

颗粒运动学特性对风扇叶片侵蚀规律影响研究

史磊¹, 卢志强², 彭鸿博², 袁堂龙², 姜琪³

(1. 中国民航大学 中欧航空工程师学院, 天津 300300;

2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 3003003;

3. 厦门航空有限公司 飞机维修工程部, 福建 厦门 361009)

摘 要: 以高涵道比涡扇发动机风扇增压级部件为研究对象, 针对中国西北和东南沿海地区飞机在起降时产生的颗粒侵蚀现象进行模拟研究, 采用拉格朗日粒子追踪理论精确抓捕颗粒撞击壁面的位置参数及运动参数。结果发现: 西北地区叶片压力面侵蚀速率远高于沿海地区; 随转速降低, 侵蚀区域扩大并向尾缘延伸, 进入内涵道颗粒数量增加, 进入外涵道颗粒数量减少, 撞击风扇叶片颗粒数量降低, 粒径较大的颗粒数量增加或减少幅度更为明显。当全速工况降低至 80% 转速工况时, 西北地区叶片磨损速率降低约 49.4%, 95% 叶高截面最大侵蚀速率降低约 54.1%, 压力面上颗粒撞击速度下降约 7.5%~24.6%; 沿海地区叶片磨损速率降低约 45.8%, 95% 叶高截面最大侵蚀速率降低约 60.6%, 压力面上颗粒撞击速度下降约 12.5%~22.9%。

关 键 词: 风扇叶片前缘; 压气机转速; 颗粒物工况; 侵蚀磨损; 运动学特性

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Study on influence of particle kinematics on fan blade erosion

Shi Lei¹, Lu Zhiqiang², Peng Hongbo², Yuan Tanglong², Jiang Qi³

(1. Sino-European Institute of Aviation Engineering,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

3. Aircraft Maintenance Engineering Department,

Xiamen Airlines Company, Limited, Xiamen Fujian 361009, China)

Abstract: The fan boost stage components of high bypass ratio turbofan engines were taken as the research object to conduct a simulation study on the particle erosion phenomenon that occurs during aircraft takeoff and landing in the northwest and southeast coastal regions of China. The Lagrangian particle tracking theory was employed to precisely capture the positional parameters and kinematic characteristics of particle-wall collision dynamics. The results showed that the erosion rate on the pressure side of the blade in the northwest region was much higher than that in the coastal region. As the rotational speed decreased, the erosion area expanded and extended towards the trailing edge, the number of particles entering the core passage increased, the number of particles entering the bypass passage and the number of particles impacting the fan blade decreased. The increase or decrease in the number of larger particles was more significant. When the full speed condition was reduced to 80% speed condition, the blade wear rate in the northwest region decreased by approximately 49.4%, the maximum erosion rate at the 95% blade height section decreased by approximately 54.1%, and the particle impact velocity on the pressure side

收稿日期: 2025-01-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费中国民航大学专项(3122024028)

作者简介: 史磊(1988—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为轴流叶轮机械气动热力学。E-mail: lshi@cauc.edu.cn

引用格式: 史磊, 卢志强, 彭鸿博, 等. 颗粒运动学特性对风扇叶片侵蚀规律影响研究[J]. 航空动力学报, 2026, 41(8): 20250025. Shi Lei, Lu Zhiqiang, Peng Hongbo, et al. Study on influence of particle kinematics on fan blade erosion[J]. Journal of Aerospace Power, 2026, 41(8): 20250025.

decreased by approximately 7.5% to 24.6%. In the coastal region, the blade wear rate decreased by approximately 45.8%, the maximum erosion rate at the 95% blade height section decreased by approximately 60.6%, and the particle impact velocity on the pressure side decreased by approximately 12.5% to 22.9%.

Keywords: fan blade leading edge; compressor speed; particulate condition; erosion wear; kinematic characteristic

颗粒物侵蚀磨损是航空发动机不可避免的问题之一。其主要原因是颗粒被吸入发动机现象存在飞机运行的所有阶段,最为严重的是起飞、爬升阶段,该阶段颗粒质量浓度高、发动机转速大,部分颗粒由于其较高惯性而偏离气路流线并影响风扇叶片和增压级的前几级叶片^[1],增加颗粒物对叶片壁面的冲击力度和频率,加剧叶片侵蚀磨损,其中包括叶片表面粗糙度增加、气动性能衰退^[2]。西北和沿海地区由于其独特的气候和地理条件,对风扇叶片的侵蚀影响更为显著。西北地区常遭受风沙侵袭,沙尘颗粒在风力作用下对风扇叶片造成严重侵蚀^[3],尤其在前缘区域,可能导致效率和静压比降低,促使附面层内的层流提前转捩并加剧附面层分离^[4]。沿海地区则因海洋环境影响,空气中颗粒的高盐分对风扇叶片同样造成侵蚀,影响其性能和寿命。

关于颗粒物侵蚀压气机叶片问题的研究最早在国外展开。Finnie^[5-6]和Tabakoff等^[7-9]的侵蚀模型被广泛应用在叶轮机械侵蚀磨损研究。随后,更多学者意识到该问题的重要性,分别在该侵蚀模型基础上优化完善,直至今日,诸多学者仍在此模型基础上进行颗粒物侵蚀研究。

首先是Saxena等^[10]、Suzuki等^[11]利用ANSYS CFX软件分别进行颗粒物侵蚀数值模拟,其结果均表明当颗粒物穿过压缩系统时,随粒径增大,颗粒离心运动趋势越显著,侵蚀区域更集中在压力面和前缘附近。Alqallaf等^[12]同样采用数值模拟发现颗粒物侵蚀现象主要发生在压力面后半部分和吸力面的前缘附近。而Corsini等^[13]通过数值模拟与实验结合进行颗粒物侵蚀研究,发现影响侵蚀过程的因素有颗粒入射角度、叶尖气流速度等。不同压气机模型可能造成的侵蚀规律存在差异,但他们在数值模拟方向最先做出成绩,为后人提供扎实的研究基础。随着仿真技术精准性和可靠性的提升,部分学者分别在前后处理中嵌入源代码,实现颗粒物精确追踪。最新研究中,Ghenaiet^[14-16]通过将内部代码植入CFX的方法进

行数值仿真,通过拉格朗日方法追踪颗粒信息,并实现随机粒子-涡流相互作用模型。研究发现,在MIL-E5007E砂(0~1 000 μm)的最高质量浓度下暴露10 h后,叶片质量减少0.29%,叶尖弦长减少0.45%,叶尖间隙增加0.23%。其研究为叶片、轮毂、机匣预防维护提供一定的参考。

国内关于颗粒物侵蚀磨损问题也开展了很多研究,较早的是孙海鸥等^[17]和Yang等^[18],他们均采用数值模拟软件中的多相流求解方法对轴流压气机进行冲蚀模拟计算,在颗粒物侵蚀磨损研究中为后人奠定了基础。随着研究的进一步深入,Cai等^[19]、徐倩楠等^[20]、杨天南等^[21]从颗粒运动规律及侵蚀特性方面开展数值模拟分析,通过比较不同粒径、质量浓度的颗粒运动轨迹和侵蚀速率验证了颗粒碰撞位置主要集中在压力面上的结论,且粒径和质量浓度变化产生的影响差异较大。以上学者的研究在颗粒物侵蚀磨损领域起到了重要的作用,他们的研究成果在一定程度具有很好的参考价值。但颗粒物侵蚀研究远不止于此,为得到精确的ANSYS CFX中所需侵蚀模型参数,部分学者开始通过实验数据来增加数值模拟的准确性,例如李超和宾光富等^[22-23],他们基于Finnie冲蚀理论推导了颗粒对金属表面的磨损率表达式,发现材料冲蚀磨损率与砂粒冲击速度呈幂函数关系,通过数值模拟与实验相结合的方法研究了全速范围内压气机的侵蚀磨损特性。相较于Finnie侵蚀模型,Tabakoff侵蚀磨损更适用于叶轮机械。因此,Yang等^[24-26]重新推导了Tabakoff侵蚀模型的冲蚀公式,设计一种PIV(particle image velocimetry)冲蚀磨损实验得到 SiO_2 和 Al_2O_3 两种颗粒撞击Ti-6Al-4V合金时在CFX软件中所需要的5个关键参数。此外,他们通过数值模拟研究了多种侵蚀工况,其中包括进口畸变程度对颗粒侵蚀特性的影响、随时间增加颗粒侵蚀特性的变化。目前而言,他们的研究在国内外具有较高的可靠性和准确性。

以上研究中发现,颗粒物侵蚀研究仍停留在

颗粒运动轨迹、侵蚀区域和侵蚀速率等阶段, 虽具有一定的研究价值, 但面对沙尘暴、火山灰等恶劣环境, 尤其在西北和沿海地区等特殊环境, 颗粒物侵蚀问题仍需要更进一步的研究。本文以高涵道比涡扇发动机风扇/增压级叶片为研究对象, 采用数值模拟方法研究气固两相流侵蚀磨损问题, 在已有研究基础上, 对中国西北、东南沿海地区颗粒运动学特性对风扇叶片侵蚀磨损规律进行总结, 通过后处理得到风扇叶片上网格点的颗粒撞击参数, 从颗粒撞击位置、撞击速度等运动参数进行深入的侵蚀问题研究, 为西北、沿海地区飞机起降时转速控制以及叶片设计优化、打磨维护提供精准理论支撑。

1 气固两相流与侵蚀模型

1.1 欧拉-拉格朗日法

欧拉-拉格朗日法是通过不同的方程分别控制离散项和连续相, 连续相介质的运动由经典的 Navier-Stokes 方程控制, 捕捉每一个空间节点上连续相的物理量变化, 而离散项运动则由独立的动量方程控制, 对离散项颗粒在空间中的运动轨迹进行追踪^[21]。另外, 根据 ANSYS CFX 用户指南规定, 当离散相体积分分数较小时, 其方法可以更好的追踪模拟颗粒位置信息及侵蚀效果。因此, 可满足本文对颗粒侵蚀研究的需要。

沙尘颗粒作为稀疏的离散项分布于气流中, 在跟随气流运动的过程中又与气流间存在一定的滑移速度, 其中会受到多种作用力控制, 包括惯性力、自身重力、曳力、Basset 力、Saffman 力等, 通过调研文献 [30-32] 发现, 当颗粒粒径小于 10^{-3} m 时, 以上力中颗粒所受惯性力、曳力(阻力)占主导作用, 其他力均是少量(相差三个数量级), 考虑到计算成本问题, 本文除惯性力、曳力外其他力暂不考虑。因此, ANSYS CFX 软件通过积分颗粒上的力平衡来预测离散项介质运动轨迹, 其方程为:

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

其中

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot \frac{24}{C_d Re_p} \quad (2)$$

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

式中 m_p 为颗粒质量; $\mathbf{u}$ 为流体速度; $\mathbf{u}_p$ 为颗粒速度; t 为时间; ρ 为流体密度; ρ_p 为颗粒密度; $\mathbf{g}_p$ 为颗粒相对加速度; d_p 为颗粒直径; τ_r 是由式 (2) 计算的粒子弛豫时间, C_d 为曳力系数, Re_p 为相对雷诺数, μ 为流体动力黏度; $\mathbf{F}$ 为其他小量力之和, 可忽略不计。

