

ICS 83.120

CCS Q 23



团体标准

T/CEATEC XXX—2026

大型兆瓦级玻璃纤维复合材料风电叶片耐候性性能评价与测试方法

Large-megawatt glass fiber reinforced composite wind turbine blade weather resistance performance evaluation and testing methods

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 评价原则	2
4.1 科学性原则	2
4.2 公正性原则	2
4.3 规范性原则	2
4.4 可重复性原则	2
4.5 可操作性原则	2
4.6 分类原则	2
4.7 安全与环保原则	2
5 评价要求	2
5.1 机构要求	2
5.2 人员要求	2
5.3 环境要求	2
5.4 设备要求	3
5.5 样品要求	3
6 评价指标体系	3
6.1 物理性能指标	3
6.2 力学性能指标	4
6.3 表面性能指标	4
7 测试方法	4
7.1 人工加速老化试验	4
7.2 物理性能测试	5
7.3 力学性能测试	5
7.4 表面性能测试	6
8 数据处理	6
8.1 数据有效性判定	6
8.2 数据统计处理	6
8.3 指标评分计算	7
9 评价报告	8
9.1 报告内容	8
9.2 报告保存	8

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

大型兆瓦级玻璃纤维复合材料风电叶片耐候性性能评价与测试方法

1 范围

本文件规定了大型兆瓦级玻璃纤维复合材料风电叶片耐候性性能的评价原则、评价要求、评价指标体系、测试方法、数据处理、评价报告。

本文件适用于大型兆瓦级玻璃纤维复合材料风电叶片（以下简称“风电叶片”）在陆上、海上等典型风场服役环境下的耐候性性能评价与测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 1446 纤维增强塑料性能试验方法总则
- GB/T 1447 纤维增强塑料拉伸性能试验方法
- GB/T 1449 纤维增强塑料弯曲性能试验方法
- GB/T 1462 纤维增强塑料吸水性试验方法
- GB/T 1463 纤维增强塑料密度和相对密度试验方法
- GB/T 2423.3 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验
- GB/T 2423.22 环境试验 第2部分：试验方法 试验N：温度变化
- GB/T 5210 色漆和清漆 拉开法附着力试验
- GB/T 9286 色漆和清漆 划格试验
- GB/T 16422.2 塑料 实验室光源暴露试验方法 第2部分：氙弧灯
- GB/T 25383 风能发电系统 风力发电机组风轮叶片
- GB/T 31588.1 色漆和清漆 耐循环腐蚀环境的测定 第1部分：湿（盐雾）/干燥/湿气

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

风电叶片 wind turbine blade

安装于风力发电机转子上，用于捕获风能并将其转换为机械能的关键部件。

3.2

耐候性 weather resistance

材料或构件在自然环境或人工环境作用下，保持其物理性能、力学性能及外观性能稳定的能力。

3.3

加速老化试验 accelerated aging test

在实验室条件下，通过强化环境因素模拟材料长期服役过程的试验方法。

4 评价原则

4.1 科学性原则

评价方法应基于材料老化机理和环境作用机理，合理选取指标、测试方法和参数。

4.2 公正性原则

评价机构应保持独立性和公正性，不受生产单位或其他相关方影响。

4.3 规范性原则

评价活动应严格按照本文件及相关标准执行，统一流程和数据处理方法。

4.4 可重复性原则

评价方法、测试条件和操作流程应具有良好的重复性，不同机构在相同条件下实施评价时，应获得一致的结果。

4.5 可操作性原则

评价指标、测试方法和数据处理流程应简明合理，便于实际操作和推广应用，满足工程实践和质量需求。

4.6 分类原则

评价应根据叶片服役环境分为陆上风场和海上风场，采用相应评价指标和试验条件进行差异化评价。

4.7 安全与环保原则

评价过程中应符合相关安全生产、职业健康和环境保护要求，采取必要防护措施，确保试验人员安全，减少对环境的影响。

5 评价要求

5.1 机构要求

5.1.1 评价机构应具备复合材料性能评价资质，并通过CNAS或CMA等认证。

5.1.2 应建立并运行完善的质量管理体系，评价过程可追溯、数据可复核。

5.1.3 应配备满足测试需求的专业设备，设备经计量校准合格并在有效期内，建立设备维护及校准档案。

5.1.4 应具备处理风电叶片样品的能力，包括取样、运输、储存及测试的专用场地和设施。

5.2 人员要求

5.2.1 评价人员应具备材料科学、复合材料工程或相关专业背景，并从事相关工作不低于2年。

5.2.2 所有人员应接受标准化培训和考核合格后方可上岗。

5.2.3 应定期开展继续教育和能力提升，熟悉陆上与海上环境下材料老化机理及试验方法。

5.2.4 评价人员在海上风场试验中应掌握盐雾腐蚀、高湿热及复合环境试验操作规范及安全防护要求。

5.3 环境要求

5.3.1 常规测试环境（样品制备、力学性能测试等）：温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $50\% \pm 5\%$ ，无明显振动、灰尘、腐蚀性气体及强电磁干扰，通风良好。

