



沙尘环境对风力机关键零部件力学特性影响综述

梁恩培¹, 马高生^{2*}, 李晔^{2,3}, 郑小波³, 巫发明⁴, 李寿图², 李德顺²

1. 东方电气集团科学技术研究院有限公司, 成都 611730;

2. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050;

3. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240;

4. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 株洲 412000

*联系人, E-mail: magsh@lzu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-27; 接受日期: 2022-07-20; 网络出版日期: 2023-02-21

国家重点基础研究发展计划(编号: 2017YFE0132000)和国家自然科学基金(编号: 11872248, 12162022)资助项目

摘要 近年来随着全球对双碳计划的落实, 风力机行业发展迅速. 风电场选址尽可能选择风资源储量大, 与当地环境能和谐共生的区域, 沙漠区域具备相当大的风能储量, 但该区域受风力影响致沙尘天气频发, 风沙环境对风力机运行产生了显著影响. 本文首先对全球沙漠分布及对应风能利用情况做了概述, 然后简述了沙尘天气发生的核心因素, 即沙源地、沙尘运动形式和沙尘天气特征; 最后对风沙环境下风沙对风力机关键部件影响研究进行了评述, 并对未来研究进行了展望. 目的是为从事相关研究的技术人员提供参考, 希望能对风能利用与沙漠化环境的协同改进研究提供支持.

关键词 风沙环境, 风力机, 风能利用, 环境力学, 空气动力学

PACS: 47.55.Kf, 92.40.Gc, 89.30.Ee, 47.85.Gj

1 引言

早在3000多年前, 风能已经被人类有效利用. 15世纪时, 欧洲已广泛利用风车进行提水和磨谷. 近半个世纪来, 随“石油危机”的爆发, 能源需求摆在各国面前, 各国意识到常规矿物能源供应不稳定, 难以满足社会日益增长的能源需求. 此时风能作为一种可再生能源回到了人们的视野, 随着技术瓶颈的突破, 风力发电机组发电功率逐渐增加, 如1975年到1987年间美国生产的Mod系列机组(Mod-0, 100 kW, 1975到Mod-5B,

2.5 MW, 1987). 兆瓦级风力机的出现, 意味着风电技术突破瓶颈, 新一代风机技术具备雏形^[1]. 近年来, 全球风电行业高速发展, 装机容量从2016年的486.8 GW增长到2021年的837 GW. 中国海陆总装机量为328.973 GW, 远超排名第二的美国(132.738 GW), 成为名副其实的风电大国.

为提高风电场经济效益, 现代风电场在进行选址时, 尽可能选择风资源储量大, 风湍流强度小的区域, 并考虑风电机组在运转时的噪音等一系列问题, 尽可能保证风电场远离村落、农田、牧场等人群聚居区

引用格式: 梁恩培, 马高生, 李晔, 等. 沙尘环境对风力机关键零部件力学特性影响综述. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2023, 53: 234701
Liang E P, Ma G S, Li Y, et al. Summary of the impact of aeolian sand environment on key parts of wind turbine (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2023, 53: 234701, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0143

域^[2]. 沙漠区域满足风电场选址条件, 具备风能资源储量大, 人烟稀少等优势. 现在主流的观点认为, 全球沙漠总面积约为3600万km², 约占整个地球陆地总面积的25%. 主要集中在北美洲中西部、南美洲西南部、非洲大部分、亚洲中部、澳大利亚等地域. 全球

沙漠蕴藏着巨大的风能资源, 若其中的风资源能得到有效地开发, 将有力促进世界各国的经济发展. 面对如此大的能源储量, 各国针对沙漠风资源已进行了不同程度的开发与利用, 如表1所示.

表1展示了全球沙漠分布与沙漠风资源的开发和

表 1 全球沙漠分布与风能利用情况

Table 1 Global desert distribution and wind energy utilization

沙漠名称	面积 (km ²)	所属区域	沙漠与风能概况	风能利用情况
阿塔卡马沙漠	181300	南美洲	智利沿海区域与沙漠共存, 全国约40 GW可利用风能	截至2019年, 智利全国装机容量近25.3 GW, 其中5 GW对应风能或太阳能发电, 陆上风电占全国可再生能源装机容量的18%
大盆地	520000	北美洲	北美洲沙漠主要分布于北美大陆西侧南北延伸的不规则荒凉辽阔地带, 有定向风, 平均风速为3-4 m/s	美国2020年投入总装机容量122.465 GW, 北部沙漠地带风能利用较少. 加利福尼亚州5.922 GW (4.84%)、内华达州0.152 GW (0.12%)、亚利桑那州0.618 GW (0.5%)、犹他州0.391 GW (0.32%)、新墨西哥州2.723 GW (2.22%)
奇瓦瓦沙漠	501896			
索诺拉沙漠	311000			
莫哈韦沙漠	64750			
撒哈拉沙漠	9060000	非洲	以利比亚沙漠为例, 该沙漠位于利比亚东部和埃及西部, 受副热带高压气带控制, 干热面积广	利比亚领土上的陆上风电的潜力为400 W/m ² , 现阶段风能未得到有效开发 埃及规划约7600 km ² 的沙漠地区用于兴建风力发电场. 这些风电场将使埃及每年可再生能源(风能/太阳能)发电能力上升至90 GW
纳米布沙漠	81000		位于纳米比亚和安哥拉境内, 来自大西洋的空气经本吉拉洋流后温度降低, 变得干燥并迅速下沉, 形成干旱气候	无相关资料
戈壁	1295000	亚洲	蒙古国蕴藏风资源达到21.7 GW, 但目前有76%的土地遭到荒漠化	蒙古国首座风电场Salkhit已于2013年输送电力, 承担全国3%-5%的电力供应. 蒙古国《可再生能源法》规划, 2030年本国的新能源利用率提高到20%
卡拉库姆沙漠	350000		土库曼斯坦大部分区域风速达到4-5 m/s, 部分地区达到5-6 m/s, 风能资源具备发电潜力地区占国土面积的40%以上	无相关资料
塔尔沙漠	238254		80%区域属于印度, 受副热带高压气带控制, 气压高, 风向稳定, 空气以下沉气流为主	印度塔尔沙漠所属的拉贾斯坦邦已安装了4.298 GW的风力发电厂, 占全国的12.06%
克齐尔库姆沙漠	298000		位于中亚阿姆河与锡尔河之间	无相关资料
内盖夫沙漠	13000		处于以色列境内, 以色列陆上风力发电潜能约3 GW	计划2020年实现风力发电比例占全国发电3.3%
约旦沙漠	71473		风能资源优势明显, 风速可达7 m/s	虽然约旦风能资源丰富, 但尚未得到大规模的开发利用 (2014年建立第一个风电项目)
塔克拉玛干沙漠	337600		中国沙漠主要集中在西北地区, 约占全国沙漠总面积的80%. 西北部分地区年平均风速可达7-8 m/s	2021年, 中国并网风电装机328.48 GW, 内蒙古39.96 GW (12.17%)、新疆24.08 GW (7.33%)、甘肃17.25 GW (5.25%), 有4座千万千瓦级基地在沙尘频发区域
腾格里沙漠	36700			
古尔班特古特沙漠	48800			
科尔沁沙地	50600			
毛乌素沙漠	32100		澳大利亚	澳大利亚沙漠和半沙漠面积约占总面积的44%. 澳大利亚西部、南澳大利亚南部等地拥有良好的风资源
辛普森沙漠	176500			
大沙地沙漠	284933			
塔纳米沙漠	259973			
大维多利亚沙漠	424400			

利用情况,同时可以看出我国沙漠多分布于新疆、内蒙古、甘肃等地,这些沙漠区域蕴藏着的风能资源约占全国陆上风资源的70%.在过去10年中,随着我国风电行业的快速发展,我国沙漠风资源得到相应地开发,4座千万千瓦级风电基地分别位于内蒙古东部、内蒙古西部、甘肃酒泉、新疆哈密沙漠附近.

