

文章编号:1001-4888(2018)06-0949-08

## 复合材料冲击损伤非线性振动 声调制检测技术的试验研究\*

肖佳辰<sup>1</sup>, 陈果<sup>1</sup>, 卢超<sup>1,3</sup>, 何双起<sup>2</sup>, 陈颖<sup>2</sup>

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西南昌 330063; 2. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076;  
3. 上饶师范学院, 江西上饶 334001)

**摘要:** 复合材料因其优良性能在航空航天领域应用广泛,但其受低速冲击后强度与结构完整性会严重下降。非线性振动声调制技术作为一种检测范围广、检测精度高的无损检测新技术,能对结构中的接触缺陷进行有效检测。本文制作了含冲击损伤试样,通过选取合适的高频超声激励频率,分别在不同的低频振动幅值及模态频率下对含冲击损伤复合材料进行检测。研究结果表明,非线性振动声调制技术能对含冲击缺陷试样与参考试样进行有效区分,调制系数与低频激励幅值呈近似线性关系。检测时需选取合适的频率及幅值。缺陷处振动不剧烈且低频激励幅值较小时,较小冲击能量损伤试样与参考试样不易区分;缺陷处振动剧烈时,输入较低的低频幅值即可较易分辨参考试样与损伤试样。

**关键词:** 非线性超声; 振动声调制; 复合材料; 冲击损伤

**中图分类号:** TG115.28      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-157

### 0 引言

复合材料因其密度低、比强度高、优越性能被广泛应用于航空航天领域,在实际工程应用和服役过程中,意外冲击及飞机飞行过程中受到外部飞行物撞击时,会产生分层、纤维断裂等基体内部损伤,会极大地降低复合材料的剩余强度与结构完整性<sup>[1]</sup>。而由于冲击速度较小及复合材料吸能的特点,这种损伤在复合材料表面目视几乎并不明显,但其内部损伤可能已经超过设计的损伤容限,这种损伤被称为几乎不可见的冲击损伤<sup>[2,3]</sup>(Barely Visible Impact Damage)。如何对目视不可见的冲击损伤进行有效检测,近年来受到无损检测领域的广泛关注。

振动声调制技术(Vibro-Acoustic Modulation)是一种对微小缺陷有着较强灵敏度的非线性超声无损检测技术,通过同时向被检结构输入大振幅低频信号(通常来自冲击力锤、激振器、叠堆式压电陶瓷等)与高频超声信号(通常来自压电晶片),并使用压电晶片或激光测振仪对信号进行采集。若试样中存在缺陷,低频振动会使缺陷的接触状况发生改变并调制高频超声信号,通过分析调制边频与主频的比例来判断结构是否存在缺陷。此方法不受待测结构形状限制,且具有设备要求低、检测速度快、检测灵敏度高于常规超声检测等优点,为复杂结构及大型结构的远端的检测提供了新思路<sup>[4-7]</sup>。基于以上特点,将非线性振动声调制检测技术应用于复合材料的低速冲击损伤检测,具有重要的研究意义。

非线性振动声调制技术需在试样的模态频率处进行低频激励才会产生较强的调制效应,故频率的

\* 收稿日期: 2017-08-04; 修回日期: 2017-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(11374134), 航天科技创新基金(BA201408258), 南昌航空大学研究生创新专项资金项目(YC2016049)

通讯作者: 卢超(1971-), 男, 博士, 教授。主要从事固体声学及超声检测研究工作。Email: luchao@163.com

选取会对检测结果产生较大影响。本文将非线性振动声调制技术用于复合材料冲击损伤缺陷的检测,通过合理选取高频超声激励频率,分析了不同振动模态及激励电压对振动声调制的影响。结果表明,该方法能对复合材料中低速冲击损伤缺陷进行有效评价。

