

风机叶片缺陷的无损检测方法比较与评价

刘 双^{1,2}, 胡 斌², 贺 铸¹, 李运涛²

(1. 武汉科技大学,材料与冶金学院,武汉 430081;2. 中国特种设备检测研究院,北京 100029)

摘要:以文献调研的形式对风机叶片的典型缺陷及产生原因进行了分析与总结,叶片在生产、安装和运行的过程中,都有可能产生缺陷和损伤,通过检测与监测相结合的方式,可以预防并且能够避免意外事故的发生。目前,国内还没有相对完善的方案针对风机叶片的缺陷及损伤检测,结合风电产业的发展和对无损检测方法的比较与评价,得出以下结论:超声波检测技术适用于叶片安装前的静态检测,红外热成像检测技术比较适用于叶片的现场检测,声发射检测技术比较适用于叶片服役过程的动态监测。

关键词:风机叶片;缺陷;检测与监测;比较与评价

中图分类号:TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2015)03-0047-04

Comparison and Evaluation on the Non-destructive Testing Methods for the Wind Turbine Blades Defects

LIU Shuang^{1,2}, HU Bin², HE Zhu¹, LI Yun-tao²

(1. School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: The paper analyzes and summarizes typical defects causes of wind turbine blade by the literature research. In the process of production, installation and operation, it is possible to produce defects and damage. The occurrence of the accident can be prevented and avoided through a combination of test and monitoring. At present, there is a lack of relatively perfect solution for the defect and damage detection of wind turbine blades domestically. By combining with the development of wind power industry and through the comparison and evaluation of various nondestructive testing methods, the following conclusions might be drawn that Ultrasonic testing technology is suitable for static test of the blade before installation, Infrared thermal imaging technology is applied to field detection of the blade and acoustic emission testing technology is applicable to dynamic monitoring of blade under the service process.

Key words: Wind turbine blade; Defect; Test and monitoring; Comparison and evaluation

风能是绿色的可再生能源,有良好的发展前景。我国可开发的风能潜力巨大,资源丰富,总的风能可开发量约有 1000~1500 GW。可见,风电有潜力成为未来能源结构中重要的组成部分^[1]。因此风力发电的发展也备受关注,而风机叶片是风电机组的重要组成部分,是关键部件之一,其成本占装

机成本的 20%左右,也是捕获风能的装置,其性能的好坏和使用寿命的长短直接影响着风电的正常运行和系统的效率。因此,叶片的可靠性和安全性显得尤为重要,它是保障风机正常运行的关键所在。

风机叶片一般由玻璃纤维复合材料制成,因其制造工艺的复杂性,在成型过程中难免会出现缺陷。另外,由于工作环境的恶劣性与工况的复杂多变性,在运行过程中也会出现不同程度的损伤。通过对文献的调研了解到,目前,对于风机叶片的无损检测方法主要有 X 射线、超声波、声发射、光纤传

收稿日期:2014-08-18

基金项目:国家质检公益性行业科研资助项目(201210076)

作者简介:刘 双(1990—),男,硕士研究生,主要从事复合材料制叶片缺陷检测及评价技术研究。

感器、红外热成像检测技术等。但每种检测方法都具有各自的优点和局限性,而且并没有完善的标准来规定检测方法的适用阶段。

就以上问题,笔者首先对叶片产生缺陷和损伤的原因进行了分析,其次是对无损检测方法的特点和适用性进行了比较,最后对检测方法的适用阶段和存在的问题进行了总结。

1 风机叶片的缺陷和损伤原因分析

风机叶片产生缺陷的原因是多方面的,在生产制造过程中,会出现孔隙、分层和夹杂等典型缺陷。孔隙缺陷主要是由于树脂与纤维浸润不良,空气排挤不完全等因素造成;分层缺陷主要是因为树脂用量不够,二次成形等;夹杂缺陷的产生主要是由于加工过程中的异物混入。

此外,叶片在运输和安装过程中,由于叶片本身尺寸和自重较大而且具有一定的弹性。因此,一定要做好保护叶片的工作,以防产生内部损伤。值得注意的是,风机在运行过程中叶片也会出现不同程度的损伤,其主要缺陷类型有裂纹、断裂和基体老化等,外界冲击是产生裂纹的主要原因,断裂通常是由缺陷损伤累积引起的,风机在正常运行情况下叶片不会发生突然断裂,而基体老化是由于风机叶片长期工作在沙尘、雨水和盐雾腐蚀的恶劣条件下造成的。

