

基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器及其无损检测研究

史镜名, 郑狄*, 潘炜, 邹喜华

西南交通大学信息科学与技术学院, 四川 成都 611756

摘要 提出一种基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器,对超声波耦合锥的结构进行数值仿真及优化,分析了光纤光栅长度对超声波探测性能的影响。在此基础上,将所设计的超声波传感器与光谱边带滤波解调技术相结合,用于识别 6061 型铝合金板中的缺陷。结果表明:所设计的超声波传感器能有效探测铝合金板中传输的兰姆波,通过分析兰姆波时域信号和 S_0 模式幅值的变化量,可以准确判决铝合金板中是否有圆孔缺陷及缺陷大小,同时证明所设计超声波传感器具有测量灵敏度高、布置位置灵活可调、可重复利用的优点,在结构体损伤识别等领域具有潜在的应用价值。

关键词 光纤光学; 光纤传感器; 耦合锥; 无损检测; 兰姆波

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1206004

Fiber Grating Ultrasonic Sensor Based on Coupling Cone Structure and Its Application in Nondestructive Detection

Shi Jingming, Zheng Di*, Pan Wei, Zou Xihua

School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China

Abstract A fiber grating ultrasonic sensor based on coupling cone structure is proposed. Numerical simulations and optimization of the ultrasonic coupling cone structure are performed, and the influence of fiber-grating length on the ultrasonic detection performance is analyzed. In conjunction with edge-filter-demodulation technology, the proposed ultrasonic sensor is applied to the identification of defects in a 6061 aluminum alloy plate. The experimental results show that the proposed ultrasonic sensor can effectively detect the Lamb wave transmitted in the aluminum alloy plate. By analyzing the variations in amplitude of the temporal waveform and S_0 mode of the Lamb wave, hole-type defects and defect size in the aluminum alloy plate can be readily determined. The proposed ultrasonic sensor has a number of advantages, including high sensitivity, flexible and adjustable positioning, and reusability, all of which are key factors for its potential application in the field of structural damage identification.

Key words fiber optics; optical fiber sensor; coupling cone; nondestructive testing; Lamb wave

OCIS codes 060.2370; 120.4290; 170.7170

1 引 言

超声无损检测作为一种高效、快捷的检测技术在结构体健康监测领域应用广泛^[1-3]。传统的超声无损检测方式通常采用压电传感器探测结构体中传播的超声波,通过分析所探测超声波信号的幅值或频谱特性来实现对结构体的损伤识别^[4]。然而,压电传感器存在尺寸大、易受电磁干扰、测量精度低等

缺点,因而其应用领域受到限制。

近年来,基于光纤光栅的超声波传感器因其具有体积小、耐高温、抗电磁干扰以及响应频带宽等优点,引起了科研人员的广泛关注^[5-7]。Zhao 等^[8]基于边带滤波解调技术,使用光纤布拉格光栅(FBG)探测超声波信号,并利用 FBG 传感网络成功实现了对超声波源的定位。Liu 等^[9]使用相移光纤光栅对超声波进行探测,采用激光稳频技术降低了温度变

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-07-31; 录用日期: 2019-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(61405166, 61775185)、四川省国际科技合作重点项目(2018HH0002)、111 创新引智基地(B18045)

* E-mail: dzheng@home.swjtu.edu.cn

化对解调系统的影响。Okabe 等^[10]将 FBG 嵌入到复合材料层压板内部,根据兰姆波的模式转换现象对层压板中分层缺陷进行了识别。Li 等^[11]在有机玻璃板中激励单模式兰姆波,并使用 FBG 对板中损伤进行识别,证明了在单模式兰姆波激励下使用 FBG 进行无损检测的可行性。Hu 等^[12]提出了一种基于全光纤结构的超声波激励与探测系统,实现了对金属薄板中温度、应变、厚度变化以及人工裂纹的多参量检测,验证了该系统在结构健康监测应用中的可行性。需要指出的是,现有基于光纤光栅的超声波传感技术通常将裸光纤光栅直接粘贴在待测结构的表面或者是埋设在结构的内部进行监测,这种方式容易受静态应力和环境温度波动的影响,并且光纤光栅的布置位置受限且难以重复利用,因而限制了其在实际中的应用。

