高压涡轮叶片颗粒物沉积特性数值模拟*

杨晓军1,刘文博1,胡英琦2,柳笑寒1

(1. 中国民航大学 航空工程学院,天津 300300;2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院,北京 100191)

摘 要:为了研究颗粒物在高压涡轮导向叶片的沉积特性,针对颗粒在沉积壁面与未沉积壁面上的 粘附与剥离建立了对应的模型,在对应的环境下利用Fluent的User defined function (UDF)功能以及网 格重构技术,对颗粒的沉积过程进行了数值模拟,并针对沉积表面颗粒物的稀疏程度以及沉积表面的颗 粒半径对沉积特性的影响进行了研究。结果表明:颗粒物的沉积以及小颗粒的陷入现象多发生于涡轮叶 片压力面前缘处;同一工况下,颗粒与沉积壁面接触方式、沉积表面颗粒间距w以及沉积表面颗粒半径 R_m对沉积分布的影响较小;随着w的增大,沉积厚度降低,剥离数量减少,颗粒陷入沉积壁面的数量增 加;表面颗粒半径的增大对沉积的影响与w的变化有着同样的趋势,当沉积表面颗粒半径过大,沉积量 则会骤降。

关键词:涡轮叶片;颗粒沉积;沉积模型;沉积表面;气-固两相流 中图分类号: V231.1 文献标识码:A 文章编号:1001-4055(2022)11-210516-12 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210516

Numerical Simulation of Particle Deposition Characteristics of High Pressure Turbine Blades

YANG Xiao-jun¹, LIU Wen-bo¹, HU Ying-qi², LIU Xiao-han¹

(1. School of Aeronautical Engineering, Civil Avation University of China, Tianjin 300300, China;2. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the deposition characteristics of particles on the high-pressure turbine guide vanes, a corresponding model is established for the adhesion and detachment of particles on the deposited and undeposited walls, and the deposition process of particles is simulated numerically in the corresponding environment by using Fluent's user defined function (UDF) and mesh reconstruction technology. The effects of the sparseness of the particles on the deposition surface and the particle radius of the deposition surface on the deposition characteristics are investigated. The results show that the deposition of particles and the entrapment of small particles occur mostly at the leading edge of the turbine blade pressure surface. Under the same working condition, the contact mode between particles and the deposition wall, the particle spacing w and the radius R_m of particle on the deposition surface have less influence on the deposition distribution. With the increase of w, the deposition thickness decreases, the number of detachment particle decreases, and the number of particles caught in the deposition wall increases. The effects of increasing the radius of curvature of the surface on deposition have the same trend as the change of w. When the particle radius of the deposition wall is too large, the deposition volume

* 收稿日期: 2021-07-30;修订日期: 2021-10-09。

基金项目:中国民航大学中央高校基本科研业务费项目(3122019187)。

通讯作者:杨晓军,博士,教授,研究领域为燃气轮机内部复杂流动与换热研究。

引用格式:杨晓军,刘文博,胡英琦,等.高压涡轮叶片颗粒物沉积特性数值模拟[J].推进技术,2022,43(11):210516. (YANG Xiao-jun, LIU Wen-bo, HU Ying-qi, et al. Numerical Simulation of Particle Deposition Characteristics of High Pressure Turbine Blades[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11):210516.) will drop abruptly.

Key words: Turbine blade; Particle deposition; Deposition model; Deposited surface; Gas-solid twophase flow

1 引 言

航空发动机通常会在含沙量较大的环境下运 行,这使得在飞机起飞和降落时^[1],发动机在近地面 全速运转会使得大量的颗粒物被吸入发动机内部; 当飞机在火山灰云层中飞行时^[2],同样也会导致火山 灰颗粒的吸入。吸入的颗粒首先会对压气机叶片进 行撞击,对叶片造成损伤,随后在燃烧室内颗粒会被 加热软化,在高压涡轮叶片上发生粘附。Dunn等^[3] 研究发现大规模沉积会堵塞气膜冷却孔,损害涡轮 部件。同时得出,火山灰造成的沉积取决于入口温 度、微粒浓度和吸入微粒的物质属性。高压涡轮第 一级导向叶片和动叶由于受到来自燃烧室的高温颗 粒流的直接影响,极易发生沉积。为了准确预测这 些涡轮部件的损伤程度,对沉积潜在物理过程的深 入研究是很有必要的。

起初人们对沙尘和火山灰的吸入问题展开了研究,大部分工作集中于在各种材料和不同条件下颗粒的冲蚀和沉积,结论认为在冲蚀和沉积主导的状态之间存在一个临界温度,随着温度的升高,颗粒会发生软化或者融化使得颗粒的团聚率增大,导致颗粒沉积概率的增大,冲蚀率反之。然而准确地预测颗粒在特定条件下的沉积情况需要对颗粒在沉积过程中的物理作用过程有全面的了解。