在生产、安装和运行过程中对叶片进行无损检测,一方面可以促进对损伤失效特征及失效模式方面的研究,另一方面可以避免运行事故的发生。因此,针对缺陷和损伤产生的阶段,制定出一套适用于风机叶片的检测方案,对保障风机安全运行和提高叶片的使用寿命具有重要意义。

2 无损检测方法的比较与评价

无损检测是建立在现代科学技术基础上的一门应用型技术学科,其特点是在不损坏被检测物体结构的前提下,应用物理方法检测物体的物理性能、状态特性以及内部结构,检查其是否存在缺陷,从而判断出被检测物是否合格,进而对其评价。

应用在工业上的无损检测方法有射线、超声波、磁粉、渗透、涡流等五大常规无损检测技术。此外,还有非常规无损检测技术,主要包括声发射、红外热成像、微波等。下面针对检测风机叶片的几种方法进行比较与评价。

2.1 X 射线检测技术

X 射线检测技术是五大常规无损检测方法之一,在工业上有着广泛的应用。X 射线能够穿透物体,如果物体某些区域存在缺陷,它将改变物体对射线的衰减,引起透射射线强度的变化,采用胶片感光成像方法,就可以判断物体是否存在缺陷以及缺陷的位置和大小。

对于风电叶片而言,何杰等^[2]表明 X 射线技术是检测风电叶片中孔隙和夹杂等体积型缺陷的良好方法,可以检测垂直于叶片表面的裂纹,对树脂、纤维聚集有一定的检测能力,也可以测量小厚度风电叶片铺层中的纤维弯曲等缺陷,但对风电叶片中常见的分层缺陷和平行于叶片表面的裂纹不敏感,文献中对孔隙和夹杂等缺陷进行了检测,从结果中可以观察到缺陷的存在,可满足叶片出厂前的检测,能够进行定性分析。中北大学电子测试国防重点实验室的研究人员将 X 射线与现代测试理论相结合,在数字图像处理阶段,通过小波变换与图像分解理论,将一幅图像分解为大小、位置和方向等不同的分量,改变小波变换域中的某些参数的大小,实时地识别出 X 射线图像中的内部缺陷^[3]。朱省初等^[4]通过试验的方法验证了不同工艺条件下的缺陷检出情况,并表明进行射线探伤的工艺管理是非常必要的。综上可知,在试验条件下,X 射线检测技术可实现对风机叶片的缺陷检测。

对于在役风机叶片,由于受现场因素的影响及高度的限制,使用 X 射线检测方法很难实现现场检测,但对于风机叶片的体积缺陷有一定的检出能力,由于受叶片尺寸的限制,该方法还未广泛地应用于叶片的全尺寸检测。

2.2 超声波检测技术

超声波检测法的原理是利用复合材料本身和缺陷处的声学性质对超声波传播路径的影响来检测材料内部或表面缺陷。在五大常规无损检测技术中,由于其具有检测对象范围广、检测深度大,缺陷定位准确、速度快以及便于现场使用等特点,所以是国内外应用最广泛、使用频率最高且发展较快的一种无损检技术。

超声波检测技术比较适用于风机叶片成型后的检验。此时,风机叶片还未安装,检测的目的是为了保证风机叶片的出厂品质。利用超声波检测技术可以有效地检测厚度的变化,能够显示出产品的内在缺陷,如分层、夹杂、气孔、缺少胶黏剂以及

脱黏等缺陷,从而可大幅度降低叶片失效的风险。由于复合材料结构具有明显的各向异性,会产生反射、散射及衰减的影响,使得超声波在复合材料多层结构中的传播变得复杂,针对风机叶片结构的超声波检测方法主要有脉冲回波法^[5]和空气耦合超声导波法^[6]。文献[2]和[5]中的研究都表明高频的超声波换能器可有效检测风电叶片表层附近的内部分层缺陷,而低频的超声波换能器可用于检测深层的分层缺陷和厚度变化。文献[6]中的研究表明空气耦合超声波导波检测方法可有效地检测风电叶片的分层、缺胶等内部结构缺陷,可以初步得到缺陷的几何形状和尺寸大小。凡丽梅等^[7]通过仿真软件,得到了检测的最佳工艺条件,并模拟检测了埋深分别为1,5,9 mm的内部缺陷。文献[8]中表明超声波检测手段很难检测出复杂缺陷或微小缺陷,较难进行实时动态监测。以上的研究说明了超声波检测技术对于风机叶片缺陷检测的可行性,但较难实现动态监测。

