

基于声发射检测技术的 PE/PE 自增强复合材料破损机理分析

Analysis on Damage Mechanism of PE/PE Self-reinforced
Composite Based on Acoustic
Emission Technique

张同华, 杨璧玲, 彭永超, 晏 雄
(东华大学 纺织学院, 上海 201620)

ZHANG Tong-hua, YANG Bi-ling, PENG Yong-chao, YAN Xiong
(College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China)

摘要: 用声发射(AE)技术研究了聚乙烯自增强复合材料的拉伸损伤与断裂行为。宽带传感器记录了不同角度纤维铺层的复合材料试样在拉伸破坏过程中的声发射信号,用扫描电子显微镜(SEM)观察了试样的几种典型的损伤破坏断面,对比分析了不同类型的损伤机制。实验分析表明,拉伸过程中破坏机制对声发射信号的特征具有显著影响,不同损伤模式的信号频谱特征存在明显的差异。声发射检测能有效提取热塑性复合材料损伤破坏信息,在材料的结构损伤主动监测中有良好的应用潜力。

关键词: 声发射检测; PE/PE 复合材料; FFT 分析; 损伤模式

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)01-0056-04

Abstract: Damage and fracture behavior of self-reinforced polyethylene (PE) composite under monotonic tensile loading were investigated by acoustic emission (AE) technique. AE signals released from different lay-ups composite specimens were acquired by a wideband transducer, and fracture surfaces of the specimens were observed by scanning electron microscope (SEM). Experimental results showed that the composites exhibited multiple damage modes and the characteristics of AE signals were remarkably affected by damage mechanism. AE technique is applicable in acquiring the damage information of thermoplastic composites effectively.

Key words: AE testing; PE/PE composite material; FFT analysis; damage mode

对材料在受载过程中的损伤破坏进行实时检测,声发射技术无疑是一种有效的方法^[1-3]。结构材料受载损伤常伴有能量的释放,部分能量以弹性波的形式释放出来并通过介质传播。纤维增强复合材料的损伤破坏常表现为基体开裂、界面分离、纤维断裂等。区分材料的破坏模式与声发射信号特征之间的关系是研究复合材料破坏行为的关键,对声发射信号特征与材料的损伤机制关系的探讨,Meahan^[4]等人曾做过较早的研究并提出用频谱分析来研究材料的破坏特征,但主要的困难在于不同模式的信号往往同时发生而难以辨别。

利用声发射技术研究材料的损伤破坏已得到广泛的应用,复合材料不同的损伤模式及其损伤过程的不同阶段信号往往存在较大的差异^[5]。关于声发射参数分析,沈功田^[6]等人详细论述了经历图分析法和关联分析法等方法,并记录了压力容器加压过程中和裂纹扩展过程中的声发射信号参数,同时利用上述方法对

其进行了直观快速的分析。陈玉华^[7]等人利用谱方法和相关分析的方法研究了声发射信号的特征,指出FFT方法已经在实践中取得了很好的效果并具有巨大潜力。M. Giordano^[8]等人借助偏振光显微镜的观察及谐振传感器的触发作用,利用宽带传感器记录了碳纤维热固性复合材料受到拉伸时单纤维断裂的声发射信号,并利用FFT描述了其频谱特征,对不同的拉伸测试得到的信号进行对比分析后指出纤维的断裂有着明显的频谱特征。Mikael Johnson^[9]等人利用宽频传感器研究了玻璃纤维/环氧复合材料层合板不同铺层的拉伸时的声发射信号,指出不同损伤模式的信号在幅度、持续时间和频率范围存在着不同,并把信号分成几组主要的类型,以此可辨别不同类型的损伤。Amilcar Quispitupa^[10]等人研究了“三明治”碳纤维增强复合材料的静态拉伸和疲劳测试过程中的声发射信号,指出加载条件对信号特征有显著影响。Yuris A.

