

引用格式: 李秀海, 毛建晖, 骆传龙, 等. 风机叶片主梁损伤分析及其维修方案可靠性检验 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 71-78. LI Xiuhai, MAO Jianhui, LUO Chuanlong, et al. Analysis of spar cap damage of wind turbine blades and reliability verification of repair scheme [J]. Southern energy construction, 2025, 12(2): 71-78. DOI: [10.16516/j.ceec.2023-235](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2023-235).

风机叶片主梁损伤分析及其维修方案可靠性检验

李秀海[✉], 毛建晖, 骆传龙, 史博文
(明阳智慧能源集团股份有限公司, 广东 中山 528437)

摘要: [目的] 褶皱是风电叶片在制造过程中可能出现的一种缺陷, 它可能导致叶片的强度下降, 严重时会产生裂纹并导致叶片断裂。如何对褶皱缺陷进行维修以及验证维修后的叶片结构安全性问题是文章研究的重点。[方法] 选取风电场某兆瓦级机组主梁褶皱损伤的叶片为研究对象。首先建立了叶片三维结构模型和有限元模型, 通过有限元仿真分析了叶片屈曲稳定性和计算了主梁许用次数; 然后, 通过玻璃钢 (FRP) 的强度折损比预测了褶皱高度并制定了维修方案; 最后, 通过叶片全尺寸静力和疲劳测试验证维修方案的可靠性。[结果] 结果表明: 若无褶皱缺陷, 主梁不会发生屈曲失稳和疲劳失效; 维修后的叶片通过了静力和疲劳测试。[结论] 依据玻璃钢强度折损比制定的维修方案具有一定可靠性, 为风电叶片主梁褶皱的维修提供参考。

关键词: 褶皱; 有限元仿真; 强度折损比; 维修; 静力测试; 疲劳测试

DOI: [10.16516/j.ceec.2023-235](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2023-235)

文章编号: 2095-8676(2025)02-0071-08

CSTR: [32391.14.j.ceec.2023-235](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2023-235)

中图分类号: TK83; TB33



论文二维码

Analysis of Spar Cap Damage of Wind Turbine Blades and Reliability Verification of Repair Scheme

LI Xiuhai[✉], MAO Jianhui, LUO Chuanlong, SHI Bowen

(Mingyang Smart Energy Group Co., Ltd., Zhongshan 528437, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Wrinkle is a kind of defect that may occur in the manufacturing process of wind turbine blades. It may cause the strength of the blade to decrease, and in serious cases, cracks will be produced and lead to blade fracture, how to repair the wrinkle defects and verify the structural safety of the blade after repair is the focus of this paper. [Method] The blade of a megawatt-class unit of wind farm with spar cap wrinkling damage was selected as the research object. Firstly, the blade three-dimensional structural model and finite element model were established, and the blade buckling stability and the permissible number of spar cap were analyzed through finite element simulation; then, the wrinkle height was predicted through the strength loss ratio of glass fiber reinforced plastic (FRP), and a repair scheme was formulated; finally, the reliability of the repair scheme was verified through the full-size static and fatigue tests of the blade. [Result] The results show that the spar cap would not have buckling instability and fatigue failure if there is no wrinkling defect; the repaired blade passed the static and fatigue tests. [Conclusion] The repair scheme formulated based on the FRP strength loss ratio has a certain degree of reliability and provides a reference for the repair of wind turbine blade spar cap wrinkle.

Key words: wrinkle; finite element simulation; strength loss ratio; repair; static testing; fatigue testing

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-08-22 修回日期: 2023-10-17

基金项目: 内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目“适应高海拔低温型陆上大型国产化风电机组研制”(2022JBGS0045)

0 引言

复合材料褶皱是指复合材料内部的一层或多层纤维在复合材料的表面或内部形成的折痕、皱纹或弯曲变形^[1]。风机叶片主梁的生产过程通常采用真空灌注的工艺方法,先铺设若干层数的玻璃纤维织物,接着抽去铺层之间的空气,然后通过灌注树脂来完成对玻纤织物的浸润,最后在一定的加热条件下固化成型。一方面,在玻璃纤维织物铺设时拉力不均匀,铺设不平整,固定不牢固,玻纤织物就会存在松散、弯曲的状态,成型后便会产生褶皱;另一方面,树脂在固化过程中受热不均匀,在上下表面之间形成压应力,压应力的作用一旦超过“上表层”的承受力,在压应力的作用下织物向外发生变形,从而出现褶皱^[2]。典型的风电叶片主梁褶皱形态见图 1 所示,图中标注 H 为褶皱高度, L 为褶皱宽度,以 H/L 来表示褶皱的高宽比。

