

考虑进口旋流的涡轮静叶流动传热的 颗粒物沉积效应

杨星^{1,2}, 郝子晗^{1,2}, 丰镇平^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;

2. 西安交通大学陕西省叶轮机械及动力装备工程实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了掌握颗粒污染物在航空发动机涡轮中的迁移规律,研究高温涡轮部件中颗粒物的沉积效应,采用数值模拟方法,结合用户自定义函数和动网格技术,在航空发动机真实运行条件下针对高压涡轮第一级静叶,研究了涡轮进口旋流对颗粒物迁移及沉积规律的影响,对比了不同颗粒物温度下叶片表面的沉积特性,并详细分析了颗粒物沉积前后叶栅通道中流场结构、出口气动损失及叶片表面换热系数的变化规律。结果表明:进口旋流对颗粒物的迁移规律及沉积特性改变十分明显,并使得相邻叶片表面的沉积分布规律不再相同;颗粒物温度仅对沉积效率有影响,不会改变颗粒物在叶片表面的沉积规律;颗粒物沉积后,由于叶栅通道面积变窄,主流马赫数会有所提高,再加上叶片型线发生改变,叶栅出口的气动损失明显增大;在存在进口旋流时,颗粒物发生沉积后,叶片表面的换热系数并不一定会增大,主要由进口旋流和叶片沉积物的综合作用决定。

关键词: 航空发动机涡轮;颗粒物沉积;气动损失;换热系数;动网格

中图分类号: V232.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202107007 **文章编号:** 0253-987X(2021)07-0061-10



OSID 码

Particle Deposition Effect of the Flow and Heat Transfer in a Turbine Vane Passage with Inlet Swirl

YANG Xing^{1,2}, HAO Zihan^{1,2}, FENG Zhenping^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Engineering Laboratory of Turbomachinery & Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To understand the particle migration and deposition patterns within the high-pressure turbine, numerical simulations, in conjunction with user-defined functions (UDF) and dynamic mesh techniques, were performed for the first stage vanes of a high-pressure turbine in real engine conditions. The effects of inlet swirl on the particle deposition, flow fields, aerodynamic losses and heat transfer coefficients within the vane passage were investigated. Results reveal that the inlet swirl has significant impacts on the particle migration and deposition patterns, and most importantly, the deposit distribution patterns on two adjacent vanes become imbalanced. Increasing particle temperature only changes the deposit rate, but not the deposition pattern. Since the vane gains additional material after deposition, the flow-path area of the turbine passage becomes smaller, generating relatively higher Mach numbers. Additionally, the change of the airfoil profile may further lead to an increase in aerodynamic losses at the passage exit. In the

presence of inlet swirl, not all deposits could generate higher heat transfer coefficients on the vane. The heat transfer characteristics are determined by the combined effects of inlet swirl and deposit pattern

Keywords: aero-engine turbine; particle deposition; aerodynamic loss; heat transfer coefficient; dynamic mesh

在航空发动机中,由于高温高速燃气的作用,颗粒污染物(比如火山灰、沙粒和燃料灰烬等)十分容易在涡轮部件中发生沉积,导致涡轮叶片的几何型线发生改变,增加叶片表面的粗糙度^[1-2],严重时甚至堵塞叶片表面的气膜孔^[3],进而改变涡轮部件的气动性能和传热冷却特性。杨星等专门总结过涡轮叶栅中颗粒污染物的沉积效应及其导致的航空发动机事故^[4]。因此,为了满足国际航空发动机适航技术的新要求,目前颗粒污染物在涡轮中的沉积效应已成为先进航空发动机涡轮气热研发设计关注的热点和难点。

颗粒污染物的迁移与沉积规律与涡轮叶栅的气动、传热与冷却问题是相互耦合的。然而,已往研究大多数集中在叶栅通道中流场结构对颗粒物沉积规律的影响,未考虑颗粒物沉积后涡轮叶栅气热性能的变化规律。Wenglarz 等的研究表明,主流温度越高,颗粒物在叶片表面的沉积量越大,且尺寸较大的颗粒物由于惯性,越容易保持自身初始轨迹迁移而偏离主流流动方向^[5-6]。此外,叶片表面温度也是影响颗粒物沉积的重要参数^[7]。据此,Casaday 等将叶栅进口来流温度分布的非均匀性(热斑)考虑在内,分别在单排涡轮静叶和涡轮级中研究了颗粒物的沉积规律,结果发现当存在进口热斑时,颗粒物的沉积量显著增大,并且叶片表面的沉积规律也发生了明显的变化^[8-9]。

随着对涡轮叶栅中颗粒物的迁移及沉积规律认识的深入,近年来已有研究开始关注颗粒物沉积后叶栅气动性能和气膜冷却的变化规律。在亚声速时,沉积物对叶栅气动性能的影响十分有限,因此 Casari 等在跨声速涡轮叶栅中采用数值模拟方法分析了沉积物对叶栅出口激波位置的改变规律^[10]。在冷却方面,Albert 等在常温风洞中开展了颗粒沉积物对叶片气膜冷却性能影响的试验研究,结果表明沉积物对气膜冷却的影响在很大程度上取决于沉积物的厚度和位置^[11-12]。虽然 Albert 等的研究^[11-12]是在常温模化条件下开展的,但其结果可为实际运行条件下颗粒沉积后叶片冷却性能的退化规律提供指导。

在国内,杨晓军等分别在平板模型和涡轮静叶中开展了颗粒物的沉积特性研究,但大部分为数值模拟分析,也未考虑沉积物对叶栅气热性能的影响^[13-17]。Zhang 等在高温条件下通过试验分析了来流温度和攻角对气膜冷却叶片表面沉积特性的影响规律^[18]。与国外相比,由于国内的相关研究起步较晚,目前尚处于跟踪阶段,缺乏关键性的特征数据,还难以将颗粒物的沉积问题纳入到涡轮的气热设计阶段。因此,为了掌握颗粒污染物对航空发动机涡轮气热性能的影响规律,建立叶栅颗粒沉积物的抑制方法,必须深入研究颗粒污染物在涡轮叶栅中的沉积效应,尤其是颗粒沉积后流热环境最为复杂的高压涡轮第一级静叶气热性能的变化规律。