Dzenis^[11]等人利用 AE 信号分类和多参数滤波的方法,记录分析了石墨/环氧复合材料受到拉伸时的破坏演化过程。

对复合材料的声发射研究,以往多以热固性基体复合材料为研究对象,实验表明热固性材料的声发射信号特征比较强烈^[12],研究过程中的信号特征比较容易区分。而热塑性基体材料具有熔点低、断裂伸长高、硬度低等特点,对这类材料的声发射信号特征研究较少。本工作以超高分子量聚乙烯纤维为增强材料、低密度聚乙烯为基体材料的 UHMWPE/LDPE 自增强复合材料为对象,研究热塑性复合材料在拉伸破坏过程中的声发射信号特征,分析了复合材料的破坏模式和声发射信号特征之间的关系。

1 实验

1.1 实验原料和试样

纤维材料为东华大学材料学院提供的超高分子量聚乙烯(Ultra-high Molecular Weight Polyethylene, 简称为 UHMWPE),基体材料为市售低密度聚乙烯薄膜(Low Density Polyethylene, 简称为 LDPE),实验原料性能指标见表 1。

表 1 超高分子量聚乙烯纤维与低密度聚乙烯薄膜性能
Table 1 Characteristics of UHMWPE and LDPE

| | Density/ (g • cm ⁻³) | Thick ness / mm | Specification | Elonga- tion/ % | Ten sile strength / MPa |
|--------|-------------------------------------|--------------------|---------------|--------------------|-------------------------------|
| LDPE | 0.90 | 0.055 | - | 12.372 | 8.67 |
| UHMWPE | 0.97 | - | 1680 D/ 240 F | 6.83 | 3013 |

为了进行对比分析,复合材料制成[0°], [+ 45°/- 45°]和[90°]层合板,采用熔融膜压法在温度 140℃、压力 1.7~ 1.8MPa、持续时间为 8min 条件下制作试样。参照 GB/ T3354- 1999 定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法和 GB/ T1446- 1983 纤维增强塑料性能试验方法来确定试样。复合材料宽度为 20mm,厚度为 1mm,纤维体积率为 20%。为了获得不同破坏模式的声发射信号特征,本实验分为四组:基体材料,[0°]试样,[+ 45°/- 45°]试样,[90°]试样。

1.2 实验过程

为了分析信号的频谱特征,实验采用美国物理声学公司(PAC)生产的 200~ 775kHz 宽频谐振式传感器进行信号接收。由于宽频传感器的敏感性使得测试过程中受到环境噪声的影响,经反复测试环境噪声后得到测试环境噪声在 27dB 左右。系统设置门槛值为

30dB;前置放大器增益为 40dB;频率带宽为 100~ 400kHz;峰值鉴别时间为 50μs;波击鉴别时间为 100μs;波击闭锁时间为 300μs。声发射信号数据由 PCI-2 系统进行接收处理。拉伸机仪器为上海华龙测试仪器厂生产的华龙 WDW-20 型万能材料试验机,加载速度为 1mm/ min,采用真空润滑脂作为耦合剂使传感器与材料表面获得良好的耦合。图 1 表示了典型的声发射实验系统。宽频传感器用松紧带固定在复合材料试样的表面,拉伸沿试样长度方向上进行,拉伸过程在准静态条件下进行直到试样断裂为止。

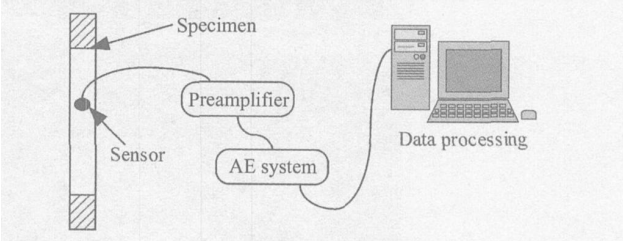


图 1 声发射测试系统框架图
Fig. 1 Schematic illustration of AE detecting system

2 实验结果和讨论

2.1 AE 事件参数与材料损伤

试样拉伸破坏过程的声发射信号由宽带传感器接收并记录储存在 PCI-2 系统内,图 2 记录了试样拉伸断裂过程中 AE 事件数与 AE 幅度变化曲线图。图 3 为拉伸断裂后的基体和复合材料试样断面的 SEM 照片。

