

涡轮叶栅内粒子沉积特性的数值研究

周君辉, 张靖周*

南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016

摘要: 为了揭示叶栅内部粒子沉积分布, 减少叶栅内粒子沉积, 数值研究了二维涡轮叶栅内部固体粒子运动与沉积特性, 重点研究了粒径和气流进气角对叶栅内粒子运动与沉积特性的影响。基于 EI-Batsh 沉积模型, 考虑了粒子与壁面碰撞所形成的黏附/反弹和离去机制, 编制了相应的粒子沉积计算模块集成在 Fluent 软件中, 并利用相关实验数据对本文计算方法进行了验证。研究结果表明, 较大粒径粒子随流性较差, 碰撞率较高, 黏附率较小, 较小粒径粒子则相反; 粒子沉积主要分布在叶片压力面中部, 气流进气角对粒子沉积分布具有重要影响。

关键词: 沉积; 两相流; 叶栅; 粒径; 数值分析

中图分类号: V231.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6893(2013)11-2492-08

航空燃气涡轮发动机在含砂尘环境中工作时, 外部微细颗粒的侵入极易在涡轮叶片冷却结构中形成沉积堵塞, 由此引发涡轮叶片冷却特性的变化, 对涡轮叶片冷却结构的可靠性将构成严重的影响。微细颗粒侵入所诱发的航空燃气涡轮发动机性能恶化和可靠性损伤问题, 已成为国际上高度重视的一个研究课题^[1-4]。

国内外对于气固两相流动和固体颗粒运动特性的研究已十分广泛和深入, 对于航空燃气涡轮发动机的外部微细颗粒侵入现象, 大量研究已经表明其具有稀疏气固两相流动特征, 颗粒之间的碰撞和相互作用极其微弱。就微细颗粒碰撞壁面后所产生的危害行为而言, 目前国际上普遍关注两类问题^[5], 即粒径相对较大的颗粒对壁面的磨蚀行为以及粒径相对较小的颗粒在壁面的沉积行为。在颗粒对壁面的磨蚀行为研究方面, 国内外研究人员已对颗粒的磨蚀机理开展了较为深入的

研究^[6-9], 颗粒撞击所形成的表面磨蚀主要由两部分构成: 即垂直冲击速度引起的变形磨蚀和切向速度引起的切削磨蚀。基于上述机理建立了颗粒磨蚀模型。相对于颗粒对壁面的磨蚀行为, 粒径相对较小的颗粒在壁面的沉积机制更为复杂, 在早期对于颗粒沉积的计算模型中, 一般都假定颗粒与壁面接触后全部黏附于壁面^[10]。这种假定显然与实际情况有很大出入, Brach 和 Dunn 引入了颗粒临界捕获速度的概念^[11], 认为只有当颗粒碰撞速度小于捕获速度, 颗粒才能黏附于表面, 否则弹离表面。进一步的研究表明, 微细颗粒在壁面上的沉积不仅与微细颗粒和壁面的机械接触有关, 而且与微细颗粒和壁面的流体动力接触相关。EI-Batsh 和 Haselbacher^[12]在粒子临界速度基础上发展了包含黏附模型的粒子沉积模型, 并对模型进行了实验验证, 基于上述机理, 研究者针对表面和微细颗粒的物理属性建立了相应的捕获和沉

收稿日期: 2013-01-16; 退修日期: 2013-03-24; 录用日期: 2013-04-15; 网络出版时间: 2013-04-25 10:12

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130425.1012.002.html

基金项目: 国家自然科学基金(51276090); 江苏省普通高校研究生科研创新基金(CXLX13_166); 中央高校基本科研业务费专项资金

* 通讯作者. Tel.: 025-84895909 E-mail: zhangjz@nuaa.edu.cn

引用格式: Zhou J H, Zhang J Z. Numerical investigation on particle deposition characteristic inside turbine cascade. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. 2013, 34(11): 2492-2499. 周君辉, 张靖周. 涡轮叶栅内粒子沉积特性的数值研究. 航空学报, 2013, 34(11): 2492-2499.