本文在航空发动机真实运行工况下,采用数值模拟方法,结合沉积模型的用户自定义函数(UDF),研究了第一级高压涡轮静叶中颗粒物的沉积规律,并采用动网格技术分析了航空发动机服役过程中颗粒物沉积前后叶片表面换热特性的变化规律,以期航空发动机服役周期内高压涡轮的运行特性提供参考,并为颗粒物沉积的主动抑制设计方法研究奠定基础。

1 颗粒物轨迹求解和沉积模型

在求解离散相颗粒污染物的轨迹及其与叶片相互作用之前,首先通过 Fluent 软件求解连续相的 N-S 方程,待获得叶栅通道中的稳定流场后,在叶栅入口均匀释放颗粒污染物,再通过 Fluent 软件中的离散相模块(DPM)继续求解主流和颗粒物的相互作用,直至与连续相和离散相相关的压力和温度等参数均不再发生变化。在此过程中,可获得颗粒物在主流中的轨迹,并得到颗粒物冲击叶片的位置、速度和温度等信息。在此基础上,将由 C 语言编写的 UDF 嵌入 Fluent 软件,即可获得颗粒物冲击壁面后是否发生沉积。最后,再结合 UDF 和 Fluent 软件自带的动网格技术,可得到沉积物导致的叶片型线的改变。图 1 给出了从连续相求解到颗粒物沉积,再到叶片型线发生改变的整个计算流程。

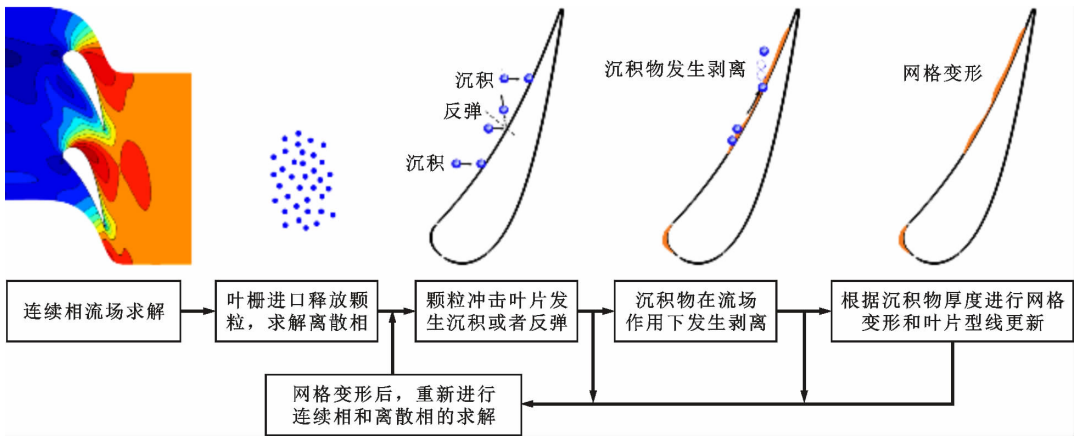


图 1 涡轮叶片颗粒物沉积效应求解过程

Fig. 1 Illustration of solving process for particle deposition effects in turbine vane passage of aero-engine

1.1 连续相中颗粒物轨迹的求解

在连续相主流中颗粒污染物轨迹的求解,可根据作用在颗粒上各种力的平衡关系获得

$$\frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = F_D(\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) + \frac{\mathbf{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \mathbf{F} \quad (1)$$

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re_d}{24} \quad (2)$$

$$Re_d = \frac{\rho_p d_p}{\mu} |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}| \quad (3)$$

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_d} + \frac{a_3}{Re_d^2} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为速度矢量; ρ 为密度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度矢量; $\mathbf{F}$ 代表作用于颗粒物上的额外作用力,本文包括 Saffman 升力、热泳力以及压力梯度力;下标 p 代表颗粒物; d_p 为颗粒物直径,本文取其为 $12 \mu\text{m}$; a_1 、 a_2 、 a_3 为常数^[19]。

1.2 颗粒物沉积模型

当颗粒物冲击叶片表面时,通过沉积模型判断颗粒物是发生反弹或者在叶片表面沉积。本文采用的沉积模型是由 Brach 等^[20] 发展,并由 Ai 等^[21] 采用试验进行过验证的临界速度模型

$$V_{cr} = \left(\frac{2E}{d_p} \right)^{10/7} \quad (5)$$

$$E = 0.51 \left[\frac{5\pi^2(k_1 + k_2)}{4\rho_p^{3/2}} \right]^{2/5} \quad (6)$$

$$k_1 = \frac{1 - \nu_s^2}{\pi E_s} \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{1 - \nu_p^2}{\pi E_p} \quad (8)$$

式中: E_s 和 E_p 为叶片和颗粒的杨氏模量; ν_s 和 ν_p 为叶片和颗粒的泊松比。当颗粒物冲击叶片的法向速度大于或等于临界速度 V_{cr} 时,颗粒物从叶片表面反

弹;当颗粒物法向冲击速度小于 V_{cr} 时,颗粒物在叶片表面沉积。由于上述临界速度模型没有考虑颗粒物沉积后主流对沉积物的作用,因此未考虑颗粒物沉积后可能发生的剥离过程。颗粒物沉积在叶片表面后,范德瓦尔斯力是颗粒物黏附于叶片表面的主要黏性力,因此当壁面附近的主流作用于沉积物的剪切应力大于作用于颗粒物上的范德瓦尔斯力,沉积于叶片表面的沉积物将会被主流剥离。根据文献[22],由作用于颗粒物上的范德瓦尔斯力可推导出主流作用于沉积物的临界剪切速度为

$$u_{tc} = \frac{C_u W_A}{\rho d_p} \left(\frac{W_A}{d_p K_c} \right)^{1/3} \quad (9)$$

