

doi: 10.3788/gzxb20164505.0506003

基于光纤光栅传感的金属薄板超声探测

郑艳, 余有龙, 梅钰洁, 李慧

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 搭建了光纤光栅检测超声应力波系统, 并阐述其工作原理, 以动态应变与光纤光栅中心波长漂移量间关系为基础, 推导得出输出电压与板中应变成线性关系。采用超声信号发生器发射 28 kHz 的脉冲信号激励超声振子, 通过有机玻璃楔形块将激励传递至 5052 铝合金薄板产生超声应力波, 并利用光纤光栅应变传感器对其进行探测。在板上开一 98 mm 长裂缝, 测得超声应力波中出现新的波包, 通过计算损伤前后新增波包到来的时间差确定裂缝位置, 所测结果与实际位置偏差为 2.7 mm。该实验表明光纤光栅可代替超声探头来实现对低频超声波的探测。

关键词: 光纤光学; 光纤布喇格光栅; 超声波; 薄板; 缺陷

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)05-0506003-4

Ultrasonic Detection of Metal Sheet Using Fiber Bragg Grating

ZHENG Yan, YU You-long, MEI Yu-jie, LI Hui

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A detection system of ultrasonic stress wave based on fiber Bragg grating was established, whose working principle was expressed. The linear relationship between the output voltage and plate strain based on the connection between the dynamic strain and center wavelength shift of fiber Bragg grating was derived. A pulse of 28 kHz generated by ultrasonic signal generator drove the ultrasound vibrator, the signal was conveyed to a 5052 aluminum alloy plate through a organic glass wedge to generate stress waves which were detected by a fiber Bragg grating strain sensor. After that, a new wave packet appeared in the measured ultrasonic waves when there was a crack of 98 mm in the plate. The arriving time difference between the new wave packet before and after the damage can be used to determine the crack location. The position deviation of the crack is 2.7 mm. It is shown that instead of an ultrasound probe, the fiber Bragg grating can be used to detect the low-frequency ultrasound waves.

Key words: Fiber optics; Fiber Bragg gratings; Ultrasonic; Sheet; Defect

OCIS Codes: 060.2300; 060.3735; 170.7170

0 引言

薄板结构多用于建筑装饰、汽车、航空航天等领域, 在其使用过程中, 外力破坏或长期疲劳损伤积累将损坏其结构, 从而产生安全隐患, 因此有必要对其结构进行检测。传统的检测方法有射线法^[1]、涡流检测法^[2]、磁粉法^[3]、渗透法^[4]、和超声法^[5], 其中射线法成本较高, 且存在辐射泄露问题; 涡流检测受趋肤效应限

制, 只能用于试件表面附近缺陷的检测; 磁粉法局限于铁磁材料且检测灵敏度不高; 渗透法不适于检测多孔性疏松材料和表面粗糙的工件; 超声法虽然方向性好、穿透力强, 但其对超声探头要求较高且探测结果易受电磁场干扰。

光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器体积小、质量轻、灵敏度高, 可以替代传统超声检测法中的接收探头, 成为一种新的探测工具, 目前已成为

基金项目: 登月三期预研项目资助项目(No. TY3Q-20110005)和合肥工业大学博士专项科研基金(No. GDBJ2009-010)资助

第一作者: 郑艳(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感。Email: zlanquiping318@163.com

导师(通讯作者): 余有龙(1965-)男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤光栅传感器、网络化技术、光纤激光及光无源器件。Email: oulongyu@163.com

收稿日期: 2015-11-19; 录用日期: 2016-01-13

<http://www.photon.ac.cn>

国内外学者的研究热点.郭团、关柏鸥等^[6-7]利用 FBG 构建双极化分布式布喇格反射光纤激光器,并利用其实现对水中超声的检测;Perez I 等^[8]利用 FBG 检测超声波引起的动态应变;陈韬等^[9]通过模拟 FBG 受超声波作用后的反射谱,验证了超声波波长与光栅长度之间的关系.这种新型的探测方法不仅可减少传播损耗,还可有效消除潮湿气候和电磁场对传感结果的影响,近年来已有学者将其用于高频检测.马科夫·阿列克谢等^[10]利用 FBG 检测冰洋中 1MHz 超声波的传播速度与温度之间的关系,为声学性能检测提供了一种新的方法;汪钱纯等^[11]利用 FBG 透射法传感解调系统检测出 1~3MHz 形成的聚焦超声场,并绘制其声场平面图,但其高频超声发射系统成本较高.本文利用 FBG 对 5052 铝合金板中传播的低频超声波进行检测,并对薄板中的缺陷进行探测.