5.3.2 老化测试环境：根据不同老化类型的要求，通过专用设备控制环境参数，如紫外老化测试的辐照强度、温湿度，盐雾测试的盐雾浓度、温度等。

5.3.3 样品储存环境：温度 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $40\% \sim 60\%$ ，避免阳光直射、雨淋、潮湿及机械损伤，储存时间应不超过30天。

5.3.4 实验室应配备温湿度、辐照强度等环境参数监测设备，实时记录环境数据，建立环境监测档案。

5.4 设备要求

5.4.1 老化测试设备

5.4.1.1 氙灯老化试验箱

应具备辐照强度调节功能（340nm处 $0.51\sim 1.10\text{W}/\text{m}^2$ ），黑板温度控制范围 $50\text{℃}\sim 80\text{℃}$ ，湿度控制范围 $30\%\sim 95\%$ ，可实现喷淋循环（每120min喷淋18min），符合GB/T 16422.2的要求。

5.4.1.2 湿热老化试验箱

温度控制范围 $0\text{℃}\sim 100\text{℃}$ ，湿度控制范围 $20\%\sim 98\%$ ，控温精度 $\pm 2\text{℃}$ ，控湿精度 $\pm 3\%$ ，符合GB/T 2423.3的要求。

5.4.1.3 盐雾试验箱

盐雾浓度 $5\%\pm 1\%$ ，温度控制 $35\text{℃}\pm 2\text{℃}$ ，喷雾均匀性应符合GB/T 31588.1的要求。

5.4.1.4 温度交变试验箱

温度范围 $-40\text{℃}\sim 150\text{℃}$ ，降温速率不小于 $5\text{℃}/\text{min}$ ，升温速率不小于 $10\text{℃}/\text{min}$ ，可实现高低温循环切换，符合GB/T 2423.22的要求。

5.4.2 力学性能测试设备

5.4.2.1 万能试验机

量程不小于100kN，精度等级0.5级，具备拉伸、弯曲、剪切测试功能，符合GB/T 1446的要求。

5.4.2.2 层间剪切强度测试仪

精度等级0.5级，加载速率可调节，符合GB/T 25383的要求。

5.4.3 表面性能测试设备

5.4.3.1 色差仪

测量范围 $0\Delta E\sim 100\Delta E$ ，精度 $\pm 0.1\Delta E$ 。

5.4.3.2 光泽度计

测量角度 60° ，范围 $0\text{GU}\sim 100\text{GU}$ ，精度 $\pm 1\text{GU}$ 。

5.4.3.3 附着力测试仪

包括拉开法测试仪（量程 $0\sim 50\text{MPa}$ ）和划格器，符合GB/T 5210、GB/T 9286的要求。

5.4.3.4 体视显微镜

放大倍数 $10\sim 100$ 倍。

5.5 样品要求

5.5.1 样品应具有代表性，涵盖叶根、中段和叶尖区域。

5.5.2 每个测试项目的样品数量应不少于5件，其中1件作为空白对照（未老化样品），其余用于老化测试。

5.5.3 力学性能测试样品尺寸应符合GB/T 25383的要求，外观及涂层性能测试样品尺寸应不小于 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ ，样品表面应无明显缺陷。

5.5.4 样品应编号、标识清楚，并记录来源、批次及制造信息。

5.5.5 样品运输过程中应采取防护措施，避免样品受到机械损伤、潮湿、阳光直射。

5.5.6 试验前样品应在标准环境中平衡不小于48小时。

6 评价指标体系

6.1 物理性能指标

风电叶片在陆上及海上的物理性能指标应符合表1的规定。

表1 物理性能指标要求

指标		A级（优秀）	B级（良好）	C级（合格）
吸水率变化率（%）	陆上	≤ 2.0	$> 2.0\sim 4.0$	$> 4.0\sim 6.0$
	海上	≤ 3.0	$> 3.0\sim 5.0$	$> 5.0\sim 7.0$
尺寸变化率（%）	陆上	≤ 1.0	$> 1.0\sim 2.0$	$> 2.0\sim 3.0$
	海上	≤ 1.5	$> 1.5\sim 3.0$	$> 3.0\sim 4.0$