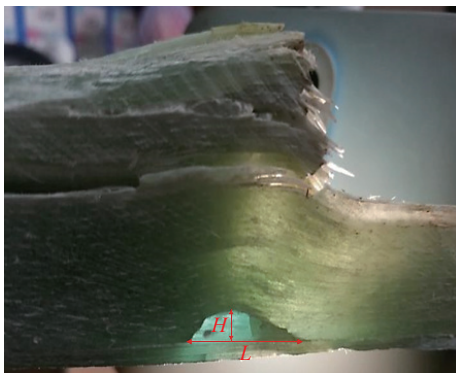


图 1 主梁褶皱

Fig. 1 Spar cap with wrinkle

褶皱缺陷对复合材料性能的影响一直是行业内重点研究的问题。赵春妮等^[3]以 40 m 长的叶片为例,通过有限元定量分析了高宽比相同但褶皱高度、褶皱长度不同对树脂应力的影响。结果表明:高宽比相同时,树脂应力随褶皱高度的增加而增大;高宽比相同时,当褶皱长度小于主梁宽度 2/3 时,树脂应力随褶皱长度增加而增大,当褶皱长度大于主梁宽度 2/3 时,树脂应力随褶皱长度增加而减小。高康等^[4]选取 2 MW 机组风电叶片,建立含褶皱的叶根有限元模型,探讨了叶根褶皱位置、宽度、层数和高宽比等因素对玻璃钢叶片性能的影响。发现相同褶皱缺陷,对越宽、越薄的构件引起的应力集中越明显,以及褶皱厚度方向,玻璃钢层间剪切应力呈抛物线

形状分布。靳交通等^[5]对一后缘梁存在贯穿性褶皱缺陷的叶片进行了全尺寸静力测试,发现叶片通过了静强度测试,但在摆阵疲劳测试中,叶片出现了发白、分层等损伤。随即对后缘梁褶皱缺陷打磨去除,并依据错层修补原则对叶片进行修补,最终修补的叶片通过了摆阵疲劳测试。沈臣等^[6]、何成智等^[7]研究了不同高宽比的褶皱对玻璃钢静态力学性能和疲劳性能的影响,测试结果表明,褶皱缺陷高宽比不同,玻璃钢结构强度折损比也不同;当褶皱缺陷高宽比大于或等于 3% 时,玻璃钢疲劳寿命下降 90% 以上。

以上研究主要集中于不同尺寸的褶皱对复合材料强度性能和疲劳寿命的影响,而基于工程实例的褶皱缺陷维修及维修方案可靠性验证的研究还比较缺乏。文章选取了风电场某兆瓦级机组主梁褶皱损伤的叶片为研究对象,采用有限元仿真分析了屈曲稳定性以及计算了主梁许用次数;提出了基于玻璃钢的强度折损比制定维修方案,并对损伤区域进行维修;最后通过叶片全尺寸静力测试和疲劳测试检验维修方案的可靠性,为风电叶片主梁褶皱的维修提供参考。

1 损伤描述与调查

该叶片的气动外形基于 NACA63 系列和 AE02 系列翼型组设计,叶根节圆段长度 1.5 m,叶片设计边界条件见表 1。

表 1 叶片设计边界条件

Tab. 1 Boundary conditions for blade design

风场类型	S
空气密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.05
风轮额定转速/rpm	17.42
风轮额定转速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	11.9
切入风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3
切出风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	25
湍流强度	0.14
年平均风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	9.6
年风速分布	威布尔分布($K=2.1$)
轮毂中心处 50 a—遇 10 min 平均风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	42.5
生存温度/ $^{\circ}\text{C}$	-40 ~ +50

此叶片开始运行到首次发现损伤,历时 7 a。叶片 PS 面(迎风面)主梁距叶根 21 m 位置,外表面出

现弦向裂纹,长约 200 mm,见图 2(a);内腔出现弦向发白,尺寸为 410 mm×30 mm,见图 2(b)。

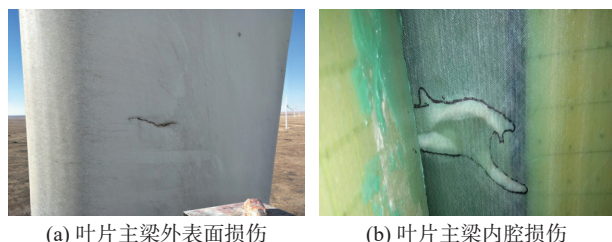


图2 叶片损伤情况

Fig. 2 Blade damage

从叶片材料、制造工艺、质检和吊装等方面对该叶片进行了调查。经调查,该叶片材料入厂检验合格,工艺文件齐全、无错误,壳体玻璃化转变温度测试结果达标,叶片无损检测合格,吊装过程无损伤记录。因此,结合叶片损伤状态及工程运维经验,判断此缺陷为主梁褶皱。

