

风力机翼型磨损形貌下的气动特性数值研究

李德顺^{1,2}, 夏伟卿¹, 强仕林³, 杜嘉玮¹, 东 海¹, 尹航帅¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省风力发电工程技术创新中心, 兰州 730050;

3. 甘肃省特种设备安全技术检查中心, 兰州 730050)

摘 要: 以风力机专用翼型 S809 为研究对象, 采用离散相模型(DPM)耦合动网格的数值方法以及高斯滤波, 研究了清洁来流下 $2^\circ \sim 12^\circ$ 攻角范围内, 沙尘颗粒对翼型表面造成的磨损形貌预测及其气动性能的影响。结果表明: 颗粒对翼型表面的冲蚀磨损区域主要集中在前缘, 其磨损深度可达 0.6% 的弦长, 随着攻角的增大, 磨损区域在吸力面逐渐减小, 而压力面呈扩张趋势; 表面磨损的形貌使翼型前缘的压力出现波动, 吸力面的流动分离现象显著提前, 12° 攻角时气流分离点向前移动距离可达 31.43% 的弦长; 翼型表面受到冲蚀磨损后阻力系数上升, 升力系数与升阻比下降, 在 12° 攻角下, 阻力系数上升 44%, 升力系数下降 25%, 升阻比下降 48%; 由此可见, 表面磨损形貌降低了翼型的气动特性。

关键词: 风力机叶片; 翼型; 冲蚀磨损; 气动特性; 数值模拟; 高斯滤波

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引 言

中国西北地区是风沙气候典型分布区, 自 2021 年开始, 沙尘暴发生的频率和范围显著增加^[1]。风沙环境下, 风力机的旋转会促进沙尘在尾流区叶尖涡和中心涡处的聚集, 从而对沙尘输运产生一定的阻碍作用^[2]。此外, 沙尘颗粒会撞击叶片, 对表层材料造成微切削和犁削^[3], 叶片的前缘磨损会对叶片的最佳性能和能量捕获产生不利影响^[4-5]。李德顺等^[6]、张骏等^[7]将前缘侵蚀转化为表面粗糙度。数值研究表明, 粗糙度对叶片的影响不是其局部效应沿叶片跨度的线性叠加, 而是综合效应的结果。Gharali 等^[8]、关新等^[9]、王燕等^[10]针对风力机专用翼型开展数值研究, 将实际磨损形貌简化成与翼型相对厚度有关的矩形凹坑, 研究表明, 减小的升力系数主要取决于侵蚀的深度。李德顺等^[11-12]将得出的磨损率分布换算成磨损深度, 通过建模软件对翼型进行改型, 得出翼型表面的凹坑会形成漩涡, 诱导出径向流动和二次涡的结论。

总体而言, 有关风力机翼型磨损的数值研究, 通常将前缘磨损简化为表面粗糙度或二次改型的方式进行研究, 缺乏针对翼型磨损演化过程的研究。Duarte 等^[13]开发了一套适应几何结构变化的网格平滑程序, 在弯管冲蚀数值计算中得到与实验相一致的几何磨损形貌; 陈雨等^[14]建立一种水力机械渐进磨损过程数值预测方法, 研究了弯管的动态磨损过程; 李德顺等^[15-16]基于离散相模型对风力机进行冲蚀磨损数

值研究, 得到不同叶尖速比、不同颗粒直径下的翼型及叶片前缘的磨损率分布。

综上, 针对风力机翼型几何磨损形貌的数值预测研究较少。本文基于离散相模型耦合动网格的方法, 对 S809 翼型展开冲蚀磨损形貌的数值研究, 并揭示其对翼型气动特性的影响规律与流动机理。

1 数值研究方法

1.1 气固两相流数值模拟

本文基于 Euler-Lagrange 方法进行气固两相流的数值模拟, 即在欧拉坐标系下将流体视作连续相, 建立并求解不可压雷诺时均 Navier-Stokes 方程组, 其控制方程组为:

$$\partial \bar{u}_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) + S_i \quad (2)$$

式中: $\bar{u}_i, \bar{u}_j$ ——速度方向分量, m/s; x_i, x_j ——位移方向分量, m; t ——时间, s; ρ ——密度, kg/m³; $\bar{p}$ ——时均压力, Pa; ν ——流体运动黏度, Pa·s; S_i ——体积源项; $-\overline{u_i' u_j'}$ ——雷诺应力项。

本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型封闭方程组; 离散相模型(discrete phase model, DPM)中, 通过在 Lagrange 坐标系下积分颗粒的受力平衡方程来预测颗粒的轨迹, 其控制方程

收稿日期: 2025-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(U25B20170); 甘肃省重点人才项目(2026RCXM024); 甘肃省产业支撑计划(2025CYZC-026); 甘肃省联合基金(25JRRA1149)

通信作者: 李德顺(1980—), 男, 博士、教授, 主要从事风力机空气动力学及风沙磨损方面的研究。lideshun_8510@sina.com

组为:

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_{fp} \quad (3)$$

$$I_p \frac{d\boldsymbol{\omega}_p}{dt} = \mathbf{M}_{fp} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}_p$ 、 $\boldsymbol{\omega}_p$ ——颗粒的速度, m/s、角速度, rad/s; m_p 、 I_p ——颗粒的质量, kg、转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; $\mathbf{F}_{fp}$ ——流体作用于颗粒上的力, 主要包含 Saffman 升力、Magnus 旋转升力、Basset 力、流体曳力、压力梯度力和虚拟质量力, N; $\mathbf{M}_{fp}$ ——颗粒在流体区域中的转矩, $\text{kg} \cdot \text{m}$ 。

1.2 磨损率计算模型

本文采用 DPM 模块中的 Oka 模型^[17]计算颗粒冲击对壁面材料在单位时间、单位面积上的质量损失, 即磨损率。该模型涉及到材料的物理属性和颗粒的冲击角度、速度等参数, 其计算公式为:

$$E = E_{90} (V/V_{\text{ref}})^{k_2} (d/d_{\text{ref}})^{k_3} f(\theta) \quad (5)$$

$$f(\theta) = (\sin \theta)^{n_1} [1 + H_v(1 - \sin \theta)]^{n_2} \quad (6)$$

式中: E_{90} ——颗粒冲击角 90° 时的冲击磨损率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; V ——颗粒冲击速度, m/s; V_{ref} ——参考速度, 取 104 m/s; d ——颗粒直径, m; d_{ref} ——参考直径, 取 326 μm ; H_v ——壁面材料维氏硬度, 取 1.5 GPa; k_2 、 k_3 ——速度指数、粒径指数, 分别取值为 2.3 $H_v^{0.038}$ 、0.19; n_1 、 n_2 ——冲击角函数常数, 分别取值为 0.71 $H_v^{0.14}$ 、2.4 $H_v^{-0.4}$; θ ——颗粒冲击角度, rad; $f(\theta)$ ——冲击角函数。

1.3 颗粒侵蚀耦合动网格计算方法

带有动量的固体颗粒撞击叶片表面时, 会对壁面材料造成磨损和变形, 壁面形貌的变化也会对颗粒的流动和冲蚀过程产生影响。为更精确地模拟壁面磨损状况, 将磨损率模型与动网格技术相结合, 通过网格节点的移动来体现壁面形貌的变化, 其网格移动的准则为:

$$\Delta x_{\text{face}} = E_{\text{face}} \Delta t_{\text{MM}} / \rho_w \quad (7)$$

式中: E_{face} ——壁面磨损率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Δt_{MM} ——网格移动时间步长, s; ρ_w ——壁面材料密度, kg/m^3 。则在总磨损预测时间 T 内, 可得出单个网格的移动距离为:

$$h = \sum_{i=0}^T \Delta x_{\text{face}, i} \quad (8)$$

在颗粒侵蚀耦合动网格计算过程中, 首先将计算得出的磨损率传递给动网格模块, 然后将磨损深度转化为网格节点的移动, 基于弹簧光顺方法和网格局部重构原则对网格质量进行调整, 最后进行定量迭代步数的流场稳态计算, 以此往复, 直到计算达到指定的磨损时间。

1.4 高斯滤波

高斯滤波是一种基于高斯分布的图像平滑技术。其基本原理是通过高斯权重对每个数据点及其邻域点进行加权

平均:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

式中: $G(x, y)$ ——点 (x, y) 的权重; σ ——高斯分布的标准差, 该值越大, 滤波效果越强, 曲线越平滑但范围更为模糊, 本文中该值取 10。后续对表面磨损形貌的翼型压力曲线进行分析时, 采用该方法对曲线进行滤波处理。

2 计算模型与验证

2.1 风沙环境变量相似理论验证

风力机叶片在实际风沙环境运行过程中的磨损时间较长, 由于本文采取数值模拟的研究方法, 为提高计算效率且保证预测精度, 基于风沙环境相似理论 (sand environment multivariate similarity theory, SEMS)^[18-19]进行冲蚀时间和沙尘浓度的换算, 其相似系数定义为:

$$K = St_e v_e^{3.4} / w \quad (10)$$

式中: S ——颗粒浓度, kg/m^3 ; t_e ——冲蚀时间, s; v_e ——颗粒冲蚀速度, m/s; w ——冲蚀质量损失量, kg。

根据相似第三定理, 当实际工况与模拟工况满足初始状态相同, 时间、几何相似时, 两种工况下的现象相似。

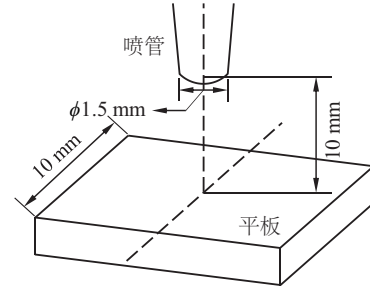


图1 平板冲蚀试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plate erosion test

为验证 SEMS 理论的准确性, 本文以文献[20]中的含沙射流平板冲蚀试验作为数值计算方法的验证案例, 该试验如图1所示, 其平板材料采用风力机叶片的玻璃纤维增强塑料, 密度为 $1800 \text{ kg}/\text{m}^3$, 平板中心距离上方喷口 10 mm, 沙尘粒径为 200 μm , 含沙喷射气流速度为 38 m/s, 试验时的质量流率为 $6.7 \times 10^{-5} \text{ kg}/\text{s}$ 。

沙尘浓度与沙尘质量流率的关系式为:

