

复合材料层板冲击后剩余压缩性能声发射分析

严 实, 陆夏美, 曾 涛

(哈尔滨理工大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 利用声发射技术对复合材料层合板的低速冲击和压缩破坏进行了分析. 测试过程中用声发射技术进行实时监测, 结合载荷—位移曲线, 分析了声发射能量, 幅值和波形经过快速傅里叶变换后的峰值频率, 并对典型信号的波形进行了频谱分析. 结果表明: AE 参数能很好的描述复合材料层合板低速冲击及其剩余压缩行为.

关键词: 声发射; 复合材料层合板; 低速冲击; 压缩; 频谱

中图分类号: TB302.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)01-0112-05

Low-velocity Impact and Residual Compressive Properties of Composite Laminates Based on AE

YAN Shi, LU Xia-mei, ZENG Tao

(School of Architecture and Civil Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The low-velocity impact and compressive failure processes of composite laminate were investigated by the acoustic emission (AE) technique in this paper. The test procedure was monitored by the acoustic emission (AE) technique. Combined with load-displacement curve during testing, the AE energy, amplitude and the peak frequency of a dominant frequency band after treated with the fast Fourier transform (FFT) were analyzed. The frequency spectrums of the waveforms for the type signals were discussed. Results reveal that the behavior of AE parameters described well the damage process on the low-velocity impact and residual compressive behaviors of the composite laminates.

Key words: acoustic emission; composite laminates; low velocity impact; compression; frequency spectrum

复合材料在冲击载荷作用下的动态响应、破坏机理以及吸能特性的研究是近年来固体力学发展中的一个热点和难点, 许多学者在这方面进行了探索与研究. 燕瑛^[1]等针对复合材料层板受低速冲击后的剩余强度问题进行分析计算. 陈浩然^[2]等研究了动荷载作用下含损伤复合材料层板承载能力. 崔海坡和温卫东^[3-4]等针对复合材料层合板的冲击及冲击后的拉伸、压缩破坏过程提出了一种全程分析

方法. 程小全^[5]等建立了复合材料层合板低速冲击后压缩的损伤累积模型. 林智育和许希武^[6]在试验研究的基础上, 建立了复合材料低速冲击后剩余强度估算的一种椭圆形弹性核模型. 文^[7]用 X 射线微观照片分析了三维机织复合材料低速冲击的破坏机理. 文^[8]分析了干态和湿态条件下机织复合材料板的低速冲击及其剩余压缩特性. 文^[9]用 X 射线断层摄影技术分析了层合复合材料冲击时的层间

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(11102055).

作者简介: 严 实(1977—), 男, 博士, 副教授, E-mail: yanshi@hrbust.edu.cn;

陆夏美(1963—), 女, 教授;

曾 涛(1967—), 男, 教授, 博士研究生导师.

破坏. 此外还有许多学者对低速冲击载荷作用下的复合材料结构进行了分析研究^[10-13].

声发射检测是一种动态检测方法, 即材料内部结构、缺陷或潜在缺陷处于运动变化过程中的检测. 由于复合材料组分和结构形式的多样性以及应力状态的不同, 其损伤机理和破坏模式也各不相同, 对此类材料的损伤描述也多采用不同的 AE 参数进行多参数综合分析^[14].

目前, 国内外研究者对声发射技术在材料损伤检测方面的应用作了大量工作, 涉及的材料几乎涵盖了所有工程材料. 文 [5] 对二维编织 SiC/SiC 复合材料进行了单向拉伸、卸载、再加载试验, 通过 AE 波形 FFT(快速傅里叶变换) 描述不同的损伤模式, 并探讨了损伤对材料弹性模量和声速的影响规律. 文 [6] 利用声发射事件数和波形特征对复合材料层合板拉伸损伤进行了实验研究, 利用声发射累积事件数和波形形态描述了损伤发展和不同类型的损伤. 文 [7] 对碳/环氧复合材料声发射信号进行了小波分析, 通过对比三点弯曲下不同损伤模式 AE 波形和 FFT 波形, 给出纤维断裂、基体开裂、界面分离、分层、界面摩擦损伤的 AE 参数特征. 文 [8-19] 针对三维编织 C/SiC 复合材料进行了实验研究, 得到了材料拉伸、压缩的主要力学性能参数, 并对材料的损伤演化及破坏规律进行了声发射参数分析和损伤模式识别. 文 [20] 论述了声发射技术在三维编织复合材料压缩过程中的应用及实验方法. 文 [21] 对陶瓷材料在两种压缩加载下破坏过程中的声发射特性进行了实验研究.

