

德国劳氏集团 (GL Group) 对风力发电机组叶片认证规范之技术要求概述

德国劳氏集团 吴强 赵国彬 朱国

摘要: 全球风力发电发展迅速, 尤其是中国自 2006 年以来, 装机总量日趋加速。据最新数据统计, 2008 年中国新增装机容量名列世界第二, 累计总装机跃居世界第四。面对国内风电行业如此之超常规发展, 关于风力发电机组叶片(下称“风电叶片”或“叶片”)认证规范有必要为国内风电叶片生产厂家所熟悉。本文阐述了德国劳氏 (GL) 对风电叶片认证的技术要求。

关键词: 风电叶片 纤维增强复合材料 (FRP) 风电叶片设计分析 生产质量管理 风电叶片样片测试

前言:

风力发电机组种类繁多, 其中按照主轴与地面相对位置可分为垂直轴式 (图 1) 与水平轴 (图 2) 两种。目前被市场广泛使用的主流机型为水平轴式, 德国劳氏 (GL) 对风电叶片的认证规范要求适用于水平轴式风力发电机组范畴叶片。



图 1 垂直轴式



图 2 水平轴式

目前大型风力发电机组的叶片基本上采用 E-玻璃纤维、S-玻璃纤维、碳纤维以及木材 (有关木材作为增强材料, 本文不作探讨) 等增强材料, 通过开模手工铺放, 预浸料或闭模树脂真空导入 (RIM) 等成型工艺复合而成。(可参阅 “德国劳氏集团非金属材料认证中对叶片材料的认证技术规范要求” - 中国风能 2008 年第 6 期)

商业化风电叶片生产, 目前除西门子宣布采用一次成型技术外, 主流仍是以结构胶粘结、最终合模成型的技术工艺 (图 3)。



图 3 合模成型

叶片结构是中空型, 内部为加强龙骨 (图 4)。

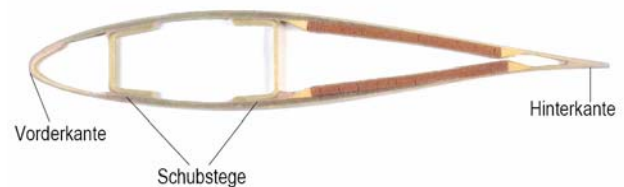


图 4 叶片结构剖面图 (一个翼型端面)

1. 风电叶片生产基本要求

1.1 对叶片生产商的要求

GL 规范要求生产厂商应具备相应的能力，能够稳定而且持续地生产出质量符合设计要求的风电叶片产品。根据具体情况，GL 对生产厂商进行现场审核，主要涵盖：

- 生产设施和设备
- 生产人员专业素质状况及培训计划
- 质量管理体系（QMS）确认

其中质量管理体系（QMS）主要是以 ISO 9001 为前提。通常情况下，厂商生产出的样片能够通过各项检测，符合设计要求后，再通过 GL 现场审核，便可进入该型号叶片的批量生产。

1.2 对风电叶片生产工艺流程的要求

叶片生产以其特有的加工工艺，尤其是纤维增强复合材料的制成品性能与其加工过程有着至关重要的关联，因此对风电叶片生产厂家的工艺要求也相应非常严格。其中需要控制环节概括如下：

a. 层压加工中的要求：

- 层压生产车间的温湿度
- 层压生产车间的照明，通风等
- 原材料存储条件，如温湿度等
- 加工过程中，工艺说明书的执行情况
- 层压制备方法
- 固化及后处理工艺
- 固化后的密封
- 叶片结构胶，粘结步骤及最终合模成型

b. GL 对叶片生产厂家的工艺监控，主要涵盖：

- 原材料监管
- 生产过程管理要求（例如：50x50cm 试验块留样）
- 产品质量检验

1.3 对叶片生产用原材料及叶片组件之层压板的实验测试要求

a. 叶片生产用原材料的要求

首先，叶片生产用纤维增强复合材料（FRP）原材料应优先选用经过 GL 认证过的产品，这样可以为原材料供应，提供性能上基本稳定可靠的保证。

其次，在叶片生产中，只有在确认材料性能的前提下才可被应用。主要材料如果有所变更，叶片生产厂商有义务向 GL 证明，其变更材料性能仍能满足并达到原设计对材料性能的要求。

