

纤维增强复合材料风力发电机叶片性能检测综述

李树虎 王丹勇 秦贞明 贾华敏 郭建芬 李茂东

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要 介绍了复合材料风力发电机叶片的特点、检测项目及相关技术标准、检测机构和检测能力。重点论述了复合材料风力发电机叶片材料性能试验和全尺寸试验情况,其中全尺寸试验主要包括静态试验、固有特性试验、疲劳试验、超声波检查试验、红外成像分析试验、声学检查试验、雷击试验等,对试验目的、原理及其研究状态进行了阐述。展望了本领域的技术发展趋势,对于复合材料风力发电机叶片的质量控制和性能可靠性有一定的参考价值。

关键词 复合材料 风力发电机叶片 全尺寸检验

风力发电具有资源再生、容量巨大、无污染、综合治理成本低等优点,是未来电力的先进生产力^[1]。从20世纪70年代至今,国内外风电事业得以蓬勃发展,目前主流风电机组的单机容量为1.5~2.0 MW,容量越大,发电效率越高,技术难度越大。风力发电机叶片是接受风能的最主要部件,也是风力发电机中基础和关键的部件,其良好的设计、可靠的质量和优越的性能是保证机组正常稳定运行的决定因素。

纤维增强复合材料(FRP)以其轻质、耐腐蚀和高拉伸模量一直是风力发电机叶片最常用的材料,是复合材料成功应用的典型大型构件^[2]。1.5 MW主力机型风力发电机叶片长34~37 m,每片重约6 t,设计制造难度很高。由于复合材料叶片外型庞大、质量重,一旦出现事故,不仅会带来巨大的经济损失,而且往往伴有灾难性的后果,风力发电机叶片损毁事件在世界各地也时有发生。为了最大限度地保证叶片产品质量可靠性和安全性,世界上建立了市场准入制度,叶片必须经权威机构检验和认证,考察结构设计和安全性是否符合IEC和其它相关标准,取得相应资质后方可进入市场。

1 FRP风力发电机叶片特点

目前世界上绝大多数风力发电机叶片采用FRP制造,其优点主要表现为:①它可以根据风力发电机叶片的受力特点设计强度与刚度,利用纤维受力为主的理论,可把主要纤维安排在叶片的纵向,减少材料用量,减轻叶片的质量;②容易成型。叶片具有复杂的气动外形,如用金属制造相当困难,而用复合材料制造则容易得多,模具制成后,可以进行批量生产;③优良的力学性能。叶片使用寿命约为20年,要求叶片具有良好的疲劳强度。FRP的疲劳强度较高,缺口敏感性低,具有良好的疲劳性能。此外,

FRP的内阻尼大,抗震性能较好;④耐腐蚀性好。风力发电机安装在野外,近年来又大力发展离岸风电场,风力发电机安装在海上,叶片要受到各种气候环境的影响,要具有耐酸、碱、水气的性能^[3]。

2 风力发电机叶片检测项目

欧盟建议采用IEC标准统一认证规则和要求。IEC有关叶片技术标准包括:IEC 61400-1《风力发电机系统第1部分:安全要求》,此标准规定了叶片载荷工况、局部安全系数、检验要求等;IEC 61400-23《风力发电机系统第23部分:转子叶片的全尺寸比例结构试验》,该标准规定了叶片静态强刚度测量、频率测量及疲劳测试方法。我国风力机标准委员会也组织制订了一系列标准规范,其中关于大型风力机叶片的标准是JB/T 10194-2000《风力发电机组风轮叶片》。该标准基本上参照了IEC标准与德国劳埃德船级社(GL)规范,对复合材料叶片的选择、制造工艺、结构设计等方面均做出规定。中国船级社组织制订了风力发电机认证规范。国家标准及认证规范的颁布实施使国内生产厂家按与国际标准等效的技术要求进行整机及部件的设计、生产与质量控制,使我国的风力发电机叶片产品能在一个高的起点上参与国内与国际竞争^[4]。