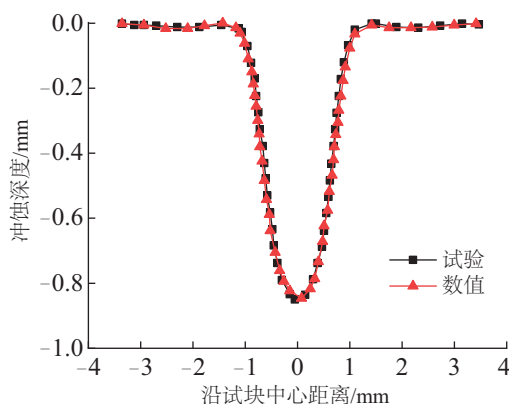
$$S = M / (v_e A) \quad (11)$$

式中: M ——沙尘质量流率, kg/s ; A ——过流断面面积, m^2 。

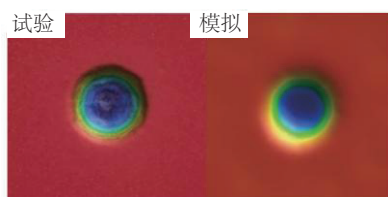
由上述的相似准则可得出, 颗粒冲蚀速度、平板物理属性以及冲蚀质量损失量相同时, 颗粒的浓度之比等同于质量流率之比, 为保证相似系数 K 相同, 当数值与实际工况的冲蚀时间比值为 100 时, 数值工况下的颗粒质量流率为 $6.7 \times 10^{-7} \text{ kg}/\text{s}$, 以此作为数值模拟的设置值。

为确保颗粒侵蚀耦合动网格数值计算方法的可靠性, 对

比分析本文的数值模拟结果和文献[20]的试验结果(图2),数值计算中得出的最大磨损深度为 0.858 mm,与试验值 0.872 mm 之间的误差小于 2%,证明了相似理论和颗粒侵蚀耦合动网格计算方法的合理性^[21]。



a. 沿平板中心距离



试验与数值磨损形貌对比

b. 试验与数值磨损形貌对比

图2 平板冲蚀数值计算结果^[21]

Fig. 2 Numerical calculation results of plate erosion^[21]

后续 S809 翼型的冲蚀数值计算中,来流速度为 20 m/s,参考有关沙漠沙尘暴的定量观测结果^[22],沙尘浓度取 $3330 \mu\text{g}/\text{m}^3$,粒径 $50 \mu\text{m}$,密度为 $2650 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。根据 SEMS 理论使实际与数值工况的冲蚀时间比值为 600,即数值模拟冲蚀时间 480 s,相当于实际冲蚀 80 h。

2.2 计算域与边界条件

本文以风力机专用翼型 S809 作为研究对象,模型弦长 c 约为 0.1 m,展长为 0.05 m,壁面材料密度与上述平板相同,壁面第一层网格无量纲高度满足 $y^+ < 1$;翼型周向分布约 700 个网格节点,展向分布约 150 个网格节点,且对近壁面边界层网格进行适当加密(图3)。

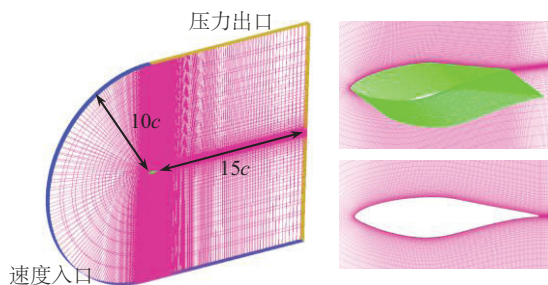


图3 计算域网格

Fig. 3 Mesh of computational domain

计算域进出口采用速度入口与压力出口,两边设置为对称面边界,翼型表面为无滑移壁面条件。为构造风沙入流条件,在翼型前方约 $3c$ 处设置颗粒入射面。

2.3 升阻力系数验证

为验证数值方法的准确性,在雷诺数为 3×10^5 的来流条件下,对不同攻角的升阻力系数进行验证。基于 RANS 方法和 SST $k-\omega$ 湍流模型,速度与压力耦合选择 SIMPLEC 算法,离散格式为二阶迎风格式。经过网格无关性测试后,最终模型的网格数量约为 700 万^[21],其计算结果与试验结果误差均在合理范围内(图4)。