由于该方法检测周期长,对不同类型的缺陷需使用不同规格的探头,在检测过程中需使用耦合剂,也是局限性所在。所以,对于实时的动态监测,超声波检测技术很难实现,但可以进行出厂前的静态检测。

2.3 声发射检测技术

声发射是指伴随固体材料在断裂时释放储存的能量产生弹性波的现象。声发射检测方法是通过接收和分析材料的声发射信号来评定材料性能或结构完整性的无损检测方法,探测到的能量来自被测物体本身,在许多方面不同于其它常规无损检测方法,它是一种动态非破坏检测技术。该方法具有高效率、长距离、可实现在线监测等优点。

韩敬宇等^[9]首先对风机叶片的裂纹产生机理进行了分析,并认为裂纹的扩展主要是因为叶片在运行过程中的振动和停车以及环境因素的影响,都会造成裂纹的加深、加长、加宽,严重威胁着叶片的安全。所以,对于叶片裂纹的检测是非常重要的。随后,对可以测量裂纹萌生及扩展的四种方法进行了比较,综合考虑了各方法的优势和局限性,最终采用了声发射技术对叶片裂纹故障进行监测,结果表明该方法可实现对风机叶片裂纹的监测。邬冠华等^[10]以施加载荷的方式对复合材料损伤过程中发出的信号特征进行了试验研究,并表明随着加载时间的持续,声发射信号有明显突增,各种表征信号

量急剧增加。可见,声发射检测技术可对裂纹的萌生和扩展进行动态监测,进而能够有效检测出风机叶片结构的完整性,评价缺陷的实际危害程度,可预防意外事故的发生。在检测过程中,接收的信号是缺陷在应力作用下自发产生的,但在实际应用中,由于声发射对环境因素十分敏感,因此对监测系统会造成干扰,影响检测的准确性,所以很难对缺陷进行定量分析,但是能够提供缺陷在应力作用下的动态信息,对于寿命评估有一定的优势,可对叶片进行安全评价。综上所述,声发射技术可有效的检测出叶片裂纹等缺陷,对实时的获取叶片动态信息有很好的帮助。

该方法与超声波法相比,在检测静态叶片品质方面没有优势,然而,由于该技术对被检件的接近要求不高,因而比较适用于在役风机叶片的实时监测,采用多传感器长距离布置的方式,能够接收到叶片在运行过程中所产生的声发射信号,通过后处理,可以获得损伤部位的动态信息。采用该方法对叶片进行监测,主要是因为叶片在运行过程中,会受到外力作用,进而产生应力集中现象,缺陷处在外力作用下会自发的产生信号,这样就能够判断出缺陷产生的位置。

2.4 光纤传感器检测技术

光纤传感器的基本原理是当叶片内部产生纤维断裂、基体开裂和脱胶等损伤时,埋入构件内的光纤将随之断裂,光纤输出端将探测不到光,以此便可以判断出损伤的位置、大小及趋势等。

在风机叶片的关键位置埋入光纤传感器阵列,探测其在加工、成型及服役的动态过程中内部应力、应变的变化,并对外力、疲劳等引起的变形、裂纹进行实时监测,可实现对风机叶片的状态监测与损伤评估^[11]。南京航空航天大学飞行器系的研究人员基于复合材料层板中的多方位多模光纤网络的特点,针对检测层板内部发生的多处横向冲击损伤提出了重构算法;通过检测系统获得的图像信号,可实时、定量、直观重构并显示出层板内部的损伤位置和程度,以上的研究说明了通过光纤传感器技术可以对风机叶片进行内部损伤的监测。

光纤具有体积小、灵敏度高、抗电磁干扰等特点,本身既是传感器,又能传输光信号,易于埋在构件中而不影响构件整体的强度,而且光纤可对内部结构参数的变化进行连续实时的安全检测,可探测出各种原因造成的材料与结构内部损伤^[12],因此,

该方法具有很好的发展前景,但由于光纤传感器存在性能稳定性及价格方面的问题,其在应用中受到很大的限制。

2.5 红外无损检测技术

红外检测的原理是基于物体辐射特性的不同,当外部热源对被检物体进行热激励,缺陷处的表面温度会发生变化,红外热像仪可实时记录物体表面的温度场变化,通过数据处理系统可实现对物体的缺陷分析^[13]。此方法属于非常规检测方法,但由于其具有操作安全、灵敏度高、检测效率高等诸多优点,近几年受到广泛关注。

