

引文格式: 王容, 吴奇, 熊克, 等. 复合材料基体裂纹光纤光栅非线性超声 Lamb 波检测试验研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(21): 51-56.
WANG Rong, WU Qi, XIONG Ke, et al. Evaluation of composite matrix crack using nonlinear ultrasonic Lamb wave detected by fiber Bragg grating[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(21): 51-56.

复合材料基体裂纹光纤光栅非线性 超声 Lamb 波检测试验研究*

王容^{1,2}, 吴奇², 熊克², 张含琦²

(1. 南京工业职业技术大学, 南京 210023;

2. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

[摘要] 针对复合材料基体裂纹引起的超声非线性问题, 研究了一种具有比例-积分-微分反馈控制的高灵敏度、大带宽相移光纤光栅超声检测系统。利用相移光栅系统检测在复合材料中传播的超声 Lamb 波信号, 对 Lamb 波进行数据处理, 分离出了频率为 2.0MHz 的二次谐波成分。结果表明, 随着裂纹个数的增加, 相对非线性参数线性增长, 且相比压电传感器检测结果, 相移光栅检测的相对非线性参数具有更高的增长速率。提出的相移光纤光栅传感系统可应用于复合材料的基体裂纹损伤评估, 且具有很高的可靠性。

关键词: 相移光纤光栅; 碳纤维增强复合材料; 非线性超声; Lamb 波; 基体裂纹

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.21.051



王容

讲师, 博士, 研究方向为非线性超声微损伤检测和光纤光栅超声传感。

目前, 碳纤维增强复合材料 (Carbon fiber reinforced plastic, CFRP) 广泛应用于航空航天领域, 因此 CFRP 的早期损伤检测显得尤为重要。超声检测作为比较常用的一种无损检测技术, 具有灵敏度高、检测范围广等优点, 可用于 CFRP 损伤的评估。其中, 超声传感器的选择是非常重要的环节, 特别是针对 CFRP 的微小损伤, 需要超声传感器具有较高的灵敏度。压电陶瓷 (Lead zirconate titanate, PZT) 是应用比较广泛的一种超声传感器。然而, PZT 传感器存在易受电磁干扰、不耐腐蚀、体积大、重量重等缺点, 难以用于恶劣工作环境的航空航天领域中。因此, 研究者提出利用抗电磁干扰的光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg

grating, FBG) 代替传统 PZT 传感器^[1]。光纤光栅传感器具有体积小、重量轻、适应恶劣环境等优点, 可以检测材料中传播的超声波^[2]。

然而, 传统的 FBG 传感器灵敏度较低, 可检测带宽有限, 不能有效检测 CFRP 中传播的微弱超声信号。因此, 为了提高光纤光栅的传感性能, 引入相移光纤光栅 (Phase-shifted fiber Bragg grating, PSFBG) 以提高超声检测灵敏度和带宽^[3]。例如, Wu 等^[4]提出了一种高灵敏度、大带宽的 PSFBG 平衡传感系统, 系统的带宽可达 5MHz。Yu 等^[5]利用 PSFBG 传感系统成功检测了 CFRP 中传播的声发射信号。Hudson 等^[6]设计了一种基于 PSFBG 的实时在线监测系统,

* 基金项目: 国家自然科学基金 (11972016); 机械结构力学与控制国家重点实验室课题 (MCMS-I-0521G04, MCMS-E-0519K01)。

结果表明该系统可以检测 CFRP 中传播的超声信号。这些研究均表明, PSFBG 在 CFRP 中具有良好的超声检测性能。

在传统的超声无损检测方法中, 非线性超声检测因其对微损伤^[7]的高敏感性引起了研究者的关注。非线性超声检测方法主要包括高次谐波、波形调制和频率偏移 3 种方法^[8-10]。超声波在微损伤材料中传播时与损伤相互影响, 产生呼吸作用, 形成高次谐波, 是比较常见的一种超声非线性现象。例如, Hong 等^[11]建立了呼吸模型和试验, 采用高次谐波法检测金属板的疲劳裂纹, 结果表明非线性参数与超声波传播距离和传感角度有关。Polimeno 等^[12]基于二次谐波技术成功检测出复合材料中几乎不可见的冲击损伤。Andreades 等^[13]通过非线性超声试验和仿真检测复合材料中的分层损伤, 结果表明非线性参数与分层损伤的大小成正比。虽然这些研究证明非线性超声检测可以用于复合材料的微损伤, 但都是利用 PZT 传感器实现非线性超声探测。基于光纤传感器的 CFRP 非线性超声检测尚未见报道。