长期以来,人们使用了许多方法来预测撞击的 颗粒是否会在作用壁面上发生粘附。Sreedharan等^[4] 考虑了颗粒的温度因素开发了临界粘度模型,随后 此模型在Singh等^[5]的调整下,可以合理地将颗粒的 粘附与回弹特性进行预测。Brach等^[6]在假设来流颗 粒为球形的条件下共同开发了临界速度模型,确定 了速度阈值,当颗粒速度小于此阈值则会发生沉积。 该模型还考虑了颗粒储存的弹性能与粘附力之间的 平衡,确定了临界速度与颗粒直径与复合杨氏模量 之间的函数关系。除了以速度阈值为依据外, Bons 等[7]从颗粒的形状出发,结合颗粒在碰撞过程中的弹 性变形、塑性变形、粘着和剪切去除,创建了 OSU 模 型,通过将数值模拟结果与实验对比,结果表明此模 型对于沉积的预测具有一定的积极意义。近年来, Casari 等^[8]开发了一种基于能量的燃气轮机污垢模型 (EBFOG),该模型通过比较颗粒在撞击时的动能和

经验活化能来预测粘着效率。

在涡轮沉积的研究方面,Bravo等^[9]提出了固着 液滴模型,研究了沉积模型与斯托克斯数(Stokes)之 间的联系,得出颗粒的粒径分布,发现颗粒的初始轨 迹对沉积影响巨大。Cheng等^[10]在不考虑热泳的条 件下对涡轮叶片冷却通道沉积进行研究,结果表明, 温度对粉尘颗粒的沉积位置影响不大。Libertowski 等^[11]在静态和动态实验当中比较了Arizona Road 灰 尘的融化特性,发现在1300~1500K 灰尘开始经历 烧结和熔化,并且证明粉尘颗粒的大小、流动温度以 及浸入时间等因素对熔化都有重大影响。Prenter 等^[12]对热斑条件下高压涡轮叶片的沉积进行了数 值模拟,讨论了导向叶片以及动叶随斯托克斯数 (Stokes)的定量影响和捕获效率趋势,得出随着斯托 克斯数的增大,冲击的趋势明显增强,捕获效率先增 大后减小。

近几年国内对于涡轮颗粒沉积问题展开了大量的研究,文献[13-15]针对平板及涡轮叶片通过实验研究了不同来流攻角、涡轮叶片带有沟槽等等条件下颗粒物的整体沉积分布。游学磊等^[16-17]对比了临界速度以及临界粘度模型之间的差异性,并利用临界速度模型研究了沟槽平板颗粒的沉积特性,得出沟槽减少了沉积量,降低了捕获效率。杨星等^[18]研究了在带有旋流条件下颗粒在高压涡轮叶片表面的沉积影响巨大,颗粒温度对沉积分布影响较小,仅对沉积效率有影响。杨晓军等^[19]在低温相似准条件下对涡轮叶片前缘的沉积进行了实验研究,结果表明颗粒的沉积形貌受主流温度的影响较大,当主流温度为颗粒熔点时,沉积效果最为明显。

目前针对颗粒沉积在已有沉积物的壁面所进行 的研究非常少,当颗粒物在沉积壁面上发生粘附时, 来流颗粒与壁面颗粒之间的接触形式,沉积壁面上 的颗粒物的疏密程度等条件会对颗粒的剥离结果产 生巨大的影响。此外,颗粒堆积的过程中往往有孔 隙存在,由于来流颗粒粒径的不同,孔隙往往会使得 颗粒堆积厚度发生变化。本文将针对上述情况展开 研究,对颗粒在涡轮叶片上的沉积提供一定的理论 依据。

2 方 法

2.1 颗粒粘附模型

2.1.1 临界粘度模型

此模型将颗粒当前的粘度与发生粘附的参考粘 度值相关联^[4]。在计算过程中,当颗粒的粘度μ小于 临界粘度μ_。时,则假设粘附概率为1;当颗粒的粘度 大于颗粒的临界粘度时,粘附概率计算式为

$$P_{\rm vsic} = \mu_{\rm c} / \mu_{\rm p} \tag{1}$$

式中*P*_{vsie}为与粘度效应相关的粘附概率,*µ*_e为颗粒在 临界条件下的粘度,*µ*_p为颗粒在当前温度下的粘度。 在颗粒的粘度测量方面,Senior等^[20]开发了一种基于 煤灰化学成分测定煤灰颗粒粘度的方法,其表达 式为

$$\ln\left(\frac{\mu}{T_{\rm p}}\right) = A + \frac{10^3 B}{T_{\rm p}} \tag{2}$$

式中A,B均为常数,其数值大小取决于颗粒的化学组成成分。关于两者详细的情况以及计算方法在文献 [20]中有进一步的描述。

2.1.2 临界速度模型

此模型将颗粒的速度与临界速度进行对比,当 颗粒法向速度低于临界速度时则会发生粘附,对于 涡轮部件的沉积通常使用简化后的临界速度模型与 复合杨氏模量来开展研究。其中临界速度模型表达 式^[6]为

$$v_{\rm c} = \left[\frac{2E}{D_{\rm p}}\right]^{\frac{10}{7}} \tag{3}$$

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

$$k_{1} = \frac{1 - v_{s}^{2}}{\pi E_{s}} \tag{5}$$

$$k_{2} = \frac{1 - v_{p}^{2}}{\pi E_{p}} \tag{6}$$

式中 v_e 为临界速度,E为组合杨氏模量, D_p 为颗粒直径。 v_a 和 v_p 分别为沉积目标表面与颗粒的泊松比,反映颗粒与表面的横向变形情况。 E_a 和 E_p 分别为表面与颗粒的杨氏模量。