积模型,并对微细颗粒在壁面上的沉积形貌进行了理论研究^[13-15]。

本文基于 EI-Batsh 沉积模型,采用数值计算方法对涡轮叶栅内的粒子沉积特性进行研究,分析研究不同粒径、气流进气角等因素对粒子运动以及沉积特性的影响和作用机制。

1 计算模型和计算方法

1.1 气固两相流动模型

假设粒子为坚硬的球体,并简化为点位于球体中心。壁面假设为光滑壁面,不考虑粗糙度的影响。针对稀疏气固两相流动特征,本文不考虑颗粒之间的碰撞以及颗粒对气相流动的影响,仍采用单相气流流动的控制方程。用 Fluent-CFD 软件进行数值计算,求解雷诺时均 Navier-Stokes 方程,压力和速度方程耦合采用 SIMPLE 方法。湍流模型采用低雷诺数剪切应力输运 (SST) $k-\omega$ 模型,该模型能较准确地模拟边界层流场结构,能够精确预测粒子在边界层内的运动轨迹,因此提高了对粒子在边界层内运动的预报能力。为了准确模拟边界层对粒子的影响,边界层网格尺度必须足够精细,本文网格在边界层处加密使 y^+ 约等于 1。各物理量的离散格式均为二阶离散格式。

粒子运动轨迹采用拉格朗日法进行求解,湍流脉动对粒子运动轨迹的影响采用随机游走模型,粒子受力主要考虑颗粒与气流存在相对运动所承受的 Stokes 阻力,由于边界层速度梯度较大,对颗粒的升力作用影响较大不能忽略,所以计算中考虑 Suffman 升力影响。

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_{\text{drag}} + \mathbf{F}_{\text{lift}} \quad (1)$$

其中,Stokes 阻力和 Suffman 升力为

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{\text{drag}} = \frac{1}{2} \rho (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p)^2 A_{cp} C_D \\ \mathbf{F}_{\text{lift}} = 1.615 \mu \mathbf{u}_p^2 \sqrt{\frac{k_r}{\nu}} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_p) \end{cases}$$

式中: m_p 为单个粒子的质量; A_{cp} 为粒子迎风面积; k_r 为局部速度梯度; \mathbf{u} 为流体速度; \mathbf{u}_p 为粒子速度; μ 为流体的动力黏度; ν 为流体运动黏度; ρ

为流体密度; C_D 为粒子阻力系数。粒子阻力系数和粒子雷诺数定义为

$$\begin{cases} C_D = \frac{24}{Re_p} \\ Re_p = \frac{\rho D_p |\mathbf{u} - \mathbf{u}_p|}{\mu} \end{cases}$$

式中: D_p 为粒子粒径。

粒子的传热方程为

$$m_p c_{pp} \frac{dT_p}{dt} = h_c A_p (T_f - T_p) \quad (2)$$

式中: A_p 为粒子表面积; c_{pp} 为粒子定压比热容; T_p 为粒子温度; T_f 为流体温度; h_c 为气流与粒子之间的对流换热系数,采用经验关系式确定

$$Nu = \frac{h_c D_p}{k} = 2.0 + 0.6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3}$$

式中: Nu 为努赛尔数; Pr 为普朗特数; k 为湍动能; D_p 为粒子直径。

1.2 粒子沉积模型

微细颗粒在壁面上的沉积形貌取决于微细颗粒与壁面的相互作用机制,具体表现为微细颗粒与壁面的机械接触和流体动力接触。前者反映了微细颗粒在壁面上的黏附与反弹机制,这一行为与微细颗粒的碰撞能力和壁面的捕获能力相关;而后者则反映了微细颗粒在壁面上的剥离与沉积机制,这一行为与壁面的摩擦速度和微细颗粒的临界剪切速度相关。

基于粒子沉积 EI-Batsh 模型^[12],黏附过程采用粒子临界速度概念,粒子的临界捕获速度为

$$V_{cr} = \left(\frac{2E}{D_p} \right)^{\frac{10}{7}} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} E = 0.51 \left[\frac{5\pi^2 (k_1 + k_2)}{4\rho_p^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{2}{5}} \\ k_1 = \frac{1 - \nu_s^2}{\pi E_s} \\ k_2 = \frac{1 - \nu_p^2}{\pi E_p} \end{cases}$$

