

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.04.025

声发射在纤维增强聚合物基复合材料中的应用进展*

郭勇^{1,2}, 李大纲¹, 陈玉霞², 李晶晶¹, 杨莹¹, 方菲¹

(1. 南京林业大学, 南京 210037; 2. 安徽农业大学, 合肥 230036)

摘要: 综述了近年来声发射(AE)技术应用于监测纤维增强聚合物基复合材料力学性能的研究进展。分析了聚合物基复合材料AE技术检测原理及特性,并总结了AE技术在分析玻璃纤维、碳纤维、其他传统纤维以及植物纤维增强聚合物基复合材料损伤、断裂过程中的应用。结合AE技术在监测纤维增强聚合物基复合材料力学性能中存在的问题对其研究趋势进行了展望。

关键词: 声发射; 纤维增强; 聚合物; 力学性能

中图分类号: TQ327.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2013)04-0107-04

Application Progress of AE in Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites

Guo Yong^{1,2}, Li Dagang¹, Chen Yuxia², Li Jingjing¹, Yang Ying¹, Fang Fei¹

(1. Nanjing Forest University, Nanjing 210037, China; 2. Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China)

Abstract: The recent progress in the research of application of Acoustic Emission(AE) technique to monitoring mechanical performance of fiber-reinforced polymer matrix composites was reviewed. AE technical principle in detecting polymer composites and its characteristics were analyzed, and then the applications of AE technique to analyzing damage and fracture progress of fiber reinforced polymer matrix composites with different fibers such as glass fiber, carbon fiber, plant fiber and other traditional fiber were summarized. Based on the current problems in the research of application of AE technique to monitoring mechanical performance of fiber-reinforced polymer matrix composites, its development trend was prospected.

Keywords: acoustic emission; fiber reinforced; polymer; mechanical properties

纤维增强聚合物基复合材料是以聚合物为基体,以玻璃纤维(GF)、碳纤维(CF)、芳纶纤维(AF)、硼纤维、聚酯纤维、尼龙纤维及其他植物纤维为增强材料制成的复合材料。这类复合材料综合了基体聚合物与纤维的性能,材料特性优于各单一组分的特性,具有比强度和比模量高、耐腐蚀、结构尺寸稳定性好等优良的物理力学性能。近年来在航空、汽车、军事、核能、船舶、风力发电、电子、体育休闲、基础设施建设等领域得到了越来越广泛的应用,正在逐步代替一些传统的结构材料^[1-2]。

纤维增强聚合物基复合材料也存在着一些缺点和问题,纤维的加入虽然提高了复合材料的力学性能,但同时由于其组分的多样性和制造工艺过程中稳定性问题,都会导致材料中出现缺陷(比如空隙、分层、夹杂、纤维分布不均等)。由于这些缺陷的存在,降低了纤维增强聚合物基复合材料材料的延展性、断裂韧性、疲劳寿命、抗蠕变损伤的能力。

近些年来,国内外相关研究一直致力于运用声发射(AE)技术来研究纤维增强聚合物基复合材料的断裂和损伤过程。这种方法是一种广泛使用的无损检测技术,一方面在产品使用中进行检测对预防灾难性事故起着重要作用;另一

方面能够监督产品的质量,并将检测的结果反馈到生产工艺中去指导和改进生产^[3]。由于AE技术可以对复合材料复杂的损伤形式进行详细的分析,是研究复合材料损伤、破坏机理及强度的有效方法之一,因此一直是众多学者研究的热点内容,笔者介绍了国内外近年来利用AE技术监测纤维增强聚合物基复合材料力学性能的一些相关研究和方法。

1 聚合物基复合材料AE技术检测原理及特性

AE又称应力波发射,是指当材料受到外力或内力作用产生变形或断裂时,积累的能量以弹性波的形式释放出来的一种物理现象。AE信号是指由传感器接收AE事件,经前置放大器、信号调理装置等处理而显示的电信号,用AE仪探测、记录和分析、处理声发射信号以及由检测到的AE信号推测AE源的部位、损伤类型及其严重性的技术称为AE技术^[4]。