2.1.3 组合粘附模型

由于临界速度模型与临界粘度模型在单独使用 过程中会对一些情况忽略,难以对沉积存在的各种 情况进行有效的分析,本文借鉴了裴钰的研究^[21],使 用了其提出的组合沉积模型,表达式为

$$P_{\rm vsic} = \frac{\mu_c v_c}{\mu_p v_n} \tag{7}$$

此模型将颗粒的温度、速度这两种情况综合考虑,得出颗粒在沉积过程中可能出现的五种情况,在 计算过程中将对颗粒所处的条件进行有效分类并做 针对性分析,五种情况及对应计算如表1所示。其中 *T_t*为颗粒的完全融化温度,当颗粒温度*T_p>T_t*时,颗粒 处于液态,即便颗粒的速度*v_a*比临界速度*v_o*低,颗粒 也难以发生粘附,沉积概率为0。

 Table 1 Adhesion probability of particles under different conditions

Item	$T_{ m p}$	v_n	P _s
1	$T_{\rm p} > T_{\rm f}$		$P_{\rm s} = 0$
2	$T_{\rm f} \ge T_{\rm p} > T_{\rm c}$	$v_n > v_c$	$P_{\rm s} = v_{\rm c}/v_{\rm n}$
3	$T_{\rm f} \ge T_{\rm p} > T_{\rm c}$	$v_n \leqslant v_c$	$P_{s} = 1$
4	$T_{\rm p} \leq T_{\rm c}$	$v_n \leqslant v_c$	$P_{\rm s} = \mu_{\rm c} / \mu_{\rm n}$
5	$T_{\rm p} \leq T_{\rm c}$	$v_n > v_c$	$P_{\rm s} = \mu_{\rm c} v_{\rm c} / (\mu_{T_{\rm p}} v_{\rm n})$

2.2 单个颗粒的剥离模型

沉积过程中,颗粒所接触的壁面有无沉积需要 被重点考虑,两种不同壁面的特性有着巨大差异,本 文将对颗粒的剥离进行细化研究。

2.2.1 未沉积壁面颗粒剥离

对于直接粘附在叶片表面的颗粒,如图1所示, 本文借鉴了EI-Batsh等^[22]的方法,其核心思想为:颗 粒在发生粘附之后主要受到主流的拖拽力F_D以及来 自壁面的约束力F_p,另外还受到升力F_L的作用,由于 其较小可以忽略不计,故颗粒的受力平衡表达式为



Fig. 1 Force analysis of particles on undeposited wall

$$F_{\rm D}\left(\frac{D_{\rm p}}{2}\right) = F_{\rm ps}a \tag{8}$$

当式(8)左侧的值大于等于右侧时,在光滑壁面 上则会发生颗粒的剥离。式中D_p为颗粒的直径,a为 颗粒与壁面的接触半径。图中粘附力的表达式为

$$F_{\rm ps} = \frac{3}{4} \pi W_{\rm A} D_{\rm p} \tag{9}$$

式中 W_A 为粘附功,其为取决于颗粒和壁面材料属性的一个常数,其值为 $0.0389J/m^2$ 。对于作用在颗粒上的阻力 F_D ,其表达式为

$$F_{\rm D} = \frac{C_{\rm D}\rho u_{\rm c}^2 A_{\rm cp} f}{2C_{\rm u}} \tag{10}$$

式中A_{ep}为颗粒受到主流作用的截面面积,f为接触壁面的颗粒的修正系数,其值为1.7,C_u为坎宁安校正系数。关于颗粒与壁面的接触半径,其表达式为

$$a = \left(\frac{3\pi W_{\rm A} D_{\rm p}^2}{2K_{\rm c}}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{11}$$

$$K_{\rm c} = \frac{4}{3} \left[\frac{1 - v_{\rm p}^2}{E_{\rm p}} + \frac{1 - v_{\rm s}^2}{E_{\rm s}} \right]^{\frac{1}{2}}$$
(12)

其中 K_c 为复合杨氏模量,它与颗粒和壁面的性质有着重要联系。

2.2.2 沉积壁面颗粒的临界陷入值

在本文中假设发生沉积后的颗粒其外部表面 (不与壁面接触的部分)依旧保持球形。在实际情况 下,发动机运行过程中所吸入的颗粒的粒径往往是 不均匀的,而且沉积壁面往往是孔隙结构^[23],颗粒之 间可能会有间距*w*,这会使得小颗粒陷入孔隙之中。 对此,本文假设来流颗粒会与沉积壁面三个颗粒发 生接触,如图2(a)所示。