密度变化率 (%)	陆上	≤1.0	>1.0~2.0	>2.0~3.0
	海上	≤1.0	>1.0~2.0	>2.0~3.0

6.2 力学性能指标

风电叶片在陆上及海上的力学性能指标应符合表2的规定。

表2 力学性能指标要求

指标		A级（优秀）	B级（良好）	C级（合格）
拉伸强度保持率 (%)	陆上	≥85	80~<85	75~<80
	海上	≥80	75~<80	70~<75
层间剪切强度保留率 (%)	陆上	≥88	83~<88	78~<83
	海上	≥83	78~<83	73~<78
弯曲强度保持率 (%)	陆上	≥90	85~<90	80~<85
	海上	≥85	80~<85	75~<80
疲劳寿命保持率 (%)	陆上	≥80	75~<80	70~<75
	海上	≥75	70~<75	65~<70

6.3 表面性能指标

风电叶片在陆上及海上的表面性能指标应符合表3的规定。

表3 表面性能指标要求

指标		A级（优秀）	B级（良好）	C级（合格）
色差 ΔE	陆上	≤3.0	>3.0~5.0	>5.0~8.0
	海上	≤5.0	>5.0~8.0	>8.0~12.0
光泽保持率 (%)	陆上	≥85	80~<85	75~<80
	海上	≥80	75~<80	70~<75
裂纹密度 (条/cm ²)	陆上	≤1	>1~2	>2~3
	海上	≤2	>2~3	>3~4
起泡剥落等级 (级)	陆上	≤1	2	3
	海上	≤2	3	4

7 测试方法

7.1 人工加速老化试验

7.1.1 氙灯老化试验

7.1.1.1 试验条件

应符合GB/T 16422.2的规定。

7.1.1.2 试验时间

累计老化时间不应少于：

a) 陆上：2000h；

b) 海上：3000h。

7.1.1.3 结果处理

老化结束后，取样进行后续性能测试。

7.1.2 湿热老化试验

应按照GB/T 2423.3的规定执行。

7.1.3 盐雾腐蚀试验

应按照GB/T 31588.1的规定执行。

7.1.4 温度交变试验

应按照GB/T 2423.22的规定执行。

7.1.5 老化后处理

老化结束后，应对试样进行表面清洁，清洁方式不应影响材料性能，并在标准环境条件下恢复不少于24小时后，按照7.2~7.4章节规定的方法进行各项性能测试和数据采集。

7.2 物理性能测试

7.2.1 吸水率变化率

吸水性测试应按照GB/T 1462的规定执行，吸水率变化率计算方法见公式（3）：

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

W ——吸水率变化率，单位为%；

m_1 ——老化前质量，单位为g；

m_2 ——老化后质量，单位为g。

7.2.2 尺寸变化率

采用游标卡尺或激光测量仪测量尺寸，尺寸变化率计算方法见公式（4）：

$$D = \frac{L_2 - L_1}{L_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

D ——尺寸变化率，单位为%；

L_1 ——老化前尺寸，单位为mm；

L_2 ——老化后尺寸，单位为mm。

7.2.3 密度变化率

密度测试应按照GB/T 1463的规定执行，密度变化率计算方法见公式（5）：

$$\Delta\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

$\Delta\rho$ ——密度变化率，单位为%；

ρ_1 ——老化前密度，单位为g/cm³；

ρ_2 ——老化后密度，单位为g/cm³。

7.3 力学性能测试

7.3.1 拉伸性能测试

拉伸性能测试应按照GB/T 1447的规定执行，拉伸强度保持率计算方法见公式（6）：

$$R_t = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

R_t ——拉伸强度保持率，单位为%；

σ_1 ——老化前拉伸强度，单位为MPa；

σ_2 ——老化后拉伸强度，单位为MPa。

7.3.2 层间剪切强度测试

层间剪切强度测试应按照GB/T 25383的规定执行，层间剪切强度保持率计算方法见公式（7）：

$$R_{ILSS} = \frac{\tau_2}{\tau_1} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

R_{ILSS} ——层间剪切强度保持率，单位为%；

τ_1 ——老化前层间剪切强度，单位为MPa；

τ_2 ——老化后层间剪切强度，单位为MPa。

7.3.3 弯曲强度测试

弯曲强度测试应按照GB/T 1449的规定执行，弯曲强度保持率计算方法见公式（8）：

$$R_b = \frac{\sigma_{b2}}{\sigma_{b1}} \times 100\% \quad (8)$$

式中：

R_b ——弯曲强度保持率，单位为%；
 σ_{b1} ——老化前弯曲强度，单位为MPa；
 σ_{b2} ——老化后弯曲强度，单位为MPa。

7.3.4 疲劳寿命测试

使用万能试验机施加交变拉伸或弯曲载荷，应力比宜为0.1~0.3，加载频率宜为2Hz~10Hz，最大应力水平宜为材料静强度的50%~70%；每个试样记录破坏时的循环次数N，疲劳寿命保持率计算方法见公式（9）：

