

doi: 10.7690/bgzd.2014.01.019

## 复杂电磁环境下的超声探伤研究

穆洪彬<sup>1</sup>, 齐世海<sup>1</sup>, 孟晓梅<sup>2</sup>, 唐茜<sup>1</sup>, 牛余朋<sup>1</sup>

(1. 第二炮兵96630部队, 北京 102206; 2. 第二炮兵工程大学203教研室, 西安 710025)

**摘要:** 针对复杂电磁环境下传统超声波探头易受电磁波干扰的缺陷, 构建基于布拉格光栅传感器的2种超声传感系统。介绍布拉格光栅的原理, 利用宽带光源和可调激光系统进行超声探测, 构建2种布拉格光栅传感系统, 采用布拉格光栅超声传感系统进行伤情探伤, 并进行实验验证对比。结果表明: 具备可调激光光源布拉格光栅传感器的超声探测系统对超声波具有相当高的灵敏度, 在复杂电磁环境下对结构复合材料的超声探伤中可以作为传统的压电传感器的替代品。

**关键词:** 布拉格光栅传感器; 无损检测; 超声探伤

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Study on Ultrasonic Detection Under Complex Electromagnetic Environment

Mu Hongbin<sup>1</sup>, Qi Shihai<sup>1</sup>, Meng Xiaomei<sup>2</sup>, Tang Qian<sup>1</sup>, Niu Yupeng<sup>1</sup>

(1. No. 96630 Unit of The Second Artillery, Beijing 102206, China;

2. No. 203 Staff Room, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** Focusing on the defect of traditional ultrasonic technical, which is easily being influenced under electromagnetic environment, two types of fiber Bragg grating (FBG) ultrasonic sensing system were constructed using different light source. Introducing the principle of FBG, using the two types of FBG ultrasonic sensing system for ultrasonic testing, and some experiments has been made for research. Results shows, the FBG ultrasonic sensing system including a tunable laser possessed high sensitivity to ultrasonic wave and proved to be an alternative to conventional piezoelectric sensors in ultrasonic inspection of structural composite materials.

**Keywords:** fiber Bragg grating sensor; non-destructive testing; ultrasonic testing

### 0 引言

超声探伤主要被用来进行固体结构缺陷的检测。到目前为止, 固体材料的超声波探伤大多采用压电材料作为超声波发送设备和传感接收装置<sup>[1]</sup>。然而, 压电传感器有易受电磁干扰的缺点, 在复杂的电磁环境下, 其信号的接收和传输过程中易受到电磁波的干扰。而光导纤维传感器则具有完全不受电磁干扰的特点, 可尝试将其作为超声波传感器<sup>[2]</sup>。常用的光纤光栅解调系统主要有宽带光源匹配滤波解调系统<sup>[3]</sup>、基于可调激光光源的解调系统、阵列波导光栅滤波解调系统等, 笔者分别用宽带光源及可调激光光源构建了2种布拉格光栅传感系统, 并采用所构建的传感系统, 应用于带有冲击损伤的正交碳纤维增强塑料超声探伤中, 记录了超声波在受损区域以及完好区域传播情况的综合回波情况, 研究了缺陷对超声波传播造成的影响。此外, 还将采用压电陶瓷探头与采用布拉格光栅传感器的缺陷检测能力进行了比较。

### 1 基于布拉格光栅的超声探伤

#### 1.1 布拉格光栅 (FBG) 原理

在光纤芯内, 布拉格光栅 (fiber Bragg gratings, FBG) 具有周期性变化的折射率, 被作为窄带反射滤光片。

由布拉格光栅反射回的中心波长被称作布拉格波长  $\lambda_B$ , 由以下公式计算出:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

其中  $n$  和  $\Lambda$  分别代表光纤芯的有效折射率和栅格周期。在温度不变的环境中, 在纤维轴线方向施加形变  $\varepsilon$  时, 布拉格波长的相对变化  $\Delta\lambda_B$  由以下公式计算出:

$$\Delta\lambda_B = 0.787\lambda_B\varepsilon \quad (2)$$

施加  $1 \times 10^{-6}$  的应力, 会导致无应力时波长为 1 550 nm 的布拉格波长产生 1.22 pm 的变化。当布拉格光栅膨胀时, 布拉格波长会增加; 当布拉格光栅缩短时, 布拉格波长减少。