式中: C_u 为 Cunningham 修正因子; W_A 为黏性功; K_c 为综合杨氏模量。主流作用在壁面上的摩擦速度为

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (10)$$

式中 τ_w 为壁面切应力。当 u_* 大于 u_{tc} 时,已沉积于叶片表面的沉积物在主流剪切应力的作用下将从壁面剥离。上述颗粒物的沉积模型和剥离模型均采用 C 语言编程后,通过 UDF 嵌入 Fluent 软件来实现。

2 数值计算方法

2.1 计算模型

研究对象为真实航空发动机高压涡轮第一级静叶。涡轮静叶由 34 个叶片组成,叶栅通道沿子午流道收缩。叶片为三维弯扭叶片,叶片平均叶高为 53.25 mm,平均弦长为 56.33 mm。图 2 为高压涡轮第一级静叶的计算模型。为了模拟航空发动机涡轮进口真实来流条件,考虑了涡轮叶栅进口的旋流。旋流强度和分布通过开展单独的燃烧室旋流器数值

模拟计算后,将燃烧室出口边界条件作为涡轮叶栅入口边界条件获得。旋流器与涡轮静叶叶片数之比为1:2,进口旋流正对叶片(叶片2)前缘,如图2所示。为了减少计算量,采用旋转周期性边界条件后,叶栅通道计算域取为高压涡轮第一级静叶整周的1/17。

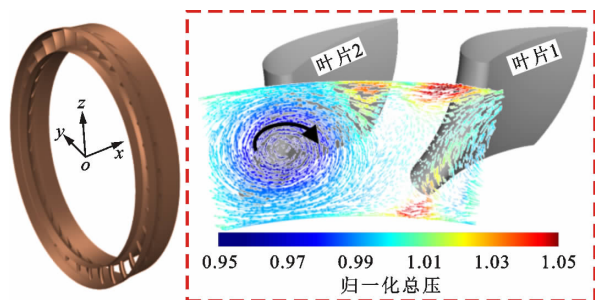


图2 涡轮叶栅计算模型及进口旋流和归一化总压分布
Fig.2 Computation model of cascade, and inlet swirl and dimensionless total pressure at turbine inlet

2.2 边界条件

高压涡轮第一级静叶的计算域进口位于叶片前缘上游1.37倍轴向弦长处,出口位于叶片尾缘下游2倍轴向弦长处。主流进口平均总压为3 043.046 kPa,总温为2 138 K;出口静压为2 511.740 kPa。在进行叶片表面换热系数计算时,叶片表面温度设为主流进口总温的约0.7倍,即1 500 K。根据图1所示,计算过程中在获得连续相结果后,再在叶栅进口释放颗粒物。在叶栅进口颗粒物分布均匀,直径为12 μm ,颗粒物的温度和速度采用UDF初始化后,可与叶栅进口主流的温度和速度保持完全相同。颗粒物的质量流量为主流流量的0.03%,但体积流量仅为主流流量的0.000 124%,远小于10%,满足DPM模型的使用条件。颗粒物的密度为2 320 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,比热容为984 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

2.3 网格无关性及湍流模型验证

计算网格采用ANSYS ICEM软件划分的非结构化网格,壁面附近采用棱柱形边界层网格,第一层网格与壁面的距离为0.002 mm,增长率为1.2,边界层网格层数为20,使得叶片表面的最大 y^+ 约为0.8,满足 $k-\omega$ 类湍流模型的要求。此外,采用密度盒的方式在叶片前缘和尾缘区域进行局部加密。为了验证网格无关性,选用了网格数量相差约2倍的粗网格、中等网格和细网格等3套网格。根据图3所示的叶片表面压力系数的计算结果可知,细网格和中等网格的计算结果已十分接近,因此用于数值模拟计算的网格选用细网格,其网格单元数约为

1 790万。

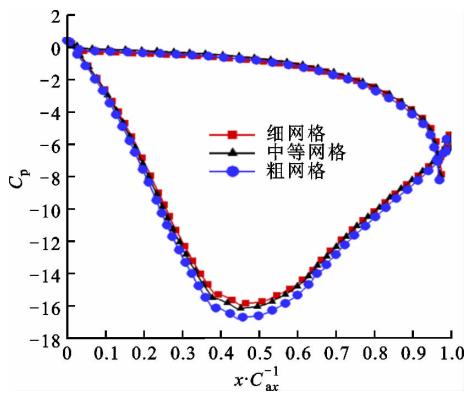


图3 网格无关性验证
Fig.3 Grid independency test

为了选用合适的湍流模型,采用位于该静叶下游的气冷动叶的中温中压实验数据进行湍流模型验证。在涡轮叶栅中, $k-\omega$ 类湍流模型具有更好的预测精度,因此对常用的标准 $k-\omega$ 、SST $k-\omega$ 和SST $k-\omega + \gamma\theta$ 三种湍流模型进行了验证。图4为不同湍流模型的计算结果与实验测量结果的对比^[23]。从图中叶片表面温度的对比结果可以看到,总体上标准 $k-\omega$ 模型具有更好的预测结果,因此选用标准 $k-\omega$ 模型进行数值计算。

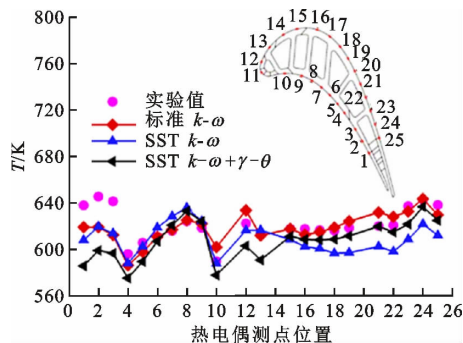


图4 湍流模型验证^[23]
Fig.4 Validation of turbulence models^[23]

