

风电紧固件的疲劳可靠性分析与结构优化设计浅析

葛少辉 王海斌 李兴标

浙江高强度紧固件有限公司 浙江绍兴 312000

【摘要】风电紧固件是风力发电机组的核心连接部件，承担传递载荷、固定关键结构重任，其疲劳可靠性关乎机组运行的安全与稳定。风电设备长期处于复杂工况，紧固件受交变载荷、环境腐蚀和振动冲击协同影响，易疲劳失效，甚至导致机组停机或安全事故。本文依托疲劳强度、可靠性工程及结构力学理论，搭建“失效机理 - 可靠性分析 - 结构优化”学术体系。系统剖析风电紧固件疲劳失效特性与影响因素，阐述疲劳可靠性分析的理论框架与评估逻辑，探究结构优化设计的理论机理与协同路径。结果表明，科学的分析能精准识别失效风险，针对性优化可大幅提升紧固件疲劳寿命与可靠性，为相关设计与应用提供理论参考。

【关键词】风电紧固件；疲劳可靠性；失效机理；结构优化设计；疲劳强度；交变载荷

Fatigue Reliability Analysis and Structural Optimization Design of Wind Turbine Fasteners: A Preliminary Study by

Ge Shaohui Wang Haibin Li Xingbiao

Zhejiang High-Strength Fasteners Co., Ltd., Shaoxing, Zhejiang 312000

【Abstract】 Wind turbine fasteners serve as critical connection components in wind power generation units, responsible for load transfer and structural fixation. Their fatigue reliability directly impacts operational safety and stability. Operating under complex conditions, these fasteners endure combined effects of alternating loads, environmental corrosion, and vibration impacts, making them prone to fatigue failure that may lead to unit shutdowns or safety incidents. This study establishes an academic framework integrating "failure mechanisms-reliability analysis-structural optimization" based on fatigue strength principles, reliability engineering, and structural mechanics. Through systematic analysis of fatigue failure characteristics and influencing factors, we elucidate the theoretical framework and evaluation logic for fatigue reliability analysis, while exploring the theoretical mechanisms and synergistic approaches for structural optimization design. Results demonstrate that scientific analysis enables precise identification of failure risks, and targeted optimization significantly enhances fastener fatigue life and reliability, providing theoretical references for related design and application practices.

【Key words】 wind turbine fasteners; fatigue reliability; failure mechanism; structural optimization design; fatigue strength; alternating load

一、引言

随着风电产业向大功率、高空化迈进，风力发电机组运行工况愈发复杂严苛。紧固件作为机组关键结构的核心连接载体，其连接可靠性关乎整体运行安全。机组长期服役时，紧固件持续承受多重交变载荷，还受复杂环境侵蚀，疲劳失效成为主要形式。这种失效渐进而隐蔽，初期裂纹难察觉，扩展至临界尺寸便会引发断裂，导致部件松动、结构失稳，甚至造成机组停机、叶片坠落等严重事故。当前研究多聚焦材料与工艺，对疲劳可靠性和结构优化理论探究不足，传统设计缺乏精准评估，致使紧固件疲劳寿命与机组不匹配。因此，强化疲劳可靠性分析、优化结构设计，对提升风电装备安全性、延长服役寿命意义重大。

二、风电紧固件的疲劳失效特性与影响因素

2.1 疲劳失效的核心特性与演化机理

风电紧固件疲劳失效是交变载荷与环境因素协同，使材料内部损伤累积直至断裂的渐进过程，有累积性、突发性与环境敏感性等特性，“疲劳裂纹萌生与扩展示意图”可直观呈现。从机理看，其分裂纹萌生、扩展与瞬时断裂三阶段。萌生阶段在表面或内部缺陷处因应力集中产生微小裂纹；扩

展阶段裂纹遵循最大切应力准则向内部延伸，损伤不可逆；瞬时断裂阶段裂纹达临界尺寸，承载力骤降而断裂。该失效是多种因素协同作用，且与工况、结构设计密切相关。

疲劳裂纹萌生与扩展示意图

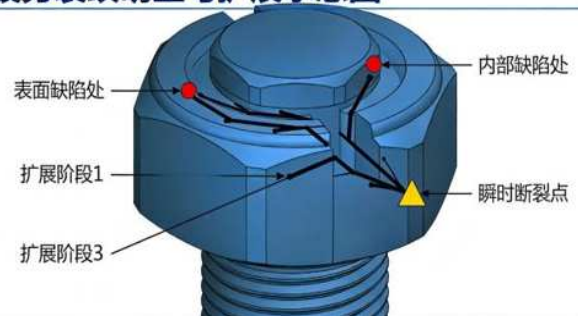


图1 疲劳裂纹萌生与扩展示意图

2.2 疲劳失效的核心影响因素解析

风电紧固件疲劳失效受载荷、材料、结构、环境四大因素影响，它们相互关联决定疲劳寿命与可靠性。图2中“风电紧固件服役过程交变载荷随时间变化”曲线，呈现了载荷动态特征这一核心驱动因素。该曲线显示，交变载荷幅值波动大、频率不稳定，幅值越大、频率越高，损伤累积越快，且载荷不均致局部应力集中，加速裂纹萌生扩展。材料因素决定本征性能，内部缺陷是裂纹萌生源，耐腐蚀、