CFX 软件中可选择多种阻力模型, 例如 Schiller-Naumann、Ishii Zuber 和 Grace 等, 其中 Schiller-Naumann 方程适用于体积分分数较小的固体球形离散相。CFX 软件不仅增强 Schiller-Naumann 方程的经验相关性, 同时修正曳力系数 C_d , 具体可表达为:

$$C_d = \max \left(\frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), 0.44 \right) \quad (4)$$

1.2 侵蚀模型选择

砂粒对壁面的侵蚀程度一般用侵蚀速率来衡量, 侵蚀速率定义为壁面材料在单位面积单位时间内损失的质量(单位: $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 在数值计算中, 通过计算每一个颗粒对壁面的累计损伤来计算侵蚀速率 E_f ^[20]。

$$E_f = \frac{1}{A_f} \sum \dot{m}_\pi e_r \quad (5)$$

式中 A_f 为壁面单元面积, $\dot{m}_\pi$ 为冲击壁面颗粒质量流量, e_r 为无量纲冲蚀率。

目前颗粒物侵蚀磨损问题较为成熟, 研究人员优化完善了多种侵蚀模型。其中, Tabakoff 侵蚀模型是 Tabakoff 和 Grant 通过对 Ti-6Al-4V、铝合金进行侵蚀磨损实验而开发的经验和半经验模型。该模型充分考虑了大、小冲击角之间的相互作用, 针对旋转机械模型具有较高的可靠性^[8]。但 Tabakoff 模型中原始公式的常数仅对以英尺为单位的颗粒速度有效, 因此在 CFX 软件中进行了一定的修改, 即:

$$E = f(\theta) \left(\frac{V_p}{V_1} \right)^2 \cos^2 \theta (1 - R_T^2) + g(\theta) \quad (6)$$

其中

$$g(\theta) = \left(\frac{V_p}{V_2} \sin \theta \right)^4 \quad (7)$$

$$f(\theta) = \left[1 + k_2 k_{12} \sin \left(\theta \frac{\pi/2}{\theta_0} \right) \right]^2 \quad (8)$$

$$R_T = 1 - \frac{V_p}{V_3} \sin \theta$$

(9)

$$k_2 = \begin{cases} 1 & \theta \leq 2\theta_0 \\ 0 & \theta > 2\theta_0 \end{cases}$$

(10)

式中 E 为无量纲数(壁面侵蚀质量除以颗粒质量), k_{12} 为无量纲常数, V_1 、 V_2 、 V_3 为 CFX 软件中 Tabakoff 侵蚀模型所需关键参数,具有速度量纲, θ 为颗粒撞击壁面时速度方向与切平面上速度投影线夹角, θ_0 为夹角处于最大侵蚀角度,即颗粒撞击时造成最严重的侵蚀角度, V_p 为颗粒冲击壁面速度。 $g(\theta)$ 、 $f(\theta)$ 是关于 θ 的无量纲函数,计算方式在式(7)、式(8)中给出。

目前国内 Tabakoff 侵蚀模型受到众多学者的认可,其中 Yang 等^[24]搭建 PIV 试验台,选用 Tabakoff 侵蚀模型进行实验,精确计算出 SiO₂ 颗粒冲击 Ti-6Al-4V 壁面时 CFX 软件所需要的关键参数,且验证不同撞击速度条件下该侵蚀模型的准确性和适用性。因此,本研究采用 Tabakoff 侵蚀磨损模型,且所需参数由 Yang 等人试验得到(见表 1)。

表 1 侵蚀模型数据

Table 1 Erosion model data

参数	数值
k_{12}	0.05
$V_1/(\text{m/s})$	1 348.93
$V_2/(\text{m/s})$	644.99
$V_3/(\text{m/s})$	625.00
$\theta_0/(\text{^\circ})$	30.00

2 模型参数与数值验证

2.1 几何模型参数

民航客机在航线运行过程中,被吸入的砂尘颗粒直接撞击在风扇叶片上,因此本文以高涵道比涡扇发动机风扇增压级部件为研究对象。根据航空公司提供模型数据(轮毂线/机匣线、叶片数),结合软件 UG 完成逆向建模,分别在 NUMECA AutoGrid/Turbo 进行网格划分和流场计算,寻找模型峰值效率点,并代入 CFX 软件中进行颗粒物侵蚀研究。其原因是 NUMECA 软件计算效率较高,且与 CFX 软件具有适用性^[33],因此选择 NUMECA 进行流场计算,如表 2 所示为模型部分设计参数。

表 2 模型设计参数

Table 2 Model design parameter

参数	数值
设计转速/(r/min)	5 175
进口质量流量/(kg/s)	260.24
等熵效率	0.89
总温比	1.17
总压比	1.65
叶尖间隙/mm	0.50

模型主要由风扇叶片(fan)、外涵导流叶片(outlet guide vane, OGV)、内涵道增压级前三级以及分流环构成,其中内涵道增压级包括内涵道导流叶片(inlet guide vane, IGV)、第一级动/静叶(记为 rotor_1, R1/stator_1, S1)、第二级动/静叶(记为 rotor_2, R2/stator_2, S2)、第三级动/静叶(记为 rotor_3, R3/stator_3, S3),压力面(pressure side, PS)、吸力面(suction side, SS),其结构示意图及叶片数分别如图 1、表 3 所示。

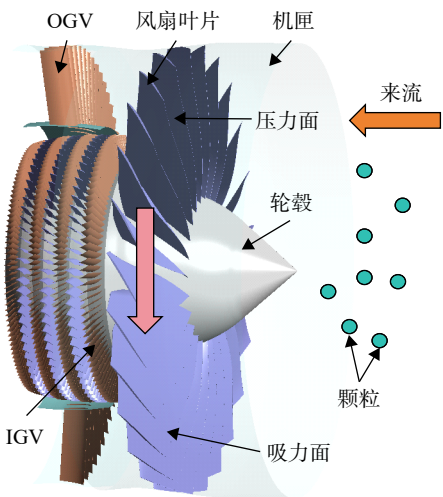


图 1 风扇增压级模型

Fig. 1 Fan booster stage model

表 3 模型叶片数量

Table 3 Number of model blades

叶片	数量
风扇叶片	24
外涵道导流叶片	76
内涵道导流叶片	108
第一级动/静叶	74/136
第二级动/静叶	78/136
第三级动/静叶	74/136

2.2 网格划分与无关性校验

通过 NUMECA 软件 AutoGrid 模块进行单通

道网格划分, 全域采用 O4H 型拓扑结构, 叶片近壁面附近设置为 O 型网格, 其他流体域使用正交 H 型网格。且由于分流环壁面流动的复杂性, 故设置为 C 型拓扑结构进行加密处理, 第一层网格厚度为 0.001 mm, 叶根和叶尖加密处理, 网格划分结果如图 2 所示。

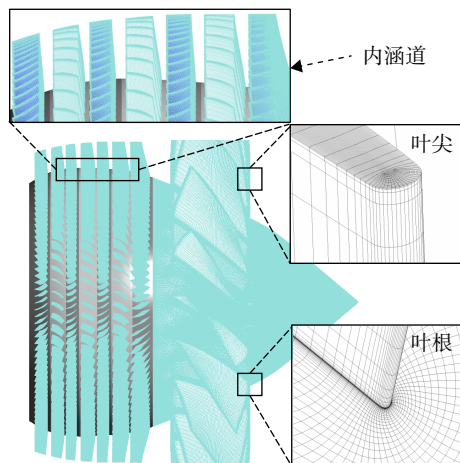


图2 网格图

Fig. 2 Grid diagram

网格尺度是影响数值模拟的关键因素, 目前对该模型网格尺度已开展了部分研究^[3], 因此选择风扇通道 360 万~760 万范围内网格数, 模型其他流体域网格数保持不变, 风扇叶片模型部分每增加 100 万网格进行一次流场计算, 分别提取 5 套模型中风扇叶片的等熵效率、温比与网格数的关系, 发现当网格数达到 660 万时, 其等熵效率及温比数据相对稳定, 误差值不超过 0.5% 满足网格无关性要求, 计算结果如图 3 所示。

本文采用标准壁面函数(standard wall functions)来模拟壁面附近区域的流动。通常情况下,

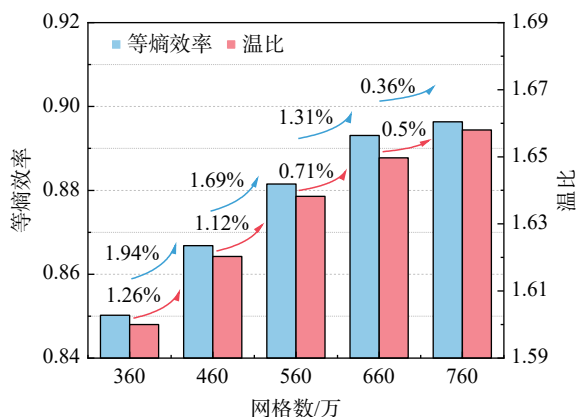
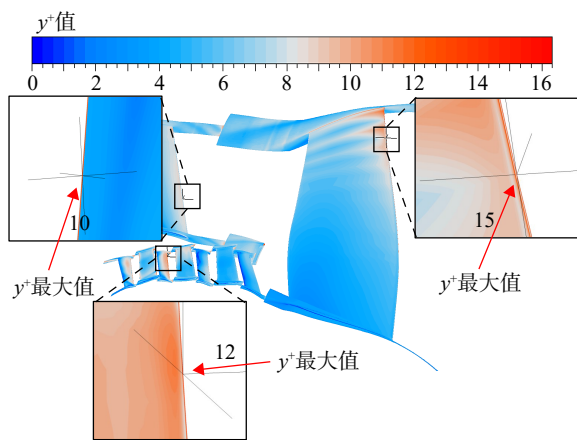


图3 网格数无关性校验

Fig. 3 Grid number independence check

湍流模型 SST(shear stress transport) 的 y^+ 值要求在 1~10 之间^[34]。考虑到本文近壁面流动要求、前缘模型复杂性及计算成本等相关问题, 将 y^+ 值范围设定在 1~20。经计算, 该模型 y^+ 值在 1~15。又参考 Ghenaiet 等^[14] 在 CFX 软件研究颗粒物侵蚀研究时, y^+ 值最大达到 36.5, 且模型大部分区域 y^+ 值在 13.4 附近。本文将风扇叶片、内外涵道 y^+ 最大值分别在图 4 中给出, 大部分区域分布在 8 左右, 仅风扇叶片前缘附近最大值达到 15。综上所述, 本文满足颗粒物侵蚀研究中湍流模型 SST 对 y^+ 值要求, y^+ 值云图如图 4 所示。

图4 y^+ 值云图Fig. 4 y^+ value cloud map

CFX 软件进行颗粒物侵蚀研究时, 需给定颗粒入射点数, 该数值是计算域中具有代表性的颗粒物数目, 并非实际颗粒数目, 两者的等效关系与给定颗粒入射点数、质量流量有关。因此, 须进行入射点数无关性验证。通过网格校验后选择 660 万网格模型, 统一颗粒物变量, 可选择粒径为 125 μm 、质量浓度为 53 mg/m^3 、初始速度为 53.3 m/s 颗粒工况, 其他边界条件均相同。然后选择入射点数为 1 万~3.5 万, 每增加 5 000 个颗粒数计算风扇叶片面积平均侵蚀速率和磨损速率。从图 5 中发现, 当入射点数达到 3 万时, 侵蚀速率基本上趋于稳定, 与 3.5 万相比较, 面积平均侵蚀速率和叶片磨损速率相差小于 0.1%, 误差范围满足无关性校验标准。