因此, 本研究使用高灵敏度的 PSFBG 超声系统来检测 CFRP 板中的基体裂纹, 并与 PZT 传感器进行比较。通过对测得的 Lamb 波信号进行数据处理, 从而计算非线性参数, 研究非线性参数与裂纹个数之间的规律。本研究使用 PSFBG 传感系统实现了基体裂纹的非线性超声探伤, 为 CFRP 微损伤的探测提供一个可靠的技术手段。

PSFBG 传感器非线性超声检测

1 PSFBG 传感系统

试验选用的 PSFBG 传感器中光栅直径为 125 μm , 栅区长度为 5mm。图 1 为由激光扫描系统(Agilent B164A)测得的 PSFBG 反射光谱,

光谱插图红色区域为 PSFBG 线性传感区域。PSFBG 线性区域斜率很大, 约为 71.6/nm。研究表明, PSFBG 光谱陡峭的线性区域可以提高超声检测的灵敏度^[14]。由文献[15]可知, PSFBG 可视为两个均匀光纤光栅和相移区构成的法布里-珀罗腔结构, 它将光限制在光栅中心附近, 因此减小了 PSFBG 有效栅区长度。沿光栅长度方向的光功率可表达为:

$$|u(z)| \approx \sqrt{1-|R|^2} e^{\frac{\kappa L}{2} - \kappa|z-L/2|} \quad (1)$$

其中, $z \in (0, L)$ 为沿栅区长度的坐标, L 为栅区长度; κ 为耦合系数; R 为光栅反射率。试验选取的 PSFBG 调制深度为 $5.7e^{-4}$, 对应光功率分布的半高全宽长度约为 1.2mm, 即为 PSFBG 有效栅区长度。短有效栅长的 PSFBG 可以提高应变测量的空间分辨率^[16], 从而检测具有较小波长的超声信号, 即扩大了超声检测的带宽。

PSFBG 超声传感系统结构如图 2 所示, 用于检测 CFRP 板中传播的

Lamb 波。本系统利用一个环形器连接可调谐激光器(Agilent, N7711A)和 PSFBG 传感器, 并将 PSFBG 的反射光和透射光输入到平衡光电探测器(New Focus, 2117)中, 通过数据采集设备将平衡光电探测器的输出电压数字化。此时, 激光波长应锁定在 PSFBG 光谱波峰的 3dB 位置。由于温度和湿度的变化会导致 PSFBG 波长发生偏移, 影响超声检测的灵敏度, 因此在试验中引入比例-积分-微分(Proportional-integral-derivative, PID)反馈控制将激光波长锁定在光谱波峰 3dB 位置处, 消除外界环境的影响。

2 非线性超声检测原理

当超声波通过健康 CFRP 板时, 板中只存在固有的材料非线性 β_M 和几何非线性 β_G 。在含有基体裂纹的板中, 非线性还包括基体裂纹与超声波相互作用引起的接触声非线性 β_{CAN} 。考虑试验设备引起的非线性 β_E , 总的非线性 β 可表示为:

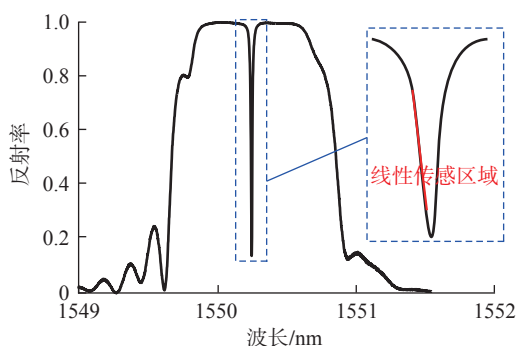


图 1 PSFBG 反射光谱

Fig.1 Typical reflection spectrum of PSFBG sensor

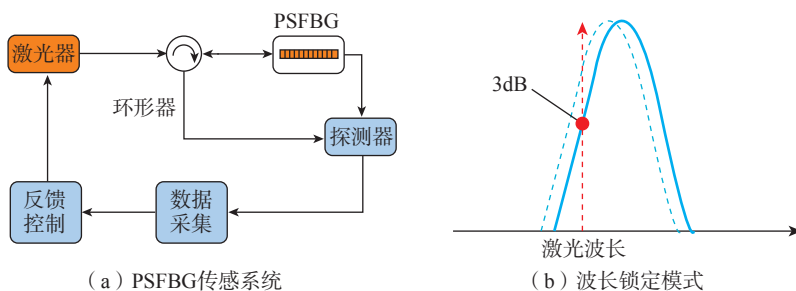


图 2 PSFBG 传感器非线性超声检测

Fig.2 PSFBG sensor for nonlinear ultrasonic detection

$$\beta = \beta_G + \beta_M + \beta_E + \beta_{CAN} \quad (2)$$

研究表明,在含有基体裂纹的CFRP板中, β_{CAN} 是主要成分^[17]。CFRP非线性理论可以简化成非线性弹簧模型,模拟界面与超声波的相互作用^[18]。因此,相对非线性参数 β' 可以表示为:

$$\beta' = \frac{A_2}{A_1^2} \quad (3)$$

其中, A_1 为基波幅值; A_2 为二次谐波幅值。

非线性超声试验

1 CFRP 超声试验设置

将单向碳纤维预浸料按照 [90₄0₄]_s 的顺序进行铺层,经过热压机高温高压作用后形成试验所需的CFRP板,厚度为2.3mm。将CFRP板裁剪为200mm×20mm,并对其边缘进行研磨及抛光处理,未观察到CFRP板损伤。CFRP超声试验布置结构示意图如图3(a)所示,裂纹标注位置为三点弯曲试验固定裂纹形成区域,具体裂纹信息将在下节中进行描述。试验选用压电复合材料(Macro fiber composite, MFC)作为激励源,类型为P2型,尺寸为14mm×7mm。利用氰基丙烯酸酯黏合剂将其粘贴在距三点弯曲试验中间加载点60mm处的PSFBG粘贴在CFRP板距加载

点位置60mm处。在靠近PSFBG的旁边粘贴一个直径为5mm,厚度为3.2mm的PZT传感器(New Focus, AE-900M),以验证PSFBG检测结果的准确性。

试验中激励信号选取为Hamming窗调制周期为10的猝发正弦信号,中心频率为1.0MHz。将信号发生器(Agilent, 33521A)产生的信号经放大器放大后,输入MFC激励器,产生峰-峰值为60V的超声波。通过示波器(Keysight, DSOX2004A)检测PZT和PSFBG传感系统探测器的输出电压,采样频率为10MHz。数据经过4096次平均后进行降噪记录。

2 三点弯曲试验

为使CFRP板在较为可控的位置产生裂纹,利用测试机(INSTRON, M10-16280-EN)进行三点弯曲试验,如图3(b)所示。支座支持跨距为72mm,加载点位于两支撑点中间位置。试验中采用位移控制,加载速度为0.5mm/min。加载时CFRP上层材料受压缩应力,底部受拉应力作用。由于特定[90₄0₄]_s的CFRP铺层顺序,底部抗拉强度较低。因此,CFRP板将最先在加载点位置底部附近产生基体裂纹^[19]。

对CFRP试件进行三点弯曲试验,在分别产生第1、2、4、6、8、10条裂纹后,暂停加载,对试件进行超声

试验,因此,共进行6次加载。图4为将加载曲线叠加而成的位移和载荷关系。当CFRP产生裂纹时,载荷会出现一定程度的突变,如图4所示。例如,当位移达到3.15mm,载荷为144.59N时,观察到荷载突降,对应产生第一条裂纹。试验中发生了10次载荷突降,因此,对应产生了10个基体裂纹。图5为CFRP基体裂纹照片,表1为CFRP板产生每一条裂纹时的加载情况。通过测量发现10条裂纹在加载点位置23mm范围内。可以明显看出三点弯曲试验使CFRP试件共出现了10条基体裂纹,利用光学显微镜观察试验件侧面得到的典型基体裂纹对应形状(图5)。基体裂纹由试验件表面贯穿了90°铺层方向,裂纹长度为20mm,裂纹面平均宽度约为2μm。CFRP中未发现分层或其他损伤。