收稿日期: 2013-07-28; 修回日期: 2013-09-09

作者简介: 穆洪彬(1980—), 男, 山东人, 硕士, 工程师, 从事固体火箭发动机无损检测专业研究。

### 1.2 采用宽带光源的超声探测

采用宽带光源的超声探测原理<sup>[4]</sup>如图1(a)所示。宽带光源通过光环行器传播至FBG传感器，从传感器反射回的光通过另一个FBG进行滤波。从滤波器传输的光被光电探测器接受并依据光信号强弱转换为相应的电信号。

笔者假设滤波器的布拉格波长 $\lambda_f$ 不变，FBG传感器在无应力状态下的波长 $\lambda_0$ 稍长于布拉格波长 $\lambda_f$ 。图1(b)展示了FBG滤波器的透射率以及不同应力施加于FBG传感器时FBG传感器反射率的变化。实线和虚线分别对应FBG传感器的反射率以及FBG滤波器的透射率。被反射曲线圈起来的区域对应传感器反射回的光线。滤波器透射的光线对应滤波器透射曲线包围的面积；因此，传感器反射和透射区域交叠的部分对应了通过滤波器的光线强度。该区域即为图1(b)中的阴影部分。当传感器被拉长时，其布拉格波长会增加为 $\lambda_1$ 。此时，阴影部分区域面积变大，光电转换器检测到的光强度变大。相反，当传感器被压缩时，布拉格波长变为较短的 $\lambda_c$ ，同时透射的光强度变小。通过此原理，利用FBG传感器配合宽带光源即可检测到超声波。

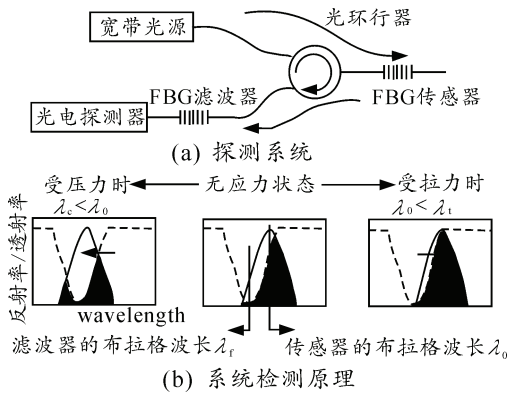


图1 应用宽带光源的FBG超声波探测系统及其检测原理示意图

### 1.3 采用可调激光系统的超声探伤

采用可调激光光源的超声系统<sup>[5]</sup>如图2。在图2(b)中，无应力状态下传感器的反射率被调节至1/2时，发射的激光波长被定为 $\lambda_{out}$ 。图中实曲线代表了无应力状态下传感器的反射率。通过光环行器，激光被导入FBG传感器。由传感器反射的光不经滤波，直接由光电转化器接收。图中虚曲线代表了受应力状态下传感器的反射率，当传感器扩张时，布拉格波长变长，随后，传感器的反射率升高，从传

感器反射的光强度变强，如图2(b)所示。相反，当传感器缩短时，从传感器反射回的光强度减弱。在包含可调激光光源的系统中，从FBG传感器反射回的光强度直接与超声波强度相对应。

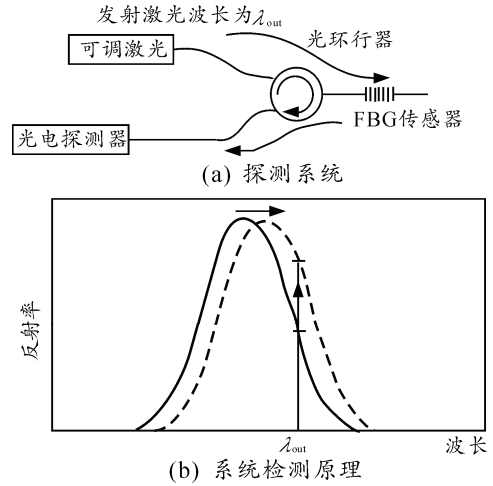


图2 应用可调激光光源的FBG超声波探测系统及其检测原理示意图

## 2 利用FBG超声传感系统的伤情探伤

### 2.1 试验参数及过程

图3为构建的探测系统。当光源选择开关1和开关2均置于端口A时，宽带光源系统工作。从FBG传感器反射回的光透射过FBG滤波器后进入光电探测器。当光源选择开关均置于端口B时，可调激光系统工作，从FBG传感器反射的光直接进入光电探测器。