叶片材料以纤维增强塑料的复合材料（FRP）为主。

通常主要材料可以分为以下几类：

- 基体树脂
- 纤维增强材料
- 预浸料
- 芯材
- 胶粘剂
- 油漆/胶衣

（其中，有关GL对基体树脂，纤维增强材料认证要求，可参阅“德国劳氏集团非金属材料认证中对叶片材料的认证技术规范要求”-中国风能2008年第6期。针对其他原材料，GL规范要求之中文阐述，笔者另行编写中。）

b. 叶片组件之层压板测试要求：

根据风电叶片的使用环境温度，GL 将其分成两种条件运行环境：-30° C 到+50° C 之间和低于-30° C 的情况。按照每种温度条件，GL 规范中详细说明了叶片组件，层压板的测试方法及要求。

生产叶片用原材料之层压板实验测试见表 1:

玻璃纤维增强层压板使用条件及测试要求		
	1) -30° C 到+50° C 2) 低于-30° C	低于-30° C 附加测试
1	热变形分析	动态热机械分析(DMA)
2	拉伸测试-纤维水平方向	拉剪测试
3	拉伸测试-纤维垂直方向	拉伸测试-纤维垂直方向(最低温度状态)
4	压缩测试-纤维水平方向	拉伸测试-±45° 层压板(最低温度状态)
5	压缩测试-纤维垂直方向	
6	拉伸测试-±45° 层压板	
碳纤维增强层压板使用条件及测试要求		
	1) -30° C 到+50° C	低于-30° C
1	拉伸测试-纤维垂直方向	动态热机械分析(DMA)
2	压缩测试-纤维水平方向	拉剪测试
3		拉伸测试-纤维垂直方向(最低温度状态)

表 1. 不同条件下层压板的实验测试要求

结构胶的性能数据, 至少包括在室温和+50°C环境中的拉剪测试, 数据判断还应考虑其粘结处特性以及叶片不同部位的不同剪切应力 τ_{Rk} (以及扩展因子 3.0) 和疲劳应力 τ_{Rd} (以及扩展因子 3.0) 要求。

为保证所有数据在设计过程的有效性, GL 还规范了一些工艺条件, 如复合材料中增强纤维与基体树脂的体积配比 (30%-55%), 剪切模量或扭曲模量数值在不同温度下的变化比例范围 (50°C测得值与 23°C测得值比例变化不能超过 20%) 等。

以上测试应在经 GL 认可的实验室进行, 或该实验室具备相应资质, 在 GL 的监证下完成。根据原材料特

性情况, 实验指标不尽相同, 一般包括: 玻璃化温度, 抗张强度, 失效应变, 弹性模量, 泊松比。所有数据应按相关国际标准 (参见 GL 规范相关章节) 实验并取平均值得出, 有效期通常为 4 年。

2 风电叶片设计分析

GL 规范中 5.5 章节 (以及与其相关的章节) 对叶片材料应变, 结构力学, 强度分析等作了详尽的阐述。

整个强度验证过程以材料特征值 R_k 为基础, 同时要满足结构设计应力值 S_d (由设计载荷导出的应力值) 小于材料 (或由其制成组件) 强度值 R_d

(R_d 等于 R_k 除以材料分项安全系数 γ_{Mx}) 即

$$S_d \leq R_k / \gamma_{Mx} = R_d$$

其中材料特征值 R_k 来自大量材料 (或由其制成组件) 的实验测试结果。

如果设计过程中没有根据确认的纤维增强复合材料 (FRP) 特征值 R_k 作为设计依据, 那么至少 “1.3 b” 中的材料测试必须进行, 所获得的数据必须在设计付诸生产前得以验证 (即证明材料或其制成组件至达到了用于设计验证的特征值)。

2.1 特征值计算

特征值 R_k 一般使用以下计算公式进行计算:

$$R_k(\alpha, P, \nu, n) = \bar{x} \left[1 - \nu \left[U_\alpha + \frac{U_p}{\sqrt{n}} \right] \right]$$

其中

U_i = 正态分布%

n = 实验次数

\bar{x} = 实验结果平均值

v = n 实验结果的变异系数

通常在实际测试中标准偏差为 5%，并且置信区间为 95%时，则以上公式可转化为：

$$R_k(5\%, 95\%, v, n) = \bar{x} \left[1 - v \left[1.645 + \frac{1.645}{\sqrt{n}} \right] \right]$$

2.2 材料分项安全系数

材料分项安全系数 γ_{Mx} 数值可分为以下几种情况：

- 短期强度验证 ($x = a$),
- 疲劳强度验证 ($x = b$),
- 稳定性分析 ($x = c$),
- 粘合强度分析 ($x = d$ and $x = e$).