2 仿真分析

风电叶片设计软件 FOCUS 中建立叶片三维结构模型,具体流程如下:首先,我们使用单位弦长为 1 的翼型坐标点来确定翼型轮廓线和旋转中心;接着,我们设定各截面所选用的翼型、弦长、扭角和预弯数据,以生成叶片的三维外形;然后,我们定义各部件的铺层边界;最后,我们选择相应的材料类型和铺层边界,根据设定的厚度和层数以及对应的截面位置,完成风力机叶片的建模^[8],见图 3。

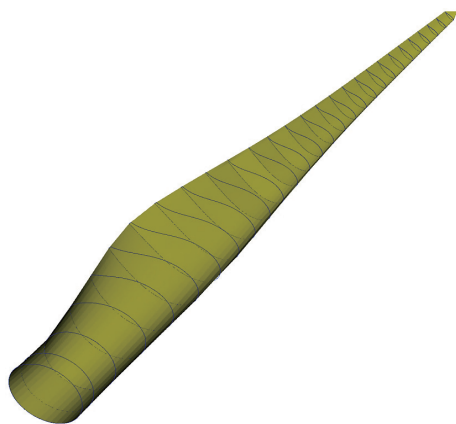


图3 叶片三维结构模型

Fig. 3 Blade 3D structural model

在有限元网格划分上, GL 2010^[9] 导则规定:当网格密度增加一倍,载荷屈曲因子误差小于 5%,则

认为网格尺寸满足计算的要求。经计算当网格尺寸设置为 60 mm 时,挥舞方向载荷下第 1 阶特征值屈曲因子 2.178;当网格尺寸设置为 30 mm 时,屈曲因子 2.141,误差为 1.7%。因此,选择网格尺寸为 60 mm,单元类型选择壳单元,导出有限元模型。该模型的节点数为 67832 个,单元数为 69549 个。壳单元是一个 4 结点单元,每个结点具有 6 个自由度($U_x/U_y/U_z/R_x/R_y/R_z$),适用于薄至中等厚度的壳形结构的线性、扭转和应变非线性分析^[10]。21m 截面附近有限元模型见图 4。

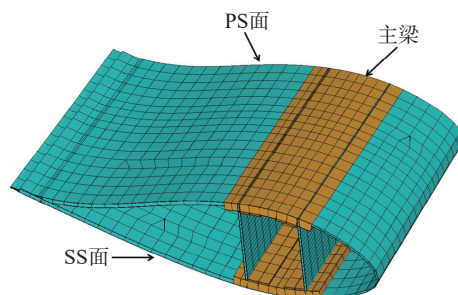


图4 21 m 截面附近有限元模型

Fig. 4 Finite element model near 21 m section

2.1 叶片载荷

叶片所受载荷主要可分为空气动力载荷、离心力载荷和重力载荷,以及运行载荷和各载荷动态交互作用^[11]。根据边界条件,参照标准 IEC61400-1^[12] 计算得到叶片挥舞方向的极限载荷和等效疲劳载荷(循环次数 10^8),见图 5。

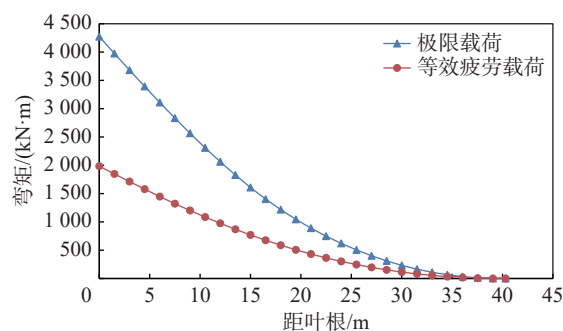


图5 叶片载荷

Fig. 5 Blade load

2.2 特征值屈曲稳定性分析

将有限元模型导入 ANSYS 设计仿真软件中,约束叶根全部自由度^[13-15],并加载挥舞方向的极限载荷(力的方向由 PS 面指向 SS 面),得到距叶根 21 m 附近最小失稳模态图,见图 6。由图可知,21 m 截面附

近最小屈曲因子 $FACT=2.568$, 失效位置为 SS 面(背风面)后缘芯材, 这是由于在挥舞载荷下 PS 面受到拉应力, SS 面受到压应力, 故 SS 面在压应力下会出现屈曲失稳。