3 结果分析与讨论

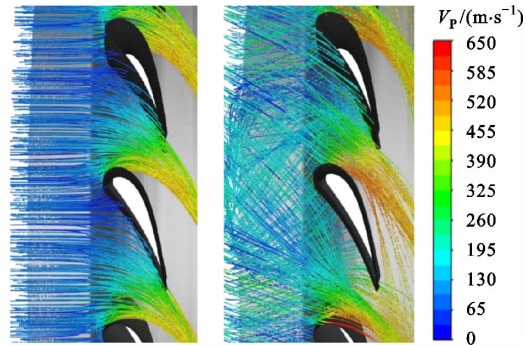
3.1 颗粒物迁移及沉积规律

颗粒污染物在叶栅通道中的迁移规律决定着其在叶片表面的沉积特性,因此首先分析颗粒物在叶栅通道中的轨迹分布。为了对比叶栅进口旋流对颗粒物迁移轨迹的影响,图5给出了叶栅进口主流为均匀来流时和旋流进口时颗粒物在叶栅通道中的迁移规律以及主流的流线。从图5a中可以看到:在均匀来流时,颗粒物随主流平顺地进入叶栅通道,并在叶栅通道中加速;在叶栅喉部区,颗粒物的速度达到

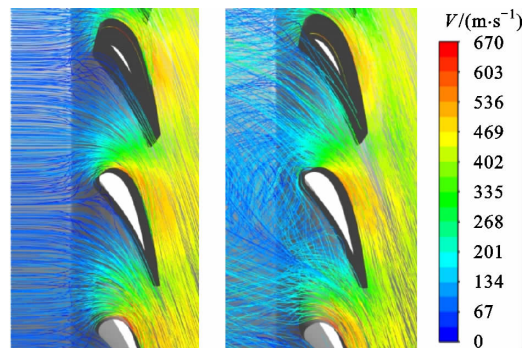
最大,但在此区域颗粒物几乎不会冲击到叶片,避免了颗粒物在叶片表面发生沉积的可能。从颗粒物的迁移轨迹来看,颗粒物几乎只能冲击到叶片的前缘区域和压力面。由于颗粒物的惯性,颗粒物在叶栅通道中发生的转折小于主流的转折(对比图 5a 和 5c),因此颗粒物难以冲击到叶片吸力面,这与文献[8-9]中的结果相似。与均匀来流时相比,虽然旋流使得主流更加扭曲(见图 5d),但主流依旧随着叶栅通道发生转折。从颗粒物的迁移规律来看,进口旋流使得颗粒物以更加扭曲的轨迹进入叶栅通道,使得相邻叶栅通道中颗粒物的迁移轨迹不再相同,导致相邻叶片表面的颗粒物沉积规律也会有所区别,这使得相邻叶片的气热性能不再相同,给涡轮叶栅的气热设计带来挑战。从图 5b 可以看到,虽然进口旋流使得颗粒物有朝着叶片吸力面迁移的趋势,但颗粒物依旧未冲击到叶片的吸力面,因此也难以在叶片吸力面发生沉积。

的沉积分布规律是相同的。从图 6 中可以明显看到,叶片压力面靠近下端壁区有一条沉积量较高的线状区域,这是由于颗粒物冲击沿子午流道收缩的下端壁后,被反弹至叶片压力面所致。有关颗粒物在下端壁的反弹及反弹后冲击叶片的过程,可详见文献[23]。

当叶栅进口有旋流时,叶片表面的沉积分布不再均匀,并且相邻叶片表面的沉积规律也完全不同。在旋流正对的叶片 2(见图 2)压力面靠近下端壁的区域,旋流流动方向指向叶片,颗粒物冲击该区域发生沉积,而在叶片压力面其他区域,旋流方向远离叶片,颗粒物无法冲击叶片发生沉积。与叶片 2 相比,旋流对叶片 1 的影响变小,但与均匀来流相比,颗粒物更容易在叶片靠近上下端壁的区域发生沉积,并且与叶片 1 相比,颗粒物也更容易沉积在叶片的前缘区域。由此可见,叶栅进口旋流除了使得叶片表面的沉积规律发生明显的改变外,也会使得相邻叶片表面的沉积特性完全不同,这必将对涡轮叶栅的气热性能产生非常明显的影响。



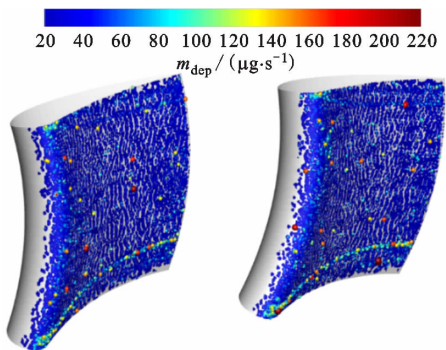
(a)均匀来流时颗粒轨迹 (b)旋流来流时颗粒轨迹



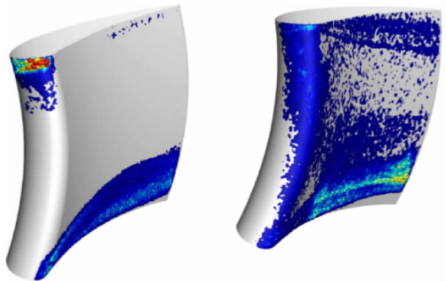
(c)均匀来流时主流流线 (d)旋流来流时主流流线

图 5 不同进口来流下叶栅通道中颗粒迁移规律及主流流线
Fig. 5 Migration patterns and flow streamlines within turbine vane passage under various incoming flow conditions

图 6 给出了与图 5 对应的叶片表面颗粒物的沉积分布规律。在图 5a 中,颗粒物均匀地进入叶栅通道,相应地,颗粒物冲击叶片压力面后,在叶片表面的沉积分布也比较均匀(见图 6a),同时相邻叶片上



(a)均匀来流



(b)旋流来流

图 6 不同进口来流下叶片表面的颗粒物沉积特性
Fig. 6 Deposition patterns on the vanes under various incoming flow conditions

