

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2015.07.023

复合材料胶接头Ⅱ型加载损伤破坏声发射监测^{*}

庞艳荣,刘然,王雅瑞,吕智慧,周伟,袁清乐,胡杰

(河北大学质量技术监督学院,河北保定 071002)

摘要:利用声发射技术实时监测复合材料胶接头Ⅱ型加载损伤破坏的全过程,研究了不同胶接长度的复合材料胶接头破坏的力学性能以及声发射信号响应特征。结果表明,界面破坏是复合材料胶接头的主要破坏模式,胶层边缘的应力集中导致整个胶层的破坏。缺胶缺陷降低了复合材料胶接头的承载能力。声发射信号的相对能量、幅度和撞击累计数与试件损伤破坏的过程相对应,因此,声发射信号的动态特征可为风电叶片胶接头的无损检测和健康监测提供依据。

关键词:复合材料;端部缺口弯曲试验;胶接头;声发射

中图分类号: TQ325.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2015)07-00105-04

Acoustic Emission Monitoring for Damage Mechanisms of Composite Adhesive Joints under II Loading

Pang Yanrong, Liu Ran, Wang Yarui, Lyu Zhihui, Zhou Wei, Yuan Qingle, Hu Jie

(College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract : Acoustic emission (AE) testing technology was used to monitor the process of damage and failure of composite adhesive joints under II loading in real time, the mechanical properties and corresponding AE characteristics of composite adhesive joints with different lap lengths were studied. The results show that interfacial failure is the dominant failure mode, and the stress concentration on the edge of the adhesive layer leads to the whole damage of the adhesive joint. The load-bearing capacities of composite adhesive joints are reduced due to the debonding. The relative energy, amplitude and cumulative hits of AE signals are related to damage failure process of specimens. Therefore, AE dynamic characteristics can provide evidences for nondestructive testing and health monitoring of wind turbine blade composite adhesive joints.

Keywords : composite ; end notched flexure test ; adhesive joint ; acoustic emission

随着玻璃纤维增强复合材料在新能源产业的广泛应用,胶接技术普遍用于复合材料的连接,如大型风电叶片结构的组装。相比于传统的连接方式,胶接是一种较为理想的方法^[1]。但受胶接工艺等因素的影响,在粘接过程中难免会产生缺胶和微小气泡等缺陷,这些缺陷在实际静/动载荷和疲劳等条件作用下,会导致复合材料整体结构的损伤累积和失稳破坏^[2-4]。因此,对含缺陷的复合材料胶接头的力学性能和损伤机制进行研究是十分必要的。

近年来,对于复合材料胶接头力学性能的研究,国内外学者进行了相关的实验研究和有限元分析^[5-8]。K.S.Kim等^[9]通过有限元模型预测了单搭接胶接头的强度。Y.M.Ji等^[10]基于断裂力学和有限元模型预测了胶层损伤的萌生和扩展。H.S.Mattos等^[11]通过实验对胶接头进行了失效分析,发现与数值计算结果较好吻合。但针对复合材料胶接头损伤的动态过程研究涉及较少。

声发射技术能够实时监测材料和结构的动态损伤,从而有效地描述材料的损伤破坏全过程^[12-14]。胡绍海等^[15]利用声发射技术研究了金属铝单搭接接头的缺陷分布和胶接强度估计。B.K.Mohamed等^[16]通过小波分析对单搭接胶接头损伤过程的声发射信号进行了分析,区分了胶接头的损伤模式。可见,声发射技术对胶接结构损伤破坏过程的监测,为研究其力学性能和损伤机制提供参考。

笔者对风电叶片复合材料胶接头Ⅱ型加载的力学性能进行了实验,采用声发射技术对加载全过程实时监测,通过对预置缺胶的复合材料胶接头Ⅱ型加载研究,分析了两种胶接头的力学性能以及损

^{*} 河北省自然科学基金项目(F2015201215, E2012201084),国家级大学生创新创业训练计划项目(2014100750004)

