

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.03.017

复合材料单搭接胶接头破坏声发射监测^{*}

周伟¹, 张晓霞², 韩婧¹, 路博哈¹, 邢新康¹, 程丽云¹, 陈家熠¹

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

摘要: 采用声发射技术对单向拉伸载荷作用下复合材料单搭接胶接头的剪切破坏试验进行实时监测的方法, 研究搭接长度对单搭接胶接头损伤破坏的影响规律及其相应的声发射响应特征。结果表明, 随搭接长度的增加, 引起单搭接胶接头的受力不均匀性增加, 损伤易发生在胶层边缘应力集中区域, 胶接头承载能力不断上升的同时, 平均剪切应力逐渐降低; 胶层边缘应力集中更明显, 从而出现较多的声发射信号, 且幅度在 60~80 dB 的声发射信号明显增多, 声发射撞击累积数有上升趋势。声发射相对能量、幅度分布等声发射信号与胶层的损伤破坏过程相对应。

关键词: 复合材料; 单搭接胶接头; 搭接长度; 声发射

中图分类号: TB302.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)03-0069-04

Acoustic Emission Monitoring for Failure of Adhesive-Bonded Single-Lap Composite Joints

Zhou Wei¹, Zhang Xiaoxia², Han Jing¹, Lu Bohan¹, Xing Xinkang¹, Cheng Liyun¹, Chen Jiayi¹

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

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

Abstract: Acoustic emission (AE) testing technology was used to monitor the shear failure of adhesive-bonded single-lap composite joints under uniaxial tensile loads in real time. The effect of lap length on mechanical properties of single lap bonded joint and corresponding AE characteristics was investigated. The results show that as the lap length increases, stress inhomogeneity increases. The damage evolutions are mainly occurred in stress concentration region. As the carrying capacity of single lap bonded joint increases, the average shear stress reduces gradually. For the obvious stress concentration, much acoustic emission signal, with the range of 60 ~ 80 dB are obtained in edge of adhesive layer. The AE cumulative hits increase gradually. The AE relative energy, amplitude distribution of acoustic emission signals are connected with damage failure process of adhesive-bonded single-lap composite joints.

Keywords: composite material; adhesive-bonded single-lap joints; lap length; acoustic emission

随着复合材料产业的飞速发展, 胶接技术在航空航天、风电等领域得到广泛应用。如大型风电叶片就是在主模具上把上下壳体、主梁及其它部件胶接组装后, 合模加压固化形成整体叶片。但由于胶接结构强度相对较低, 且受胶接工艺影响因素复杂, 导致其强度的不稳定性, 从而引起复合材料整体结构的损伤和失稳破坏^[1-2]。为此, 胶接头的强度、刚度等力学性能是胶接结构研究的重点。

近年来, 国内外相关学者对复合材料胶接头, 尤其是单搭接胶接头, 进行了相关理论^[3]、试验研究和有限元数值分析^[4], 并将胶接结构力学分析模型分为基于有限元应力分析、基于断裂力学和基于损伤力学模型 3 类。K.S.Kim 等^[5]通过建立有限元模型对单搭接胶接头的极限强度进行了预测。郭霞等^[6]针对复合材料单搭接接头的拉伸性能进行有限元

建模, 分析了搭接长度对单搭接接头的应力分布和破坏模式的影响。此外, 江乐彬等^[7]采用有限元数值模拟和数字图像相关技术对单向拉伸载荷作用下单搭接胶接头中的剪切性能进行分析, 获得了不同厚度胶层中切应力的变化规律。但针对复合材料单搭接胶接头损伤破坏过程的研究涉及较少。

裂纹的萌生与扩展过程伴随着能量释放, 通过实时记录的声发射特征信号可有效描述材料结构的损伤破坏过程^[8-9]。益小苏^[10]采用声发射技术对胶接头微损伤活动进行监测, 从而提出了一条胶接结

^{*} 河北省自然科学基金 (E2012201084), 河北大学大学生科技创新项目 (2013069)

联系人: 周伟, 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: 2014-01-06

构的强度设计准则。胡绍海等^[11]通过单搭接胶接结构的声发射检测,发现声发检测技术可检测胶接结构的胶接强度。此外, B.K.Mohamed 等^[12]借助小波分析方法,对单搭接胶接头破坏过程的声发射信号进行频域划分,区别了胶层破坏、纤维失效等损伤模式。可见,利用声发射技术,可有效获取胶接头损伤破坏机制。