式中: V_{cr} 为粒子临界捕获速度; ρ_p 为粒子密度; E_p 和 E_s 分别为粒子和表面材料的杨氏模量; ν_p 和 ν_s 分别为粒子和表面材料的泊松比。如果粒子对壁面的法向撞击速度小于捕获速度,则粒子

黏附于表面,否则粒子在壁面形成反弹。

如果湍流流动壁面摩擦速度大于临界表面剪切速度,则粒子将被移离表面。离去过程采用临界动量理论计算临界壁面剪切速度。临界壁面剪切速度用下式计算:

$$u_{tc}^2 = \frac{W_A}{\rho D_p} \left(\frac{3\pi W_A}{2D_p K_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中: W_A 为黏附常数,取决于粒子与表面材料的性质; K_c 为复合杨氏模量,其表达式为

$$K_c = \frac{4}{3} \left(\frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_p^2}{E_p} \right)^{-1}$$

1.3 计算流程

基于 Fluent-CFD 软件计算气相流场和粒子运动轨迹;粒子沉积过程采用用户自定义计算模块分析。计算流程如下:

1) 计算单相气流流场。

2) 计算粒子的运动过程,依据式(3)判断粒子是否被壁面捕获;如果不能被捕获,则继续追踪粒子的运动轨迹。

3) 对于被捕获的粒子,依据式(4)判断粒子是否沉积于壁面,一旦沉积则累积粒子质量;否则粒子被移离表面,继续追踪粒子轨迹。

4) 追踪粒子在计算域的运动轨迹以及与壁面的相互作用,直至粒子沉积于壁面或离开计算域;然后进行其他粒子的运动分析。

2 计算方法验证

为了验证本文计算方法的正确性,针对文献[15]的二维实验模型进行了计算。计算物理模型如图1所示。图中:1 in=2.54 cm。实验中射流进口速度为173 m/s,温度范围为1 273~1 453 K。粒子平均直径为13.4 μm ,密度为990 kg/m^3 ,比热比为984 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,导热系数为0.5 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。气流冲击靶板与来流呈45°放置,冲击靶板温度控制为1 311 K,导热系数为9 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,平板背面采用陶瓷材料以实现绝热,粒子的沉积率通过冲击表面上沉积的粒子质量与投入粒子质量的比值确定。

计算模型依据实验模型确定。射流入口给定来流的速度和温度,粒子投放质量流量为5.71 ×

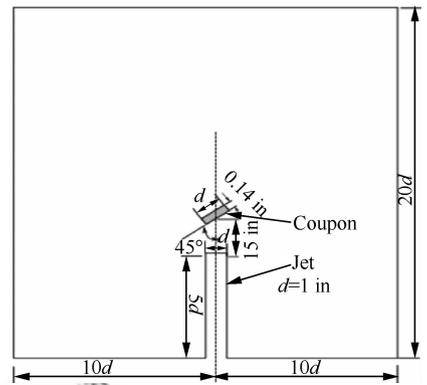


图1 二维实验模型示意图^[15]

Fig. 1 Schematic of the 2D experimental model^[15]

10^{-6} kg/s,粒子平均直径为13.4 μm ,粒子粒径分布呈 Rosin-Rammler logarithm 分布;冲击靶面背面采用绝热边界,计算域选取边界范围较大,采用压力出口和300 K的温度边界条件,以模拟环境条件。计算中,粒子和表面材料的泊松比 ν_p 和 ν_s 均取为0.27,表面材料的杨氏模量 E_s 取为 2.15×10^{14} Pa,粒子的杨氏模量 E_p 取为

$$E_p = 3 \times 10^{20} \exp(-0.023 65 T_g)$$

式中: T_g 为气体温度。

图2为粒子沉积率的计算结果与实验结果的对比图,沉积率定义为沉积于壁面的粒子质量与投放的总粒子质量之比。由图可知,本文计算结果与实验结果符合较好,证明了本文计算方法的合理性。