为便于对陷入现象的研究,本文对其转化为二 维情况进行探究,如图2(b)所示。可以发现,当来流 颗粒(红色颗粒)的上表面与壁面沉积颗粒的上缘相 平齐时,颗粒将难以发生剥离。因此临界陷入值的 表达式为

$$h^{2} + (R_{\rm m} - r_{\rm c})^{2} = (R_{\rm m} + r_{\rm c})^{2}$$
 (13)

因此,当颗粒发生粘附时,如果颗粒的半径<r。,则颗粒在粘附后不参与剥离计算,同样也不会导致 沉积厚度的增加。

2.2.3 沉积壁面的剥离

当粒径大于临界陷入值的颗粒在已有沉积壁面

发生粘附时,此时约束力往往不会垂直于壁面,这就 导致颗粒的受力形式发生了改变,因此对此部分进 行研究是很有必要的。

(a)颗粒粘附力与法向方向的余弦值

当来流颗粒与壁面颗粒粘附时,粘附力方向往 往沿两个颗粒球心的连线方向指向壁面,本文假设 来流颗粒与壁面三个颗粒会发生粘附,图3中展示了 简化后的几何关系。



Fig. 3 Schematic diagram of particle contact geometry

由于来流颗粒的粒径之间存在一定的差异,这 就导致不同颗粒所对应的粘附力的方向存在区别, 因此需要针对不同的颗粒求出粘附力与壁面法向的 余弦值。从上图中可以得出粘附力*F*_{Po}的方向与法方 向的余弦值,其表达式为

$$\cos \gamma = \frac{l}{R_{\rm m} + r} = \frac{\sqrt{\left(R_{\rm m} + r\right)^2 - h^2}}{R_{\rm m} + r}$$
(14)

(b)自由高度H与校正系数S

当颗粒在沉积壁面上发生粘附时,来流颗粒一部分往往会与原有的沉积表面发生重叠,因此需要 对高于沉积表面部分的高度(自由高度H)进行求解, 其中自由高度示意图如图4所示。



Fig. 4 Schematic diagram of free height

由图 4 中的几何关系可以明显发现自由高度 H 的表达式为

$$H = r + \left(R_{\rm m} + r - \frac{R_{\rm m}}{\cos\gamma}\right)\cos\gamma \qquad (15)$$

本文中关于无量纲矫正系数*S*的计算参考了文献[24]的研究,其表达式为

$$S = \frac{H}{2r} \tag{16}$$

应用于颗粒的受力平衡中,此无量纲表达式可 以反映当前来流颗粒在沉积表面上发生粘附后,其 能受到主流作用部分的净比率,可以有效反映主流 在针对不同来流粒径的颗粒所能发挥作用程度的 大小。

(c)法向力臂 Y

颗粒在沉积之后的法向力臂示意图如图5所示, 其对颗粒的受力平衡会产生巨大影响。



Fig. 5 Schematic diagram of normal moment

对于法向力臂的计算,本文参考了文献[24]的 研究,得出法向力臂Y的表达式为

$$Y = (r - b)\cos\gamma + \frac{H}{2}$$
(17)

式中 $H > 0_{\circ}$

(d)切向力臂的计算

在切向力臂的计算过程中需要明确来流颗粒球 心的法线与沉积表面颗粒接触点之间的距离f,将所 有的接触点相连接可得到一个等边三角形,如图 6 所示。

依据图6中的几何关系可以得出切向力臂,其表



Fig. 6 Schematic diagram of tangential moment

达式为

$$i = \frac{3}{2} \times \frac{r}{R_{\rm m} + r} \times h \tag{18}$$

式中h为沉积颗粒的球心到来流颗粒球心的法线的 距离。在沉积的发展过程当中,沉积壁面颗粒的分 布往往是不规律的,为了能够对沉积壁面的剥离进 行进一步的研究,对颗粒的分布情况主要考虑了三 个颗粒顶端沿主流方向(图7(a))以及主流反向(图7 (b))两种情况。可以发现,两种接触情况下的切向 力臂相同。



(e)颗粒受力分析及平衡方程

颗粒发生粘附后,主要受到壁面以及主流的作用,由于在沉积壁面上的颗粒受到壁面特性的影响较大,并且主流工况并未发生改变,因此F_D的大小保持不变。

对于粘附力的计算,本文参考了文献[24]的研究,颗粒与沉积壁面的粘附力表达式为

$$F_{\rm pp} = \frac{3}{2} \pi W_{\rm A} R_{\rm eq} \tag{19}$$

式中*R*_{eq}为等效半径,其取决于当前来流颗粒半径*R*_p与已沉积壁面的曲率半径,本文将沉积壁面曲率半径假设为颗粒半径*R*_m,则等效半径的表达式为

$$R_{\rm eq} = \frac{R_{\rm p}R_{\rm s}}{R_{\rm p} + R_{\rm s}} = \frac{R_{\rm m}r}{R_{\rm m} + r}$$
(20)