笔者通过对单向拉伸载荷作用下复合材料单搭接胶接头的剪切破坏力学性能试验,采用声发射技术全程监测胶接头加载破坏过程,确定胶接结构的力学响应行为及其对应的声发射特征信号,揭示不同搭接长度的胶接头损伤演化破坏规律及其声发射响应行为,为风电叶片等复合材料胶接结构的损伤破坏研究提供参考。

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;

环氧结构胶粘剂: Araldite 4854 A/B, 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, 德国华伦西尔国际有限公司。

1.3 试样制备

采用真空灌注的方式获取玻璃纤维单向复合材料, 纤维布铺设 10 层, 环氧树脂和固化剂的质量配比为 100 : 34。将复合材料单向板切割成宽度为 25 mm 的长条; 采用丙酮溶液清洗搭接区表面后, 均匀涂抹环氧结构胶粘剂, 胶层厚度约为 0.4 mm, 搭接长度分别为 10, 20 和 30 mm, 胶接试件整体长度为 240 mm。待胶层基本凝固后, 升温至 80℃, 后固化 8 h, 自然冷却。

1.4 力学与声发射测试

复合材料单搭接胶接头的力学性能试验在微

机控制电子万能试验机上进行, 实验加载采用位移控制, 加载速率设定为 2 mm/min。在力学加载的同时, 采用声发射仪实时获取复合材料试件整个损伤破坏过程的声发射信号。图 1 为试件加载与探头布置。对应每种搭接长度, 有效试件个数不低于 5 个。为保证胶接面正好处于载荷作用线上和避免试验机夹具损坏试件, 在胶接试件两端粘接补偿块和铝加强片。



图 1 试件加载与探头布置

试验采用 2 个声发射探头, 频带宽度为 100 ~ 450 kHz, 中心频率为 150 kHz 探头, 间距为 100 mm。探头与试件之间用高真空油脂耦合, 最后用胶带固定。试验过程中声发射信号采样频率设定为 5 MHz, 考虑机械噪声等因素影响, 只采集 40 dB 以上声发射信号。

2 结果与讨论

2.1 胶接试件力学性能与破坏特征

胶接试件失效载荷和平均剪切应力与搭接长度对应关系如图 2 所示。当单搭接胶接头搭接长度由 10 mm 增加至 20, 30 mm 时, 胶接试件的失效载荷由 5.748 kN 分别增加至 6.735, 8.058 kN, 平均剪切应力由 22.63 MPa 分别降至 13.07, 10.7 MPa。力学试验结果表明, 胶接头承载能力随搭接长度的增加不断上升的同时, 平均剪切应力逐渐降低, 与复合材料单搭接接头拉伸性能的有限元分析结果吻合^[6]。这表明随搭接长度的增加, 引起的受力不均匀性增加。损伤易发生在胶层边缘应力集中区域, 该部位的损伤破坏迅速扩展至整个胶接界面。

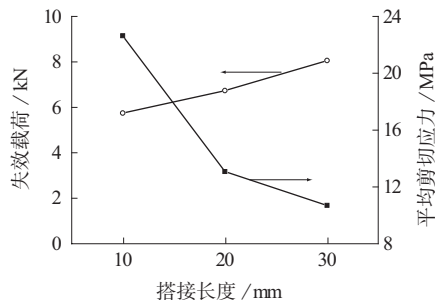


图 2 胶接试件失效载荷和平均剪切应力与搭接长度对应关系

图 3 为典型的胶接界面破坏特征。从图 3 可以

看出,胶接头界面破坏为主导破坏模式,同时伴有胶层自身的破坏和单向板基体内部分纤维的破坏。这表明胶接界面的强度低于胶层自身的强度,胶层边缘应力集中区域弱界面的早期损伤进而引发整个胶层的破坏。