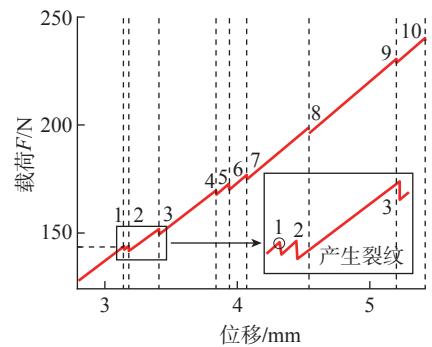


图4 三点弯曲加载曲线

Fig.4 Load curve of three-point bending test

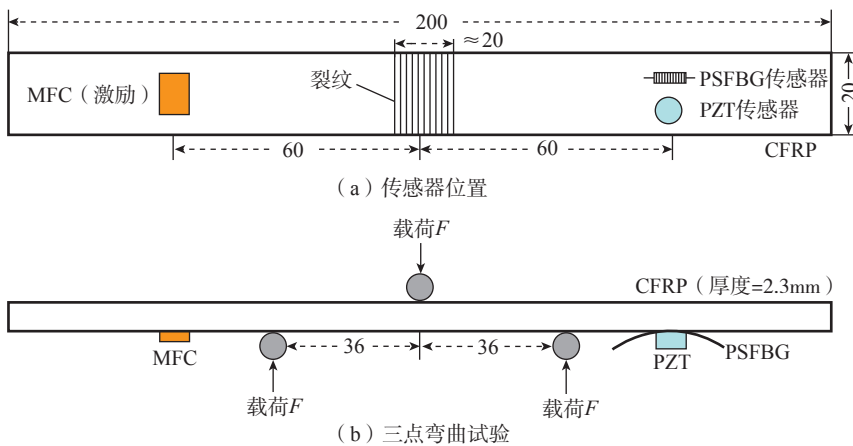


图3 CFRP 试验结构示意图(mm)

Fig.3 Schematic diagram of CFRP test structure (mm)

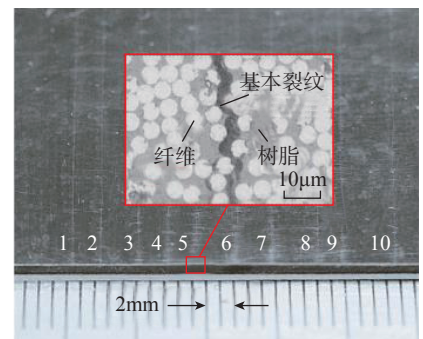


图5 CFRP板90°纤维方向产生的裂纹

Fig.5 Matrix cracks generated at the bottom 90° layer of cross-ply CFRP

表 1 CFRP 位移-载荷加载数据

Table 1 Crack and loading conditions of CFRP

裂纹个数	位移/mm	载荷 F/N
1	3.15	144.5
2	3.18	144.7
3	3.41	152.5
4	3.85	170.2
5	3.94	173.3
6	3.95	171.7
7	4.08	177.4
8	4.55	199.2
9	5.21	230.8
10	5.43	240.3

3 试验结果分析

图 6 (a)和(b)与图 7 (a)和(b)分别为当 CFRP 板产生 2 个基体裂纹时, PZT 和 PSFBG 检测的典型超声波形及对应的傅里叶变换结果。可以看出,两种传感器到达时间基本一致。但检测到的波形并不完全相同,这是由于传感器特性不同造成的。对信号进行频谱分析,发现大部分能量集中在 1.0MHz,这与输入信号中心频率相同。同时,信号中存在少量的 2.0MHz 的二次谐波成分,证明 CFRP 板中存在超声非线性。由试验结果可知, PSFBG 可以准确检测 CFRP 板中高达 2.0MHz 的高频超声非线性信号。为了有效提取超声信号的基波和二次谐波幅值,采用中心频率为 2.5,带宽为 2 的 Complex Morlet 小波基,对信号进行小波变换^[20]。PZT 和 PSFBG 的小波变换结果分别如图 6 (c)和 7 (c)所示,大部分能量集中在 1MHz 处,其中放大区域为二次谐波能量集中区域。从小波变换结果中提取基频和谐波频率处的包络线,选取包络线第一个峰值,分别记为 A_1 和 A_2 ,如图 6 (d)和 7 (d)所示。将其代入式(3),计算出 PZT 和 PSFBG 的相