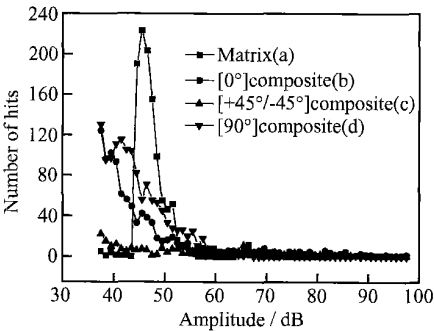


图 2 AE 事件数与 AE 幅度变化曲线图
Fig. 2 Curves of AE amplitude vs number of hits

从图 2 可以看出,基体材料和复合材料在变形断裂过程中事件振幅多集中在 35~ 60dB,而超过 70dB 的事件很少,这表明热塑性复合材料的损伤破坏事件为低振幅低能量事件。为了进行对比分析,同时对基体材料进行了拉伸破坏实验。由图 2a 曲线可以看出基体材料在拉伸破坏过程中出现了大量的低于 50dB 的 AE 事件,这是因为 PE 材料的断裂伸长非常大,材

料完全破坏其伸长率达到 130%^[13]。拉伸过程以弹塑性变形为主,先是材料大分子的伸直和滑移,最后是分子链的断裂,由图 3a 明显看出基体材料的破坏是韧性

断裂破坏。因此基体材料破坏之前的弹塑性变形阶段以低振幅 AE 事件为主,仅当材料开始断裂时出现少量的较大振幅事件,振幅集中在 60~70dB 之间。

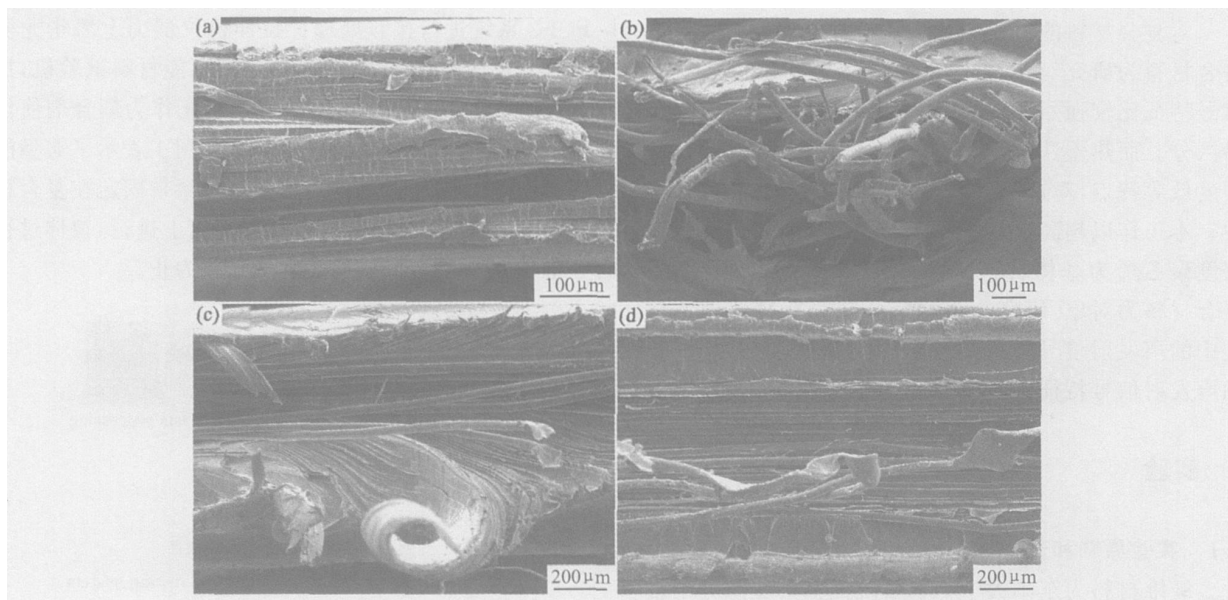


图 3 试样拉伸断面 SEM 照片 (a) 基体材料; (b) $[0^\circ]$ 复合材料; (c) $[+45^\circ/-45^\circ]$ 复合材料; (d) $[90^\circ]$ 复合材料