联系人:周伟,博士,副教授,主要从事复合材料实验力学及声学无损检测研究

收稿日期:2015-04-26

伤演化破坏过程中声发射信号的响应特征,可作为风电叶片胶接结构安全评估的重要依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

单向玻璃纤维布: ECW600-1270, 600 g/m², 泰安市经纬玻璃纤维制品有限公司;

环氧树脂: Araldite LY 1564 SP, 亨斯迈先进化工材料(广东)有限公司;

环氧树脂固化剂: Aradur 3486, 亨斯迈先进化工材料(广东)有限公司。

1.2 主要仪器与设备

真空泵: V-i120SV 型, 浙江飞越机电有限公司;

真空干燥箱: DZF-1 AS 型, 北京科伟永兴仪器有限公司;

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;

高速摄影仪: IDT 18-0614-0538 型, 美国 IDT 公司。

1.3 试样制备

复合材料采用玻璃纤维单向布和环氧树脂及其固化剂, 采用真空灌注的方式, 制得玻璃纤维复合材料层合板, 纤维布铺设 6 层; 实验所采用的环氧树脂与固化剂的质量比为 100:34。根据 ASTM D 7905 / D 7905M-2014, 成型复合材料层合板厚度为 2 mm, 然后切割成 160 mm × 25 mm 长条试样。

粘合剂采用相同质量配比的环氧树脂和固化剂, 试样胶层厚度约为 0.5 mm, 预置缺胶试样的胶接长度分别为 80 mm 和 120 mm。

1.4 性能测试

复合材料胶接头端部缺口弯曲 (ENF) 试验在万能试验机上进行加载, 加载方式为位移控制, 加载速率设定为 2 mm/min, 加载时的跨距为 120 mm; 同时, 利用声发射仪监测试样加载破坏的全过程。1 个传感器被用来采集声发射信号, 其频带宽度为 100 ~ 450 kHz, 中心频率为 150 kHz, 内置前置放大器增益 34 dB, 用胶带将传感器固定在试件表面, 并均匀涂抹真空油脂作为耦合剂。为了减少机械噪音等因素的影响, 声发射信号的采样频率设定为 5 MHz, 采集阈值提高到 40 dB。

2 结果与讨论

2.1 力学性能与破坏特征

图 1 为复合材料不同胶接长度试样载荷一位

移曲线。在加载初期, 两种试样的载荷基本呈线性增长, 随着位移的增大, 试样胶层中的损伤不断积累并沿胶层扩展, 直至达到破坏峰值。胶接长度为 80 mm 的试样失效载荷为 168 N, 胶接长度为 120 mm 的试样失效载荷为 198 N。缺胶的存在, 导致了复合材料胶接头强度的降低, 随着胶接长度的增加, 胶接界面的承载能力提高。

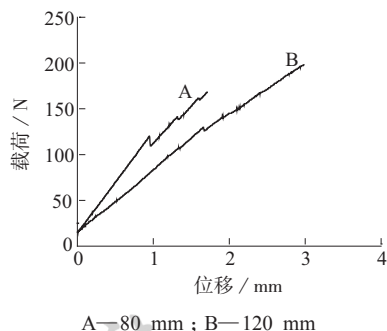
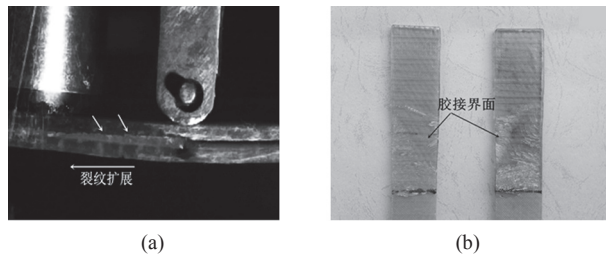