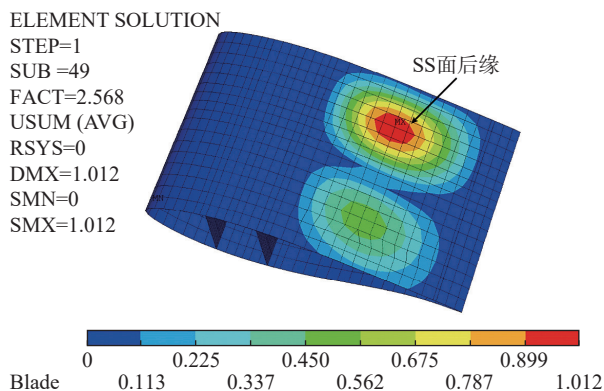


图 6 距叶根 21 m 附近最小失稳模式

Fig. 6 Minimum instability modes near 21 m from the blade root

GL 2010 导则规定: 进行屈曲稳定性分析时, 材料刚度的局部安全系数 $\gamma_{M0} = 1.35$, 考虑材料模量的离散 $C_{1C} = 1.1$, 考虑温度的影响 $C_{2C} = 1.1$, 使用线性方法计算 $C_{3C} = 1.25$ 。因此屈曲分析需要考虑的安全系数是:

$$\gamma_{MD} = \gamma_{M0} \times C_{1C} \times C_{2C} \times C_{3C} = 2.042$$

最小安全系数=最小屈曲因子/ $\gamma_{MD}=2.568/2.042=1.257>1$ 。因此可认为, 若 PS 面主梁无褶皱缺陷, 21m 截面附近不会发生屈曲失稳。

2.3 等效疲劳分析

将有限元模型导入 ANSYS 软件中, 约束叶根全部自由度, 并加载挥舞方向的等效疲劳载荷, 得到 PS 面距叶根 21 m 附近主梁轴向应力分布, 见图 7。

由图 5 可知, 在挥舞方向等效疲劳载荷作用下, PS 面主梁距叶根 21 m 附近的轴向最大应力 $S_{MX}=55.227$ MPa。依据线性疲劳损伤理论(Miner 理论): 在循环载荷作用下, 各级应力之间相互独立, 互不干扰, 疲劳损伤可以线性累加, 当累积的损伤达到材料允许的临界值时, 构件发生疲劳破坏^[16], 参照 GL2010 导则中的计算方法可估算此处的许用次数, 见式(1)。

$$N = \left[\frac{R_{k,t} + |R_{k,c}| - |2 \cdot \gamma_{Ma} \cdot S_{k,M} - R_{k,t} + |R_{k,c}||}{2 \cdot (\gamma_{Mb}/C_{1b}) \cdot S_{k,A}} \right]^m \quad (1)$$

式中:

$R_{k,t}$ ——极限拉伸强度(MPa);

$R_{k,c}$ ——极限压缩强度(MPa);

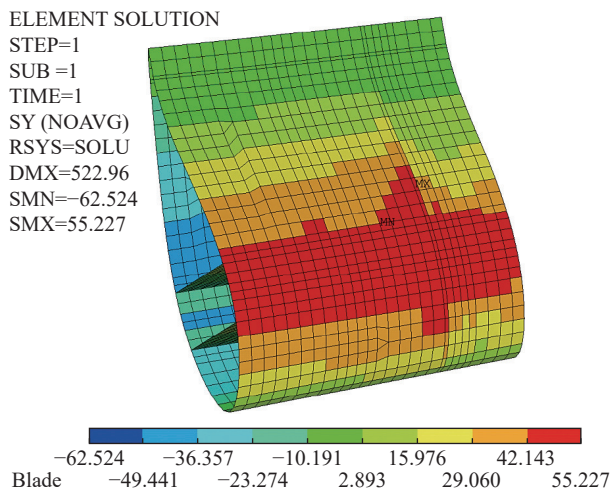


图 7 叶片轴向应力分布图

Fig. 7 Blade axial stress distribution

γ_{Ma} ——极限分析材料折减系数;

$S_{k,M}$ ——应力均值(MPa);

$S_{k,A}$ ——应力幅值(MPa);

m —— $S-N$ 曲线斜率;

γ_{Mb} ——疲劳分析材料折减系数;

$C_{1b} = N^{1/m}$ 。

在等效疲劳校核中, 可认为平均应力^[17] $S_{k,M} = 0$, 可将公式简化为公式(2)。

$$N = \left[\frac{|R_{k,c}|}{\gamma_{Mb} \cdot S_{k,A}} \right]^m \quad (2)$$

该叶片主梁采用的是面密度为 1200 g/m^2 的单轴向玻璃纤维织物, 极限压缩强度 $R_{k,c}=500 \text{ MPa}$; $S-N$ 疲劳曲线斜率 $m=10$; 材料折减系数 $\gamma_{Mb} = 1.485$; 应力幅值 $S_{k,A} = \frac{55.227}{2} = 27.614 \text{ MPa}$ 。