Fig. 3 SEM micrographs of fracture surfaces of specimens during tensile testing (a) matrix;
(b) $[0^\circ]$ composite; (c) $[+45^\circ/-45^\circ]$ composite; (d) $[90^\circ]$ composite

由图 2b 曲线可以看出, $[0^\circ]$ 试样的拉伸破坏过程中尽管低振幅事件较多,但同时出现了较多的 60~90dB 相对较高振幅事件。在拉伸初期材料以弹性变形为主,基体和纤维都没有造成破坏,声发射事件主要由拉伸过程中分子链的取向变化造成,AE 事件的振幅较小且相对平稳。随着拉伸的进行,由于基体材料和增强材料不同的伸长特性,纤维束之间、纤维束与基体之间的结合面开始发生界面破损并出现裂纹的扩展。这时出现较高振幅的事件,主要集中在 60~80dB。在材料拉伸的最后阶段,出现了大量 80~90dB 高幅事件。由图 3b 可以明显看出,材料的最终断裂是大量的纤维破坏同时伴有基体和界面的破坏。

由图 2c 曲线明显看出, $[+45^\circ/-45^\circ]$ 试样拉伸破坏过程中出现了较少的 AE 事件,由于试样纤维铺层角度较大,拉伸载荷主要是由纤维和界面承受,在纤维方向和界面上产生应力集中,当载荷大于界面粘结强度时,界面发生脱胶,使微裂纹沿界面扩展连成连续的剪切主裂缝,造成沿 45° 方向的层间剪切分离,在该方向上的剪应力最大拉应力很小。基体产生局部塑性变形,由于纤维两端并未同时全被夹持住,界面的脱胶引起部分纤维从基体中抽拔出来,继而引起基体裂纹的急速扩展,破坏在较短时间内完成,因此声发射事件较少。由图 3c 可以看出,材料断面损伤主要是纤维的

抽拔、纤维-基体界面分离及周围基体破裂。

由图 2d 曲线可以看出, $[90^\circ]$ 试样的拉伸以低振幅事件居多,同时出现了 50~70dB 的中振幅事件。材料的拉伸初期,其变形主要是复合材料中的基体产生弹塑性变形为主,此时出现的事件振幅较小。随着应力的不断增大,纤维束和基体材料之间的界面开始受到损伤并发生开裂,最终导致界面的整体分离,此时声发射事件表现为 50~70dB,并出现了少量大于 70dB 的声发射事件。由图 3d 明显看出,材料的破坏主要是界面分离。

2.2 AE 信号波形及频谱分析

由宽带传感器记录了基体及复合材料拉伸变形全部过程产生的 AE 信号。采用快速傅立叶变换(FFT)对信号进行时频分析,在大量的事件信号中对每种损伤的典型事件信号进行研究。图 4 为材料拉伸断裂损伤时典型的 AE 原始信号波形及其 FFT 变换频谱特征图,由图 4 可以看出每种破坏损伤均为宽频模式,这里必须指出的是原始信号中伴有材料损伤、噪声、机械摩擦以及低通滤波的影响。图 4a, b 为基体断裂时的典型信号及其频谱,可以看出基体材料断裂时的信号波形幅度较小,频率峰值多集中在 250kHz 以下并出现了多个峰值,即断裂信号频率较低。图 4c, d 为 $[0^\circ]$ 复合材料的破坏瞬间出现的信号,由波形图和频谱图

