

涡轮叶片综合冷却效率实验的缩尺效应

孙国庆, 吴昌, 戴韧

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 基于简化叶片的传热实验, 研究缩尺模化对综合冷却效率的影响, 得到缩尺效应随主流雷诺数和流量比的变化情况, 以及毕渥数和热障涂层厚度对综合冷却缩尺效应的影响规律。采用一维传热模型, 量化分析了缩尺模化对综合冷却效率的影响, 并在实验中得到验证。结果表明: 缩尺比例为 1.5 时, 缩尺叶片综合冷却效率相对基准叶片增加 10%, 且增幅随主流雷诺数和流量比增加; 基准叶片导热系数由 $17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 增加至 $50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 缩尺叶片平均综合冷却效率差异由 13.71% 降至 0.34%; 热胀涂层厚度等比例缩尺可减小缩尺效应的影响, 使缩尺叶片综合冷却效率差异由 13.07% 降至 2.98%。

关键词: 综合冷却效率; 缩尺效应; 毕渥数; 热障涂层; 流量比

中图分类号: TK472 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2023.03.003

[引用本文格式] 孙国庆, 吴昌, 戴韧. 涡轮叶片综合冷却效率实验的缩尺效应[J]. 热能动力工程, 2023, 38(3): 16-23. SUN Guo-qing, WU Chang, DAI Ren. Downscaling effect on overall cooling effectiveness experiment of turbine blade [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3): 16-23.

Downscaling Effect on Overall Cooling Effectiveness Experiment of Turbine Blade

SUN Guo-qing, WU Chang, DAI Ren

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: Based on the heat transfer experiment of simplified blades, the influence of downscaling effect on overall cooling effectiveness (OCE) of blade was studied. The variation of downscaling effect with the mainstream Reynolds number and flow ratio was obtained. The influence rule of Biot numbers and thicknesses of the thermal barrier coating (TBC) on downscaling effects of the OCE was obtained. One dimensional heat transfer model was used to quantify and analyze the OCE variation due to downscaling influences and get verified in the experiment. Results show that when the scale ratio is 1.5, the OCE of the downscaled blade increases by 10% compared with the reference blade. The augmentation is raised as the Reynolds number and mass ratio increase; the thermal conductivity of the reference blade is increased from $17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ to $50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. The average OCE's discrepancies of downscaled blade is decreased from 13.71% to 0.34%; reducing the thickness of TBC in equal proportion can decrease the influence of downscaling effects and reduce the OCE's discrepancies of downscaled blade from 13.07% to 2.98%.

Key words: overall cooling effectiveness (OCE), downscaling effect, Biot number, thermal barrier coating (TBC), mass flow ratio

收稿日期: 2022-08-19; 修订日期: 2022-10-26

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-V-0012-0064)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project (2017-V-0012-0064)

作者简介: 孙国庆 (1995-), 男, 上海理工大学硕士研究生.

通讯作者: 戴韧 (1966-), 男, 上海理工大学教授.

引言

先进涡轮叶片冷却结构是多种冷却结构的组合,包括强化对流、冲击以及气膜冷却等^[1],通常采用综合冷却效率评价整体冷却设计的有效性。

采用共轭传热数值计算方法预测涡轮叶片综合冷却效率,受限于湍流模型的能力,预测精度较低。董平等人^[2]通过对比实验结果证明 Mark II 叶片壁面温度的计算偏差较大。Dees 等人^[3-4]证明压力面换热系数的计算值与实验值较为接近,并预测压力面的转捩位置,但吸力面计算值低于实验值。Liu 等人^[5]指出各类转捩模型对共轭传热问题的计算精度少有验证,精度下降的主要原因是边界层转捩和前缘驻点位置计算异常。

通过实验方法对叶片综合冷却效率进行评价时,因重型燃气轮机叶片尺寸较大,难以用原型进行冷却效率实验,通常采用模化实验方法。模化实验需要考虑3项准则,即几何、运动以及热相似^[6],但很难同时满足3项准则。例如,马赫数相同时,雷诺数不相等,尽管一定雷诺数下可忽略其对流动的影响,但其对换热的影响不可忽略。因此,冷却效率实验的缩尺效应是多因素问题。