沙漠风资源的利用则带来另一个问题,即沙漠风电机组完全暴露的风沙环境,关键零部件易受极端环境中颗粒的影响,导致风力机气动性能与结构安全受到损伤,如较高的叶尖旋转速度使得粒子的冲击效应扩大,这导致风力机叶片越靠近叶尖部分更易遭受沙粒长时间且重复的侵蚀,进而导致叶片表面受损相较于其他部分更为严重^[3].对风电行业来说,风沙侵蚀作用不仅影响了风力机机组的结构安全性,砂粒的碰撞和破坏也会导致翼型气动性能的降低^[4],进而对机组功率输出产生严重影响.

本文针对风沙环境对风力机机组影响的研究进行综述,首先简要阐述沙尘天气发生的核心因素,随后综述了风沙对风力机叶片、塔筒、机舱等关键零部件影响的研究进展,为相关人员提供参考.

2 沙源地、沙尘运动形式和沙尘天气特征

2.1 沙源地

沙尘天气形成的物质基础是沙源地沙尘的释放,沙漠、戈壁、农牧交错带以及绿洲荒漠交错带等生态环境脆弱地带是沙源地的主要分布地区,即目前全球的沙漠化和荒漠化地区.沙尘源的类型复杂多样,主要有干涸湖泊、盐湖、河道、湖床沉积物、山前冲积物、洪积物、活动沙丘、盐碱化土地以及农业开发用地等^[5].沙尘的主要化学成分是二氧化硅(SiO_2)、三氧化二铝(Al_2O_3)等.根据平均粒径大小,可分为粉砂、极细砂、细砂、中砂、粗砂、极粗砂六个等级^[6].

2.2 沙尘运动形式

不同粒径的沙尘在重力、气流拖曳力和静电力等作用下,主要表现为三种运动形式:贴地表蠕移、近地表跃移和长短距离悬移^[7],如图1所示.粒径大于 $500\text{ }\mu\text{m}$ 的沙粒蠕移是形成沙波纹的主要机制,粒径在 $70\text{--}500\text{ }\mu\text{m}$ 之间的沙粒,其跃移运动与风成地貌、防沙治沙、沙割、侵蚀和沉积等现象或工程问题直接相

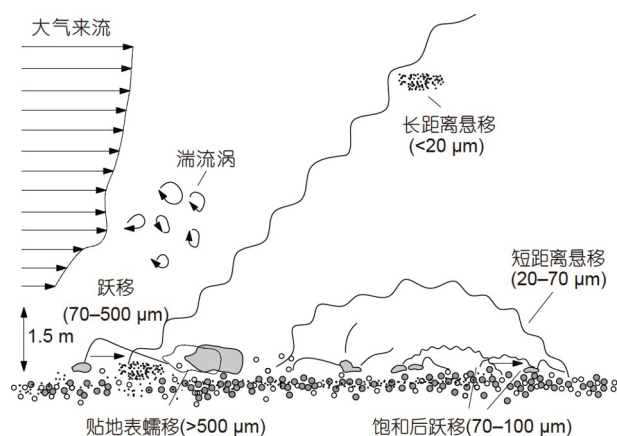


图1 沙尘的三种运动形式. 图片取自文献[8]. Copyright©2008, Springer

Figure 1 Three movement forms of sand-dust. Revised according to ref. [8]. Copyright©2008, Springer.

关. $70\text{ }\mu\text{m}$ 以下的沙粒根据大气湍流情况会发生 10 m 以上尺度的悬移,如果满足相关大气条件,会在气流的裹挟下发展成不同级别的沙尘暴^[8].

2.3 沙尘天气形成原因和特征

沙尘天气发生的必要条件是沙源、强风、不稳定大气,三者密切配合,缺一不可^[9].触发的天气机制也复杂多样.在中国,沙尘天气触发原因多为纯强干冷锋、蒙古气旋与干冷锋混合型等大尺度环流背景和中尺度系统的相互作用,并在此条件下发生与发展^[10],也有海陆风形成的弱冷锋被冷气旋加强后激发生成的^[11],而非洲西部夏季的黑风暴多为中小尺度的对流冷池激发^[12],中尺度对流系统激发的沙尘暴可持续多天,对流冷池激发的沙尘暴通常持续 $30\text{ min--}3\text{ h}$ ^[13].虽时空尺度上存在差异性,但上述沙尘天气揭示冷暖空气交汇下的不稳定层结是产生沙尘暴的关键因素,其流体力学本质是冷暖空气携带沙尘颗粒的两相异重流.

根据大气能见度可将其划分为不同等级,如表2^[14]所示.

在沙尘暴发展阶段,大风卷携沙尘的机制是众多学者关心的问题.曾庆存等人^[15]指出,小尺度湍流并不是有效的扬尘机制,而强风所伴随的阵风(相干结构)才是扬尘最有效的机理. Hutchins等人^[16]通过测量首次证实了大气边界层大尺度结构(LSMs)和超大尺度结构(VLSMs)的垂向尺度与近地层高度相当.并有

表 2 沙尘天气等级(数据取自文献[14])

Table 2 Dust weather classification (taken from ref. [14])

名称	能见度	空气特点
扬尘	水平能见度小于 10 km	大气中悬浮沙粒和尘土
扬尘	能见度在 1–10 km	地面沙和尘土被卷起
沙尘暴	水平能见度小于 1 km	地面沙大量被吹起, 空气浑浊且能直接观测
强沙尘暴	水平能见度小于 200 m	
特强沙尘暴	水平能见度小于 50 m	强风浓沙尘

学者试图寻找其与沙尘运动的关系, Wang等人^[17]观测结果表明, VLMSs的低速区和高速区分别抑制和增强了流向和垂向的起尘通量, 而在更高处, VLMSs的高速区同时增强了流向和垂向的沙尘输运. Jacob等人^[18]通过数值模拟, 发现地表直接影响沙尘流体起动的极端切应力受中性大气边界层中的LSMs和VLMSs的低动量区和高动量区影响, 并推测LSMs和VLMSs能够产生复杂的沙尘“输运通道”. 以上研究结果对风力机/风电场与沙尘输运的相互关系研究有非常大的意义. 沙尘天气下沙尘浓度沿高度呈指数递减分布, 具体指数参数与下垫面特征相关, 在戈壁沙漠地带, 30 m以上沙尘浓度沿高度基本无变化^[19]; 粒径分布与沙尘天气等级、当地植被和距离沙源地远近有关, 粒径大小与传输距离大致成反比关系^[20].

另外, 有学者对沙尘暴中电场特征, 以及强沙尘暴的沙墙结构做了相关研究^[21–23]. 因与风力机运行关系不大, 不再赘述. 如有读者需要, 可自行查阅.

2.4 沙尘天气中颗粒特征

在一场沙尘输运过程中, 各尺寸的颗粒在空间高度分布不同. 如前所述, 尺寸约70 μm 以上的颗粒以跃移运动形式活跃于近地表(距地面1–2 m); 近地表之外的高度范围主要是小于70 μm 的颗粒以悬移运动存在^[24,25]. 随风速的增加, 大粒径的沙尘颗粒可能被裹挟至沙尘运动中. 资料表明, 浑善达克沙地50 m高度内的粒径为20–50 μm 和50–100 μm ^[26]; 甘肃民勤青土湖30 m高度内的粒径主要为70–105 μm ^[20]; 塔克拉玛干沙漠腹地80 m高度内的粒径为80–110 μm 和10–20 μm ^[27]. 由上述资料分析, 在风力机叶片工作高度下

的沙尘粒径主要以10–110 μm 为主.