纤维增强聚合物基复合材料的损伤破坏形式大致可分

* 国家自然科学基金项目(31170514)、安徽省高校省级自然科学基金项目(KJ2011Z124)、安徽农业大学青年基金项目(2009zr10)

联系人: 郭勇, 博士, 主要从事木塑复合材料的教学和研究

收稿日期: 2013-02-09

为纤维拔出、纤维断裂、基体开裂、纤维和基体界面分离、纤维摩擦和层间分离等^[5]。采用传统的力学方法和测试手段难以准确有效地将损伤破坏的模式加以区分。AE技术是一种实时有效的非破坏性测试方法,对复合材料的损伤破坏信息尤为敏感。虽然纤维增强聚合物基复合材料的损伤破坏形式具有多样和复杂性,但是这些损伤从发生直至断裂时都会有AE特征信号出现,而AE技术是可以检测和识别这些复合材料微观变形直至断裂的全过程。

AE技术的分析方法主要有参数分析法和波形分析法,参数分析法已经成为聚合物基复合材料成熟的分析方法。常用的AE信号分析参数有:AE事件及事件计数、振铃及振铃计数、幅度和幅度分布、能量及能量分布、上升时间和持续时间、费利西蒂比、有效值电压等^[6]。通过对这些AE特征参数进行相关分析,可以有效获得复合材料内部损伤破坏过程中的基本信息。波形分析法是指对AE信号的波形进行记录和分析,得到信号的频谱及相关函数等。波形在理论上包含了AE事件的全部信息,因此,波形分析法是最精确、能给出定量分析的方法。

2 AE技术在纤维增强聚合物基复合材料中的应用

AE技术作为一种动态的无损检测方法,可以对纤维增强聚合物复合材料的受载过程中损伤的发生与扩展进行动态监测,并确定发生损伤的载荷部位、危害程度和预期使用寿命等。目前,AE实时监测技术被常用于如CF、GF、AF增强传统聚合物复合材料的损伤破坏机理、材料性能(包括断裂性能和力学性能等)、强度检测和使用寿命评估等研究中^[7-8],而植物纤维增强聚合物基复合材料的界面强度、植物纤维结构、损伤破坏特性与传统纤维增强聚合物基复合材料相比AE信号特征有着较大的差异性和处理难度,因此开展相关研究相对较晚,有待进一步深化。

2.1 在GF增强聚合物基复合材料中的应用

GF增强聚合物基复合材料是应用较为广泛的纤维增强复合材料,目前国内外相关学者利用AE技术对其损伤、断裂过程开展了相关研究。王从科^[9]采用AE技术研究了环氧(EP)/GF复合材料的弯曲损伤过程。研究表明,在GF增强EP复合材料的弯曲损伤过程中,AE信号产生分为两个阶段,基体EP及其界面损伤产生少量信号阶段和基体EP及其界面破坏、GF断裂产生丰富的AE信号阶段,另外AE信号随GF含量增加、树脂含量的降低呈减少趋势。J. Bohse^[10]利用AE技术研究了GF增强聚丙烯层合板的断裂特性,根据AE振铃总计数正比于裂纹尖端塑性区尺寸这一观点,得到了振铃总计数与材料断裂韧性以及作用载荷的关系。S. Huguet等^[11]监测了聚酯/GF复合材料静态拉伸过程中的AE信号,根据振幅、持续时间、能量等AE信号

参数,识别了基体断裂和纤维—基体脱粘两种损伤模式,并且利用Kohonen神经网络对损伤信号进行了识别研究。G. Caprino^[12]等利用AE技术监测了EP/GF复合板四点弯曲疲劳加载过程。研究表明,疲劳周期数、剩余强度与AE试件总数有密切的实验关系。A. Oskouei^[13]等利用AE技术研究了GF增强聚酯复合材料层合板I型分层断裂特性,利用机械能与声能比值的对数来研究层合板断裂韧性。