可以看出, 信号的幅度较大, 频率峰值集中, 该信号记录的主要是纤维断裂瞬间的信号, 因此纤维断裂具有较大的幅度和集中的频率。图 4e, f 与图 4g, h 分别为 $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]$ 和 $[90^{\circ}]$ 复合材料断裂瞬间的典型声发射信号, 可以看出两种破坏具有相似的模式, 频率峰值

集中在 200~ 300kHz, 这是因为两种材料的破坏均以界面分离为最终破坏模式, 但 $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]$ 复合材料的损伤还伴有纤维抽拔等模式, 而 $[90^{\circ}]$ 复合材料破坏过程的中心频率在 250kHz 左右, 因为 $[90^{\circ}]$ 复合材料的损伤模式相对单一, 主要表现为纤维基体的界面分离。

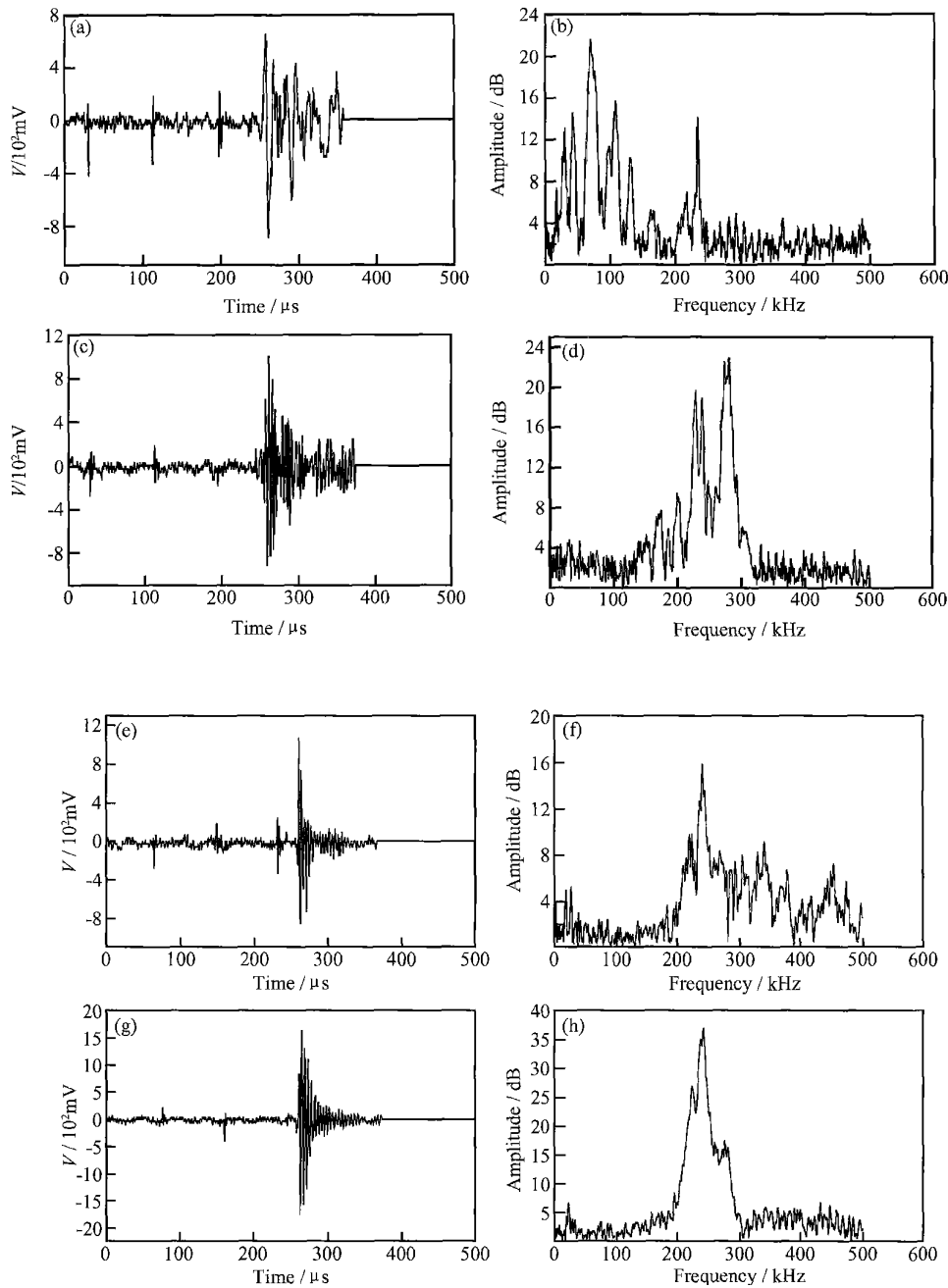


图 4 基体及复合材料破坏时典型 AE 信号及其频谱

(a), (b) 基体材料; (c), (d) $[0^{\circ}]$ 复合材料; (e), (f) $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]$ 复合材料; (g), (h) $[90^{\circ}]$ 复合材料
Fig. 4 Typical AE signals and the corresponding spectra of matrix and composites during tensile testing
(a), (b) matrix; (c), (d) $[0^{\circ}]$ composite; (e), (f) $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]$ composite; (g), (h) $[90^{\circ}]$ composite

3 结论

层方式及铺层角度对材料拉伸破坏模式影响较大。
(2) PE/PE 复合材料的拉伸破坏过程 AE 信号复
(下转第 64 页)

(1) 复合材料的损伤破坏存在多种机制, 纤维铺

- Grain growth and texture evolution in Ti-6Al-4V during beta annealing under continuous heating conditions[J]. Mater Sci Eng, 2002, A337: 88– 96.
- [15] IVASISHIN O M, SHEVCHENKO S V, SEMIATIN S L. Effect of crystallographic texture on the isothermal beta grain growth kinetics of Ti-6Al-4V[J]. Mater Sci Eng, 2002, A332: 343– 350.
- [16] DING R, GUO Z X, WILSON A. Microstructure evolution of a Ti-6Al-4V alloy during thermomechanical processing[J]. Mater Sci Eng, 2002, A327: 233– 245.
- [17] DING R, GUO Z X. Microstructure evolution of a Ti-6Al-4V alloy during β -phase processing: experimental and simulative investigations[J]. Mater Sci Eng, 2004, A365: 172– 179.