风轮叶片国家标准及中国船级社关于风力发电机的认证规范均要求进行叶片试验,所有试验的目的是为了验证设计的正确性、可靠性和制造工艺的合理性,并为设计和制造工艺的完善和改进提供可靠的依据,最终达到准确进行性能表征、严格控制材料和产品质量、为产品研发提供保障的目的。

《风力发电机组风轮叶片》标准规定:风力发电机叶片的检验可以分为出厂检验、型式检验和鉴定

检验三类。每片叶片均要做出厂检验;新产品试制完成时应进行鉴定检验;凡是属于下列情况之一要进行型式检验:①新产品经鉴定定型后,叶片制造商第一次试制或小批量生产时;②停产一年以上,产品再次生产时;③正常生产的叶片自上次试验算起已满三年;④叶片的设计、生产工艺、主要原材料的变更影响叶片性能时,进行相关项目的试验;⑤质量监督机构、叶片制造商和用户三方对产品质量、性能发生异议时可以进行有关项目的试验。每种检验包含的试验项目及分类归纳如表1。

表 1 风力发电机叶片各种检验包含项目表

序号	试验名称	出厂 检验	鉴定 检验	型式 检验
1	气动性能试验	×	√	×
2	定桨距叶片的叶尖气动 刹车机构功能试验	×	√	√
3	固有特性试验	×	√	√
4	静力试验	×	√	√
5	疲劳试验	×	√	×
6	解剖试验	×	√	×
7	雷击试验	×	√	×
8	叶片随件试件试验	√	×	√
9	其它性能(如叶片翼型尺寸、质量、重心、内部缺陷或无损检测等)	√	√	√

3 风力发电机叶片材料性能试验

风力发电机叶片具体试验项目包括两类:材料试验和全尺寸叶片结构试验。

《风力发电机组风轮叶片》标准明确规定了选择风力发电机叶片材料体系应遵守的准则:①疲劳强度高;②静强度适当;③在所有环境下的可靠性;④质量轻;⑤成本低。所选叶片材料必须满足设计要求,并适合于加工制造,材料制造商应该具有GB/T 19002 质量认证体系,提供材料的合格证和检验单。主要材料进厂后应该进行性能复验,试验类型和范围按设计要求或有关规定进行,试验方法按国家相关标准进行。国内叶片厂商和相关研究机构具备了叶片材料性能的基本测试能力,但是针对GL认证中特别要求的复合材料板压缩性能测定,国内只有中国兵器工业集团公司五三研究所等少数单位具备本项检测能力并开展了相关检测工作。针对玻璃纤维(GF)增强塑料层压板,《风力发电机组风轮叶片》标准中明确了具体指标要求。

4 全尺寸风力发电机叶片试验

4.1 叶片主要测试机构和测试能力

建立叶片检测机构是各国竞相发展的重点,国外风电产业发展较快的国家或大的叶片制造厂商都

建立了自己的叶片检测中心。其中仅丹麦就建有三处叶片检测中心,特别是2005年由挪威船级社、丹麦Risoe国家实验室、FORCE技术公司合作成立的Blade Test Center A/S(BLAEST),将最大检测叶片长度增加至100 m,以满足未来几年内可能的需要。荷兰能源研究中心(ECN)通过与Delft大学以共建的形式成立了WMC,承担着风电机组材料、部件和结构的研究开发工作,也承担基础研究课题(如新材料的研究)及产业合作工作(如部件认证测试)。美国国家可再生能源实验室(NREL)下属的国家风能技术研发中心(NWTC)也建有叶片检测平台^[5]。

世界主要叶片测试机构的主要测试能力归纳如表2所示^[6]。

表 2 世界主要叶片测试机构的最大叶片测试长度

测试机构	最大叶片测试长度/m	测试机构	最大叶片测试长度/m
BLAEST	100	LM - Glasfiber	80
CENER	75	New and Renewable Energy Center(NaREC)	70
WMC	60	RIS Spaerker	50
NWTC	50	Vestas Blades	40

