

风电叶片复合材料压缩损伤破坏声发射监测^{*}

周伟¹ 张晓霞² 韦子辉¹ 钟 旻¹

(1. 河北大学质量技术监督学院, 保定 071002; 2. 河北大学图书馆, 保定 071002)

摘要 研究了风电叶片单向复合材料的压缩力学特性及其声发射响应特征。结果表明,复合材料的横向和纵向压缩力学性能及其声发射响应特性明显不同,纵向压缩强度、模量高,失效应变小,对应的声发射相对能量、幅度高,但撞击累积总数少。复合材料具有脆性破坏的特点,横向压缩以45°剪切失效为主,纵向压缩以层间劈裂为主。风电叶片复合材料压缩损伤破坏与声发射的相对能量、幅度、撞击等参量特征有关。

关键词 风电叶片 复合材料 压缩 声发射

风电叶片作为风电机组最重要的零部件,造价占整机的20%以上,其良好的设计、可靠的质量是决定风电机组性能优劣的关键^[1]。玻璃纤维增强复合材料以高的比强度、比模量和良好的抗疲劳性能等优点,成为风电叶片最常用的材料。在实际风况下,风电叶片要承受拉、压、弯、扭等载荷作用,从而引起风电叶片结构的损伤累积和失稳破坏^[2-3]。为此,风电叶片复合材料结构的健康监测对其长期可靠运行具有重要作用^[4]。

声发射检测技术对动态缺陷敏感,在裂纹萌生和扩展的过程中能实时发现,通过记录的声发射特征参数可以有效反映复合材料各阶段的变形损伤机制,从而可以更全面、更深入地了解复合材料的损伤破坏过程^[5-9]。近年来,国外相关学者相继开展了声发射技术在风电叶片的早期损伤预报和结构健康监测方面的研究^[10],通过使用声发射检测系统实时监测风电叶片的声发射特征信号,可使叶片损伤在发展到叶片可能毁坏之前被检出^[11]。国内在该领域的研究处于起步阶段,主要包括风电叶片裂纹的声发射监测^[12]和结构健康监测的设想^[13],但具体针对风电叶片复合材料损伤破坏声发射监测方面的研究较少。

笔者通过对风电叶片单向复合材料进行横向和纵向压缩破坏试验,采用声发射技术全程监测复合材料试样的加载破坏过程,确定复合材料在压缩载荷作用下的力学性能及其相应的声发射响应特征,揭示风电叶片复合材料压缩损伤破坏的变化规律,为风电叶片复合材料结构的早期损伤预报和健康监测提供参考依据,为风电叶片检测标准与认证体系的形成奠定基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

单向玻璃纤维环氧预浸料: G15000, 厚度 0.12 mm, 威海光威复合材料有限公司。

1.2 主要设备与仪器

平板硫化机: XLB-D400 型, 商丘市东方橡塑机器有限公司;

万能拉压试验机: CMT5305 型, 深圳市新三思材料检测有限公司;

全波形声发射仪: AMSY-5 型, 德国华伦公司。

1.3 试样制备

将单向玻璃纤维环氧预浸料裁剪成 280 mm × 200 mm 大小的层片, 在平板模具上铺设 60 层后, 放入平板硫化机加热加压固化, 获得约为 6 mm 厚的层板。在制样机上将层板切割成相应横向和纵向试样, 尺寸为 16 mm × 16 mm × 6 mm。

1.4 性能测试

风电叶片复合材料试样压缩试验在万能拉压试验机上进行, 采用位移控制加载, 试验机加载速率设为 1 mm/min, 匀速单向压缩。试样加载过程中, 同时利用声发射仪实时监测并记录整个加载过程中的声发射信号。试验采用的 VS150-RIC 声发射传感器频带宽度为 100~900 kHz, 中心频率为 150 kHz, 采样频率为 10 MHz。考虑到传感器外壳直径 (28 mm) 比压缩试样尺寸大, 加载过程的声发射监测无法使传感器接触到试样上, 故采取图 1 所示的传感器布置方式。压缩试样与下加载盘、传感器与下加载盘之间均采用凡士林耦合, 声发射信号采集