这个参数的数值表现为分项安全系数 γ_{M0} 乘以一个或数个折减换算系数 C_{ix} ：

$$\gamma_{Mx} = \gamma_{M0} \cdot \prod_i C_{ix}$$

对所有分析条件，分项安全系数 $\gamma_{M0} = 1.35$ 。

C_{ix} 取值在不同验证模型、不同条件下进行变化，可直接引用下列系数，也可从实验测试中获得：

a. 短期强度验证折减系数：

1.35 (老化影响), 1.1 (温度影响), 1.1 (工艺过程, 如预浸料, 闭模树脂真空导 RIM), 1.2 (工艺过程, 如手糊、手工铺放), 1.0 (后固化成型), 1.1 (无后固化成型)

b. 疲劳强度验证折减系数：

$N^{1/m}$ (载荷循环次数 N 和斜率 K 的高周期疲劳强度曲线, m 由分析 S-N 曲线得出, 或参照

“2.2.4” 疲劳分析), 1.1 (温度影响), 1.0 (单向纤维增强材料), 1.1 (纤维增强无纺布或单向纤维增强材料织布), 1.2 (织布或毡布), 1.0 (后固化成型), 1.1 (无后固化成型), 1.0-1.2 尾缘: 1.0 (水平于叶片弦面方向疲劳测试), 1.1 (有限元计算), 1.2 (按伯努利理论的计算)

c. 稳定性验证折减系数: (见 “2.3.3 a”)

d. 粘合强度剪切验证折减系数：

1.5 (老化影响), 1.0 (温度影响), 1.1 (工艺过程, 粘合面可再塑性), 1.0 (后固化成型), 1.1 (无后固化成型)

e. 粘合强度疲劳验证折减系数：

1.0 (普通), 1.1 (温度影响), 1.1 (工艺过程, 粘合面可再塑性), 1.0 (后固化成型), 1.1 (无后固化成型)

2.3 强度分析

强度分析既可以用应变验证又可以用应力验证, 对于后者, 应额外建立最大载荷点处的应变来证实没有超过失效极限。

2.3.1 纤维失效分析

付诸实施之设计应力值(由设计载荷导出的应力值) S_d 可以直接用于分析受到拉伸、压缩、剪切载荷的区域。

2.3.2 纤维(层)间失效分析(IFF)

在验证允许失效力和在纤维水平方向与垂直方向(即横向应力)以及剪切应力失效时,应该采取纤维(层)间失效分析(IFF)。特征值参数按照折减系数($\gamma_{MA} * C_{IFF}$)减少,但 $\gamma_{MA} * C_{IFF}$ 必须不小于 1.35。对于验证所需要的横向应力值可由计算(有限元分析)或者实验得出。 C_{IFF} 数值大小由纤维层间产生 ΔF 来决定。

目前,比较通用的纤维(层)间失效分析方法为 VDI 2014 或 Puck 以及蔡-吴理论等,其中尤以 Puck 被广泛公认(图 5),因为它包含了各种失效模型,垂直纤维方向的拉伸、压缩,并且结合拉伸、压缩与剪切都可以有不同的分析。

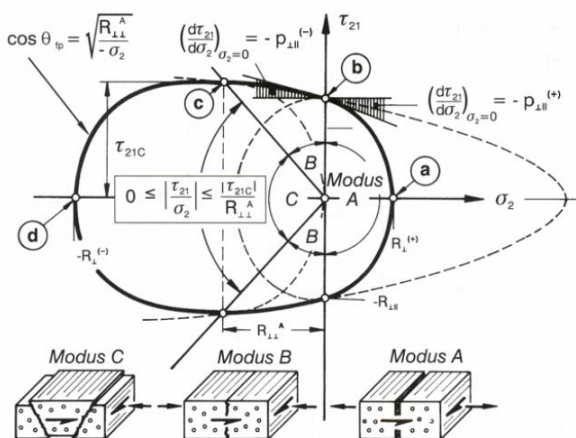


图 5 Puck 模型

失效模型	相对于纤维方向的失效模型
A	剪切与横向拉伸
B	剪切伴随横向压缩
C	横向压缩伴随剪切

表 2 失效模型

对于失效模型 A 和 B,纤维(层)间失效安全系数值为 1.35 到 1.98 之间,对失效模型 C,纤维(层)间

失效安全系数值为 1.98 到 2.64 之间。较低安全系数值只可在单层失效分析中使用,一旦多于一层失效并且因此影响组件刚度下降超过 5%时,应使用较高安全系数值进行分析。

