜冷却效率是衡量气膜孔冷却性能的重要参数,定义如下

$$\eta = \frac{T_m - T_f}{T_m - T_a} \quad (1)$$

式中: T_m 为主流气体温度, $^{\circ}\text{C}$; T_f 为绝热壁温, $^{\circ}\text{C}$; T_a 为冷却射流注入温度, $^{\circ}\text{C}$.

1 计算模型

如图1所示,主流空气由计算区域前端的入口进入,流过叶片表面后经出口流出,二次流由二次流入口进入,均匀分配流量后进入前腔,最后由气膜孔流出. 气膜孔倾角为 23° ,主流计算区域的深度为 $65.3d$,共计7个气膜孔,孔间距 p 为 $2d$ 和 $4d$. 流动与换热控制方程采用 N-S 方程.

前人的研究表明,该模型在计算圆柱形孔的气膜流动和换热时的效果较好^[5-6],故本计算采用可实现的 $k-\epsilon$ 模型,壁面函数采用增强壁面函数.

模型网格采用非结构化网格,在重点考察的区域,如气膜孔内、主流腔中靠近气膜孔出口所在的区域,根据所选用湍流模型的特点都进行了局部加密. 网格划分见图2,其中气膜孔内的网格数超过了 2×10^5 ,网格总数大于 5.5×10^6 ,气膜孔出口所在平面的 y^+ 都小于1,满足增强壁面函数的要求.

本文采用 CFD/NHT 商用软件 Fluent 6.18 进行计算. 求解器使用分离隐式求解器,方程采用离散

格式为3阶精度的 QUICK 格式,压力速度耦合方法采用 SIMPLE 方法,压力插值方式采用标准方式. 主流和二次流的进口都设有流量进口条件,出口有流量出口条件,叶片表面绝热.

本文模拟了在圆柱形气膜孔归一化的孔间距 (p/d) 分别为2和4的情况下主流与二次流掺混的流动,计算了动量比 $I=1, 2, 4$ 等3种情况. 为了考察湍流度的影响,分别计算了主流湍流度 (T) 为8%和0.5%的2种情况,同时对密度比 (D_r) 为1和1.5的2种情况也进行了计算. 采用提高主流温度的方法使密度比降低.

2 计算结果及分析

从图3可以看出:随着孔间距的增大,冷气覆盖程度变差, $p/d=2$ 时,在气膜孔下游能够形成气膜,而当 $p/d=4$ 时,气膜孔下游冷气覆盖程度很不均匀;随着动量比的增大,自气膜孔流出的二次流之间的相互影响也越大,其原因在于二次流动量的增加导致二次流流量增大,主流的影响减小,因此在云图上就出现了气膜孔下游的高冷却效率区;在相同的动量比下,孔间距增大,冷却效率降低,其原因也在于孔间距增大后,相邻气膜孔之间的相互影响减小,而主流的影响增加,因此在云图上就表现为在 $p/d=4$ 时气膜孔下游的冷却效率降低.

从图4可以看出,随着动量比的增大,在密度比为1时,二次流出口处高温区域逐渐偏离气膜孔出口叶片的下游区域,这说明动量比为4时,气膜孔下游叶片表面的部分区域二次流覆盖程度不好,这一

