

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2012.08.018

# 风电叶片复合材料层间剪切破坏声发射监测<sup>\*</sup>

张晓霞<sup>1</sup>, 戚海东<sup>2</sup>, 王芳<sup>2</sup>, 张洪波<sup>2</sup>, 周伟<sup>2</sup>

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

**摘要:**采用声发射技术对含分层缺陷风电叶片多轴向复合材料的层间剪切破坏实验进行实时监测,研究分层缺陷对复合材料层间力学性能的影响规律及其损伤破坏过程的声发射响应特征。结果表明,具有不同分层面积的两类复合材料试样破坏载荷相近,当分层缺陷位于剪切面中间位置时,分层缺陷大小对界面承载能力影响不大,损伤演化主要集中在剪切面上偏离中心两侧的区域;随着分层缺陷面积的增加,声发射撞击累积数有上升趋势,声发射相对能量、幅度分布、撞击源定位信号与剪切面上偏离中心两侧高应力区域的损伤破坏过程相对应。

**关键词:**风电叶片; 复合材料; 分层; 层间剪切; 声发射

**中图分类号:** TB302.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3539(2012)08-0077-04

## Acoustic Emission Monitoring for Interlaminar Shear Failure of Wind Turbine Blade Composite

Zhang Xiaoxia<sup>1</sup>, Qi Haidong<sup>2</sup>, Wang Fang<sup>2</sup>, Zhang Hongbo<sup>2</sup>, Zhou Wei<sup>2</sup>

(1. Library of Hebei University, Baoding 071002, China; 2. College of Quality and Technology Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** Acoustic emission (AE) testing technology was used to monitor the interlaminar shear failure of multi-axial wind turbine blade composites embedded with delamination defects in real time. The effect of delamination defects on interlaminar mechanical properties and corresponding AE response characteristics in the process of damage and failure were investigated. The results showed that the failure load of two composite specimens with various delaminated area was similar and it illustrated that the defect size had little effect on the interfacial loading ability when the delamination defects were located in the middle of shear plane. The damage evolutions were mainly occurred in an off center region which belonged to either side of the shear plane. As the area of delamination defects increased, the AE cumulative hits increased gradually. The AE relative energy, amplitude distribution and impinging source location signals were connected with the damage failure process in an off center high stress region which belonged to either side of the interlaminar shear plane.

**Keywords:** wind turbine blade; composite; delamination; interlaminar shear; acoustic emission

玻璃纤维增强复合材料的比强度、比模量高,抗疲劳性能好,广泛用于风电叶片制造等新能源产业。为提高风电叶片在弯、扭等复杂载荷作用下的综合力学性能,复合材料的增强相一般采用单向和多轴向玻璃纤维。受制造工艺等随机条件的影响,风电叶片制造过程中难免会出现分层、缺胶等结构缺陷,从而引起实际风况下风电叶片结构的损伤累积和失稳破坏<sup>[1-2]</sup>。此外, L. C. T. Overgaard 等<sup>[3]</sup>通过对风电叶片的静力测试,发现叶片的最终强度主要受分层等不稳定因素的影响,随着这些不稳定因素的协同作用,最终导致风电叶片的失稳破坏。可见,风电叶片界面分层缺陷的损伤累积将导致其整体力学性能的严重退化。

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地反映复合材料各阶段的变形损伤

机制,从而可以全面、深入地了解复合材料的损伤破坏过程<sup>[4-6]</sup>。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应用研究。A. G. Dutton 等<sup>[7]</sup>在风电叶片静力、疲劳和剩余强度的 IEC 认证测试中,采用声发射技术对损伤进行定位和特性分析,指出高幅值和高能量声发射事件的出现预示着叶片的失效。A. Anastassopoulos 等<sup>[8]</sup>针对风电叶片认证测试中监测的声发射信号,进一步提出模式识别系统。F. S. Bent 等<sup>[9]</sup>开展了风电叶片远程结构健康监测的相关研究,提出近海风电叶片实时监测的可行性。

<sup>\*</sup> 河北省自然科学基金资助项目(E2010000297、E2012201084)、保定市科技攻关计划资助项目(11ZG020)

联系人: 周伟, 博士, 副教授, 主要从事复合材料声学无损检测方面的研究

收稿日期: 2012-06-08

此外, R. K. Goutham 等<sup>[10]</sup>还提出了基于声发射监测的 SNS 结构神经系统,用于实时监测风电叶片静力加载过程。总体上看,这些研究工作主要集中在风电叶片损伤的早期发现、定位和损伤严重程度分级,对含分层缺陷风电叶片复合材料损伤破坏声发射监测方面的实验研究较少。