- [18] DING R, GUO Z X. Microstructural modeling of dynamic recrystallization using an extended cellular approach[J]. Computational Mater Sci, 2002, 23: 209– 218.
- [19] FUJII H. Strengthening of $\alpha + \beta$ titanium alloys by thermomechanical processing[J]. Mater Sci and Eng, 1998, A243: 103– 108.
- [20] LÜTJERING G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of ($\alpha + \beta$) titanium alloys[J]. Mater Sci Eng, 1998, A243: 32– 45.
- [21] PRASAD Y V R K, SESHACHARYULU T. Processing maps for hot working of titanium alloy[J]. Mater Sci Eng, 1998, A243: 82– 88.
- [22] JEOUNG H K, SEMIATIN S T, CHONG S L. Constitutive analysis of the high temperature deformation of Ti-6Al-4V with a transformed microstructure[J]. Acta Mater, 2003, 51: 5613– 5626.
- [23] 孙新军. 钛合金片层组织的等轴化规律及超细晶钛合金超塑性的研究[D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 1999.
- [24] 姚泽坤, 郭鸿填, 苏祖武, 等. 热力参数对 $\alpha + \beta$ 两相钛合金再结晶百分数和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工艺, 2000, 29 (5): 340– 343.
- [25] LIM Q, XIONG A M, HUANG W C, et al. Microstructure evolution and modeling of the hot compression of a TC6 titanium alloy[J]. Material Characterization, 2003, 49: 203– 209.
- [26] 熊爱明, 黄维超, 陈胜晖, 等. 高温变形参数对 TC6 钛合金微观组织的影响研究[J]. 航空材料学报, 2003, 23(1): 11– 15.
- [27] 熊爱明, 陈胜晖, 黄维超, 等. TC6 钛合金高温变形力学行为研究[J]. 锻压技术, 2003, (2): 41– 43.
- [28] 熊爱明, 陈胜晖, 黄维超, 等. TC6 钛合金的高温变形行为及组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32 (6): 447– 450.
- [29] 熊爱明, 薛善坤, 李森泉. TC4 钛合金高温变形时微观组织变化的计算[J]. 塑性工程学报, 2002, 9 (1): 14– 16.
- [30] 李晓芹. TC11 钛合金 β 锻造工艺、组织和性能的关系[J]. 机械科学与技术, 2000, 19 (1): 127– 129.
- [31] 曾卫东. Ti-17 合金变形机理及 β 锻造过程的数值模拟[D]. 西安: 西北工业大学博士学位论文, 1994.
- [32] 李萍, 薛克敏, 吕炎, 等. 热变形参数对 Ti-15-3 合金显微组织的影响及预测[J]. 金属学报, 2002, 38 (2): 145– 148.