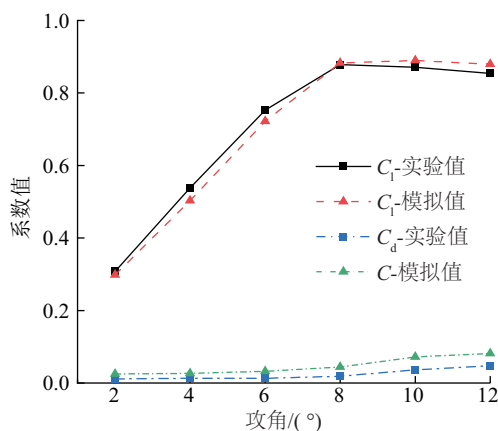


图4 数值计算与验证

Fig. 4 Numerical calculation and verification

3 结果与分析

3.1 表面磨损形貌

冲蚀计算的攻角范围为 $2^\circ \sim 12^\circ$,每间隔 2° 取一个工况,共 6 个攻角。最终得到各工况下的翼型表面磨损形貌如图5所示。

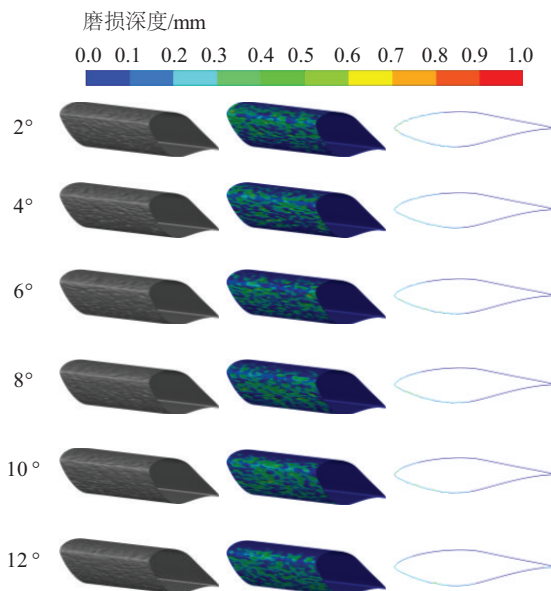


图5 不同攻角下的翼型表面磨损形貌

Fig. 5 Surface wear morphology of airfoil at different AOA

从图 5 中可知,风力机在沙尘环境下运行,叶片受到颗粒的冲击磨损,随着时间的累积在表面形成大小不均匀的凹坑,凹坑的区域主要集中在翼型的前缘部分,不同攻角下的磨损深度基本相同,磨损深度可达 $0.6\%c$ 。翼型的前缘随着攻角的增大,压力面与颗粒的接触面积逐渐增大,而吸力面靠近前缘区域的颗粒撞击角度逐渐减小,从而使得翼型表面的磨损位置分布向压力面扩展,而吸力面所受到的冲蚀区域呈现逐渐减小的趋势。

3.2 气动特性

如图 5 所示,翼型受到沙尘颗粒的冲蚀后,表面出现的

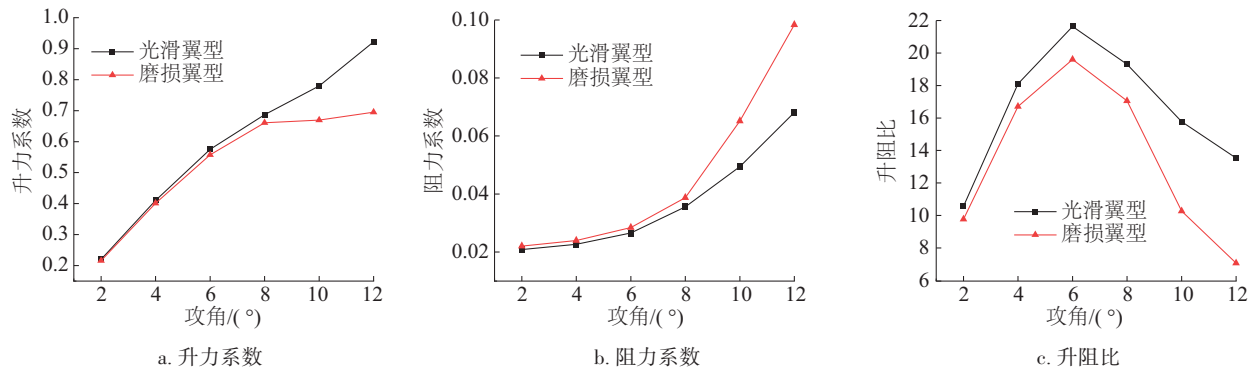


图6 冲蚀磨损前后翼型的气动特性

Fig. 6 Aerodynamic characteristics of smooth and wear airfoils

表1 光滑翼型升、阻力系数随攻角的变化

Table 1 Aerodynamic coefficients of smooth airfoil with AOA

攻角/(°)	$C_{l-clean}$	$\Delta C_{l-clean}/\%$	$C_{d-clean}$	$\Delta C_{d-clean}/\%$
2	0.22038		0.02084	
4	0.41020	86.13	0.02265	8.70
6	0.57541	40.28	0.02660	17.41
8	0.68691	19.38	0.03559	33.80
10	0.77992	13.54	0.04945	38.95
12	0.92228	18.25	0.06814	37.80

表2 表面磨损翼型升、阻力系数随攻角的变化

Table 2 Aerodynamic coefficients of wear airfoil with AOA

攻角/(°)	C_{l-wear}	$\Delta C_{l-wear}/\%$	C_{d-wear}	$\Delta C_{d-wear}/\%$
2	0.21578		0.02207	
4	0.40093	85.81	0.02400	8.71
6	0.55724	38.99	0.02843	18.48
8	0.66067	18.56	0.03874	36.25
10	0.66958	1.35	0.06516	68.22
12	0.69480	3.77	0.09834	50.91

