

气膜冷却共轭传热性能对 CMAS 颗粒沉积规律影响研究

陈小虎¹, 刘 勋², 王玉璋¹, 翁史烈¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘 要: 基于颗粒速度、温度、粘度和组分之间的函数关系以及与壁面的碰撞、反弹、粘附和去除机制, 建立了 CMAS ($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) 颗粒在涡轮叶片表面沉积的数学模型, 研究了不同吹风比 $0 \leq M \leq 2$ 和粒径下气膜冷却共轭传热性能对气膜冷却有效度、CMAS 沉积效率和沉积规律的影响规律。结果表明: 当吹风比为 $0 \leq M \leq 2$ 时考虑共轭传热的平均气膜冷却有效度随吹风比非线性增大, $M > 1.5$ 时气膜孔下游出现明显的对转涡对和冷却剂射流分离; 气膜孔出口存在被 CMAS 堵塞的潜在风险, 小吹风比时气膜孔被严重堵塞, 大吹风比时气膜孔间以及下游气膜覆盖间隙处形成典型的扇形周期性沉积“犁沟”, CMAS 沉积效率随吹风比的增大而减小; 分析工况下, 随着粒径增大沉积效率显著降低, 粒径为 $4 \mu\text{m}$ 时沉积效率最大, 可达 28.5%。

关 键 词: 涡轮叶片; CMAS 沉积; 共轭传热; 沉积特性

中图分类号: TK124

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2021.10.001

[引用本文格式] 陈小虎, 刘 勋, 王玉璋, 等. 气膜冷却共轭传热性能对 CMAS 颗粒沉积规律影响研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(10): 1-10. CHEN Xiao-hu, LIU Xun, WANG Yu-zhang, et al. Study on effect of conjugate heat transfer of film cooling on CMAS particle deposition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 1-10.

Study on Effect of Conjugate Heat Transfer of Film Cooling on CMAS Particle Deposition

CHEN Xiao-hu¹, LIU Xun², WANG Yu-zhang¹, WENG Shi-lie¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240;

2. Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: Gas turbine cannot operate in completely pure environment. Particulate matter in air and impure fuel will form $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS) particles in the combustion chamber during service. CMAS deposition on the surface of turbine blade will deteriorate the cooling performance of the film cooling and shorten the service life of gas turbine. Based on the functional relationship between particle velocity, temperature, viscosity and components and the mechanism of collision, rebound, adhesion and removal with the wall, the mathematical models for the CMAS deposition were established. The effect of conjugate heat transfer performance of film cooling on the CMAS deposition efficiency and performance under different blowing ratio $0 \leq M \leq 2$, and particle sizes were studied. The results show that the average film cooling efficiency under conjugate heat transfer increases nonlinearly with the increase of blowing ratio at $0 \leq M \leq$

收稿日期: 2021-03-30; 修订日期: 2021-06-23

基金项目: 国家科技重大专项(2017-I-0007-0008)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2017-I-0007-0008)

作者简介: 陈小虎(1990-), 男, 河南周口人, 上海交通大学博士研究生。

通讯作者: 王玉璋(1973-), 男, 河北石家庄人, 上海交通大学副教授。

2, and obvious counter-rotating vortexes (CRVP) and coolant jet separation appear downstream of film holes when . The film holes may be the starting point of particles deposition on the vane. The film holes are seriously blocked at low blowing ratio, and typical fan-shaped periodic deposition “furrows” are formed between film holes and downstream film coverage gaps under high blowing ratios. The deposition efficiency decreased with the increase of blowing ratio. The maximum deposition efficiency of particles with a size of $4\text{ }\mu\text{m}$ on the wall is 28.5%, and the deposition efficiency decreases significantly with the increase of particle size.

Key words: turbine vane, CMAS deposition, conjugate heat transfer, deposition characteristics

引 言

燃气轮机不可能在完全清洁的环境中运行^[1-2]。尽管发电和舰船燃气轮机中高效的进气过滤系统能有效滤除粒径大于 $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒,但小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的小粒径颗粒(如细砂、盐分、气溶胶和燃烧焦炭等)在长时间服役中仍能造成严重的沉积和气膜孔堵塞。航空用燃气轮机没有进气过滤系统,但可能在大浓度的沙尘和火山灰环境中运行^[3]。国内外关于 CMAS($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$)颗粒在高温涡轮叶片上的沉积已经开展了广泛而深入的研究,目前主要集中在两个方面:一是粒径较大颗粒对热障涂层(Thermal barrier coatings, TBC)和叶片表面的冲蚀、磨损和失效行为;二是粒径较小颗粒在壁面的沉积规律^[4]。相较于颗粒的冲蚀行为,CMAS 在壁面的沉积机理更为复杂,对燃气轮机寿命退化的影响更为显著。

CMAS 颗粒与叶片壁面的相互作用机制受众多参数(进口温度、表面粗糙度、粒径、颗粒物组分、流动特性和温度均匀性等)的影响^[5-7]。在实验方面, Bons 等人通过实验获得了涡轮壁面沉积的三维形貌,发现沉积物具有随机的波峰和波谷组合,并通过高温加速沉积设备(Turbine accelerated deposition facility, TADF)开展了实验,分析了颗粒沉积物的微观形貌和成分,描述了沉积物随时间的演化过程及对壁面传热的影响规律^[8-10]。Ai 等人^[11-14]利用 TADF 研究了颗粒在平板和叶片上的沉积规律,研究表明:壁温随沉积厚度的增加而增加,捕获效率随壁温非线性增加;气膜冷却对颗粒沉积影响显著,吹风比增大,下游沉积量减少,扩张型气膜孔下游沉积厚度小于圆柱型孔;沉积主要发生在涡轮叶片的前