2.3 侵蚀工况选择

飞机在航线飞行过程中, 其发动机难免吸入沙尘等颗粒物, 尤其是在起飞、爬升等低空飞行时, 风扇叶片受侵蚀的程度相当明显。目前国内航空发动机通用规范 GJB 241A—2010、GJB 242A—

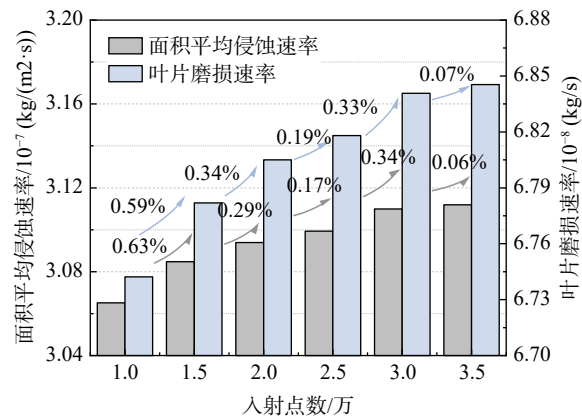


图 5 入射点数无关性校验
Fig. 5 Incident point independence check

2018 要求航空涡喷、涡扇、涡轴发动机在空气含砂尘质量浓度为 53 mg/m^3 的地面环境条件下应能在整个工作范围内满意工作^[35]。参考国标 GJB1171-1991 规定颗粒物的组成及成分占比,且不同地区砂尘粒径也存在差异^[36]。

本文选择占比最多的 SiO_2 颗粒,通过针对性调研发现西北/沿海地区由于其独特的环境侵蚀情况尤为显著,因此通过文献^[37]确定当地粒径范围如表 4 所示,其中西北地区以塔克拉玛干沙漠沙粒种类为代表,沿海地区以厦门沙粒为代表,粒径按大小均匀分布。

表 4 沙粒粒径分布	
Table 4 Sand particle size distribution	
沙粒种类	粒径范围/ μm
美国标准砂	350~700
塔克拉玛干沙粒	150~300
厦门沙粒	300~800
海南沙粒	200~900
腾格里沙漠沙粒	200~500

砂尘质量浓度,即单位体积空气中砂尘颗粒的质量,是影响颗粒侵蚀的重要参数,大气中砂尘质量浓度与地理位置、气候类型以及人类活动有较大关系^[38],参考 GB/T 4797.6—2013 标准给出自然界中常见砂尘质量浓度最大值只有 2 mg/m^3 (工业区)和 17.4 mg/m^3 (沙漠地带)^[39],因此可分别作为本文沿海地区和西北地区颗粒物质量浓度。

在 CFX 软件中选择 Tabakoff 侵蚀模型,气固耦合方式为单向耦合。设置壁面为光滑壁面且无滑移,参考文献^[40]并结合经验给定壁面切向反弹系数为 1,法向反弹系数为 0.95。颗粒物属性

为 SiO_2 ,密度为 $2\,330\text{ kg/m}^3$,注入方式为统一注入、均匀分布,入射点数为 30 000 个。初始速度参考文献^[24],统一设置为 53.3 m/s ,初始温度温度为 288.15 K ,符合近地面颗粒工况,质量流量可通过速度、进口截面、质量浓度关系计算得到。具体参数见表 5。

表 5 侵蚀工况
Table 5 Erosion condition

转速/%	地区	粒径/ μm	质量浓度/(mg/m^3)
100	西北地区	150~300	17.4
	沿海地区	300~800	2
80	西北地区	150~300	17.4
	沿海地区	300~800	2

2.4 计算工况
飞机在近地面时不同阶段低压压气机转速(N1)存在差异,风扇叶片与低压压气机同轴转动,且近地面砂尘质量浓度一般较大^[39],因此可将起飞、爬升阶段作为主要研究工况。以 QAR(quick access recorder)数据中其中一组数据为例,提取 N1 在不同阶段时的转速范围及工作时间,如表 6 所示,可选择 80% 转速与 100% 转速作为研究工况。

表 6 QAR 数据中 N1 参数
Table 6 N1 parameter in QAR data

阶段	时间/s	转速/%
滑出	774	25±5
起飞	30	95±5
起飞航段	8	95±5
爬升	686	92/95/98
巡航	3 360	83±3
下降	2 797	70±10
进近	253	40±10
最终进近	180	50±3
着陆	35	60±10
滑入	420	20±3

通过 NUMECA 软件可实现该模型在不同条件下特性线的高效计算。图 6 为风扇叶片特性曲线,其计算方法为控制内涵背压使风扇叶片处于峰值效率点,改变外涵背压;控制外涵背压使风扇叶片处于峰值效率点,改变内涵背压。本文单通道模型进行全周期设置,湍流模型选用 SST 模型,进出口边界条件为总压进口、静压出口,进口压力给定 $101\,325\text{ Pa}$,进口总温给定 288.15 K ,湍

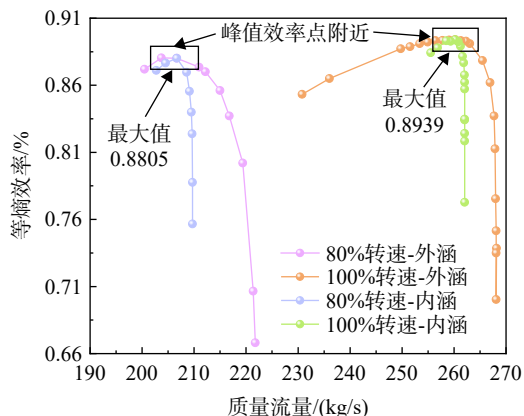


图 6 风扇叶片特性曲线

Fig. 6 Characteristic curve of fan blades

流黏度比给定 5%。转速为 5 175 r/min(100% 转速)工况时,选择内外涵道均处于峰值效率点附近,即外涵背压为 133 000 Pa、内涵背压为 183 000 Pa。转速为 4 140 r/min(80% 转速)工况时,依然选择内外涵道均处于峰值效率点附近,即外涵背压为 113 000 Pa、内涵背压为 150 000 Pa。

3 计算结果分析与讨论

3.1 颗粒轨迹分析

颗粒在侵蚀过程中所受主导力是惯性力和电力,压气机转速是影响通道内气流变化的重要因

素。因此,转速变化对颗粒造成的侵蚀影响不容忽视。本节通过拉格朗日法追踪颗粒位置信息,初步掌握西北/沿海地区飞机在起飞和爬升阶段的颗粒运动轨迹。

如图 7 所示为颗粒轨迹速度云图。图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)、图 7(d) 分别代表西北地区 100% 转速工况、西北地区 80% 转速工况、沿海地区 100% 转速工况、沿海地区 80% 转速工况。首先,对于西北地区,从图(a)、(b)可以发现,转速较大时,颗粒整体运动速度增加,更多颗粒以较大速度撞击在压力面上,进而经过风扇叶片加速后分别冲向内外涵道,部分颗粒撞击在进气锥上反弹进入风扇通道,全速工况时颗粒反弹后加速能力强,反弹高度较小,80% 转速时颗粒反弹高度增加,颗粒加速能力减弱。外涵道中,由于电力的影响,颗粒做减速运动,部分颗粒撞击在外涵道导流叶片和机匣附近,全速工况时颗粒集中撞击趋势明显,撞击速度较大;80% 转速工况时颗粒撞击速度减小。内涵道中,全速工况时,颗粒通过每一级动叶时,加速现象明显,大部分颗粒会产生三次较为明显的碰撞,而后以较大的速度离开内涵道,撞击位置分别在 IGV 叶尖、R2 叶根和 S3 叶尖附近,80% 转速工况时,颗粒加速现象不明显,撞击位置较为分散。

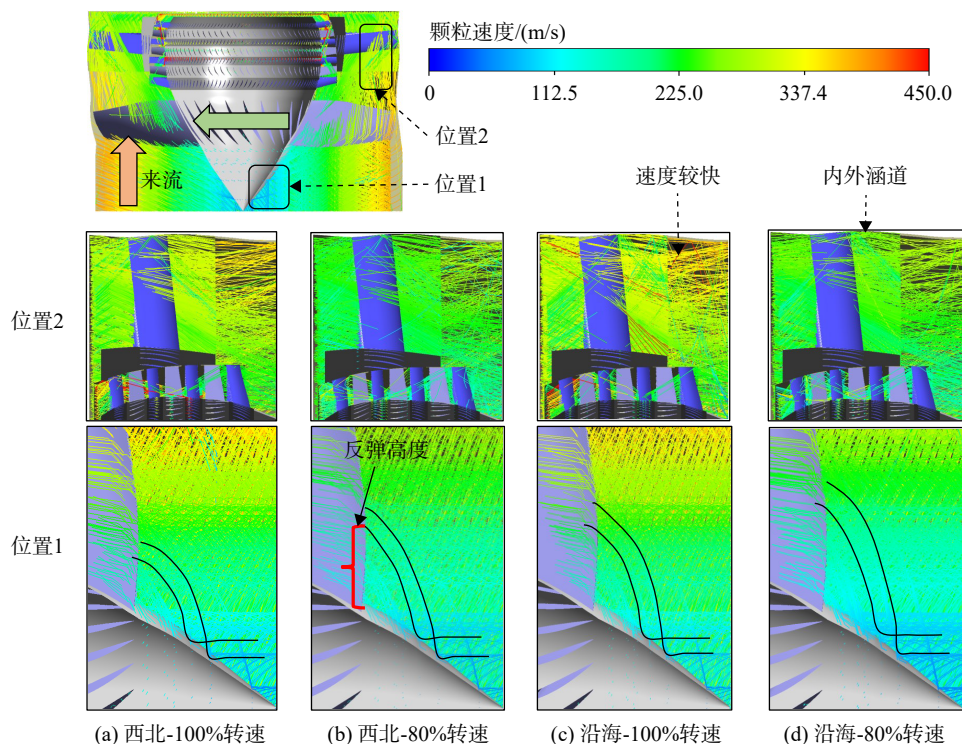


图 7 颗粒轨迹速度云图

Fig. 7 Particle trajectory velocity cloud image

以上现象差异均由转速不同引起,其主要原因是,发动机转速降低,通道内气流速度减小,从而严重影响颗粒的加速度和离心趋势,此外,颗粒撞击壁面后惯性作用会更明显,更容易沿着自身反弹的方向移动,由此会导致颗粒撞击次数增多。

通过观察图(a)和图(c)发现,两地区颗粒在全速运转时,颗粒加速能力相差不大。对于风扇叶片,撞击区域差异不够明显,撞击速度也无明显差别。在外涵道中,沿海地区颗粒撞击外涵道机匣位置相对前移,大部分颗粒减速后流出外涵道,部分颗粒运动紊乱无序,且速度较大。内涵道中发现,沿海地区进入内涵道的颗粒数目相对较少,但颗粒撞击次数并未减少,甚至部分颗粒撞击 4 次。其主要原因是颗粒直径增加,惯性力和曳力增强,而粒径分布范围不一致,导致颗粒之间运动轨迹差异较大,可造成更为复杂的侵蚀规律。