将上述已知条件代入公式(2), 求得 PS 面主梁许用次数为 7.25×10^{10} 。叶片设计寿命为 20 a, 对应循环次数为 10^8 , 可粗略计算循环次数为 7.25×10^{10} 对应叶片的可使用年限为 $1.45 \times 10^4 \text{ a}$, 远大于 7 a。因此可认为, 若 PS 面主梁距叶根 21 m 位置无褶皱缺陷, 在挥舞方向疲劳载荷作用下, 叶片运行 7 a 此处不会发生疲劳失效。

3 维修方案

参考文献 [3] 和文献 [6] 的研究结论, 叶片运行中褶皱缺陷初始损伤发生在树脂上以及褶皱会降低疲劳寿命, 因此可将玻璃钢 $S-N$ 曲线斜率 m 值修正为 8。叶片已运行 7 a, 对应主梁许用次数为 3.5×10^7 。

将已知条件带入公式(2)中,求得存在褶皱缺陷下复合材料的极限压缩强度 $R_{k,c}$ =359.7 MPa,强度折损比28%。通过对比文献 [6] 强度折损比数据,可推测该叶片 PS 面主梁褶皱高宽比约为 2.45%。

一方面,为保证叶片在维修区域的刚度,维修玻璃钢厚度应等于褶皱的厚度;另一方面,为充分保证维修方案的可靠性,假设内腔发白区域与褶皱宽度相等为 410 mm,则褶皱高度为 $410 \times 2.45\% = 10$ mm。已知单轴玻璃纤维织物玻璃钢的单层厚度为 0.87 mm,故维修中因铺设单轴织物层数为 $10/0.87 \approx 12$ 。

将损伤位置轴向单侧扩展打磨 1600 mm,弦向单侧扩展打磨 750 mm,只需要打磨掉表面油漆即可;接着清理灰尘、杂质,将表 2 单轴向玻纤织物按照轴向错层 100 mm,弦向错层 20 mm,对维修区域进行铺层;最后进行真空灌注及加热固化,最终应保证玻璃钢的玻璃化转变温度 $T_g \geq 70$ ℃。

表 2 单轴向玻纤织物尺寸		
Tab. 2 Uniaxial fiberglass fabric dimensions		
序号	长度/mm	宽度/mm
1	1000	400
2	1200	500
3	1400	600
4	1600	700
5	1800	800
6	2000	900
7	2200	1000
8	2400	1100
9	2600	1200
10	2800	1300
11	3000	1400
12	3200	1500

4 静力测试、疲劳测试

为验证维修方案的可靠性,将维修后的叶片进行了叶片全尺寸静力测试和挥舞疲劳测试,测试参照标准 IEC61400-23^[18] 的要求进行。测试用到的主要设备仪器见表 3。

4.1 静力测试

采用三点向上协调加载,加载点分别布置在距叶根 18 m、24 m、32.2 m 截面,加载方向垂直于加载截

表 3 设备仪器
Tab. 3 Equipment and instrument

名称	型号	厂家
负荷传感器	BK-1B	中国航天科技集团有限公司
动态应变仪	DH3817F	江苏东华测试技术股份有限公司
应变片	BE120-10AA-P150	中航电测仪器股份有限公司
激振器	45kW电机	上海中畅机器人控制技术发展有限公司

面的法线方向,见图 8。在距叶根 10 ~ 30 m PS 面、SS 面主梁中央区域布置应变片,接着对载荷传感器、动态应变仪清零;然后用吊车向上加载,挥舞正方向、负方向按目标载荷的 0%、40%、60%、80%、100%,逐级进行加载并记录数据,每级载荷的持续时间不少于 10 s。加载完成后再逐级进行卸载,将叶片载荷直接卸载至零状态。



图 8 叶片静力测试

Fig. 8 Blade static test

测试后叶片无异常,没有损伤,不同位置的主梁应变实测数据见图 9。

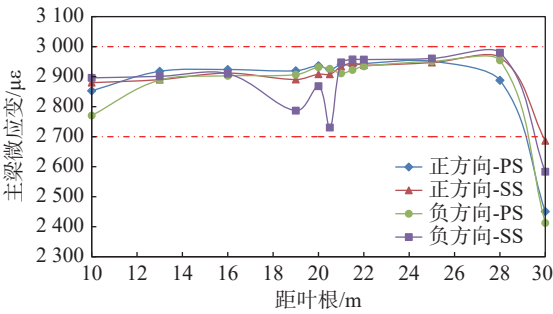


图 9 不同位置的主梁应变

Fig. 9 Spar cap strains at different locations

由图可知,PS 面、SS 面主梁区域的微应变集中在 2700 ~ 3000 $\mu\epsilon$,满足内控指标,叶片结构安全。

4.2 疲劳测试

疲劳测试采用单点共振恒幅加载方式为叶片各截面加恒幅的交变载荷,以检验各截面在设计寿命周期内对疲劳载荷的承受能力。所谓单点共振恒幅加载方式,是指在叶片特定截面安装激振系统(电机、减速机、悬臂、偏心块等),通过调节偏心轮的转速,使其旋转频率与叶片固有频率接近于叶片产生共振,并通过激振系统的偏心轮旋转产生的离心力对叶片施加交变恒幅载荷^[19-20],原理如图 10 所示。