## 1 非线性振动声调制检测原理

非线性振动声调制技术向结构输入两种不同频率的连续正弦信号,即低频振动信号与高频超声信号。当结构完整时,接收信号的频谱仅有两列输入信号成分;当结构中存在缺陷时,施加低频振动会使结构中缺陷的接触界面反复闭合,使低频振动与高频超声产生调制效应,接收信号中会产生调制边频和高次谐波等其他成分。通过观察接收信号的频谱成分,即可判断结构中是否存在缺陷<sup>[8-10]</sup>,非线性振动声调制检测原理如图1所示。调制效应产生的调制边频频率为:

$$f_m = f_0 \pm n f_1 \quad (1)$$

式中,  $f_m$  为  $n$  阶调制边频 ( $n=1, 2, \dots, n$ );  $f_0$  为高频超声频率;  $f_1$  为低频振动频率。

由振动声调制原理可知,当结构中存在缺陷时,低频振动与高频超声信号会相互作用产生调制边频,调制边频的阶数与幅值取决于调制强度及结构的损伤程度,接收信号频谱示意图如图3所示。研究表明,仅选取一次调制边频之和与主频的比值作为调制系数更易分辨缺陷<sup>[11]</sup>,调制系数 MI 定义如下:

$$MI = \frac{A_1 + A_2}{A_0} \quad (2)$$

式中,  $A_1$ 、 $A_2$  为接收信号一次调制边频幅值;  $A_0$  为高频超声信号幅值。

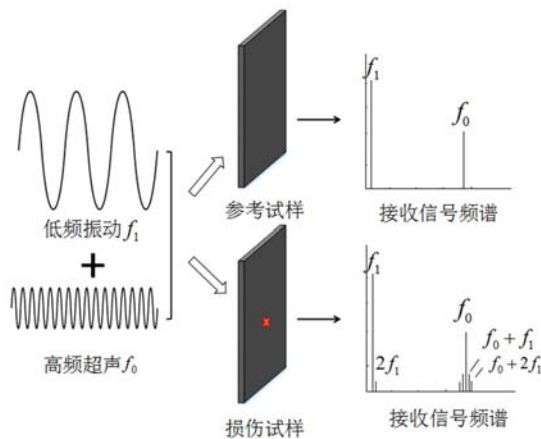


图1 非线性振动声调制原理图

Fig. 1 The principle of nonlinear vibro-acoustic modulation technique

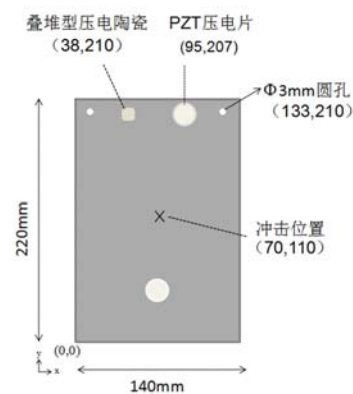


图2 试样尺寸示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of specimen size(unit:mm)

## 2 试样制备及信号选取

### 2.1 试样制作

取切割自同一母板、尺寸为  $220 \times 140 \times 1.6 \text{ mm}^3$  的碳纤维复合材料层板三块,铺层顺序为  $[90^\circ/0^\circ/45^\circ/-45^\circ]$ ,在其上端钻两个直径 3mm 的圆孔以便悬挂,取复合材料层板左下角为原点,试样尺寸及各点位置信息如图2所示。试样冲击前,对其进行水浸超声 C 扫描检测,以确保试样不存在初始缺陷。本文采用空气压缩动力的冲击损伤制备方法,使用直径为 16mm 的钢制半球形冲击弹头对其中两块复合材料几何中心位置进行低速冲击损伤,冲击能量分别为 7.03J、13.9J。冲击后对试样表面进行观察,冲击能量为 13.9J 试样背面出现了细小的微裂纹,冲击能量为 7.03J 试样表面无明显变化,目视无法判断其存在损伤,即产生了几乎不可见的冲击损伤(BVID)。冲击后再次使用超声水浸 C 扫描对各试样进行检测,超声 C 扫描探头中心频率为 10MHz,扫描结果如图4所示。