^{*} 河北省自然科学基金项目 (E2010000297)

收稿日期: 2011-09-14

阈值设为 46 dB。

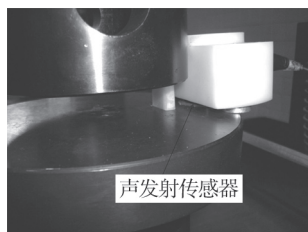


图1 试样加载与传感器布置

2 结果与讨论

2.1 压缩力学性能与破坏特征

图2示出复合材料试样的横向和纵向压缩应力-应变曲线。由图2可知,复合材料的横向压缩强度为 147 MPa,失效应变为 0.0513;纵向压缩强度为 389 MPa,失效应变为 0.0325。从开始加载到试样破坏,横向压缩应力-应变曲线表现出明显的非线性特征,这表明复合材料试样在整个横向加载过程均有损伤产生,损伤积累到一定程度后导致试样的最终破坏;纵向应力-应变曲线基本为直线,说明纵向加载过程未出现明显的损伤累积,而是加载到一定载荷后失稳破坏。此外,从图2还可以看出,复合材料的纵向压缩弹性模量高于横向压缩初始弹性模量。复合材料横向压缩时,树脂基体承受主要载荷;而纵向压缩时,基体和纤维共同承受压缩载荷。因此,与纵向相比,横向压缩对应较低的强度、较大的失效应变和较低的弹性模量。

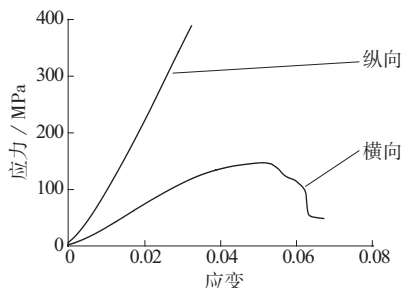
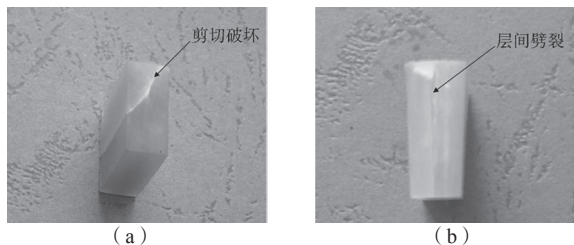


图2 复合材料试样压缩应力-应变曲线

图3示出复合材料试样典型的压缩破坏特征。



(a)

(b)

a—横向压缩; b—纵向压缩

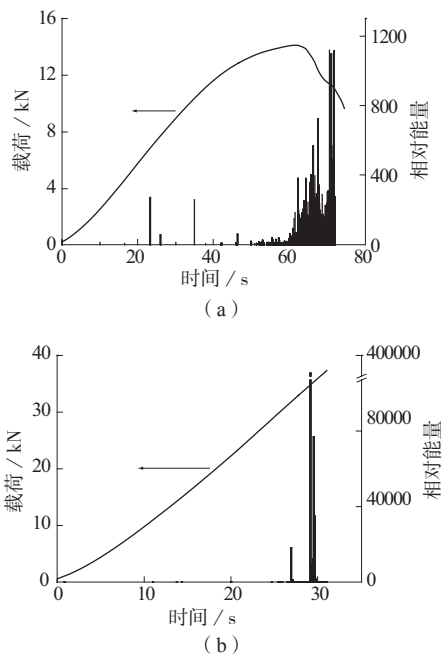
图3 复合材料试样压缩破坏特征

由图3可知,压缩试样横向和纵向失效形式明

显不同。横向压缩失效主要表现为基体的剪切破坏,断口与加载方向约成 45° ,且具有脆性破坏的特点。纵向加载时,由于纤维与树脂基体的弹性模量和泊松比不同,相同载荷下产生的变形失配,使纤维/基体界面应力集中明显,并在垂直于界面方向形成拉应力,纵向加载到一定程度后,发生层间劈裂失效。