为解决现有方案存在的问题,本文提出了一种基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器。基于耦合锥结构将 FBG 从待测板件上脱离,垂直于板件表面布置,因而测量位置灵活可调且 FBG 可重复利用。此外,管式封装结构能够保护光纤光栅不受外界破坏,并减小外界环境变化对测量精度的影响。将所设计超声波传感器用于识别 6061 型铝合金板中的缺陷,通过分析测量到的兰姆波时域波形和频谱特性,可准确判决铝合金板中是否有缺陷及缺陷大小。

2 传感器结构与参数优化

2.1 传感器结构

基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器结构如图 1 所示。传感器由实心耦合锥(solid coupling cone)、刻有 FBG 的单模光纤、金属保护套管(metal protective sleeve)、光纤固定器(optical fiber fixer)和顶部保护盖(top protective cover)组成。FBG 封装于金属保护套管内,其两端分别使用环氧树脂固定于顶部保护盖和光纤固定器上。封装前,使用乙醇溶液对各个部件进行清洗以达到去污效果。光纤固定器底部斜面和金属保护套管底部斜面分别与实心耦合锥表面契合并采用环氧树脂固定,以确保超声波能沿实心耦合锥和光纤固定器有效传递到 FBG。

为证明耦合锥结构能将超声波信号有效传递到 FBG,使用 COMSOL 软件对耦合锥结构进行了数值仿真并进行参数优化。仿真中,耦合锥的材料为铝,底部直径为 7.5 mm,轴截面为等腰三角形,采用正方体型压电陶瓷(PZT)直接作用于耦合锥底部。

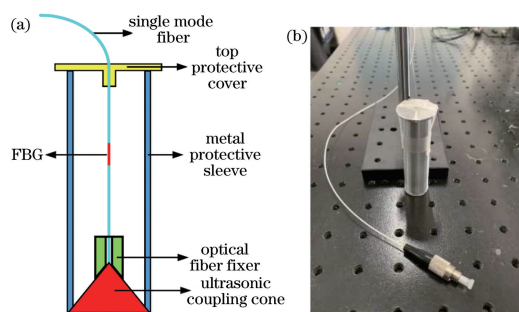


图 1 基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器。

(a)原理图;(b)实物图

Fig. 1 Fiber Bragg grating based ultrasonic sensor with coupling cone structure. (a) Schematic diagram;

(b) physical map

这里选取铝作为耦合锥材料的原因是:相对于大多数金属材料,铝具有非常低的声损耗和较低的声阻抗^[13]。此外,耦合锥的圆锥角度数也是影响超声波探测性能的重要因素之一。通过对不同圆锥角度数的耦合锥进行建模仿真,可以发现,当圆锥角度数为 60° 时,耦合锥传递超声波的效率最高,相似结论在文献^[14]中也得到验证。图 2 为圆锥角度数为 60° 时耦合锥及所连接光纤的动态响应。可以看出,在 PZT 激励的超声波作用下,沿光纤长度方向产生了周期性的振动,证明了所设计耦合锥结构能将超声波信号有效传递到 FBG。

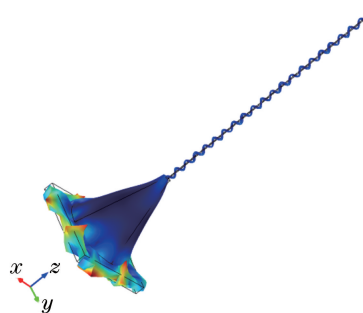


图 2 超声波激励下的耦合锥动态响应仿真

Fig. 2 Simulated dynamic response of coupling cone excited by ultrasonic wave

2.2 FBG 长度对超声波探测性能的影响

当超声波作用于 FBG 时,超声波将以纵向应力波的形式沿光纤轴向传播并产生轴向应变,进而对 FBG 的光栅周期和有效折射率产生周期性调制。不同频率的超声波信号,沿 FBG 轴向方向上将产生不同的应变分布,进而对 FBG 的反射谱形状和中心波长产生不同影响,导致超声波探测时的性能差异,因此需要对 FBG 的长度进行优化选取。为实现对超声波信号的高速、高灵敏度解调,本研究采用光谱边带滤波技术对 FBG 进行强度解调,如图 3 所示。