本文是基于工程应用背景, 将主要围绕如何应用声发射技术描述碳纤维复合材料层合板冲击及冲击后压缩损伤演化过程和破坏形式问题而展开. 通过声发射的能量、事件率、峰值频率和幅度等特征参数, 采用多参数历程图分析法, 并结合载荷-位移曲线, 从宏观角度描述了复合材料层合板冲击后压缩破坏的损伤发展过程, 揭示其损伤发展和演化规律. 通过对复合材料层合板冲击后压缩过程中声发射信号的频谱分析, 得出了不同类型损伤的频谱特性, 在微观上研究了复合材料层合板冲击后压缩损伤机理.

1 实验方法

试件为复合材料碳纤维层合板, 铺层方式为 $[5/0/1 - 45/90]_{2S}$, 试样标准尺寸为 $150\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 5\text{ mm}$. 低速冲击实验在 INSTRON 9250HV

实验机上进行, 该试验机具有抱死系统, 防止冲头二次冲击试件, 影响实验效果. 冲头直径 12.5 mm , 以 30 J 能量进行冲击. 并采用 PAC 公司 MISTRAS-2001 全数字式声发射系统, 用宽频(WD) 探头采集声发射信号, 探头频率范围为 $100 \sim 1\,000\text{ kHz}$, 增益设为 40 dB , 信号触发门阈值为 50 dB , 图 1 为冲击试验装置.



图1 层合板冲击装置

冲击后的试件在 INSTRON(3382) 电子拉伸机上进行冲击后剩余压缩强度的测试, 按 1 mm/min 加载速率连续加载至试样破坏. 记录试样测试过程和破坏情况. 图 2 为压缩试验装置.



图2 层合板压缩装置

2 试件断口细观形貌分析

图 3 为试件冲击后形貌, 可以观察到冲击凹坑周围出现明显的裂纹扩展.

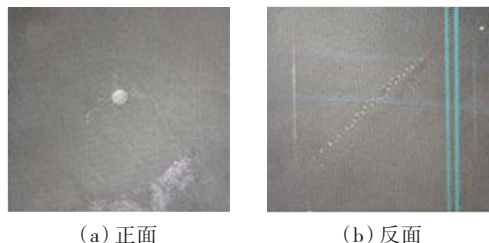


图3 试件低速冲击实验后

图 4 为试件压缩损伤图, 可以观察到试件出现

了大量脆性破坏—基体裂纹扩展以及大量的纤维束断裂. 试件已经失效, 无法继续正常使用.

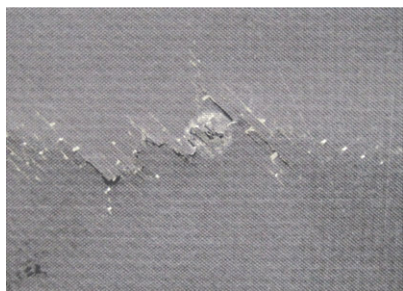


图4 试件剩余压缩强度测试破坏形貌

3 声发射信号分析

3.1 参数分析

由图 5(a)、(b) 可以看出能量峰点所对应的峰值频率在 30 ~ 40 kHz 时, 所对应的幅值在 95 ~ 100 dB 时, 说明冲击过程中最主要得破坏声发射信号为低频和高幅值信号. 损伤的主要方式为层合板凹陷 (凹陷处出现基体开裂和纤维束断裂).