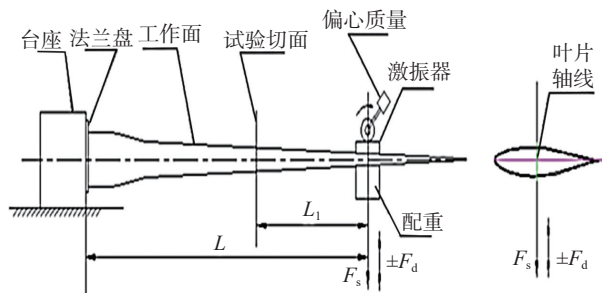


图 10 挥舞疲劳试验原理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of fatigue test principle

关于目标载荷,参照式(3)将许用次数 10^8 下的项目挥舞疲劳载荷转化为许用次数为 200 万下的载荷作为目标载荷做测试。同时,目标载荷需考虑叶片特性离散系数 $\gamma_{sf} = 1.10$,局部失效系数 $\gamma_{nf} = 1.15$ 以及疲劳分析误差局部安全系数 $\gamma_{ef} = 1.05$ 的影响。

$$M_{N1}^m \times N1 = M_{N2}^m \times N2 \quad (3)$$

测试过程监测了距叶根 21 m 截面 PS 面主梁中央的应变,目标应变为 $2171 \mu\epsilon$,监测数据见图 11。应变变化图可以看出测试期间,褶皱附近截面的应变值均大于目标应变值 2171,故已达到了测试要求。

因条件限制,最终叶片挥舞疲劳循环了 60 万次左右,见表 4。由表可知,距叶根 13~30 m 区域内的

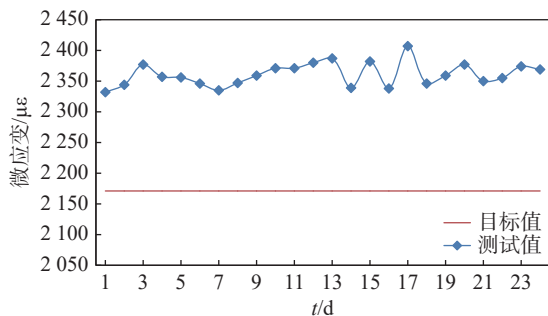


图 11 21m 截面应变图

Fig. 11 Strain diagram of 21m section

等效载荷循环次数满足至少 60 万次的试验需求,等效寿命满足至少 6 a 使用寿命。

表 4 不同截面循环次数

Tab. 4 Number of cycles for different sections

截面位置/m	13	15	17	19	20	20.5	21	21.5	22	24	26	30
循环次数/万次	63.4	65.8	66.4	66.6	66.5	66.5	60.3	66.8	65.8	61	67.4	66.9

在试验过程中,叶片未发生灾难性失效与功能性失效,见图 12;试验后,经目视检查叶片 PS 面主梁褶皱损伤面积没有出现扩展,见图 13,也没有出现新的损伤。

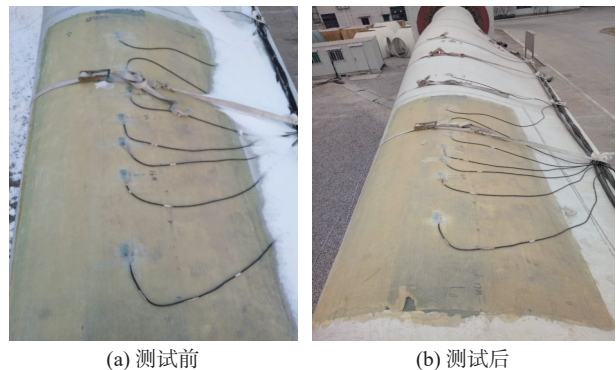


图 12 叶片测试前后的状态

Fig. 12 State of the blade before and after testing

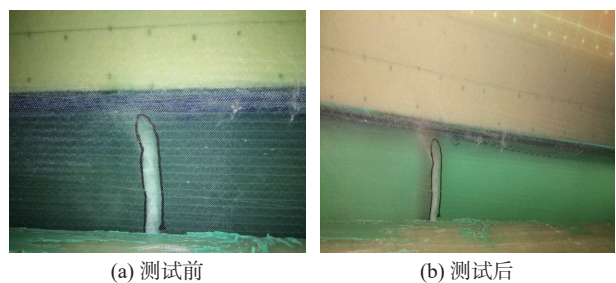


图 13 叶片内腔主梁褶皱处测试前后状态

Fig. 13 Before and after testing at the spar cap wrinkling in the inner chamber of the blade