窄线宽光源的输出波长位于 FBG 反射谱的线性斜边处,当传感 FBG 受到超声波作用时,其反射谱将随声压的变化产生漂移,进而导致反射光功率的变化。因此,通过测量经 FBG 反射的光功率变化即可实现对超声波信号的解调。

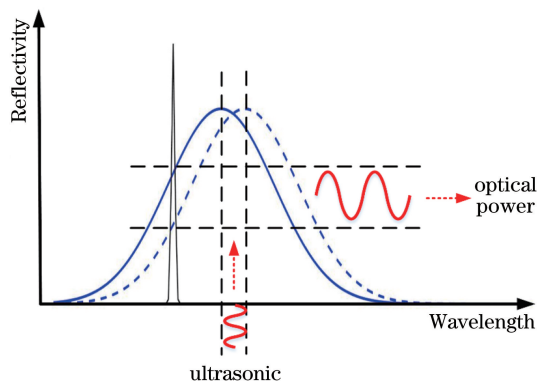


图 3 基于光谱边带滤波的 FBG 解调原理
Fig. 3 Schematic of sideband filtering based FBG demodulation

实验中,选取了 4 根长度分别为 2, 10, 15, 20 mm 的 FBG 进行对比分析。需要说明的是,由于不同长度 FBG 的反射谱形状和反射率存在差异,为确保测量结果的可比性,在使用不同长度 FBG 进行超声波探测实验之前,需要分别调节激光器输出波长到 FBG 反射谱的线性边带上,同时调节激光器输出功率使经不同长度 FBG 反射回来的光功率相同。图 4 给出了激励超声波为 150 kHz 正弦信号时不同长度 FBG 的时域响应曲线。从图中可以看出,所有长度的 FBG 均能对输入超声波信号进行有效探测,但时域响应曲线的峰-峰值随着 FBG 长度的增长而逐渐降低。此外,FBG 长度较长时,探测到的时域波形将产生畸变,这是因为 150 kHz 的超声波激励信号,在 20 mm 长的 FBG 上沿长度方向引起的应变不再均匀一致,导致 FBG 的反射谱形状发生畸变,使得输入信号与探测信号之间不再满足线性关系。因此,对于给定频率的超声波信号,为获得高信噪比的超声波探测信号,光纤光栅的选择应遵循光纤光栅长度与超声波波长比值较小的原则。

进一步研究了 FBG 长度与检测频带的关系,图 5 为不同长度 FBG 在不同超声波频率下的探测信号峰-峰值。从图中可以看出,在 20~1000 kHz 频率范围内,较短长度的 FBG 能获得更大的探测信号峰-峰值。这是因为在相同频率下,较短的 FBG 与较长 FBG 相比受超声波调制引起的轴向应变更为均匀,因此能获得更好的频率响应。当 FBG 长度大

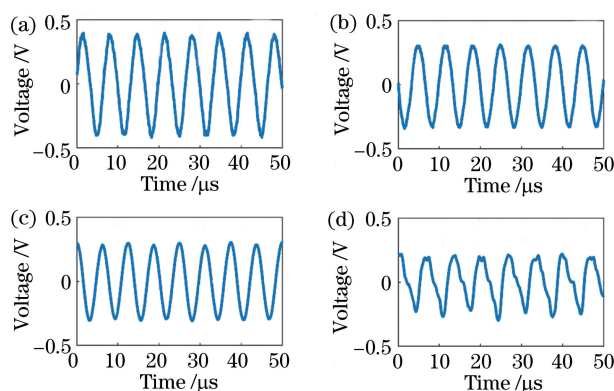


图 4 不同长度 FBG 对 150 kHz 连续正弦超声波信号的时域响应曲线。(a) FBG 长度为 2 mm; (b) FBG 长度为 10 mm; (c) FBG 长度为 15 mm; (d) FBG 长度为 20 mm