缘,随着进口温度的升高,压力面的沉积量显著增大。

由于 TADF 实验需要巨大的研究成本,国内外近年来开始利用数值计算的经济性和高效性研究 CMAS 颗粒的沉积和换热机理。EI-Batsh 等人^[15]建立了以颗粒与壁面相互作用为基础的临界速度模型,通过临界速度判断颗粒的沉积与反弹。Tafti 等人^[16]在颗粒粘度-温度关系的基础上建立了判断颗粒沉积的粘度模型。Ai 等人^[17-19]分别构建速度或粘度模型,研究主流流动参数、孔型和端壁等参数对颗粒沉积的影响。上海交通大学、南京航空航天大学等单位^[20-22]针对颗粒在涡轮叶栅和气膜孔附近的沉积特性也开展了数值和实验研究。

临界速度模型主要由颗粒速度考量粘附和反弹,而高温下软化或熔融的 CMAS 颗粒的粘度显著影响沉积。临界粘度模型包含了颗粒温度、粘度和化学组分对沉积的影响,而未考虑颗粒速度、壁面温度和粗糙度等因素的影响。同时,气膜冷却与涡轮叶片的共轭传热显著影响壁面温度和颗粒速度、温度和粘度等参数,而目前公开文献中缺乏 CMAS 在气膜孔内的堵塞及多因素耦合下沉积机制的深入研究。因此,本文发展了考虑 CMAS 软化和熔融温度、粘度、速度和组分等因素的复合沉积模型,并在建立气膜冷却与固体壁面共轭传热的基础上,研究了 CMAS 颗粒在气膜孔附近的沉积和孔内的堵塞特性。

1 数值计算方法

1.1 物理模型及网格划分

颗粒在气膜孔附近沉积的物理模型如图 1 所示,模型以及计算条件与 Ai 等人^[17]实验相匹配。计算域主要由主流通道、冷却剂通道、气膜孔、固体

试样和平板组成。圆柱型气膜孔的直径为 $D = 1\text{ mm}$,长径比 $L/D = 4.5$,

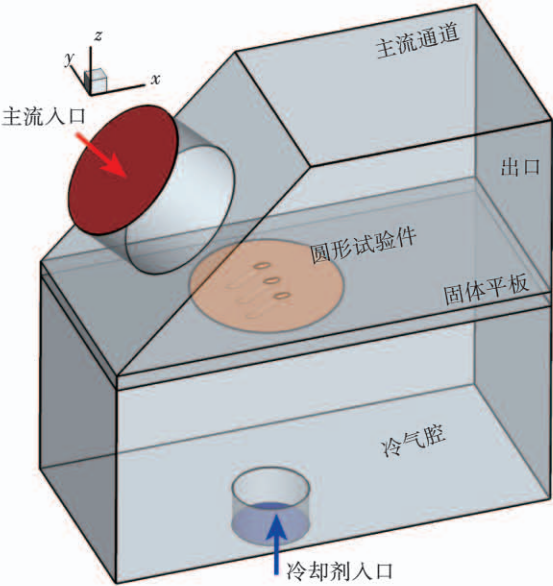


图 1 颗粒在气膜孔附近沉积的物理模型
Fig. 1 Physical model for the deposition of particles near the film holes

冷却剂通过气膜孔流出与高温燃气掺混。入口段与平板的夹角为 45° ,气膜孔与平板的夹角为 30° 。主流通道的长、宽、高分别为 $81D$ 、 $39D$ 和 $36D$ 。气膜孔距离平板前缘的距离为 $36D$ 。冷却通道长、宽、高分别为 $81D$ 、 $39D$ 和 $40.5D$ 。平板厚度为 $3D$ 。试样直径为 25.4 mm 。

在气 - 固两相计算中,主流速度为 173 m/s ,温度为 $1\,453\text{ K}$ 。冷却剂入口温度为 293 K ,冷却剂通道壁面为绝热壁面。在主流通道,除入口处壁面温度为 300 K 以外,其他壁面温度均为 900 K 。出口边界处各流动变量在流向上的梯度均为 0 。为开展流动与壁面的共轭传热计算,平板以及试样的上、下壁面均为耦合壁面,平板侧面均为绝热壁面,以实现热流的垂向传递。根据实验将入口湍流度设为 4.7% 。

在计算域生成非结构四面体拓扑网格,如图 2 所示。网格数量和质量决定计算精度,经过网格无关性验证,最终确定四面体网格单元数约为 320 万 。在壁面附近和大速度、大温度梯度区域对网格进行加密处理。平板上、下壁面和气膜孔附近网格增长因子为 $1.1 \sim 1.2$ 。

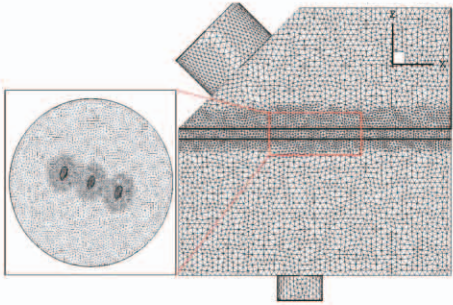


图 2 计算网格
Fig. 2 Computational grid

在主流入口处均匀地释放 CMAS 颗粒。颗粒的温度和速度与高温主流相同,并在到达试样时与壁面相互作用。颗粒与壁面材料的物性参数如表 1 所示。实验中颗粒的平均直径为 $13.4\text{ }\mu\text{m}$,粒径服从 Rosin-Rammler 对数分布。为对比粒径对沉积的影响,模拟了粒径 $2 \sim 8\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒在壁面的沉积特性。颗粒与壁面的杨氏模量根据实验^[3]由式(17)确定:

$$E_p = 3 \times 10^{20} \exp(-0.023\,65\,T_{\text{avg}})$$

(17)

表 1 颗粒和壁面物性参数

Tab. 1 Material parameters of particles and walls

密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	颗粒平均 直径/ μm	比定压 热容/ $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	泊松 比	颗粒导 热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	壁面导 热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$
990	13.4	984	0.27	0.5	9