1 传感解调原理

为探测薄板中的超声波,搭建图 1 所示的装置.超声波信号发生器产生频率为 28kHz 的脉冲信号,用来驱动超声振子.超声振子底部平滑,5052 铝合金板表面平整,两者间夹有倾斜角为 α 的有机玻璃楔形块,使得超声以兰姆波的形式耦合进铝合金板.

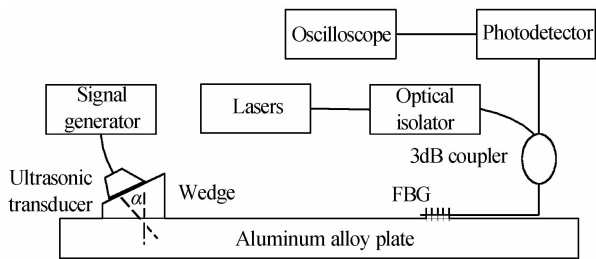


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental setup

为减少超声波因声束扩散、散射等原因产生的衰减,可在振子与楔形块、楔形块与金属板之间涂抹超声波耦合剂.激光经光隔离器和 3dB 耦合器到达 FBG 应变传感器,光隔离器用于阻隔回光. FBG 反射波再经 3 dB 耦合器到达光电探测器,因此光能利用率 $K_2 = 1/4$. 光电探测器将光信号转化成电信号,并在示波器上显示,示波器采样率达 10 GS/s.

为了简化问题,可以将 FBG 反射谱近似为高斯分布^[12].如图 2, FBG 应变传感器对激光输出起到边沿滤波的作用,两者光谱重叠部分反映了激光输出经 FBG 反射后被光电探测器接收的光功率.超声激励产生的应力波作用于 FBG,通过机械拉伸和弹光效应引起 FBG 布喇格波长发生漂移.若激光器工作稳定,且 FBG 布喇格波长始终小于激光器输出波长,探测器接收光功率的值随 FBG 布喇格波长变化而呈线性变化,标定后,通过对光功率监测便可对薄板中的应力波进

行监测.

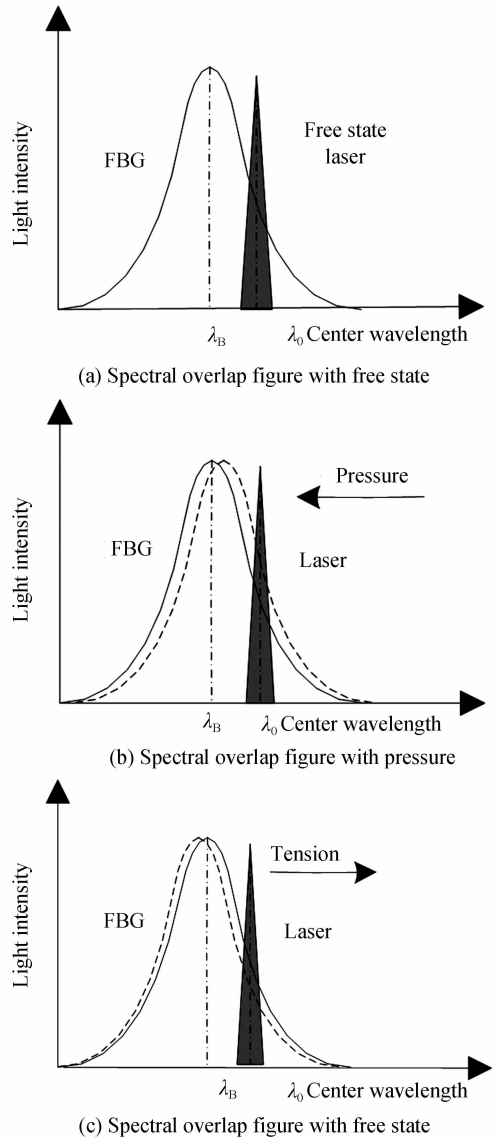


图 2 传感解调原理

Fig. 2 Sensing demodulation schematic

FBG 反射后的光信号经探测器被线性转换为电信号,其输出电压为^[13]

$$U = K \frac{\Delta\lambda_{FWHM} \Delta\lambda_0}{\sqrt{\Delta\lambda_{FWHM}^2 + \Delta\lambda_0^2}} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_B - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda_{FWHM}^2 + \Delta\lambda_0^2} \right] \quad (1)$$