笔者以含分层缺陷的风电叶片多轴向复合材料为研究对象,对其进行层间剪切实验,采用声发射技术全程监测复合材料试样加载破坏过程,确定复合材料在层间剪切条件下的力学性能及其相应的声发射响应特征,揭示分层缺陷对层间界面承载能力的影响规律,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

风电叶片多轴向玻璃纤维环氧预浸料: KT900, 单层厚度为 1 mm, 威海光威复合材料有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

平板硫化机: XLB-D400 型, 商丘市东方橡塑机器有限公司;

微机控制电子万能试验机: 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

将风电叶片多轴向预浸料裁剪成 280 mm × 200 mm 尺寸, 在平板模具上铺设 4 层后, 放入平板硫化机加热、加压固化, 制得厚度约为 3.6 mm 的层合板, 如图 1 所示。在铺设预浸料时, 预先按图 1 指示的位置将相应的两层切断, 并用塑料薄膜隔开以防粘结, 形成层间剪切面, 分层缺陷预置在剪切面的中间位置。最后将层合板切割成宽度为 25 mm 的长条形试样, 两种试样的分层缺陷尺寸分别为 20 mm × 25 mm 和 40 mm × 25 mm。

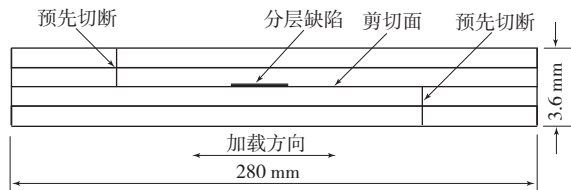


图1 复合材料试样示意图

### 1.4 力学加载与声发射监测

风电叶片复合材料试样的层间剪切实验在万能试验机上进行, 采用位移控制加载, 试验机的加载

速率为 2 mm/min。在试样加载过程中, 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。试样加载与传感器布置如图 2 所示。

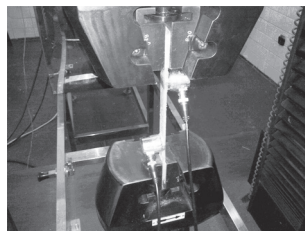


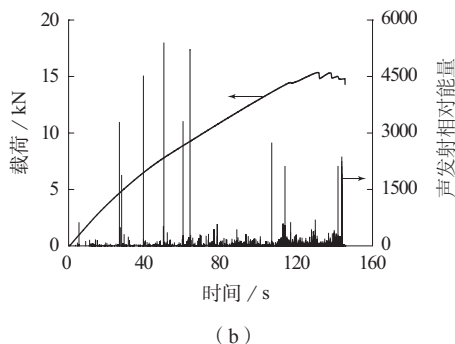
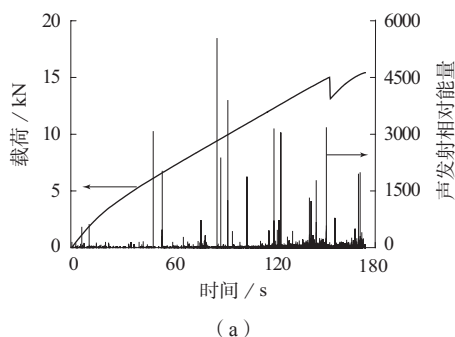
图2 试样加载与传感器布置

实验采用两个频带宽度为 100 ~ 450 kHz 的声发射传感器, 中心频率为 150 kHz, 采样频率为 5 MHz。传感器与试样之间用凡士林耦合, 然后用胶带将传感器固定在试样上, 2 个传感器的间距为 120 mm, 声发射监测过程中声发射信号采集阈值设为 46 dB。

## 2 结果与讨论

### 2.1 试样加载力学性能与声发射响应特征

复合材料层间剪切试样的拉伸载荷—声发射相对能量—时间历程如图 3 所示。



a—20 mm × 25 mm 分层缺陷试样;  
b—40 mm × 25 mm 分层缺陷试样

图3 复合材料试样拉伸载荷—声发射相对能量—时间历程

由图 3 可知, 分层缺陷尺寸为 20 mm × 25 mm 和 40 mm × 25 mm 试样的破坏载荷相近, 分别为 15.4 kN 和 15.3 kN。力学实验结果表明, 当分层缺

陷位于剪切面中间位置时,分层缺陷大小对界面承载能力的影响不大,说明损伤演化主要集中在剪切面上偏离中心两侧的区域,而位于剪切面中间的区域处于低应力状态,该区域上的分层缺陷对界面力学特性的作用不明显。