2.2 压缩响应声发射特征

复合材料试样的压缩载荷-声发射相对能量-时间历程见图4。从图4a可以看出,横向压缩加载初始阶段,由于损伤较少,声发射相对能量几乎为零;随着载荷的增加,出现少量一定能量的声发射事件,说明此时已有基体微裂纹等损伤出现;随着载荷的继续增加,产生的声发射事件逐渐增多,且相对能量越来越大,直至试样的最终剪切破坏,此时对应最高的声发射相对能量,数值为 1118。与横向压缩相比,图4b中纵向压缩条件下的中间阶段未出现明显声发射能量释放,这表明该过程无明显的损伤出现。直到加载的最后阶段,才出现明显的高能量声发射事件,最高相对能量达 365665,远高于横向压缩条件下对应的声发射相对能量。其原因是横向压缩对应基体微裂纹等损伤累积导致的宏观剪切破坏,而纵向压缩与纤维及纤维/基体界面破坏有关。



a—横向压缩; b—纵向压缩

图4 复合材料试样压缩载荷及声发射相对能量

复合材料试样压缩加载过程声发射信号撞击累积-幅度-时间历程如图5所示。依据图5a中声发射撞击累积和幅度的变化情况,可将整个过程

划分为起始演化阶段和破坏阶段两个部分。试样加载起始演化阶段,出现少量幅度 60 dB 左右的声发射信号,这与基体微裂纹等损伤有关,且该阶段声发射撞击数变化很小。随着载荷的增加,损伤累积明显,幅度在 50~75 dB 的声发射信号增多,且声发射撞击数累积呈直线上升趋势,直至试样宏观剪切破坏。破坏阶段持续时间较短,对应的最高幅度为 76.5 dB,这说明纤维未出现明显损伤,横向压缩失效主要是基体的破坏。从图 5b 可知,纵向压缩过程也可划分为起始阶段和破坏阶段两个部分。与图 5a 相比,起始阶段产生的声发射信号更少,破坏阶段出现的声发射信号总量少,但幅度分布范围宽,最高幅度达 93.8 dB,且声发射撞击数累积增加更快,该阶段持续更短。这表明纵向压缩破坏主要涉及到纤维/基体界面破坏和部分高应力纤维的断裂。

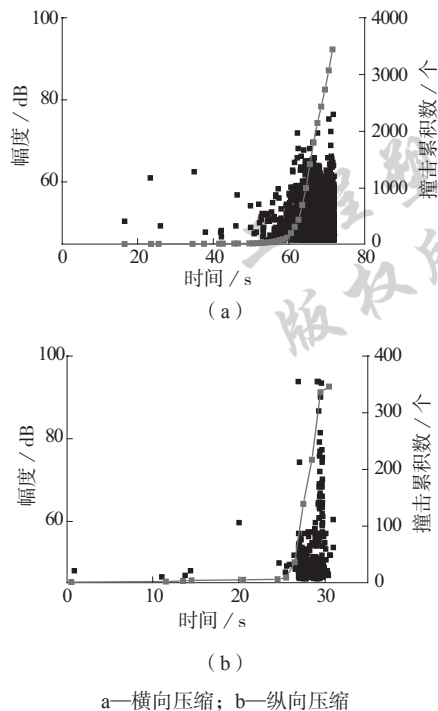


图5 声发射信号撞击累积-幅度-时间历程图

3 结论

(1) 风电叶片复合材料横向压缩对应树脂基体的剪切破坏,纵向压缩对应层间劈裂;与纵向相比,横向压缩对应较低的强度、较大的失效应变和较低的弹性模量。

(2) 风电叶片复合材料横向压缩对应较低的声发射相对能量,幅度分布在 50~75 dB,声发射撞击累积总数较多;而纵向压缩破坏阶段对应较高的声发射相对能量,幅度分布在 50~93.8 dB,声发射撞击累积总数较少。