国内也有相关厂商和研究机构建立了全尺寸风力发电机叶片检测能力,但是检验规模较小、检测项目单一。目前,国内还没有完备的叶片检测机构^[7]。因此无论从缩小国际国内叶片检测的差距还是从满足我国风电产业叶片检测的需要来讲,进行大型全尺寸叶片测试都显得十分必要。

4.2 静态试验

所有FRP叶片结构试验都需要一个有足够刚强度和稳定性的固定基座,一般在室外宽阔地带用钢筋混凝土浇筑而成。NWTC于2005年建造的基座可以进行50 m长风力发电机叶片的结构试验。

静态试验的目的是为了验证叶片的静强度储备,并为校验刚度、强度计算方法以及结构合理性提供必要的数据。静态试验的加载方式主要有以下几种:沙包等重物模拟压力加载方式,丹麦RIS实验室早期采用沙包等重物模拟施加压力的方式进行7.5 m长叶片静态试验;垂直方向多点负载方式,美国NWTC采用垂直方向4点负载方式进行47 m长叶片静态试验;水平方向多点负载方式,丹麦LM公司采用6点水平加载方式进行叶片静态试验。上海玻璃钢研究院在进行660 kW叶片静态结构试验时,采用了绞车手动加载的方式。静态结构试验应先进行静刚度测量,再进行静强度试验。进行静刚

度测量时,试验载荷不超过设计载荷,加载部位不得有残余变形和局部损坏。在试验过程中,采取逐级加载测量的试验方法,对同一试验内容一般不少于 3 次试验,或用不同的试验方法验证数据的重复性和准确性。为了消除加载时因结构间隙带来的非线性,提高数据测量的精度,可采用预加载或其它适宜的试验办法,试验结果处理可采用最小二乘法。进行静强度试验时,试验载荷应尽量与叶片设计载荷一致,既要满足叶片的总体受力要求,又要满足叶片的局部受力要求。静强度试验载荷顺序:预试-使用载荷试验-设计载荷试验-破坏试验。静态试验过程中,要对叶片关键部位进行应变和变形情况的监控,传统上采用“应变片-电阻应变仪-信号采集处理系统”的方式,近年来国外已经开始大量使用预埋光线传感器的方式。

4.3 固有特性试验

叶片的振动特性包含三种振动形式。①挥舞:叶片在垂直于旋转平面方向上的弯曲振动;②摆振:叶片在旋转平面内的弯曲振动;③扭振:绕叶片变距轴的扭转振动。叶片主要的振动形式为挥舞和扭转。试验模态分析方法可以分为频响函数法(简称“测力法”)和环境激励法(简称“不测力法”)两种。作用在叶片上的气动载荷是动载荷,其频率为风轮转速的整倍数。对于 3 叶片风力发电机组,频率为转速 3 倍的动载荷分量最大。为避免叶片共振或产生较大的动应力,规范要求叶片的一阶频率高于 3 倍转速频率 20%。叶片的固有频率可以通过计算,也可以通过试验测定,固定叶片根部后,一般可采用重锤敲击法或激振器激振法,使叶片产生振动,通过数据采集和处理系统分析响应信号,得到叶片的自振频率。丹麦 Risoe 实验室对模态测试中不同的锤击激励方式进行比较,并对一些可能的影响因素如试验台刚度、叶片自重等做了相关研究^[8]。毛火军^[6]利用中科院工程热物理所与保定国家新能源产业基地合作建立的风电叶片检测台进行了 38 m 长叶片的全尺寸试验模态的研究。试验采用不测力法,通过一台八通道的动态数据采集系统分挥舞和摆振两个方向对叶片的振动模态进行了测试。采集到的时域振动信号通过 FFT 变换等过程进行了处理,提取出了模态参数,并利用 MAC、MOV 等对模态参数进行了验证。