5 风场运行验证

将主梁褶皱损伤的叶片按此方案进行维修,至今叶片已于风场稳定运行 4 a,且维修区域未发现新的损伤,见图 14。这充分验证了维修方案的可靠性,同时说明了叶片主梁存在褶皱的区域会逐渐出现表

面弦向裂纹,内部结构分层发白等,若能及时发现并对缺陷及时维修处理,可增加叶片安全运行年限。



图 14 机组运行图

Fig. 14 Wind turbine operation photo

6 结论

以主梁褶皱缺陷的叶片为研究对象,采用有限元仿真分析了屈曲稳定性以及计算了主梁许用次数,制定了褶皱区域维修方案,并进行叶片全尺寸静力测试和疲劳测试,得出以下结论:

- 1)若主梁无褶皱缺陷,此叶片在设计寿命内不会发生屈曲失稳及疲劳失效;
- 2)主梁褶皱缺陷会大幅降低叶片的使用寿命;
- 3)维修后的叶片通过了全尺寸静力测试和疲劳测试,且疲劳测试表明叶片至少还有6a使用寿命,通过复合材料强度折损比推测褶皱高度进而确定织物铺层层数的维修方案具有一定的可靠性。

参考文献:

- [1] 卓鹏,刘强,赵龙,等. 复合材料褶皱与试件性能的关系研究[J]. 航空制造技术, 2014(15): 101-102, 105. DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2014.15.014.
ZHUO P, LIU Q, ZHAO L, et al. Experimental investigation on the relationship between wrinkles and properties of composite laminates [J]. Aeronautical manufacturing technology, 2014(15): 101-102, 105. DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2014.15.014.
- [2] 王冰佳,赵勇,王杰彬. 风力机叶片褶皱机理及预防措施研究[J]. 电站系统工程, 2018, 34(1): 62-64.
WANG B J, ZHAO Y, WANG J B. Study on mechanism and precaution of fold in wind turbine blade [J]. Power system engineering, 2018, 34(1): 62-64.
- [3] 赵春妮,刘清,陈文光,等. 不同尺寸褶皱对风电叶片主梁性能的影响研究[J]. 风能, 2020(5): 90-93. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2020.05.027.
ZHAO C N, LIU Q, CHEN W G, et al. Research on the effect of different size folds on the performance of wind turbine blade main beam [J]. Wind energy, 2020(5): 90-93. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2020.05.027.
- [4] 高康,陶伟文,刘奇星,等. 典型叶根褶皱对风电叶片强度影响的初步研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(10): 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2017.10.010.
GAO K, TAO W W, LIU Q X, et al. Initial study of effects on strength of wind turbine blade with typical root waviness [J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2017(10): 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2017.10.010.
- [5] 靳交通,邓航,侯彬彬,等. 风电叶片试验中褶皱的影响分析及修补方案的可靠性验证[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(3): 56-59. DOI: 10.13952/j.cnki.jofmndr.2020.0102.
JIN J T, DENG H, HOU B B, et al. Influences analysis of wrinkles and reliability verification of repair method in the wind turbine blade test [J]. Machine design & research, 2020, 36(3): 56-59. DOI: 10.13952/j.cnki.jofmndr.2020.0102.
- [6] 沈臣,周勃,李菲,等. 褶皱对风力机叶片主梁复合材料疲劳性能研究[J]. 重型机械, 2022(1): 36-39. DOI: 10.13551/j.cnki.zxjxqk.2022.01.007.
SHEN C, ZHOU B, LI F, et al. Study on the effect of folds on the fatigue properties of wind turbine blade girder composite materials [J]. Heavy machinery, 2022(1): 36-39. DOI: 10.13551/j.cnki.zxjxqk.2022.01.007.
- [7] 何成智,马小军,李阳阳,等. 褶皱对玻璃钢疲劳性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(10): 53-57. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2017.10.009.
HE C Z, MA X J, LI Y Y, et al. The effect of folding on the fatigue properties of glass fiber reinforced plastics [J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2017(10): 53-57. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2017.10.009.
- [8] 孔魁,周晓亮,程明哲. 风电叶片建模及结构分析与测试[J]. 机电工程技术, 2018, 47(5): 45-48. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2018.05.014.
KONG K, ZHOU X L, CHENG M Z. Structural modeling analysis and testing of wind turbine rotor blade [J]. Mechanical & electrical engineering technology, 2018, 47(5): 45-48. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2018.05.014.
- [9] Germanischer Lloyd. Guideline for the certification of wind turbines: GL 2010 [S]. Hamburg: Germanischer Lloyd, 2010.
- [10] 徐立军,王维庆. 复合材料风电叶片结构强度非线性分析[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(2): 13-24. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2020.203.
XU L J, WANG W Q. Nonlinear analysis of the structural strength of a composite wind turbine blade [J]. Journal of