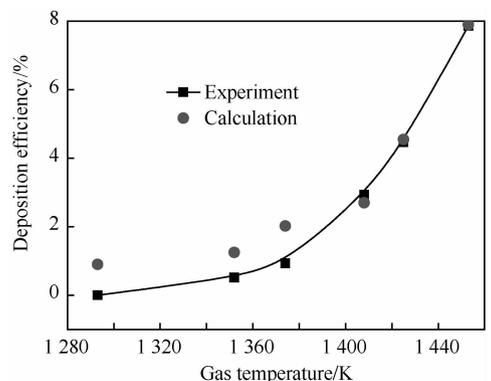


图2 沉积率计算与实验结果对比

Fig. 2 Calculated deposition efficiency vs experimental data

3 叶栅通道粒子沉积特性

3.1 计算物理模型

计算模型为二维涡轮叶栅通道, 叶片叶型按照文献[16]确定, 叶片弦长为 67.647 mm, 栅距为 57.5 mm, 喉部宽度为 14.93 mm, 计算域如图 3 所示。计算网格采用非结构四面体网格, 对网格进行网格独立性实验, 网格数为 12 万。

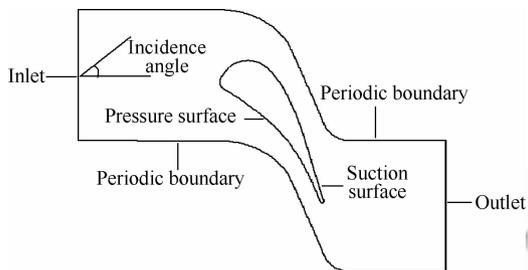


图 3 二维叶栅通道计算模型

Fig. 3 Computational model of 2D cascade passage

计算域的边界条件设置: 主流为压力入口, 总压为 147 500 Pa, 总温为 1 500 K, 湍流度取为 1%, 湍流特征长度为 4 mm; 出口为压力出口, 静压为 89 600 Pa; 栅距方向周期性面为周期性边界条件; 叶片固壁绝热, 采用无滑移速度边界条件。在叶栅通道入口, 粒子投放质量流量为 0.012 9 kg/s, 粒子温度和速度与入口流体一致, 粒子的密度、比热比和导热系数物性参数以及粒子和表面材料的泊松比、杨氏模量取值与第 2 节一致。

为了验证平面叶栅流动计算方法的正确性, 本文对单相气流流场进行了算例验证, 图 4 为叶

片壁面静压计算结果与文献[16]的实验结果对比, 横坐标为叶栅无量纲化的轴向距离。由图可知本文计算结果与实验结果符合较好, 从而验证了本文单相气流流场计算的正确性以及网格的适用性。

3.2 粒子粒径的影响

图 5 为主流进气角为 0° 时, 不同粒径的粒子在叶栅通道内的运动轨迹及残留时间计算结果。表 1 为不同粒径粒子黏附率、碰撞速率以及沉积速率计算结果, 这里, 粒子碰撞速率定义为每秒撞击叶片表面的粒子质量, 黏附率定义为黏附于表面的粒子质量与碰撞表面粒子质量之比, 粒子沉积速率定义为粒子每秒黏附于叶片表面的质量。 $0.1 \mu\text{m}$ 的粒子由于惯性较小显示了较好的随流性, 粒子运动几乎与壁面平行并不与壁面发生碰撞, 并且粒子黏附于壁面或者被流体剪切离开壁面受流体影响较为严重, 碰撞到壁面的粒子有着非常小的法向撞击速度, 使得较小粒径的粒子有较小的碰撞率但是较大的黏附率; $1 \mu\text{m}$ 的粒子轨迹图与 $0.1 \mu\text{m}$ 的粒子轨迹的差异主要反映在叶片吸力面侧, 由于粒子的惯性力增大, 吸力面的碰撞显著减少, 粒子偏离吸力面较早, 粒子轨迹与吸力面距离较远。 $10 \mu\text{m}$ 的粒子轨迹图, 惯性力作用显著增强, 受流体力作用较小, 导致了粒子轨迹与气流轨迹的巨大差异性, 吸力面碰撞与 $1 \mu\text{m}$ 粒子相比增多, 主要集中在吸力面后部, 碰撞粒子主要来源于相邻叶片表面间的反弹碰撞。由于 $10 \mu\text{m}$ 粒子运动到叶片表面时几乎与表面垂直, 导致了叶片前缘的碰撞较多, 另一方面也导致了粒子与壁面碰撞时的法向速度较大, 使得法向速度大于捕获速度的概率增大, 从而使粒子与壁面接触时更易发生反弹而不是黏附于壁面, 因此较大粒子有着较大的碰撞率但是较小的黏附率。