经过上文分析可得出结论,压气机转速降低,可导致颗粒运动速度减小,加速能力减弱,即颗粒跟随性相对减弱。西北地区和沿海地区由于粒径范围的不同,颗粒运动轨迹存在些许差异,但对于整体的碰撞趋势并未有太大区别。

通过对颗粒轨迹的掌握,可以一定程度上加

深对颗粒行为轨迹的预测。而叶片压力面侵蚀云图则是对颗粒轨迹速度云图最直接的结果反馈信息,可实现颗粒对叶片壁面造成侵蚀区域和程度的精准抓捕。

如图 8 所示,提取 4 种工况下风扇叶片压力面及通道内机匣面的侵蚀速率云图。首先对于西北地区,由全速工况图 8(a)变为 80% 转速工况图 8(b)时,压力面上前缘及叶尖附近侵蚀速率降低,但侵蚀区域向尾缘方向延伸,50% 叶高以上尾缘附近少量的侵蚀情况减弱,全速工况时最大侵蚀速率位于叶尖附近,达到 $1.87 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,80% 转速工况时叶尖最大侵蚀速率增加到 $1.89 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,且位置更靠近叶尖。此外观察到,机匣上靠近压力面的一侧,有明显的侵蚀痕迹,并逐渐扩展至外涵道交界面处,随着转速的降低,该划痕相对减弱。其原因是转速降低,导致颗粒运动速度减小,即惯性力相对减弱,且使风扇叶片接触颗粒时间延迟,部分颗粒在轴向上运动距离更远。

对于沿海地区,即图 8(c)和图 8(d),压力面整体上侵蚀区域和侵蚀程度均减小。全速工况时,颗粒撞击区域进一步集中在前缘附近,叶根和机匣面侵蚀几乎不明显,叶尖侵蚀速率最大值为

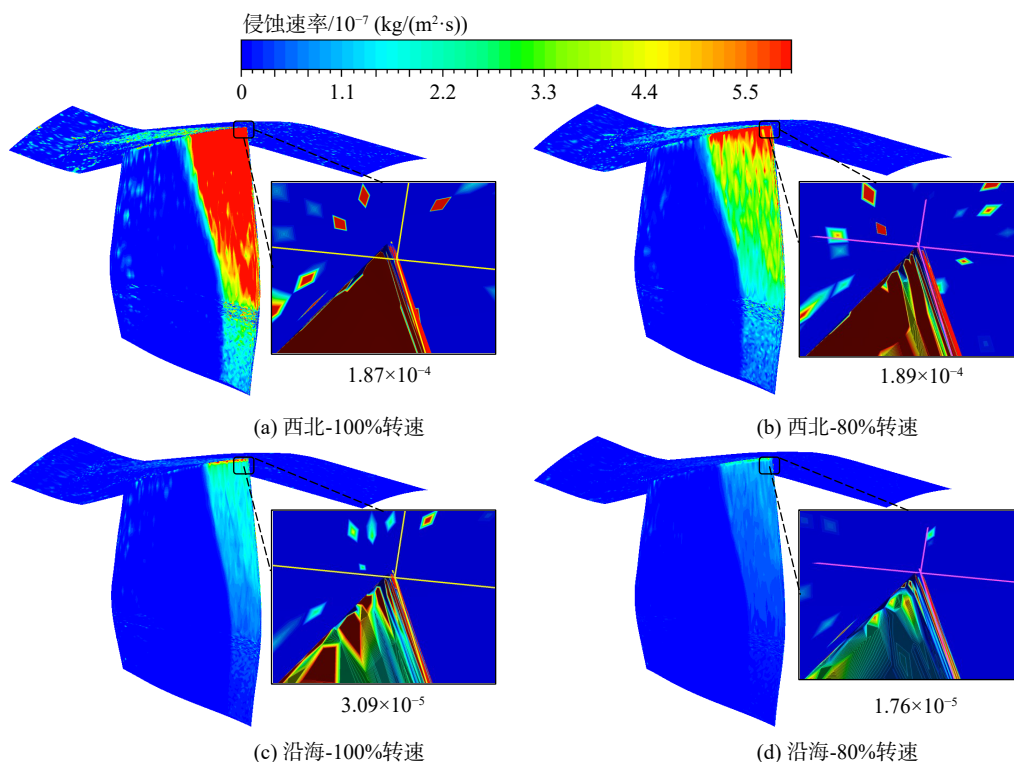


图 8 压力面侵蚀速率云图

Fig. 8 Erosion rate cloud map of pressure surface

$3.09 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。当压气机转速为 80% 时, 侵蚀速率相较于全速时明显减弱, 但侵蚀区域亦向尾缘延伸, 在叶尖侵蚀速率最大值为 $1.76 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。其主要原因是, 沿海地区颗粒质量浓度较低, 粒径范围相对较大, 而质量浓度是影响侵蚀程度的重要因素, 粒径是影响侵蚀规律的重要因素。

综上所述, 西北地区风扇叶片压力面侵蚀速率明显较大, 沿海地区侵蚀区域更集中于前缘附近, 质量浓度影响相较于粒径影响更为明显。当压气机转速降低时, 不论粒径大小, 压力面侵蚀面积均增加, 叶尖最大侵蚀速率点上移。

3.2 颗粒平均体积分数

由 3.1 节分析发现, 侵蚀较为严重的区域位于叶尖附近, 因此提取 95% 叶高截面颗粒平均体积分数云图, 该参数不仅可以有效体现出轴向颗粒轨迹的差异, 更能描述出颗粒质量浓度在轴向上的具体分布。

由于风扇叶片高速旋转形成气流吸力效应, 颗粒会相对于叶片旋转方向产生一定的入射角度并造成侵蚀, 如图 9 所示。图 10 为 95% 叶高截面颗粒平均体积分数, 通过图 10(a)、图 10(b) 对比发现, 80% 转速时颗粒撞击压力面范围较大, 叶片前缘附近及反弹轨迹上颗粒物质量浓度较高。另外发现, 无论哪种工况颗粒撞击前缘后均产生

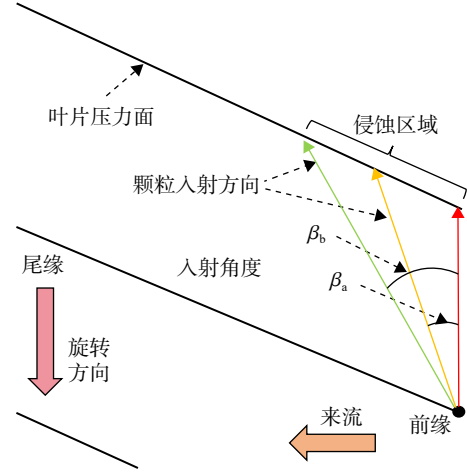


图 9 入射角度示意图

Fig. 9 Schematic diagram of incident angle

分离现象, 部分颗粒直接撞击在压力面上, 另一部分颗粒进入相邻通道并撞击在相邻叶片压力面上, 通过撞击在压力面上范围可以发现, 入射角度 β_b 明显大于 β_a , β_d 大于 β_c 。因此可认为: 压气机转速小, 颗粒入射角度较大, 撞击到叶片压力面上区域延伸至中间位置, 侵蚀区域较大; 压气机转速增大, 颗粒入射角度减小, 撞击在压力面上的区域更加集中在前缘附近。

图 10(c) 和图 10(d) 也遵循以上结论, 不同的是, 沿海地区颗粒物质量浓度低于西北地区, 因此在颗粒平均体积分数云图上颜色较浅, 导致其侵

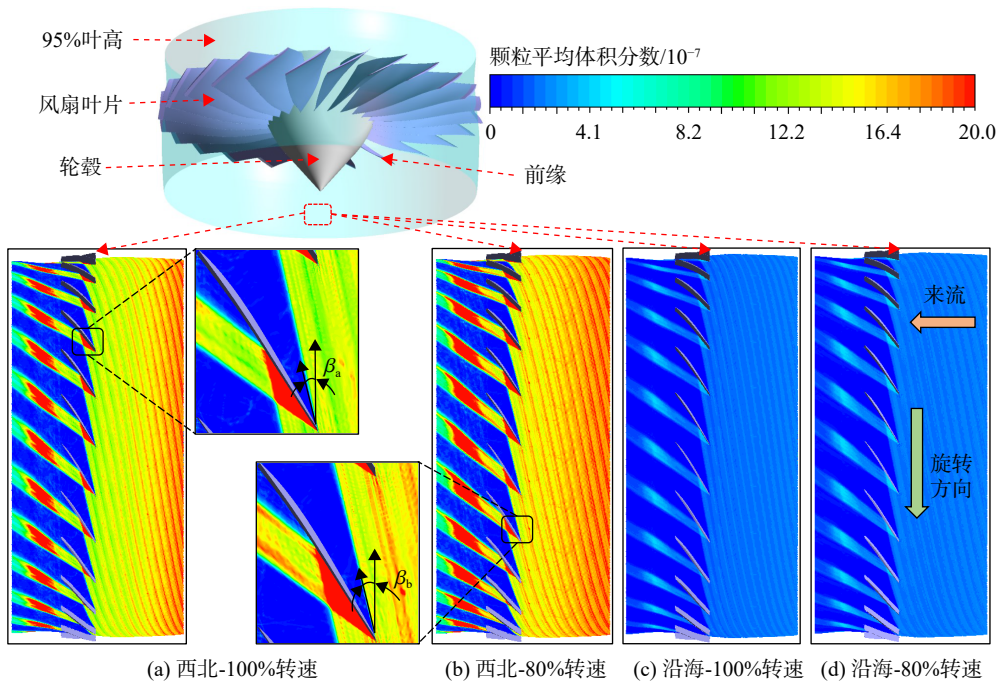


图 10 95% 叶高截面颗粒平均体积分数

Fig. 10 Average volume fraction of particles at 95% span cross section

蚀程度远低于西北地区。另外,结合上述入射角度定义,将图 10(a)和图 10(c)、图 10(b)和图 10(d)分别对比发现, $\beta_c < \beta_a$, $\beta_d < \beta_b$ 。由此可发现,当相同转速时,若颗粒物直径增大,颗粒入射角度亦会减小,导致撞击在压力面上区域集中在前缘附近。

为分析风扇叶片侵蚀位置分布的原因以及通道中颗粒质量浓度沿周向分布情况,在 $Z=0.04$ m 处设置圆形通道平面,监测颗粒平均体积分数云

图(本文模型中轴向为 Z 方向,周向为 X 方向,径向为 Y 方向)。如图 11 所示,可以发现,从叶根到叶尖压力面附近颗粒平均体积分数始终高于吸力面附近,且叶根和叶尖处颗粒物质量浓度均较大。需要注意的是,颗粒平均体积分数与气流速度密切相关,因为不同的气流速度条件下吸入空气量不同。例如,低转速时吸入空气量低于高转速工况条件,此时会导致颗粒平均体积分数显著增大。