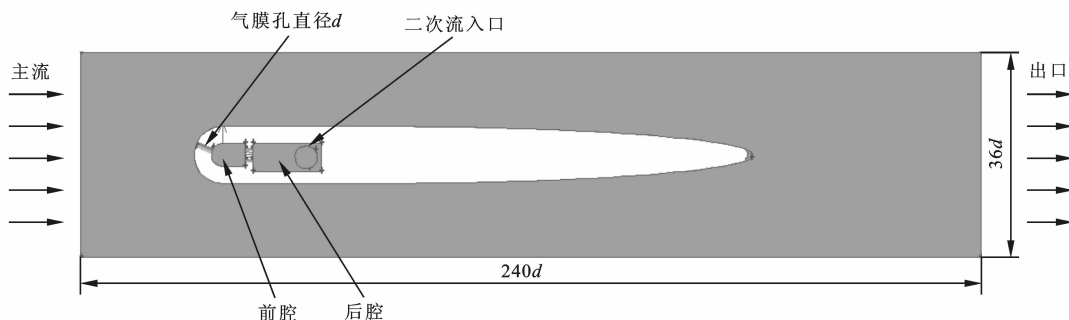


图1 计算模型简图

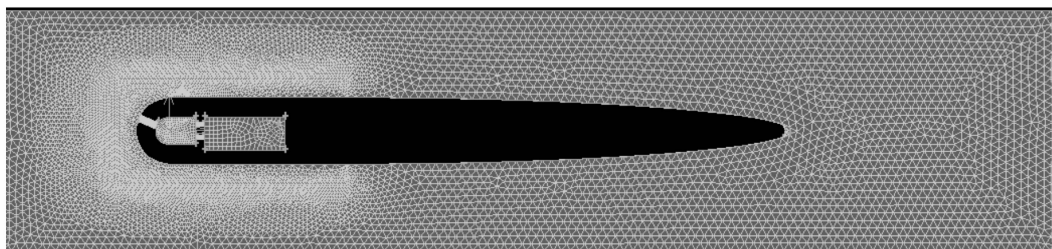


图2 网格划分

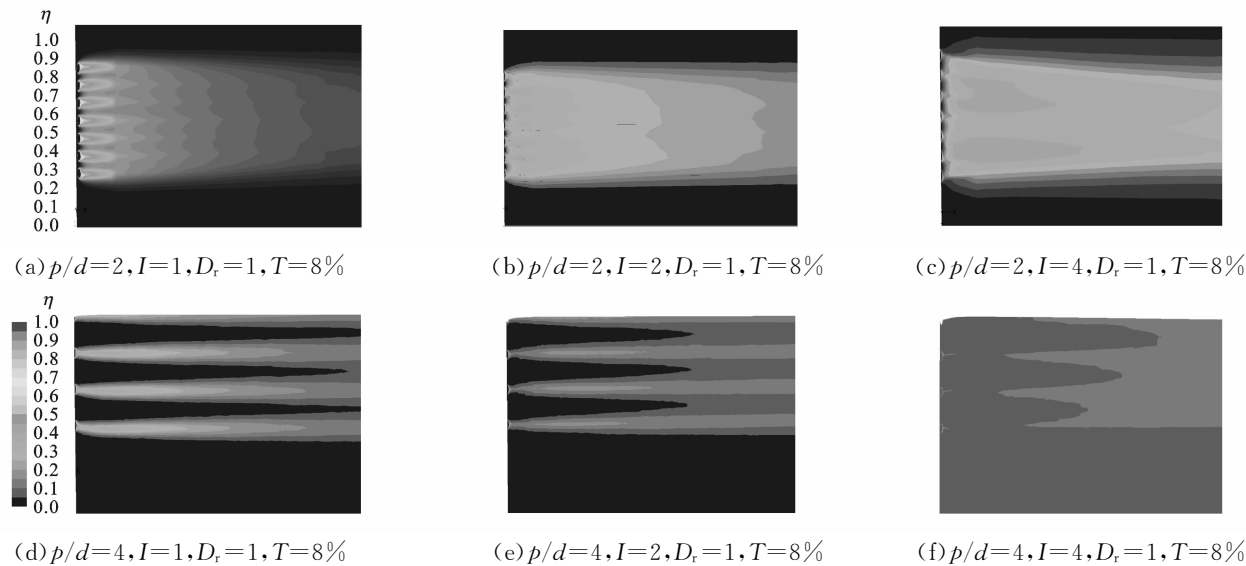


图 3 冷却效率分布云图

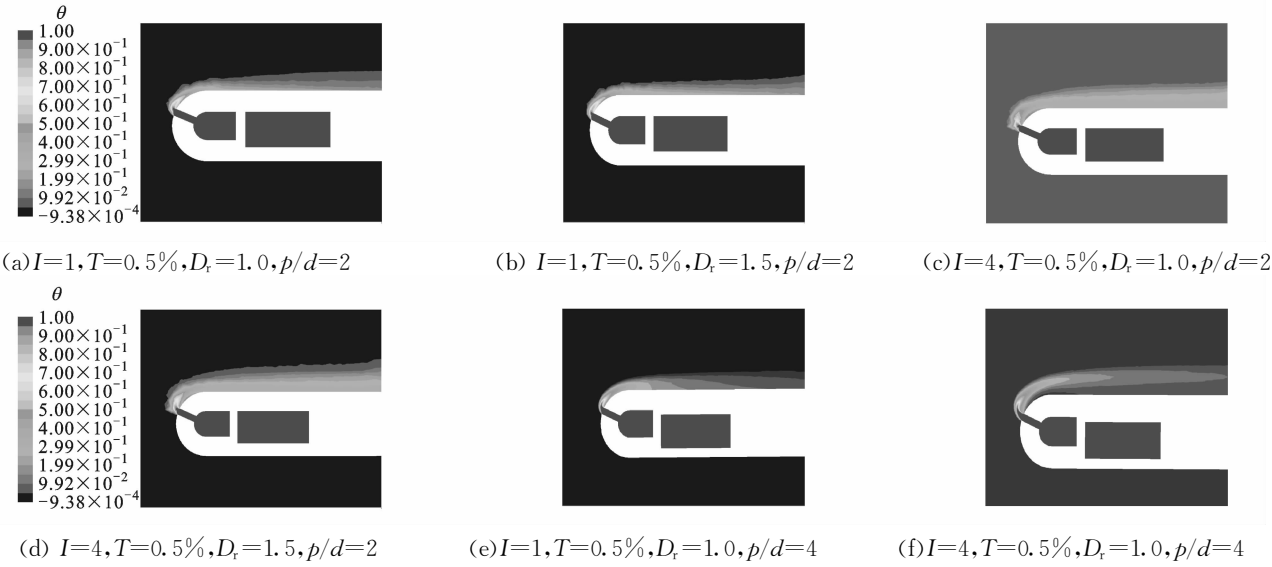


图 4 气膜孔截面归一化温度 θ 分布云图 ($\theta = \frac{T_a - T}{T_a - T_m}$)

点在密度比为 1.5 时也得到相同的结论。从图 4 还可以看出,密度比的变化似乎对温度分布没有明显的影响,此时 $p/d=2$ 和 $p/d=4$ 的归一化温度分布云图是类似的。

从图 5 可以看出:随着动量比的增大,气膜孔出口冷气流的影响范围变大;在动量比为 1 时,气膜孔出口下游存在一个高速区域,如图中圆内所示,随着动量比增大,这一区域的速度减小;密度比增大,二次流的影响范围变大。同样,对于 $p/d=2$ 和 $p/d=4$ 的 2 种孔间距,归一化速度分布也基本一致。

在图 6 中, x 为气膜孔中心至测量点的叶片表面长度, x/d 为二次流与主流混合的归一化长度。由图 6 可以看出,无论是 $p/d=2$ 还是 $p/d=4$,在平板

阶段($x/d > 8$),冷却效率 η 随 x/d 的增加缓慢减小,而在初始阶段,冷却效率随 x/d 的增加迅速衰减。其原因在于二次流从气膜孔喷出后,脱离了叶片表面,与主流以较大的角度相交,掺混过程很剧烈,因此冷却效率下降很快,而当二次流到达平板后,在平板上形成边界层,这时主流与二次流的掺混大大减弱,因此冷却效率衰减较慢。随着孔间距的增大,冷却效率下降。

随着动量比增加,冷却效率值随着 x/d 的增加在减小,在动量比为 2 时,先减小后增大,然后又缓慢减小。当 $p/d=2$ 、动量比为 1 时,冷却效率的衰减要快于动量比为 2 时的情况,这一点在实验中也得到了验证。原因在于二次流动量大的工况其相应的