Colladay 等人^[7]发现,忽略导热获得的叶片模化综合冷却效率与原型足够近似。王进等人^[8]证实共轭换热中材料导热系数对冷却效果起主导作用。Jung 等人^[9]在平板实验中改变热侧毕渥数,也明显影响了综合冷却效率。Liu 等人^[10]证实,不同毕渥数模型的冷却效率变化规律还受到流量比影响。Bryant 等人^[11]发现,低毕渥数叶片的气膜出口上游冷却效率较高。Stewart 等人^[12]指出0.6倍气膜孔径厚的热障涂层(TBC)隔热效果强于气膜冷却。Horner 等人^[13]证实,TBC不影响强化内冷的冷却效率提升,且TBC可降低主次流最佳速比。Huang 等人^[14]提出TBC厚度变化造成其毕渥数与金属毕渥数比值 Bi_{TBC}/Bi_{Metal} 每增加1.5,综合冷却效率约提高15%。文献[8-14]实验研究了综合冷却效率的各影响因素,但共轭换热情况下缩尺模化对综合冷却效率的影响未见报道。

本文设计了1个简化涡轮叶片综合冷却效率实验,在缩尺比1.5的条件下测量不同雷诺数、流量

比、毕渥数和热障涂层厚度对缩尺叶片冷却效率的影响,对重型燃气轮机热端部件应用模化方法设计具有理论指导意义。

1 实验装置

1.1 实验系统

实验在1台加热风洞上完成,实验系统如图1所示。该系统主要包括加热风洞和内冷气流管路。高温气流侧由离心风机提供空气进入电加热器,将空气加热至设定温度后依次经过收缩段、稳流段、扩张段,最后进入实验段。稳流段装有蜂窝器能够降低叶片模型前缘主流气流的湍流度,常温时采用单丝热线测量湍流度低于5%。冷气由螺杆式空气压缩机提供,通过泄压阀和储气罐使气流压力稳定,通过流量计控制冷气流量。实验段入口装有J型铠装热电偶反馈电加热器温度,使其维持设定工况的进口温度。

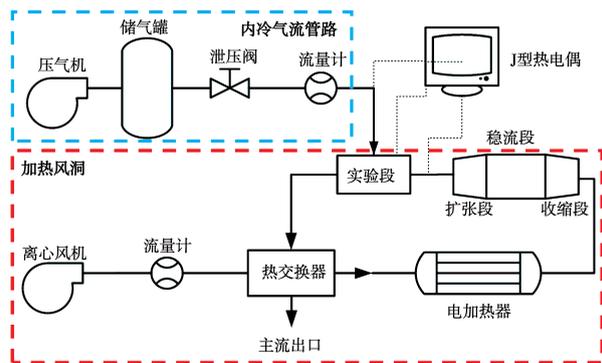


图1 实验系统

Fig.1 Experimental system

1.2 模化实验件

涡轮叶栅气动与传热实验比较复杂,尤其需要保证叶栅的周期性。本文研究的重点在于几何尺寸相似的缩尺叶片之间有关综合冷却效率随雷诺数、流量比和毕渥数的变化规律,因此采用文献[15]给出的简化叶片的实验方法。叶片前缘设计为长短轴比2:1的椭圆形,以降低主流在前缘处发生流动分离的可能性。实验叶片内部通道及测点的位置如图2所示。叶片模型内部分为3组U型冷却通道,冷气由叶片顶部进入内冷通道后,由实验件一侧表面S1,S2和S33排气膜孔排出流入主流。沿叶片周线

在 50% 叶高处处理 21 支直径 0.5 mm 的 K 型铠装热电偶, 选择叶中位置作为测量区, 消除叶片有限高度可能造成的端区影响。测点位置如图 2 所示。图 3 为本实验基准叶片照片, 参数如表 1 所示。几何相似的缩尺叶片弦长 80 mm, 其他尺寸均按比例缩小。