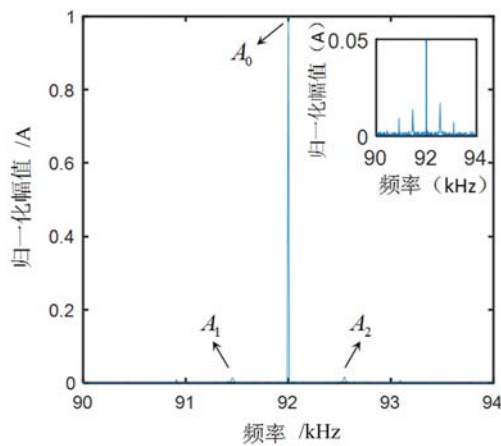


图 3 接收信号频谱图示意图

Fig. 3 Schematic diagram of frequency spectrum of received signal

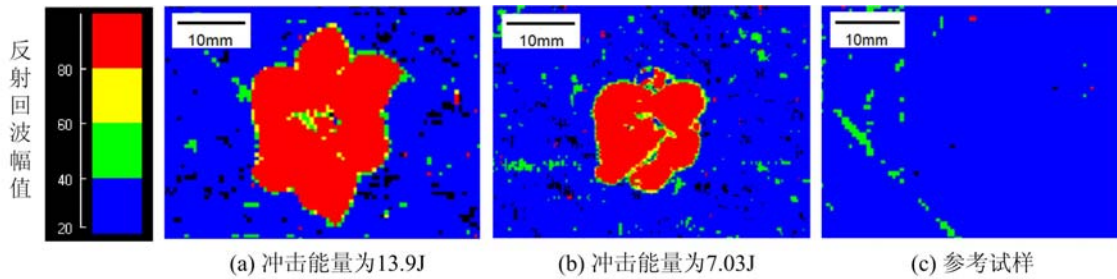


图 4 超声 C 扫描检测结果

Fig. 4 Image of specimens by ultrasonic C-scan

### 2.2 低频振动信号选取

振动声调制的频率选择对试验结果有较大影响,合理选择高频超声与低频振动频率可以获得最佳调制效应,但因试样制作误差、缺陷改变固有频率等因素,各试样的固有频率各不相同。若使用相同频率激励无法使所有试样产生最大调制效应,不利于试验结果分析。首先对试样固有频率进行分析,使用安捷伦 33220A 信号发生器产生扫频信号加载到叠堆压电陶瓷,扫频范围为 1~1500Hz,扫频时间为 2s,激励电压为 75V<sub>pp</sub>,采样频率为 20kHz,采样长度为 50kpts,使用粘接在试样上的压电晶片接收响应信号,对数据进行处理即可获得其频响曲线。

通过叠层式压电晶片进行扫频试验仅可获得试样的固有频率,但无法得到其振型。因此,分别对三块复合材料层板进行动力响应试验。首先,将复合材料板进行网格划分,均匀划分 96 个测点并对节点进行编号,通过悬挂试样以模拟自由边界条件,使用逐点激励单点测试方法进行模态试验<sup>[12]</sup>。使用带有力传感器的力锤逐次敲击复合板上的各激励点,使用两个不同测量位置的 INV9206 声压传感器采样信号后传输到 INV3062-C2 信号采集仪,设定采样频率为 5120Hz,采样点数为 1024,平均采样次数为 3 次(即每个点进行 3 次有效敲击),测试结束后将数据导入,通过 DASP V11 动态测试分析软件得到各复合材料层板的模态振型,试验示意图如图 5 所示。通过 DASP V11 软件分别获得三块复合材料层板振型,三块试样的实测振型均一致。表 1 给出了不同