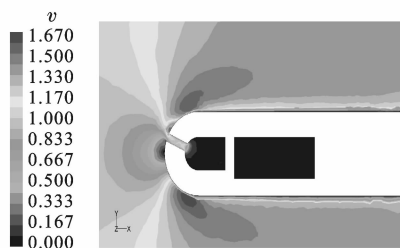
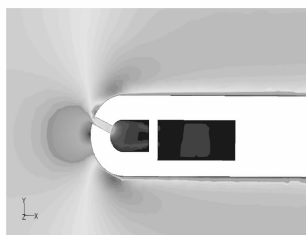
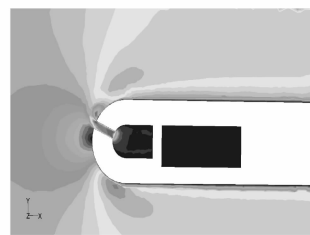
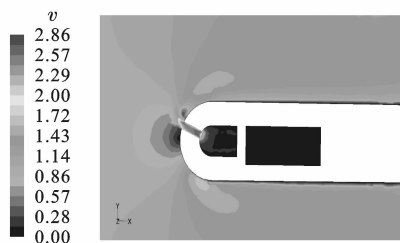
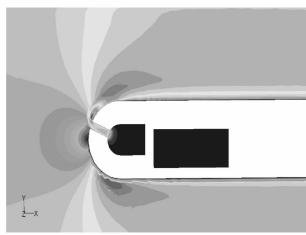
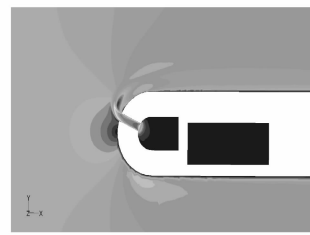
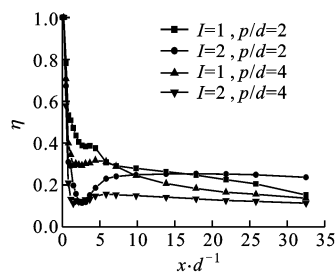
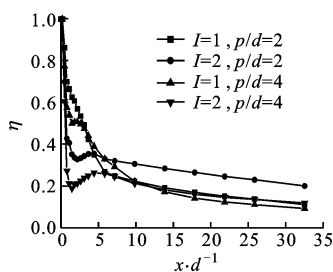
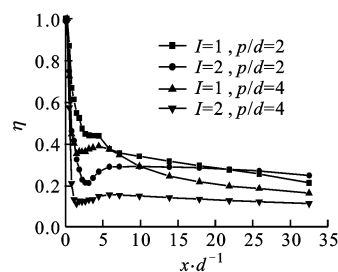
(a) $I=1, T=8\%, D_r=1.5, p/d=2$ (b) $I=1, T=8\%, D_r=1, p/d=2$ (c) $I=4, T=8\%, D_r=1.5, p/d=2$ (d) $I=4, T=8\%, D_r=1, p/d=2$ (e) $I=1, T=8\%, D_r=1, p/d=4$ (f) $I=4, T=8\%, D_r=1, p/d=4$ 图5 气膜孔截面归一化速度 v 分布云图 ($v=V/V_{in}$, V 为当地速度, V_{in} 为主流入口速度)(a) $T=0.5\%, D_r=1$ (b) $T=0.8\%, D_r=1$ (c) $T=0.5\%, D_r=1.5$

图6 冷却效率随动量比的变化

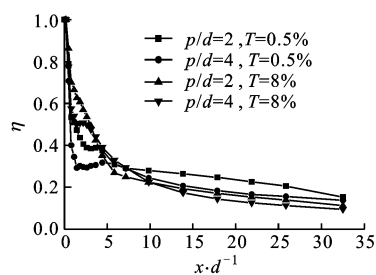
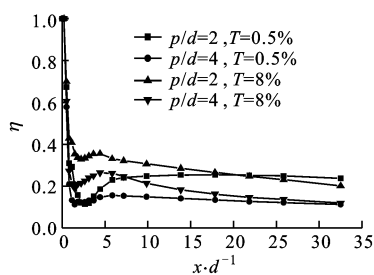
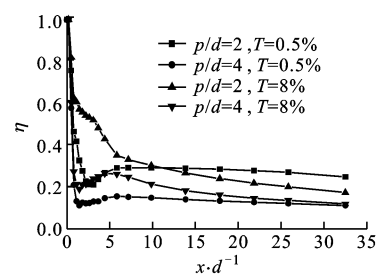
(a) $I=1, D_r=1$ (b) $I=2, D_r=1$ (c) $I=2, D_r=1.5$

图7 冷却效率随湍流度的变化

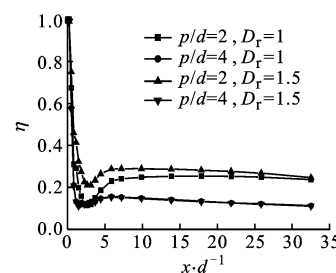
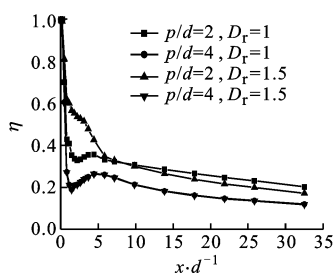
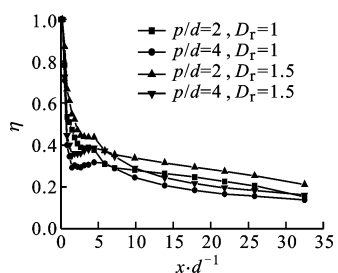
(a) $I=2, T=0.5\%$ (b) $I=2, T=8\%$ (c) $I=1, T=0.5\%$