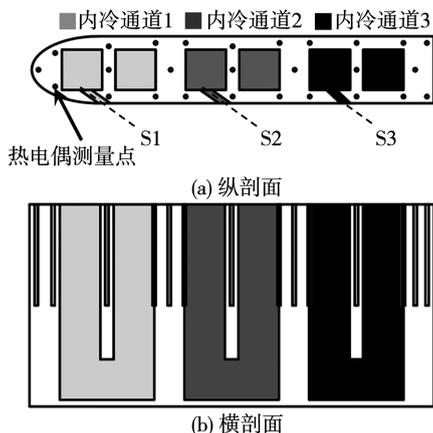


图 2 内部通道及热电偶测点位置

Fig. 2 Locations of internal passages and thermocouple measuring points

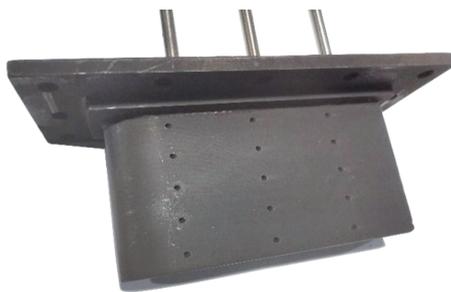


图 3 实验基准叶片照片

Fig. 3 Photos of tested baseline blade

表 1 叶片几何参数

Tab. 1 Geometric parameters of blade

参数	数值
叶片高度/mm	60
轴向弦长 l_a /mm	120
叶片厚度/mm	20
壁面厚度/mm	4
内冷通道水力直径/mm	12
气膜孔直径/mm	2
S1, S2 位置气膜孔流向倾角/(°)	35
S3 位置气膜孔流向倾角/(°)	43

1.3 参数定义

实验采用以下参数表征实验工况, 流量比 M , 温度比 K 和雷诺数 Re 分别定义为:

流量比 M :

$$M = m_c / m_g \quad (1)$$

温度比 K :

$$K = T_\infty / T_c \quad (2)$$

主流雷诺数 Re :

$$Re = u_\infty l_a / \nu \quad (3)$$

式中: m_c —冷气质量流量, kg/s; m_g —主流质量流量, kg/s; T_∞ —主流进口温度, K; T_c —冷气进口温度, K; u_∞ —主流进口速度, m/s; l_a —轴向弦长, m; ν —运动粘度, m^2/s 。

1.4 不确定度分析

实验过程中, 主流进口温度由 J 型热电偶测得, 最大相对误差为 $\pm 0.75\%$; 冷气进口温度和叶片测点温度由 K 型热电偶测得, 最大相对误差为 $\pm 0.5\%$ 。根据误差传递公式^[16]求得综合冷却效率不确定度为:

$$\frac{d\Phi}{\Phi} = \left(\frac{(T_w - T_c)^2 dT_\infty^2}{(T_\infty - T_c)^2 (T_\infty - T_w)^2} + \frac{dT_c^2}{(T_\infty - T_c)^2} + \frac{dT_w^2}{(T_\infty - T_w)^2} \right)^{0.5} \quad (4)$$

式中: T_w —叶片表面温度, K; Φ —综合冷却效率。

根据式(4)求得所有工况下的平均不确定度为 3.9%。

2 缩尺效应的近似分析

Sweeney 等人^[17]在共轭传热的气膜冷却平板实验中, 根据综合冷却效率的定义提出了壁面热流密度公式:

$$q = h_e (T_\infty - T_w) = \frac{T_\infty - T_c}{\frac{1}{h_e} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_i}} \quad (5)$$

式中: q —叶片表面热流密度, W/m^2 ; h_e —叶片热侧对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; δ —叶片当量壁厚, m; λ —叶片导热系数, $W/(m \cdot K)$; h_i —叶片冷气侧对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

重新排列方程, 得到综合冷却效率定义:

$$\Phi = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_c} = \frac{1}{1 + \frac{h_e \delta}{\lambda} + \frac{h_e}{h_i}} = \frac{1}{1 + Bi + \frac{h_e}{h_i}} \quad (6)$$

式中: Bi —叶片热侧毕渥数。

由式(6)可知,几何相似叶片的综合冷却效率是否相等,取决于叶片热侧对流换热系数 h_e 与叶片冷气侧换热系数 h_i 的比值 h_e/h_i , 以及毕渥数 $Bi = h_e \delta/\lambda$ 是否保持相等。在缩尺模型实验中,叶片当量壁厚 δ 等比例缩小,如果不计材料导热系数 λ 的变化,叶片缩尺后 Bi 减小,定性分析可知,综合冷却效率提升。

另一方面,叶片缩尺后内外换热系数比 h_e/h_i 的变化复杂,受流动状态以及过流表面传热特性的多重影响。其中, h_i 近似采用管槽内湍流强制对流传热关联式(7)估算, h_e 根据层流全板长平均 Nu 数实验关联式(8)估算^[18]:

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (7)$$

$$Nu_f = 0.664 Re_f^{0.5} Pr_f^{0.3} \quad (8)$$

式中: Re_f —流动雷诺数; Pr_f —湍流普朗特数。

根据公式(6),本实验中基准叶片和缩尺叶片在流量比 $M = 1.18\%$ 、温度比 $K = 1.7$ 及马赫数 $Ma = 0.14$ 工况时的壁面参数如表2所示。采用两种导热系数材料制作基准叶片,因此有两组数据。近似的定量分析表明,缩尺叶片的综合冷却效率提高约10%。

表2 叶片壁面参数

Tab.2 Parameters of blade wall

参数	基准 叶片1	基准 叶片2	缩尺 叶片
当量壁厚 δ/mm	5.9	5.9	3.9
主流侧 Re	1.55×10^5	1.55×10^5	1.03×10^5
叶片导热系数 $\lambda/W \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	17	50	17
主流侧 $h_e/W \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	78.64	78.64	96.32
内冷通道 Re_i	4.36×10^3	4.36×10^3	4.11×10^3
冷气侧 $h_i/W \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	43.48	43.48	62.23
毕渥数 Bi	0.027	0.009	0.022
综合冷却效率 Φ	0.35	0.36	0.39

3 实验结果

3.1 雷诺数的影响

图4对比了叶片材质相同的情况下,在流量比 $M = 1.18\%$ 、温度比 $K = 1.7$ 、主流马赫数 $Ma = 0.30$ 工况时,不同弦长叶片综合冷却效率 Φ 分布随雷诺数变化情况。可以看出,叶片缩尺后综合冷却效率明显增加,叶片侧面及尾缘区域综合冷却效率增加,前缘位置换热系数受来流冲击影响,与 Re 相关性小,综合冷却效率基本不变。由缩尺效应近似分析可知,叶片缩尺后,相比对流换热系数比值的减小量,毕渥数的变化量小。结合式(6)可知,缩尺导致综合冷却效率增加的原因是几何结构改变导致内部对流换热强度增加,对流换热系数比 h_e/h_i 减小。

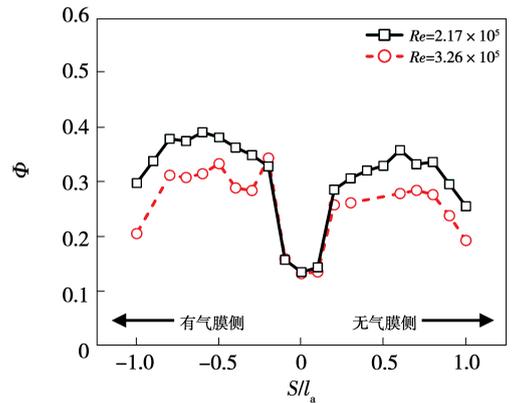


图4 雷诺数对叶片综合冷却效率分布的影响
Fig.4 Effect of Reynolds number on distribution of overall cooling effectiveness at 50% blade height

图5比较了缩尺前后叶片在温度比 $K = 1.7$ 时,两种不同流量比工况下,不同弦长叶片平均综合冷却效率 $\bar{\Phi}$ 随雷诺数的变化情况。从图中可以看出,随着雷诺数增加,两种叶片的平均综合冷却效率均升高。原因是通过提高主流入口速度增加主流雷诺数,造成主流流量增加,在流量比保持不变的情况下,冷气流量同时增加,内、外侧壁面换热系数增大。根据缩尺效应近似分析可知,叶片内部通道的换热系数增加量超过了外表面增加量, h_e/h_i 下降,叶片综合冷却效率增加。流量比为1.18%和0.39%时,模化缩尺造成平均综合冷却效率分别增加了0.041

和0.018。可见,在大流量比工况下缩尺效应更为显著,即模化缩尺使叶片综合冷却效率对进口雷诺数的敏感性增加。大流量比时缩尺叶片冷却效率增加速率高于基准叶片,原因是随冷气流增加,缩尺叶片综合冷却效率增加速率保持不变。但当冷气流比超过0.79%,基准叶片综合冷却效率增加速率开始下降(参见图7)。