同时随空间高度的增加, 沙尘暴中的沙尘质量浓度呈下降趋势, 但在不同高度区间内的下降速率不同, 其典型结果如图2所示, 在0–30 m的高度区间, 沙尘质量浓度下降较快, 当高度超过30 m后, 其质量浓度变化有所减缓.

2.5 我国风沙活动成因简介

我国主要风沙源地有巴丹吉林沙漠、古尔班通古特沙漠、腾格里沙漠等^[28]. 上述沙漠的主要成分以细砂为主, 但沙粒度特征存在差异^[29].

风沙成因则以甘肃河西走廊为例, 该地区位于青藏高原北坡的中纬度地带, 为大陆性干旱气候, 降水稀少, 此地冷暖空气交替频繁. 同时该地区地表干燥裸露、干土层厚, 在西部和北部有库姆塔格、巴丹吉林、腾格里沙漠, 为沙尘天气提供充足的沙源地. 受河西走廊地形走势影响, 大风天气极易导致该区域沙尘频发. 据统计, 2009–2018年酒泉共发生沙尘日数120 d, 其中沙尘暴22 d, 主要发生在4–6月, 并且沙尘暴天气发生时大气边界层高度超过3100 m^[30].

3 沙尘天气对风力机叶片的影响

沙尘天气的存在导致风力机叶片表面破坏是一种

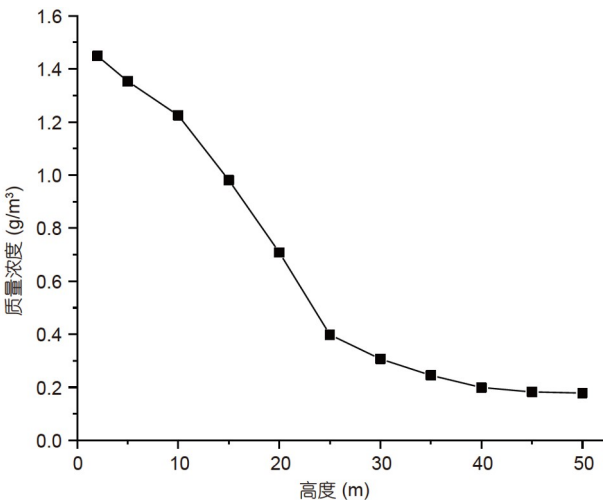


图 2 巴丹吉林强沙尘暴时浓度分布(作者测于民勤治沙站3号塔2008年4月12日)

Figure 2 Concentration distribution during strong sandstorm in Badan Jilin (measured by the author at Tower 3 of Minqin sand control station on April 12, 2008).

不可避免的自然现象. 叶片作为风力机主要吸收风能的零部件, 其颗粒冲蚀磨损导致的问题也是各大风电企业主要面临的难点之一, 因此更应关注并解决由沙尘环境引发的叶片表面粗糙度导致的叶片性能退化和失效等问题.

3.1 叶片损伤机理

现阶段研究表明, 磨损主要由叶片表面疲劳决定^[31], 由此引发的气动特性改变主要受磨损宽度影响. 当翼型遭受风沙冲蚀作用时, 其几何外型的变化如图3所示, 并作如下解释^[32-35].

风沙颗粒持续撞击叶片表面造成破坏, 在磨损初期仅形成几何尺寸为毫米级的砂眼; 随风沙颗粒持续的冲蚀作用, 颗粒有机会撞击并深入到砂眼内部, 并在砂眼内部产生漩涡, 这种漩涡导致颗粒对砂眼内壁产生撞击, 扩大砂眼尺寸; 上述行为导致砂眼逐步演化成小坑, 同时随冲蚀作用的累积, 沿翼型气动外型方向小坑与砂眼数量增加, 并逐步连结形成局部脱层; 局部脱层随冲蚀行为的加剧, 相互连结形成更大面积脱层, 翼型几何外型最终被破坏. 在不同磨损阶段, 流场响应程度不同, 当前缘磨损为砂眼和小坑时, 此时翼型的升、阻力系数变化不大; 随冲蚀行为的加深, 脱层的形成导致翼型升阻力对攻角响应显著, 并导致翼型表面出现台阶流, 气流绕过台阶发生分离, 随后附着在翼型表面进行流动^[36].

3.2 基于叶片损伤机理的数值研究

3.2.1 叶片表面气动变化

沙尘颗粒的冲蚀作用造成风力机翼型表面粗糙度的改变, 而粗糙度的变化又会对风力机翼型的升阻力系数产生显著影响^[37-44]. 在风沙持续侵蚀下, 风力机翼磨损区域从叶尖逐渐向叶根发展, 且较多地集中在压力面并从叶片前缘向后缘发展, 距叶尖距离越远磨损程度越小. 翼型升力系数则随前缘磨损程度的增大而大幅度降低, 特别是大攻角工况, 其升力系数降低更加明显, 最大可降低50%以上, 阻力系数可增大为原来的3-5倍, 导致风轮输出功率降低, 如表3所示.

表3总结了部分翼型在不同两相流场中气动数据的变化. 不难发现, 不同翼型在遭受风沙冲蚀后, 升阻力系数的变化存在差异, 该差异性可相对笼统地解释为由翼型自身几何外形和环境工况的不同所影响. 进一步地, 风沙环境中的叶片表面气动特性变化和侵蚀作用因素可以归纳为环境条件: 来流风速、叶片攻角、沙尘浓度等; 碰撞颗粒条件: 颗粒粒径、颗粒形状等; 翼型自身条件: 翼型形状. 其影响规律如下^[45-51].

(1) 针对来流风速, 主流研究有相对统一的说法, 即随着风速的增大, 颗粒裹挟的动能增加, 造成更为严重的破坏. 叶尖处合速度远大于叶根处, 其磨损率是叶根处的10-20倍以上^[45].

(2) 随叶片攻角的改变, 磨损区域从叶片前缘蔓延至整个压力面, 并且随着攻角的增大, 翼型表面发生流

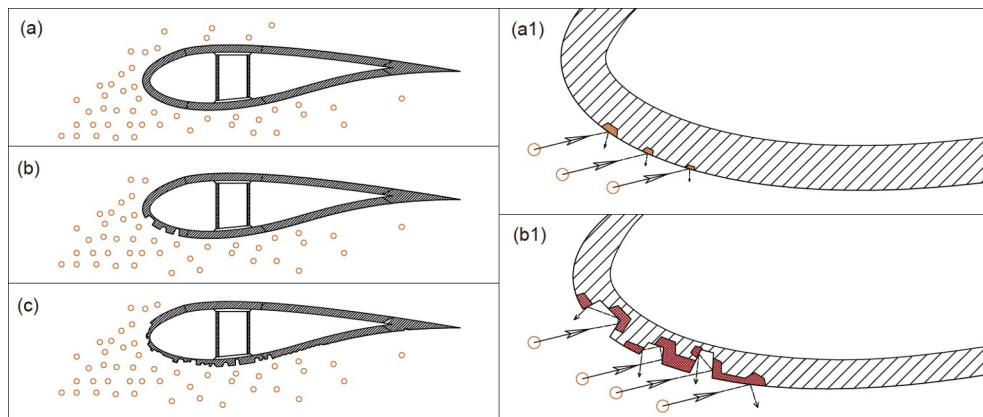


图3 (网络版彩图)叶片磨损随时间变化. (a) 叶片在风沙环境中但未遭侵蚀; (a1) 颗粒侵蚀; (b) 砂眼与小坑的形成; (b1) 砂眼与小坑的进一步扩大, 局部脱层的形成; (c) 大面积脱层的出现, 叶片遭受破坏

Figure 3 (Color online) Variation of blade wear with time. (a) The blade is in the wind sand environment but not eroded; (a1) particle erosion; (b) the formation of sand holes and pits; (b1) the further expansion of sand holes and pits and the formation of local delamination; (c) the emergence of large-area delamination and the destruction of the blade.