3.2 颗粒物温度对沉积特性的影响

涡轮叶栅中的颗粒物主要来自于上游的燃烧室,由于燃烧室一般会采用稀释流和燃烧室筒壁冷

却流,因此燃烧室出口颗粒物的温度也与主流一样存在温度差异的分布。为了详细研究旋流进口条件下颗粒物温度 T_p 对沉积的影响,图7对比了不同颗粒物温度下叶片表面的颗粒物沉积特性。总体上看,在不同颗粒物温度下,沉积分布规律是一致的。这与文献[5-6]中的结论一致,随着颗粒物温度的提高,叶片表面的沉积量也逐渐增大。

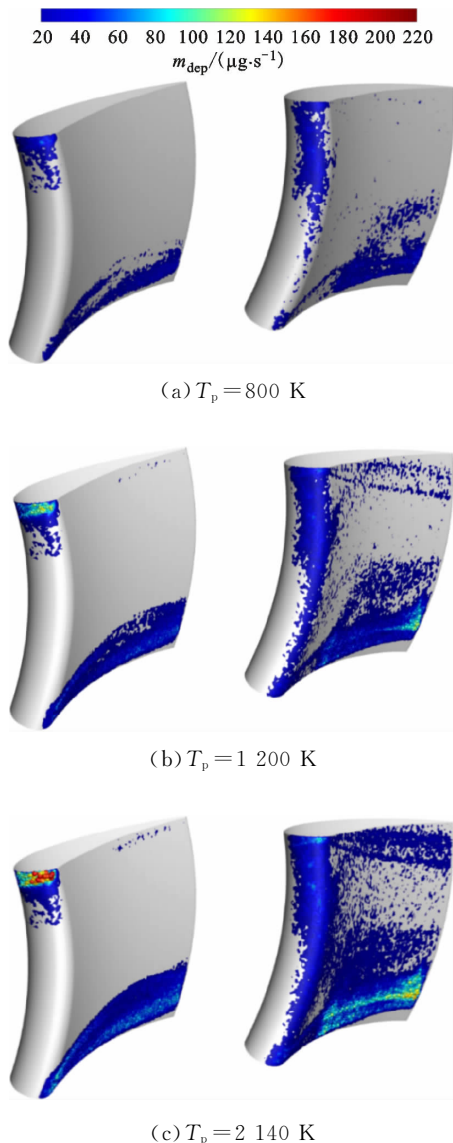


图7 不同颗粒物温度下叶片表面的沉积规律

Fig. 7 Deposition patterns on the vanes at different particle temperatures

为了定量分析颗粒物温度对沉积量的影响,图8给出了不同颗粒物温度下颗粒物在叶片表面的沉积效率 η (叶片表面的沉积质量与叶栅入口颗粒物的总质量之比)。同时,由于相邻叶片表面的沉积规律不同,为了分析颗粒物温度对相邻叶片表面颗粒物沉积量比值的影响,图8中还给出了叶片1和叶

片2的沉积质量占比。与图7中的结果一致,随着颗粒物温度的提高,颗粒物在叶片表面的沉积效率逐渐增大,但同时也可以看到,随着颗粒物温度的逐渐提高,沉积效率的增加幅度逐渐下降。此外,从相邻叶片表面颗粒物的沉积量占比来看,颗粒物温度几乎不会改变相邻叶片沉积质量的分配关系。由此可见,对颗粒物沉积分布规律起主导作用的依旧是进口旋流,颗粒物温度的变化主要改变的是沉积量。

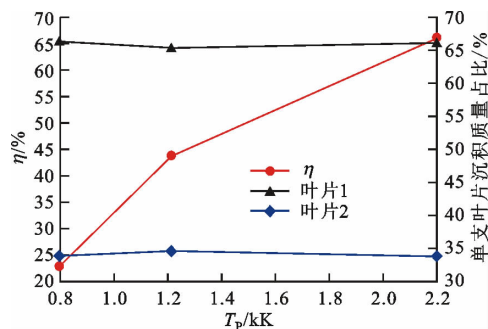


图8 不同颗粒物温度下叶片表面的沉积效率

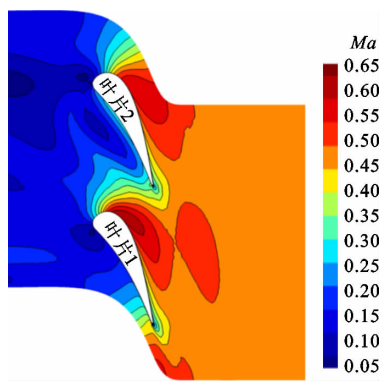
Fig. 8 Diposition efficiency of particles on the vanes at different particle temperatures

3.3 颗粒物沉积对叶栅气动性能的影响

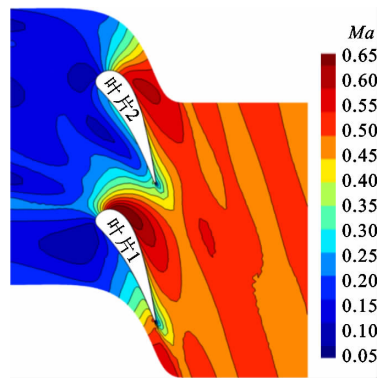
在获得叶片表面颗粒物的沉积规律后,进一步采用动网格技术,使得发生沉积的部位按照沉积量发生网格变形,从而分析颗粒沉积物对叶栅气热性能的影响。

图9a和9b分别为在叶栅进口有旋流时,叶片表面无颗粒沉积时和发生颗粒物沉积后中叶展处的马赫数分布。与图9a中无颗粒物沉积的结果相比,由于颗粒物沉积使得叶片增厚,叶栅通道面积变小,图9b中叶栅通道的马赫数有一定程度的增大,尤其是叶片1压力面的沉积量最大,使得由叶片1压力面指向叶片2吸力面的叶栅通道的马赫数变化最为明显,而由于正对旋流的叶片2表面的沉积量相对较少,因此由叶片2压力面指向叶片1吸力面的叶栅通道的马赫数变化较小。颗粒物沉积导致叶栅出口马赫数发生变化,也使得叶栅进口的马赫数分布有一定的变化,但总体上变化非常小。