$$R_f = \frac{N_2}{N_1} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

R_f ——疲劳寿命保持率，单位为%；
 N_1 ——老化前疲劳寿命循环次数；
 N_2 ——老化后疲劳寿命循环次数。

7.4 表面性能测试

7.4.1 色差测定

使用色差仪，在样品表面选取5个均匀分布的测试点，测量老化前后的色差 ΔE ，取平均值作为最终结果。

7.4.2 光泽度测定

使用光泽度计（60° 测量角），在样品表面选取5个均匀分布的测试点，测量老化前后的光泽度，计算光泽度保留率，计算方法见公式（10）：

$$R_G = \frac{G_2}{G_1} \times 100\% \quad (10)$$

式中：

R_G ——光泽保持率，单位为%；
 G_1 ——老化前光泽值；
 G_2 ——老化后光泽值。

7.4.3 裂纹密度测定

使用体视显微镜，放大10~100倍观察表面裂纹，统计单位面积裂纹数量，裂纹密度计算方法见公式（11）：

$$\rho_{crack} = \frac{n}{A} \quad (11)$$

式中：

ρ_{crack} ——裂纹密度，单位为条/cm²；
 n ——单位面积裂纹条数；
 A ——测量面积，单位为cm²。

7.4.4 起泡剥落等级评定

应按照GB/T 9286的规定进行起泡剥落等级评定，依据表面缺陷数量和面积划分等级（1~5级），1级最优，5级最差。

8 数据处理

8.1 数据有效性判定

- 8.1.1 测试过程应符合本文件及相关标准规定。
- 8.1.2 试验设备处于有效检定周期内。
- 8.1.3 试样无异常破坏或明显缺陷影响结果。
- 8.1.4 不满足上述条件的数据应予以剔除，并重新试验。

8.2 数据统计处理

同一指标的测试结果应采用算术平均值作为代表值，计算方法见公式（12）：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (12)$$

式中：

\bar{x} ——测试结果平均值；

x_i ——第*i*次测试结果；

n ——测试次数。

8.3 指标评分计算

8.3.1 单项指标等级判定

风电叶片各项物理性能、力学性能和表面性能指标应依据表1~表3的规定进行等级判定，分为A级、B级和C级，当测量值低于C级指标要求时，判定为不合格。

8.3.2 不同等级评分

各项指标根据6.1分级进行评分：

a) A级（优秀）：100分；

b) B级（良好）：80分；

c) C级（合格）：60分；

d) 不合格：0分。

8.3.3 各类指标归一化

对每类指标，先计算该类指标的平均得分，计算公式见式（1）：

$$S_{\text{类}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (1)$$

式中：

n ——该类指标项数；

S_i ——第*i*个指标得分。

8.3.4 指标权重

各类性能指标在综合评价中的权重应根据其对叶片服役安全性和耐久性的影响程度确定，权重分配见表5。

表5 评价指标权重分配

指标类别	权重系数
物理性能指标	0.25
力学性能指标	0.45
表面性能指标	0.30

8.3.5 综合得分计算

综合评价得分按公式（2）计算：

$$S = S_w \times 0.25 + S_l \times 0.45 + S_b \times 0.30 \quad (2)$$

式中：

S ——综合评价得分；

S_w ——物理性能指标平均得分；

S_l ——力学性能指标平均得分；

S_b ——表面性能指标平均得分。

8.3.6 综合等级判定

综合评价等级应符合表6的规定。

表6 综合评价等级划分

综合得分S	综合等级	技术水平
$S \geq 85$	A级	优秀
$70 \leq S < 85$	B级	良好
$60 \leq S < 70$	C级	合格
$S < 60$	不合格	不满足要求

9 评价报告

9.1 报告内容

评价报告至少应包括以下内容：

- a) 委托单位及样品基本信息；
- b) 试验依据及试验条件；
- c) 样品来源、批次及数量；
- d) 试验设备及校准信息；
- e) 原始测试数据及处理过程；
- f) 综合评价结果及等级判定；
- g) 异常情况 & 偏差说明；
- h) 评价人员、审核人员签字及日期。

9.2 报告保存

评价报告及原始记录保存应符合下列要求：

- a) 纸质报告应妥善存档，防潮、防火、防损坏；
 - b) 电子版报告应采用安全可靠的存储介质保存，并定期备份；
 - c) 报告数据应具备可追溯性，不得随意修改或删除；
 - d) 未经授权，不得擅自公开、复制或对外提供评价报告内容；
 - e) 评价报告及相关原始记录的保存期限不应少于5年，自报告签发之日起计算。
-