对非线性参数 β' 。

利用 PSFBG 和 PZT 传感器检测并采集基体裂纹数从 0 增长到 10 时 CFRP 试件中传播的 Lamb 波信号,计算对应的 β' 值。对 β' 归一化

处理,即将所有的 β' 值均除以健康状态的值。图 8 为 β' 和基体裂纹个数的关系线性拟合结果。可以看出,随着裂纹数量的增多, β' 近似线性增长。这是由于超声波在传播到基体裂纹时,与裂纹界面发生相互作用,产生接触声非线性 β_{CAN} ,基体裂纹的增多会使 β_{CAN} 变多,因此对应的 β' 不断增长。并且, PSFBG 检测结果中 β' 上升趋势明显高于 PZT 结果。表 2 比较了 PZT 和 PSFBG 检测结果的线性拟合斜率和标准差,可以看出 PSFBG 检测的 β' 斜率更大,这种大的倾斜度更有利于表征 CFRP 基体裂纹数量的变化,表明 PSFBG 具有更高的非线性超声检测灵敏性。但 PSFBG 的标准差要高于 PZT,可认为 PZT 检测结果更趋近于线性,更加稳定。因此,综合试验结果表明, PSFBG 传感系统可用于 CFRP 基体裂纹的非线性超声检测,且具有高灵敏度的优势。