除 GL 规范中要求对纤维层间失效进行分析外,其它规范或者标准均未提出此类要求。

2.3.3 稳定性分析

受压或受剪切区域的稳定性(抗屈曲和褶皱)应以满足付诸实施之设计应力值(由设计载荷导出的应力值) S_d 进行验证。

a. 稳定性验证折减系数:

1.1 (考虑了模量分散性的大层压板和夹芯结构的表面层), 1.3 (考虑了模量分散性芯材), 1.0 (纤维增强无纺布或单向纤维增强材料织布), 1.2 (适用于验证过最小特征值的芯材), 1.1 (温度影响)

如果利用有限元进行稳定性分析,附加安全系数 1.25 应该考虑进去。安全系数 1.633 可以应用在材料刚度平均值上来计算组件抗力设计值。对于那些通过计算进行验证的实际结构不能详细分析的区域,所采用的假定和估算应偏保守。

2.3.4 疲劳分析

叶片认证按照 GL 规范颁发证书的情况下,不需要对叶片进行疲劳试验,但是要对叶片材料(或由其制成组件)本身进行计算校验。

材料在周期载荷条件下发生性能(例如强度和刚度)损失称为材料疲劳破坏。叶片材料为复合材料构成,复合材料性质为不均一,各向异性的材料,因

此在疲劳分析时较为复杂。对于层压板不连续部位, 应考虑作用力的作用点和大的载荷循环数。

叶片所有的临界断面, 叶片根部以及载荷引入区域都要求进行疲劳分析。疲劳分析是以 S-N 疲劳曲线为分析依据, 在已知 R 因子前提下, 循环次数 N 通常在疲劳 S-N 曲线描绘得出(图 8)。

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$$

σ_{\max} 最大应力, σ_{\min} 最小应力,

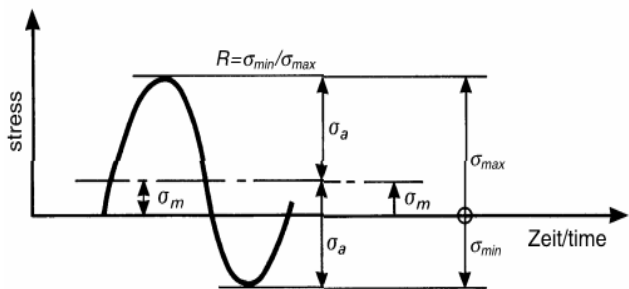


图 6 典型的完整周期应力

σ_m 平均应力, σ_a 应力振幅, σ_{\max} 最大应力, σ_{\min} 最小应力, R 应力比, $\Delta\sigma$ 应力范围 = $2\sigma_a$ 。