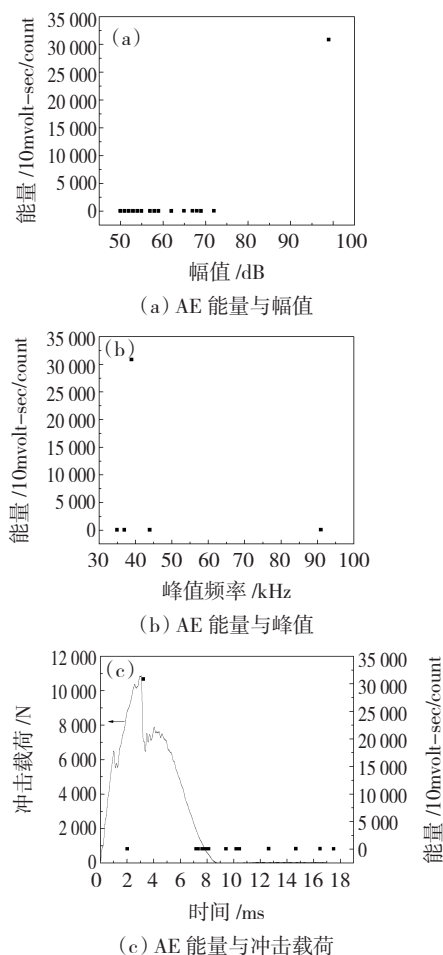


图5 试件低速冲击时 AE 能量分布图

由图 5(c) 可知, 当载荷值达到峰值点时, 出现高能点, 也可以说材料受到冲击载荷达到最大值时, 出现高能量的损伤.

根据累积声发射能量和事件率变化, 参照峰值频率和幅度的改变, 结合压缩试件的载荷—位移曲线以及破坏机理, 把复合材料层合板的剩余压缩损伤行为基本分为以下两个阶段 (如图 6 所示).

第一阶段 (损伤演化阶段): 此阶段 AE 累积能量随着载荷的增加逐渐上升, 这表明时间产生大量稳态发展的损伤, 其发展速度基本不变. AE 累积能量的小幅度波动说明了损伤发展的渐进性; AE 峰值频率和幅度参数变化基本稳定, 可以判定损伤类型基本相同. 这阶段的损伤主要是以基体裂纹扩展和纤维束/基体界面脱胶为主, 同时伴有纤维束剪切破坏和纤维束内纤维断裂. 此阶段声发射信号特征为低频率 (低于 100 kHz), 中幅值 (60 dB 左右)

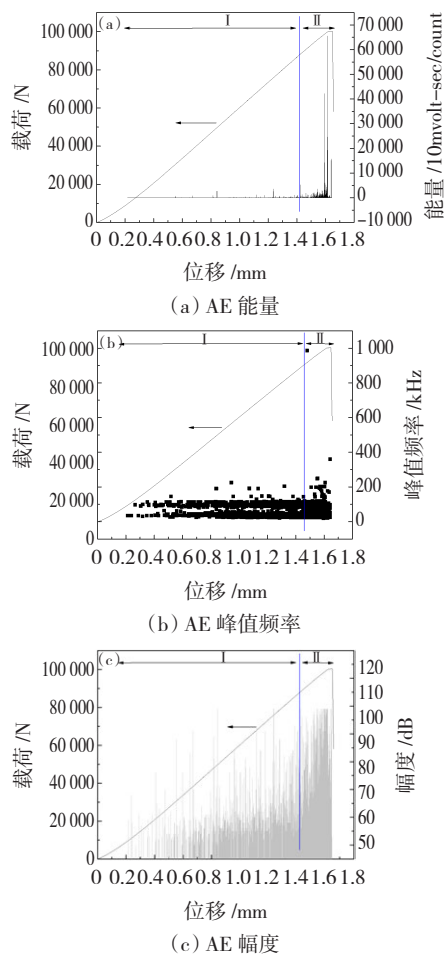


图6 试件压缩时载荷—位移曲线与相应的 AE 行为分布

第二阶段 (损伤破坏阶段): 此阶段 AE 累积能量急剧急剧升高, 说明是大能量损伤. 此时 AE 幅度主要分布在高幅度区域, 与高能量分布对应. 这个阶

段只出现一次 AE 能量的急剧突变, 压缩试件的载荷—位移曲线也表明试件的最终破坏形式是突发性的脆性断裂试件的断口比较齐平, 这说明纤维束不是被逐步压断, 而是几乎同时被压断的. 其主要原因在于: 对于压缩试件, 裂纹沿纤维束方向扩展的驱动力较小, 压缩载荷主要由纤维束承受. 纤维束压断与裂纹沿纤维束扩展的两种破坏模式相比, 试件以纤维束压断为主要的破坏模式, 最终导致试件失效, 此时的声发射信号特征是大量的低频率(100 ~ 150 kHz 左右), 高幅值(大于 80 dB) 信号出现. 其中伴有一些少量的高频(150 ~ 400 kHz) 高幅值(大于 80 dB) 信号出现, 主要是由于试件内纤维束之间相互摩擦所引起的.