图 8 中展示了粘附力 F_{pp}以及在三个方向的分量示意图,从剥离的角度来看,对图 8 中的 o 点取矩,如果要使得颗粒从壁面发生剥离,只有粘附力在 z 方向的分解是有效的。因此,有效粘附力 F_e表达 式为

$$F_{\rm e} = F_{\rm pp} \cos \gamma \tag{21}$$

综合图 7 中的两种情况可以得出颗粒的受力分 布,如图 9 所示。

针对图9中两种颗粒受力方式可列平衡方程,其 表达式为



Fig. 8 Schematic diagram of the direction of adhesion distribution



(a) Force analysis of the first contact form



(b) Force analysis of the second contact form



$$\begin{cases} F_{\rm D}YS = 2F_{\rm e}i \quad (\rm Fig.9(a)) \\ F_{\rm D}YS = F_{\rm e}i \quad (\rm Fig.9(b)) \end{cases}$$
(22)

当等式左侧大于右侧时,在沉积壁面上的颗粒 才会发生剥离。

2.3 大块颗粒物的剥离

颗粒物在壁面沉积堆积后,颗粒之间在高温的 作用下成为一体,会有可能在主流的作用下发生整 体剥离,本文中借鉴于杨晓军等开发的模型^[25],该模 型剥离方式借鉴了单个颗粒物的剥离形式,将整块 沉积物假设为四棱锥,对其展开受力分析,如图10 所示。

图 10 中 A 为整个沉积块的底面积,在进行数值 模拟计算过程中假设其为颗粒沉积处所对应的网格



Fig. 10 Detachment of the entire deposition block

的面积,其受力分析表达式为

$$F_{\rm D}h_{\rm c} \ge \frac{F_{\rm p}\sqrt{A}}{2} \tag{23}$$

当大块沉积物剥离之后,当前网格上的沉积量 会变为0,颗粒将重新开始在当前网格上累积。

2.4 非稳态计算方法及动网格技术

由于颗粒的沉积是一个动态发展的过程,颗粒 的沉积量会逐渐增加,各个计算时间节点下的沉积 量也会有巨大的差异。因此本文中采用了非稳态的 计算方法。

图 11 中展示了在不同的时间节点下,颗粒物在 涡轮叶片压力面上的沉积分布情况。可以发现,当 计算时间节点越长,颗粒物在压力面前缘的沉积量 越多。为了宏观了解沉积分布,进行了动网格设 置,并对网格节点的运动进行了代码的编写,其中 心思想为:首先计算网格节点相邻四个面质心的移 动量,对其进行平均处理从而计算得出该节点的移 动量,保证网格的质量^[26],其表现形式如图 12 所示。







Fig. 12 Node movement of the grid

计算过程中单个颗粒在未沉积壁面产生的移动 量为

$$\Delta H_{z}(i,j) = \frac{\Delta V(i,j)}{S(i,j)} n(i,j)$$
(24)

由于重叠的关系,单个颗粒在沉积壁面上产生 的移动量为ΔH_sS。当计算中加入网格节点运动后, 计算所需的时间会大幅度增加,为了缩短计算时间, 使用了网格拼接技术,将叶片周围2mm区域单独划 分,从而达到缩短时间的效果,整个计算的流程如图 13所示。



Fig. 13 Caculation process

关于沉积壁面与未沉积壁面的区别,本文将来 流颗粒的直径与当前粘附壁面的沉积厚度进行对比 来确定当前壁面是否有沉积,针对两种壁面分别开 展粘附与剥离的计算,达到细化整个沉积现象的计 算流程的目的。

2.5 几何模型及边界条件设定

本文在计算中是用 ANSYS Fluent 17.0 对涡轮叶 片沉积进行数值模拟,由于k-c模型^[27]往往会高估颗 粒的分布情况,所得计算结果误差较大,因此本文中 湍流模型设置为*k*-w SST模型,计算过程中颗粒的注 入通过离散相模型(DPM)来实现,本文中的颗粒尺 寸借鉴于 Lawson 等^[28]收集的资料,其中颗粒的尺寸 小于10µm,本文中选取粒径0.15~8.5µm颗粒进行分 析,在颗粒的尺寸设置中使用到了Rosin-Ramler-Logarithmic分布,使得此范围内不同粒径的颗粒都有 一定的几率进入流场。计算的几何结构及边界条件 的设置如图14所示。为模拟真实的叶片流动特性, 叶片两侧为周期性边界条件,进口和出口均基于压 力,其中进口总压为1.62120MPa,出口总压为 1.01325MPa。由于本文中针对各流体域进行了单独 的网格划分,因此各流体域连接处设置为Interface从 而进行数据的传输。



2.6 网格无关性验证

计算域中网格划分方式为为六面体结构化网 格,本文主要针对涡轮叶片上的沉积现象进行研究, 因此对叶片附近的网格进行了O型切分,并进行了局 部的加密处理,其中第一层网格高度为3μm。计算 过程中网格的数量会对计算精度产生巨大的影响, 在本文中针对此模型划分的网格数量分别为102万、 236万和303万,以压力面中径部分总压为网格无关 性验证对象,计算所得结果如图15所示。可以明显 发现当网格数量为236万时,其与303万网格之间的 误差较小,可以满足无关性要求。因此本文选择使 用236万网格用于沉积的计算。