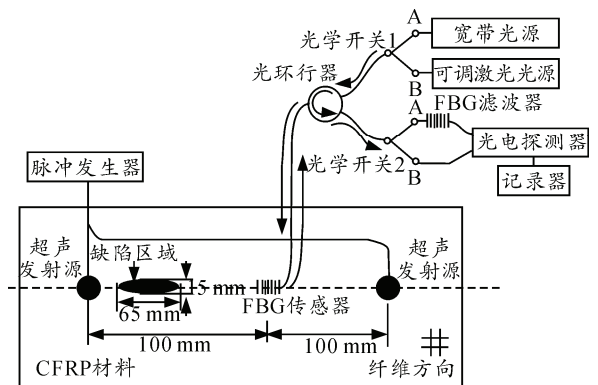


图3 CFRP材料缺陷超声波检测实验

试验所用的材料是一块规格尺寸为290 mm×190 mm×1 mm的碳纤维增强塑料(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)。该材料包含由一个圆球坠落碰撞造成的一块椭圆形可见伤。图4显示了其受损区域。在受伤区域可见到裂缝和分层。

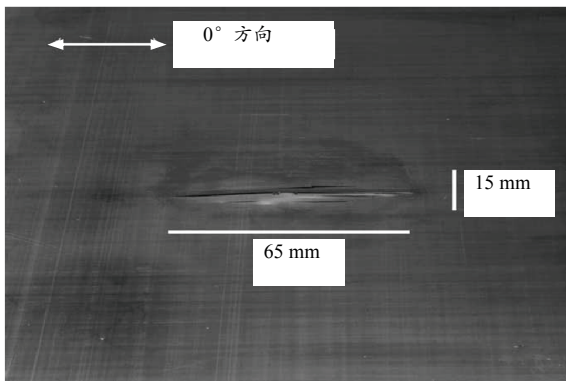


图 4 超声探伤实验中采用的 CFRP 材料受损区域

探测前，采用高粘度胶作为耦合剂，在距离材料表面边缘 50 mm 的位置处，将 FBG 传感器与 CFRP 板固联在一起，由脉冲发生器发出的脉冲信号驱动工作。采用能产生 S 波<sup>[6]</sup>的剪切波超声发射器作为超生源，其直径为 25 mm，中心频率为 250 kHz。以 100 MHz 的采样率记录光电传感器的输出，取 512 个波形的平均值。

采用的 FBG 传感器的波长参数以及激光的波长如图 5 所示。传感器和滤波器的布拉格波长分别为 1 550.18 nm 和 1 550.17 nm。激光发射波长设定为 1 550.28 nm 时，传感器的反射率约为 50%。

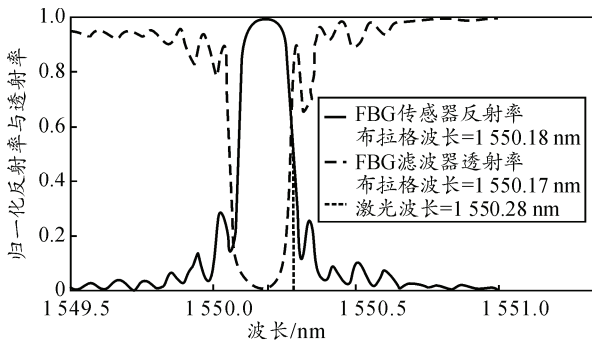


图 5 超声探伤过程中的 FBG 波长特征与激光波长

从脉冲发生器产生的脉冲信号传入超声波发射器产生 S<sub>0</sub> 波<sup>[7]</sup>。将超声波发射器置于 2 个位置，以便于产生的 S<sub>0</sub> 波在到达 FBG 传感器之前能通过受伤区域或者完好区域。超声波发射器与传感器的间距为 100 mm。此外，为了进行比较，采用与超声发射器材料一致的压电元件作为传感器，在与 FBG 传感器相同的位置上进行超声探测。在相同条件下进行超声探伤实验，并分别记录 FBG 传感器和压电传感器接收的信号数据。