(3) 风电叶片复合材料检测中,可综合考虑声发射相对能量、幅度、撞击等特征参量来预测结构的早期损伤。

参考文献

- [1] Joselin H G M, Iniyan S, Sreevalsan E, et al. A review of wind energy technologies [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11 (6): 1117-1145.
- [2] Thomas M H, Dharmaraj M, James E L. Post buckling analysis of a wind turbine blade substructure [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127 (4): 544-552.
- [3] Mahmood M S, Roham R. Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade [J]. Composite Structures, 2006, 74 (3): 332-342.
- [4] 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.
- [5] 王波,矫桂琼,陶亮,等. 三维编织复合材料拉压性能的实验研究[J]. 实验力学, 2002, 17 (3): 302-306.
- [6] 万振凯,李静东. 三维编织复合材料压缩损伤声发射特性分析[J]. 纺织学报, 2006, 27 (2): 20-24.
- [7] Amilcar Q, Basir S, Frederick J, et al. Acoustic emission based tensile characteristics of sandwich composites [J]. Composites: Part B, 2004, 35 (6-8): 563-571.
- [8] 王从科,李金鹿,李根臣,等. 环氧树脂拉伸损伤过程的声发射特性研究[J]. 工程塑料应用, 2009, 37 (11): 61-64.
- [9] 李海斌,阳建红,刘承武,等. 复合材料随机渐进失效分析与声发射监测[J]. 复合材料学报, 2011, 28 (1): 223-229.
- [10] Goutham R K, Vishal S, Mark J S, et al. Monitoring multi-site damage growth during quasi-static testing of a wind turbine blade using a structural neural system [J]. Structural Health Monitoring, 2008, 7 (2): 157-173.
- [11] Wei J, Mccarty J. Acoustic emission evaluation of composite wind turbine blades during fatigue testing [J]. Wind Engineering, 1993, 17 (6): 266-274.
- [12] 袁洪芳,周璐,柯细勇,等. 基于声发射信号的风机叶片裂纹定位分析[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (1): 320-323.
- [13] 朱永凯,潘仁前,陈盛票,等. 基于声发射传感器阵列的风机叶片结构健康监测方法[J]. 无损检测, 2010, 32 (10): 753-761.

ACOUSTIC EMISSION MONITORING FOR WIND TURBINE BLADE COMPOSITE MATERIAL UNDER COMPRESSIVE DAMAGE FAILURE CONDITION

Zhou Wei¹, Zhang Xiaoxia², Wei Zihui¹, Zhong Yang¹

(1. College of Quality and Technology Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. Library of Hebei University, Baoding 071002, China)

ABSTRACT The compressive tests and acoustic emission (AE) response characteristics of wind turbine blade composite material were conducted. The results showed that transverse compressive properties and corresponding AE characteristics of composite material were different to longitudinal direction. High compressive strength, high modulus, low failure strain, high AE relative energy, high amplitude and less cumulative hits were obtained in longitudinal direction. Furthermore, composite specimens exhibited brittle characteristics. The main failure modes of transverse and longitudinal compression were 45° shear failure and layer splitting, respectively. The AE monitoring results such as energy, amplitude, hits and other parameters in compressive tests were useful for monitoring the damage development and failure of the specimen.

KEYWORDS wind turbine blade, composite material, compression, acoustic emission

色母粒行业“十二五”将持续走强

“十二五”开局之年,对于以小型企业、微型企业为主体的中国色母粒行业来说,又经受着一次不亚于国际金融危机的冲击。原材料价格暴涨、劳动力成本大增、银行贷款紧缩、用电紧张等诸多因素的影响,让行业生存与发展陷入窘境。同时,下游行业的需求却没有萎缩,塑料制品行业保持25%的稳定增长;化纤制品由于受棉花价格的影响,需求激增;更由于低碳环保的要求,化纤原液着色的比例也有望大幅增长。处于中间产品的色母粒行业,不得不牺牲利润消化原材料价格暴涨等因素带来的影响,尽量满足下游需求。“十二五”开局,中国色母粒行业面临着严峻考验。

中国色母粒行业在“十一五”期间取得了实质性的进展。2006年~2008年,是中国色母粒行业的快速发展期。正是在这一时期,色母粒行业实现了产量翻番,每年从25万t增至50万t以上。而2008年~2011年,行业处于平稳发展期,产量没有大幅波动,色母粒企业在一波未平一波又起的经济风暴中,调整着结构,艰难前行。