Fig. 4 Temporal responses of the proposed ultrasonic sensor with different FBG lengths for 150-kHz continuously sinusoidal ultrasonic wave. (a) FBG length is 2 mm; (b) FBG length is 10 mm; (c) FBG length is 15 mm; (d) FBG length is 20 mm

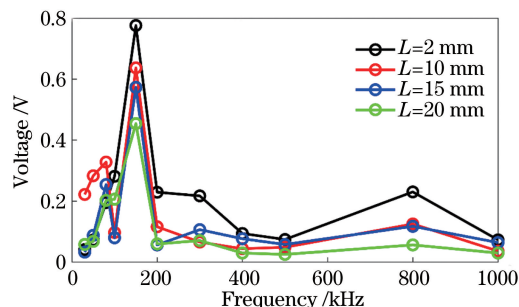


图 5 不同长度 FBG 在不同超声波频率下的探测信号峰-峰值

Fig. 5 Peak-to-peak values of the proposed ultrasonic sensor with different FBG lengths at different ultrasonic wave frequencies

于超声波波长时,FBG 光谱在超声波作用下将不会发生改变,因而探测到的信号峰-峰值很低,进而无法实现对超声波的解调。需要注意的是,在 150 kHz 处测得的信号峰-峰值远大于其他频率,这是因为实验中所使用 PZT 的频率响应曲线并不平坦,不同频率下激励的超声波响应强度并不一致,在 150 kHz 达到最大幅值输出。此外,文献[15]已通过实验证明,当 FBG 的长度小于超声波波长的一半时,FBG 可有效地探测到超声波信号。因此,为增大传感器对超声波信号的频率检测范围,应选取较短的 FBG。然而,在实际应用中,FBG 长度也不宜过短,过短的 FBG 因其反射边带的斜率较小,传感器的灵敏度降低,进而影响超声波信号解调。综上

所述,为获得高信噪比的超声波探测信号以及宽响应频带,本研究选用 2 mm 长的 FBG 作为耦合锥结构的传感光栅。

3 超声无损检测实验验证与分析

为验证所提基于耦合锥结构的 FBG 超声波传感器可实现超声无损检测,搭建了如图 6 所示的实验系统。整个系统由超声激励源和光纤光栅解调单元两部分组成。其中,超声激励源由函数发生器、电压放大器、压电陶瓷片组成。函数发生器产生的激励信号经电压放大器放大后,激励 PZT 产生超声波

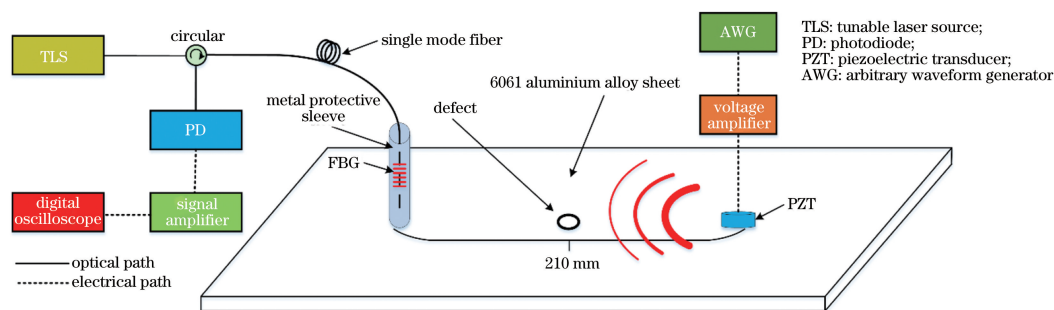


图 6 超声无损检测实验装置图

Fig. 6 Experimental setup of ultrasonic nondestructive detection system

实验中待检测损伤结构为 400 mm×400 mm×2.8 mm 的 6061 型铝合金板(以下简称铝合金板)。PZT 与所设计超声波传感器均使用超声波耦合剂进行耦合,并可以在铝合金板上自由移动。将 PZT 与所设计超声波传感器放置于铝合金板长度方向的中心线上,设置两者距离为 210 mm 且位置关于铝合金板呈中心点对称。由函数发生器信号激励 PZT 产生超声波,激励信号公式为

$$V(t) = V_0 \sin(2\pi ft) \left[\sin\left(\frac{2\pi ft}{10}\right) \right]^2, t < \frac{5}{f}, \quad (1)$$