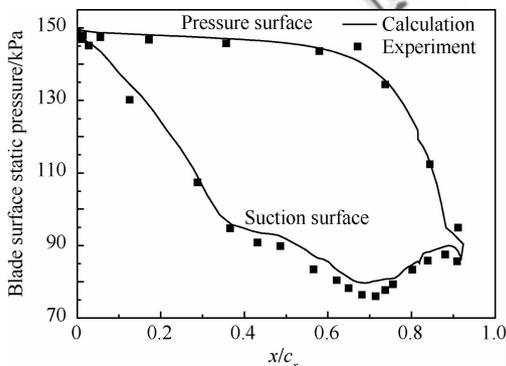
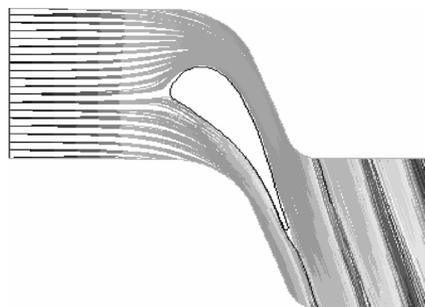


图 4 叶片壁面静压分布对比

Fig. 4 Comparison of static pressure distribution on the blade surface



(a) $0.1 \mu\text{m}$

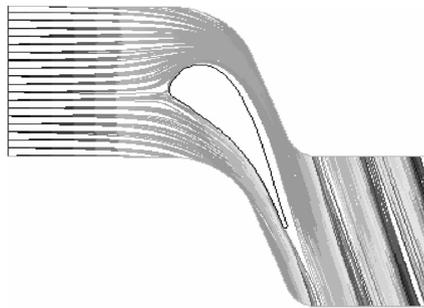
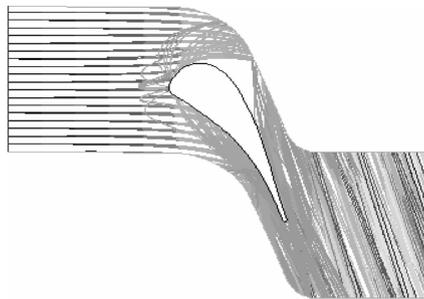
(b) 1 μm (c) 10 μm

图5 不同粒径粒子轨迹图

Fig. 5 Effects of particle diameter on trajectory

表1 不同粒径粒子黏附率、碰撞速率和沉积速率

Table 1 Effects of particle diameter on sticking efficiency, impacting rate and deposition rate

Particle diameter/ μm	Impacting rate/ $(\text{mg} \cdot \text{s}^{-1})$	Deposition rate/ $(\text{mg} \cdot \text{s}^{-1})$	Sticking efficiency
0.1	155.4	155.4	1
1	441.1	346.2	0.78
5	8 070.2	122.9	0.015
10	1.78×10^4	20.4	0.001