4.4 疲劳试验

疲劳试验的目的是暴露叶片的疲劳薄弱部位,

验证设计的可靠性、工艺的符合性,为改进设计、工艺、编制使用维护说明书、确定叶片使用寿命提供依据。试验过程中,叶片一般水平放置,叶根与试验架固定,呈悬臂梁形式。在叶身应力较大处贴电阻应变片,并用导线与动态应变仪连接。一般可简化为铁块加静载荷,发动机带动偏心轮加动载荷。用变频调速仪来控制 and 调节振动频率^[9]。

疲劳试验载荷既可以采用程序谱加载又可以采用等幅谱加载,等幅谱载荷应力幅按设计载荷包线最大值选取,循环特征依据实际载荷环境确定;对于程序谱加载,载荷谱应根据载荷环境分析及运用应变测量统计结果得到的使用载荷谱编制,编制载荷谱时要保证损伤等效,并能实现随机加载。加载误差在最大峰值时一般小于 5%。

根据叶片疲劳载荷谱,在 20 年使用期,疲劳载荷交变次数应达 10^8 次量级。对于大型叶片,试验加载速度 1 次/s 左右。为加速疲劳试验速度,应加大载荷,减少试验次数,一般加载次数达 500 万次,需 2~3 个月。对于 FRP 叶片,若要加速试验时,试验频率不应导致试件发热而使疲劳特性受影响。

NREL 最近发展了一套新型叶片动态响应测试系统,新系统仅用原系统 1/3 的能量就能提高 2 倍的频率,不到 2 个月时间就能完成 300 万次叶片疲劳试验。NREL 使用本系统进行了 37 m 长 GE 公司叶片疲劳寿命检测。

4.5 超声波检查试验

超声检测技术,特别是超声 C 扫描,由于显示直观、检测速度快,已经成为大型先进复合材料构件普遍采用的检测技术。

自动超声波检查非常适合风力发电机叶片检验。利用自动超声波检验法可以有效地检测层的厚度变化,显示隐藏的产品故障,如分层、内含物、气孔(干燥地区)、缺少粘合剂、翼梁与外壳之间以及外壳的前缘与后缘之间粘结不牢等。超声波检验可以直接用来优化叶片设计和产品参数,从而大幅降低叶片故障的风险^[10]。

超声检测技术不仅能有效检测出先进复合材料中的缺陷,而且在判断材料的疏密、密度、纤维取向、屈曲、弹性模量、厚度等特性和几何形状等方面也有一定的作用^[11],超声检测技术对于分层类缺陷的检测灵敏度最小值为 20 mm × 20 mm,对于其它类型缺陷的灵敏度为 2~5 mm²。超声检测技术的缺点是检测效率低、对不同类型的缺陷要使用不同规格

的探头,而且在检测过程中需要使用耦合剂^[12]。

4.6 红外热成像分析试验

红外热成像技术是将不可见的红外辐射转换成可见图像的技术,利用这一技术研制的装置称为热成像装置或热像仪。作为一种新兴的无损检测方法,热成像技术具有快速、实时、可大面积检测、无需耦合剂、无需接触被测面等优点,在复合材料构件的无损检测技术应用方面有着良好的前景^[11,13-16],特别适合于检测复合材料薄板与金属粘接结构中的脱粘类缺陷,尤其是当零件或组件不能浸入水中进行超声 C 扫描检测以及零件表面形状使得超声检测实施比较困难时,可使用红外热成像技术检测^[17]。红外热成像技术检测对于复合材料中的分层也具有很大的探测潜力,能够准确地确定出复合材料中分层的深度^[18]。

叶片的红外热成像分析检测可以提示设计人员叶片结构的危险区,这种危险区的小的缺陷可以导致最终的故障^[19]。

4.7 声学检查试验

声-超声(AU)技术又称应力波因子(SWF)技术。与通常的无损检测技术不同,AU技术主要用于检测和研究材料中分布的细微缺陷群及其对结构力学性能(强度或刚度等)的整体影响,属于材料的完整性评估技术^[12]。