式中: V_0 为激励信号电压; f 为激励信号中心频率。由于所选取的激励信号为窄带信号,且待检测结构为金属薄板,因此该激励信号在薄板中将激励出兰姆波^[16]。兰姆波在结构中传播时遇到缺陷会发生反射和散射现象,从而导致兰姆波信号的幅值、频率成分发生相应变化。实验中,当激励信号频率 $f = 200$ kHz 时,在铝合金板中激励出的兰姆波信号幅值最大,因此利用所设计传感器来测量中心频率为 200 kHz 的兰姆波,可以实现对缺陷的识别。

为探究有无缺陷时兰姆波的变化,先记录无缺陷情况下探测到的兰姆波信号,并将其作为参考信号,然后在铝合金板中心点处分别加工直径为 10,

并垂直耦合进入到待测结构中传播。光纤光栅解调单元包括可调谐窄线宽激光器、光环形器、所设计超声波传感器、光电探测器、信号放大器、示波器,用于获取携带有损伤信息的超声波信号。将激光器的输出波长调节到 FBG 反射谱的线性边带处,激光器输出信号首先经环形器进入刻有 FBG 的单模光纤中;输入信号被 FBG 反射后再次进入环形器;经过 FBG 反射后的输入信号最后被光电探测器检测;光电探测器输出的电信号被信号放大器放大后进入数字示波器观察并存储。

13,18,20 mm 的圆孔型缺陷并测量对应的兰姆波信号。图 7 分别给出了输入信号为单周期 200 kHz 超声波脉冲时,在不同孔径圆孔型缺陷下 FBG 探测的兰姆波时域信号。为便于对比分析,图中包含了无缺陷时探测的兰姆波时域信号,用黑色曲线表示。从图中可以看出,当铝合金板中有缺陷存在时,探测的兰姆波信号相比于无缺陷时信号幅值发生了衰减,波形出现较大畸变,且铝合金板中的缺陷越大,兰姆波信号衰减越明显。因此可以根据兰姆波时域信号中波包幅值的衰减程度对铝合金板中有无缺陷以及缺陷有无扩展进行判别。

由于输入超声波信号在缺陷处和板边界将产生反射、透射,因而探测的兰姆波时域信号在时域包含多个叠加的反射、透射波包。同时,PZT 在不同频率下激励的兰姆波信号幅值存在差异,因此通过时域信号仅能对缺陷的扩展趋势进行判断,但难以实现对缺陷大小的定量分析。为解决以上问题,拟通过频域分析法对时域信号进行傅里叶变换以获得兰姆波信号的频域特征。将图 7 中所探测的兰姆波信号进行傅里叶变换,得到对应的频谱图,如图 8 所示。从图中可以看出,由于兰姆波具有频散和多模式特性,激励信号在铝合金板中发生了频散,有多种模式产生。在无缺陷情况下,兰姆波主要由 S_0 和