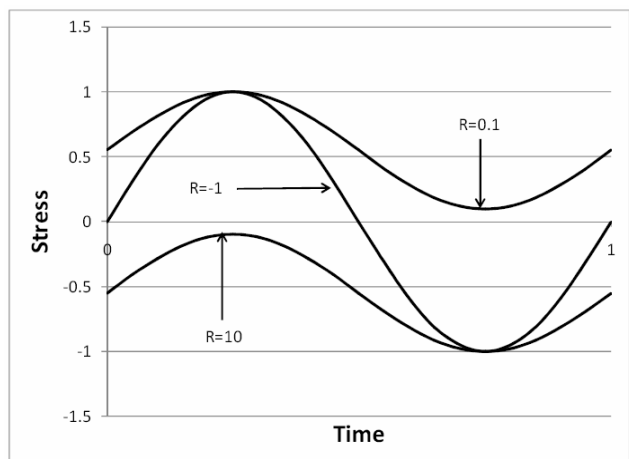


图 7 几种典型的 R 值

R = 0.1 拉伸-拉伸, R = -1 完全翻转, R = 10 压缩-压缩

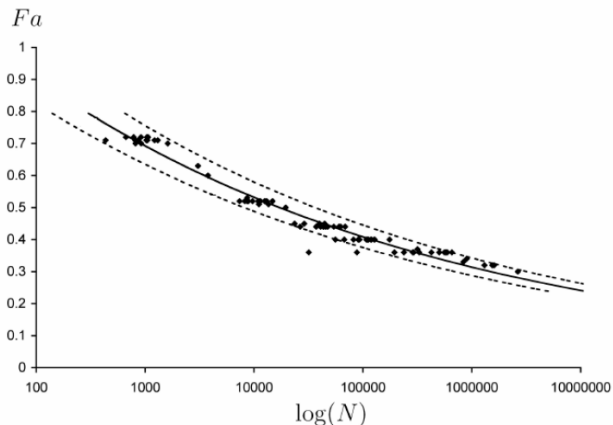


图 8 疲劳 S-N 曲线图

当特定材料由疲劳 S-N 曲线得出很多组 R 比的时候, 疲劳试验数据绘制成 (Goodman diagram) 古德曼应力极限图(图 9)。

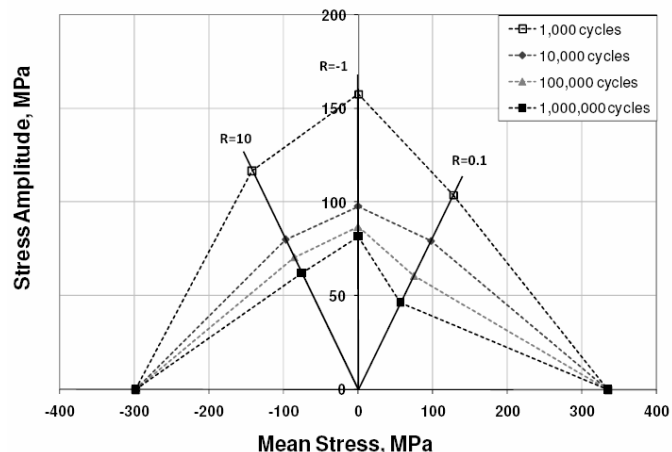


图 9 古德曼应力极限图举例

由古德曼应力极限图分析, 可以决定在一定的应力应变范围内, 允许负荷循环的次数, 图形表示为以下公式, 用来计算最终允许负荷循环次数 N。

$$N_{all} = \left[\frac{\frac{\varepsilon_{chT} + |\varepsilon_{chC}|}{2\gamma_{Mb}} - \frac{\gamma_{Ma}}{\gamma_{Mb}} \left[\varepsilon_{mean} - \frac{\varepsilon_{chT} - |\varepsilon_{chC}|}{2\gamma_{Ma}} \right]}{\varepsilon_a} \right]^m$$