图 1 复合材料不同胶接长度试样载荷-位移曲线

移曲线。在加载初期, 两种试样的载荷基本呈线性增长, 随着位移的增大, 试样胶层中的损伤不断积累并沿胶层扩展, 直至达到破坏峰值。胶接长度为 80 mm 的试样失效载荷为 168 N, 胶接长度为 120 mm 的试样失效载荷为 198 N。缺胶的存在, 导致了复合材料胶接头强度的降低, 随着胶接长度的增加, 胶接界面的承载能力提高。

复合材料胶接试样胶层破坏情况如图 2 所示。在实验加载结束后的试样检查中, 复合材料层板并没有发生明显的塑性变形, 这表明加载过程中的损伤来自胶接界面的破坏, 如图 2a 所示, 裂纹出现在胶层边缘, 并迅速扩展至整个胶层界面, 导致胶接头的破坏。图 2b 为复合材料胶接试样的界面破坏形貌。从胶接界面的破坏情况看, 界面破坏为试样破坏的主要模式, 这是因为胶层与复合材料层板的二次胶接面粘结强度低于胶层内部的自身强度。结果进一步证明, 胶层内部的微损伤不断积累, 导致胶层与胶层界面裂纹的萌生及扩展, 且损伤易发生在胶层边缘应力集中处, 最终引起胶层的整体破坏。



a—裂纹扩展; b—胶接界面

图 2 复合材料胶接试样胶层破坏图

2.2 声发射信号特征

声发射信号的相对能量、幅度、撞击累计数等特征参数能有效地反应声发射响应特征, 可以被用来描述复合材料胶接试样的损伤破坏。II 型加载过程被分为初始演化阶段和破坏阶段。图 3 为复合材料不同胶接长度试样 II 型加载声发射相对能量一时间曲线。从图 3a 可以看出, 胶接长度为 80 mm 的

试样在初始演化阶段由于胶层内损伤破坏较少,只采集到少量低能量的声发射信号。随着载荷的逐渐增大,胶层内的损伤不断积累,加载进入破坏阶段,声发射相对能量突然持续增大,直至胶接头完全破坏。此时,破坏对应的声发射相对能量最高,约为1000。与图3a相似,胶接长度为120 mm的试样在加载初始演化阶段的声发射信号较少,声发射相对能量较低。当加载进入破坏阶段,图3b中的声发射相对能量远远高于图3a,且高能量的声发射信号出现较早,胶接头破坏时对应的声发射相对能量最高值约为22700。

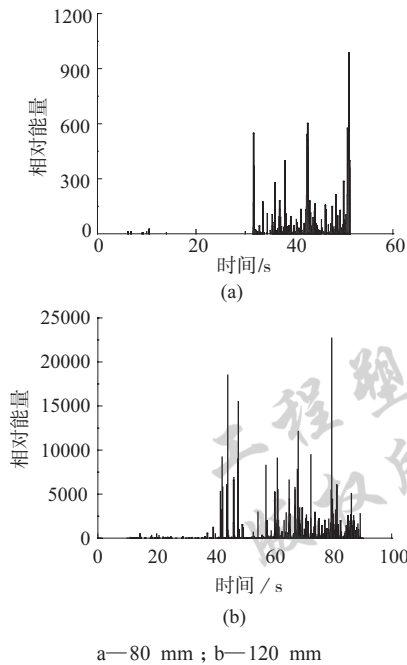


图3 复合材料不同胶接长度试样声发射相对能量—时间曲线

对比图3a与图3b可以发现,胶接长度不同的两种试样在整个Ⅱ型加载过程中,声发射相对能量变化趋势大致相同。在加载的初始演化阶段,由于均无明显的损伤破坏,声发射相对能量一直处于较低的水平,随着载荷与位移的逐渐增大,损伤积累导致胶层内部裂纹的萌生扩展,此阶段的声发射相对能量值较高,直至胶接头破坏。此外,胶接长度为120 mm的试样破坏阶段的声发射相对能量值远高于胶接长度为80 mm的试样,这是由于较长的胶接长度对应着较高的应力集中,从而出现了层合板表面纤维破坏的高能量声发射事件。结果表明,胶接长度越长,对应的声发射信号越多,相对能量值越高。