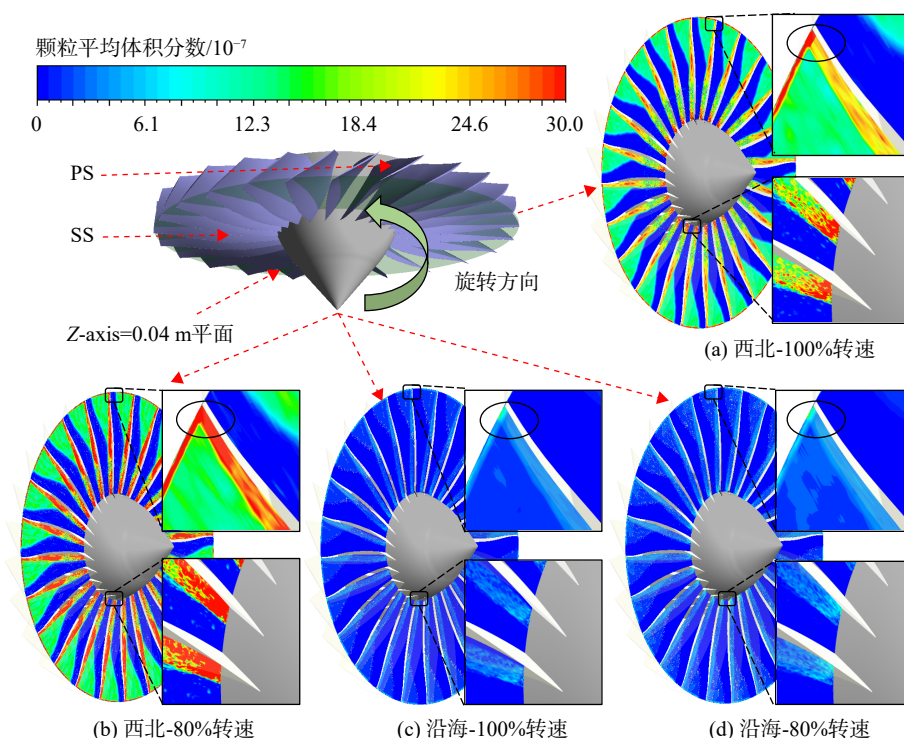


图 11 压力面附近颗粒平均体积分数

Fig. 11 Average volume fraction of particles near the pressure surface

通过图 11(a)、图 11(b)对比发现,当转速从全速降低至 80% 转速时,叶尖高质量浓度区域增大,其原因是压气机转速的降低,导致叶尖间隙的端壁保护作用减弱,更多颗粒在离心作用下进入边界层。另外压力面及叶根附近颗粒物质量浓度明显增加,高质量浓度区域向叶尖延展,其原因是气流速度的减小,引起颗粒吸力效应减弱,更容易停留在通道中。此外进气锥的原因,使得部分颗粒撞击其后反弹高度位于叶根附近,这种现象易引发积垢等问题。

通过对比同转速条件下西北地区 and 沿海地区颗粒平均体积分数分布情况发现,西北地区远高于沿海地区,其原因有颗粒质量浓度是影响颗粒平均体积分数的关键参数,此时由粒径增大产生

的影响显得不明显。

3.3 侵蚀磨损结果分析

通过上文云图分析,得到两地区在不同转速工况下的部分颗粒侵蚀规律,若要精准掌握颗粒物侵蚀规律及原因,需从颗粒运动参数进行深入分析,因此,本节主要从撞击风扇叶片壁面的颗粒滑移速度、叶片磨损速率等多方面进行分析。

为验证上文结论:发动机转速增加,颗粒惯性力作用更加明显,颗粒运动速度更快,提取撞击壁面颗粒的滑移速度,即通过追踪单一颗粒速度与周围气流速度之差,来判断颗粒惯性力变化。如图 12 所示,无论西北地区还是沿海地区全速时颗粒滑移速度更大,整体上明显高于 80% 转速时工况,其主要原因有,转速增加导致气流速度加

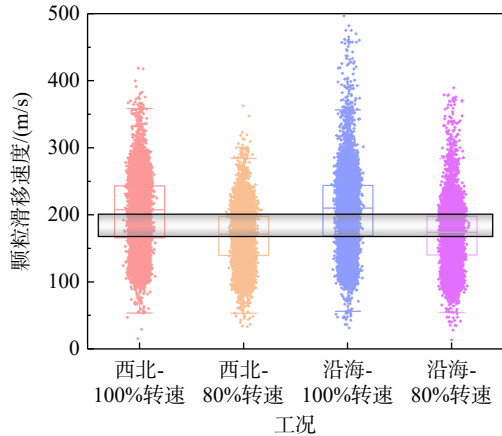


图 12 颗粒滑移速度

Fig. 12 Particle slip velocity

快, 颗粒在气流作用下加速趋势更加明显, 由此可能导致颗粒产生更快的速度。

此外, 根据图 12(a) 和图 12(c)、图 12(b) 和图 12(d) 对比发现, 在同转速时, 沿海地区部分颗粒滑移速度更大, 分布范围更广, 其主要原因有, 沿海地区颗粒直径相对较大, 颗粒迎风面积增加, 在相同气流作用力下, 短时间内加速度较小, 随气流作用时间增加, 颗粒加速度增加幅度较大, 进而导致颗粒滑移速度的增加, 此时颗粒撞击反弹次数增加, 行为轨迹更加复杂。

根据上文分析发现不同工况下颗粒惯性力存在差异, 这将直接影响颗粒运动轨迹和行为方式, 因此可设置监测不同位置(交界面和壁面)颗粒通过数量和撞击数量。如图 13 所示, IGV-interface 代表颗粒通过风扇叶片与内涵道交界面数量, 即颗粒进入内涵道数量; OGV-interface 代表颗粒通过风扇叶片与外涵道交界面数量, 即颗粒进入

外涵道数量; Impact fan 代表颗粒撞击风扇叶片壁面数量; IGV/OGV 代表此工况下通过内涵道颗粒数量与通过外涵道颗粒数量比值。

对于西北地区, 由全速工况降低至 80% 转速工况时, 进入内涵道颗粒数量增加约 4.2%, 进入外涵道数量降低约 0.6%, 撞击风扇叶片壁面数量也降低约 0.1%, 因此造成进入内外涵道颗粒数量占比增加约 2.5%; 对于沿海地区当转速降低 20% 时, 进入内涵道颗粒数量增加约 5.6%, 进入外涵道颗粒数量减少约 1.2%, 撞击叶片颗粒数量降低约 0.8%, 通过内外涵道颗粒数量占比增加约 3.7%。综上所述, 当转速降低时, 进入内涵道颗粒数量增加, 进入外涵道颗粒数量减少, 撞击风扇叶片颗粒数量降低; 而粒径较大的颗粒数量增加或减少幅度更为明显。

此外, 通过对比图 13(a)、图 13(c) 发现, 在全速工况时, 西北地区进入内涵道颗粒数量占比高于沿海地区约 5%, 进入外涵道颗粒数量占比低于沿海地区约 1.1%, 撞击叶片壁面颗粒数量占比亦低于沿海地区 1%; 对比图 13(b)、图 13(d) 发现, 80% 转速工况时, 进入内涵道颗粒数量占比高于沿海地区约 2.7%, 进入外涵道颗粒数量占比高于沿海地区约 0.5%, 撞击叶片壁面数量占比低于沿海地区约 0.3%。综上所述, 大粒径颗粒进入外涵道数量更多, 进入内涵道数量较少, 撞击风扇叶片壁面数量也较多; 当转速下降时, 其变化趋势相同, 变化幅度减小。

通过 CFX 软件后处理可直接得到颗粒对风扇叶片的磨损速率和数量平均侵蚀速率, 通过两组数据可得出不同转速不同地区的侵蚀磨损情况。如图 14 所示, 在全速工况时, 西北地区磨损速率达到 $2.63 \times 10^{-8} \text{ kg/s}$, 相较于沿海地区增加约 $2.29 \times 10^{-8} \text{ kg/s}$, 增加幅度明显。而 80% 转速时, 西北地区磨损速率也达到 $1.33 \times 10^{-8} \text{ kg/s}$, 沿海地区仅有 $1.72 \times 10^{-9} \text{ kg/s}$, 降低了约 87%。对于西北地区, 转速降低 20%, 叶片磨损速率降低约 49.4%; 对于沿海地区, 转速降低 20%, 叶片磨损速率降低约 45.8%, 两地降低幅值均较大。由于不同工况造成颗粒撞击壁面的数量存在差异, 因此, 对比数量平均侵蚀速率可有效解释叶片磨损速率的变化情况。由图 14 中发现, 在全速工况时, 西北地区, 数量平均侵蚀速率达到 $1.31 \times 10^{-7} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$, 高于沿海地区约 $1.15 \times 10^{-7} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$; 在 80% 转速时, 同样西北地区高于沿海地区约 $5.71 \times 10^{-8} \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{s)}$ 。

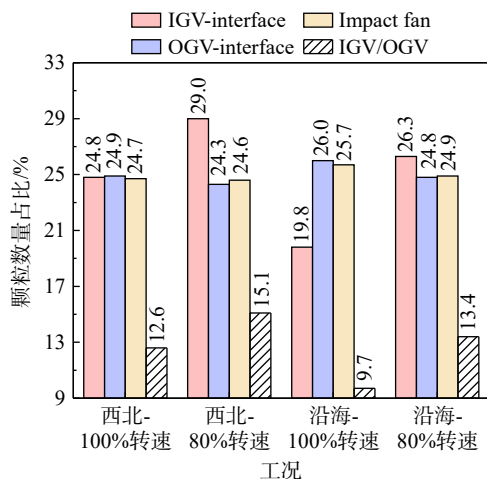


图 13 颗粒数量占比

Fig. 13 Proportion of the number of particles

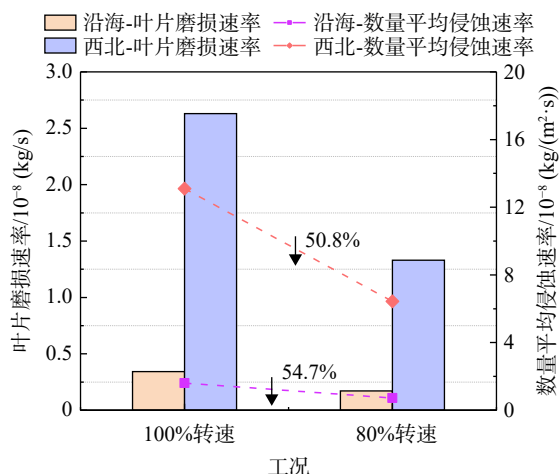


图 14 叶片磨损速率

Fig. 14 Blade wear rate

通过以上数据分析可以得到结论: 西北地区相较于沿海地区其叶片磨损速率明显较大, 甚至在 10 倍以上; 而当压气机转速降低 20% 时, 叶片磨损速率可下降 45% 以上, 西北地区下降更多, 因此可说明转速越大, 造成叶片侵蚀磨损速率越快。

为充分掌握颗粒侵蚀沿叶高变化规律, 提取叶片 10%~99% 叶高截面网格点平均侵蚀速率, 通过对侵蚀数据均化处理可避免某些特殊因素造成的误差。如图 15 所示, 由于叶根与叶尖侵蚀速率相差量级在 10^{-3} 以上, 为具体展示叶根处的平均侵蚀速率, 纵坐标面积平均侵蚀速率采用对数坐标, 横坐标为叶高。