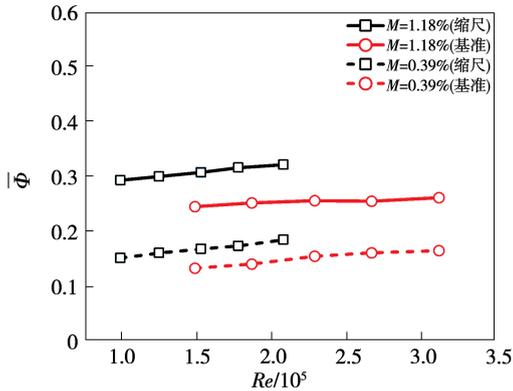


图5 平均综合冷却效率随雷诺数变化趋势

Fig. 5 Variation trend of average overall cooling effectiveness with Reynolds number

3.2 流量比的影响

图6为在温度比 $K=1.7$ 、马赫数 $Ma=0.14$ 及两种主次流流量比工况下,不同弦长叶片中综合冷却效率 Φ 分布随流量比变化情况。实验中通过质量流量计控制冷气流,从而改变流量比。由于在轴向相对弦长 $S/l_a = -0.5 \sim -0.2$ 范围内开有气膜孔,因此叶片冷气出口附近及其下游位置的表面冷却效率高于无气膜位置。随流量比增加,两种叶片综合冷却效率均增加。在不同流量比工况下,缩尺对叶片综合冷却效率的影响规律一致,缩尺造成综合冷却效率增加,而且在高流量比工况下,冷却效率提升更为显著。

图7是在温度比 $K=1.7$ 、马赫数 $Ma=0.14$ 工况下,不同弦长叶片平均综合冷却效率 $\bar{\Phi}$ 随流量比 M 的变化情况。由图可知,主次流流量比由0.39%变化至1.96%,缩尺前后叶片平均综合冷却效率分别增加0.20和0.23。由此可见,增加流量比会使叶片平均综合冷却效率较大幅度提升。缩尺前后叶

片平均综合冷却效率差异逐渐增加,即模化缩尺使叶片平均综合冷却效率对流量比的敏感性增加。随流量比升高,气膜出流量增加,根据式(6)可知,冷气的覆盖抑制了高温主流与叶片表面间的对流换热,也降低了叶片表面附近的气流温度,减小了叶片冷气侧对流换热系数 h_c 。由于冷气流增加,内冷通道 Re 上升,内部对流换热系数 h_i 变大,从而对流换热系数比 h_c/h_i 减小,叶片平均综合冷却效率提高。

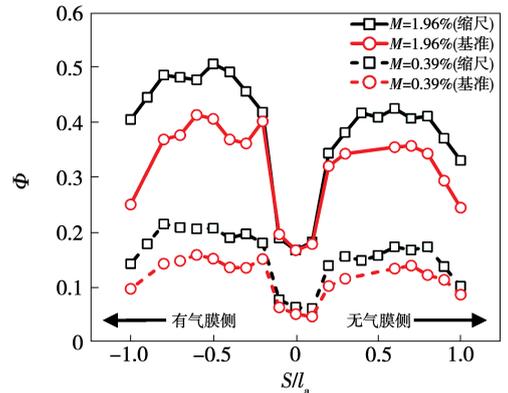


图6 流量比对叶片综合冷却效率分布的影响

Fig. 6 Effect of flow ratios on distribution of overall cooling effectiveness at 50% blade height