### 2.2 实验结果

图 6 为宽带光源系统的反射信号。在无受损区域，信号振幅由反射信号的最大值进行归一化。在实验结果处理过程中，所有的反射信号都进行了归一化处理，时间轴都是以脉冲到达超声发射器的时刻为零点。在通过受损区域与未受损区域过程中对 S<sub>0</sub> 波的反馈有以下不同的特点。第一，受损区域的初始响应较早，为 10.6 ns；第二，第一个周期为 13.1 ns，约为未受损区域的 2 倍；第三，第一个周期的峰峰值减少了约 80%。在存在分层的受损区域内，S<sub>0</sub> 分别波在 0° 和 90° 的层面上单独传播。因为杨氏模量越高，超声波的传播速度越快，S<sub>0</sub> 波在受损区域内 0° 层面上传播的速度较之在未受损区域内的速度要快；所以，S<sub>0</sub> 波通过受损区域到达传感器比通过未受损区域更快。此外，由于缺陷存在造成的超声波散射和衰减造成了第一个周期回馈信号的周期变长以及振幅下降。

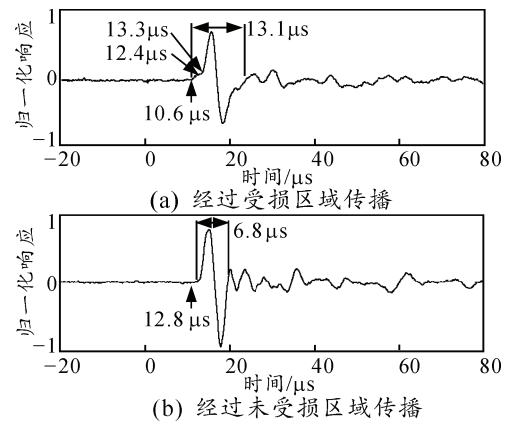


图 6 宽带光源系统 FBG 传感器的超声响应

从回波开始进一步观察波形，在未受损区域中，对 S<sub>0</sub> 波的回波信号为正弦曲线，而受损区域中对 S<sub>0</sub> 波的回波信号较为复杂。首次回波过后，回波的增长率有所下降。之后，出现正弦回波图像。

图 7 所示为可调激光系统的回波信号。两回波信号都演示了良好的波形，各自的回馈起始位置与宽带光源系统的回馈起始位置相吻合。通过损伤区域时，对 S<sub>0</sub> 波回馈的第一周期长度约为通过未受损区域时第一周期长度的 2 倍。受损伤区域的峰峰值越位未受损区域峰峰值的 70%。上述特征与宽带光源系统的反馈信号特征相吻合。

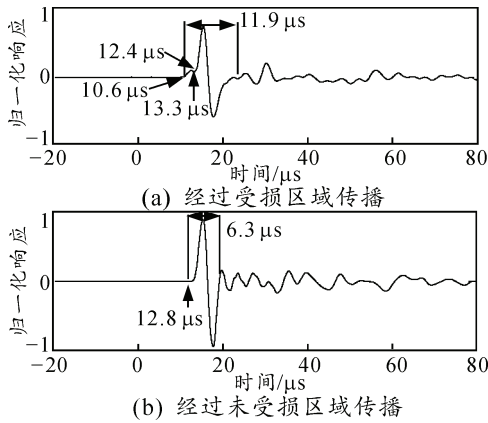


图 7 可调激光光源系统中FBG传感器接收的超声信号

注意到通过受损区域  $S_0$  波的反馈特征， $10.6 \mu\text{s}$  开始收到反馈信号， $12.4 \mu\text{s}$  时开始有轻微衰减。这与宽带光源系统中增长率下降开始的时间相吻合。其次，与宽带光源系统相一致，在  $13.3 \mu\text{s}$  时开始出现正弦反馈信号。初始回波时间  $10.6 \mu\text{s}$  与  $S_0$  波直接通过  $0^\circ$  层的受损区域和未受损区域时间相吻合。绕过受损区域的超声波到达传感器的时间稍微滞后。其绕过的距离可由下式估算。

$$P \approx \pi \sqrt{2(a^2 + b^2) - \frac{(a-b)^2}{2}} \quad (3)$$

其中  $a$ 、 $b$  分别为缺陷椭圆的长、短半径。通过计算得出绕过缺陷区域进行传播的超声波比直线传播的超声波多传播了  $3.7 \text{ mm}$ 。根据  $S_0$  波的速度  $7320 \text{ m/s}$  计算，多传播的时间为  $0.5 \mu\text{s}$ 。只经过未受损区域时超声回波开始于  $12.8 \mu\text{s}$ ，正弦回波曲线的开始时间  $13.3 \mu\text{s}$  与绕过缺陷区域传播的  $S_0$  波所用时间相吻合。