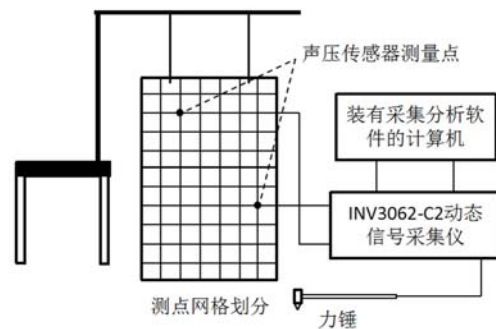


图 5 复合材料层板模态试验系统

Fig. 5 Modal test experimental setup for laminates

激励方式下测得的试样固有频率,分析可知两种方式测试结果接近,即叠堆式压电陶瓷有较高精度,可以作为低频激励器件。叠层式压电晶片激励前三阶模态及低频激励频率与复合材料层板固有频率有较大偏差时,频率响应较小,产生的振动较弱,无法产生较强的调制效应。由于结构的低阶模态更易被激励,一般选取结构的低阶模态激励。为产生较强的调制效应,并综合考虑复合材料层板振型,对比不同振型对检测结果的影响,本文选取复合材料层板第4、5阶模态频率作为低频激励,对应模态振型如图6所示。

表1 不同激励方式下复合材料层板固有频率

Tab.1 Composite laminates natural frequencies under different excitation methods

模态阶次	冲击能量试样 13.9J 模态频率/Hz		冲击能量 7.03J 试样模态频率/Hz		参考试样模态频率/Hz	
	压电片	力锤	压电片	力锤	压电片	力锤
4	439	439	438	438	451	451
5	545	546	542	542	545	546

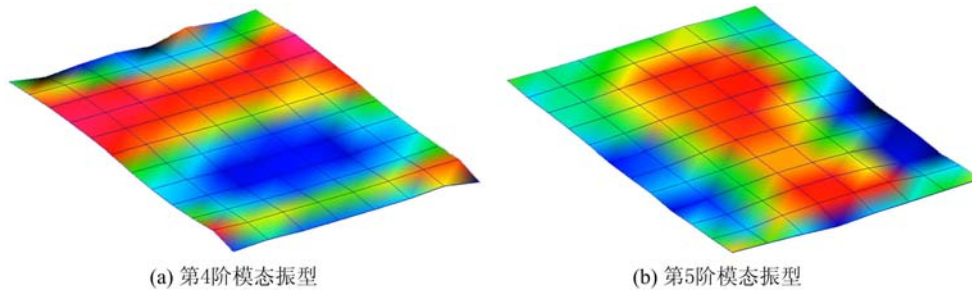


图6 复合材料层板模态振型

Fig.6 Mode shapes of composite laminates

### 2.3 高频超声信号选取

非线性振动声调制试验通常选取低于100kHz的频率作为超声激励频率。因各压电晶片响应存在差异,较小的频率差异会引起较大的频率响应变化,使用相同超声频率激励时各试样的频率响应可能不同。为选取合适的超声激励频率,使用Tiepie Handyscope HS5多功能测试仪产生50~100kHz的扫频信号,扫频时间为0.5s,采样长度为500Kpts,扫频后得到各试样的高频超声频响曲线。由扫频结果可知压电晶片在90~100kHz有较良好响应,故在90~100kHz选取幅值相差5%以内、且频率相差1kHz以内的超声频率作为高频超声激励,相应参数选取如表2所示。选取相同超声激励频率时,各试样的接收信号幅值可能存在较大差异。为对比特定选取、幅值接近的超声频率与选取相同超声频率激励时对试验结果的影响,选取与特定频率相近的91kHz作为任意选取超声频率。

表2 试验频率选择

Tab.2 Frequency selection for experimental

试样类型	第4阶模态频率/Hz	第5阶模态频率/Hz	超声频率/Hz
参考试样	451	545	91380
冲击能量为7.03J	438	542	92050
冲击能量为13.9J	439	545	91950