注:表 1、2 中下标 clean、wear 代表光滑、磨损翼型; C_l 、 C_d 为升力、阻力系数; ΔC_l 、 ΔC_d 为升力、阻力系数变化量。

凹坑改变了翼型的几何特征。为研究表面磨损形貌对翼型气动特性造成的影响,以原始翼型在清洁来流下的气动计算值作为参考,对各攻角下的表面磨损翼型进行清洁来流下的气动性能数值计算,其升力系数、阻力系数随攻角的变化如图 6 所示。总体上,在清洁来流下翼型表面的磨损形貌降低了翼型的升力且提高了阻力,2°~8°翼型的升力系数下降约 4%,阻力系数上升约 10%;8°攻角之后,受翼型表面磨损形貌的影响,发生流动分离的现象更加严重,从而使得升阻力系数都产生大幅变化,10°攻角下升力下降 14%,阻力增加 32%;12°攻角下升力下降 25%,阻力增加 44%。

表 1 和表 2 分别为两种翼型升、阻力系数随攻角的变化

情况。可知,两种翼型的升、阻力都随着攻角的增加而提高,6°攻角之前两种翼型的升力增幅均高于阻力;在此之后,阻力的增幅超过了升力。因此,图 6c 两种翼型的升阻比仍保持着先增后减的趋势,且在 6°攻角时升阻比达到攻角范围内的最大值,分别为 21.6 和 19.6;翼型表面遭受颗粒磨损,2°~8°攻角升阻比下降约 10%,而 10°和 12°攻角时,升阻比下降分别为 35% 和 48%。从图 6、表 1 与表 2 可得出,清洁来流条件下表面的磨损形貌降低了翼型的气动特性。

3.3 表面压力分布

分别截取表面磨损翼型、原始光滑翼型的中间截面,提取其清洁来流下的表面压力数值计算结果。各攻角下的压力系数分布如图 7 所示,从图 7 中可得出,由于沙尘颗粒冲击翼型前缘使其产生了不同范围内的凹陷,翼型受损的前缘区域压力分布出现明显的波动现象,随着攻角的增加,吸力面由最初 2°攻角下的前缘至约 30% c 处间的压力波动逐渐消退,而压力面的压力波动由前缘向约 50% c 处逐渐延伸,由此也验证了 3.1 节中翼型表面的磨损位置随攻角的增大,逐渐向压力面蔓延,而吸力面逐渐消去的结论。

采用高斯滤波的方法,滤除波动的微小细节,保留压力系数曲线的主要趋势。将滤波后的压力分布曲线与光滑翼型的压力分布进行对比,从图 7 可得出,翼型前缘至 50% c 处间压力面的压力分布,除 10°和 12°两个攻角下压力有小幅度

的下降,其他攻角下的压力面曲线与原始翼型几乎重合;靠近前缘处的吸力面曲线均低于原始翼型,说明表面磨损形貌增大了翼型吸力面的负压,进一步使得翼型上下表面的压力差减小,降低翼型的气动特性,尤其是在 10° 和 12° 时下降的趋势更加显著,这也验证了 3.2 节中表面磨损形貌的翼型升阻比整体呈下降趋势,且在 10° 和 12° 攻角下大幅下滑的结论。