3 结果与讨论

3.1 涡轮叶片沉积特性分析

计算过程中,首先对整个流场进行求解使其收敛,在指定的时间节点下加载离散相模型(DPM),将 设置好的颗粒发射进入计算域,随后颗粒将被全程 追踪。在本文中,颗粒将经历主流的拖拽、颗粒粘



Fig. 15 Effects of the number of grids on the total pressure of the pressure surface

附、反弹以及剥离的现象,最终得出颗粒在整个涡轮 叶片的沉积分布结果。

图 16 中展示了时间节点为 480,颗粒间距 w= 0μm条件下,涡轮叶片沉积分布情况。可以发现,大 量的颗粒在涡轮叶片的压力面前缘处发生沉积,随 后从压力面前缘到压力面尾缘以及吸力面两个方 向,颗粒的沉积呈递减趋势。从沉积分布图中发现, 在压力面尾缘以及吸力面前缘处的沉积量较少,在 吸力面绝大部分没有沉积。沉积部分的情况可由两 方面进行解释。



造成此分布情况一方面是单个颗粒的剥离作 用,本文中针对颗粒的剥离分别进行了未沉积壁面 与沉积壁面的计算,其分布如图17,图18所示。由 于壁面特性的差异,使得两种情况下颗粒剥离量较 多的区域有着一定的相似与区别。两张图中,无论 壁面是否存在沉积,颗粒都会很大程度上在叶片前 缘驻点上游处发生剥离。当壁面还未沉积时,颗粒 在压力面上的剥离多发生在压力面尾缘叶根部分, 而沉积表面单个颗粒的剥离多发生于压力面中部叶 根处。这是由于涡轮叶栅通道在结构设计中是收敛 的,对于亚声速气流而言,其往往会发生加速现象, 然而针对本文中的叶栅通道而言,从叶尖到叶根 处流道的收缩性会显著增加,因此在压力面尾缘 处气流加速效果最为明显,颗粒受到主流的作用 力也最为明显,所以颗粒发生剥离的数量也会增 加,这就使尾缘处的沉积量大大减少,导致在沉积 壁面上单个颗粒的剥离往往集中于压力面中部叶 根处。



Fig. 17 Particle detached from undeposited surface



Fig. 18 Particle detached from deposited surface

另外,由于大块颗粒剥离的影响,当沉积壁面发 生大块颗粒的脱落后将导致此网格目前的沉积量归 零。图19中展示了大块颗粒物剥离的区域分布,图 中红色框线部分可以发现大块颗粒物的剥离多集中 于压力面尾缘中部到叶尖部分,在压力面中上游的 剥离数量相对较少。此外黑色框线中可以发现大块



颗粒的剥离对压力面前缘驻点处的影响非常小,这 也使得压力面前缘的沉积量最为明显。

3.2 临界陷入值的作用及剥离方式的差异

当涡轮叶片上发生颗粒粘附之后,其表面特性 与还未沉积的表面存在着显著的差异,本文在计算 中假设沉积壁面由许多球形颗粒覆盖,沉积壁面表 面往往会有许多小凸起。然而即便已经发生沉积的 颗粒相互紧挨,多个颗粒之间还是会有孔隙的存在, 当小颗粒发生粘附时很有可能陷入此孔隙当中,图 20中展示了w=0μm,颗粒接触方式为图7(a)时,颗粒 在叶片沉积壁面陷入数量的分布情况,可以直观地 发现,颗粒大部分陷入在压力面前缘处,其同时也揭 示了小颗粒在前缘部分的粘附概率较高,这很可能 是由于在压力面前缘处的主流温度相对较高,此位 置颗粒的粘附主要取决于临界粘度模型,最终产生 大量的堆积。



此外颗粒的接触形式对颗粒是否能够一直粘附 在壁面上也会产生一定的影响,图21展示了图7中 两种接触形式(w=0)下颗粒的沉积分布情况,可以发 现在两种颗粒的接触形式下,涡轮叶片沉积分布之 间的差异性较小。结合图18颗粒得出压力面前缘较 大颗粒发生粘附的概率较大,第二种颗粒的接触方式会使得



contact forms

其更容易发生剥离,颗粒的沉积厚度则会变小,然而 压力面前缘最终沉积量差异较小,足以证明此处大 颗粒的粘附数量非常少。

3.3 沉积壁面颗粒稀疏程度的影响

本文通过改变在沉积壁面上相邻颗粒的间距 w 来表示壁面颗粒的稀疏程度,由于沉积的理论计算 没有发生改变,其对涡轮叶片上沉积物的整体分布 影响不会太大。从沉积物的大块剥离云图中可以发 现,剥离对叶片前缘驻点处的影响较小,此部分颗粒 厚度重新累积的情况较少,因此针对前缘驻点沉积 壁面的稀疏度的影响开展讨论。