1.2 控制方程

1.2.1 气相控制方程

气相的连续性和动量方程可以表达为:

$$\nabla \cdot (\rho_f u_f) = 0$$

(1)

$$\nabla \cdot (\rho_f u_f u_f) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho_f g$$

(2)

剪切应力 τ 可表述为:

$$\tau = \mu_e [(\nabla u_f) + (\nabla u_f)^{-1}]$$

(3)

通过标准 $k - \omega$ 方程确定流体有效粘度 μ_e 。

能量方程可表达为:

$$\nabla \cdot (\rho_f c_{p,f} T_f u_f) = -u_f \nabla p + \nabla \cdot (k_e \nabla T_f)$$

(4)

$$k_e = k_f + c_{p,f} \mu_f / Pr_f$$

(5)

式中: ρ_f —气相的密度, kg/m^3 ; u_f —速度, m/s ;

p —压力, Pa; T_f —气相温度, K; k_e —有效热导率, W/(m·K); k_f —气体热导率, W/(m·K); $c_{p,f}$ —比定压热容, J/(kg·K); μ_t —涡黏, Pa·s; Pr_t —普朗特数, 取 0.5。

通过在流体和固体区域求解式(1)~式(5), 从而预测气膜冷却流场、温度场和固体域内的温度场。在固体域求解傅里叶方程, 流体与固体交界面设置为耦合边界, 流体域和固体域通过交界面上的热流交换实现耦合。湍流模型采用标准的 $k-\omega$ 模型, 压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法。能量方程及 $k-\omega$ 方程的离散采用二阶迎风格式。

1.2.2 颗粒相控制方程

采用欧拉-拉格朗日法预测颗粒在气相中的运动轨迹, 随机游走模型被用来评估颗粒受湍流脉动的影响。颗粒输运方程主要考虑颗粒所受的重力 G_p 、拖曳力 F_D 和 Saffman 升力 F_S :

$$m_p \frac{d u_p}{dt} = F_D + F_S + G_p \quad (6)$$

颗粒受到的拖曳力 F_D 和阻力系数 C_D 可以表示为:

$$F_D = \frac{1}{8} \pi C_D d_p^2 \rho_f |u_f - u_p| (u_f - u_p) \quad (7)$$

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}, Re_p < 1 \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), 1 \leq Re_p < 400 \\ 0.44, Re_p \geq 400 \end{cases} \quad (8)$$

颗粒的传热方程为:

$$m_p c_p \frac{d T_p}{dt} = h A_p (T_f - T_p) \quad (9)$$

颗粒在涡轮叶片表面的沉积一方面取决于本身的温度-粘性-组分关系, 另一方面取决于颗粒与壁面的相互作用。基于 EI-Batsh 模型的颗粒临界速度为:

$$v_{cr} = \left\{ \frac{1.02}{d_p} \left[\frac{5 \pi^2 (k_1 + k_2)}{4 \rho_p^{3/2}} \right]^{2/5} \right\}^{10/7} \quad (10)$$

其中,

$$k_1 = \frac{(1 - \nu_w^2)}{\pi E_w} \quad (11)$$

$$k_2 = \frac{(1 - \nu_p^2)}{\pi E_p} \quad (12)$$

颗粒粘度与温度的变化关系为:

$$\log\left(\frac{\mu_p}{T_p}\right) = A + \frac{1000B}{T_p} \quad (13)$$

系数 A 和 B 由颗粒的化学组分决定, 根据实验数据^[16]得到。本文在高温下取 -11.3 和 15.96。

CMAS 颗粒的熔融温度约为 1 478 K, 本文取 1 500 K, 对应的临界粘度为 μ_{cr} 。因此, 颗粒在不同温度下的沉积概率可表达为:

$$P_s(T_p) = \frac{\mu_{cr} v_{cr}}{\mu_p v_n} \quad (14)$$

采用临界动量理论来描述颗粒从涡轮表面的脱离机制。临界壁面剪切力 $u_{\tau c}$ 为:

$$u_{\tau c}^2 = \left(\frac{C_u W_A}{\rho d_p} \right) \left(\frac{W_A}{K_C d_p} \right)^{1/3} \quad (15)$$

其中复合杨氏模量 K_C 为:

$$K_C = \frac{4}{3} \left[\frac{(1 - \nu_w^2)}{E_w} + \frac{(1 - \nu_p^2)}{E_p} \right]^{-1} \quad (16)$$

式中: m_p —颗粒质量, kg; u_p —颗粒速度, m/s; Re_p —颗粒雷诺数; c_p —颗粒比定压热容, J/(kg·K); T_f 、 T_p —流体和颗粒温度, K; h —换热系数, W/(m·K); A_p —颗粒表面积; m^2 。 μ_p 、 μ_{cr} —颗粒粘度和临界粘度, Pa·s; v_n 、 v_{cr} —法向速度和临界速度, m/s; C_u —康宁系数; W_A —附着功, J/m², 取 38.9×10^{-3} ; d_p —颗粒直径, m; E_w 、 E_p —壁面与颗粒的杨氏模量, Pa; ν_w 、 ν_p —壁面与颗粒的泊松比, 取 0.27。

当湍流流动在壁面的摩擦速度大于临界表面剪切速度时, 颗粒将被从壁面除去。

1.3 沉积模型验证

颗粒沉积效率被定义为:

$$\text{沉积效率} = \frac{\text{壁面沉积的颗粒质量}}{\text{颗粒入射的总质量}} \quad (17)$$

根据 Ai 等人^[17]的实验数据, 比较了通过沉积模型预测的沉积效率与实验测量值的对比, 如图 3 所示。从预测结果来看, 沉积模型能准确地反映颗粒在不同吹风比下的沉积趋势。在吹风比较小时沉积模型对颗粒沉积有小幅的过预测。其中有 3 个原因: 一是粒径分布与实验不完全匹配; 二是实验中入口管道长度为 1 m, 而数值计算模型中受限于计算成本而较短; 三是数值计算中冷却剂入口条件是根