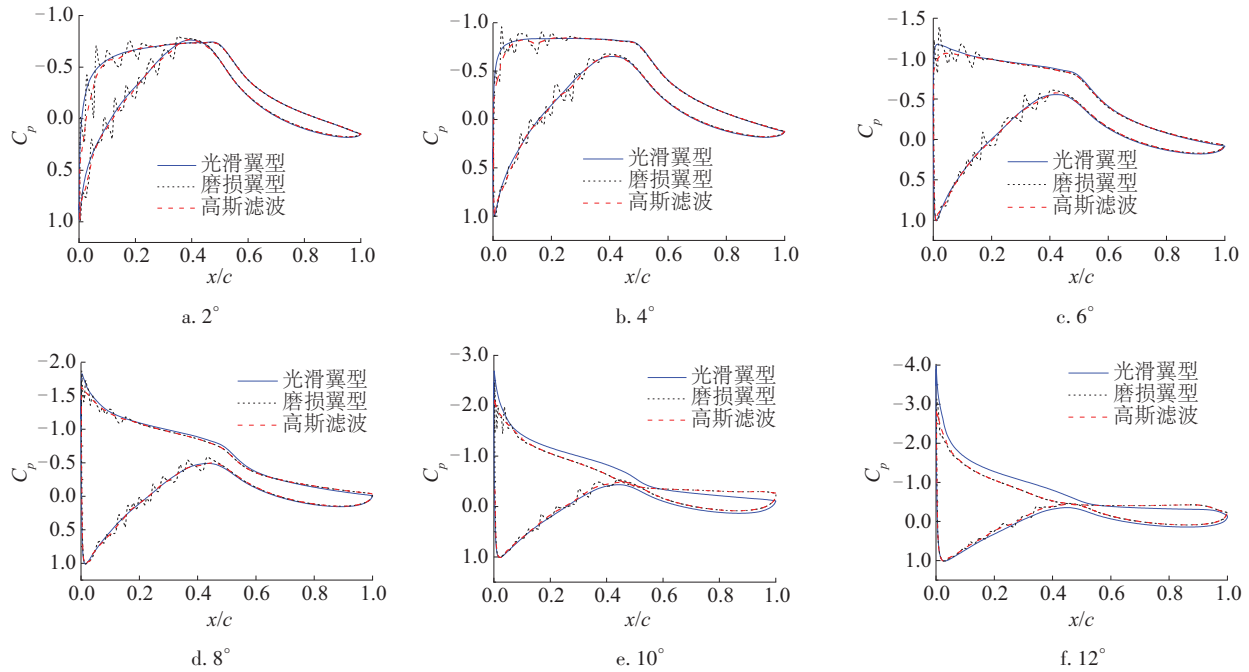


图7 冲蚀磨损前后翼型的表面压力分布

Fig. 7 Pressure distribution of smooth and wear airfoils

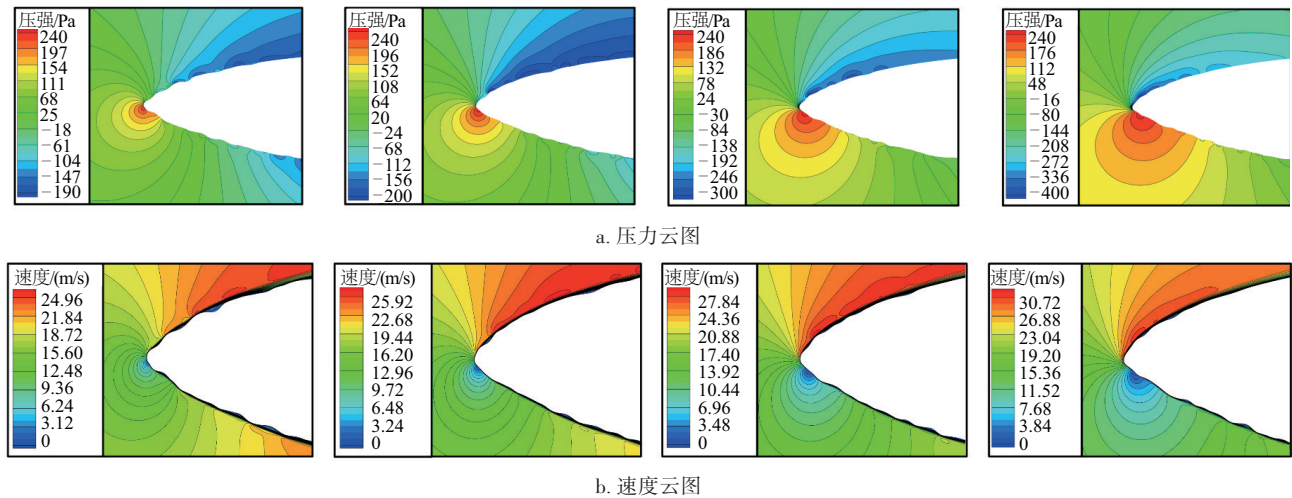


图8 表面磨损翼型前缘流场分布

Fig. 8 Flow field distribution around leading edge of wear airfoils

如图 9 所示,以 10° 与 12° 攻角为例,提取翼型吸力面弦向 25%、50% 与 75% 处的边界层流向速度剖面, S_n 为壁面法向距离。从中可看出,磨损形貌加剧了边界层内的动量亏损,50% c 处两攻角下的磨损翼型吸力面已难以抵抗逆压力

3.4 边界层流动

以 $2^\circ \sim 8^\circ$ 攻角为例,其速度、压力流场分布如图 8 所示,从中可看出颗粒冲蚀翼型表面所产生的凹坑形成了低速区域,根据伯努利原理可推断出这些低速会引起较高的压力,使得表面磨损区域发生了不同程度的压力波动,这些波动扰乱了翼型周围的气流运动,对其气动特性产生了影响。

梯度的作用,相比光滑翼型提前开始出现回流。两攻角下的吸力面气流分离点分别向前移动约 16.80% c 、31.43% c ,翼型表面的尾缘分离区被扩大,流动分离被提前,这也是导致 10° 与 12° 攻角下升阻力急剧下降的主要原因。