图 22 中展示了 *R*_m为 2.5μm,颗粒间距 *w* 分别为 0.0,0.5,1.0以及 1.5μm条件下,相同的计算时间节点 下,在前缘驻点线上颗粒物的沉积厚度。图中明显 发现随着颗粒间距 *w* 的增大,相同时间的节点下对应 的沉积厚度会降低。此类现象的产生可以从两方面 来解释:一方面是对于一个发生粘附后能够被主流 作用的颗粒而言,由于 *w* 的增大,被主流作用的自由 高度 *H* 会显著降低,进而影响到无量纲矫正系数 *S*, 因此在单个颗粒造成的厚度演化计算时,单个颗粒 增加的厚度会显著降低。



surface leading edge with *w*

另一方面需要从临界陷入值的角度来探讨,图 23中展示了随着颗粒间距w的增大,陷入在沉积表面 的颗粒的数量。可以明显发现随着w的增大导致临 界陷入值r。增大,这部分在嵌入沉积壁面之后由于难 以被主流作用,导致其自由高度H<0,因而此部分颗 粒无法对沉积厚度造成影响。

无量纲矫正系数的变化不光对沉积厚度的演变 有影响,也会影响到颗粒受主流作用的程度,对颗粒 在沉积壁面的受力平衡也会造成影响。图24展示了 四种颗粒间距下沉积壁面颗粒剥离数量的分布云



Fig. 23 Variation of catchment number of pressure surface leading edge with *w*



图,可以发现w的变化并不会对剥离位置的变化造成 影响,但是在同一计算时间节点下,同一位置处随着 颗粒间距w的增大,沉积壁面剥离的数量会有所减 小。这是由于w的增大会使得矫正系数S减小,进而 导致主流对沉积壁面颗粒的作用程度降低,使得在 同一工况下,颗粒发生剥离的难度有所增加,导致剥 离数量的减少。

3.4 沉积表面颗粒半径的影响

对于沉积壁面的情况,本文做了两个假设,其分 别为沉积壁面被主流作用的一面依旧保持球形和沉 积表面颗粒半径 R_m为固定值。由于来流颗粒尺寸并 不固定,并且 R_m的大小会影响到等效半径的计算,最 终导致沉积表面粘附力大小受到影响,此部分中将 针对 R_m的大小展开一定的研究。

关于表面颗粒半径 R_m的影响,本文依旧针对压力面前缘驻点处进行研究。图 25 展示了颗粒间距



Fig. 25 Variation of deposition thickness of pressure surface leading edge with R_m

w=0μm, *R*_m分别为2.5, 3.5, 4.5 以及5.5μm情况下压力面前缘驻点处沉积厚度的分布规律。

从图 25 中可以明显看出,随着表面颗粒半径 R_m 的增大,沉积厚度首先逐渐减小,当颗粒半径较大 时,沉积厚度骤减。造成此结果,一方面是由于 R_m的 增大,使得临界陷入值 r_o的阈值增大,使得粒径相对 较大的颗粒嵌入沉积表面;另一方面则与颗粒物粒 径的尺寸分布有一定的联系,在相同的计算工况下, 不同粒径的颗粒在叶片的沉积分布也存在一定的差 异,当表面颗粒半径过大时,导致满足粘附条件的颗 粒在沉积之后的自由高度 H过低,使得沉积厚度的增 长变得非常缓慢。同时此图也间接反映了在大颗粒 半径下,同一计算时间节点下同一位置处的沉积量 也会急剧减小。

图 26 中展示了四种 R_m下,从压力面前缘叶尖到 叶根处颗粒陷入数量的趋势,可以发现随着表面颗 粒半径的增大,陷入壁面的颗粒也会增加,当壁面颗 粒半径过大时,陷入壁面空隙的颗粒的数量也会急 剧增加。因此随着颗粒半径的增大,同一计算时间 节点下,沉积厚度减小是必然趋势。



Fig. 26 Variation of catchment number of pressure surface leading edge with R_m

4 结 论

本文中针对涡轮叶片沉积表面颗粒的受力特性 展开了研究,主要得到以下结论:

(1)综合颗粒的粘附与剥离现象,颗粒将会在涡轮叶片压力面产生较多的沉积,其中在压力面前缘 处最为明显。

(2)在已有沉积的壁面上,颗粒在压力面前缘处 的陷入量较多,此外单个颗粒在沉积表面的接触方 式对沉积的整体布局影响较小。

(3)随着沉积表面颗粒距离w的增大,相同时间 节点下在压力面前缘处颗粒的沉积厚度降低,陷入 沉积壁面的颗粒数量增加。

(4)随着沉积壁面颗粒半径的增加,沉积厚度降低,当沉积壁面颗粒半径过大,沉积厚度将会骤降。

致 谢:感谢中国民航大学中央高校基本科研业务费项目的资助。

参考文献

- 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] Kim J, Dunn M G, Baran A J, et al. Deposition of Volcanic Materials in the Hot Sections of Two Gas Turbine Engines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(3): 641-651.
- [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 & Power, 1996, 118 (4): 724-731.
- [4] Sreedharan S S, Tafti D K. Composition Dependent model for the Prediction of Syngas Ash Deposition with Application to a Leading Edge Turbine Vane [R]. ASME GT 2010-23655.
- [5] Singh S, Tafti D. Predicting the Coefficient of Restitution for Particle Wall Collisions in Gas Turbine Components
 [R]. ASME GT 2013-95623.
- [6] Brach R M, Dunn P F. A Mathematical Model of the Impact and Adhesion of Microsphers [J]. Aerosol Science and Technology, 1992, 16(1): 51-64.
- [7] Bons J P, Prenter R, Whitaker S. A Simple Physics-Based Model for Particle Rebound and Deposition in Turbomachinery[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139 (8).
- [8] Casari N, Pinelli M, Suman A, et al. EBFOG: Deposition, Erosion and Detachment on High Pressure Turbine Vanes [R]. ASME GT 2017-64526.