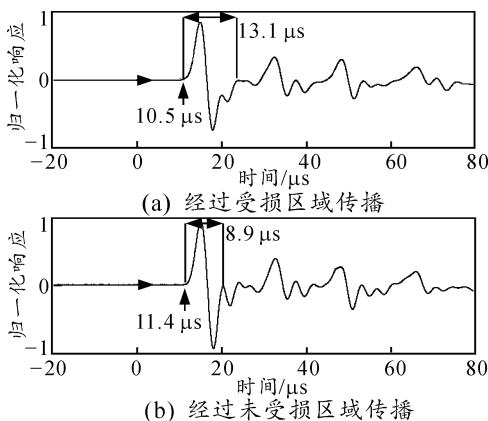


图 8 压电传感器在超声探伤中的回波

图 8 所示为压电超声探头接收到的反馈信号。与无损区域相比较， $S_0$  波通过伤情部位时的回波与 FBG 传感器的回波相似：回波的第一周期具有较

快的反馈信号，较长的周期和较小的波幅。不同的是，在回波的初始阶段，2 种超声波传播路径中压电传感器均显示出清晰的正弦信号<sup>[8]</sup>。这意味着不可能将沿绕开受损区域的传播路径与沿直线传播路径的  $S_0$  波区分开，这证明了 FBG 传感器比传统的压电传感器更适用于超声探伤。

### 3 结论

笔者构建了包含可调激光光源和宽带光源的 2 种 FBG 超声传感系统。针对 2 种系统的超声检测能力和超声探伤能力进行了相关实验，并得出结论：

1) 通过若干 FBG 传感器记录了  $S_0$  波在正交铺设的碳纤维增强塑料中传播的情况。由实验结果测得的超声波声速与理论计算结果相吻合。两 FBG 传感系统均有适应实际应用需要的灵敏度，且信噪比与传感器间距无关。与宽带光源系统相比较，可调激光光源传感器系统对超声波有较高的灵敏度。

2) 采用构建的 FBG 传感器系统对包含可见伤的正交铺设碳纤维增强塑料进行超声探伤。超声波传播路径有 2 条：直线传播和绕缺陷传播。两系统中的 FBG 传感器可以探测沿不同路径传播的超声波，而压电传感器不能将不同路径的波从检测结果的波形上区分开来。

3) 包含可调激光光源的 FBG 传感器系统完全可以替代传统的压电传感器完成对复合结构材料的超声探伤。

### 参考文献：

- [1] Schmerr L. Fundamentals of ultrasonic nondestructive evaluation[C]. New York: Plenum Press, 1998: 1-13.
- [2] Dorigi J, Krishnaswamy S, Achenbach J. Stabilization of an embedded fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasound detection[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 1995, 42(5): 820-824.
- [3] Tsuda H, Toyama N, Urabe K, Takatsubo J. Impact damage detection in CFRP using fiber Bragg gratings[J]. Smart Mater Struct, 2004, 13(4): 719-724.
- [4] Fomitchov P, Krishnaswamy S. Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor[J]. Opt Eng, 2003, 42(4): 956-963.
- [5] Othonos A. Fiber Bragg gratings[J]. Rev Sci Instrum, 1997, 68(12): 4309-4341.
- [6] Tsuda H, Toyama N, Takatsubo J. Damage detection of CFRP using fiber Bragg gratings[J]. J Mater Sci, 2004, 39(6): 2211-2214.
- [7] Rose J. Ultrasonic waves in solid media[D]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 101-131.
- [8] 陈铁胜, 杨靖, 段圣江. 多传感器冗余测试中的通道选择设计[J]. 兵工自动化, 2013, 32(8): 81-83.