声学分析或应力波分析使锁定小的裂痕和结构上的小缺陷成为可能。在疲劳检验和静态检验时使用声学检测系统使叶片在遭到破坏的程度大到足以毁坏叶片之前停止检验成为可能。声学检测系统是按照预定义模式放置在叶片上的一套压电传感器系统。传感器与数据采集系统相连接,这样可以采集传感器的信号。

采用 AU 振幅 C 扫描技术不仅能够对复合材料与金属材料间的粘接界面进行有效检测,而且克服了超声反射技术信号清晰度不高、超声透射技术传感器可达性差的缺点。美国 Sandia 国家试验室的 W. P. Winfree 等^[20]采用 AU 振幅 C 扫描技术对复合材料涡轮叶片中复合层与柱形金属(钢)芯棒间粘接界面状态进行检测,从 AU 图像中可以非常清楚地看到结构左边区域粘接界面存在大面积的脱粘缺陷。

4.8 雷击试验

闪电是对风力发电机组叶片最具有破坏力的方式之一,普通闪电通常最大能量值大约为 30 kA,比

较大的闪电能量值超过 150 kA(在自然界发生的概率仅仅大约为 0.5%),闪电释放的巨大的能量可以严重地破坏叶片,甚至可以导致叶片完全被毁坏^[21]。目前大型 FRP 叶片均装有防雷措施,标准装置为:在叶片内部安装电缆,作为雷电的通路,电缆的最小截面积为 50 mm²,电缆的一端与叶尖的集闪器相连,另一端接轮毂,雷电被集闪器接收并通过电缆向翼根安全传导。

LM 公司开发了一种新型多接收器雷电保护系统,并且在叶片监控系统上配有雷电传感器,自动记录雷击信息,这些数据可通过有线或无线方式传输到风机塔座下的电脑,供风场操作者监控和处理。LM 公司同时开发了一种新的大型叶片导雷质量鉴定试验程序,基于新的(草本)(美国)SAE ARP5416 和(欧洲)EUROCAE ED105 航空器材导雷测试标准,在一个 35.0 m 长的叶片上进行了高压电击下的全程测试^[22]。

5 结语

FRP 风力发电机叶片材料性能试验和全尺寸试验可以验证设计的正确性、可靠性和制造工艺的合理性,随着高功率、大尺寸叶片的不断开发,迫切需要新的测试技术、新的测试设备不断介入,需要准确的试验数据为设计和制造工艺的完善提供依据,以全面促进 FRP 风力发电机叶片行业的发展。

参考文献

- [1] 潘艺,周鹏展,王进. 风力发电机叶片技术发展概述[J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(3): 48-51.
- [2] 王炳雷,李树虎,陈以蔚. 树脂基复合材料在大型风力发电机叶片中的应用[J]. 工程塑料应用, 2008, 35(4): 76-79.
- [3] 董锋岩. 复合材料风机叶片发展现状及成型工艺进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(增刊): 343-345.
- [4] 陈余岳,张锦南. 玻璃钢/复合材料风力机叶片的开发[J]. 上海电力, 2007(4): 371-374.
- [5] 毛火军. 风电叶片全尺寸检测和结构分析[D]. 北京: 中国科学院, 2008: 18-20.
- [6] Cotrell J, Musial W, Hughes S. Necessity and requirements of a collaborative effort to develop a large wind turbine blade test facility in north america, NREL/TP-500-38044[R]. America Colorado, 2006(5).
- [7] 王仲颖,胡润青,秦海岩,等. 中国风电产业化发展国家行动方案, 中国可再生能源规模化发展项目[R]. 2005. 06.
- [8] Henrik Broen, Pedersen, Ole Jesper Dahl Kristensen. Applied modal analysis of wind turbine blades[M]. Coloxade: National Renewable Energy Laboratory, 2006-05-01.
- [9] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000:

800.

[10] 风机叶片检验主要项目概述(一)[EB/OL]. (2007-06-18) http://www.huaxiawind.com.cn/detail_blade.asp?infol=3796.