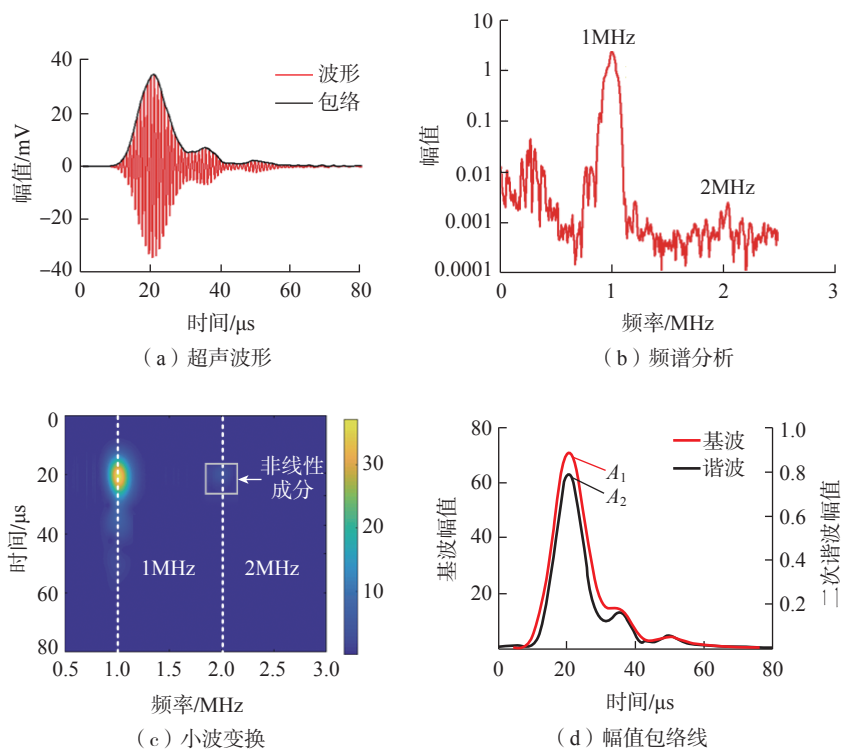


图 6 PZT 检测的超声信号

Fig.6 Typical ultrasonic signal of PZT sensor

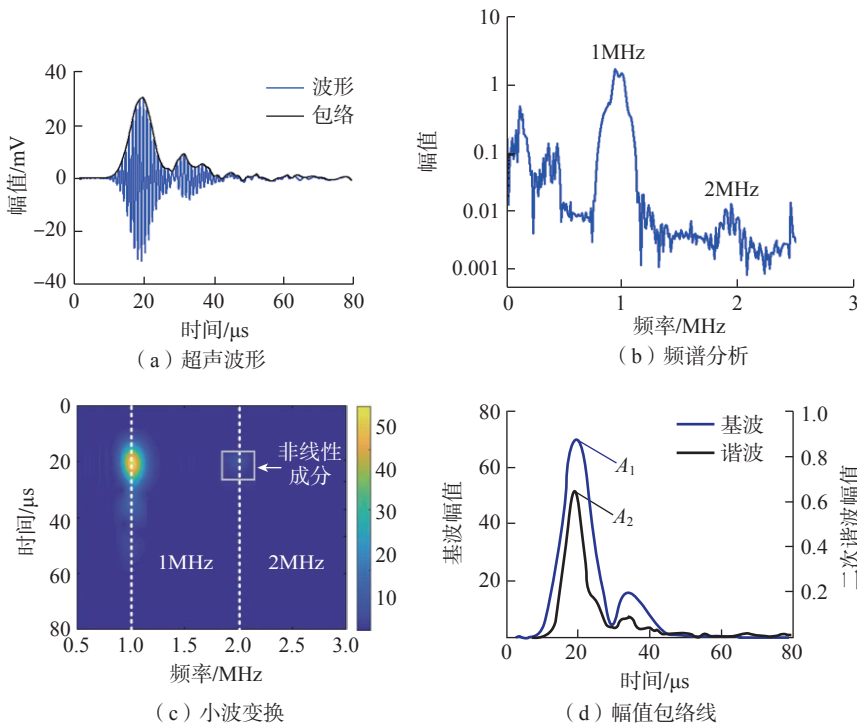


图7 PSFBG 检测的超声信号

Fig.7 Typical ultrasonic signal of PSFBG sensor

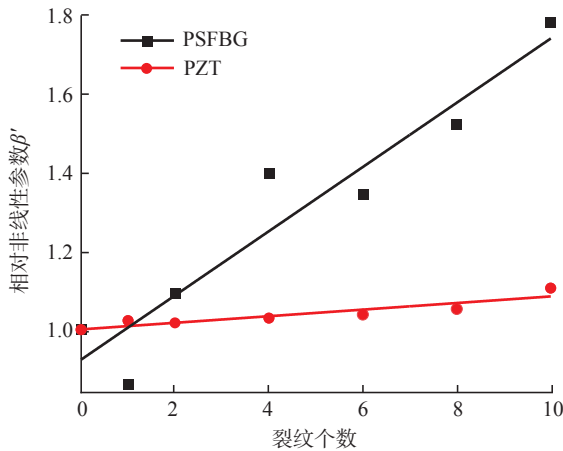


图8 β' 与基体裂纹个数的关系

Fig.8 Relationship between β' and number of matrix cracks

表2 β' 线性拟合参数

Table 2 Linear-fit parameter of β'

参数	斜率	标准差 / %
PSFBG	0.08	1
PZT	0.008	0.1

结论

(1) 提出的高灵敏度大带宽

的 PSFBG 传感系统可以有效评估 CFRP 基体裂纹的数量。

(2) 试验结果表明,随着 CFRP

基体裂纹数量的增加,相对非线性参数近似线性增长。

(3) PSFBG 相比于 PZT 具有较高的 CFRP 非线性超声损伤检测灵敏度,可以成为 CFRP 结构健康监测的潜在工具。

参考文献

[1] WILD G, HINCKLEY S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: Overview and state-of-the-art[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(7): 1184-1193.

[2] JIANG M S, SUI Q M, JIA L, et al. FBG-based ultrasonic wave detection and acoustic emission linear location system[J]. Optoelectronics Letters, 2012, 8(3): 220-223.

[3] ZHU Y P, HU L L, LIU Z G, et al. Ultrasensitive ultrasound detection using an intracavity phase-shifted fiber Bragg grating in a self-injection-locked diode laser[J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5525-5528.

[4] WU Q, OKABE Y. High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28353-28362.

[5] YU F M, OKABE Y, WU Q, et al. A novel method of identifying damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates based on acoustic emission detection using a fiber-optic sensor[J]. Composites Science and Technology, 2016, 135: 116-122.