## 3 试验方法与结果分析

在非线性振动声调制检测中,需在试件激励高频超声信号与低频振动信号。本文使用PZT压电晶片作为高频超声激励与接收换能器,压电晶片直径为15mm,厚度为4mm。振动声调制试样常使用激振器作为低频激励装置,但需要对试样进行固定且激励位置受限,采用叠堆式压电陶瓷作为低频激励具有位置选择灵活、安装简单等优点。本文使用NAC2014叠堆压电陶瓷激励低频振动,尺寸为7×7×





样因频率响应与其他两个试样差异较大,各阶振动模态调制系数均远低于其他试样。故使用任意选取相同频率超声频率因接收幅值相差较大,得到的试验结果易造成误判,无法有效区分损伤试样和参考试样。

图 9 为特定选取超声频率时不同模态频率激励下各试样调制系数随电压增长的检测结果。由图 9 (a)可知,冲击能量为 13.9J 试样的调制系数随电压增加急剧增长,而冲击能量为 7.03J 试样、参考试样在低频振动激励电压较小时,调制系数相差并不明显,在低频电压大于 50V<sub>pp</sub> 后,冲击能量为 7.09J 试样调制系数开始大于参考试样;从图 9(b)可以看出,冲击能量为 13.9J 试样调制系数仍随电压增大迅速增长,冲击能量为 7.09J 的试样调制系数也迅速上升,并高于参考试样。比较图 9(a)和(b)可知,因冲击能量为 13.9J 试样存在微小裂纹,而非线性振动声调制对裂纹极为敏感,且其损伤面积较大,在两阶振动模态下损伤区域均受到较强振动,因此调制系数随电压增加而急剧上升。由图 6 可知,复合材料层板在第 4 阶振动模态时受损伤区域仅有部分振动,因此冲击能量为 7.09J 试样在电压较低时其调制系数与参考试样相差不大,当电压增加到一定程度后,缺陷使低频振动与高频超声相互作用,调制系数开始高于参考试样;而第 5 阶振动模态时中心位置振动较强,随低频激励电压增加含缺陷试样调制系数均远高于参考试样。因参考试样内部微小缺陷、材料固有非线性以及试验系统引入的非线性,参考试样调制系数也随电压增加,但增长缓慢。