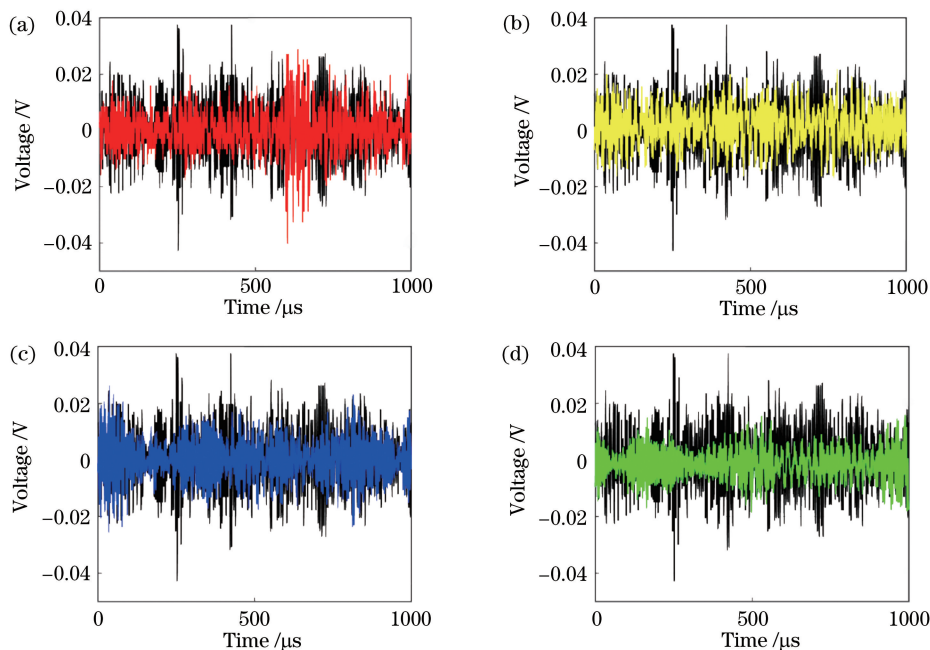


图 7 在不同孔径圆孔型缺陷下,FBG 探测的兰姆波时域信号。(a) 10 mm;(b) 13 mm;(c) 18 mm;(d) 20 mm

Fig. 7 Lamb wave signals under different hole-size defects detected by FBG sensing system.

(a) 10 mm; (b) 13 mm; (c) 18 mm; (d) 20 mm

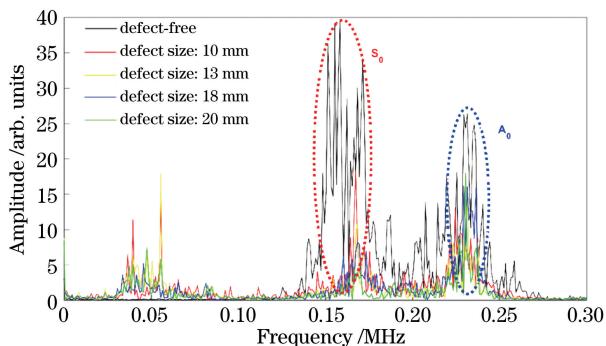


图 8 不同孔径圆孔型缺陷下的兰姆波频域信号

Fig. 8 Spectral response of Lamb wave under different hole-size defects

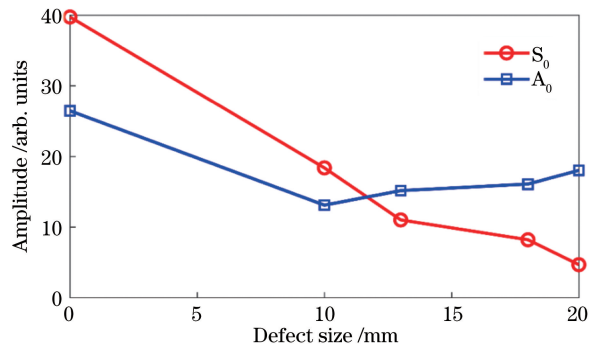


图 9 不同孔径缺陷下的 S_0 和 A_0 模式频谱强度

Fig. 9 Amplitudes of S_0 and A_0 modes under different hole-size defects

A_0 两种模式组成,其中; S_0 为主要模式; A_0 为次要模式。当存在圆孔型缺陷时,兰姆波信号在 50 kHz 附近均有新的频率成分产生且频率大小与孔径大小无关,因此也可根据兰姆波频域信号有无新频率分量产生来对缺陷进行识别。

为得到兰姆波与缺陷孔径大小的定量关系,图 9 给出了不同孔径圆孔型缺陷下 S_0 和 A_0 的频谱强度变化。可以看出, S_0 模式比 A_0 模式对圆孔型缺陷更为敏感。 S_0 模式的幅值与圆孔型缺陷满足较好的线性关系,随着圆孔型缺陷直径的增大, S_0 模式的幅值逐渐降低。因此,可通过测量兰姆波中 S_0 模式的幅值来反推缺陷孔径的大小。