严天鹏^[14]针对风力机叶片常见的几种缺陷,采用传统的手糊成型法,使用风力机叶片特有的单向型纤维增强体和环氧树脂基体,制作了内部含有裂缝、渗胶、分层、气孔等四种典型缺陷的样品。使用红外热成像仪,运用主动式热成像方法,在室内环境下,对这几种缺陷进行了检测并作了分析。分析结果表明缺陷尺寸越大、深度越浅,冷却过程中形成的最大表面温差越大,越容易检测,对于制造风力机叶片的玻璃纤维增强复合材料,热成像技术是一种比较适用的无损检测方法,尤为适用于常见的分层和渗胶类型的缺陷;并说明了热载荷的均匀程度是该检测方法的一个基本要素,这主要是由于纤维材料为各向异性材料,热扩散率较大,内部缺陷在热像图上的形状会有变形。岳大皓等^[15]在对风机叶片红外无损检测的试验研究中,针对生产过程中的砂眼缺陷,灌注过程中的白斑缺陷,铺层过程中的褶皱缺陷以及固化过程中的鼓包缺陷,采用闪光灯激励方法进行检测。通过观察红外热像图可以观察到这些缺陷,但对于风机叶片较深层结构的缺陷检测还有待进一步研究。DATTOMA 等^[16]利用红外热成像技术实现了对风机叶片结构的胶渗透、浸水和脱胶等典型缺陷的识别,试验结果表明红外热成像技术可用于实验室和现场缺陷检测。郭天太^[17]在文献中给出了用红外热成像技术进行无损检测的例子,表明采用热像仪检测能显示缺陷的大小、形状和缺陷深度。李托雅等^[18]通过试验和仿真计算两方面证明了感应激励红外热像方法在裂纹检测中具有优势。通过以上的研究和对文献的调研可知,红外热成像检测技术能够检测出玻璃纤维制叶片的几种典型缺陷。

该方法与其他检测方法相比,具有非接触、可大面积远距检测以及操作简单和易于实时观察等

特点,更加适用于风机叶片的现场检测。但由于受到塔筒的高度限制,在现场检测中有一定的局限性,考虑到光线的照射以及叶片表面温差较小等因素,这都会对检测结果造成不利影响,对于缺陷的检出和定性分析有一定难度。所以,该方法在应用方面还有待进一步的开发研究,研究意义较大。

3 结语

目前,国内还没有相对完善的方案针对风机叶片的缺陷及损伤检测,随着风电的快速发展以及国家的高度重视,保证风机正常运行,减少叶片破损事件的发生是首要任务,这样不仅可以有效提高经济效益,而且可以提高风电产业的竞争力。

结合风电产业的发展和对无损检测方法的比较与评价,得出超声波检测技术适用于叶片安装前的静态检测,红外热成像检测技术比较适用于叶片的现场检测,声发射检测技术比较适用于叶片服役过程的动态监测。

参考文献:

- [1] 李俊峰,蔡丰波,唐文倩,等. 中国风电发展报告 2011 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2011.
- [2] 何杰,杜玲,王冬生,等. 风电叶片的主要缺陷与无损检测技术评价[J]. 玻璃钢,2013(1):1-7.
- [3] 葛邦,杨涛,高殿斌,等. 复合材料无损检测技术研究进展[J]. 复合材料,2009(6):67-71.
- [4] 朱省初,魏培生,赵久国,等. 不同射线照相工艺条件下的裂纹检测[J]. 无损检测,2013,35(7):39-41.
- [5] JASIŪNIENĖ E, RAIŠUTIS R, ŠLITERIS R et al. Ultrasonic NDT of wind turbine blades using contact pulseecho immersion testing with moving water container[J]. Ultragarsas, 2008, 63(3):28-32.
- [6] RAIŠUTIS R, JASIŪNIENĖ E, ŽUKAUSKAS E. Ultrasonic NDT of wind turbine blades using guided waves[J]. Ultragarsas, 2008 , 63(1):7-11.
- [7] 凡丽梅,王从科,于波,等. 玻璃纤维增强树脂基复合材料内部缺陷检测的仿真[J]. 无损检测,2013,35(9): 52-55.
- [8] 周伟,张洪波,马力辉,等. 风电叶片复合材料结构缺陷无损检测研究进展[J]. 塑料科技,2010,38(12): 84-86.
- [9] 韩敬宇. 基于声发射技术的风电叶片裂纹无线监测系统研究[D]. 北京:北京化工大学,2010.
- [10] 邬冠华,刘斯以,吴伟,等. 蜂窝夹层复合材料的压缩损伤声发射特征[J]. 无损检测,2013,35(12):42-45.