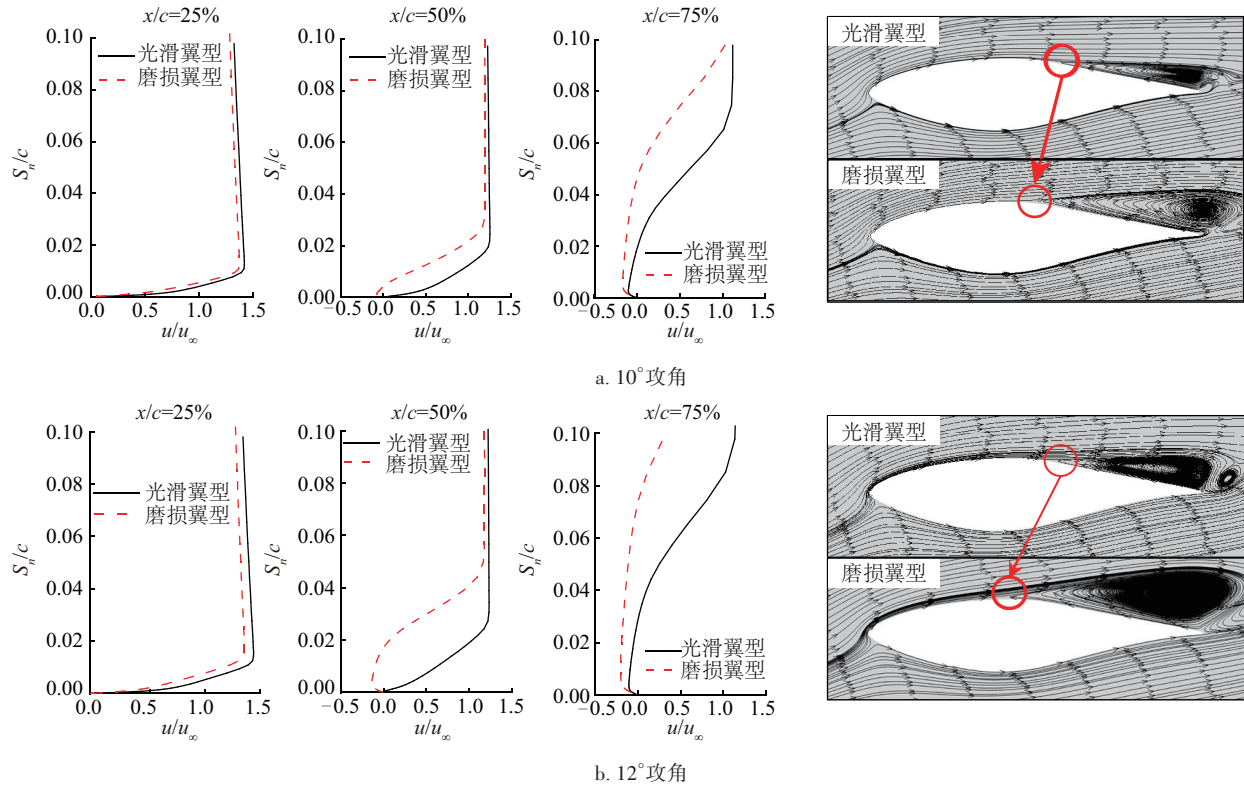


图9 10°和12°攻角下吸力面边界层速度剖面与翼型流场

Fig. 9 Boundary layer velocity profiles on suction side and airfoil flow field at 10° and 12°

4 结 论

本文基于 DPM 模型与动网格方法,对风力机专用翼型 S809 在 2°~12° 攻角内展开了冲蚀磨损和气动性能的数值研究,主要结论如下:

1)翼型前缘部分在风沙环境下受到颗粒的撞击产生凹坑,磨损深度可达 0.6% c ,随着攻角的增大,吸力面的磨损区域逐渐减小,而压力面磨损区域逐步扩展。

2)清洁来流条件下,受冲蚀磨损后翼型的阻力上升,升力与升阻比下降,且在 8° 攻角之后,升、阻力变化更加剧烈,其升阻比下降可达 48%,说明表面磨损形貌降低了翼型的气动特性。

3)表面磨损的凹坑使翼型压力产生波动,吸力面靠近前缘区域的负压增大,压力差减小,该现象在 8° 攻角之后尤为明显。

4)在 8° 攻角之后,表面磨损形貌使得翼型的流动分离现象被显著提前,气流分离点前移距离可达 31.43% c 。

针对风力机叶片前缘磨损的预防提出以下建议:

1)翼型流动控制层面,通过翼型改型的方式减缓边界层内的能量损失或抗冲蚀能力。

2)翼型表面材料层面,研制适合西北地区风力机运行的抗磨损新涂层材料,定期停机检查和修复叶片。

[参考文献]

- [1] 张正德, 潘凯佳, 张焱, 等. 中国西北戈壁区沙尘暴过程中近地层风沙运动特征[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2): 130-138.
ZHANG Z C, PAN K J, ZHANG Y, et al. Sand transport characteristics above Gobi surface during a dust storm in northern China[J]. Journal of desert research, 2023, 43 (2): 130-138.
- [2] 马高生, 霍春玉, 李德顺, 等. 风力机尾流影响沙尘输运的实验研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 444-450.
MA G S, HUO C Y, LI D S, et al. Experimental study on influence of wind turbine wake on sand-dust transport[J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(10): 444-450.
- [3] 李德顺, 王亚娥, 郭兴铎, 等. 沙粒形状对风力机翼型磨损特性及临界颗粒 Stokes 数的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 224-231.
LI D S, WANG Y E, GUO X D, et al. Effects of particle shape on erosion characteristic and critical particle Stokes number of wind turbine airfoil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35 (12): 224-231.
- [4] SAREEN A, SAPRE C A, SELIG M S. Effects of leading