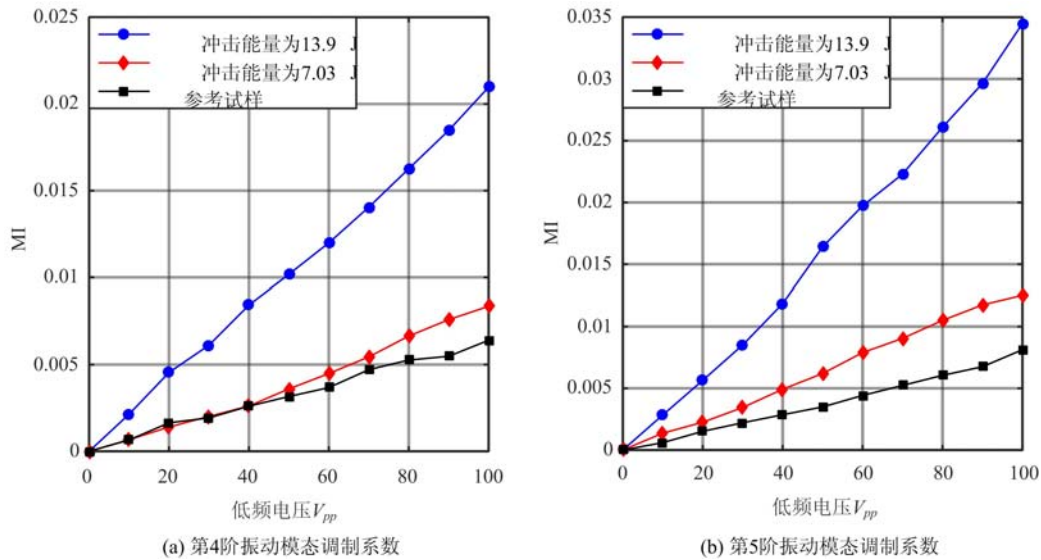


图 9 特定频率时各试样的调制系数

Fig.9 Modulation indicators of each specimen at particular frequency

综上所述,高频超声频率和低频振动频率均会对试验结果产生较大影响,在合理选取超声频率、振动模态且低频激励电压较大时,损伤试样的调制系数远大于参考试样,非线性振动声调制方法能够较易分辨试样是否存在缺陷。

为明确各试样调制系数随电压的增长速率,对特定激励超声频率的各阶模态调制系数曲线进行一元线性回归分析,即根据若干实测点确定调制系数  $y$  与低频电压  $x$  的关系,回归函数记为

$$y = a + bx \tag{3}$$

称为  $y$  对  $x$  的线性回归,其中  $a, b$  统称为回归系数。通过计算各曲线的判定系数  $R^2$  来检验两者的线性关系,判定系数  $R^2$  接近 1 时回归方程显著<sup>[13]</sup>,相关系数  $R$  定义为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \tag{4}$$

计算结果如表 3 所示,可以发现各阶模态下调制系数均随低频激励电压呈近似线性增长,而含缺陷

试样增大速率要大于参考试样。因此,在试验频率选取合理时通过调制系数增长速率可对试样是否存在损伤及其大小做出初步估计。

表3 各试样判定系数

Tab.3 Coefficient of determination for different specimens

试样类型	第4阶模态判定系数	第5阶模态判定系数
参考试样	0.9935	0.9946
冲击能量为7.03J	0.9910	0.9972
冲击能量为13.9J	0.9985	0.9963

## 4 结论

本文使用非线性振动声调制技术对含冲击损伤复合材料层板进行检测,对激励信号的合理选取进行了相应研究,主要结论如下:

(1) 非线性振动声调制技术通过高频超声与低频振动在结构中的相互作用,会产生调制边频,通过调制系数MI判断调制效应的大小以判断试样是否存在缺陷。通过合理选取激励频率与幅值,此技术能够有效判别复合材料中是否存在冲击损伤缺陷,且与超声C扫描结果趋势一致。

(2) 试样的调制系数随电压呈近似线性增长趋势,不同振动模态下产生的调制效应各不相同,合理选取超声频率及振动模态将有利于区分缺陷,文中选择特定超声频率、第5阶振动模态及较小的低频激励幅值(大于20V<sub>pp</sub>)即可较易分辨缺陷试样。