专题(GB/T 11345—2013系列标准评析)征稿启事

2013年9月18日正式发布的钢焊缝超声检测国家标准GB/T 11345—2013《焊缝无损检测 超声检测技术、检测等级和评定》、GB/T 29711—2013《焊缝无损检测 超声检测 焊缝中的显示特征》和GB/T 29712—2013《焊缝无损检测 超声检测 验收等级》于2014年6月1日起实施。而旧版本标准GB/T 11345—1989《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级》是1989年5月8日发布,1990年1月1日起实施的,新老标准交替的周期为24年。新标准发布与实施以来,引起了业界,尤其是从事焊缝超声检测相关工作人员的广泛关注。为了帮助同行更好地理解和执行GB/T 11345—2013系列标准,本刊拟于近期推出“GB/T 11345—2013系列标准评析”专题,特向行业内相关专家、学者及工程检测人员征稿。

征稿内容:

- (1)新标准的主要内容及与旧版本的比较;
- (2)对新标准中变化内容的理解;



专题(ASME 2013 NDE 规范评析)征稿启事

2013版的ASME锅炉及压力容器规范已于2013年7月1日发行。现多数规范卷册的中译本已经出版,为了帮助ASME规范用户和相关读者更好地了解和执行新版规范,提高实际应用水平,本刊拟于近期推出“ASME 2013 NDE规范评析”专题,主要对ASME规范(2013)第V卷《无损检测》内容进行评析,现特向锅炉和压力容器等行业内专家、学者、工程检测技术和管理人员征稿。

征稿内容:

- (1)新规范的主要内容及与旧版本的比较;
- (2)对新规范中变化内容(新条款、新方法、新程序、新要求)的理解;
- (3)为适应新规范的变化,实际检测工作中做了哪些工作,还存在哪些疑问或困难;
- (4)对正确执行或实施规范的建议。



- [11] 杨建良,向清. 探测复合材料结构冲击损伤的内埋光纤阵列[J]. 光纤与电缆及其应用技术,1997,(4): 27-30.
- [12] RIPPERT L, M WEVERS M, HUFFEL V S. Optical and acoustic damage detection in laminated CFRP composite materials [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60:2713-2724.
- [13] OMAR M A. A quantitative review of three flash thermography processing routines[J]. Infrared Physics and Technology, 2008, 51:300-306.
- [14] 张天鹏. 红外热成像技术在风力机叶片无损检测方面的应用研究[D]. 北京:北京工业大学,2004.

(3)为适应新标准的变化,实际检测工作中做了哪些工作,还存在哪些疑问或困难;

(4)对正确执行或实施标准的建议。

(征稿不只局限于上述内容,欢迎行业内专家学者们多多赐稿)

征稿要求:

(1)文章请按照本刊已发表论文的格式撰写,长短不限,能够表述清楚即可;

(2)请在2015年4月28日前将稿件发送至编辑部邮箱,并请注明“GB/T 11345系列标准征稿”字样;

(3)对参与讨论的文章,经审核后择优发表。

期待您的来稿! 编辑部联系人:朱绍华;电话:021-65559079;Email:ndt@mat-test.com。

《无损检测》编辑部

(征稿不只局限于上述内容,欢迎行业内专家学者们多多赐稿)

征稿要求:

(1)文章请按照本刊已发表论文的格式撰写,长短不限,能够表述清楚即可;

(2)请在2015年6月30日前将稿件发送至编辑部邮箱,并请注明“ASME 2013 NDE 规范专题征稿”字样;

(3)对参与讨论的文章,经审核后择优发表。

期待您的来稿!

编辑部联系人:朱绍华;电话:021-65559079;
Email:ndt@mat-test.com。

《无损检测》编辑部

[15] 岳大皓,伍耐明,李晓丽,等. 风电叶片红外热波无损检测的实验探究[J]. 红外技术, 2011, 33 (10): 614-617.

[16] DATTOOMA V, MARCUCCIO R, PAPPALTERE C, et al. Thermographic investigation of sandwich structure made of composite material[J]. NDT&E International, 2001, 34(8):515-520.

[17] 郭天太. 红外热成像技术在无损检测中的应用[J]. 机床与液压, 2004(2):110-111.

[18] 李托雅,田裕鹏,王平,等. 感应激励红外热像无损检测及其在裂纹检测中的应用[J]. 无损检测, 2014, 36(1):15-18.