ε_a = 应变循环振幅

ε_{mean} = 应变循环平均值

γ_{Ma} = 极端载荷分项安全系数

γ_{Mb} = 疲劳载荷分项安全系数

ε_{chT} = 极端载荷应变，拉力特征值

ε_{chC} = 极端载荷应变，压缩特征值

m = S-N 斜率

古德曼应力图可以用于确定给定应变下的许用载荷循环次数，它能用于损伤累计计算。损伤的定义是：施加的载荷循环数与许用载荷循环数商的总和，其必须小于或等于1，即

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

D = 损伤

n_i = 某级应变变程作用的载荷循环数

N_i = 某级应变变程许用的载荷循环数

当叶片材料(或由其制成组件)之层压板没有积累出疲劳 S-N 曲线时，GL 规范中给出疲劳验证中经验数据 $N^{1/m}$ ，其中 m 值分以下几种情况：

a. 玻璃纤维增强 聚脂树脂 $m=9$

环氧树脂 $m=10$

以上数值只适用与玻纤体积含量 30%–55%范围内，若不在此范围，或者采用其他树脂则材料疲劳 S-N 需要测定。

承载层压板是由单向玻璃纤维增强铺层制成的叶片可以用简化的应变验证方法来检验。在设计载荷点沿纤维方向的应变设计值为：

- 拉伸应变 $\varepsilon_{Rd, t} \leq 0.35\%$

- 压缩应变 $\varepsilon_{Rd, c} \leq |-0.25|\%$

如果不进一步验证，沿纤维方向在力的作用区内表面压力不能超过 $100\text{N}/\text{mm}^2$ 。

b. 碳纤维增强 环氧树脂 $m=14$

此数值只适用于碳纤维体积含量在 50%–60%范围内，若不在此范围，或者采用其他树脂则材料疲劳 S-N 需要测得。

承载层压板是由单向碳纤维增强铺层制成的叶片可以用简化的应变验证方法来检验。在设计载荷点沿纤维方向的应变设计值为：

- 拉伸应变 $\varepsilon_{Rd, t} \leq 0.24\%$

- 压缩应变 $\varepsilon_{Rd, c} \leq |-0.18|\%$

如果不进一步验证，沿纤维方向在力的作用区内表面压力不能超过 $150\text{N}/\text{mm}^2$ 。

3. 风电叶片全尺寸结构测试

目前，尽管在上述规范下的计算分析方法对叶片结构、强度等能够进行较为精确、周全的评估，但是与在图纸、计算书或电脑上的设计相比，实际的叶

片全尺寸结构试验仍为验证叶片设计的正确性、可靠性，制造工艺的合理性以及评估叶片结构的实际承载能力和使用寿命的一种不可替代的手段，GL 在进行机组认证过程中要求进行相应的叶片全尺寸结构试验。但叶片认证如果按照 GL 规范颁发证书时，不需要对叶片进行全尺寸疲劳试验，而只要求完成静载试验。

3.1 叶片测试要求

风电叶片的全尺寸结构检验中以设计载荷为基础，必须在被认可的试验检测中心进行，通常必须由 GL 认证人员现场监证整个检测过程。测试中，设计分析过程中那些最大载荷部分必须得以验证，从而校验、评判实际测得数值与设计数值承载吻合度。GL 规范了叶片需要进行拍打方向（垂直于翼型弦面的方向）和挥舞方向（平行于翼型弦面的方向）一个或数个固有频率、以及记录叶片的质量和重心等。

- 测试前需要提交详细的设计图纸，叶片测试说明书，叶片质量和重心。
- 测试叶片拍打和挥舞方向的一阶固有频率，当叶片超过 30 米时，则同时要求测试拍打方向二阶固有频率，并且可考虑测试扭曲固有频率。
- 测试叶片前后缘，挥舞方向正负静载。
- 测试叶片拍打方向正负静载。

$$S_{\text{Test}} = S_d \cdot \gamma_{1T} \cdot \gamma_{2T}$$

其中：

S_{Test} = 测试载荷 S_d = 设计载荷

γ_{1T} = 1.1 叶片批量生产中的离散系数

γ_{2T} = 1.0 测试环境温度在 20° C 以上

= 1.1 测试环境温度在 -30° C 以下

测试环境温度在 20° C 到 -30° C 之间时，此数值可以按照线性变化进行推算。

S_{Test} 至少涵盖 2.5%-70% 的叶片长度，并且重点测试那些设计过程中安全余量最小处。40%-100% 的载荷至少分四个级别达到 S_{Test} 最大载荷值，测试包括：

- 载荷引入点
- 叶片中部和尖部的弯曲度
- 上部龙骨和下部腹板四个截面的应变
- 叶片前后缘在翼型弦面最大值部位和叶片中部
- 叶片根部受剪应变(最好是在最大载荷情况下)
- 测试时环境温度

例如：测试过程中叶片加载力可以分为以下几个阶段，分别为静力消除、设计载荷 (S_d) 的 40%、60%、80%、100%，然后逐级递减为设计载荷的 80%、60%、40%，每步详细记录载荷、叶片测试点位移。加载 (S_{Test}) 过程中，每级力加载时间要求持续至少 10 秒。

3.2 叶片测试方法

静强度试验的加载类型主要有：分布式表面载荷、单点加载方法、多点加载方法等，叶片静力试验常用加载设备有：天车或吊车；液压或气动动作筒；静重（如沙袋）；绞车或卷扬机等。

目前，叶片设计评估中比较常用的是 Whiffle Tree (图 10) 测试方法，此种方法的结构、静载力通过起重机逐级传递到叶片的四个加载点 (图 11)，来完成叶片实际承载与设计承载的比较。