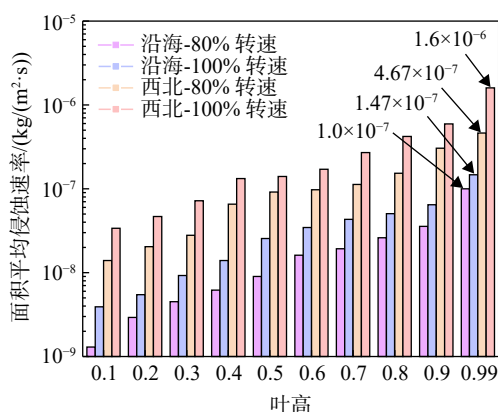


图 15 沿叶高面积平均侵蚀速率变化

Fig. 15 Area-averaged erosion rate changes along leaf height

由图 15 中发现, 4 种工况时均随叶高的增加面积平均侵蚀速率也增加。其中, 西北地区在全速和 80% 转速工况时的不同叶高截面平均侵蚀速率均远高于沿海地区。首先对于西北地区, 在全速工况 10% 叶高处面积平均侵蚀速率仅有

$3.38 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而 80% 转速时为 $1.39 \times 10^{-8} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 降低约 58.9%; 在全速工况 99% 叶高时面积平均侵蚀速率达到最大值 $1.6 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 80% 转速时 99% 叶高也达到最大值 $4.67 \times 10^{-7} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 相较于全速工况降低 70.8%。对于沿海地区, 转速降低 20% 时的变化规律与西北地区基本相似, 在 10% 叶高处, 80% 转速相较于全速工况叶片面积平均侵蚀速率降低约 64.5%, 在 99% 叶高处, 降低约 32%。因此可以发现, 当转速下降 20% 时, 叶根处面积平均侵蚀速率沿海地区下降幅度大, 且随叶高的增加下降幅度逐渐减小; 叶尖处面积平均侵蚀速率西北地区下降幅度较大, 且在叶尖下降幅度达到最大值。

从上文发现, 随叶高增加平均侵蚀速率明显加快, 叶尖附近侵蚀速率较大。为进一步了解其侵蚀规律, 提取 95% 叶高截面从前缘到尾缘方向的约前 57% 弦长, 其原因是后 43% 弦长侵蚀速率较小, 甚至未有明显侵蚀。如图 16 所示, 同样纵坐标侵蚀速率采用对数坐标, 横坐标为压气机轴向风扇叶片前缘至尾缘的坐标数据, 即为压力面侵蚀区域范围。4 种工况侵蚀速率最快的点均在前缘附近。对于西北地区, 全速工况时前缘附近最大达到 $2.15 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而 80% 转速时也有 $9.88 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 全速工况时压力面整体侵蚀速率明显较高, 但侵蚀区域相对较少, 更集中向前缘方向; 对于沿海地区, 80% 转速工况相较于全速工况时前缘附近最大侵蚀速率下降约 60.6%, 侵蚀区域的变化与西北地区有相似之处。因此可以得出结论: 风扇叶片前缘附近最大侵蚀速率随转速的增加而增加, 压力面上侵蚀区域随转速的增加而集中向前缘方向缩减。

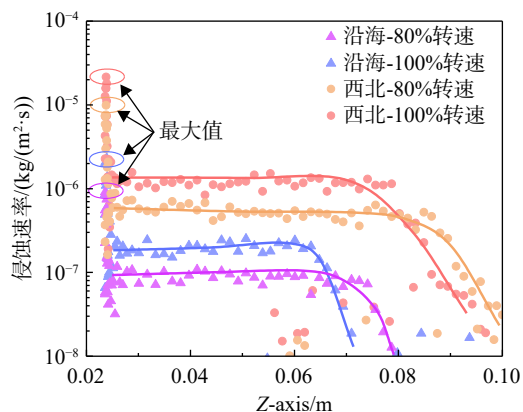


图 16 95% 叶高截面侵蚀速率

Fig. 16 Erosion rate of 95% span cross section

产生以上现象的原因包括但不限于转速影响气流变化、粒径影响惯性力变化,此规律与叶片磨损速率变化存在相似特征,可进一步研究。

为详细了解叶尖附近前缘侵蚀情况,如图 17 所示,提取 $X=0.68\text{ m}$ 高度(约为 95% 叶高)前缘附近部分网格节点(1 mm 约为 0.4% 弦长)侵蚀数据。

如图 18 所示,提取前缘 0.4% 弦长范围内吸力面和压力面网格侵蚀数据,网格点数为 31 个,

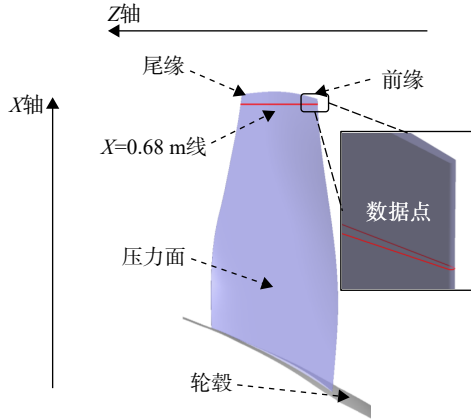


图 17 数据点示意图

Fig. 17 Schematic diagram of data points

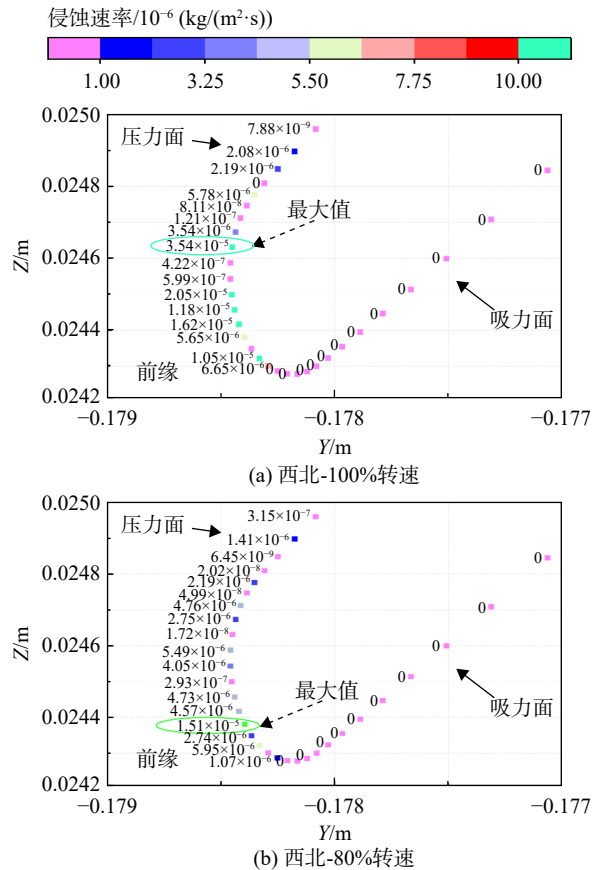


图 18 西北地区前缘网格点侵蚀数据

Fig. 18 Erosion data of northwest region at front grid point

横纵坐标分别为模型所在坐标系的坐标值,叶片弯扭掠的存在导致 X 轴截面下前缘并非椭圆形状,但能够代表前缘附近侵蚀变化规律,图中云图代表监测到的网格点侵蚀速率。由图 18(a)、图 18(b)说明,侵蚀现象发生在压力面上,吸力面基本上无侵蚀情况,侵蚀较为严重的点分布在前缘附近。对于西北地区,在全速工况时最大侵蚀速率约为 $3.1 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,超过 $1 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的网格点数有 5 个。80% 转速工况时,最大侵蚀速率约为 $1.51 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,且仅有 1 个网格点在 $1 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之上。此外,通过侵蚀速率点在网格位置上的分布可以发现,当全速降低至 80% 转速时,最大侵蚀点更接近前缘附近,且侵蚀范围略有增大,并向吸力面方向延展。

如图 19 所示为沿海地区在全速和 80% 转速工况条件下前缘附近网格点侵蚀情况,在全速工况时,最大侵蚀速率约为 $5.24 \times 10^{-6} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,约为 80% 转速时的 5.3 倍。不同于西北地区的是,当转速下降至 80% 转速时,前缘附近最大侵蚀点有向压力面移动的趋势。

通过对上述问题的分析可以得出结论:当压

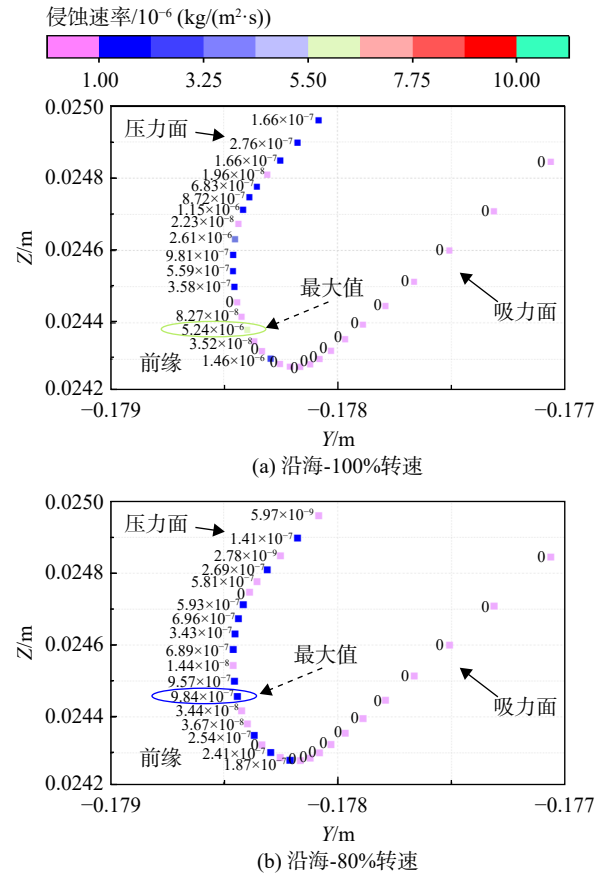


图 19 沿海地区前缘网格点侵蚀数据

Fig. 19 Erosion data of coastal region at front grid point

气机转速由全速状态降低至 80% 转速时,对于西北地区, $X=0.68\text{ m}$ 高度截面前缘附近最大侵蚀速率降低 51.3%,位置向前缘移动,前缘的侵蚀范围向吸力面方向延展;对于沿海地区,前缘附近最大侵蚀速率降低 81.2%,下降趋势尤为明显,最大侵蚀点位置向压力面方向移动,前缘附近侵蚀范围无明显变化。

3.4 颗粒运动参数

导致颗粒撞击壁面时侵蚀磨损存在差异的原因是复杂的,但据目前已有研究发现,颗粒撞击壁面时的角度和撞击速度对壁面产生的侵蚀影响较为显著^[4],本文上述已对壁面侵蚀情况进行分析,为进一步探究颗粒撞击壁面的角度、速度与侵蚀磨损之间的关系,在 CFX 前处理中分别监测颗粒撞击壁面的位置、速度矢量和弧度制角度,