表 3 两相场中的翼型气动数据变化

Table 3 Variation of airfoil aerodynamic data in two-phase field

翼型	研究内容
DU 96-W-180	磨损造成的前缘脱层会导致明显的台阶流, 此时升力减少, 阻力大幅上升 ^[37] . 通过实验测得, 由前缘侵蚀导致阻力增加了6%–500%, 并导致升力系数大幅降低, 预计风力机年发电量损失可高达25% ^[38] . 而数值研究表明, 其升力系数减少了7%, 阻力系数增加了40% ^[39]
NACA 0012	当颗粒粒径小于0.3 μm , 沙尘颗粒粒径对升阻力特性影响较大, 升力系数减少24.29%, 阻力系数增大229.99% ^[40]
FFA-W3-211	升阻比下降13% ^[41]
S822	升阻比下降11% ^[41]
DU-W2-250	升阻比下降12% ^[41]
SD2030	升阻比下降15% ^[41]
NACA 64-618	污染和侵蚀条件使叶片的升力系数降低53%, 阻力系数增加314% ^[42] , 升阻比下降17% ^[41]
S809, S819	将沙粒引入主流通常会降低翼型上的压力系数, 从而降低阻力系数. 这种效应对细砂颗粒更为显著, 并随着颗粒变得更粗而逐渐消失 ^[43,44]

动分离, 此时颗粒更易卷入尾流区域. 但攻角达到失速攻角时, 翼型绕流场受颗粒影响反而不如小攻角明显^[46,47].

(3) 颗粒质量浓度的增大均会显著地导致翼型升力系数增大与阻力系数减小. 但颗粒质量浓度的改变仅会增大单位时间内的磨损量, 冲蚀率与磨损区间不受其影响.

(4) 针对颗粒粒径, 具体表现如下: (i) 不同颗粒粒径对流场的响应程度有所不同, 颗粒粒径越大, 流动越不受空气流动影响, 并对壁面的撞击能力增强, 反弹距离也随之增大; (ii) 粒径的增大会导致升力系数呈先减后增的状态, 但随粒径的进一步增大, 升力系数最终会趋于平稳, 阻力系数则持续上升^[48]; (iii) 颗粒粒径影响翼型周围绕流流场, 大粒径会削弱, 小粒径会导致翼型吸力面的流动分离提前; (iv) 翼型尾流状态随粒径的增大先呈现不同于清洁空气的流动状态, 但随粒径进一步增大, 尾流流动状态又逐渐向清洁空气靠拢.

(5) 针对不同颗粒形状, 文献^[49]采用形状因子法(目标颗粒同体积大小的球体表面积与目标颗粒实际表面积的值)描述来流颗粒外形特征, 表明翼型最大磨损率变化规律不随颗粒外型改变, 且在相同工况下, 形状因子越小, 越不容易发生磨损.

(6) 不同翼型几何外型其抗磨损能力有所区别^[50], 最具备抗磨损能力的翼型几何外型是前缘上部为球型下部分相对平整^[45]. 此外高升力系数翼型与大质量轮毂对风力机运行周期有益.

(7) 脱层深度与脱层范围也是影响翼型气动性能的主要原因之一. 文献^[51]针对不同脱层位置做了详细研究, 关键结论如下: (i) 翼型前缘处的脱层导致前缘流动变为台阶流, 并导致翼型提前进入失速状态; (ii) 前缘脱层显著的影响翼型升阻力系数变化, 并呈正相关, 即脱层深度越大, 升阻力系数变化越明显. 如: 相对光滑翼型来说, 脱层深度为0.5% C (C 为翼型弦长)、攻角为 16.2° 时, 升力损失率最高为55.08%; (iii) 改变翼型攻角会导致压力面脱层翼型发生局部压力突变, 并随着脱层范围增加, 突变越显著.

3.2.2 叶片表面边界层转捩

磨损导致叶片表面粗糙度的改变, 并由此引发翼型边界层的转捩过程(层流边界层随表面粗糙度的增加发生不完全转捩), 转捩点沿壁面向前缘移动, 尾缘提前发生边界层分离^[52–54]. 多数研究表明^[55,56], 流动分离导致尾缘涡产生(此现象在大攻角下更加明显); 翼型表面层流分离泡会随着颗粒相的加入而变薄, 弦向跨度变小, 翼型吸力面层流分离泡位置提前, 翼型表面转捩提前发生(颗粒直径越小, 转捩位置提前越多), 边界层厚度也略小于清洁空气条件.

3.2.3 颗粒斯托克斯数对冲蚀行为影响

颗粒Stokes数可以描述颗粒对流场的响应行为, 即是否会脱离流场而独立运动. 将颗粒Stokes数引入风力机翼型冲蚀磨损行为中, 可得如下结论.

(1) 翼型是否发生磨损可由临界颗粒Stokes数判断^[57]: 当粒子的颗粒Stokes数小于某特定值时, 颗粒随流场运动并绕过叶片翼型, 不会与叶片发生碰撞. 反之, 颗粒与叶片发生碰撞并导致叶片表面破损.

(2) 通过改变工况并保持颗粒Stokes数不变, 翼型的冲蚀率也不会发生改变^[58,59].

(3) 翼型是否发生磨损也受颗粒形状、相对厚度、几何外型等因素影响, 但上述因素仅在较小范围内改变翼型临界磨损的颗粒Stokes数范围. 翼型开始发生临界磨损的颗粒Stokes数随颗粒形状因子的减小而增大^[60].

(4) 0.018–0.022可以作为叶片发生磨损的临界Stokes数^[57].

3.3 基于叶片损伤机理的实验研究

翼型受到沙尘冲蚀后的气动特性与商用风力机受风沙环境影响的实验结论和数值仿真结果一致, 如Gaudern^[61]以实际风电机组叶片(由维斯塔斯提供)为研究对象进行气动实验, 研究发现磨损最严重区域的翼型升力系数下降6%, 阻力系数增加86%; Timmer^[62]以wrap-around和NACA翼型为研究对象, 对比原光滑翼型与前缘粗糙翼型, 研究发现, 当翼型粗糙度改变时, 升力系数降低(wrap-around翼型降低18.5%, NACA翼型降低4.5%), 阻力系数增加(wrap-around翼型增加50%, NACA翼型增加20%); Soltani等人^[33]以660 kW风力机翼型段为研究对象, 发现遭受表面污染后, 翼

型最大升力系数降低了35%. 综上所述表明翼型表面粗糙度的改变引发翼型升力系数的降低与阻力系数的提高. 对于实际风力机, 沙尘环境下颗粒粒径、砂石沉积等因素对输出功率均有影响, 沙尘沉积区域主要集中在前缘附近, 且越接近叶尖沙尘沉积厚度越大, 因此风轮的输出功率降低; Khalfallah等人^[63]对位于埃及的赫尔格达风电场进行了长期的风力机叶片风沙堆积和磨损作用实验, 结果如图4所示. 由结果可知, 随风力机运行时间的积累, 机组发电功率损失增加, 并在9个月时发电功率损失已超过50%, 实验结果表明叶片的磨损对整个风力机机组气动性能影响显著.