图6为不同粒径粒子在叶片压力面上的沉积速率计算结果。由图可以看出,粒子粒径对压力面表面沉积速率分布有较大影响,1 μm 粒子由于

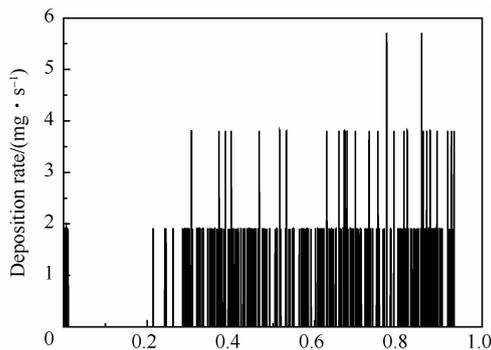
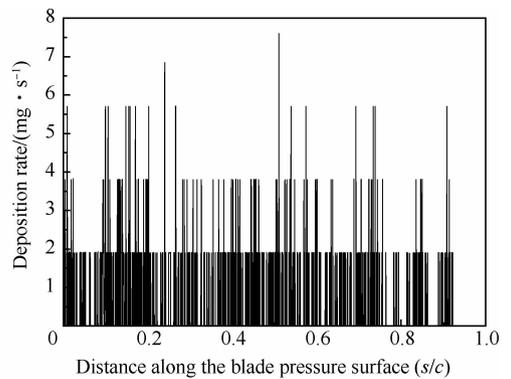
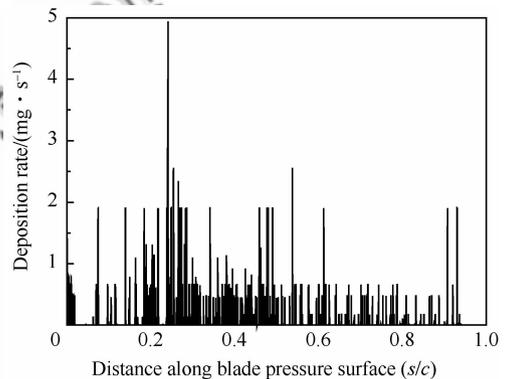
(a) 1 μm (b) 3 μm (c) 5 μm

图6 不同粒径粒子对沉积速率分布的影响

Fig. 6 Effects of particle diameter on deposition rate distribution

随流性较好主要沉积于压力面中部和后部,前部沉积较少;随着粒径逐渐增大,粒子随流性逐渐变差,压力面前部的沉积逐渐增多,3 μm 粒子在压力面上的沉积速率分布较为均匀,而5 μm 粒子则主要分布在压力面前部和中部。

3.3 气流进气角的影响

图7显示不同气流进气角下粒子在涡轮叶片上的沉积速率分布。采用的最小粒径为0.25 μm 、最大粒径为5 μm ,粒径分布服从 Rosin-Rammler logarithm 分布,平均粒径为2 μm 。表2为不同入射角对吸力面及压力面沉积速率的影响。由表可以看出,粒子沉积主要发生在叶片压力面中部,吸力面只有极少数量的粒子沉积,并且尾缘处的粒子沉积较少。图8为压力面的壁面剪切应力分布图,在压力面尾缘处的流体剪切应力最大,使得粒子较难沉积于此。不同气流进气角对吸力面及压力面沉积速率、粒子沉积位置

以及整体沉积率影响非常大。随着气流进气角的增大, 吸力面沉积率逐渐增大, 压力面沉积速率逐渐减小, 而整体沉积速率逐渐减小; 同时, 压力面沉积速率最大的区域也随着气流进气角的改变而改变, 40° 气流进气角时, 压力面最大沉积速率区域在前缘处, 随着气流进气角增大, 最大沉积速率区域逐渐向中部移动。这是由于增大气流进气角使