图4为复合材料不同胶接长度试样Ⅱ型加载声发射撞击累计数—时间曲线。两种胶接试样在加载

的初始演化阶段的声发射事件较少,对应的撞击累计数变化相对缓慢,随着加载进入破坏阶段,胶层内的损伤不断积累,声发射事件逐渐增多,这个阶段的声发射撞击累计数远远多于加载的初始演化阶段,且增长速度逐渐加快。对比两种类型的试样可知,在整个Ⅱ型加载过程中,胶接长度为120 mm的试样声发射撞击累计数远远多于胶接长度为80 mm的试样。这一现象源于胶接长度为120 mm在加载过程中对应较多的破坏损伤,且应力集中更加严重,从而导致了胶层以及纤维的破坏。

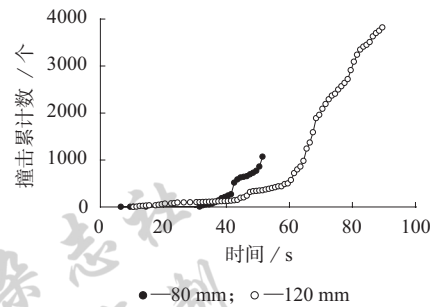


图4 复合材料不同胶接长度试样声发射撞击累计数—时间曲线

图5为复合材料不同胶接长度试样Ⅱ型加载声发射幅度—时间曲线。

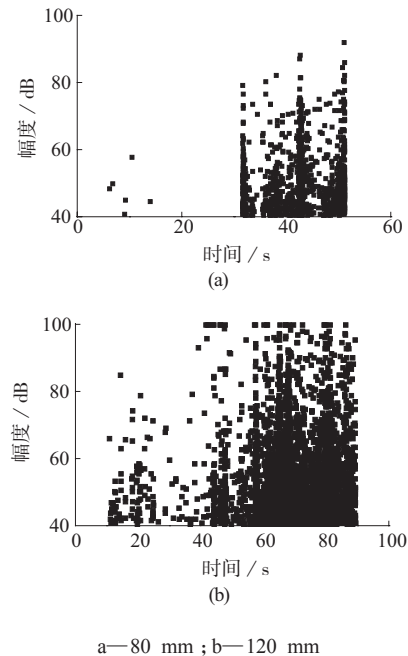


图5 复合材料不同胶接长度试样声发射幅度—时间曲线

从图5a可以看出,胶接长度为80 mm的试样在加载的初始演化阶段几乎没有声发射信号,这是由于在加载初期胶层并没有出现损伤破坏。随着载荷增大,胶层内部的损伤不断积累,出现了较多的声发射信号,加载进入破坏阶段,且幅度高于60 dB的声发射信号持续增多,大量的胶层微损伤

导致胶接头的损伤破坏。相比于图 5a,胶接长度为 120 mm 的试样在加载的初始演化阶段出现了少量的声发射信号,且大部分幅度低于 60 dB。当加载进入破坏阶段,产生了大量幅度在 60~80 dB 的声发射信号,且幅度高于 90 dB 的声发射信号逐渐增多,直至胶接头破坏。这一现象与胶接界面的破坏伴随着复合材料层板表面的纤维破坏有关,导致了在破坏阶段产生了大量高幅度的声发射信号。实验结果再次验证,复合材料胶接试样的损伤破坏过程对应着声发射信号的响应特征,从而可以为风电叶片胶接头的无损检测提供依据。

3 结论

(1) 复合材料胶接试样的主要破坏模式为界面破坏,胶层边缘应力集中处的损伤引起整个胶层的破坏。复合材料胶接头的承载能力随着胶接长度的增加而提高,胶层中的缺陷降低了胶接界面的承载能力。