耐磨性影响长期稳定性。结构因素聚焦几何设计,不合理设计引发应力集中,尺寸不匹配加剧局部损伤。环境因素则间接加速失效。

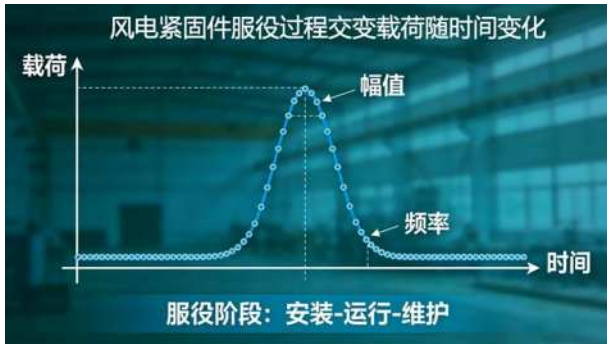


图2 载荷-时间历程图

2.3 风电工况对疲劳失效的耦合影响机理

风力发电机组特殊工况使紧固件面临多重载荷与环境因素耦合,大幅加剧疲劳失效风险。图3“多因素耦合作用加速疲劳失效示意图”分模块呈现此过程,核心机理是“载荷强化环境侵蚀-环境弱化抗疲劳能力”。交变载荷使局部材料塑性变形,破坏保护膜,为环境侵蚀创造条件形成腐蚀坑,加剧应力集中与裂纹萌生。腐蚀又降低材料力学性能,使紧固件更易损伤。低温增脆、高温引发蠕变,振动与交变载荷耦合产生共振,都进一步加速失效,这对疲劳可靠性分析与结构优化提出更高要求。

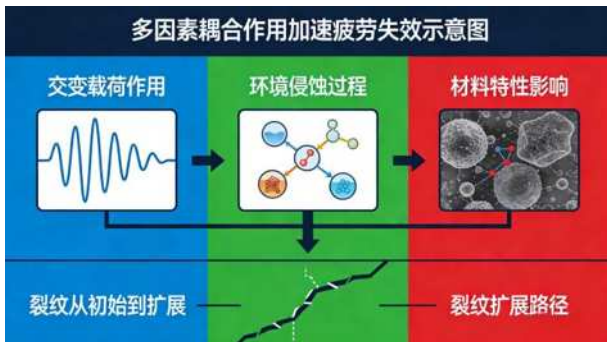


图3 多因素耦合作用示意图

2.4 传统设计的疲劳可靠性局限

传统风电紧固件设计以静态强度校核为主,存在理论与实践局限。设计理念上,忽视风电工况复杂与多因素耦合,仅按静态载荷计算强度,无法精准评估交变载荷与环境侵蚀下的疲劳失效风险,设计寿命与实际偏差大。设计方法上,过度依赖经验公式与标准,缺乏对适配性的深度分析,难解决局部应力集中等核心问题,且未建立完善疲劳可靠性评估体系,方案安全性无科学验证。结构设计追求标准化,忽视工况差异,参数优化不足。风电装备发展下,传统模式难满足需求,需构建新理论体系。

三、风电紧固件疲劳可靠性分析的理论基础

3.1 核心理论支撑体系

风电紧固件疲劳可靠性分析,依托疲劳强度、可靠性工程、断裂力学与结构力学四大理论,彼此融合协同。疲劳强度理论是评估寿命的基础,解析材料在交变载荷下的损伤规律,明确疲劳极限等关联,Miner理论、Manson-Coffin方程等助力损伤量化与寿命计算。可靠性工程理论提供量化工

具,建失效概率模型,结合统计方法量化可靠度、明确风险等级,概率统计等理论支撑数据处理与指标计算。断裂力学理论分析裂纹扩展,结构力学理论分析应力应变,二者分别预测裂纹寿命、定位失效风险。