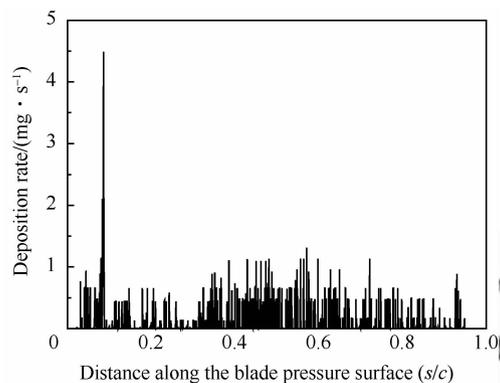
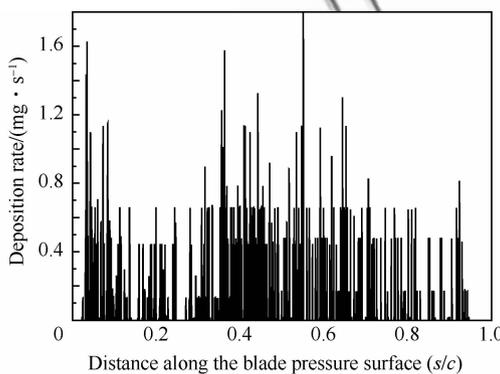
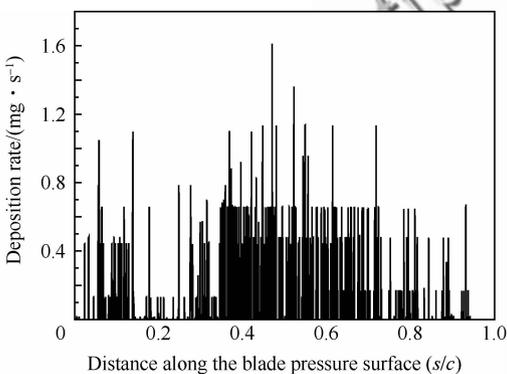
(a) Flow incidence angle 40° (b) Flow incidence angle 50° (c) Flow incidence angle 60°

图7 不同气流进气角对沉积速率分布的影响

Fig. 7 Effects of flow incidence angle on deposition rate distribution

表2 不同气流进气角对叶片表面沉积速率影响

Table 2 Effects of flow incidence angle on deposition rate of blade surface

Deposition rate/ ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)	Flow incidence angle/ $(^\circ)$		
	40	50	60
Suction surface	4.2	5.2	7.6
Pressure surface	580.5	559.7	537.7
Total	584.7	564.9	545.3

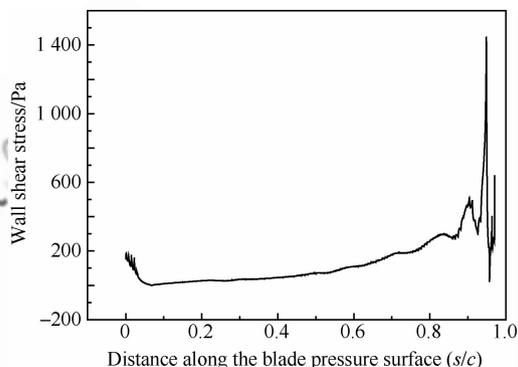


图8 压力面壁面剪切应力分布

Fig. 8 Wall shear stress distribution on pressure surface

得粒子撞击压力面时的法向速度变小, 而撞击吸力面时的法向速度变大, 从而改变了沉积速率在叶片表面的分布。

4 结论

1) 基于 EI-Batsh 的粒子沉积模型, 编制了粒子沉积的计算模块。采用国外已有实验对本文计算方法进行验证, 结果表明本文的计算方法是合理的。

2) 粒子粒径对黏附率影响较大, 较大粒径粒子随流性较差, 造成粒子碰撞率高而黏附率低, 相反较小粒径粒子随流性较好, 粒子碰撞率低而黏附率高。

3) 气流进气角对叶片表面粒子沉积速率分布有较大影响, 增大气流进气角会使吸力面沉积速率增大同时使压力面沉积速率减小, 并且压力面最大沉积速率区域逐渐向中部移动。

参 考 文 献

- [1] Brun K, Nored M, Kurz R. Particle transport analysis of sand ingestion in gas turbine engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2012, 134(1): 012402-
© 航空学报编辑部 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