目前,中国的色母粒企业已经开始从小规模、低产能的生产方式,逐渐向大型化、规模化发展。国内一些龙头企业已发展成为可与外企抗衡的标杆企业。今后几年,随着国家西部大开发的推进,向西部地区的挺进与拓展,将成为色母粒行业面临的新课题,同时也为行业发展带来新机遇。

随着技术水平的不断提升,色母粒品种分布发生了较大变化。第一个变化是彩色母粒在色母粒总产量中的份额明显增加。我国彩色母粒占总产量的份额已从2005年的14%增长到2010年的26%,达到年产14.6万t。第二个变化是白色母粒所占份额降低。与2005年相比,在色母粒中所占份额最多的白色母粒从原来的44%降到了20%。

面对中国经济的发展,国外企业也在不断渗入。今年,美国卡博特公司在天津建立了年产4.5万t的黑色母粒生产线,已于9月19日开工,二期工程可达8万t。届时,这个工厂将成为世界上最大的色母粒加工厂。

由于有“十一五”期间行业的稳步发展作基础,当前面临的困难还不足以阻止中国色母粒行业前进的脚步。色母粒行业的发展将继续与我国塑料制品、化纤行业的高速发展相适应,预计“十二五”期间仍将以大于10%的速度发展。主要体现在以下几个方面:

——多功能色母粒的开发。塑料或化纤制品往往需要制品同时具备多种性能,将着色与其他功能融为一体制成母

粒,对提高塑料或化纤制品性能、简化其生产工艺意义重大。

如应用于煤矿制品的着色、阻燃、抗静电多功能母粒;应用于化纤面料的着色、抗菌、保温、导电母粒等。将多种功能集于一身,必然给母粒的制备与应用提出许多技术难题,如多种功能助剂之间的相容性以及制品中的分散性都与单一功能的母粒不同,这正是在“十二五”期间要攻克的难题。

——高性能工程塑料、热塑弹性体色母粒的开发。“十一五”期间,我国高性能工程塑料及热塑弹性体发展较快,如热塑性氟塑料和热塑性聚氨酯;与之相适应,其制品也需要用色母粒着色,如聚全氟乙丙烯色母粒、聚偏氟乙烯色母粒、热塑性聚氨酯色母粒都给色母粒行业提出了全新的挑战。这些色母粒制备在原材料的选择、加工工艺及使用条件上都与传统的色母粒有很大差别。如何适应高性能工程塑料的超高温加工性能、热塑弹性体特殊的加工流变特性都将为是所面临的技术难题。

——专用牌号大批量色母粒的开发。随着我国塑料制品业的迅速发展,色母粒的产量将比过去有较大增长。一些色母粒品种将不再直接供应下游塑料制品厂商,而是直接提供给上游石化企业,用色母粒与树脂直接做成彩色改性料,如管材料、汽车专用料等。这一生产方式的形成使得过去一向以小批量、多品种为特色的色母粒生产模式要部分转型为单一品种、大规模的生产模式。生产方式的改变也将给色母粒技术提出挑战,如何保证所生产色母粒的均一性,如何适应大型螺杆造粒技术将是这种色母粒所要解决的技术难题。

——色母粒用分散剂、添加剂的开发。随着多功能色母粒、高性能工程塑料、热塑弹性体色母粒,专用牌号大批量色母粒的开发,与之配套的分散剂及添加剂的研发也是“十二五”期间色母粒行业面临的重要任务,如开发复合型分散剂、耐高温分散剂、加工流变性能调节剂等。

——色母粒性能测试标准的制定及检测机构的建立。“十一五”期间,颁布实施了两个色母粒行业标准,评审通过了一个行业标准和国家标准。今年4月1日《给水用聚乙烯(PE)管材混配料用炭黑母粒QB/T 4132-2010》行业标准正式实施。目前,色母粒行业只有4个正式颁布与实施的行业标准,由于标准缺失,也没有设立专业的检测机构,这种局面已经远远不能适应高速发展的色母粒行业的需要。“十二五”期间,应重点进行色母粒性能测试标准的制定与颁布实施,并尽快着手建立专业的色母粒检测机构。

(化工报)