[6] HUDSON T B, AUWAIJAN N, YUAN F G. Guided wave-based system for real-time cure monitoring of composites using piezoelectric discs and phase-shifted fiber Bragg gratings[J]. Journal of Composite Materials, 2019, 53(7): 969-979.

[7] CROXFORD A J, WILCOX P D, DRINKWATER B W, et al. The use of non-collinear mixing for nonlinear ultrasonic detection of plasticity and fatigue[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 126(5): 117-122.

[8] YAN H J, XU C G, XIAO D G, et al. Properties of GH4169 superalloy characterized by nonlinear ultrasonic waves[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015: 1-8.

[9] LIM H J, KIM Y, KOO G, et al. Development and field application of a nonlinear ultrasonic modulation technique for fatigue crack detection without reference data from an intact

condition[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(9): 095055.

[10] VAN DEN ABEELE K E, CARMELIET J, TEN CATE J A, et al. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, part II: Single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy[J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2000, 12(1): 31–42.

[11] HONG M, SU Z Q, WANG Q, et al. Modeling nonlinearities of ultrasonic waves for fatigue damage characterization: Theory, simulation, and experimental validation[J]. *Ultrasonics*, 2014, 54(3): 770–778.

[12] POLIMENO U, MEO M, ALMOND D P, et al. Detecting low velocity impact damage in composite plate using nonlinear acoustic/ultrasound methods[J]. *Applied Composite Materials*, 2010, 17(5): 481–488.

[13] ANDREADES C, MAHMOODI P, CIAMPA F. Characterisation of smart CFRP composites with embedded PZT transducers for

nonlinear ultrasonic applications[J]. *Composite Structures*, 2018, 206: 456–466.

[14] WU Q, WANG R, YU F M, et al. Application of an optical fiber sensor for nonlinear ultrasonic evaluation of fatigue crack[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(13): 4992–4999.

[15] ZHAI H Z, WU Q, XIONG K, et al. π -phase-shifted fiber Bragg grating for strain measurement with high spatial resolution[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(16): 1335–1338.

[16] MINARDO A, CUSANO A, BERNINI R, et al. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2005, 52(2): 304–312.

[17] SOLEIMANPOUR R, NG C T. Locating delaminations in laminated composite beams using nonlinear guided waves[J]. *Engineering Structures*, 2017, 131: 207–219.

[18] PECORARI C. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface

between rough surfaces in contact[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003, 113(6): 3065–3072.

[19] SIDERIDIS E, PAPADOPOULOS G A. Short-beam and three-point-bending tests for the study of shear and flexural properties in unidirectional-fiber-reinforced epoxy composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, 93(1): 63–74.

[20] OHARA Y, KAWASHIMA K. Detection of internal micro defects by nonlinear resonant ultrasonic method using water immersion[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(5B): 3119–3120.

通讯作者: 吴奇, 教授, 博士, 研究方向为航空材料微损伤的声光检测、复合材料成型的大规模多尺度仿真和基于先进光纤传感的智能结构。

Evaluation of Composite Matrix Crack Using Nonlinear Ultrasonic Lamb Wave Detected by Fiber Bragg Grating

WANG Rong^{1,2}, WU Qi², XIONG Ke², ZHANG Hanqi²

(1. Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] A high-sensitive and broad-bandwidth phase-shifted fiber Bragg grating based ultrasonic detection system with proportional-integral-derivative feedback controller was proposed to evaluate the ultrasonic nonlinearity induced by the matrix crack in carbon fiber reinforced plastic. After the optical fiber sensing system detected the ultrasonic Lamb wave propagating in a composite laminate, the second harmonic components with a frequency of 2.0MHz was extracted from Lamb wave signals by data processing. The result show that the relative nonlinear parameter grew linearly with the increase of crack numbers. In comparison with conventional lead zirconate titanate sensor, the relative nonlinear parameter detected by the phase-shifted fiber Bragg grating sensor shows a higher growth rate. Thus, the proposed fiber optic-ultrasonic detection system with high reliability can be applied to the evaluation of matrix cracks damage of composite materials.

Keywords: Phase-shifted fiber Bragg grating (PSFBG); Carbon fiber reinforced plastic (CFRP); Nonlinear ultrasonic; Lamb wave; Matrix crack

(责编 阳光)