由图 3a 可以看出,在试样加载初始阶段,声发射相对能量较低,说明承载剪切面损伤较少;随着载荷的增加,开始出现相对能量为 3 000 左右的声发射信号,且声发射信号逐渐增多,直至试样最终破坏。由图 3b 可以看出,相对能量为 3 000 左右的声发射信号出现得较早(与图 3a 相比,),且从加载到最终破坏的时间历程较短。说明随着分层缺陷面积的增加,剪切面的有效承载面积减小,界面损伤演化的作用区域相对集中,从而较早出现典型的分层损伤声发射信号。

图 4 为典型复合材料试样的破坏特征。由图 4 可以看出,试样层间剪切破坏模式明显,未出现明显的纤维损伤和断裂,这与图 3 未出现与纤维断裂相关的较高相对能量声发射信号相对应。

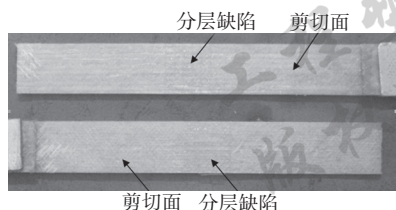
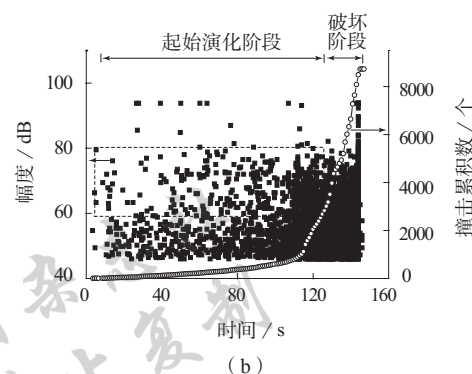
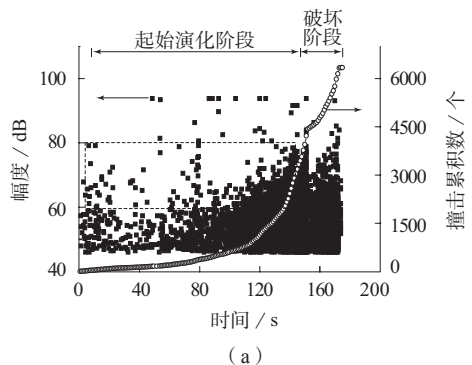


图 4 复合材料试样的破坏特征

复合材料试样的声发射幅度—撞击累积—时间历程如图 5 所示。依据图 5a 声发射信号撞击累积数和幅度的变化情况,可将整个过程划分为起始演化阶段和破坏阶段两部分。由图 5a 可以看出,在试样加载起始演化阶段,幅度在 60~80 dB 的声发射信号(矩形虚框内区域)较少,且该阶段声发射撞击累积数的变化很小。随着载荷的增加,撞击累积数明显增加,直至试样发生层间剪切破坏。由图 5b 可以看出,在试样加载起始演化阶段,幅度在 60~80 dB 的声发射信号明显增多(矩形虚框内区域);在破坏阶段,声发射撞击累积数增加更快,撞击累积总数更多。表明由于分层缺陷面积的增大,剪切面损伤演化的区域减小,对应的分层损伤出现得较早且作用明显。

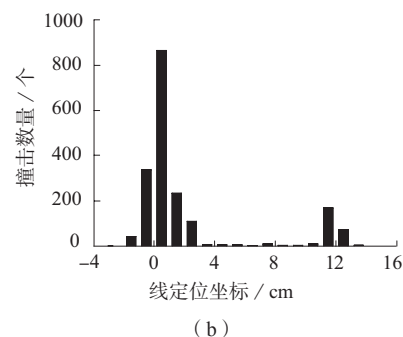
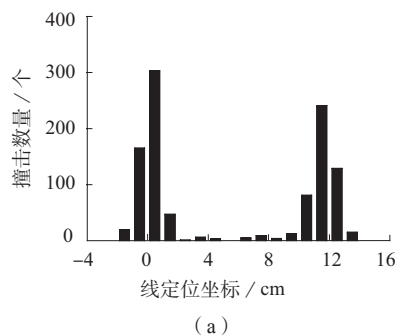
## 2.2 声发射源定位