- 1-8.
- [2] Dunn M G, Padova C, Moller J C, et al. Performance deterioration of a turbofan and a turbojet engine upon exposure to a dust environment. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1987, 109(3): 336-343.
- [3] Kim J, Dunn M G, Baran A J, et al. Deposition of volcanic materials in the hot sections of two gas turbine engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1993, 115(3): 641-651.
- [4] Schneider O, Dohmen H J, Benra F K, et al. Investigations of dust separation in the internal cooling air system of gas turbines. *ASME Paper*, GT-2003-38293, 2003.
- [5] Hamed A, Tabakoff W, Wenglarz R. Erosion and deposition in turbomachinery. *Journal of Propulsion and Power*, 2006, 22(2): 350-360.
- [6] Hamed A A, Tabakoff W, Rivir R B, et al. Turbine blade surface deterioration by erosion. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2005, 127(3): 445-452.
- [7] Zhang Y L, McLaury B S, Shirazi S A. Improvements of particle near-wall velocity and erosion predictions using a commercial CFD code. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2009, 131(3): 031303-1-9.
- [8] Yi J H, Shi F, Xu Z. A study on motion behaviours of particles through turbine cascade. *Journal of Aerospace Power*, 1995, 10(3): 277-279, 313. (in Chinese)
伊景海, 史峰, 徐忠. 平面叶栅内固体粒子运动特性的研究. *航空动力学报*, 1995, 10(3): 277-279, 313.
- [9] Rao J, Ge M C, Xu J Z, et al. Experimental investigation on interaction between solid particle and wall surface. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(1): 134-136. (in Chinese)
饶江, 葛满初, 徐建中, 等. 固体颗粒与通道壁面相互作用的实验研究. *工程热物理学报*, 2003, 24(1): 134-136.
- [10] Xi G, Jia H X, Wang X F, et al. Numerical study of the deposition of solid particles in the blade cascade of axial compressors. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2003, 24(1): 55-58. (in Chinese)
席光, 贾会霞, 王晓锋, 等. 轴流压缩机叶栅内固体微粒沉积的数值研究. *工程热物理学报*, 2003, 24(1): 55-58.
- [11] Brach R, Dunn P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres. *Aerosol Science and Technology*, 1992, 16(1): 51-64.
- [12] El-Batsh H, Haselbacher H. Numerical investigation of the effect of ash particle deposition on the flow field through turbine cascades. *ASME Paper*, GT-2002-30600, 2002.
- [13] Wammack J E, Crosby J, Fletcher D, et al. Evolution of surface deposits on a high pressure turbine blade, part I: physical characteristics. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2008, 130(2): 021020-1-8.
- [14] Guha A. Transport and deposition of particles in turbulent and laminar flow. *Annual Review Fluid Mechanics*, 2008, 40: 311-341.
- [15] Ai W G, Fletcher T H. Computational analysis of conjugate heat transfer and particulate deposition on a high pressure turbine vane. *ASME Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(4): 041020-1-12.
- [16] Arts T, de Rouvoit M L, Rutherford A W. Aero-thermal investigation of a highly loaded transonic linear turbine guide vane cascade. VKI Technical Note 174, 1990.

作者简介:

周君辉 男, 博士研究生。主要研究方向: 传热与两相流研究。
E-mail: zhoujunhui12345@163.com

张靖周 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 强化传热、红外隐身等。

Tel: 025-84895909

E-mail: zhangjz@nuaa.edu.cn

Numerical Investigation on Particle Deposition Characteristic Inside Turbine Cascade

ZHOU Junhui, ZHANG Jingzhou *

College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: In order to reveal the particle deposition distribution inside the cascade, reduce the particle deposition, a numerical investigation is performed on the movement and deposition of dilute particles inside a two-dimensional turbine cascade, focusing on the effects of particle diameter and flow incidence angle on movement and particle deposition characteristics. Based on the El-Batsh deposition model including particle sticking/rebounding and particle detachment, the investigation links user definition functions with Fluent to predict particle deposition. A comparison of the numerical results with existing experimental data shows that the present numerical model is valid. The research results show that particles with larger particle diameters do not follow air flow easily, thus exhibiting a higher collision rate and lower sticking rate. Particles with smaller particle diameters have the opposite tendency. Particle deposition mainly occurs on the central area of the blade pressure surface. The flow incidence angle has important influence on particle deposition distribution.

Key words: deposition; two phase flow; cascade; particle diameter; numerical analysis

Received: 2013-01-16; **Revised:** 2013-03-24; **Accepted:** 2013-04-15; **Published online:** 2013-04-25 10:12

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20130425.1012.002.html

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51276090); Funding of Jiangsu Innovation Program for Graduate Education (CXLX13_166); Fundamental Research Funds for the Central Universities

* **Corresponding author.** Tel.: 025-84895909 E-mail: zhangjz@nuaa.edu.cn