叶片涂层材料冲蚀实验解释了颗粒在近边界层附近的碰撞机理, 相关研究人员结合国内实际情况, 针对风力机叶片涂层材料(漆膜和玻璃纤维复合材料)进行冲蚀磨损试验, 探究颗粒碰撞规律与材料冲蚀特性, 其规律如下.

材料属性大致可分为塑性与脆性, 并具备截然不同的物理现象. 其中玻璃纤维复合材料展现脆性材料属性, 磨损量随冲击角度增大而增加^[64,65], 叶片表面涂层则展现塑性材料属性^[66,67]. 前期研究发现塑性材料具有较好的弹性, 具备抵消来自正向的凿削作用能力, 但对水平方向上的切削作用抗性较弱, 即在低冲击角度下涂层损失的质量更多^[68]. 冲击速度影响涂层质量损失大小, 表现为质量损失随冲击速度增加而增大. 材料属性影响最大冲击角度出现的位置, 并存在低速冲蚀和高速冲蚀两个阶段^[67]. 冲蚀颗粒粒径变化

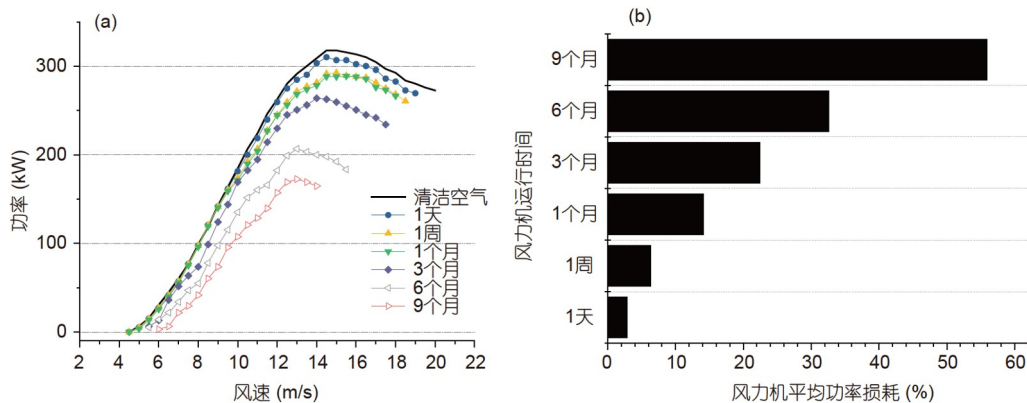


图4 (网络版彩图)不同运行时间风力机发电效率随风速变化和功率损失. (a) 不同运行周期下沙粒对风力机功率的影响; (b) 不同运行周期(沙尘厚度)对风力机平均功率损耗(%)的影响. 图片取自文献[63]. Copyright©2007, Elsevier B.V.

Figure 4 (Color online) Variation of wind turbine power generation efficiency with wind speed and power loss after different operation times. (a) Effect of dust for various operation periods on the power curve of turbine; (b) effect of various operation periods (dust thickness) on the mean power loss (%) of turbine. Revised according to ref. [63]. Copyright© 2007, Elsevier B.V.

也影响靶材的冲蚀率, 玻璃纤维复合材料存在“尺寸效应”, 随着粒径的减小, 冲蚀率先增大后减小^[64].

4 沙尘天气对风力机其他部件的影响与防护手段

4.1 沙尘天气对塔筒的影响

塔筒是风力机关键零部件之一, 保证风轮、轮毂和机舱处在合适的风资源较丰富的高度, 并作为主要支撑部件保证风力机机组正常运行. 现阶段塔筒形式如图5所示, 拉线式塔架主要应用在风力机早期阶段的微、小型机组, 包括单管拉线塔架和桁架拉线塔架; 中、小型机组常采用不设拉线的桁架塔架; 随着技术的发展及风力机尺寸的增大, 现阶段风力机更多地应用具备更强支撑能力的圆台(棱台)式塔架^[69-71]. 小风力机也采用张线支撑式塔筒^[69].

塔筒结构较为简单, 主要分为内部钢结构与保护涂层, 涂层能有效地防止塔筒遭受环境颗粒造成的腐蚀和冲蚀. 塔筒空间高度更低, 在沙尘天气下塔筒相比于风轮部分会遭受更大粒径的颗粒撞击, 受到的破坏作用更强烈, 尤其是1 m以下的部位^[72]. 当涂层发生脱落行为后, 塔筒钢结构部分暴露在恶劣的工作环境中, 并有风轮转动带来的周期性载荷作用在塔筒受损处, 加剧了风电机组稳定性破坏过程, 体系的安全性和耐久性随之下降^[73].

4.2 沙尘天气对风力机机舱的影响

机舱包含发电机、齿轮箱、含电子元件的控制系统等, 也是风力机核心部件之一. 而风电机组所处的恶劣沙尘天气中沙尘颗粒可能会造成齿轮箱损坏、轴承

损坏、发电机短路故障、变流器功率模块损坏、控制系统失灵和警告^[74]. 齿轮传动系统作为连接风能与电能转化的桥梁, 易因风沙侵害引发运行阶段不规则噪声与振动, 导致传动系统机械效率的降低与机组发电量的减少^[75]. 由沙尘颗粒引发的故障可归类为磨料磨损, 这是指齿轮箱中摩擦副之间夹带坚硬磨粒, 或硬质凸出物(包括硬金属)相互摩擦引起表面材料损失的现象.

按齿轮箱磨损程度, 可分为轻度磨损、中度磨损以及重度磨损. 以文献^[76]风电场案例为例, 受风沙颗粒影响, 齿轮箱表面材料损失, 在轻度磨损时期机组低速轴和行星轮叶片侧轴承出现轻微擦伤; 当磨损程度进行到中度磨损, 运行阶段齿轮箱出现异常响声, 内齿圈有点蚀现象, 轴承滚动体表面出现剥落; 当磨损程度为重度磨损时, 内齿圈有大量点蚀, 行星轮侧轴承有严重剥落.

4.3 沙尘环境下风力机关键零部件的防护手段

叶片是风力机机组最重要的零部件之一, 它是吸收风能最为关键, 也是直接面对环境颗粒影响的零部件, 因此对其防护是重中之重. 现阶段比较认可的风电叶片防护方式是进行叶片表面工程的优化处理, 简单举例, Swaminathan等人^[77]开发了一种具备抗冲蚀性能的纳米涂层材料, 能有效减少叶片表面的冲蚀现象; 另一种保护措施是在叶片前缘位置添加保护带, 该方案被证明可行^[78], 但保护带改变了叶片的几何外形, 在小冲击攻角下造成一定的气动性能损失(阻力增加5%–10%^[79]). 随冲击角的增大, 保护带对气动性能的影响减弱, 甚至在某些情况下提升了翼型的气动特性^[80]. 研究表明, 前缘保护带会略微地减少风力机叶片的气动性能, 但不加保护带的叶片因磨损造成的气动性能下降更厉害.

风沙对塔筒影响行为相对简单, 针对风力机塔筒防护的研究更多是针对塔筒涂层的优化, 选用性能优异的涂层可以更好地抵抗风沙侵蚀.