将得到的三维坐标离散点与处理过的撞击速度、角度数据分别对应,即可得到每个网格点的数据。

如图 20 所示,可以看到颗粒撞击壁面的位置和所在位置撞击角度云图,撞击区域与压力面侵蚀云图相似。对于西北地区全速和 80% 转速工况时,颗粒撞击位置均集中在压力面前缘附近,叶尖尾缘产生侵蚀。从叶尖至叶根压力面上撞击角度呈增大趋势;将叶尖、叶中和叶根进行局部放大发现,撞击角度最大的位置几乎均分布在前缘附近。从全速工况降低至 80% 转速时,压力面上撞击的位置向尾缘延伸,60% 叶高附近颗粒撞击壁面角度减小明显,通过标记 95%、60% 和 10% 叶高前缘附近最大撞击角度发现,95% 和 60% 叶高前缘附近最大撞击角度相对减小约 $5^\circ\sim 15^\circ$,10% 叶高前缘附近最大撞击角度相对增加。

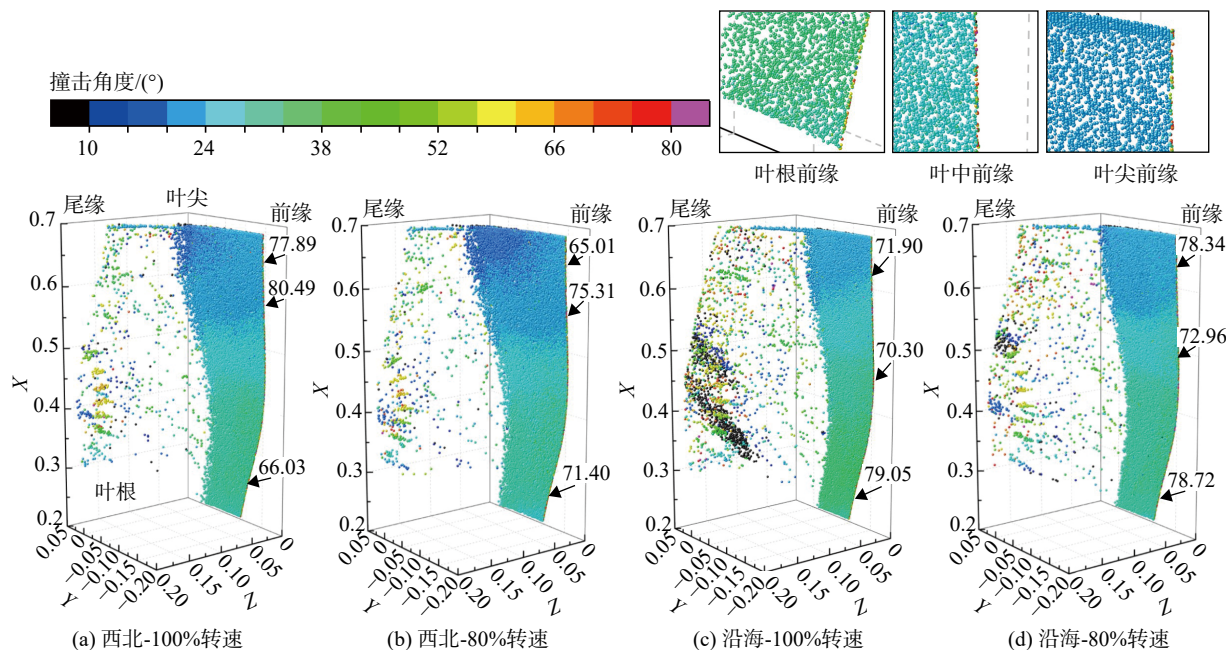


图 20 叶片壁面撞击位置及角度分布

Fig. 20 Impact position and angle distribution of blade wall

沿海地区与西北地区相似的是,撞击位置集中在压力面前缘附近,随叶高的降低撞击角度呈增大趋势。从全速降低至 80% 转速时,压力面侵蚀位置向尾缘延伸。此外,尾缘颗粒撞击壁面数量明显减少,在全速工况时存在的一条从叶根斜向上至 50% 叶高尾缘的撞击集中区域也相对分散。通过提取不同叶高前缘附近最大侵蚀角度发现,随着转速的降低,在 95% 叶高前缘附近,最大撞击角度相对增加,60% 叶高前缘附近相差不大,10% 叶高附近,最大撞击角度减小明显。

通过对比图 20(a)和图 20(c)发现,全速工况时,沿海地区在 50% 叶高尾缘附近出现一条带状撞击区域,部分颗粒撞击角度在 10° 以下;95% 叶高和 60% 叶高前缘附近沿海地区最大撞击角度低于西北地区 $5^\circ\sim 10^\circ$,10% 叶高最大撞击角度高于西北地区约 14° 。在 80% 转速工况时,整体上变化趋势与全速工况时相似,但沿海地区压力面上尾缘附近带状区域不再明显。

由图 20 可见,对于西北地区,从全速降低至 80% 转速时,压力面上 50% 叶高以上撞击角度减

小, 前缘附近最大撞击角度减小尤为明显, 叶根处最大撞击角度相对增加, 撞击位置向尾缘延伸。对于沿海地区, 从全速降低至 80% 转速时, 叶尖附近最大撞击角度增加, 叶中变化不大, 叶根附近最大撞击角度减小。

如图 21 所示, 提取风扇叶片上颗粒撞击壁面

时速度参数, 与角度参数相比, 撞击位置相同。西北地区全速工况时叶尖速度较快, 几乎达到 400 m/s, 而 80% 转速时叶尖仅有约为 300 m/s, 叶根为 147 m/s。随叶高降低, 颗粒撞击壁面速度均呈下降趋势, 80% 转速时颗粒速度整体下降明显。由图 22 可以发现, 颗粒速度变化趋势与西北地区

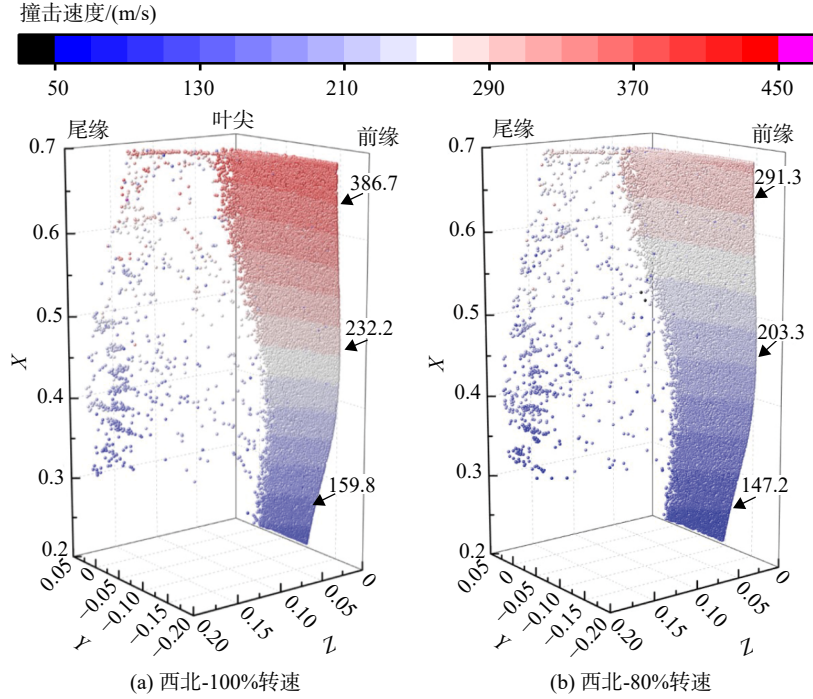


图 21 西北地区叶片壁面撞击速度分布

Fig. 21 Impact velocity distribution on blade wall of northwestern region

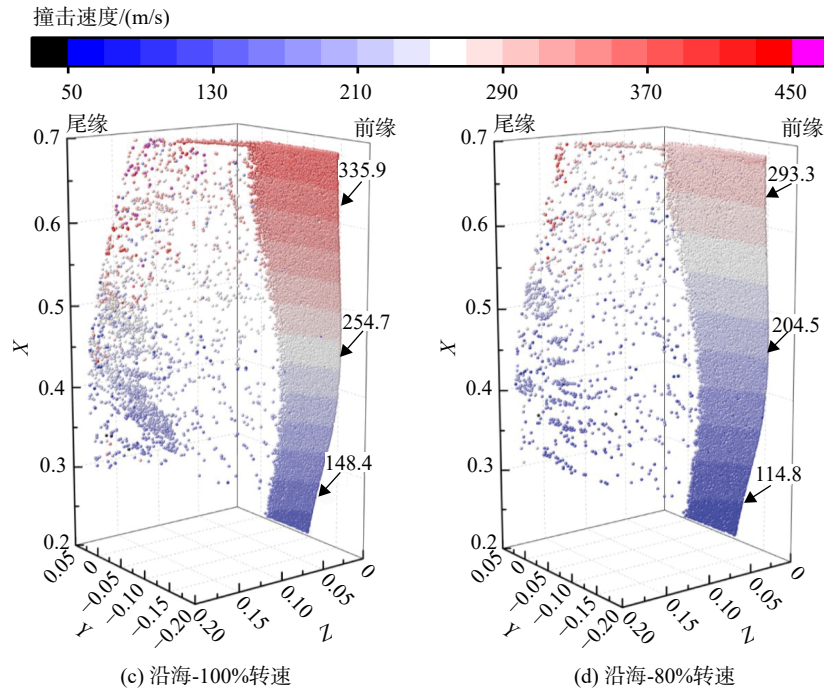


图 22 沿海地区叶片壁面撞击速度分布

Fig. 22 Impact velocity distribution on blade wall of coastal region

相似,相较于西北地区同转速工况时,全速工况时,50%叶高附近沿海地区颗粒撞击速度高于西北地区,叶尖尾缘附近部分颗粒速度在 450 m/s 以上;80%转速工况时,90%叶高附近沿海地区颗粒撞击速度与西北地区持平,而 10%叶高附近却远小于西北地区。

综上所述,随叶高降低,颗粒撞击速度减小明显;随转速降低,颗粒撞击壁面速度也明显减弱,且随叶高降低,减小的幅度逐渐拉近;粒径增加时,叶根、叶尖颗粒撞击速度均减小,叶中颗粒撞击速度增大。因此可以认为,转速以及粒径变化,对颗粒撞击速度的影响均较为严重。

4 结 论

本文针对中国西北、东南沿海地区飞机起降时可能遇到的颗粒物工况进行侵蚀磨损数值模拟,基于拉格朗日粒子追踪理论实现对颗粒撞击壁面参数的精确抓捕,从粒径、质量浓度分布方面还原两个典型地区航空发动机叶片工作时的沙尘环境,通过分析风扇叶片的侵蚀规律变化以及颗粒运动学对叶片侵蚀作用的影响,得到以下结论:

1) 西北地区压力面侵蚀速率远高于沿海地区。随转速降低,压力面侵蚀区域增大并延伸至尾缘,颗粒入射角度亦随之增大,通道内颗粒平均体积分数有所增加,叶尖及前缘附近增加趋势显著。

2) 当全速降低至 80% 转速时,西北地区内涵道颗粒数量增加约 4.2%,外涵道数量降低约 0.6%,撞击风扇叶片壁面数量降低约 0.1%,叶片磨损速率降低约 49.4%, $X=0.68$ m 高度截面前缘附近最大侵蚀速率降低 51.3%,位置朝前缘移动,且前缘的侵蚀范围也向吸力面方向延展;沿海地区内涵道颗粒数量增加约 5.6%,外涵道颗粒数量减少约 1.2%,撞击叶片颗粒数量减少约 0.8%,叶片磨损速率减少约 45.8%,前缘附近最大侵蚀速率降低 81.2%,最大侵蚀点位置向压力面方向移动,前缘附近侵蚀范围无明显变化。