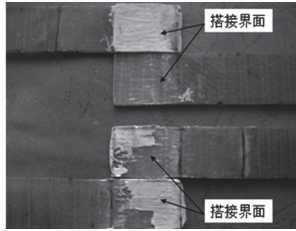
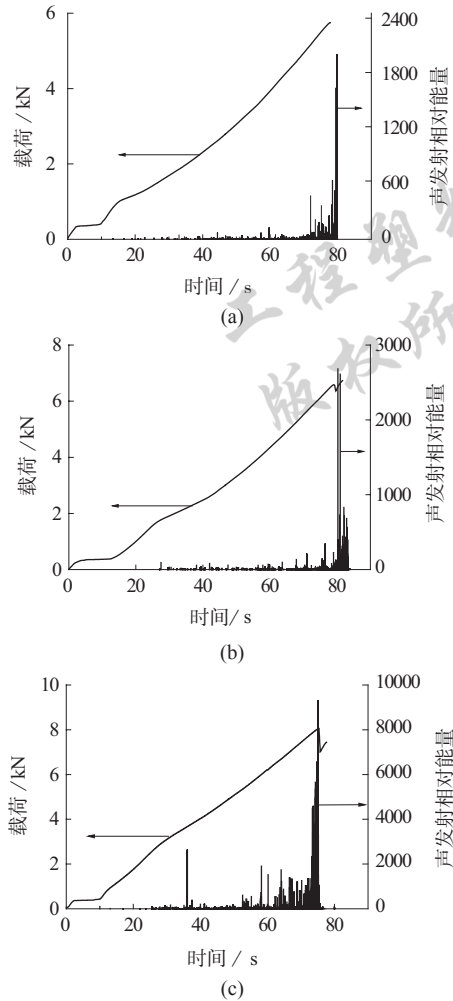


图3 胶接试件破坏特征

2.2 损伤破坏声发射响应特征

图4为不同搭接长度胶接试件拉伸载荷和声发射相对能量随时间的变化曲线。



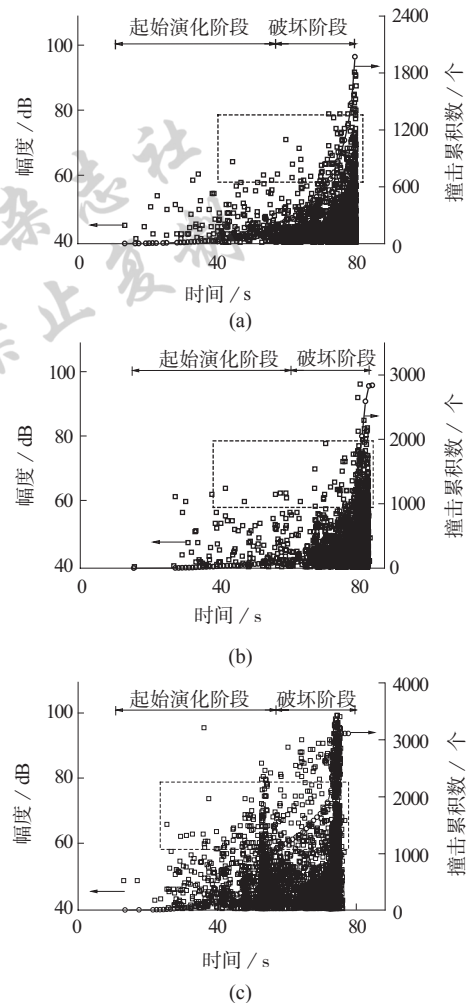
搭接长度: a—10 mm; b—20 mm; c—30 mm

图4 不同搭接长度试件拉伸载荷和声发射相对能量随时间的变化

根据图4a,胶接试件加载初期,由于承载面内损伤较少,声发射相对能量处于较低的水平;随外

载荷的逐渐增加,声发射事件逐渐增多,直至胶接面开裂破坏,此时声发射相对能量达到2037。与图4a相比,对应搭接长度为20 mm(见图4b)和30 mm胶接试件(见图4c),声发射相对能量最大值分别增至2680和9280,这与图3中出现纤维破坏相关的较高相对能量声发射信号对应。尤其是搭接长度为30 mm胶接试件,一定能量的声发射信号出现得较早。这说明随着胶层搭接面积的增大,产生的受力不均匀性增加,胶层边缘应力集中更明显,从而出现较多的声发射信号。

图5为不同搭接长度胶接试件声发射幅度和撞击累积数随时间的变化曲线。



搭接长度: a—10 mm; b—20 mm; c—30 mm

图5 不同搭接长度试件声发射幅度和撞击累积随时间的变化曲线

图5a显示了搭接长度为10 mm试件的声发射撞击累积数和幅度随时间分布规律,胶接试件的损伤破坏过程可大致分为初始演化和破坏两个阶段。对应搭接长度为10 mm试件,在初始演化阶段,声发射信号幅度较低,声发射撞击累积数变化缓慢。