据吹风比反推算出来的,存在一定的误差。总体来看,本文发展的颗粒沉积模型可以有效地预测颗粒在涡轮壁面的沉积行为。

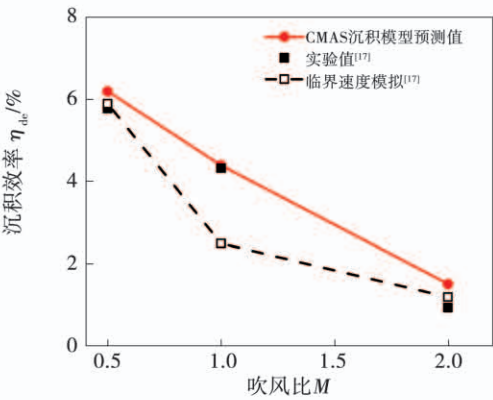


图 3 沉积模型预测的沉积效率与实验值

Fig.3 Deposition efficiency predicted by deposition model and experimental data

2 结果及分析

2.1 吹风比对表面温度分布的影响

由于颗粒的临界粘度和临界速度是温度的函数,壁面温度是影响颗粒在叶片表面沉积的重要因素。图 4 为不同吹风比下试验件表面的面积-平均温度。随着吹风比从 0 到 2 不断增大,壁面的平均温度不断下降,温差约为 200 K。当吹风比大于 1.5 时温度下降斜率逐渐减小,这是由于大吹风比下冷却剂射流在气膜孔下游出现流动分离导致的。

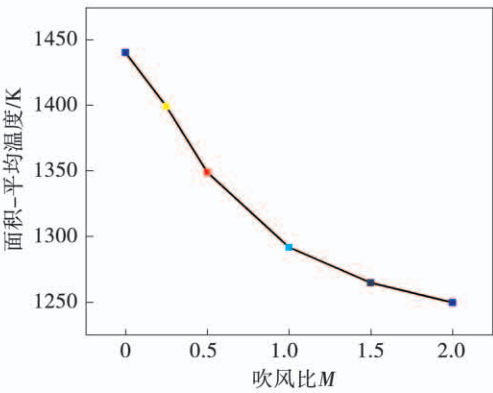


图 4 圆形试验件表面的面积-平均温度

Fig.4 Area-averaged temperature of coupon surface

气膜冷却有效度是衡量气膜冷却有效程度的重要指标,定义为:

$$\eta = \frac{T - T_m}{T_c - T_m} \tag{18}$$

式中: T , T_m 和 T_c —气膜孔下游的壁面温度,主流温度和气膜孔入口的冷却剂温度,K。

图 5 为不同吹风比下表面气膜冷却有效度分布。气膜冷却有效度最高的区域在气膜孔的前缘,这是气膜孔入口处的分离区造成的。冷却剂在分离区的迎风侧形成“喷射效应”,速度急剧增大,直接冲击到气膜孔前缘处造成冷却有效度的升高。当吹风比增大时,高冷却有效度水平区域由气膜孔边缘向下游和展向扩展。吹风比大于 1.0 时,下游的冷却效果增长不明显,这是由冷却剂和高温燃气的掺混增强造成的。

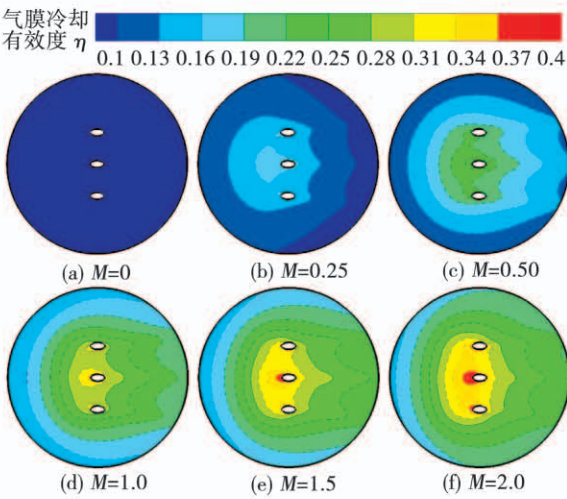


图 5 不同吹风比下试样表面的气膜冷却有效度分布

Fig.5 Film cooling effectiveness distribution on coupon surface with different blowing ratios

图 6 为不同吹风比时气膜孔下游 $X/D = 3$ 处的温度分布和流线。对比小吹风比下 ($M = 0 \sim 0.5$) 的温度场和流线发现,冷却气膜在吹风比达到 0.5 时才能稳定形成于气膜孔下游,固体试样表面和内部的温度开始显著降低。从图 6(d) ~ 图 6(f) 中的流线可以清晰看到,气膜孔下游形成对转涡对 (CRVP),说明冷却剂射流的强度增强,同时与主流的相互作用增强。CRVP 能裹挟附近的高温燃气输运到壁面,对气膜冷却有效度的提高是不利的。图 6(f) 中的 CRVP 相比小吹风比时尺度更大且远离壁面,在气膜孔下游形成局部分离区。

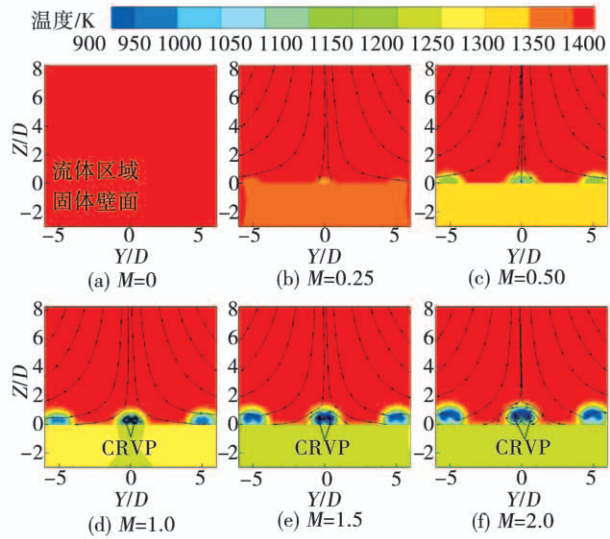


图 6 不同吹风比下气膜孔下游 ($X/D = 3$) 的温度分布和流线

Fig. 6 Temperature distribution and streamlines downstream of film cooling hole ($X/D = 3$) with different blowing ratios