3) 颗粒撞击风扇叶片压力面角度随叶高的增加而降低,速度随叶高的增加而增加。当转速降低 20% 时,西北地区在 95% 叶高前缘附近最大撞击角度增加约 12° ,60% 叶高前缘附近减小约 5° ,压力面上大部分颗粒撞击速度下降约 7.5%~24.6%;沿海地区 95% 叶高前缘附近最大撞击角度增加约 8° ,60% 叶高前缘附近相差不大,压力

面上大部分颗粒撞击速度下降约 12.5%~22.9%。

参考文献:

- [1] Chirayath E, Xu Haosen, Yang Xiang, et al. Full stage axial compressor performance modeling incorporating the effects of blade damage due to particle ingestion[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2023, 145(9): 091001.
- [2] 史磊, 杨光, 林文俊. 前缘侵蚀对风扇转子叶片气动特性的影响机理[J]. *航空学报*, 2019, 40(10): 100-110.
Shi Lei, Yang Guang, Lin Wenjun. Influence mechanism of leading-edge erosion on aerodynamic performance of fan rotor blade[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(10): 100-110. (in Chinese)
- [3] Shi Lei, Guo Shuhan, Yu Peng, et al. A review on leading-edge erosion morphology and performance degradation of aero-engine fan and compressor blades[J]. *Energies*, 2023, 16(7): 3068.
- [4] 史磊, 林文俊, 于满, 等. 风扇转子叶型侵蚀前缘再造型优化设计[J]. *航空发动机*, 2023, 49(4): 95-103.
Shi Lei, Lin Wenjun, Yu Man, et al. Design optimization of re-modeling fan rotor blade airfoil with leading-edge erosion[J]. *Aero-engine*, 2023, 49(4): 95-103. (in Chinese)
- [5] Finnie I. Erosion of surfaces by solid particles[J]. *Wear*, 1960, 3(2): 87-103.
- [6] Finnie I. Some reflections on the past and future of erosion[J]. *Wear*, 1995, 186/187: 0043164895071881.
- [7] Grant G, Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles[J]. *Journal of Aircraft*, 1975, 12(5): 471-478.
- [8] Tabakoff W, Kotwal R, Hamed A. Erosion study of different materials affected by coal ash particles[J]. *Wear*, 1979, 52(1): 161-173.
- [9] Tabakoff W, Lakshminarasimha A N, Pasin M. Simulation of compressor performance deterioration due to erosion[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1990, 112(1): 78-83.
- [10] Saxena S, Jothiprasad G, Bourassa C, et al. Numerical simulation of particulates in multistage axial compressors[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2017, 139(3): 031013.
- [11] Suzuki M, Inaba K, Yamamoto M. Numerical simulation of sand erosion phenomena in rotor/stator interaction of compressor[J]. *Journal of Thermal Science*, 2008, 17(2): 125-133.
- [12] Alqallaf J, Teixeira J A. Numerical study of effects of solid particle erosion on compressor and engine performance[J]. *Results in Engineering*, 2022, 15: 100462.
- [13] Corsini A, Marchegiani A, Rispoli F, et al. Predicting blade leading edge erosion in an axial induced draft fan[R]. ASME GT2011-45719, 2011.
- [14] Ghenaiet A. Predicting dust erosion in a counter-rotating fan[R]. London, UK: ASME Turbo Expo 2024: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2024.
- [15] Ghenaiet A. Modeling and simulation of sand particle trajectories and erosion in a transonic fan stage[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2025, 147(7): 071012.
- [16] Ghenaiet A. Simulation of particle-laden flows and erosion in an axial fan stage considering the relative position of the blades[J]. *The Aeronautical Journal*, 2024, 128(1325): 1379-1416.
- [17] 孙海鸥, 王萌, 王忠义, 等. 轴流压气机气固两相流及磨损特性数值模拟[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(2): 310-316.
Sun Haiou, Wang Meng, Wang Zhongyi, et al. Numerical research on two-phase flow and erosion characteristic of axial compressor[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(2): 310-316. (in Chinese)

- [18] Yang Hong, Boulanger J. The whole annulus computations of particulate flow and erosion in an axial fan[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135: 011040.
- [19] Cai L X, He Y, Hou Y F, et al. Research on particle motion and erosion characteristics in the blade passage of multistage axial compressors[R]. Rotterdam, Netherlands: ASME Turbo Expo 2022: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2022.
- [20] 徐倩楠, 胡峰, 肖友洪, 等. 航空发动机进气及叶栅通道内砂粒动力学特性分析[J]. *航空动力学报*, 2021, 36(8): 1776-1782.
- Xu Qiannan, Hu Feng, Xiao Youhong, et al. Analysis of dynamic characteristics of sand particles in air intake and compressor cascade of aero-engine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(8): 1776-1782. (in Chinese)
- [21] 杨天南, 张轲, 郑培英, 等. 砂尘对压气机叶片的侵蚀及性能影响[J]. *航空发动机*, 2023, 49(5): 57-63.
- Yang Tiannan, Zhang Ke, Zheng Peiying, et al. Analysis of effect on sand ingestion on blade erosion and performance of compressor [J]. *Aeroengine*, 2023, 49(5): 57-63. (in Chinese)
- [22] 李超, 宾光富, 李坚, 等. 砂粒粒径对航空涡轴发动机压气机叶片冲蚀磨损的影响研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(19): 180-190.
- Li Chao, Bin Guangfu, Li Jian, et al. Influence of sand particle size on the erosive wear of compressor blade in an aero-turboshaft engine[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(19): 180-190. (in Chinese)
- [23] Li Chao, Bin Guangfu, Li Jian, et al. Erosion wear characteristics of the aero-compressor blades in full speed range[J]. *Powder Technology*, 2023, 418: 118227.
- [24] Yang Pingping, Yue Wenhui, Chen Anhua, et al. Influence of SiO_2 and Al_2O_3 particles on erosion wear of aero-compressor blades[J]. *Wear*, 2023, 530/531: 204992.
- [25] Yang Pingping, Li Chao, Yue Wenhui, et al. Study on erosion wear characteristics of aero-compressor blades considering distortion degree[J]. *Tribology International*, 2023, 189: 108895.
- [26] Yang Pingping, Li Chao, Bin Guangfu, et al. Effect of particle impact on spatial and temporal erosion characteristics of turboshaft engine compressor[J]. *Wear*, 2024, 558/559: 205578.
- [27] 史磊, 郭姝含, 马鹏宇, 等. 风扇超声型叶侵蚀前缘多目标优化修型[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(6): 20230801.
- Shi Lei, Guo Shuhan, Ma Pengyu, et al. Multi-objective optimization remodeling of eroded leading edge of supersonic fan blade[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(6): 20230801. (in Chinese)
- [28] 彭鸿博, 薛渤韦, 史磊, 等. 跨音速风扇转子叶片前缘再造型优化设计[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(23): 10301-10309.
- Peng Hongbo, Xue Bowei, Shi Lei, et al. Re-modeling optimization design of leading edge of titanium alloy fan blade[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(23): 10301-10309. (in Chinese)
- [29] 卢志强, 史磊, 彭鸿博, 等. 不同前缘形貌对风扇转子叶片颗粒物的冲蚀磨损[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(22): 9654-9663.
- Lu Zhiqiang, Shi Lei, Peng Hongbo, et al. Particulate erosion wear of fan rotor blades with different leading edge morphology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(22): 9654-9663. (in Chinese)
- [30] 李青, 涂国华, 李婷婷, 等. 高焓流动中的可压缩颗粒求解器(第1部分): 考虑多物理效应的点力颗粒两相流理论方案[J]. *空气动力学学报*, 2023, 41(8): 71-86.
- Li Qing, Tu Guohua, Li Tingting, et al. Particle solver in compressible high enthalpy flow(Part 1): the theoretical equations of point particle laden flow[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2023, 41(8): 71-86. (in Chinese)
- [31] 赵传鹏, 刘松, 谭晓茗, 等. 气膜冷却射流对叶片微细颗粒沉积影响[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(3): 545-554.
- Zhao Chuanpeng, Liu Song, Tan Xiaoming, et al. Effect of film cooling jet on deposition of micro particles on blades[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(3): 545-554. (in Chinese)
- [32] 马立坤, 徐路浙, 杨鹏年, 等. 高速气固两相横向射流数值模拟进展[J]. *航空动力学报*, 2025, 40(4): 20240512.
- Ma Likun, Xu Luxi, Yang Pengnian, et al. Progress in numerical simulation of gas-solid two-phase jet in high-speed crossflow[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2025, 40(4): 20240512. (in Chinese)
- [33] 史磊, 卢志强, 张雪洋, 等. 钝化前缘修型对风扇叶片侵蚀磨损特性影响研究[J/OL]. *机械科学与技术*, 2025-03-11. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240172>.
- Shi Lei, Lu Zhiqiang, Zhang Xueyang, et al. Study on the effect of leading edge blunting and shaping on erosion wear characteristics of fan blades[J/OL]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2025-03-11. <https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20240172>. (in Chinese)
- [34] Menter F R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective[J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, 23(4): 305-316.
- [35] 于宏军. 《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范指南》分析[J]. *航空标准化与质量*, 2006(4): 20-24.
- Yu Hongjun. Analysis of “guide to general specification of aero-turbojet turbofan turboprop engine”[J]. *Aeronautics Standardization & Quality*, 2006(4): 20-24. (in Chinese)
- [36] 吕继淮. 军用直升机与沙尘环境: 介绍国军标《军用直升机防沙尘要求》[R]. 深圳: 第七届全国直升机年会, 2024.
- [37] 曾林, 程礼, 李宁, 等. 航空发动机吞砂试验标准砂与典型沙粒形貌对比分析[J]. *航空发动机*, 2019, 45(1): 97-102.
- Zeng Lin, Cheng Li, Li Ning, et al. Comparison and analysis of morphology of standard sand and typical sand particle in aero-engine sand swallowing test[J]. *Aeroengine*, 2019, 45(1): 97-102. (in Chinese)
- [38] 孙见忠, 刘信超, 刘若晨, 等. 基于 IDMS 的航空发动机沙尘吸入物定量监测[J]. *航空学报*, 2017, 38(8): 177-187.
- Sun Jianzhong, Liu Xinchao, Liu Ruochen, et al. IDMS based method for quantitative monitoring of aero-engine ingested airborne sands[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(8): 177-187. (in Chinese)
- [39] 中国国家标准化管理委员会. 环境条件分类 自然环境条件 尘、沙、盐雾: GB/T 4797.2013-95[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 3-4.
- [40] 孙见忠, 姜衡, 陈颖达. 航空发动机沙尘吸入物静电监测仿真实验[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(12): 2913-2923.
- Sun Jianzhong, Jiang Heng, Chen Yingda. Aero engine sand dust ingestion electrostatic monitoring simulation experiment[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(12): 2913-2923. (in Chinese)
- [41] Guo Chuanliang, Chen Shaowen, Chen Shuaitong, et al. Investigation of particle deposition and erosion characteristics of axial compressor blades[R]. London, UK: ASME Turbo Expo 2024: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2024.

(编辑: 秦理曼)