2.2 在CF增强聚合物基复合材料中的应用

CF增强聚合物基复合材料是一种质轻、高强的新型复合材料,CF目前应用较广泛的是增强热固性塑料^[14]。沈功田等^[15]对CF增强聚酰亚胺复合材料的加热固化过程进行了AE监测。分析了不同温度下材料的幅度、AE试件、持续时间等AE信号特征,得出AE方法是监测CF增强聚酰亚胺复合材料凝胶点的可靠方法。近些年来,国内外的相关研究主要集中在研究EP/CF复合材料中,刘怀喜等^[16]通过实验证明,选择合理的神经网络结构、建立有效的训练样本集、确定合理的参数及训练方法,就能在AE检测中用神经网络方法对EP/CF复合材料的各种损伤类型进行正确的识别。龙宪海等^[17]对EP/CF复合材料三点弯曲试样进行加载,利用AE仪检测试样损伤断裂过程中产生的AE信号。结果表明,AE信号的累计撞击数可有效地描述复合材料试样三点弯曲的损伤演化过程;重复加载实验表明,复合材料的费利西蒂效应非常明显,说明复合材料在受载的过程中都会发生损伤。龙宪海等^[18]还对EP/CF复合材料拉伸断裂过程进行了AE检测,并结合细观力学分析探讨了其拉伸断裂的机理。通过分析拉伸过程AE信号撞击数、幅值、能量以及撞击持续时间随载荷和时间的变化关系,得出EP/CF复合材料拉伸损伤过程可以分为三个阶段:弹性变形阶段、损伤发展与累积阶段和临近断裂阶段。

2.3 在其他传统纤维增强聚合物基复合材料中的应用

AF是一种具有高强度、高弹性模量、质轻且具有良好的热稳定性的合成纤维。在AF增强聚合物基复合材料的研究方面,AF多采用编织的方法和树脂共混,尤其是在增强EP方面研究较多^[19]。Dae-unsung等^[20]用小波变换的方法研究了EP/AF复合材料层合板的损伤破坏情况,对复合材料拉伸实验下的基体破坏和界面分层的扩展作了小波分析,并得出了相关的特征,结论认为最终材料的破坏AE信号幅度是界面分层幅度的3倍,而其他AE信号持续时间则比较短。刘怀喜等^[21]研究了EP/AF复合材料在承受拉伸载荷时的损伤与断裂行为。发现不同损伤类型表现出不同的AE特性,从AE信号各特征参量可以很好地判断损伤发生的类型,并可根据某些AE特征参量值对临界承载值进行合理的确定。

硼纤维也是一种新型纤维,弹性模量高于 GF,硼纤维增强聚合物基复合材料主要用于航空领域。A. C. Okafor 等^[22]利用 AE 技术监测了用于修复受损飞机的 EP/硼纤维复合材料补片拉伸疲劳载荷下的裂纹扩展过程,研究发现 AE 系统能够探测到裂纹的扩展,即使在 10 Hz 高噪声条件下,也可以区分开基体开裂、纤维断裂、裂纹扩展的信号。并通过训练神经网络来预测裂纹长度。