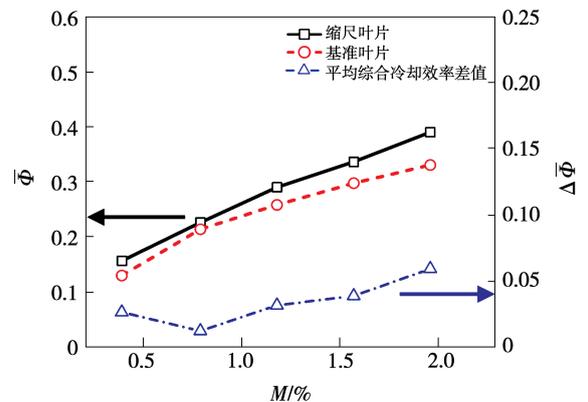


图7 平均综合冷却效率随流量比变化趋势

Fig. 7 Variation trend of average overall cooling effectiveness with flow ratios

3.3 毕渥数的影响

图8对比了导热系数 λ 分别为17和50 W/(m·K)的两种叶片,在流量比 $M=1.18\%$ 、温度

比 $K=1.7$ 、马赫数 $Ma=0.14$ 工况时,叶中综合冷却效率 Φ 分布随毕渥数的变化情况。由图中两支不同导热系数的基准叶片可以看出,当叶片材质导热系数增加引起毕渥数降低时,在全弦长范围内叶片综合冷却效率提升明显。叶片两侧冷却效率提升与缩尺情况相当,但前缘位置冷却效率提升差异大。叶片弦长不变,仅当叶片导热系数增加时,根据式(6)计算结果显示,叶片内、外侧对流换热系数均不发生变化,仅毕渥数减小。当 Bi 减小后,叶片外表面温度受内冷通道对流换热冷却影响明显,造成叶片综合冷却效率增加。同时,受叶片导热系数增加的影响,叶片的温度分布更均匀,使得叶片前缘冷却效率增加明显。

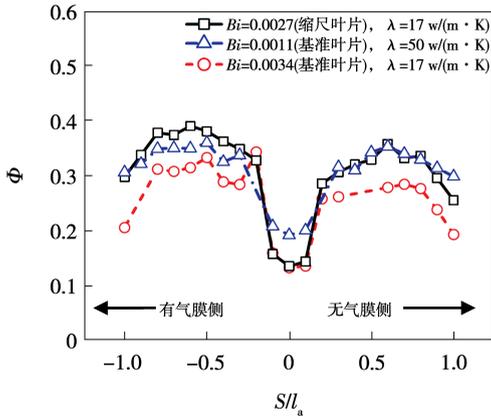


图8 毕渥数对叶片综合冷却效率分布的影响

Fig.8 Effect of Biot number on distribution of overall cooling effectiveness at 50% blade height

图9为温度比 $K=1.7$,不同流量比时毕渥数对叶片平均综合冷效 $\bar{\Phi}$ 的影响。由图可知,流量比对冷却效率影响显著,在多流量比工况下研究毕渥数的影响情况。图中显示缩尺叶片与导热系数增加的基准叶片平均冷却效率相等,与图8显示两者冷却效率沿弦向分布情况基本一致。这说明在叶片缩尺过程中, Bi 随叶片导热系数减小增加,可以降低由叶片缩尺造成的 h_i 增强对综合冷却效率带来的影响。基准叶片导热系数变化前后,缩尺叶片平均综合冷却效率差异由 13.71% 减小至 0.34%。

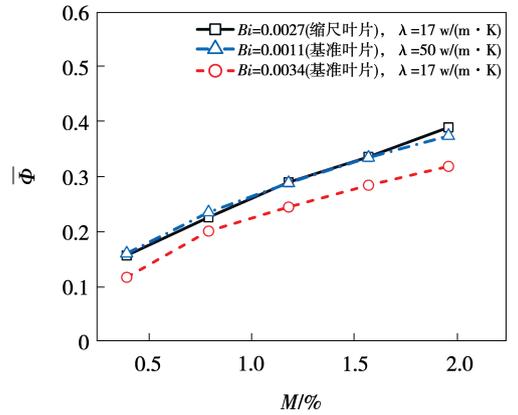


图9 不同流量比下毕渥数对平均综合冷却效率的影响

Fig.9 Effect of Biot number on average overall cooling effectiveness under different flow ratios

3.4 热障涂层的影响

热障涂层(TBC)是热部件防护的重要一环,叶片模化实验应考虑TBC厚度是否等比例缩尺对结果造成的影响。实验在不同弦长叶片表面贴附不同厚度铁氟龙薄膜(导热系数 $0.25 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),研究TBC厚度对缩尺前后叶片综合冷却效率造成的影响。

基于一维传热条件推导的壁面热流量公式(5),叶片表面贴附热障涂层后,复合壁面的热流密度为:

$$q_{\text{TBC}} = \frac{(T_{\infty} - T_w)}{\frac{1}{h_e} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}} = \frac{T_{\infty} - T_c}{\frac{1}{h_e} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_i}} \quad (9)$$

式中: δ_1 —热障涂层厚度, m; λ_1 —热障涂层导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

带热障涂层的叶片综合冷却效率为:

$$\Phi_{\text{TBC}} = \frac{T_{\infty} - T_w}{T_{\infty} - T_c} = \frac{\frac{1}{h_e} + \frac{\delta_1}{\lambda_1}}{\frac{1}{h_e} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_i}} \quad (10)$$