- [9] Bravo L G, Jain N, Khare P, et al. Physical Aspects of CMAS Particle Dynamics and Deposition in Turboshaft Engines [J]. Journal of Materials Research, 2020, 35 (17): 2249-2259.
- [10] Cheng W L, Lundgreen R, Guo B. A Numerical Study of Dust Deposition in a Model Turbine Vane Cooling Passage [R]. ASME GT 2018-75833.
- [11] Libertowski N, Plewacki N, Bons J P. The Effect of Temperature and Melting Relative to Particle Deposition in Gas Turbines[R]. AIAA 2019-1951.
- [12] Prenter R, Ameri A, Bons J P. Computational Simulation of Deposition in a Cooled High-Pressure Turbine Stage with Hot Streaks[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(9).
- [13] 张 斐,刘振侠,刘振刚,等.不同来流条件对涡轮 叶片表面颗粒沉积影响的实验研究[J].推进技术, 2019,40(7):1536-1545. (ZHANG Fei, LIU Zhenxia, LIU Zhen-gang, et al. Experimental Simulation of Particle Deposition on Turbine Blade Surface with Different Free Stream Conditions [J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(7):1536-1545.)
- [14] Zhang F, Liu Z, Liu Z, 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).
- [15] Liu Z, Zhang F, Liu Z. An Experimental Study on Reducing Depositing on Turbine Vanes with Transverse Trenches[C]. Chengdu: Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2018: 1707-1716.
- [16] 游学磊,姜玉廷,岳国强,等.舰船燃气轮机高压涡 轮颗粒沉积特性研究[J].推进技术,2020,41(11): 2490-2498. (YOU Xue-lei, JIANG Yu-ting, YUE Guo-qiang, et al. Investigation on Particle Deposition Characteristic of High-Pressure Turbine for Marine Gas Turbine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020,41 (11): 2490-2498.)
- [17] 游学磊,岳国强,王少良,等.沟槽平板颗粒沉积特 性和气膜冷却性能[J].航空动力学报,2021,36(5): 1022-1032.
- [18] 杨 星,郝子晗,丰镇平.考虑进口旋流的涡轮静叶流动传热的颗粒物沉积效应[J].西安交通大学学报, 2021,55(7):1-10.
- [19] 杨晓军,于天浩,胡英琦,等.沉积环境下叶片前缘 气膜冷却的实验研究[J].北京航空航天大学学报, 2021,47(11).
- [20] Senior C L, Srinivasachar S. Viscosity of Ash Particles in Combustion Systems for Prediction of Particle Sticking
 [J]. Energy & Fuels, 1995, 9(2): 277-283.

- [21] 裴 钰.燃气轮机涡轮叶片表面污染物沉积模型研究 [D].天津.中国民航大学,2016.
- [22] El-Batsh H, Haselbacher H. Numerical Investigation of the Effect of Ash Particle Deposition on the Flow Field Through Turbine Cascades [R]. ASME GT 2002-30600.
- [23] Casari N, Pinelli M, Suman A, et al. On Deposit Sintering and Detachment from Gas Turbines [R]. ASME GT 2018-76774.
- [24] Nasr B, Ahmadi G, Ferro A R, et al. A Model for Particle Removal from Surfaces with Large-Scale Roughness in Turbulent Flows[J]. Aerosol Science and Technology, 2020, 54(3): 291-303.
- [25] 杨晓军,胡英琦,徐致远,等.存在剥离条件下颗粒物沉积过程的数值研究和实验验证[J].推进技术,2019,40(7):1523-1535. (YANG Xiao-jun, HU

Ying-qi, XU Zhi-yuan, et al. Experimental Validation and Numerical Simulation of Particles Depositional Processes with Detachment[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(7): 1523-1535.)

- [26] 杨晓军,祝佳雄.涡轮叶栅通道内颗粒物沉积过程的 数值模拟[J]. 航空学报,2017,38(5):31-42.
- [27] 曾 飞,宋玉琴.不同粒径颗粒在涡轮流道内沿程温度及其与叶片的撞击特性研究[J].推进技术,2020,41(8):1797-1806.(ZENG Fei, SONG Yu-qin. Temperature of Particles with Different Diameters along Turbine Flow Path and Impingement Characteristics on Turbine Vanes and Blades[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(8):1797-1806.)
- [28] Lawson S A, Thole K A. Simulations of Multi-Phase Particle Deposition on Endwall Film-Cooling Holes in Transverse Trenches [R]. ASME GT 2011-45190.

(编辑:史亚红)