(3) 材料自身及试验系统引入的非线性会对试验结果产生影响,如何将其影响降至最小以及如何对各层板间的损伤大小进行检测与定量分析值得进一步探讨与研究。

### 参考文献:

- [1] 朱炜焱, 许希武. 含低速冲击损伤复合材料层合板剩余压缩强度及疲劳性能试验研究[J]. 复合材料学报, 2012, 29(5):171-178 (ZHU Weiyao, XU Xiwu. Experiment research on residual compressive strength and fatigue performance of composite laminates with low velocity impact damage[J]. ACTA Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(5):171-178 (in Chinese))
- [2] 刘松平, 刘菲菲, 史俊伟, 等. 复合材料冲击损伤高分辨率超声成像检测与损伤行为分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22):16-23 (LIU Songping, LIU Feifei, SHI Junwei, et al. High-resolution ultrasonic imaging evaluation and behavior analysis of impact damages in composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22):16-23 (in Chinese))
- [3] 刘畅, 岳珠峰, 耿小亮, 等. PMI复合材料泡沫夹层结构小能量冲击后回弹规律研究[J]. 实验力学, 2015, 30(6):757-767 (LIU Chang, YUE Zhufeng, GENG Xiaoliang, et al. On the rebound regularity of PMI foam core composite structure subjected to low energy impact[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6):757-767 (in Chinese))
- [4] 刘斌, 刚铁, 万楚豪, 等. 金属杆内疲劳裂纹与振动/超声相互作用及其定量表征[J]. 声学学报, 2016, 41(4):507-514 (LIU Bin, GANG Tie, WAN Chuhao, et al. Interaction of fatigue crack with vibration and ultrasound in metallic rod and its use for quantitative characterization[J]. ACTA Acustica, 2016, 41(4):507-514 (in Chinese))
- [5] Klepka A, Staszewski W J, Uhl T, et al. Impact damage detection in composite chiral sandwich panels[J]. Key Engineering Materials, 2012, 518(518):160-167.
- [6] Donskoy D, Sutin A, Ekimov A. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing[J]. NDT & E International, 2001, 34(4):231-238.
- [7] 卢超, 李诚, 常俊杰. 钢轨轨底垂直振动模式导波检测技术的实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(5):593-600 (LU Chao, LI Cheng, CHANG Junjie. Experimental investigation on guided waves detection technology for rail bottom vertical vibration mode[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(5):593-600 (in Chinese))

- [8] Duffour P, Morbidini M, Cawley P. A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, 119(3):1463.
- [9] Pieczonka L, Klepka A, Uhl T, et al. Damage imaging in nonlinear vibro-acoustic modulation tests[C]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2015:9438.
- [10] Parsons Z, Staszewski W J. Nonlinear acoustics with low-profile piezoceramic excitation for crack detection in metallic structures[J]. Smart Materials & Structures, 2006, 15(4):1110.
- [11] Pieczonka L, Klepka A, Staszewski W J. Nonlinear vibroacoustic wave modulations for structural damage detection: an overview[J]. Optical Engineering, 2016, 55(1):011005.
- [12] 漆文凯, 程博, 刘磊. 复合材料层合板的振动模态试验研究[J]. 航空发动机, 2013, 39(6):53—58 (QI Wenkai, CHENG Bo, LIU Lei. Research of vibration modal experiment for composite laminates[J]. Aeroengine, 2013, 39(6):53—58 (in Chinese))
- [13] 庄楚强, 何春雄. 应用数理统计基础[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2005:179—192 (ZHUANG Chuqiang, HE Chunhui. Applied mathematical statistics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2005:179—192 (in Chinese))

## Experimental investigation on nonlinear vibro-acoustic modulation detection technique for impact damage of composite materials

XIAO Jia-chen<sup>1</sup>, CHEN Guo<sup>1</sup>, LU Chao<sup>1,3</sup>, HE Shuang-qi<sup>2</sup>, CHEN Ying<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China; 3. Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China)

**Abstract:** Composite material is widely used in aerospace due to its excellent properties, but its strength and structural integrity will decrease seriously after subjected to low speed impact. As a new nondestructive testing technique with wide detection range and high detection precision, nonlinear vibration acoustic modulation technique can effectively detect the contact defects in structure. In this paper, samples with impact damage were prepared firstly. By selecting appropriate high frequency ultrasonic excitation frequency, composite samples with impacted damage were tested under different low frequency vibration amplitudes and modal frequencies respectively. Experimental results show that nonlinear vibration acoustic modulation technique can effectively distinguish the impact specimen from the reference specimen. The modulation coefficient is approximately linear with the low frequency excitation amplitude. The proper frequency and amplitude should be selected in testing. When the vibration at the defect is not severe and the amplitude of the low frequency excitation is small, the smaller impact energy damage specimen is not easily distinguishable from the reference specimen. When the vibration of the defect is severe, the reference specimen and damage specimen can be easily distinguished by input lower frequency amplitude.

**Keywords:** nonlinear ultrasonic; vibro-acoustic modulation; composites; impact damage