3.2 频谱分析

声发射的波形包含了损伤事件的全部信息, 因此放大高能量点的波形图并通过快速傅里叶变换 (FFT) 得到的频谱图, 我们可以更直接的得到试件损伤的主要方式. 图 7、8 为高能量点的波形图及通过快速傅里叶变换 (FFT) 的频谱特性曲线.

图 7 为试件低速冲击测试中最高能量的频谱特性曲线, 可以看出最高能量的峰值频率在 30 kHz 左右, 幅值较大, 和声发射特征参数以及时间载荷位移曲线所对应, 即试件受冲击时导致层合板凹陷, 使凹陷处产生大量的基体开裂和纤维断裂.

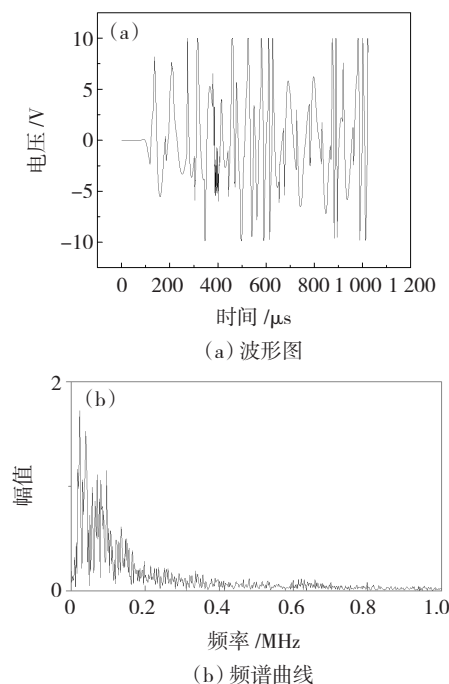


图 7 试件低速冲击声发射特性

图 8 的信号是试件剩余压缩行为最后阶段(释放出最大能量时候) 所采集到的. 从图中可以看出,

FFT 的实部参数主要集中在低频区域, 幅值很大, 峰值频率在 100 kHz 左右, 幅频变化范围较窄, 与上述的声发射特征参数信号一致, 主要是由纤维束断裂引起的, 这是材料的脆性断裂特征引起的. 声发射信号的能量与材料损伤试件产生的缺陷尺寸有关. 当裂纹(基体裂纹为主) 由稳定扩展进入失稳扩展(大量的基体断裂和纤维束断裂), 释放的应变能足够大时, 可以听到材料断裂爆音(高能量低频率信号).

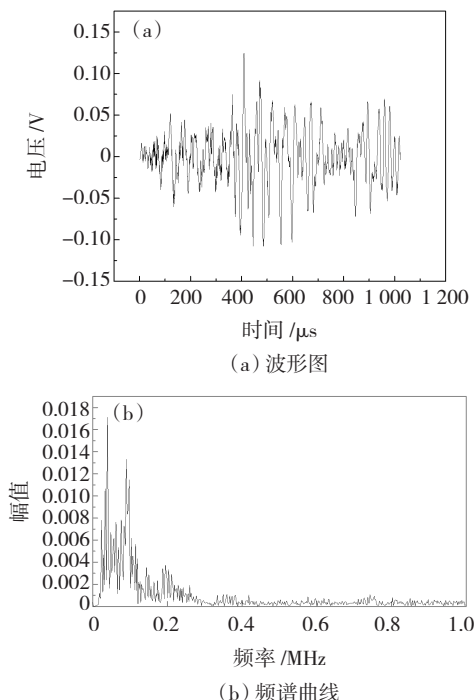


图 8 试件剩余压缩行为声发射特性

4 结 论

复合材料层合板低速冲击过程中最主要得损伤方式为层合板凹坑, 凹坑处有大量的基体裂纹和纤维束断裂. 其主要声发射特征为高能量、高幅值、低频率. 冲击后压缩实验过程损伤可大体分为两个阶段: 损伤演化阶段和损伤破坏阶段. 损伤演化阶段的主要损伤方式为低能量的基体裂纹扩展和纤维束/基体界面脱胶为主, 同时伴有纤维束剪切破坏和纤维束内纤维断裂. 声发射信号特征为低频率, 中幅值. 损伤破坏阶段的主要损伤方式为试件以高能量的纤维束压断为主要破坏模式, 最终导致试件失效, 此时的声发射信号特征是低频率, 高幅值.