通过图10中叶片表面的极限流线可以更加清楚地看到颗粒沉积物对主流流动的影响,尤其是壁面附近的区域。对比颗粒物沉积前后叶片1和叶片2表面的极限流线可以看到,叶片2的沉积量较小,大部分颗粒沉积在压力面靠近下端壁的区域,因此极限流线变化的区域主要是在压力面下侧。对于叶片1来说,几乎整个压力面上均存在沉积物(见图



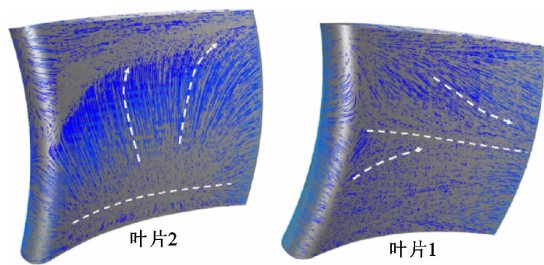
(a)无颗粒沉积



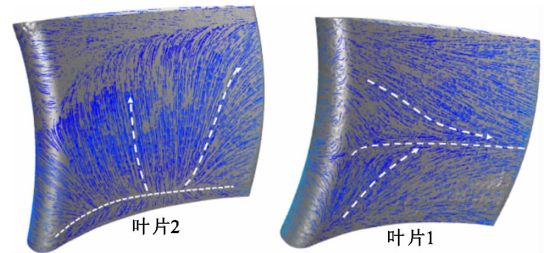
(b)有颗粒沉积

图 9 颗粒物沉积对叶栅通道流动的影响

Fig. 9 Effects of deposits on flows within the turbine vane passage



(a)无颗粒沉积



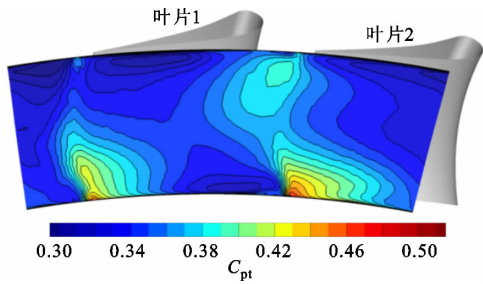
(b)有颗粒沉积

图 10 颗粒物沉积前后叶片表面极限流线的变化

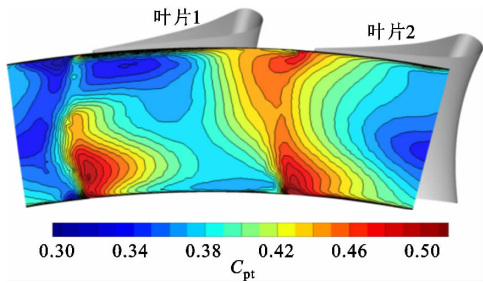
Fig. 10 Variations of surface limit streamlines due to deposits

6b 右侧叶片),对比图 10a 和 10b 可以非常清楚地看到,叶片 1 压力侧表面的极限流线变化非常明显,流动分离线整体向下端壁发生了移动。

为了进一步分析沉积物对第一级静叶栅气动损失的影响,图 11 给出了叶栅出口总压损失系数($C_{pt} = (P_{t,in} - P_{t,ex}) / 0.5 \rho_{in} U_{in}^2$)的分布。在无沉积物时(见图 11a),在叶片 2 的尾缘附近,除了下端壁通道涡带来的气动损失外,在靠近上端壁的位置也能观察到上端壁通道涡带来的损失。然而,在叶片 1 尾缘靠近上端壁的区域,由于旋流的存在,上端壁通道涡被削弱,已观察不到其带来的气动损失区。在颗粒物发生沉积后,总压损失的分布规律总体变化不大,但损失的幅值增长十分明显。因此,颗粒物沉积导致叶栅通道变窄和叶片型线发生变化是导致叶栅气动损失增加的主要原因。



(a)无颗粒沉积



(b)有颗粒沉积

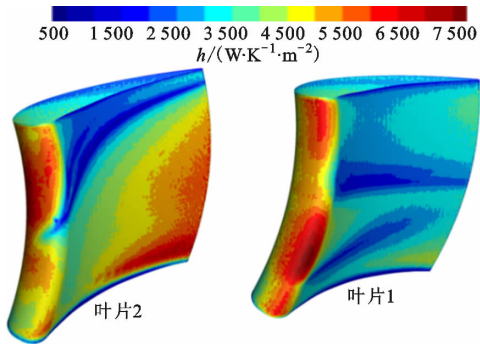
图 11 沉积物对叶栅出口总压损失系数的影响

Fig. 11 Effect of deposits on total pressure loss coefficient at turbine vane passage exit

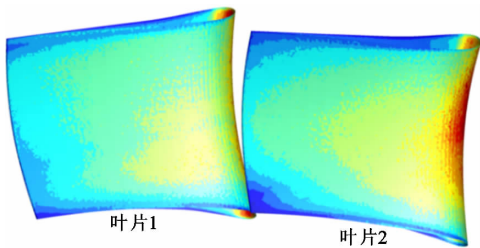
3.4 颗粒物沉积对叶片表面传热的影响

颗粒物沉积导致叶片型线的改变,也必然会对叶片表面的传热特性带来影响。图 12 给出了颗粒物沉积前后叶片 1 和正对旋流的叶片 2 叶片表面的换热系数分布。对比颗粒物沉积前后叶片表面的换热系数可以看到,在存在进口旋流时,沉积物并不一定会导致换热系数的增加。对于叶片 1,旋流的影响相比叶片 2 较小,其压力面颗粒物沉积量大,导致换热系数明显增大,并且叶片前缘的换热系数也因