随外载荷增加,撞击累积数出现一个明显上升的过程,直至胶接试件的界面开裂破坏,且幅度在 60~80 dB 的声发射信号(矩形虚框内区域)明显增多。这是由于大量的微损伤引发的胶层宏观破坏。与图 5a 相比,对应搭接长度为 20 mm(见图 5b)和 30 mm 胶接试件(见图 5c),声发射撞击累积数明显增加,尤其是搭接长度为 30 mm 胶接试件,起始演化阶段时,幅度在 60~80 dB 的声发射信号明显增多并伴有大量超过 85 dB 的声发射信号,这与图 3 中单向板基体内部分纤维的破坏有关。上述结果进一步表明,胶层界面应力集中区域损伤及其引发的整个胶层破坏过程与对应的声发射信号相关,从而为胶接结构的无损评价与状态监测提供依据。

3 结论

(1) 随搭接长度的增加,引起单搭接胶接头的受力不均匀性增加,损伤易发生在胶层边缘应力集中区域,胶接头承载能力不断上升的同时,平均剪切应力逐渐降低。

(2) 随搭接长度的增加,胶层边缘应力集中更明显,从而出现较多的声发射信号。幅度在 60~80 dB 的声发射信号明显增多,并伴有大量超过 85 dB 的与单向板基体内部分纤维破坏相关的声发射信号,声发射撞击累积数有上升趋势。

(3) 在复合材料胶接结构检测中,可结合声发射相对能量、幅度分布等声发射信号评价胶接结构的早期损伤和进行健康监测。

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] Meneghetti G, Quaresimin M, Ricotta M. Damage mechanisms in composite bonded joints under fatigue loading[J]. Composites Part B, 2012, 43(2): 210-220.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Wang Xiaohui, Yao Weixing. Progress in research on FEA models of adhesively bonded composite joints[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(5): 562-571.
- [6] 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.
- [7] 郭霞,关志东,刘遂,等. 搭接长度对复合材料单搭接胶接接头的影响[J]. 科技导报, 2013, 31(7): 37-41.
- [8] Guo Xia, Guan Zhidong, Liu Sui, et al. Effect of lap length on the adhesive-bonded single-lap composite joints [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(7): 37-41.
- [9] 江乐彬,谢惠民,王怀喜,等. 单搭接胶接接头拉伸剪切性能的数值模拟与实验研究 [J]. 实验力学, 2012, 27(6): 643-649.
- [10] Jiang Lebin, Xie Huimin, Wang Huaixi, et al. Numerical simulation and experimental study of tensile shear performance of adhesively bonded single-lap joint[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(6): 643-649.
- [11] 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.
- [12] Wang Congke, Li Jinlu, Li Genchen, et al. Study on acoustic emission characteristics of tensile damage processes in epoxy resin[J]. Engineering Plastics Application, 2009, 37(11): 61-64.
- [13] 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.
- [14] 益小苏. 胶接接头的微损伤特征值和破坏过程的声发射研究[J]. 南京航空航天大学学报, 1984, 3: 50-63.
- [15] Yi Xiaosu. The investigation on the crazing characteristic value and breaking process of the adhesive bond with sound emission analysis[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1984, 3: 50-63.
- [16] 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.
- [17] Hu Shaohai, Zhang Shujing. Acoustic emission testing of adhesive bonds[J]. Nondestructive Testing, 1994, 16(6): 154-156, 163.
- [18] Mohamed B K, KalaiChelvan K, Vijayaraghavan G K, et al. Acoustic emission wavelet transform on adhesively bonded single-lap joints of composite laminate during tensile test[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013, 32(2): 87-95.

预计 2015 年我国塑料管材生产总量约 1320 万 t

由于塑料管材在节能、节地、节水、节材方面具有明显优势,受当前利好政策影响,低碳、环保、绿色的新型塑料管材将步入快速发展的“黄金时代”,预计到 2015 年,我国塑料管材生产总量约为 1320 万 t。

伴随城镇化建设步伐加快,房屋建筑、市政工程、水利及农村饮水系统建设等对塑料管材制品的需求巨大。据中国

塑料加工工业协会统计,目前我国塑料管材市场年增长率达 15%。

有业内专家指出,功能化、轻量化、微成型将是我国塑管业的发展趋势,未来塑管业需要围绕提升产品质量,在关键技术上实现突破,通过新材料、新工艺、新技术、新装备的推广,增加核心竞争力和发展后劲,推动塑管业的可持续发展。

(工程塑料网)