式中, $K = (\sqrt{\pi} / (2 \sqrt{\ln 2})) K_1 K_2 A_1 A_2 I_0 R_{s0}$, K_1 为光能传输损耗, K_2 为光能利用率; A_1 为光电探测器增益, A_2 为电压电流转换系数; I_0 为激光器输出光强; R_{s0} 为 FBG 反射率; λ_B 为 FBG 布喇格波长(即:中心波长), $\Delta\lambda_{FWHM}$ 为 FBG 的 3dB 带宽; λ_0 为激光中心波长, $\Delta\lambda_0$ 为激光的 3 dB 带宽.

激光器输出光强 I_0 与输出功率 P_0 间关系^[14]为

$$I_0 = \frac{p_0 \cdot \sqrt{4 \ln 2 / \pi}}{\Delta\lambda_0} \quad (2)$$

结合式(1)、(2),并根据泰勒公式一阶展开,电压可改写为

$$U = K' \frac{\Delta\lambda_{FWHM}}{\sqrt{\Delta\lambda_{FWHM}^2 + \Delta\lambda_0^2}} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{B0} - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda_{FWHM}^2 + \Delta\lambda_0^2} \right] \cdot \left[1 - \frac{8 \ln 2 (\lambda_{B0} - \lambda_0)}{\Delta\lambda_{FWHM}^2 + \Delta\lambda_0^2} (\lambda_B - \lambda_{B0}) \right] \quad (3)$$

式中系数 $K' = K_1 K_2 A_1 A_2 P_0 R_{s0}$.

忽略温度对测量系统的影响,轴向应变 ϵ 与 FBG 布喇格波长变化的关系^[15]为

$$\epsilon = k (\lambda_B - \lambda_{B0}) \quad (4)$$

式中, $k = \frac{1}{(1 - \rho_e) \cdot \lambda_{B0}}$, P_e 为有效弹光系数, λ_{B0} 为 FBG 初始波长.

考虑 $\Delta\lambda_0 \ll \Delta\lambda_{FWHM}$, 由式(3)和式(4)可知系统输出电压与 FBG 测得应变的关系为

$$U = a\epsilon + b \quad (5)$$

式中

$$a = -K' \frac{8 \ln 2 (\lambda_{B0} - \lambda_0)}{k \Delta\lambda_{FWHM}^2} \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{B0} - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda_{FWHM}^2} \right],$$

$$b = K' \exp \left[-4 \ln 2 \frac{(\lambda_{B0} - \lambda_0)^2}{\Delta\lambda_{FWHM}^2} \right].$$

由式(5)可看出示波器显示的电压与 FBG 测得的应变成线性关系,通过观察示波器波形,即可得到 FBG 感知的超声应力波.

2 实验及结果分析

2.1 实验装置

实验所用光栅的长度为 5 mm, 初始波长为 1 544.168 nm, 3 dB 带宽为 0.2408 nm; 激光输出波长为 1544.268 nm, 3 dB 带宽为 0.02 nm. 功率为 5 mW. 铝合金板尺寸为 500 mm × 300 mm × 2 mm, 杨氏模量为 69.3 GPa, 泊松比为 0.33, 28 kHz 超声频厚积为 0.056 MHz · mm, 对应的兰姆波传播速度为 5489.5 m/s, 入射角 α 约为 30°^[16]. 由于 FBG 对兰姆波对称模式 S0 的响应灵敏度比非对称模式 A0 高^[17], 因此实验中一般测得的是 S0 模式波.

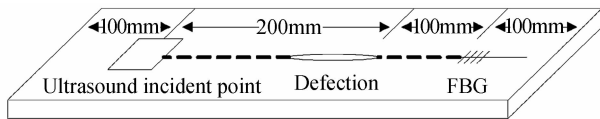


图3 带有缺陷的铝合金板光纤光栅布置

Fig. 3 FBG layout on aluminum panel with deflection

2.2 结果分析

超声探头-楔形块与 FBG 在同一轴线上, 超声入射点与 FBG 的距离为 300 mm, 示波器横轴时基为

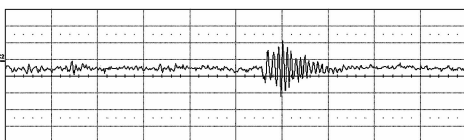


图4 FBG 感知超声应力波形

Fig. 4 Measuring ultrasonic stress waveform of FBG

500 ns/div, 纵轴电压为 2 mV/div. 图 4 为 FBG 测得的超声应力波信号.