图 7 为不同吹风比下气膜孔下游沿中心线的气膜冷却有效度。在吹风比 $M \leq 1.5$ 时,中心线气膜冷却有效度随着吹风比的增加而增加。然而,当吹风比继续增大时,气膜冷却有效度却反而下降。与 $M = 1.5$ 相比, $M = 2.0$ 时的冷却有效度降低了约 3.9%,这正是大吹风比下冷却气膜贴附壁面的能力下降所导致的。

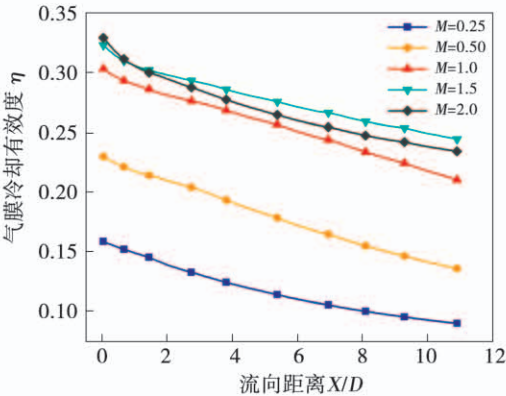


图 7 不同吹风比下沿中心线的气膜冷却有效度
Fig. 7 Centerline film cooling effectiveness with different blowing ratios

展向平均气膜冷却有效度能反映气膜的展向冷却能力。图 8 为不同吹风比下的展向平均气膜冷却

有效度,展向积分区间为 $[-19.5D, 19.5D]$ 。在 $0 \leq M \leq 2$ 的吹风比区间内气膜孔下游的平均冷却有效度随着远离气膜孔而减小,变化趋势相似。与沿中心线的气膜冷却有效度不同,展向平均气膜冷却有效度随着吹风比的增大而增大。产生这种现象的原因是冷却剂的展向扩散能力和对平板背面的冷却能力增强。

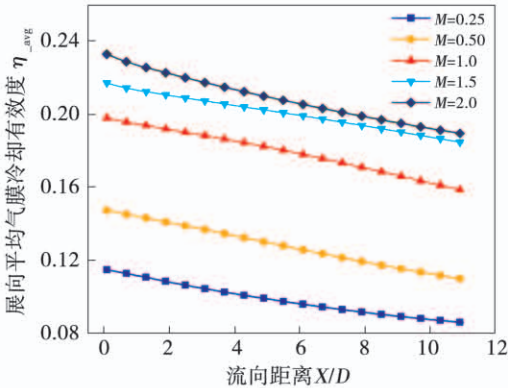


图 8 不同吹风比下的展向平均气膜冷却有效度
Fig. 8 Laterally-averaged film cooling effectiveness with different blowing ratios

图 9 为不同吹风比下圆形试样表面的面积平均气膜冷却有效度。面积平均气膜冷却有效度随消耗冷气量的增加而增加,但增长速率逐渐缓慢。当 $M \leq 1.0$ 时,吹风比每增加 0.5,面积平均气膜冷却有效度增大 30% ~ 35%;而当 $1.0 \leq M \leq 2.0$ 时,吹风比增加 0.5,面积平均气膜冷却有效度的增大量小于 10%。面积平均气膜冷却有效度的增大代表冷却效果更好,壁面温度更低,而颗粒沉积的概率也会降低。

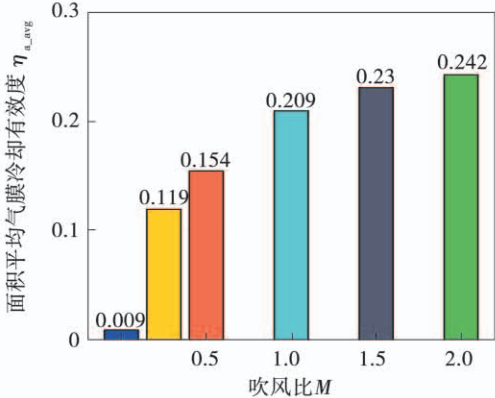


图 9 不同吹风比下面积平均气膜冷却有效度
Fig. 9 Area-averaged film cooling effectiveness with different blowing ratios

2.2 吹风比对颗粒沉积特性的影响

吹风比对颗粒在壁面沉积的影响主要体现在两方面:一是冷却剂射流与主流的相互作用改变颗粒的运动特性;二是气膜冷却显著降低壁面温度从而影响颗粒附着特性。图 10 为颗粒在涡轮叶片表面沉积分布与吹风比之间的对应关系。颗粒的平均直径为 13.4 μm,为了直观地观察颗粒在气膜孔附近的沉积,过滤了只有少数的粒径特别大的颗粒,并对粒径的显示进行了统一地放大处理。

由图 10(a)可知,当没有冷气吹出时圆形试样几乎完全被沉积物所覆盖。除气膜孔前缘外,沉积的颗粒分布相对均匀,颗粒温度在 1 400 K 以上。同时,在气膜孔出口背风侧看到显著沉积物堵塞,堵塞范围甚至超过 0.5*D*。这说明气膜孔很有可能是涡轮叶片表面颗粒物沉积的起源位置。随着吹风比逐渐增大,气膜孔内颗粒物沉积减少,尤其是小粒径颗粒,直到吹风比增大到 1.5 以上时孔内堵塞几乎消失。颗粒物在气膜孔内堵塞将在 0 < *M* < 1.5 范围内造成气膜冷却效果显著恶化,极大缩短高温叶片的健康度和寿命^[22]。