热障涂层厚度增加 $\Delta\delta_1$ 后,综合冷却效率变化量 $\Delta\Phi$ 为:

$$\Delta\Phi = \frac{\frac{\Delta\delta_1}{\lambda_1} \left(\frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_i} \right)}{\left(\frac{1}{h_e} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_1 + \Delta\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_i} \right) \left(\frac{1}{h_e} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_i} \right)} \quad (11)$$

由 $\Delta\Phi > 0$ 可知,随着热障涂层厚度增加,叶片综合冷却效率上升。图 10 是在温度比 $K = 1.5$ 、马赫数 $Ma = 0.14$ 、流量比 $M = 1.18\%$ 工况时,叶片平均综合冷却效率 $\bar{\Phi}$ 随涂层厚度的变化情况。图中计算值根据式(8)得到。可以看出,随着热障涂层厚度的增加,两种叶片的综合冷却效率均增加。同时,实验值和计算值显示,相同热障涂层厚度的情况下,缩尺叶片冷却效率始终高于基准叶片。

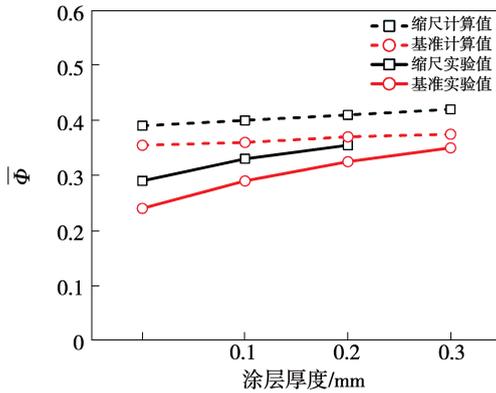


图 10 平均综合冷却效率随涂层厚度变化趋势

Fig. 10 Variation trend of average overall cooling effectiveness with coating thickness

图 11 是在温度比 $K = 1.5$ 、马赫数 $Ma = 0.14$ 、不同流量比工况下涂层厚度对叶片平均综合冷却效率 $\bar{\Phi}$ 的影响情况。对比图中缩尺叶片 0.2 mm 和基准叶片 0.3 mm,两者冷却效率基本一致。

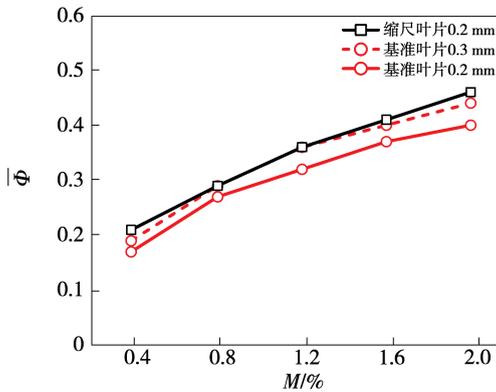


图 11 不同流量比下涂层厚度对平均综合冷却效率的影响

Fig. 11 Effect of coating thickness on average overall cooling effectiveness under different flow ratios

由图 11 可知,涂层厚度相同时,缩尺叶片冷却效率依然高于基准叶片。所以当涂层厚度按比例缩尺时,即缩尺叶片涂层厚度减小,综合冷却效率下降,可以一定程度上抵消模化缩尺带来的影响。这说明在叶片模化实验中,当热障涂层厚度按照叶片缩尺比 1.5 等比例缩小时,可以明显减小缩尺叶片与基准叶片之间的冷却效率差;当涂层厚度未等比例缩尺时,缩尺叶片冷却效率将高于基准叶片。热胀涂层厚度等比例缩尺可减小缩尺效应的影响,使缩尺叶片综合冷效差异由 13.07% 下降至 2.98%。

4 结 论

设计简化叶片的综合冷却效率实验,研究叶片缩尺过程中,毕渥数及涂层厚度变化对综合冷却效率的影响。通过一维传热模型分析,建立缩尺实验中内、外表面换热系数、叶片导热系数以及涂层厚度变化对综合冷却效率影响的定量评价,得出结论:

(1) 缩尺比例 1.5 时,缩尺叶片综合冷却效率相对基准叶片增加 10%。缩尺叶片内冷通道换热强度增加,内部换热系数增大,平均综合冷却效率上升。叶片侧面及尾缘位置冷却效率提升明显,前缘冷却效率不受影响。