复合材料试样层间剪切破坏过程的声发射撞击信号定位图如图 6 所示。设置试样的剪切面总长



a—20 mm × 25 mm 分层缺陷试样;  
b—40 mm × 25 mm 分层缺陷试样

图 5 声发射幅度—撞击累积—时间历程



a—20 mm × 25 mm 分层缺陷试样;  
b—40 mm × 25 mm 分层缺陷试样

图 6 声发射撞击信号定位图

为 160 mm,两个声发射传感器的间距为 120 mm。由图 6a 可以看出,20 mm × 25 mm 分层缺陷试样

的声发射源定位主要分布在剪切面上偏离中心两侧的区域。40 mm×25 mm 分层缺陷试样(图 6b)的声发射源定位表现出相似的特性。结合图 3 复合材料试样界面力学性能的分析,进一步说明损伤演化主要集中在剪切面上偏离中心两侧的高应力区域,剪切面的承载能力由该区域决定。由于剪切面上中间部位的分层缺陷处于低应力状态,且没有明显的声发射源定位信号,使剪切面上中间位置分层缺陷的大小对界面承载能力影响不大。综上所述,剪切面上分层缺陷的大小及其所处的应力状态是综合评价界面承载能力的依据。

### 3 结论

(1) 当分层缺陷位于剪切面中间位置时,分层缺陷大小对界面承载能力影响不大,损伤演化主要集中在剪切面上偏离中心两侧的区域。

(2) 随分层缺陷面积的增加,声发射撞击累积数呈上升趋势,声发射相对能量、幅度分布、撞击源定位信号与剪切面上偏离中心两侧高应力区域的损伤破坏过程相对应。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] Mahmood M S, Roham R. Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade [J]. Composite Structures, 2006, 74 (3): 332-342.
- [3] Overgaard L C T, Lund E, Thomsen O T. Structural collapse of a wind turbine blade. Part A: Static test and equivalent single layered models [J]. Composites: Part A, 2010, 41 (4): 257-270.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Dutton A G, Blanch M, Vionis P, et al. Acoustic emission monitoring from wind turbine blades undergoing static and dynamic fatigue testing [J]. Insight, 2000, 42 (12): 805-808.
- [8] Anastassopoulos A A, Kouroussis D A, Nikolaidis V N, et al. Structural integrity evaluation of wind turbine blades using pattern recognition analysis on acoustic emission data [C]// Engineering and Instrumentation, 25th European Conference on Acoustic Emission Testing (EWGAE 2002). Prague: Czech Republic, 2002: 21-28.
- [9] Bent F S, Lars L, Peter S, et al. Fundamentals for remote structural health monitoring of wind turbine blades—a preproject [R]. Risø National Laboratory, Roskilde, 2002.
- [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.

### 日本东丽在四川成立树脂材料公司

日本东丽公司近日宣布,已在我国四川成立了一家制造和销售面向汽车和家电零部件的树脂材料新公司,将投入约 10 亿日元成立一家年产量达 11 000 t 的新工厂,并于 2013 年 10 月份投产。

据悉,新公司名为“东丽塑料(成都)有限公司”,注册资金为 7 000 万元人民币。由东丽集团旗下两家公司全额出资成立,主要生产树脂材料,并供应给我国西部地区以及欧美和日系汽车及家电等相关行业的制造商。(中化网)

### SABIC 拟扩大比利时增强聚丙烯产能

SABIC 创新塑料业务部近日宣布,公司正大幅扩充其比利时亨克生产基地的长玻纤增强聚丙烯复合材料的产量,以满足汽车行业客户快速增长的需求。

SABIC 于今年 6 月开始引进一条新生产线,预计于 2013 年下半年投产,从而进一步确保在本地稳定供应这一高性能材料。SABIC 亨克工厂是欧洲迄今为止最大的聚丙烯复合材料工厂。(中化网)

### 碳纤维薄片可替代硅酯

日前在东京举行的技术前沿展会上,索尼旗下化工部门

展示了导热硅酯的未来替代品——一种碳纤维薄片,在导热效率和寿命上均优于前者。

实际上索尼在若干年之前就开始研究碳纤维代替硅酯的可能性,只不过当时的试验品 EX50000 性能不佳。此次展示的 EX20000C 热阻降至 EX50000 的 1/5~1/6,厚度也降至 0.3~2.0 mm。

由于不存在硅酯因溢流而导致的劣化问题,碳纤维散热的寿命远优于硅酯。根据索尼化工部门的实物演示,与硅酯相比,使用碳纤维散热可使 CPU 下降 3℃左右。这款产品预计将首先用于服务器和高端投影仪上。(慧聪网)

### 美国建立翻新轮胎验证程序

近日,美国环境保护署(EPA)为 8 类拖车使用的翻新轮胎建立了验证程序。使用获得 EPA 认证的翻新轮胎的车辆,将符合低滚动阻力轮胎 CARB 法规的相关要求。

EPA 在致轮胎制造商的信中,简述了翻新轮胎制造商为证明其产品高节油性能所必须使用的测试方法,并称 EPA 将立即开始接受翻新产品验证的申请。EPA 明确表示,接受验证的低滚动阻力翻新产品,其燃料消耗必须比现时的最可见翻新产品降低至少 3%。(中化网)