[11] 李志君. 先进复合材料的无损检测[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(5): 28-31.

[12] 王小永, 钱华. 先进复合材料中的主要缺陷与无损检测技术评价[J]. 无损探伤, 2006(4): 2-6.

[13] 徐涛清. 复合材料无损检测技术新进展[J]. 宇航材料工艺, 1996, 26(2): 63-66.

[14] Titman D J. Applications of thermography in non-destructive testing or structures[J]. NDT&E International, 2001, 34(2): 149-154.

[15] Dattma V, Marcuccio R, Ppalettere C, et al. Thermo graphic investigation of sandwich structure made of composite material [J]. NDT&E International, 2001, 34(8): 518-519.

[16] Rajic N. Principal component thermograph for flaw contrast enhancement and flaw depth characterization in composite structures [J]. Composite Structures, 2002, 58(4): 521-528.

[17] 陈桂才. 复合材料缺陷的红外热波无损检测技术[J]. 宇航材料工艺, 2004, 34(1): 56.

[18] Hagemaiier D, Mcfaul H J, Moon D. Non-destructive testing of graphite fiber composites structure society of automotive engineers [C]. National Aeronautic and Space Engineering and Manufacturing Meeting, Los Angeles, Calif. 1970: 10.

[19] 风机叶片检验主要项目概述(二)[EB/OL]. (2007-06-18) http://www.huaxiawind.com.cn/detail_blade.asp?infol=3797.

[20] Winfree W P, Zalameda J N. Thermographic detemination of delamination depth in composites[J]. Proc of SPIE, 5073: 263.

[21] 风电机组叶片防闪电系统概述[EB/OL]. (2007-05-16) http://www.huaxiawind.com.cn/detail_blade.asp?infol=3000.

[22] 新的大型叶片导雷质量鉴定试验程序[EB/OL]. (2006-04-04) http://www.cwea.org.cn/tech_se/display_info.asp?cid=44.

SUMARY OF PROPERTY TESTING FOR COMPOSITES WIND TURBINE BLADE

Li Shuhu, Wang Danyong, Qin Zhenming, Jia Huamin, Guo Jianfen, Li Maodong
(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

ABSTRACT The characteristic, testing item and relevant standard, testing organization and ability of composites wind turbine blade are reviewed. The material testing and full-scale structural testing of composites wind turbine blade are discussed emphatically, full-scale structural testing concludes static testing, natural frequencies testing, fatigue testing, ultrasonic wave testing, infrared image testing, acoustics testing, thunder testing et al. The propects of technology & developing trends in this field are made. There is certain reference value for quality control and property reliability of composites wind turbine blade.

KEYWORDS composites, wind turbine blade, full-scale structural testing

宜兴市东山新材料有限公司

碳化硅微粉

我公司生产的碳化硅微粉采用气流粉碎, 细度 < 2 μm, 具有纳米材料的性能, 而价格只有其 1%, 它具有分散性好, 和塑料相容性好, 耐酸、耐碱、耐磨, 强度达九级, 明显改善塑料的耐磨性、强度、耐候性、耐高温性。

硅微粉

本品是石英经 2800℃ 电熔气化冷却的硅微粉, 具有不饱和硅酮, 和塑料的亲性好, 性能好, 但价格便宜, 只有 3 元/公斤。

陶瓷釉粉

各种熔点、各种细度陶瓷釉粉, 由于力学性能好, 耐酸、耐碱, 可提高塑料的耐磨性及力学性能。

东山公司以自主创新为立厂之本, 具有超强的自主开发能力, 欢迎各界朋友合作, 共同开发新材料、新工艺取代进口, 欢迎您提出特种需求。公司可供无机材料 200 多种, 可供各种规格玻璃粉末。

厂址: 江苏省宜兴市大浦镇宜浦路工业园区 邮编: 214226
电话: 0510-87457988(传真), 87457669, 13906152806 E-mail: web@188X.com
http://www.188X.com 开户: 工行东山办 账号: 1103028909000039117