2.4 在植物纤维增强聚合物基复合材料中的应用

植物纤维主要包括木粉、竹纤维、麻纤维、秸秆纤维、果壳粉和其它茎秆纤维等。植物纤维和其它合成纤维相比,具有来源广泛、价格低廉、密度较小和可降解回收的优势,同时,植物纤维还具有相对较高的强度和弹性模量^[23]。因此,近些年来植物纤维增强聚合物基复合材料得到了较快发展。相关研究表明,AE 技术能实时有效地监测植物纤维增强聚合物基复合材料以及对损伤、断裂过程产生的应力波均具有高度敏感性。Z. kocsis 等^[24]运用 AE 技术对木纤维增强高分子复合材料的拉伸过程进行了研究,通过制备了未经处理的不同木纤维含量的聚丙烯复合材料,并对注射成型试样进行拉伸试验,结合扫描电子显微镜观察拉伸试验的断裂表面,对拉伸试验进行 AE 监测。结果表明,AE 计数分布从最大数量至减少的同时伴随着不同木粉含量复合材料拉伸强度的变化。F. G. Shin 等^[25]在拉伸和弯曲强度试验中运用 AE 计数方法预测和评价 EP/单向竹纤维复合材料的断裂和破坏现象。结果显示,少量 AE 活动的发生预示着纤维开始断裂,而 AE 活动的大量出现则预示着纤维将开始发生严重的破坏。G. Dogossy 等^[26]利用 AE 技术来监测玉米壳填充聚乙烯(PE)复合材料拉伸实验的损伤演化过程。实验表明,幅度与时间的关系可以揭示实验断裂特性并区分出三种主要的失效模式:基材的变形(在 25 dB 以下)、玉米壳拔出(26~40 dB)和玉米壳的破损(大于 41 dB)。H. Anuar 等^[27]也证明 AE 监测技术是确定麻纤维增强热塑性天然橡胶的不同失效模式和评价损伤区域演化的有效工具,同时也运用不同韧性的样品进行了相关实验。M. S. Sreekala 等^[28]运用 AE 监测技术研究油棕榈和菠萝纤维增强酚醛树脂复合材料的失效模式。在施加载荷时,累积 AE 事件和平均幅度及运行时间之间存在一定的关系。在施加载荷的初始阶段,AE 事件分布表明基材变形和脱粘产生较小的信号幅度。相比之下,接近最大载荷值时,由于拉拔和纤维断裂的发生出现了较高的信号幅度。

国内相关学者也开展了相关研究,殷冬萌等^[29]利用 AE 技术对木塑复合材料进行无损检测,且应用小波分析去除噪声,提取 AE 信号特征信息,并应用人工神经网络模式进行识别出木塑复合材料缺陷及损伤的五类 AE 信号:纤维

断裂、界面分离、基材开裂、空洞和界面摩擦。王军等^[30]研究了由稻糠粉、聚乙烯塑料挤出成型的木塑复合材料三点弯曲过程中损伤、破坏时 AE 信号,确定了不同缺陷及损伤模式所对应的 AE 特征信号。

3 结语

AE 技术已广泛应用于纤维增强聚合物基复合材料力学性能研究之中,该技术为无损监测和研究纤维增强聚合物基复合材料的损伤、断裂过程提供了很好的技术手段,但仍存在一些亟待解决的科学问题。

(1) 纤维增强热固性复合材料塑性差,弹性形变较低,损伤破坏过程中信号明显,而纤维增强热塑性复合材料可塑性强,弹性形变较高,AE 信号比较复杂。因此,相关研究主要集中于 EP/GF, EP/CF 等纤维增强热固性复合材料,而纤维增强热塑性复合材料的研究相对较少。随着人们环保意识的提高,具有可回收、易降解的植物纤维增强热塑性复合材料的应用越来越广泛,因此利用 AE 技术开展植物纤维增强可降解复合材料的研究将成为今后研究的重点。

(2) 增强纤维结构复杂,界面相容性差异较大,纤维增强聚合物基复合材料内部呈现多界面的特征。目前研究由于缺乏纤维增强聚合物基复合材料初始损伤的量化数据,其损伤、断裂过程中 AE 信号分析、比较起来难度较大。因此,AE 技术结合 CT 扫描、超声技术等,在定义材料初始损伤的基础上,将 AE 波形分析与先进神经网络模式识别技术结合起来,将成为新的研究手段。