4 结 论

针对裸光纤光栅在超声无损检测技术中存在的布置位置受限、可重复利用率低、易受静态应力以及环境温度波动影响等问题,设计并封装了一种基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器,该传感器进行超声波探测的方式区别于以往采用裸光纤光栅直接粘贴于待测物体表面进行超声波探测的方式。该传感器结构结合了细径管保护式和夹持式封装的特点,具有灵敏度高、布置位置灵活可调以及可重复利用等优势,适用于板结构中缺陷的检测。将所设计的超声波传感器用于对 6061 铝合金板中的缺陷检测。通过有效探测兰姆波信号,分析兰姆波时域信

号的波包幅值和 S_0 模式幅值变化量,可判决板中有无缺陷并进一步对缺陷大小进行定量分析。下一步工作中,将采用相移光纤布拉格光栅(PSFBG)代替FBG,进一步提高测量的灵敏度。

参 考 文 献

- [1] You B W, Ni C Y, Shen Z H. Laser ultrasonic real-time monitoring of photothermal modulation crack closure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(2): 0204009.
尤博文, 倪辰荫, 沈中华. 光热调制裂纹闭合的激光超声实时监测[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0204009.
- [2] Li H Y, Li Q X, Wang Z B, *et al.* Detection and evaluation of surface defects based on critical frequency method by laser ultrasonic[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0712003.
李海洋, 李巧霞, 王召巴, 等. 基于激光超声临界频率的表面缺陷检测与评价[J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0712003.
- [3] He C F, Zheng M F, Lü Y, *et al.* Development, applications and challenges in ultrasonic guided waves testing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1713-1735.
何存富, 郑明方, 吕炎, 等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [4] Worden K, Pierce S G, Manson G, *et al.* Detection of defects in composite plates using Lamb waves and novelty detection [J]. International Journal of Systems Science, 2000, 31(11): 1397-1409.
- [5] Shang Y, Yang Y H, Wang C, *et al.* Quasi-distributed acoustic sensing based on identical low-reflective fiber Bragg gratings [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(1): 015202.
- [6] Xu Y P, Zhang L, Gao S, *et al.* Highly sensitive fiber random-grating-based random laser sensor for ultrasound detection [J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1353-1356.
- [7] Guo J J, Yang C X. Highly stabilized phase-shifted fiber Bragg grating sensing system for ultrasonic detection [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(8): 848-851.
- [8] Zhao Y, Zhu Y N, Yuan M D, *et al.* A laser-based fiber Bragg grating ultrasonic sensing system for structural health monitoring [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2573-2576.
- [9] Liu G G, Han M. Wavelength locking of a diode laser to the maximal slope of a phase-shifted fiber Bragg grating for acoustic emission detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(22): 9257-9262.
- [10] Okabe Y, Fujibayashi K, Shimazaki M, *et al.* Delamination detection in composite laminates using dispersion change based on mode conversion of Lamb waves [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(11): 115013.
- [11] Li C, Xiao H, Zuo X Q. Damage detection in a plate structure based on FBG sensing technique under a single-mode Lamb wave [J]. International Journal of Online Engineering (IJOE), 2018, 14(7): 62-74.
- [12] Hu C N, Yu Z H, Wang A B. An all fiber-optic multi-parameter structure health monitoring system [J]. Optics Express, 2016, 24(18): 20287-20296.
- [13] Frederick J R. Ultrasonic engineering [M]. UK: John Wiley and Sons. Inc., 1965.
- [14] Brentnall M D, Martin R W, Vaezy S, *et al.* A new high intensity focused ultrasound applicator for surgical applications [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2001, 48(1): 53-63.
- [15] Fisher E, Surowiec J, Webb J, *et al.* In-fibre Bragg gratings for ultrasonic medical applications [J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(10): 1050-1054.
- [16] Harb M S, Yuan F G. Non-contact ultrasonic technique for Lamb wave characterization in composite plates [J]. Ultrasonics, 2016, 64: 162-169.