3.2 疲劳可靠性分析的核心原则

风电紧固件疲劳可靠性分析要遵循“工况适配、多因素耦合、量化评估、风险导向”原则。工况适配需精准匹配实际服役工况,涵盖载荷、环境、安装状态等,如海上与陆上风电要分别考虑盐雾、大气腐蚀对疲劳性能的影响。多因素耦合强调兼顾载荷、材料等多因素协同,构建分析模型捕捉耦合效应对失效的加剧作用。量化评估要借助科学理论与数学模型,量化疲劳失效风险等指标,为结构优化提供数据支撑。风险导向聚焦风险等级划分,明确防控措施,优先解决高风险部位问题。

3.3 疲劳可靠性分析的关键维度与理论逻辑

风电紧固件疲劳可靠性分析有载荷谱分析、疲劳寿命预测、可靠性评估、失效风险识别四大关键维度,遵循“载荷解析-损伤量化-可靠性评估-风险定位”逻辑。载荷谱分析是基础,解析交变载荷参数构建模型,明确作用规律与应力特征,需结合现场数据与理论计算保证准确性。疲劳寿命预测基于疲劳强度与断裂力学理论,量化损伤累积与裂纹扩展速率,预测寿命并明确分布规律与影响因素。可靠性评估结合寿命预测与可靠性理论,计算可靠度等指标。失效风险识别则明确高风险模式与关键因素,指导结构优化。

3.4 疲劳可靠性评估的指标体系

科学的疲劳可靠性评估指标体系是精准分析的前提,构建要遵循“系统性、针对性、可量化”原则,涵盖寿命、可靠性、风险三大类指标。寿命指标量化疲劳服役能力,核心有疲劳寿命均值、标准差、特征疲劳寿命,分别反映平均服役时间、寿命分布离散程度、为设计提供参考。可靠性指标评估可靠运行能力,包括可靠度、累积失效概率、可靠寿命等。风险指标划分失效风险等级,有风险优先级数、失效后果严重度等。该体系要结合风电紧固件服役需求与安全等级,全面精准反映其疲劳可靠性水平。

四、风电紧固件结构优化设计的理论逻辑与实现机理

4.1 结构优化设计的核心思路与理论依据

风电紧固件结构优化设计以疲劳可靠性分析结果为基础,旨在达成“可靠性提升-重量优化-成本可控”的协同目标,理论依据为结构力学、疲劳强度与优化设计理论。结构力学理论助力优化结构参数,解析尺寸、形状与应力分布关系,改善载荷传递路径,减少应力集中,提升承载与抗疲劳能力。疲劳强度理论提供性能目标,确保优化后满足疲劳寿命与可靠性要求,降低局部应力幅、提升疲劳极限。优化设计理论为多目标优化提供求解逻辑,建立映射模型,求解最优参数组合,实现综合性能最优。

4.2 结构参数优化的实现机理

结构参数优化通过调控紧固件几何参数与结构形式改善应力分布、提升疲劳可靠性,核心机理为“参数调控-应力优化-损伤减缓”。螺纹结构优化是关键,优化牙型可增大承载面积、降低齿根应力集中,优化螺距与导程能使载荷均匀分布。头部结构优化聚焦过渡区域,增大过渡圆角半径减少应力集中,优化头部厚度与形状兼顾承载与轻量化。杆

部结构优化依承载需求调直径,受弯曲载荷时可优化截面形状。优化要结合应力分析结果,针对性调整高应力集中区域参数,实现应力均匀化,延缓疲劳失效。

4.3 界面协同优化的实现机理

界面协同优化通过改善紧固件与被连接件接触界面特性,来提升整体疲劳可靠性,其核心机理为“界面适配 - 载荷均匀传递 - 损伤防护”。接触界面粗糙度优化是关键,合理粗糙度能提升贴合度与摩擦力,防止相对滑动,减少磨损、疲劳损伤及应力集中,避免裂纹萌生。配合间隙优化要保证配合精度,间隙过大或过小都会影响疲劳性能。界面防护优化通过添加防护涂层或润滑剂,减少磨损腐蚀,缓解应力冲击。该优化需实现两者性能适配,确保载荷传递平稳均匀,防止因界面问题导致疲劳失效。

4.4 材料与结构协同优化的理论逻辑

风电紧固件疲劳可靠性既依赖结构设计,也与材料性能紧密相关,材料与结构协同优化是提升其疲劳可靠性的关键,理论逻辑为“材料本征性能 - 结构承载能力 - 协同适配优化”。材料选型要精准适配结构设计,依载荷分布与应力特征选有对应疲劳极限、韧性及耐腐蚀性的材料,高应力区选高韧性、高疲劳极限材料。结构设计要发挥材料优势,优化参数避免性能过剩或不足,高强度材料可优化尺寸轻量化。材料改性与结构优化协同,通过工艺提升材料性能,配合结构优化,如表面氮化处理配合螺纹优化,可提升抗疲劳能力。