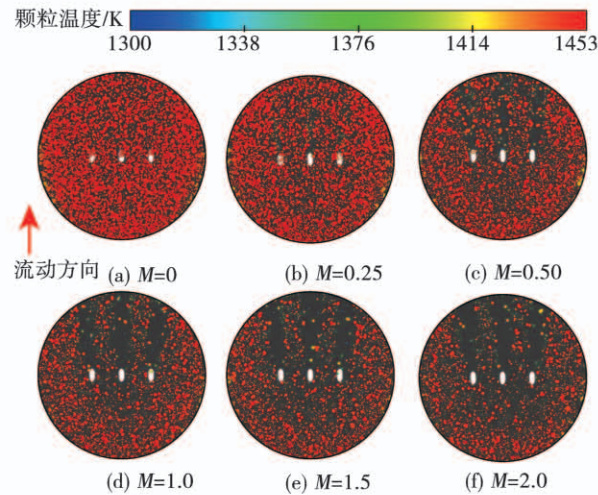


图 10 不同吹风比下试样表面的颗粒沉积
Fig. 10 Particle deposition on coupon surface with different blowing ratios

吹风比对颗粒物在气膜孔下游的沉积具有重要影响。由图 10(b) ~ 图 10(f)可知,小吹风比下,试样表面温度降低,沉积物浓度降低明显。同时,当吹风比为 0.5 时气膜孔下游将形成一段距离的沉积减少区域,而在气膜孔之间以及冷却剂覆盖间隙处形成显著的“犁沟”型沉积分布。此时仍有少量的大

直径颗粒能穿透气膜附着在试样表面。当吹风比大于 1.0 时,气膜孔下游的扇形区域内颗粒沉积形成的周期性波峰和波谷更明显。冷却气膜覆盖区域的颗粒沉积逐渐减少,颗粒的温度也显著降低。此时沉积除了集中在气膜孔间外,还大量附着在气膜孔前缘区域和试样的边缘,这是因为这些区域因为得不到足够的冷却而温度较高。

图 11 为不同吹风比下试样表面的沉积效率。颗粒分布与图 10 相同,符合 Rosin-Rammler 对数分布。颗粒在壁面的沉积效率随着吹风比的增大而减小,变化呈现非线性。与没有冷空气出入工况相比,试样表面的沉积率在 0 < *M* ≤ 2.0 范围内分别降低了约 20.6% ,51.2% ,63.5% ,71.3% 和 75.5%。提高吹风比能降低颗粒在壁面的沉积率,但当吹风比达到 0.5 以上时这种抵抗沉积的能力逐渐减弱。在吹风比 1.0 以上,吹风比增加只能带来 10% 以内的沉积效率降低,这与气膜冷却的流动机理有关。离散的圆柱型气膜孔在绝热情况下的最佳吹风比大约在 0.5 附近,在考虑共轭传热情况下会有提高,约在 1.0 附近^[23]。继续提高吹风比会带来较大的冷却剂射流分离,冷热掺混也变剧烈,冷却效果下降,这就导致沉积效率的缓慢下降。

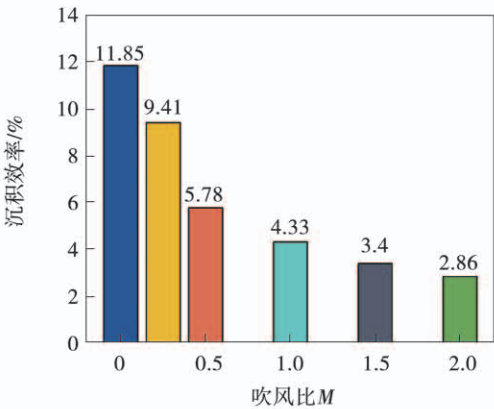


图 11 不同吹风比下试样表面的颗粒沉积效率
Fig. 11 Particle deposition efficiency on coupon surface with different blowing ratios

2.3 粒径对颗粒沉积特性的影响

颗粒直径对沉积的重要影响主要体现在两个方面:一是颗粒粒径直接决定了 *St* 数,其是评价粒子随流性的最重要指标。二是粒径直接影响颗粒的临界捕获速度,由公式(10)可知。*St* 数定义为:

$$St = \frac{\tau U_p}{d_p}$$

(19)

式中： U —特征速度， m/s ； μ_f —流体粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； L —特征长度， m 。

$$\tau = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_f} \tag{20}$$

图 12 为不同粒径($d_p=2,4,6,8\ \mu\text{m}$)和不同吹风比($M=0,0.5,1,2$)下颗粒在气膜孔附近的沉积分布。吹风比为 0 时,颗粒的平均温度明显高于其他情况。纵向对比可知,在 $2\ \mu\text{m} \leq d_p \leq 8\ \mu\text{m}$ 时,颗粒在试样表面的沉积数量总是随着吹风比的增大而减少。造成这种现象的主要原因是冷却效果得到了提升,壁面温度迅速下降,颗粒的粘度也显著增大,沉积概率就相应降低。

在没有冷空气吹入时,发现除了直径 $2\ \mu\text{m}$ 的颗粒外,其他颗粒均在气膜孔内形成严重的沉积。尽管直径在 $6 \sim 8\ \mu\text{m}$ 之间的颗粒在壁面的沉积数量减少,但大颗粒的体积和质量呈指数增加,几乎完全堵塞了气膜孔。当吹风比达到 1.0 时,气膜孔堵塞现象基本消失。在相同吹风比下, $d_p=4\ \mu\text{m}$ 的颗粒在壁面的沉积量最大,粒径继续增大颗粒沉积量减小。造成这种现象的原因主要是,由于临界速度与粒径成反比关系,粒径增大临界速度减小,相应的沉积概率减小。小粒径下沉积数量少的原因是 St 数较小,颗粒随流性较好,被冷却气膜隔开而无法碰撞壁面。