图8 冷却效率随密度比的变化

影响范围要大于动量小的工况,因此在计算段的中后部,动量比为1的工况的冷却效率要小于动量比为2时的工况,而 $p/d=4$ 时则无此现象。

湍流度对冷却效率的影响如图7所示,可以看出:动量比为1时,在平板处,主流湍流度越大,其与二次流的掺混作用越强烈,因此冷却效率越低;对于 $p/d=4$ 的情况,冷却效率与动量比为2时的差异不大,甚至是湍流度越大,冷却效率越高;对于二次流的出口段,湍流度越大,冷却效率也越高。

由图8可以看出:在同一密度比下, p/d 越大,冷却效率越低;密度比增大,则冷却效率提高。在同一密度比下, p/d 越大意味着气膜孔之间的相互影响的可能性就越小,因此二次流在叶片表面形成的气膜就越薄,与主流掺混后冷却效率降低。密度比增大,是通过对主流加温实现的,主流的温度升高,其浮力增大,减弱了掺混作用,因此冷却效率提高。

3 结 论

本文对孔间距分别为 $p/d=2$ 和 $p/d=4$ 等2种几何参数下的圆柱形气膜孔,在动量比分别为1、2、4几种工况下的射流流动情况和冷却效果进行了数值模拟。通过对计算结果的分析,得出了以下几点结论。

(1)随着孔间距的增大,冷气覆盖程度变差,当 $p/d=2$ 时,在气膜孔下游能够形成气膜,而当 $p/d=4$ 时,气膜孔下游冷气覆盖程度很不均匀。对于 $p/d=2$ 和 $p/d=4$ 的2种孔间距,归一化速度分布云图的分布规律基本一致。

(2)在湍流度和密度比保持不变的情况下,随着动量比增加,冷却效率的计算值呈现出逐渐减小的趋势,在动量比为1时,冷却效率持续减小,在动量比为2时,冷却效率先减小后增大,然后又缓慢减小。随着孔间距的增大,冷却效率降低。

(3)在平板处,主流湍流度越大,其与二次流的掺混作用越强烈,因此冷却效率越低。对于二次流的

出口段,湍流度越高,冷却效率也越高。

(4)在同一密度比下, p/d 越大,冷却效率越低,密度比增大,则冷却效率提高。

参考文献:

- [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]. 程代京等,译. 西安:西安交通大学出版社,2005.
- [2] 刘高文,刘松龄. 涡轮叶栅端壁气膜冷却数值模拟[J]. 推进技术,2004,25(2):87-90.
LIU Gaowen, LIU Songling. Numerical simulation of endwall film-cooling in a turbine cascade [J]. Journal of Propulsion Technology,2004,25(2):87-90.
- [3] 邓明春,朱惠人,李冰,等. 动量比对涡轮叶片气膜孔流量系数的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究,2006,19(1):35-38.
DENG Mingchun, ZHU Huiren, LI Bing, et al. Influence of momentum ratio on the discharge coefficient of film cooling holes on blade surface in a turbine cascade [J]. Gas Turbine Experiment and Research,2006,19(1):35-38.
- [4] 刘学强,伍贻兆. 非结构网格上N-S方程解法研究及在多段翼型绕流中的应用[J]. 空气动力学学报,2001,19(2):223-227.
LIU Xueqiang, WU Yizhao. Computation of the flow past multi-element airfoils using unstructured grid and N-S equations [J]. Acta Aerodynamica Sinica,2001,19(2):223-227.
- [5] JIA Rongguang, BENGT S, MIRON P. A numerical and experimental investigation of the slot film-cooling jet with various angles [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2005, 127(3):635-645.
- [6] TASLIN M E, KHANICHEH A. Film effectiveness downstream of a row of compound angle film holes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 2005, 27(4): 434-440.

(编辑 王焕雪)