示波器横轴时基调为 5 μ s/div, 纵轴电压调为 5 mV/div. 被测板结构完整, 调整示波器时基, FBG 测得的波形如图 5. S0 模式波到达 FBG 后经板右边界反射, 第二次到达 FBG 所走的路程为 200 mm (见图 3), 所需时间理论值为 36.43 μ s. 由图 5 可知, 第一次到达 FBG 的波为 S0₁, S0₂ 峰到 S0₁ 峰的时间差 Δt_1 为 35.1 μ s, 与理论值非常接近. 由此可知, 第二次到达 FBG 的波为 S0₁ 经过板边界的反射波 S0₂.

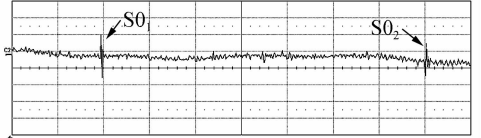


图5 板结构完整时光纤光栅测得波形

Fig. 5 Measuring waveform with FBG on complete board structure

如图 3, 超声入射点与 FBG 之间制作一长约 98 mm、宽约 2 mm、深度为 2 mm 的狭长裂缝当作缺陷, 缺陷右端距 FBG 的距离为 100 mm. 理论上 S0 模式波经缺陷后第一次到达 FBG 的时间理论值为 18.2 μ s, 测得波形如图 6. 与图 5 对比可知, FBG 测得的波形发生相应改变, 且反射信号幅值减小, 这是因为缺陷对超声应力波有一定的散射作用. 此外, 图 6 相对于图 5 增加一个波包 S0₃, 且 S0₃ 波峰到 S0₁ 波峰的时间差 Δt_2 约为 17.7 μ s, 与理论值 18.2 μ s 偏差很小, 说明波的传播速度未发生改变. 因此可知, 在此过程中, 只存在一种模式的波, 即 S0 模式波. 同时可通过波包 S0₃ 到 S0₁ 时间差计算出缺陷的位置, 所测缺陷位置相对于实际位置沿 x 方向偏差为 2.7 mm.

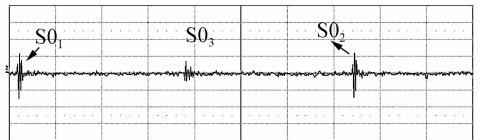


图6 板结构存在裂缝时光纤光栅测得波形

Fig. 6 Measuring waveform with FBG on defective metal sheet

3 结论

本文以 28 kHz 的超声信号作为激励, 利用光纤光栅分别对结构完整和带有缺陷的 5052 铝合金板进行探测. 实验结果表明, 金属板内出现缺陷时, 光纤光栅测得的低频超声应力波信号出现新的波包, 因缺陷对超声应力波有一定的散射作用, 故波形发生改变, 且幅值减小, 但并未发生模式转换, 通过计算新增波包与第一次到达光纤光栅的波包的时间差, 可对缺陷位置进行探测, 所测结果与实际位置偏差为 2.7 mm. 研究表明光纤光栅可实现对金属板中低频超声应力波的探

测.进一步的工作中,将增加测点,并在测点处粘贴两个方向垂直的光栅,通过对比应力波形图以及幅值大小来研究缺陷大小及大致位置.