(2) 基准叶片导热系数变化前后,缩尺叶片平均综合冷却效率差异由 13.71% 减小至 0.34%。导热系数影响耦合换热过程中的毕渥数,毕渥数增加使冷却效率分布趋于均匀化。叶片缩尺过程中,减小缩尺叶片导热系数,毕渥数增加,可降低缩尺效应对综合冷却效率的影响。

(3) 热障涂层厚度等比例缩尺可减小缩尺效应的影响,使缩尺叶片综合冷却效率差异由 13.07% 下降至 2.98%。由于热障涂层的导热系数远小于叶片金属,贴敷厚度等比例缩小的涂层时,可忽略缩尺效应对综合冷却效率的影响。

(4) 与燃气轮机实际工况相比,文中雷诺数和温度比偏低,缩尺效应量值受影响,但不影响定性结论,后续将在高雷诺数实验中研究。

参考文献:

[1] HAN J C. Advanced cooling in gas turbines 2016 Max Jakob me-

- morial award paper [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2018, 140(11):113001.
- [2] 董平,黄洪雁,冯国泰,等.高压燃气涡轮径向向内冷叶片气热耦合的数值分析[J].*航空动力学报*,2008,23(2):201-207.
DONG Ping, HUANG Hong-yan, FENG Guo-tai, et al. Conjugate heat transfer analysis of a high pressure turbine vane with radial internal cooling passages [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2008, 23(2):201-207.
- [3] DEES J E, BOGARD D G, LEDEZMA G A, et al. Experimental measurements and computational predictions for an internally cooled simulated turbine vane [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(6):061003.
- [4] DEES J E, BOGARD D G, LEDEZMA G A, et al. Experimental measurements and computational predictions for an internally cooled simulated turbine vane with 90 degree rib turbulators [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(6):061005.
- [5] LIU You-hong, LUO Yi-fu, DING Yu-lin, et al. Numerical and experimental investigation of a turbine guide vane with conjugate heat transfer method [J]. *Thermal Science*, 2022, 26(5):4259-4269.
- [6] 曹玉璋,邱绪光.实验传热学 [M].北京:国防工业出版社,1998.
CAO Yu-zhang, QIU Xu-guang. *Experimental heat transfer* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.
- [7] COLLADAY R S, STEPKA F S. Similarity constraints in testing of cooled engine parts [R]. NASA-TND, 1974.
- [8] 王进,崔沛,田丽亭,等.开槽冷却孔结构的耦合传热特性的研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(2):409-413.
WANG Jin, CUI Pei, TIAN Li-ting, et al. Conjugate heat transfer investigation of trenched film cooling characteristics [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(2):409-413.
- [9] JUNG E Y, CHUNG H, CHOI S M, et al. Conjugate heat transfer on full-coverage film cooling with array jet impingements with various Biot numbers [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 83:1-8.
- [10] LIU Xue-bin, ZHANG Chao, SONG Li-ming, et al. Influence of Biot number and geometric parameters on the overall cooling effectiveness of double wall structure with pins [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 198:117439.
- [11] BRYANT C E, WIESE C J, RUTLEDGE J L, et al. Experimental evaluations of the relative contributions to overall effectiveness in turbine blade leading edge cooling [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2019, 141(4):041007.
- [12] STEWART W R, KISTENMACHER D A, BOGARD D G, et al. Effects of TBC thickness on an internally and film cooled model turbine vane [C] // *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014*. German: Turbine Technical Conference and Exposition, 2014.
- [13] HORNER M J, YOON C, BOGARD D G, et al. Experimental and computational investigation of integrated internal and film cooling designs incorporating a thermal barrier coating [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2022, 144(9):091001.
- [14] HUANG Xin, PU Jian, WANG Jian-hua, et al. Sensitivity analysis of internal layout and coating thickness to overall cooling performances of laminated cooling configurations with surface thermal barrier coatings [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 181:116020.
- [15] CHOI J H, MHETRAS S, HAN J C, et al. Film cooling and heat transfer on two cutback trailing edge models with internal perforated blockages [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2008, 130(1):012201.
- [16] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1):3-17.
- [17] SWEENEY P C, RHODES J F. An infrared technique for evaluating turbine airfoil cooling designs [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2000, 122(1):170-177.
- [18] BERGMAN T L, LAVINE A S. *Fundamentals of heat and mass transfer* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.

(刘颖编辑)