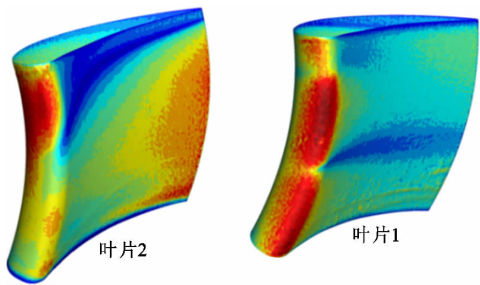
沉积物明显提升。



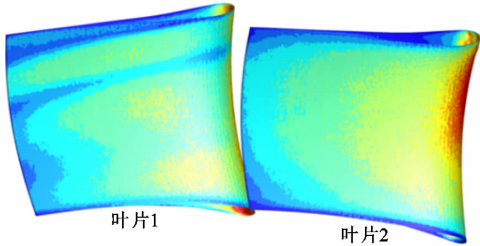
(a) 无颗粒沉积(压力面)



(b) 无颗粒沉积(吸力面)



(c) 有颗粒沉积(压力面)



(d) 有颗粒沉积(吸力面)

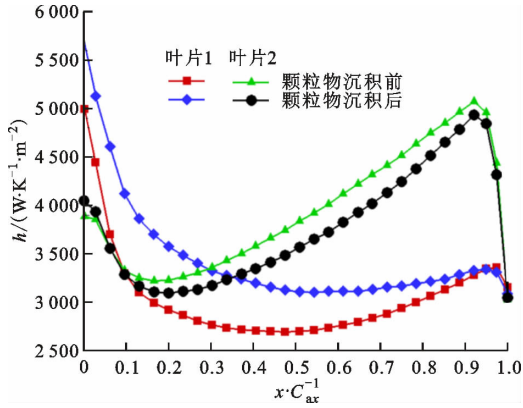
图 12 沉积物对叶片换热系数的影响

Fig. 12 Effects of deposits on heat transfer coefficient of turbine vanes

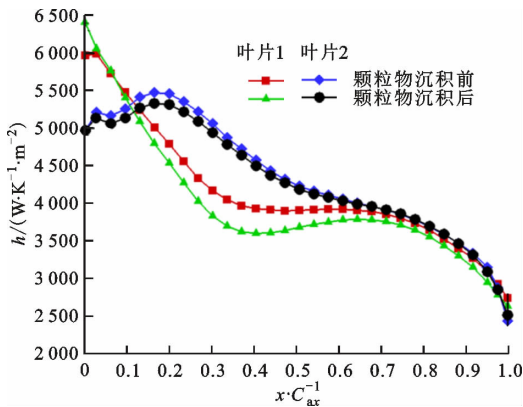
然而,在叶片 1 的吸力面上,由于颗粒物并未发生沉积,因此换热系数分布变化并不明显。在正对旋流的叶片 2 上,与均匀进口相比,旋流一般通过增大壁面的剪切速度来提高叶片表面的换热系数,尤其是叶片压力面,因此当叶片 2 压力面靠近下端壁

区存在颗粒物沉积时,沉积物反而对旋流带来的强化换热有所削弱,因此由图 12 可以看到,颗粒物沉积后,叶片 2 压力面的换热系数有所下降。在叶片 2 的吸力面,由于前缘靠近上端壁存在较大的沉积量(见图 6),在吸力面侧可以清晰地看到该沉积物导致的下游高换热区,但总体上颗粒物沉积前后,叶片 2 吸力面的换热系数变化也并不大。

图 13 给出了叶片压力面和吸力面换热系数展向(叶高方向)平均值沿轴向的分布。从图中可以定量地看到,对于叶片 1,颗粒物沉积后,压力面的换热系数增加十分明显,而对于叶片 2,换热系数则有稍微的下降。由于叶片 1 和叶片 2 的吸力面均未发生颗粒物沉积,颗粒物沉积前后吸力面的换热系数变化相对较小,但是从图 13b 中可以看到,对于叶片 1,颗粒物发生沉积后,吸力面的换热系数还有稍微的下降。这是由于颗粒物沉积在叶片前缘区,在旋流的综合作用下,使得自叶片前缘发展的吸力面边界层有所增厚,从而导致换热系数有稍微的下降。



(a) 叶片压力面



(b) 叶片吸力面

图 13 叶片表面换热系数展向平均值沿轴向的分布
Fig. 13 Distributions of spanwise-averaged heat transfer coefficients along axial direction

4 结 论

本文应用数值模拟方法,结合用户自定义函数和动网格技术,在真实航空发动机运行条件下研究了高压涡轮第一级静叶中的颗粒物沉积效应,分析了进口旋流条件下颗粒物在叶栅通道中的迁移规律及在叶片表面的沉积特性,并进一步对比了颗粒沉积物对叶栅通道流场结构、气动损失及叶片表面换热的影响规律,得到的主要结论有:

(1)在叶栅进口旋流的作用下,颗粒物易于向叶栅通道的上下端壁区域迁移,同时使得相邻叶栅通道中的颗粒物迁移规律存在明显区别,从而导致相邻叶片表面的颗粒物沉积分布规律不再相同;

(2)颗粒物温度对叶片表面及相邻叶片表面的沉积分布规律几乎没有影响,仅改变当地颗粒物的沉积量大小,且随着颗粒物温度的升高,对沉积量的影响逐渐减弱;

(3)颗粒物沉积后,叶栅通道面积变小,因此叶栅通道中主流马赫数有所增大,同时叶片型线发生改变,使得叶栅的气动损失增大;

(4)在存在进口旋流时,颗粒沉积物并不一定会导致叶片表面换热系数的增大,这取决于进口旋流和叶片沉积物的综合作用。

本文在航空发动机真实运行条件下获得的研究结果,既可为后续研究对颗粒沉积物不敏感的高压涡轮先进气热设计方法奠定基础,又可为航空发动机的实际运行维护提供指导。

参考文献:

- [1] HAMED A, TABAKOFF W C, WENGLARZ R V. Erosion and deposition in turbomachinery [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(2): 350-360.
- [2] BONIS J P. A review of surface roughness effects in gas turbines [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2010, 132(2): 021004.
- [3] DUNN M G, BARAN A J, MIATECH J. Operation of gas turbine engines in volcanic ash clouds [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1996, 118(4): 724-731.
- [4] 杨星,郝子晗,丰镇平. 颗粒污染物在涡轮中的沉积效应 [J]. *航空动力*, 2020(1): 27-31.
YANG Xing, HAO Zihan, FENG Zhenping. Deposition effects of particles in turbines [J]. *Aerospace Power*, 2020(1): 27-31.
- [5] WENGLARZ R A, FOX R G Jr. Physical aspects of deposition from coal-water fuels under gas turbine conditions [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1990, 112(1): 9-14.
- [6] 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.
- [7] CROSBY J M, LEWIS S, BONIS J P, et al. Effects of temperature and particle size on deposition in land based turbines [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(5): 051503.
- [8] CASADAY B, PRENTER R, BONILLA C, et al. Deposition with hot streaks in an uncooled turbine vane passage [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2014, 136(4): 041017.
- [9] PRENTER R, AMERI A, BONIS J P. Computational simulation of deposition in a cooled high-pressure turbine stage with hot streaks [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(9): 091005.
- [10] CASARI N, PINELLI M, SUMAN A, et al. EB-FOG: deposition, erosion, and detachment on high-pressure turbine vanes [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(6): 061001.
- [11] ALBERT J E, BOGARD D G. Experimental simulation of contaminant deposition on a film cooled turbine airfoil leading edge [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(5): 051014.
- [12] LAWSON S A, THOLE K A, OKITA Y, et al. Simulations of multiphase particle deposition on a showerhead with staggered film-cooling holes [J]. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(5): 051041.
- [13] 杨晓军,于天浩,崔莫含,等. 沉积环境下气膜冷却效率的实验 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2019, 45(8): 1681-1690.
YANG Xiaojun, YU Tianhao, CUI Mohan, et al. Experiment on gas film cooling efficiency in environment of deposition [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 45(8): 1681-1690.
- [14] YANG X J, HU Y Q, YU T H, et al. Numerical modeling of particle deposition in turbine cascade [C] // *Proceedings of ASME Turbo Expo*. New York, USA: ASME, 2019: GT2019-90739.
- [15] 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 Junhui, ZHANG Jingzhou. Numerical investigation on particle deposition characteristic inside turbine cascade [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica*

- Sinica, 2013, 34(11): 2492-2499.
- [16] ZHENG Y, SUN D, YANG H. The effects of ash deposition on transonic turbine guide vane [C]// Proceedings of Global Power and Propulsion Society. Beijing, China: GPPS, 2019: GPPS-BJ-2019-0068.
- [17] 杨承, 吕浪, 马晓茜. 燃气透平静叶微颗粒碰撞和沉积特性的数值分析 [J]. 热科学与技术, 2017, 16(3): 245-252.
- YANG CHENG, LV LIANG, MA XIAOQIAN. Numerical analysis of micro-particle collision and deposition on gas turbine stator blades [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2017, 16(3): 245-252.
- [18] ZHANG Fei, LIU Zhenxia, LIU Zhengang, et al. Experimental study of sand particle deposition on a film-cooled turbine blade at different gas temperatures and angles of attack [J]. Energies, 2020, 13(4): 811.
- [19] MORSI S A, ALEXANDER A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55(2): 193.
- [20] BRACH R M, DUNN P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres [J]. Aerosol Science and Technology, 1992, 16(1): 51-64.
- [21] AI Weiguo, FLETCHER T H. Computational analysis of conjugate heat transfer and particulate deposition on a high pressure turbine vane [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2012, 134(4): 041020.
- [22] EL-BATSH H, HASELBACHER H. Numerical investigation of the effect of ash particle deposition on the flow field through turbine cascades [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo. New York, USA: ASME, 2002: GT-2002-30600.
- [23] 杨星, 郝子晗, 丰镇平. 高压涡轮级中颗粒污染物的迁移与沉积特性研究 [C]// 中国工程热物理学会学术会议. 保定: 华北电力大学, 2020: 202-224.

[本刊相关文献链接]

- 张垠垣, 李志刚, 李军. 透平端壁冷却及泛冷却最优的端壁造型设计研究. 2021, 55(5): 1-9. [doi: 10.7652/xjtuxb202105001]
- 黄明, 李军, 李志刚, 宋立明. 动叶凹槽状叶顶气膜冷却有效度和气动性能不确定性量化研究. 2021, 55(5): 181-192. [doi: 10.7652/xjtuxb202105020]
- 刘钊, 贾哲, 张志欣, 丰镇平. 透平动叶前缘冲击-气膜复合冷却与旋流-气膜复合冷却的热流耦合对比研究. 2021, 55(4): 116-125. [doi: 10.7652/xjtuxb202104013]
- 张韦馨, 刘战胜, 杨星, 刘钊, 丰镇平. 射流角和质量流量比对涡轮端壁气膜冷却特性的影响. 2021, 55(4): 107-115. [doi: 10.7652/xjtuxb202104012]
- 席雷, 徐亮, 高建民, 赵振, 李云龙. 涡轮叶片厚壁带肋通道冷却性能的实验研究. 2021, 55(3): 29-38. [doi: 10.7652/xjtuxb202103004]
- 张筠松, 刘永葆, 李钰洁, 李启杰. 存在热斑旋流时变几何导叶弯曲对涡轮级气热特性的影响. 2021, 55(2): 172-180. [doi: 10.7652/xjtuxb202102021]
- 郭嘉杰, 王新军, 鲍宇航. 椭圆孔及偏转角对凹槽叶顶气膜冷却流动换热特性的影响. 2021, 55(1): 153-161. [doi: 10.7652/xjtuxb202101019]
- 黄官格, 袁奇, 潘阳, 冀大伟. 叶顶泄漏对跨声速涡轮气动性能和叶片激振特性的影响. 2020, 54(11): 10-18. [doi: 10.7652/xjtuxb202011002]

(编辑 荆树蓉)