针对由风沙造成的齿轮箱失效, 现阶段常见的防护方式是对密封系统加以改进, 这可以保证风电机组在运行状态时齿轮箱内部润滑油具有良好的密封性, 同时, 防止外界风、沙、雪等杂物进入到齿轮箱内部造成污染. 同时加强齿轮箱运行状态检测和远程故障诊断^[81](由风沙引起的电机齿轮振动信号易被噪声淹

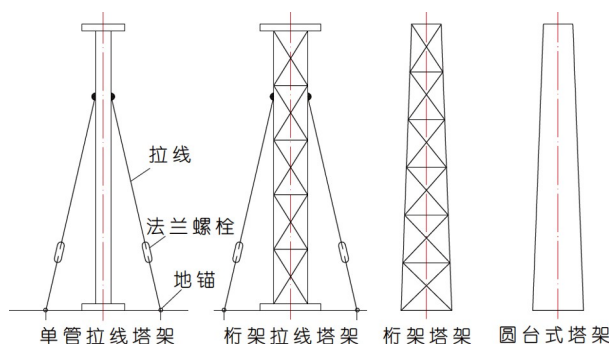


图5 (网络版彩图)塔架的基本形式
Figure 5 (Color online) Basic form of tower.

没^[82], 可采用小波降噪在时域和频域同时进行降噪, 区分信号的突变和噪声^[83]), 做好事先预警, 有效避免机组齿轮箱事故.

5 研究展望

针对沙尘环境下的风力机力学特性, 研究人员对沙尘产生的原因和运动机理、风沙环境对风力机叶片和其他关键部件的影响开展相应研究, 剖析了风沙环境对风力机影响的根本原因. 可以预见, 随数值模拟技术的发展与试验手段的进步, 更多沙尘环境对风力机零部件的力学特性将会被揭示. 其研究成果很大程度上推进风力机在沙尘(沙漠、荒漠化)环境下的发展与应用, 但目前研究多局限在单一领域, 尚未研制出切实可行的沙尘防护手段.

因此, 建议今后相关研究着重以下方向.

(1) 沙尘环境下风力机各子项课题(沙尘输运、力学特征、损伤机理)的边界条件与研究目标逐渐呈体

系化, 多学科交叉成主流趋势, 并在风力机相关研究中已有应用, 如: 考虑湍流脉动和湍流结构的大涡模拟在风力机上应用, 但现阶段各项子课题间更深层次的联系仍需进一步的深入研究.

(2) 沙尘环境下的风力机保护策略: (i) 机组形式是否含有齿轮箱(双馈或直驱)与齿轮箱是否具备良好的密封性, 这决定风沙环境是否会对机舱内部齿轮箱造成破坏; (ii) 机组叶片几何外形、叶片工艺形式、叶片漆膜成分以及是否含有前缘保护膜, 这些因素决定叶片能否具备长久的抵抗风沙侵蚀能力; (iii) 塔筒高度、形式、漆膜成分等因素决定塔筒是否会被破坏. 现阶段已有学者针对各关键零部件提出相应的保护措施, 但仍缺少系统性的防护策略.

本文提出的展望难以覆盖所有研究内容, 上述两点仅作为参考. 即现阶段关于沙尘环境对风力机的影响更多关注于单一变量引发的物理特性研究, 对于包含环境因素和机组结构特点的强非线性研究存在较多空白. 因此相关研究人员仍面临严峻的挑战.

参考文献

- 1 Enevoldsen P, Xydis G. Examining the trends of 35 years growth of key wind turbine components. *Energy Sustain Dev*, 2019, 50: 18–26
- 2 Ziliani R. The estimation of noise levels in residual areas surrounding an operating wind farm. *Noise Control Eng J*, 2011, 59: 23–29
- 3 Keegan M H, Nash D H, Stack M M. On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades. *J Phys D-Appl Phys*, 2013, 46: 383001
- 4 Vigneshwaran S, Uthayakumar M, Arumugaprabu V. A review on erosion studies of fiber-reinforced polymer composites. *J Reinforced Plasts Compos*, 2017, 36: 1019–1027
- 5 Chi M X. Remote Sensing of Land Uses in Dust Source Regions of East Asia (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2020 [池梦雪. 东亚沙尘源区土地利用类型的遥感分析. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2020]
- 6 Wu Z. Aeolian Geomorphology (in Chinese). Beijing: Science Press, 1987 [吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987]
- 7 Tsoar H, Bagnold, R.A. 1941: The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen. *Prog Phys Geography-Earth Environ*, 1994, 18: 91–96
- 8 Shao Y. Physics and Modelling of Wind Erosion. Dordrecht: Springer, 2008
- 9 Hu Y Q, Guang T N. Development of the strong dust storm and dry squall line—A mechanism analysis on generating black storm (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 1996, 15: 178–185 [胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴发展与干飚线-黑风暴形成的一种机理分析. 高原气象, 1996, 15: 178–185]
- 10 Zhang J X. Large Eddy Simulation Study of Effects of Convective Cold Pools on Dust-Uplift and Transportation of Black Storm (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2018 [张君霞. 对流冷池对黑风暴沙尘抬升和传输影响的大涡模拟研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2018]
- 11 Knippertz P, Todd M C. Mineral dust aerosols over the Sahara: Meteorological controls on emission and transport and implications for modeling. *Rev Geophys*, 2012, 50: RG1007
- 12 Crouvi O, Dayan U, Amit R, et al. An Israeli haboob: Sea breeze activating local anthropogenic dust sources in the Negev loess. *Aeolian Res*, 2017, 24: 39–52
- 13 Roberts A, Knippertz P. Haboobs: Convectively generated dust storms in west africa. *Weather*, 2012, 67: 311–316