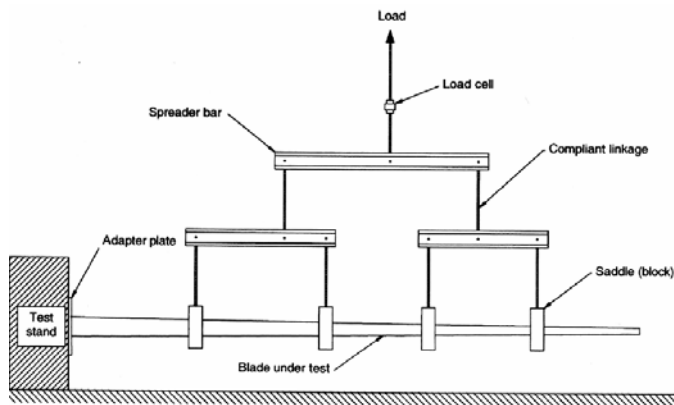


图 10 Whiffle Tree 试验模型



图 11 静载测试实拍

4. 避雷系统

风电叶片的主要材料为非导电材料，当遇雷电会积聚大量的电量，据数据统计，风电叶片初期未采取避雷装置时，每年损坏叶片中由于雷击的比例占 80%。（图 12）



图 12 叶片自然雷击

4.1 避雷装置

GL 规范要求设计时加装避雷系统，避雷材料应在导电性能、热性能有较强的适应性。对于叶片而言，遭遇雷电时，能够将电流从叶片经轮毂或机舱罩导向塔筒。当叶片超过 30 米时，叶尖部位每一面腹板应设至少一个接闪器，当叶片尺寸越大时（比如 >30 米），避雷接闪器数量上也应该随之增加。当叶片增强材料为碳纤维时，该处除常规避雷接收装置，应该外加装金属网。

雷电引导线端面，规范最低要求为：

铜铝合金	50 mm ²
钢带	60 mm ²
圆钢	78 mm ²

上述参数包括考虑到了：材料温度瞬间（1-2 秒）上升到 300° C，会波及到避雷装置安装点处树脂以及芯材的材料性能。

4.2 避雷测试

出于研究目的，一些特大型风电叶片生产厂商（例如丹麦的 LM Glasfiber）对避雷接收装置是进行实际检测的，以此获得大量的实际数据，完善该项目的设计要求。（图 13 避雷装置测试，LM 公司）



图 13 避雷装置测试

5. 叶片尖端到塔筒间隙

首先为了保证风电叶片与塔筒表面的最小间隙，通常需要进行动态变形和气动弹力变形分析。通常叶片在塔筒方向的最大变形大约为 $\pm 10^\circ$ ，此变形数值必须乘以安全系数 1.428，得出最后的变形参考数值。叶尖到塔筒间隙数值一定要大于叶片变形角度乘以安全系数的值。

其次为了确保叶片和其他部件的最小间隙，应使用可维修性极限状态进行变形分析，如果是进行静态分析，则对叶片运行时的所有载荷情况，最小间隙应保持为未变形结构间隙的 50%；对叶片运行时的静止载荷情况，最小间隙应保持为未变形结构间隙的 5%，如果经动态或气动弹力变形分析，最小间隙对叶片运行时应保持为未变形结构间隙的 30%。

6. 叶片认证文档资料

6.1 所需要基本的设计过程文件如下：

- 所有原料实测数据文档资料
- 叶片设计分析，计算书等
- 叶片交货状态时的图纸和技术规格书
- 叶片生产工艺说明书以及图纸
- 所有翼型端面的坐标（ASCII 或 Excel 格式）
- 叶片样片试验实测数据

6.2 所需要基本的生产过程文件如下：

- 叶片生产工艺所有相关文件，如各项跟踪检查表等
- 叶片外形尺寸检验，包括抽检固有频率等
- 叶片重量和重心的确定
- 叶片粘合检查
- 材料随机抽检合格率

6.3 所需要基本的随叶片交货文件如下：

- 叶片型号
- 生产年份与产品序列号
- 叶片尺寸
- 叶片重量和重心
- 气动刹车类型（如适用）
- 铭牌：生产厂家，型号，产品序列号

结论：德国劳氏(GL)对于风电叶片认证，要求必须有“IFF”即“纤维层间失效分析”，具有其独特性，也是国内叶片厂商，在引进消化吸收国外技术后，进行自我知识产权设计叶片时必须重视的；在叶片疲劳测试的讨论中，按 IEC61400-23 TS 规范是必须的，虽然属 TS “Technical Specification”即“技术规格”范畴，但成为正式标准后，对国内全尺寸叶片检测，着实是提出了上一台阶的要求。

GL 中国风能部(GL Wind China)旨在为国内厂商阐述、引入较成熟的国际技术规范，启示国内风电叶片行业摒弃“纯粹为证而做认证”的观念，认识到“为快速生产风电叶片一味引进所谓国外先进设计（甚至不同商家重复引进类似的技术）而忽视自我知识产权开发”的现象，对整个行业健康发展，长期而言，是极大的阻碍。