(2) 复合材料胶接试样在初始演化阶段对应的声发射信号相对能量和幅度较低,撞击累计数较少,且增长较慢。当进入破坏阶段,胶层的微损伤引起胶接头的整体破坏,此时对应的声发射信号相对能量和幅度高,撞击累计数持续增多。较长胶接长度的试样由于较多的损伤破坏对应着较高的声发射幅度和相对能量,以及较多的撞击累计数。

(3) 复合材料胶接试样在整个 II 型加载过程中,胶接头的损伤破坏与其声发射信号相关的动态参数相关,因此,声发射响应特征可以用来监测风电叶片胶接结构。

参考文献

- [1] 杨银环,周振功,郭颖,等. 缺陷对单搭胶接接头力学性能的影响[J]. 复合材料学报,2012,29(5):157-163.
Yang Yinhuan, Zhou Zhengong, Guo Ying, et al. Effect of defects in the adhesive layer on strength of adhesively bonded single-lap composite joints[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 29(5):157-163.
- [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] Meneghetti G, Quaresimin M, Ricotta M. Damage mechanisms in composite bonded joints under fatigue loading[J]. Composites Part B, 2012, 43(2):210-220.
- [4] 周伟,张晓霞,韩婧,等. 复合材料单搭胶接接头破坏声发射监测[J]. 工程塑料应用,2014,42(3):1-4.
Zhou Wei, Zhang Xiaoxia, Han Jing, et al. Acoustic emission monitoring for failure of adhesive-bonded single-lap composite joints[J]. Engineering Plastics Application, 2014, 42(3):1-4.
- [5] Roohollah S, Anastasios P V, Thomas K. Experimental investigation and modeling of mean load effect on fatigue behavior of adhesively-bonded pultruded GFRP joints[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 44:245-252.
- [6] Hu Ping, Shao Qi, Lin Weidong, et al. Experimental and numerical analysis on load capacity and failure process of T-joint: Effect produced by the bond-line length[J]. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2012, 38:17-24.
- [7] 王孝慧,姚卫星. 复合材料胶接结构有限元分析方法研究进展[J]. 力学进展,2012,42(5):562-571.
Wang Xiaohui, Yao Weixing. Progress in research on FEA models of adhesively bonded composite joints[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5):562-571.
- [8] Budzik M K, Jume J, Shanahan M E R. On the crack front curvature in bonded joints[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2012, 59(1):8-20.
- [9] Kim K S, Yi Y M, Cho G R, et al. Failure prediction and strength improvement of unidirectional composite single lap bonded joints[J]. Composite Structures, 2008, 82(4):513-520.
- [10] Ji Y M, Han K S. Fracture mechanics approach for failure of adhesive joints in wind turbine blades[J]. Renewable Energy, 2014, 65:23-28.
- [11] Mattos H S, Monteiro A H, Palazzetti R. Failure analysis of adhesively bonded joints in composite materials[J]. Materials and Design, 2012, 33:242-247.
- [12] Beatrice A G. Acoustic emission-principles and instrumentation[J]. Journal of Acoustic Emission, 1983, 2(1/2):95-128.
- [13] 汪星明,郭耀红,朱庆友,等. 复合材料无损检测研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2012(S1):261-265.
Wang Xingming, Guo Yaohong, Zhu Qingyou, et al. Progress in research of nondestructive testing technique of composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012(S1):261-265.
- [14] 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.
- [15] 胡绍海,张树京. 胶接结构的声发射检测[J]. 无损检测,1994, 16(6):154-156, 163.
Hu Shaohai, Zhang Shujing. Acoustic emission testing of adhesive bonds[J]. Nondestructive Testing, 1994, 16(6):154-156, 163.
- [16] Mohamed B K, Kalai C K, Vijayaraghavan G K, et al. Acoustic emission wavelet transform on adhesively bonded singlelap joints of composite laminate during tensile test[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013, 32(2):87-95.