- 14 Alden A, Diab A. A preliminary study of the blade erosion for a wind turbine operating in a dusty environment. In: Proceedings of the ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference & Exposition. Seoul, 2016. 49873: V009T46A010
- 15 Zeng Q C, Hu F, Cheng X L. The mechanism of dust entrainment by gustwind (in Chinese). Climatic Environ Res, 2007, 12: 251–255 [曾庆存, 胡非, 程雪玲. 大气边界层阵风扬尘机理. 气候与环境研究, 2007, 12: 251–255]
- 16 Hutchins N, Nickels T B, Marusic I, et al. Hot-wire spatial resolution issues in wall-bounded turbulence. Fluid Mech, 2009, 635: 103–136
- 17 Wang G, Zheng X. Very large scale motions in the atmospheric surface layer: A field investigation. J Fluid Mech, 2016, 802: 464–489
- 18 Jacob C, Anderson W. Conditionally averaged large-scale motions in the neutral atmospheric boundary layer: Insights for aeolian processes. Bound-Layer Meteorol, 2017, 162: 21–41
- 19 Wang G, Zheng X, Tao J. Very large scale motions and PM10 concentration in a high-Re boundary layer. Phys Fluids, 2017, 29: 061701
- 20 Gu H H. Features of Sand-Laden Flows and PM10 Concentration in the Atmospheric Surface Layer (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2019 [顾海华. 大气表面层含沙流动及PM10的流动规律. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2019]
- 21 Zhang H, Zhou Y H. Reconstructing the electrical structure of dust storms from locally observed electric field data. Nat Commun, 2020, 11: 5072
- 22 Wang X, Zheng X, Wang P. Direct numerical simulation of particle-laden plane turbulent wall jet and the influence of Stokes number. Int J Multiphase Flow, 2017, 92: 82–92
- 23 Huang H J. Numerical Studies on Sand-Dust Storms and Sand Wall Morphology Based on the Modeling of the Very-Large-Scale Motions (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2018 [黄豪杰. 基于超大尺度结构模化的沙尘暴及沙墙型态数值研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2018]
- 24 Heywood H. The physics of blown sand and desert dunes. Nature, 1941, 148: 480–481
- 25 Duffa G. Ablative thermal protection systems modeling. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013
- 26 Qu N, Yan D R, Guo C F. Study on characteristic of dust and particulate matter in Duolun ecological station of Hunshandake Sandy land (in Chinese). J Anhui Agricul Sci, 2020, 48: 74–77 [曲娜, 闫德仁, 郭城峰. 浑善达克沙地多伦生态站沙尘及颗粒物特征研究. 安徽农业科学, 2020, 48: 74–77]
- 27 Dai Y Y. Vertical Distribution of Characteristics of Dust Aerosols in the Near-Surface in Hinterland of Taklimakan Desert (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Urumqi: Xinjiang University, 2016 [代亚亚. 塔克拉玛干沙漠腹地近地层沙尘气溶胶的理化特性垂直分布研究. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016]
- 28 Sun J, Zhang M, Liu T. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960–1999: Relations to source area and climate. J Geophys Res, 2001, 106: 10325–10333
- 29 Song J, Chun X, Bai X M, et al. Review of grain size analysis in China desert (in Chinese). J Desert Res, 2016, 36: 597–603 [宋洁, 春喜, 白雪梅, 等. 中国沙漠粒度分析研究综述. 中国沙漠, 2016, 36: 597–603]
- 30 Ren G P, Wei Y P, Ke W, et al. Characteristics of atmospheric-boundary-layer height and its relationship with sand-dust weather in Jiuquan of Gansu province (in Chinese). J Arid Meteorol, 2020, 38: 979–986 [任桂萍, 魏雅鹏, 柯伟, 等. 甘肃酒泉地区大气边界层高度变化特征及其与沙尘天气的关系. 干旱气象, 2020, 38: 979–986]
- 31 Slot H M, Gelinck E R M, Rentrop C, et al. Leading edge erosion of coated wind turbine blades: Review of coating life models. Renew Energy, 2015, 80: 837–848
- 32 Gharali K, Johnson D A. Numerical modeling of an S809 airfoil under dynamic stall, erosion and high reduced frequencies. Appl Energy, 2012, 93: 45–52
- 33 Soltani M R, Birjandi A H, Seddighi Moorani M. Effect of surface contamination on the performance of a section of a wind turbine blade. Sci Iranica, 2011, 18: 349–357
- 34 Lu J Q, Mou S X, Li Q Z. Progress on leading edge protection technology of wind turbine blades (in Chinese). FRP/Composite, 2015, 7: 5 [卢家骐, 牟书香, 李权舟. 风电叶片前缘防护技术进展. 玻璃钢/复合材料, 2015, 7: 5]
- 35 Enikeev G, Abdulin A, Yanibaev R, et al. Analysis of the particle motion dynamics in the compressor to accompany erosion resistance testing of blade material. In: Proceedings of the 2020 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines (DVM). Samara, 2020
- 36 Li D S, Wang C Z, Li Y R, et al. Influence of blade leading edge wear morphology on aerodynamic performance of wind wing (in Chinese). Trans Chin Soc Agricul Eng, 2017, 33: 7 [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. 农业工程学报, 2017, 33: 7]
- 37 Wang C Z. Research on Erosion Characteristics of Wind Turbine Blades Under Sand-Wind Environment (in Chinese). Dissertation for Master's

- Degree. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016 [王成泽. 风沙环境下风力机叶片的冲蚀磨损特性研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州理工大学, 2016]
- 38 Oka Y I, Okamura K, Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Erosion*, 2005, 259: 95–101
- 39 Fiore G. A Method to Estimate Wind Turbine Blade Damage and to Design Damage Resilient Blades. Dissertation for Doctoral Degree. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2016
- 40 Dong L. Research on Gas-Solid Aerodynamic Characteristics of Wind Turbine Airfoil Under the Sand-Wind Environment (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014 [董麟. 风沙环境下风力机翼型的气固两相流动特性研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州理工大学, 2014]
- 41 Jiao L Y. Investigation on Influence of Airfoils and Roughness on Aerodynamic Performance of Wind Turbine Blade (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2015 [焦灵燕. 翼型及粗糙度对风力机叶片气动性能影响的初探. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2015]
- 42 Han W, Kim J, Kim B. Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines. *Renew Energy*, 2018, 115: 817–823
- 43 Khakpour Y, Bardakji S, Nair S. Aerodynamic performance of wind turbine blades in dusty environments. In: Proceedings of the ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 8: Heat Transfer, Fluid Flows, and Thermal Systems, Parts A and B. Seattle, Washington, 2007. 483–491
- 44 Douvi D, Margaris D, Davaris A. Aerodynamic performance of a NREL S809 airfoil in an air-sand particle two-phase flow. *Computation*, 2017, 5: 13
- 45 Zhao Z X. Study on the Characteristics of Wind Turbine Erosion in Sand-Wind Environment Based on the Particle Stokes Number (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018 [赵振希. 基于颗粒Stokes数的风力机叶片冲蚀磨损特性研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州理工大学, 2018]
- 46 Fiore G, Fujiwara G E C, Selig M S. A damage assessment for wind turbine blades from heavy atmospheric particles. In: Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, 2015
- 47 Fiore G, Selig M S. A simulation of operational damage for wind turbine blades. In: Proceedings of the 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference. Atlanta, 2014. 2014–2848
- 48 Caboni M, Minisci E, Riccardi A. Aerodynamic design optimization of wind turbine airfoils under aleatory and epistemic uncertainty. *J Phys Conf Ser*, 2018, 1037: 042011
- 49 Wang Y E. Effect of Sand Shape and Size Distribution on the Erosion Characteristics of Wind Turbine Airfoil (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019 [王亚娥. 沙尘颗粒形状和粒径分布对风力机翼型的冲蚀磨损影响. 硕士学位论文. 兰州: 兰州理工大学, 2019]
- 50 Fiore G, Selig M S. Optimization of wind turbine airfoils subject to particle erosion. In: Proceedings of the 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference. Dallas, 2015. 2015–3393
- 51 Li R N, Yu J X, Li D S, et al. Influence of leading edge delamination on flow field around airfoil and aerodynamic performance of wind turbine (in Chinese). *J Lanzhou Univ Tech*, 2020, 46: 7 [李仁年, 于佳鑫, 李德顺, 等. 前缘脱层对风力机翼型流场和气动性能的影响. 兰州理工大学学报, 2020, 46: 7]
- 52 Wang Y. Research on the Effects of Leading Edge Erosion on Horizontal Axis Wind Turbine Performance (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2017 [王燕. 磨蚀对水平轴风力机气动性能的影响研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2017]
- 53 Marzabadi F R, Soltani M, Masdari M. Experimental investigation of the leading edge roughness on the boundary layer of a plunging airfoil. In: Proceedings of the 27th International Congress of the Aeronautical Sciences. Tehran, 2010. 1–7
- 54 van Rooij R P J O M, Timmer W A. Roughness sensitivity considerations for thick rotor blade airfoils. *J Sol Energy Eng*, 2003, 125: 468–478
- 55 Somers D M. Design and Experimental Results for the S809 Airfoil. Technical Report. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, 1997
- 56 Giguère P, Selig M S. Aerodynamic effects of leading-edge tape on aerofoils at low Reynolds numbers. *Wind Energy: An Int J Progress Appl Wind Power Conv Tech*, 1999, 2: 125–136
- 57 Gong Y X. Research on Erosion and Stokes Number Critical Range of Wind Turbine Airfoil Under Sand-Wind Environment (in Chinese).