参考文献

- [1] 丁浩. 塑料工业实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
Ding Hao. Handbook of plastics industry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [2] 罗吉祥, 等. 复合材料学报, 2009, 26(6): 201-209.
Luo JiXiang, et al. Acta Materiea Composita Sinica, 2009, 26(6): 201-209.
- [3] 张俊哲. 无损检测技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Zhang Junzhe. Nondestructive testing technique and its application[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [4] 郭晓磊, 等. 森林工程, 2011, 26(6): 201-209.
Guo Xiaolei, et al. Forest Engineering, 2011, 26(6): 201-209.
- [5] Tekalur S A, et al. Composites: Part B, 2008, 39(1): 57-65.
- [6] 沈功田, 等. 无损检测, 2002, 24(2): 72-77.
Shen Gongtian, et al. Nondestructive Testing, 2002, 24(2): 72-77.
- [7] 李维, 等. 化工机械, 2011, 38(6): 692-696.
Li Wei, et al. Chemical Engineering & Machinery, 2011, 38(6): 692-696.
- [8] 杨盛良, 等. 无损检测, 2000(7): 303-306.
Yang Shengliang, et al. Nondestructive Testing, 2000(7): 303-306.
- [9] 王从科. 工程塑料应用, 1996, 24(6): 46-48.

- Wang Congke. Engineering Plastics Application, 1996, 24(6):46-48.
- [10] Bohse J. European Structural Integrity Society, 2000, 27:15-26.
- [11] Huguet S. Composites Science and Technology, 2002, 62(3):1 433-1 444.
- [12] Caprino G, et al. Composites: Part B, 2005, 36(5):365-371.
- [13] Refahi A. Materials and Design, 2011, 32(3):1 444-1 455.
- [14] Bourchak M. Int J Fatigue, 2007, 29(3):457-470.
- [15] 沈功田, 等. 无损检测, 1998, 20(5):126-128.
- Shen Gongtian, et al. Nondestructive Testing, 1998, 20(5):126-128.
- [16] 刘怀喜, 等. 无损检测, 2004, 26(12):628-632.
- Liu Huaixi, et al. Nondestructive Testing, 2004, 26(12):628-632.
- [17] 龙宪海, 等. 振动与冲击, 2008, 27(S):43-45.
- Long Xianhai, et al. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(S):43-45.
- [18] 龙宪海, 等. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(2):50-54.
- Long Xianhai, et al. Polymer Materials Science & Engineering, 2011, 27(2):50-54.
- [19] 李伟, 等. 工程塑料应用, 2010, 38(9):86-88.
- Li Wei, et al. Engineering Plastics Application, 2010, 38(9):86-88.
- [20] Dae-unsung, et al. Composites: Part B, 2002, 33:35-43.
- [21] 刘怀喜, 等. 材料导报, 2004, 16(6):93-95.
- Liu Huaixi, et al. Materials Review, 2004, 16(6):93-95.
- [22] Okafor A C, et al. Acoustic emission detection and prediction of fatigue crack propagation in composite patch repairs using neural networks[C]. Am Inst Phys Conf Proc, 2007, 894:1 532-1 539.
- [23] Oksmana K et al. Composites Science and Technology, 2003, 63(9):1 317-1 324.
- [24] Kocsis Z, et al. Investigation of the debonding process in wood fiber reinforced polymer composites by acoustic emission [J]. Mater Sci Forum, 2007, 537-538: 199-205.
- [25] Shin F G, et al. J Mater Sci, 1989, 24(10):3 483-3 490.
- [26] Dogossy G, et al. Polym Test, 2006, 25(3):353-357.
- [27] Anuar H, et al. J Compos Mater, 2007, 41(25):3 035-3 049.
- [28] Sreekala M S, et al. Polym Polym Compos, 2003, 11(1):9-18.
- [29] 殷冬萌, 等. 应用声学, 2007, 26(6):352-354.
- Yin Dongmeng, et al. Applied Acoustics, 2007, 26(6):352-354.
- [30] 王军, 等. 声学技术, 2008, 27(4):497-500.
- Wang Jun, et al. Technical Acoustics, 2008, 27(4):497-500.