收稿日期: 2005-10-20; 修订日期: 2006-08-19

作者简介: 陈慧琴(1968–), 女, 博士研究生, 研究方向为钛合金塑性加工技术, 联系地址: 北京 81 信箱 20 分箱(100095)。

(上接第 59 页)

杂, 材料损伤破坏机制对声发射信号特征有显著的影响, 不同破坏的信号在波形特征、频谱特征方面存在不同。

(3) 声发射检测技术能够有效地提取热塑性复合材料的损伤破坏信息。

参考文献

- [1] BAKUCKAS J G, PROSSER W S, JOHNSON W S. Monitoring damage growth in titanium matrix composites using acoustic emission[J]. J Compos Mater, 1994, 28(4): 305– 328.
- [2] DANIEL IM. Experimentation and modeling of composite materials[J]. Exp Mech, 1999, 39(1): 1– 19.
- [3] 耿荣生, 沈功田, 刘时风. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 23– 28.
- [4] MEHAN R L, MULLIN J V. Analysis of composite failure mechanisms using acoustic emissions[J]. J Compos Mater, 1971, 5: 266– 269.
- [5] 金周庚, 刘哲军, 王健, 等. B/AI 复合材料变形和断裂过程声发射特性[J]. 稀有金属, 1999, 23(3): 161– 166.
- [6] 沈功田, 耿荣生, 刘时风. 声发射信号的参数分析方法[J]. 无损检测, 2002, 24(2): 72– 77.
- [7] 陈玉华, 刘时风, 耿荣生, 等. 声发射信号的谱分析和相关分析

[J]. 无损检测, 2002, 24(9): 395– 399.

- [8] GIORDANO M, CALABRO A, ESPOSITO C, et al. An acoustic emission characterization of the failure modes in polymer-composites[J]. Composites Sci Technol, 1998, 58: 1923– 1928.
- [9] JOHNSON M, GUDMUNDSON P. Broad band transient recording and characterization of acoustic emission events in composite laminates[J]. Composites Sci Technol, 2000, 60: 2803– 2818.
- [10] AMILCAR Q, BASIR S, FREDERICK J, et al. Acoustic emission based tensile characteristics of sandwich composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2004, 35: 563– 571.
- [11] DZENIS Y A, QIAN J. Analysis of microdamage evolution histories in composites[J]. Int J of Solids and Struct, 2001, 38 (10): 1831– 1854.
- [12] 许凤旌, 陈积懋. 声发射技术在复合材料发展中的应用[J]. 机械工程材料, 1997, 121(4): 30– 34.
- [13] 王旭, 张同华, 崔健伟, 等. UHMWPE/LDPE 复合材料拉伸破坏的声发射特征研究() [J]. 玻璃钢/复合材料, 2006, 2: 23– 26.

收稿日期: 2006-06-05; 修订日期: 2006-12-06

作者简介: 张同华(1971–), 男, 博士研究生, 从事专业为纺织结构复合材料, 联系地址: 上海市松江区人民北路 2999 号东华大学纺织学院(201620)。