4.5 多目标协同优化的理论逻辑

风电紧固件结构优化设计有疲劳可靠性、轻量化、经济性、工艺可行性等多目标,单一目标优化易使整体性能失衡,需构建多目标协同优化逻辑。其核心是明确各目标优先级与关联,通过权重分配和约束条件实现有机融合。疲劳可靠性是核心优先级,作为首要约束确保满足规定要求;轻量化靠优化参数减冗余材料实现;经济性通过优化设计与选材降低成本;工艺可行性保证适配现有工艺。协同优化要建立多目标模型,平衡矛盾,如轻量化与可靠性靠材料结构协同解决,最终得出综合性能最优方案。

五、应用价值与保障体系

5.1 核心应用价值:安全与效益协同提升

风电紧固件疲劳可靠性分析与结构优化设计,核心价值在于提升风电装备运行安全性与企业经济效益。安全性上,精准分析识别失效风险,针对性优化提升疲劳寿命与可靠性,降低失效概率,避免机组停机等事故,保障长期稳定运行,还能增强抗工况干扰能力,提升环境适应性。经济效益上,延长服役寿命减少运维成本,轻量化设计降低制造与运输成本,稳定运行提高发电量。从行业看,相关理论技术可推广至其他核心连接部件,推动风电产业向高可靠性、低成

本升级,助力新能源产业高质量发展。

5.2 技术保障:理论落地的规范与支撑

疲劳可靠性分析与结构优化设计理论的有效落地,需完善技术保障体系,涵盖设计规范、仿真验证与技术标准。设计规范明确结构优化设计流程、方法及技术要求,如载荷谱分析步骤、结构参数优化范围等,为设计人员提供统一指导,确保设计科学规范,还能明确不同风电紧固件疲劳可靠性指标,指导方案制定。仿真验证借助有限元等技术构建模型,模拟实际工况,评估优化效果,提前发现问题并调整,降低制作成本、缩短研发周期。技术标准规范关键性能指标等,为生产、检测与验收提供依据,保障成果转化。

5.3 管理保障:全生命周期的可靠性管控

风电紧固件疲劳可靠性与结构优化效果要长期稳定,需全生命周期管理保障,实现全过程可靠性管控。设计阶段,组建跨学科团队整合专业资源,确保协同性,建立评审机制多维度评审设计方案。生产阶段,严控原材料质量,加强过程质量管控,优化工艺避免缺陷,建立检验机制抽检产品。安装阶段,规范安装流程,控制扭矩与预紧力,加强质量检验保证贴合度。运维阶段,建立常态化监测维护机制,实时监测运行状态,建立定期更换维护制度,依疲劳寿命预测提前更换,避免疲劳失效事故。

六、研究结论与展望

6.1 研究结论

本文基于疲劳强度、可靠性工程及结构力学理论,系统探究风电紧固件疲劳可靠性分析与结构优化设计理论体系,得出主要结论:风电紧固件疲劳失效是交变载荷、环境侵蚀和材料特性共同作用的结果,风电工况多因素耦合加剧风险,传统设计难满足需求;疲劳可靠性分析依托相关理论,经四大环节精准量化失效风险,为优化指明方向;结构优化需多目标协同,通过多种协同优化提升疲劳可靠性,兼顾轻量化与经济性;理论落地需技术与管理协同保障,可提升风电装备安全性与经济效益。

6.2 研究展望

本文研究成果为风电紧固件疲劳可靠性分析与结构优化设计筑牢了理论根基。未来研究可朝以下方向深入:其一,融合智能化方法。借助机器学习算法构建载荷 - 结构 - 可靠性映射模型,精准预测疲劳可靠性并智能优化结构参数;结合数字孪生技术,搭建紧固件数字孪生模型,实时监测疲劳损伤,实现动态优化与风险预警。其二,聚焦极端工况。针对海上、高原风电等,探究强腐蚀、强振动等因素耦合机理,建立适配极端工况的分析与优化体系。其三,研发新型材料与结构。探索复合材料等应用,结合仿生设计提升性能;研究新型连接结构,突破传统局限。其四,开展全装备协同优化,构建全系统理论体系,推动风电装备高质量升级。

参考文献

- [1]应华冬. 风电机组桨叶螺栓断裂失效分析及优化[D]. 浙江: 浙江大学, 2022.
- [2]付煜哲. 风电机组变桨螺栓疲劳寿命与影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
- [3]张翔. 316L 不锈钢表面渗氮/ta-C 复合防护涂层微观组织及性能研究[D]. 甘肃: 兰州理工大学, 2024.
- [4]苏标. 金属表面 TiN 涂层溅射制备及其力学和生物性能研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2024.