- Chongqing University, 2021, 44(2): 13-24. DOI: [10.11835/j.issn.1000-582X.2020.203](https://doi.org/10.11835/j.issn.1000-582X.2020.203).
- [11] 郑玉巧, 张岩, 魏泰. 风力发电机叶片结构与动力学 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2022: 37.
ZHENG Y Q, ZHANG Y, WEI T. Structural design and dynamics for wind turbine blades [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2022: 37.
- [12] International Electrotechnical Commission. Wind energy generation systems-part1: design requirements: IEC 61400-1 [S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2019.
- [13] 赵春妮, 刘清, 陈文光, 等. 风电叶片后缘建模方法对屈曲稳定性的影响 [J]. *复合材料科学与工程*, 2020(5): 100-104. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0999.2020.05.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0999.2020.05.016).
ZHAO C N, LIU Q, CHEN W G, et al. The effects of wind turbine blade trailing edge modeling way on buckling [J]. *Composites science and engineering*, 2020(5): 100-104. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0999.2020.05.016](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0999.2020.05.016).
- [14] 袁巍华, 吴玉国, 王国付, 等. 风电叶片尾缘结构稳定性研究 [J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(1): 12-17. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0999.2018.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0999.2018.01.002).
YUAN W H, WU Y G, WANG G F, et al. Study on the stability of wind turbine blade trailing edge structure [J]. *Fiber reinforced plastics/composites*, 2018(1): 12-17. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0999.2018.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0999.2018.01.002).
- [15] 阳雪兵, 沈意平, 李卉. 5 MW 风力机叶片结构力学特性有限元分析 [J]. *机械研究与应用*, 2018, 31(4): 42-45. DOI: [10.16576/j.cnki.1007-4414.2018.04.014](https://doi.org/10.16576/j.cnki.1007-4414.2018.04.014).
YANG X B, SHEN Y P, LI H. Finite element analysis on structural mechanical characteristics of the 5 MW wind turbine blade [J]. *Mechanical research & application*, 2018, 31(4): 42-45. DOI: [10.16576/j.cnki.1007-4414.2018.04.014](https://doi.org/10.16576/j.cnki.1007-4414.2018.04.014).
- [16] 熊磊. 大型风力机叶片的疲劳寿命模糊预测方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
XIONG L. Study on the fuzzy fatigue life prediction of large wind turbine blades [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [17] 骆传龙, 李秀海, 李军向, 等. 风电叶片摆振疲劳损伤分析与补强维修 [J]. *玻璃纤维*, 2022(6): 7-11. DOI: [10.13354/j.cnki.cn32-1129/tq.2022.06.007](https://doi.org/10.13354/j.cnki.cn32-1129/tq.2022.06.007).
LUO C L, LI X H, LI J X, et al. Edgewise fatigue analysis of wind turbine blade and structural strengthening [J]. *Fiber glass*, 2022(6): 7-11. DOI: [10.13354/j.cnki.cn32-1129/tq.2022.06.007](https://doi.org/10.13354/j.cnki.cn32-1129/tq.2022.06.007).
- [18] International Electrotechnical Commission. Wind turbines-part 23: full-scale structural testing of rotor blades: IEC 61400-23 [S]. Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2014.
- [19] 陆亮, 吴海军, 乌建中. 全尺寸风机叶片疲劳测试技术与弯矩匹配方法研究进展综述 [J]. *液压与气动*, 2020(2): 1-8. DOI: [10.11832/j.issn.1000-4858.2020.02.001](https://doi.org/10.11832/j.issn.1000-4858.2020.02.001).
LU L, WU H J, WU J Z. Review of fatigue testing technology and bending moment matching method of full-scale wind turbine blades [J]. *Chinese hydraulics & pneumatics*, 2020(2): 1-8. DOI: [10.11832/j.issn.1000-4858.2020.02.001](https://doi.org/10.11832/j.issn.1000-4858.2020.02.001).
- [20] 杨海江, 李军向, 李秀海. 风电机组叶片疲劳测试加载系统激励力及能量消耗分析 [J]. *风能*, 2020(2): 88-92. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2020.02.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2020.02.024).
YANG H J, LI J X, LI X H. Analysis of excitation force and energy consumption of loading system for wind turbine blade fatigue test [J]. *Wind energy*, 2020(2): 88-92. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2020.02.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2020.02.024).

作者简介:

李秀海

李秀海(第一作者, 通信作者)

1982-, 男, 工程师, 主要从事风电叶片结构校核及复合材料的研究(e-mail) lixu hai@mywind.com.cn。

(编辑 叶筠英)