声发射频谱特性曲线所表现出的最高能量点损伤特性和声发射 AE 参数特征所表现出的损伤特征一致, 可用于实验过程中破坏模式的识别及材料损伤演化过程的研究. 声发射技术对复合材料损伤表

征和安全性、完整性评价非常有效.

参 考 文 献:

- [1] 燕琰, 曾东. 复合材料层板低速冲击剩余强度的研究 [J]. 航空学报, 2003, 24(2): 137-139.
- [2] 陈浩然, 刘远东. 动荷载作用下含损伤复合材料层板承载能力 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 115-119.
- [3] 崔海坡, 温卫东, 崔海涛. 复合材料层板的低能冲击损伤及剩余拉伸强度研究 [J]. 宇航学报, 2005, 26(6): 784-788.
- [4] 崔海坡, 温卫东, 崔海涛. 层合复合材料板的低速冲击损伤及剩余压缩强度研究 [J]. 机械科学与技术, 2006, 25(9): 1013-1017.
- [5] 程小全, 酆正能. 复合材料层板低速冲击后压缩的损伤累积模型 [J]. 应用数学和力学, 2005, 26(5): 569-576.
- [6] 林智育, 许希武. 复合材料层板低速冲击后剩余压缩强度 [J]. 复合材料学报, 2008, 25(1): 140-146.
- [7] SELTZER R, GONZALERA C, MUNOZA R, et al. X-ray Microtomography Analysis of the Damage Micromechanisms in 3D Woven Composites Under Low-velocity Impact [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013, 45: 49-60.
- [8] MICHAEL D, BETIANA A, LEIF A. Low Velocity Impact and Compression After Impact Characterization of Woven Carbon/vinylester at Dry and Water Saturated Conditions [J]. Composite Structures, 2012, 94(5): 1582-1589.
- [9] SINAN F, TAMER S, EGEMEN A. Internal Damage Investigation of the Impacted Glass/glass + aramid Fiber Reinforced Composites by Micro-computerized Tomography [J]. NDT & E International, 2012, 51: 1-7.
- [10] MARINO Q, MAURO R, LIVIO M, et al. Energy Absorption in Composite Laminates Under Impact Loading [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 44, (1): 133-140.
- [11] MAJEED A M, YIGIT A S, CHRISTOFOROU A P. Elastoplastic Contact/impact of Rigidly Supported Composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 1244-1251.
- [12] BOUVET C, RIVALLANT S, BARRAU J J. Low Velocity Impact Modeling in Composite Laminates Capturing Permanent Indentation [J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(16): 1977-1988.
- [13] SHI Y, SWAIT T, SOUTIS C. Modelling Damage Evolution in Composite Laminates Subjected to Low Velocity Impact [J]. Composite Structures, 2012, 94(9): 2902-2913.
- [14] 张凤林, 韩维, 胡国才, 等. 声发射技术在航空领域的应用研究 [J]. 无损检测, 2004, 22(4): 157-161.
- [15] MORSECHER G N. Modal Acoustic Emission of Damage Accumulation in a Woven SiC/SiC Composite [J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(5): 687-697.
- [16] JOHNSON M, GUDMUNDSON P. Experimental and Theoretical Characterization of Acoustic Emission Transients in Composite Laminates [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(10): 1367-1378.
- [17] 王健, 金周庚, 刘哲军. C/E 复合材料声发射信号小波分析及人工神经网络模式识别 [J]. 宇航材料工艺, 2001, (1): 49-57.
- [18] 王波, 矫桂琼, 等. 三维编织 C/SiC 复合材料的拉压实验研究 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(3): 110-114.
- [19] 常岩军, 矫桂琼, 张克实, 等. 3D C/SiC 复合材料拉伸性能的声发射研究 [J]. 复合材料学报, 2010, 27(6): 82-87.
- [20] 万振凯, 李静东. 三维编织复合材料压缩损伤声发射特征分析 [J]. 纺织学报, 2006, 27(2): 20-24.
- [21] 任会兰, 方敏杰, 贺建华. 压缩载荷下陶瓷材料声发射特性的实验研究 [J]. 材料工程, 2012, (2): 30-34.

(编辑: 王 萍)