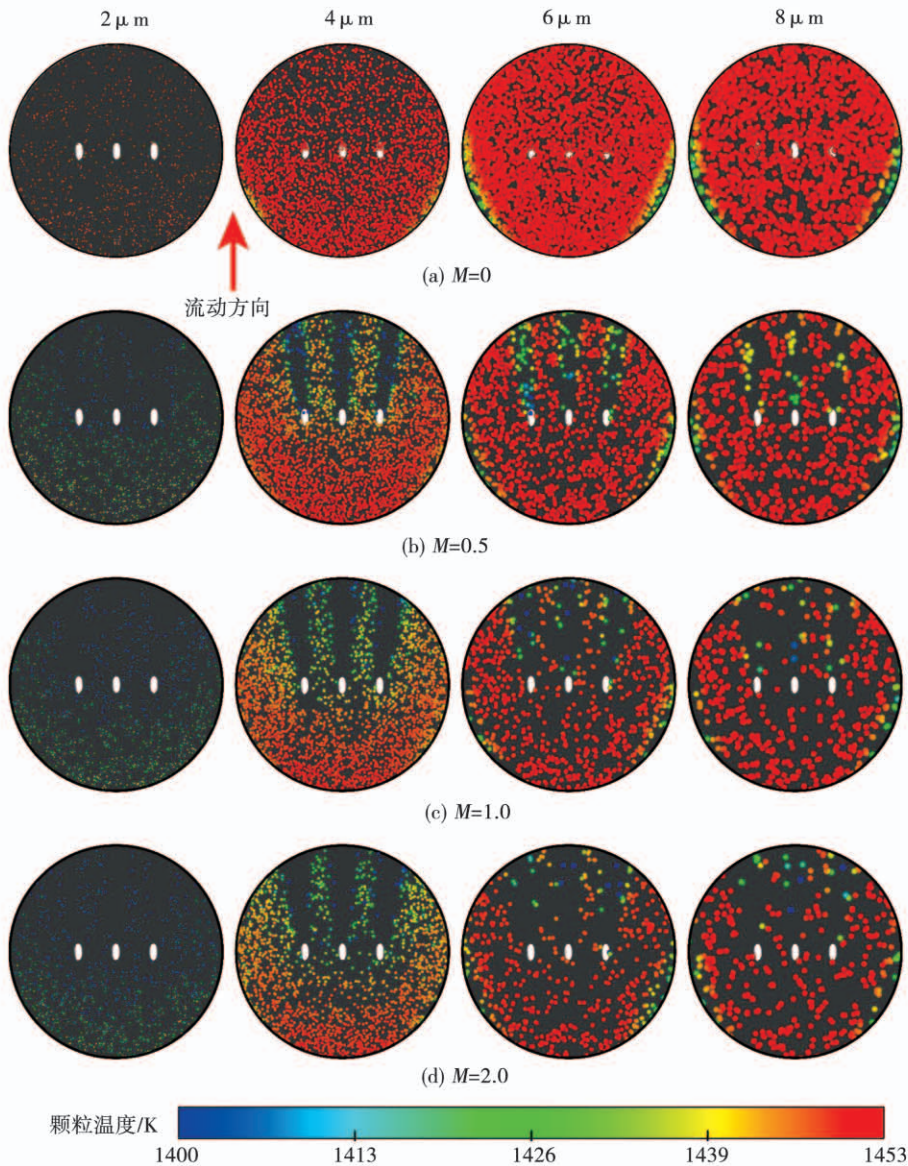


图 12 不同吹风比和粒径下试样表面的颗粒沉积

Fig. 12 Particle deposition on coupon surface with different blowing ratios and particle diameters

图 13 为不同粒径和吹风比下颗粒沉积效率的定量对比。当没有气膜冷却时,沉积效率最高的是直径 $6\ \mu\text{m}$ 的颗粒,而当存在气膜冷却时沉积效率最高的是直径 $4\ \mu\text{m}$ 的颗粒。 $2\ \mu\text{m}$ 的小颗粒的沉积效率一直维持在较低的水平,约为 5%。其中一个原因是单个颗粒的质量太小,即使有较多的颗粒的被捕获但总质量仍较低。当粒径达到 $4\ \mu\text{m}$ 时临界捕获速度的减小量较小,且此时颗粒在相同温度下的熔融程度较高,因此有更高的沉积效率,最高约 28.5%。粒径继续增大到 6 和 $8\ \mu\text{m}$ 后,临界速度显著减小,且熔融程度减小,颗粒粘附在壁面的概率显著降低。此时,尽管颗粒的跟随性差,部分颗粒能穿透冷却气膜与壁面发生相互作用,但只有少数的较低法向速度的颗粒能沉积到壁面,因而总沉积效率迅速下降。当吹风比达到 1 时沉积效率下降到 10% 以下。在燃气轮机的设计和服役阶段可针对性地滤除 $4\ \mu\text{m}$ 以上的颗粒或者恰当地调整冷气消耗量以使颗粒的沉积效率降到最低。

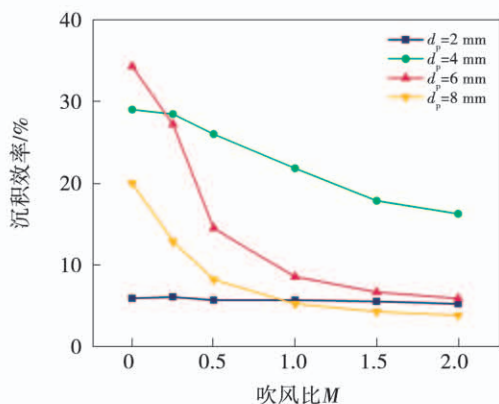


图 13 不同吹风比和粒径下试样表面颗粒沉积效率

Fig. 13 Particle deposition efficiency on coupon surface with different blowing ratios and particle diameters