参考文献

- [1] HOU Yao. A new two dimensional for X-ray [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(9): 1139-1140.
侯瑶. 一种新型二维 X 射线探测器[J]. 光子学报, 2001, **30**(9): 1139-1140.
- [2] HAO Liang, CHENG Deng-feng, LU Ying, *et al.* Thickness of metallic layers from pulsed eddy-current nondestructive measurements [J]. *Journal of Central South University*, 2011, **0**(42): 698-701.
- [3] LU Bao-chun, LI Jian-wen, CHEN Ji-peng, *et al.* Automatic flaw recognition method of fluorescent magnetic detection[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science)*, 2010, **34**(6): 803-808.
陆宝春, 李建文, 陈吉朋, 等. 荧光磁粉探伤自动缺陷识别方法研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, **34**(6): 803-808.
- [4] LIU Bin. Application of liquid penetrant inspection of surface defects on metallic joint components[J]. *Journal of Material Engineering*, 2009, **0**(5): 73-75.
刘斌. 利用渗透检测技术检验人工关节金属零件的表面缺陷[J]. 材料工程, 2009, **0**(5): 73-75.
- [5] KONG Ling-jian, XU Jun, YAN Yi-sheng, *et al.* The new research on ultrasound laser excitation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 20-23.
孔令剑, 徐军, 闫夷升, 等. 激光激发超声波的新方法的研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(1): 20-23.
- [6] GUO Tuan, GUAN Bai-ou, LU Chao, *et al.* Ultrasonic detection using a tunable & low beat-frequency DBR fiber laser [C]. The Sixteenth Opto-Electronics and Communication Conference, OECC, Taiwan, 2011, **7753**(36): 4-8.
- [7] GUAN Bai-ou, TAM H Y, LAU S T, *et al.* Ultrasonic hydrophone based on distributed bragg reflector fiber laser[J]. *Photonics Technology Letters*, 2005, **16**(1): 169-171.
- [8] PEREZ I, GUI H L, UDD E. Acoustic emission detection using fiber Bragg gratings[C]. SPIE, 2001, **4328**: 209-215.
- [9] CHEN Tao, ZHANG Jie, TIAN Chun-hua, *et al.* Study on the response of Fiber prague grating on medical ultrasonic[J]. *Journal of Qiqihar University of Medicine*, 2014, **35**(13): 1959-1960.
- 陈韬, 张杰, 田春华, 等. 光纤布拉格光栅对医用超声波的响应的研究[J]. 齐齐哈尔医学院学报, 2014, **35**(13): 1959-1960.
- [10] ALEXEY M, GUO Yao, CHANG Tian-ming, *et al.* Application of fiber bragg gratings in the measurements of acoustic properties of ice [J]. *Acta Optic Sinica*, 2015, **35**(11): 69-78.
马科夫·阿列克谢, 郭耀, 常天英, 等. 光纤布拉格光栅在冰声性能测量中的应用[J]. 光学学报, 2015, **35**(11): 69-78.
- [11] WANG Qian-chun. Detection of focused ultrasonic fields with fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2005, **18**(1): 171-173.
汪钱纯. 用布拉格光纤光栅对聚焦超声场的检测[J]. 传感技术学报, 2005, **18**(1): 172-176.
- [12] XIONG Yan-ling, REN Nai-kui, LIANG Huan, *et al.* Fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on dynamic scanning of distributed feedback laser [J]. *High Power Laser and Partial Beams*, 2015, **27**(1): 37-40.
熊燕玲, 任乃奎, 梁欢, 等. 分布式反馈激光器动态扫描光纤布拉格光栅波长解调系统[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**(1): 37-40.
- [13] MENG Li-jun, TAN Yue-gang. Plate structural damage identification based on ultrasonic excitation and fiber Bragg grating sensing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, **33**(10): 2330-2336.
孟丽君, 谭跃刚. 超声激励-光纤光栅传感的板结构损伤识别[J]. 仪器仪表学报, 2012, **33**(10): 2330-2336.
- [14] LIU Yun-qi, LIU Zhi-guo, GUO Zhuan-yun, *et al.* Tuning filter detection of Bragg grating sensors [J]. *Acta Optic Sinica*, 2001, **21**(1): 88-92.
刘云启, 刘志国, 郭转运, 等. 光纤光栅传感器的调谐滤波检测技术[J]. 光学学报, 2001, **21**(1): 88-92.
- [15] 余有龙. 光纤光栅及其网络化技术[M]. 黑龙江: 黑龙江科学技术出版社, 2003: 56.
- [16] MENG Li-jun, TAN Yue-gang. Theory and application of detection technology based on ultrasonic excitation and fiber Bragg gratings sensing[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013, 16-20.
孟丽君, 谭跃刚. 超声激励-光纤光栅传感检测技术的相关理论与应用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学. 2013, 16-20.
- [17] TSUDA H, TOYAMA N, TAKATSUBO J, *et al.* Damage detection of CFRP using fiber Bragg grating[J]. *Journal of Materials Science*, 2004, **39**(2004): 2211-2214.