- edge erosion on wind turbine blade performance[J]. Wind energy, 2014, 17(10): 1531-1542.
- [5] MISHNAEVSKY L, HASAGER C B, BAK C, et al. Leading edge erosion of wind turbine blades: Understanding, prevention and protection[J]. Renewable energy, 2021, 169: 953-969.
- [6] LI D S, LI R N, YANG C X, et al. Effects of surface roughness on aerodynamic performance of a wind turbine airfoil [C]//2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China, 2010: 1-4.
- [7] 张骏, 袁奇, 吴聪, 等. 大型风力机叶片表面粗糙度效应数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(20): 3384-3391.
- ZHANG J, YUAN Q, WU C, et al. Numerical simulation on the effect of surface roughness for large wind turbine blades[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(20): 3384-3391.
- [8] GHARALI K, JOHNSON D A. Numerical modeling of an S809 airfoil under dynamic stall, erosion and high reduced frequencies[J]. Applied energy, 2012, 93: 45-52.
- [9] GUAN X, XIE Y Q, WANG S J, et al. Research on leading edge erosion and aerodynamic characteristics of wind turbine blade airfoil[J]. Fluid dynamics & materials processing, 2024, 20(9): 2045-2058.
- [10] 王燕, 胡锐锋, 王萍. 基于磨损模型的S809翼型气动性能及流场特性研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3): 607-615.
- WANG Y, HU R F, WANG P. Research on the aerodynamic and flow field characteristics of S809 airfoil based on the leading edge erosion modeling [J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(3): 607-615.
- [11] 李德顺, 陈霞, 李银然, 等. 风力机翼型风沙冲蚀磨损演化过程研究[J]. 甘肃科学学报, 2020, 32(5): 63-68, 87.
- LI D S, CHEN X, LI Y R, et al. Study on the evolution of wind turbine airfoil sandstorm erosion wear[J]. Journal of Gansu sciences, 2020, 32(5): 63-68, 87.
- [12] 李德顺, 王成泽, 李银然, 等. 叶片前缘磨损形貌特征对风力机翼型气动性能的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 269-275.
- LI D S, WANG C Z, LI Y R, et al. Influence of blade leading edge erosion features on aerodynamic characteristics of wind turbine airfoil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 269-275.
- [13] DUARTE C A R, DE SOUZA F J. Dynamic mesh approaches for eroded shape predictions[J]. Wear, 2021, 484: 203438.
- [14] 陈雨, 李仁年, 韩伟, 等. 基于动态边界的90°弯管壁面渐进磨损特性[J]. 排灌机械工程学报, 2024, 42(4): 380-387.
- CHEN Y, LI R N, HAN W, et al. Progressive erosion of 90° elbow wall based on dynamic boundary[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2024, 42(4): 380-387.
- [15] LI D S, ZHAO Z X, LI Y R, et al. Effects of the particle Stokes number on wind turbine airfoil erosion[J]. Applied mathematics and mechanics, 2018, 39(5): 639-652.
- [16] 李德顺, 王成泽, 李银然, 等. 风沙环境下风力机叶片冲蚀磨损的数值研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(3): 627-632.
- LI D S, WANG C Z, LI Y R, et al. Numerical simulation of wind turbine blade erosion in sandy environment [J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(3): 627-632.
- [17] OKA Y I, YOSHIDA T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact part 2: mechanical properties of materials directly associated with erosion damage[J]. Wear, 2005, 259(1/2/3/4/5/6): 102-109.
- [18] 郝负洪, 刘艳晨, 郭健, 等. 风沙环境变量相似理论及其应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(3): 640-649.
- HAO Y H, LIU Y C, GUO J, et al. Sand environment multivariate similarity theory and its application[J]. Journal of basic science and engineering, 2018, 26(3): 640-649.
- [19] 郝负洪, 冯韬, 刘艳晨, 等. 风沙试验相似准则及其应用研究[J]. 材料保护, 2022, 55(7): 137-143, 199.
- HAO Y H, FENG T, LIU Y C, et al. Similarity criterion of wind sand test and its application research[J]. Materials protection, 2022, 55(7): 137-143, 199.
- [20] ALAJMI A F. Characterization and modeling of the leading edge erosion of wind turbine blades due to sand [D]. Seattle: University of Washington, 2021.
- [21] 李德顺, 强仕林, 夏伟卿, 等. S809直翼段风沙冲蚀磨损动态演化及其对气动性能的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(19): 42-51.
- LI D S, QIANG S L, XIA W Q, et al. Dynamic evolution of wind-sand erosion on the straight wing section of S809 and its effect on aerodynamic performance [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(19): 42-51.
- [22] 明虎, 王敏仲, 刘新春, 等. 基于Grimm180粒子仪对塔克拉玛干沙漠沙尘暴的定量观测[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(2): 26-33.
- MING H, WANG M Z, LIU X C, et al. Quantitative detection of dust storms with the Grimm180 particle monitor in the Taklimakan desert [J]. Desert and oasis meteorology, 2021, 15(2): 26-33.

NUMERICAL INVESTIGATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS UNDER WIND TURBINE AIRFOILS WEAR MORPHOLOGY

Li Deshun^{1,2}, Xia Weiqing¹, Qiang Shilin³, Du Jiawei¹, Dong Hai¹, Yin Hangshuai¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Wind Power Engineering Technology Innovation Center of Gansu Province, Lanzhou 730050, China;

3. Special Equipment Safety Technology Inspection Center of Gansu Province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: This study investigates the impact of sand-induced surface wear on the aerodynamic performance of the S809 wind turbine airfoil using a numerical approach integrating the Discrete Phase Model (DPM), dynamic mesh, and Gaussian filtering. Results show that erosion is concentrated at the leading edge, with a maximum depth of 0.6% chord length. As the angle of attack increases ($2^\circ \sim 12^\circ$), the eroded region contracts on the suction side but expands on the pressure side. Surface wear causes pressure fluctuations at the leading edge and advances flow separation, shifting the separation point forward by up to 31.43% chord length at 12° . Erosion increases drag while reducing lift and aerodynamic efficiency, with a 44% drag rise, 25% lift loss, and 48% decline in lift-to-drag ratio at 12° . These findings highlight the adverse effects of surface wear on airfoil aerodynamics.

Keywords: wind turbine blades; airfoils; erosion; aerodynamic characteristics; numerical analysis; Gaussian filtering