奥地利聚氨酯泡沫厂商南非建厂

奥地利特种泡沫生产商 GFI 近日和南非聚氨酯泡沫生产商 Unimattress 达成合作关系, 代表了 GFI 正式进军非洲市场。

合资公司位于德班北部 70 km 处, 新公司命名为 Unifoam(Pty)Ltd. 双方表示, 他们的主要目标是成为南非最强的泡沫公司。

Unimattress 成立于 1997 年, 位于夸祖鲁-纳塔尔省, 2011 年生产了 6 000 t 聚氨酯泡沫, 主要用于生产床垫。目前公司拥有员工 230 名, 2012 年的年销售额达 2 000 万欧元。目前, 南非地区只有 1/3 的床垫是用泡沫做成的, 也就是说南非的床垫市场潜力无穷。

双方还希望能够扩大产品的下游应用, 包括汽车零部件或是将产品出口至邻国。

(环聚网)

中国市场尼龙化合物供需不断攀升

根据英国 AWJ 咨询公司最新研究报告显示, 中国市场尼龙混合物的供需都在不断攀升。此报告主要是指尼龙 6, 尼龙 66 和高温尼龙物。

在 2012 年, 中国对于尼龙混合物的需求达到 894 500 t, 并且预计在之后的五年里将以 7.5% 的速度增长。这就要求 2017 年市场将有 1 300 000 吨 t 的尼龙混合物供给。

在过去的 3 年里, 中国尼龙市场的增长率达到 11.2%。在 2012 年, 中国市场的需求增长率为 6.2%。其中汽车应用占到 9%, 电气工业占 3%~4%。

5 年前, 中国 65% 的尼龙 6 和 86% 的尼龙 66 要从其他国家进口。近年来, DSM 在尼龙 6 聚合物的生产上发展很快, 而神马则是尼龙 66 生产的领军者。

目前, 独立生产尼龙混合物的前几位厂商是: 东莞市意普万尼龙科技股份有限公司, 金发科技有限公司, 哈尔滨鑫达高分子材料有限公司, 得邦工程塑料有限公司, 浙江俊尔新材料有限公司, 山东道恩高分子材料有限公司, 南京聚隆科技股份有限公司。

(PUWORLD)

昆山向国内外重要模具产业基地目标迈进

近年来, 江苏省昆山市 IT 产业、精密机械产业发展迅猛, 为模具产业带来了广阔的发展空间。成立于 1998 年的昆山模具工业实验区集聚了一大批为高精密电子、高档汽车配套的精密模具企业, 成为国家火炬计划模具产业基地。目前, 模具区已经形成了包括模具制造、模具标准件、模具材料和模具机械等在内的多元化模具产业结构布局。

未来 3 年, 江苏省昆山市将投资 25 亿元建设占地 1 000 亩的昆山国际模具城。项目建成后, 昆山市的模具产业年产值将占全国的 10%, 带动相关产业效益 300 亿元。建成后的中国昆山国际模具城将开发建设模具制造加工区、模具材料交易区、模具设备商贸区、模具设计开发区、模具技术培训中心及信息服务区等五大功能区, 预计吸纳 500 家以上模具生产、研发、培训、服务企业, 使昆山成为国内外有重要影响的模具产业基地。

江苏昆山的模具产业的上升空间还很大, 昆山模具正在蓬勃的发展, 再加上昆山模具的区位优势, 昆山模具产业的前途非常远大, 昆山正在向国内外有重要影响的模具产业基地目标大步迈进。

(模具网)

山东中联 4 万 t 糊树脂项目投产顺利

山东中联化学年产 4 万 t 糊树脂项目, 经过投料试生产, 于近日生产出一级品率达到 100% 的合格产品。

(色母网)