3 结 论

发展了考虑颗粒速度、温度、粘度和组分的沉积模型,在气冷涡轮叶片共轭传热的基础上开展了不同吹风比和粒径对气膜孔附近的颗粒沉积特性的影响的研究,主要结论为:

(1) 当吹风比 $M > 1.5$ 时气膜孔下游出现明显的 CRVP 和冷却剂射流分离,沿中心线的气膜冷却

有效度开始降低;平均气膜冷却有效度在 $0 \leq M \leq 2$ 区间内,随着吹风比的增大而非线性增大,最大面积平均冷却有效度约为 0.242。

(2) 吹风比较小时,气膜出口存在被 CMAS 严重堵塞的潜在风险;大吹风比时在气膜孔间以及下游气膜覆盖间隙处形成典型的扇形周期性沉积“犁沟”;颗粒在壁面的沉积效率随吹风比的增大而非线性减小。

(3) 小颗粒的沉积效率在 5% 以下,直径 $4\ \mu\text{m}$ 的颗粒在壁面的沉积数量最多,沉积效率最大可达约 28.5%;随着粒径增大,临界捕获速度减小且熔融程度减小,沉积效率显著降低。

参考文献:

- [1] SUMAN A, CASARI N, FABBRI E, et al. Generalization of particle impact behavior in gas turbine via non-dimensional grouping[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 74: 103–151.
- [2] MORELLI S, TESTA V, BOLELLI G, et al. CMAS corrosion of YSZ thermal barrier coatings obtained by different thermal spray processes[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2020, 40(12): 4084–4100.
- [3] AI W, MURRAY N, FLETCHER T, et al. Deposition near film cooling holes on a high-pressure turbine vane[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2012, 134(4): 041013.
- [4] BONILLA C, WEBB J, CLUM C, et al. The effect of particle size and film cooling on nozzle guide vane deposition[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134: 101901.
- [5] BARKER B, CASADAY B, SHANKARA P, et al. Coal ash deposition on nozzle guide vanes-Part II: computational modeling[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2013, 135: 011015.
- [6] WHITAKER S M, PRENTER R, BONIS J P. The effect of freestream turbulence on deposition for nozzle guide vanes[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2015, 137: 121001.
- [7] PRENTER R, AMERI A, BONIS J P. Deposition on a cooled nozzle guide vane with nonuniform inlet temperatures[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2016, 138: 101005.
- [8] Jensen J W, Squire S W, Bonis J P, et al. Simulated Land-Based Turbine Deposits Generated in an Accelerated Deposition Facility[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(3): 462–470.
- [9] BONIS J P, WAMMACK J E, CROSBY J, et al. Evolution of surface deposits on a high pressure turbine blade, Part II: Convective heat transfer[C]//ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air vol. 3 pt. B Heat Transfer: General Interest Transition Internal

- Air and Seals. Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, Provo, UT 84602, 2006:1 – 10.
- [10] CROSBY J M, LEWIS S, BONIS J P, et al. Effects of particle size, gas temperature and metal temperature on high pressure turbine deposition in land based gas turbines from various syngases [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 2007, 47934: 1365 – 1376.
- [11] AI W, FLETCHER T H. Computational analysis of conjugate heat transfer and particulate deposition on a high pressure turbine vane [J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(4): 041020.
- [12] LEWIS S, BARKER B, BONIS J P, et al. Film cooling effectiveness and heat transfer near deposit-laden film holes [J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(3): 031003.
- [13] SMITH C, BARKER B, CLUM C, et al. Deposition in a turbine cascade with combustor flow [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 2010, 43994: 743 – 751.
- [14] LUNDGREEN R, SACCO C, PRENTER R, et al. Temperature effects on nozzle guide vane deposition in a new turbine cascade rig [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2016, 49781: V05AT13A021.
- [15] EL-BATSH H, HASSELBACHER H. Numerical investigation of the effect of ash particle deposition on the flow field through turbine cascades [C]//ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air. 2002, 30600, 1035 – 1043.
- [16] SREEDHARAN S S, TAFTI D K. Composition dependent model for the prediction of syngas ash deposition in turbine gas hot-path [J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2011, 32(1): 201 – 211.
- [17] AI W, FLETCHER T H. Computational analysis of conjugate heat transfer and particulate deposition on a high-pressure turbine vane [C]//Turbo Expo: Power for land, sea and air; 2009, 48845: 573 – 585.
- [18] LAWSON S A, LYNCH S P, THOLE K A. Simulations of multi-phase particle deposition on a nonaxisymmetric contoured endwall with film-cooling [J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(3): 031032.
- [19] BARKER B, CASADAY B, SHANKARA P, et al. Coal ash deposition on nozzle guide vanes—Part II: Computational modeling [J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(1): 011015.
- [20] 周君辉, 张靖周. 涡轮叶栅内粒子沉积特性的数值研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(11): 2492 – 2499.
- ZHOU Jun-hui, ZHANG Jing-zhou. Numerical investigation on particle deposition characteristic inside turbine cascade [J]. Hangkong Xuebao/Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(11): 2492 – 2499.
- [21] YANG X, HU Y, YU T, et al. Numerical modeling of particle deposition in turbine cascade [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2019, 58585: V02DT47A006: 1 – 14.
- [22] CHEN X, WANG Y, LONG Y, et al. Effect of partial blockage on flow and heat transfer of film cooling with cylindrical and fan-shaped holes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 164: 106866: 1 – 20.
- [23] CHEN X, LI J, LONG Y, et al. A conjugate heat transfer and thermal stress analysis of film-cooled superalloy with thermal barrier coating [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. American Society of Mechanical Engineers, 2020, 84171: V07BT12A074: 1 – 13.

(丛 敏 编辑)