- Dissertation for Master's Degree. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2015 [龚玉祥. 风沙环境下风力机翼型的磨损及其 St 数临界范围研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州理工大学, 2015]
- 58 He G J. Numerical simulation of sand erosion behavior of wind turbine blade (in Chinese). *Appl Energy Tech*, 2017, 4: 9–13 [何广军. 风力机叶片侵蚀行为的数值模拟. 应用能源技术, 2017, 4: 9–13]
- 59 Li D, Zhao Z, Li Y, et al. Effects of the particle Stokes number on wind turbine airfoil erosion. *Appl Math Mech-Engl Ed*, 2018, 39: 639–652
- 60 Li D S, Wang Y E, Guo X D, et al. Effect of sand particle shape on wear characteristics and critical particle Stokes number of wind wing (in Chinese). *Trans Chin Soc Agricult Eng*, 2019, 35: 224–231 [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. 农业工程学报, 2019, 35: 224–231]
- 61 Gaudern N. A practical study of the aerodynamic impact of wind turbine blade leading edge erosion. *J Phys-Conf Ser*, 2014, 524: 012031
- 62 Timmer W. An overview of NACA 6-digit airfoil series characteristics with reference to airfoils for large wind turbine blades. In: *Proceedings of the 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. Orlando, 2009. 268
- 63 Khalfallah M G, Koliub A M. Effect of dust on the performance of wind turbines. *Desalination*, 2007, 209: 209–220
- 64 Dong X F. Gas-Solid Flow Erosion Wear Behavior of Key Materials of the Wind Turbine (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Urumqi: Xinjiang University, 2013 [董晓峰. 气固两相流下风力发电机叶片材料冲刷磨损行为研究. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013]
- 65 Yu D, Li X M, Yu Q, et al. Erosion wear of composite materials for wind turbine blades (in Chinese). *Trans Mater Heat Treat*, 2014, 35: 166–170 [余冬, 李新梅, 于青, 等. 风力发电机叶片复合材料的冲刷磨损. 材料热处理学报, 2014, 35: 166–170]
- 66 Huang C. The Experimental Research of Erosion-Wear Process of Wind Turbine Blade Coating by Wind-borne Sands (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016 [黄超. 挟沙风作用下风力机叶片涂层冲蚀磨损过程试验研究. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016]
- 67 Duan G L. Experimental Research on Erosion Wear of Steel-structure Coating in Sandstorm (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2014 [段国龙. 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损实验研究. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2014]
- 68 Liang E P. Wind Tunnel Erosion Wear Test and Model Study of Wind Turbine Blade Coating (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021 [梁恩培. 风力机叶片涂层风洞冲蚀磨损试验及模型研究. 硕士学位论文. 兰州: 兰州理工大学, 2021]
- 69 Dong X X. Study on Numerical Simulation of Wind Turbine Erosion (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Urumqi: Xinjiang University, 2017 [董旭旭. 风力发电机关键部件冲蚀磨损数值模拟研究. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017]
- 70 Li W S, Zhu L, Yao X Q. An overview on reinforced concrete tubular tower structures for horizontal axis wind turbines (in Chinese). *Special Struct*, 2014, 31: 5–10 [李书文, 祝磊, 姚小芹. 水平轴风力发电机组钢筋混凝土塔筒结构研究综述. 特种结构, 2014, 31: 5–10]
- 71 Li H M, Xu Y X. Development of coatings with excellent weatherability and wind erosion resistance (in Chinese). *Modern Paint Finish*, 2008, 7: 45–46 [李华明, 许玉霞. 高耐候抗风蚀涂料的研制. 现代涂料与涂装, 2008, 7: 45–46]
- 72 Zhao H X, Tian D, Wang H K, et al. Development status of wind turbine impeller technology (in Chinese). *Mech Rural Past Areas*, 2004, 4: 2 [赵慧欣, 田德, 王海宽, 等. 风力发电机叶轮技术的发展现状. 农村牧区机械化, 2004, 4: 2]
- 73 Hao F H, Xing Y M, Feng Y J, et al. Research on anti-erosion mechanical properties of steel structure coating (in Chinese). *J Build Mater*, 2013, 16: 1092–1096 [郝负洪, 邢永明, 冯玉江, 等. 钢结构表面涂层材料抗风沙冲蚀力学性能研究. 建筑材料学报, 2013, 16: 1092–1096]
- 74 Chen L L, Wang J, Yang L W, et al. Discussion on wind sand hazard and prevention measures for WTGS (in Chinese). *Northwest Hydropower*, 2021, 1: 73–75 [陈亮亮, 王佳, 杨丽薇, 等. 风力发电机组的风沙危害及防风沙措施探讨. 西北水电, 2021, 1: 73–75]
- 75 He S D, Jin Y L, Wang B R, et al. Wavelet de-noising and classification for gear vibration of wind turbine suffering from wind sand erosion (in Chinese). *Acta Energiæ Solar Sin*, 2016, 37: 1119–1124 [何孙东, 金英连, 王斌锐, 等. 风电机组齿轮振动的小波降噪与风沙侵害分类. 太阳能学报, 2016, 37: 1119–1124]
- 76 Wang Y, Liu J, Liang P P. Case analysis of wind turbine gearbox wear (in Chinese). *Plant Maint Eng*, 2020, 1: 2 [王圆, 刘静, 梁培沛. 风电机组齿轮箱磨损案例分析. 设备管理与维修, 2020, 1: 2]
- 77 Swaminathan V P, Wei R, Gandy D W. Nanotechnology coatings for erosion protection of turbine components. *J Eng Gas Turbines Power*, 2010, 132: 082104
- 78 Chinmay S. Turbine Blade Erosion and the Use of Wind Protection Tape. Dissertation for Doctoral Degree. Urbana: University of Illinois, 2012
- 79 Kidder N. Aerodynamic Impact of Leading Edge Surface Treatments on Wind Turbine Blades. Dissertation for Doctoral Degree. Columbus: The

Ohio State University, 2015

- 80 Sareen A, Sapre C A, Selig M S. Effects of leading-edge protection tape on wind turbine blade performance. *Wind Eng*, 2012, 36: 525–534
- 81 Sundukov A Y, Sundukov Y V, Plotnikov S M. Vibrodiagnostics of turboprop engine gearbox wear. *VESTNIK Samara University Aerospace Mech Eng*, 2015, 14: 193–201
- 82 Castillo E, Morales D P, Botella G, et al. Efficient wavelet-based ECG processing for single-lead FHR extraction. *Digital Signal Process*, 2013, 23: 1897–1909
- 83 Mohammed O A, Khan A A, El-Tallawy A M, et al. A wavelet filtering scheme for noise and vibration reduction in high-frequency signal injection-based sensorless control of PMSM at low speed. *IEEE Trans Energy Convers*, 2012, 27: 250–260

Summary of the impact of aeolian sand environment on key parts of wind turbine

LIANG EnPei¹, MA GaoSheng^{2*}, LI Ye^{2,3}, ZHENG XiaoBo³, WU FaMing⁴,
LI ShouTu² & LI DeShun²

¹ DongFang Electric Corporation Academy of Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 611730, China;

² School of Energy and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

³ State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

⁴ CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China

With the global implementation of the double carbon plan, the wind turbine industry has developed rapidly recently. The wind and sand environments significantly impact the operation of wind turbines. Wind farms are typically located in an area with large reserves of wind resources and can coexist harmoniously with the local environment. Although the desert area has substantial wind energy reserves, it is frequently affected by windy and dusty weather. First, this paper summarizes the distribution of deserts and the corresponding usage of wind energy globally; then, it briefly describes the core factors of the dusty weather, namely, sand source, dust movement form, and dust weather characteristics; finally, the research on the influence of wind and sand on the key components of wind turbines in the wind-sand environment is reviewed, and the research prospect is discussed. The purpose is to provide a reference for the technicians engaged in relevant research, hoping to support the collaborative improvement of wind energy usage and the desertification environment.

aeolian sand environment, wind turbine, wind energy utilization, environmental mechanics, aerodynamics

PACS: 47.55.Kf, 92.40.Gc, 89.30.Ee, 47.85.Gj

doi: [10.1360/SSPMA-2022-0143](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0143)