风电叶片制造是一多学科、技术资本密集、应具备长期战略发展眼光的行业，其涉及：1) 空气动力学的基础理论研究（如风洞试验，叶片翼型的定型及选型分析等），2) 专业软件包的开发（如已获得 GL 认证：英国 GH 公司的 Bladed，美国国家可再生能源实验室“NREL”的 FAST 和 ADAMS，含 AeroDyn 模块等），3) CAD /CAE 辅助结构力学、疲劳分析

开发应用高素质人才培养和经验积累, 以及 4) 高资本投资、符合规范的叶片生产厂房、设施建设 (还包括系统的人员培训, 严格的工艺管理制度等), 5) 完善的叶片全尺寸结构试验检测中心建设 (叶片厂商自备或第三方专业检测中心), 加之 6) 纤维增强复合材料 (FRP) 供应链的培养、建立、完善, 即众多材料供应厂商能够针对叶片生产厂商提出的具体要求, 不断研发新品, 长期、稳定地生产质量经检测、认证合格的风电叶片原材料。

参考资料:

- 1) "Guideline for the Certification of Wind Turbines", Germanischer Lloyd, Edition 2003 with Supplement 2004. Chapters - 6.2, 5.5, 3.1, 3.2, 3.3.3, 3.4.3-5, 8.9.3.9, 1.2.5.3, 4.3.4.1
- 2) Wacker, G. GL, "Requirements for the certification of rotor blades" (2003)
- 3) Wacker, G.; Hauschildt, M., "Kleerverbindungen in Rotorblättern für Windenergieanlagen" (2003)
- 4) A. Puck, "Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten", Carl Hanser Verlag München, Wien, 1996, p. 59-80
- 5) "Guidelines for design of wind turbines", DNV/Risø, Second Edition 2002
- 6) "Design and manufacture of wind turbine blades, offshore and onshore wind turbines", DNV-OS-J102, 2006
- 7) IEC TS 61400-23 "Wind turbine generator systems – Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades", Edition 2001
- 8) JB/T 10194—2000 "风力发电机组风轮叶片", 田野、石海增、鲁金华、田卫国、陈余岳
- 9) Scott W. Case ,John J. Lesko ,Michael W. Hye, "Long Term Durability of Glass Reinforced Composites", 2008, Virginia, p.6-8

- 10) M.J.Hinton, P.D.Soden, A bdul-Salam Kaddour, "Failure criteria in fibre reinforced polymer composite", Elsevier Science Ltd., 2004
- 11) Tony Burton, David Shape, Nick Jenkins, "Wind energy handbook", West Sussex, England, 2001, p.211-213
- 12) Ivan Mortensen "LM Lightning Protection and evolutions for larger wind turbine rotor blades" (2005)
- 13) <http://www.awea.org>. "U.S. and China in race to the top of global wind industry", (2009)

德国劳氏 风力发电机组叶片认证技术要求

吴强 赵国斌 朱国

德国劳氏集团

摘要：全球风电发展迅速，尤其是中国，自2006年以来装机总量日趋加速。据最新数据统计，2008年中国新增装机容量名列世界第二，累计装机容量跃居世界第四。在这种形势下，国内风电叶片生产厂家有必要熟悉德国劳氏集团（GL）对风电叶片认证的技术要求。

关键词：叶片 纤维增强复合材料（FRP） 叶片设计分析 生产质量管理 叶片样片测试

引言

风电机组种类繁多，其中按照主轴与地面相对位置可分为垂直轴式（图1）与水平轴式（图2）两种。目前，被市场广泛使用的主流机型为水平轴式，德国劳氏集团对叶片的认证规范要求适用于水平轴式风力发电机组叶片范畴。

目前，大型风电机组的叶片基本上采用E-玻璃纤维、S-玻璃纤维、碳纤维以及木材（有关木材作为增强材料，本文不作探讨）等增强材料，通过开模手工铺放、预浸料或闭模树脂真空导入（RIM）等成型工艺复合而成。商业化风电叶片生产，目前除西门子宣布采用一次成型技术外，主流仍是以结构胶粘结、最终合模成型的技术工艺（图3）。叶片结构是中空型，内部为加强龙骨（图4）。



图1 垂直轴式



图2 水平轴式



图3 合模成型



图4 叶片结构剖面图（一个翼型端面）