

基于 π PS-FBG传感技术的激光超声水下铝板缺陷检测研究

郭古青,白盛康,田亚莉,宫廷,孙小聪,周月婷,邱选兵,李传亮

(太原科技大学 应用科学学院;山西省精密测量与在线检测装备工程研究中心;

山西省光场调控与融合应用技术创新中心,太原 030024)

摘要:为实现水下金属构件在线服役状态的在线评估,搭建了一套基于激光超声和 π 相移光纤布拉格光栅(π PS-FBG)的水下板材缺陷检测系统.为了研究水下激光超声传播规律,以6061铝合金板材为测试样品,进行了不同水深下的激光超声探测实验.与空气中超声传播相比,实验发现水下 π PS-FBG多接收到一个超声波信号,此信号是激光第一次与水面作用产生的纵波信号.随着激励源与 π PS-FBG传感距离的增加,超声信号在时域上也延迟增加; π PS-FBG接收的激光激励的首个超声波信号的波速为2871.91 m/s,缺陷反射波的波速为2911.02 m/s,其与铝板中超声表面波的速度接近,两者的相对误差分别为1.3%和0.03%.改变激励源与缺陷的距离,发现缺陷的定位精度与缺陷距离无关,缺陷位置的定位相对误差随着距离的增大而逐渐减小.本研究为水下金属构件的在线服役状态检测提供了一种潜在应用技术(包括在南水北调工程中),对于提高水下结构的安全性和可靠性具有一定意义.

关键词:激光超声; π 相移光纤布拉格光栅;6061铝合金;无损检测;缺陷定位;南水北调工程

中图分类号:O439

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2024)04-0046-06

随着我国海洋工程的发展和南水北调政策的落实,水下结构面临着高水压、强腐蚀、水质复杂等环境因素的影响.这些因素会对结构的完整性和稳定性产生重要影响.其中,板材裂纹缺陷是影响结构安全的重要因素之一.传统的水下检测方法主要包括声纳检测、电磁检测和射线检测等^[1].然而,这些传统方法在实际应用中存在一些限制,如信号分辨率低、易受液体干扰和污染环境等^[2-3].而激光超声结合了激光技术和超声波技术的优势,具有空间分辨率高、精度高、抗干扰能力强等优势,能够有效应对水下复杂环境下的探测需求.布拉格光纤光栅(FBG)在超声检测中具有极大的应用潜力,其优势包括高灵敏度、抗电磁干扰和可远程测量.由于其体积较小且能适应极端环境,FBG在水下超声检测领域受到了广泛关注^[4-6].

近年来,许多研究团队深入研究了激光激励固体或液体产生超声波的现象,以及FBG在水下探测应用中的性能.赵瑞等^[7]探讨了水下环境中脉冲激光激发超声波的物理特性,详细分析了光波传播方向和传输距离与声压幅值的相关性,提出了声脉冲幅值随着激光入射角的增大而有所减小,且激光束垂直入射时信号幅值最大的观点,为水下目标检测提供了理论依据.朱海等^[8]研制了一种高灵敏度的FBG水下压力传感器,其灵敏度相比于普通光纤光栅传感器提高了1750倍,这一突破性进展对于水下结构健康检测和水下目标探测的发展具有重要意义.SAYAL等^[9]研究了激光声信号与脉冲波形之间的关系,揭示了通过调整激光器的脉

收稿日期:2024-02-08;**修回日期:**2024-04-18.

基金项目:国家重点研发计划(2023YFF0718100);国家自然科学基金(52076145;12304403);山西省科技合作交流专项(2023040411101022).

作者简介:郭古青(1986-),男,山西阳泉人,太原科技大学副教授,博士,研究方向:激光超声无损检测,E-mail:guqing-guo@tyust.edu.cn.

通信作者:邱选兵,E-mail:qiuxb@tyust.edu.cn.

引用本文:郭古青,白盛康,田亚莉,等.基于 π PS-FBG传感技术的激光超声水下铝板缺陷检测研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(4):46-51.(Guo Guqing,Bai Shengkang,Tian Yali,et al.Research on defect detection of underwater aluminum plate by laser ultrasonic based on π PS-FBG sensing technology[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(4):46-51.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.02.08.0001.)

冲时间分布可以有效减少声波中的高次谐波噪声,从而产生窄频带的声波,提高声波的传播距离,为水下探测技术开辟了一种能够实现远距离探测的新途径.章金龙^[10]基于光纤传感网络对南水北调大桥 G107 的结构内力和变形进行了监控,表明了光纤光栅传感器在水下桥梁应力检测中具有一定的使用潜力,为南水北调桥梁的应力应变检测提出了一种新方法.BAI 等^[11]通过结合蚀刻处理的 FBG 与设计有锥形孔的单模光纤,研发出了一种可用于水下物体检测的 FBG 水听器,显著提高了水下探测作业和水下物体成像过程中的信噪比.李鹏等^[12]研究了激光透过空气和水下两种介质产生超声波的传播特性,根据超声信号实现了三维成像,为水下探测成像领域提供了参考依据.上述研究成果充分展示了激光超声技术与 FBG 传感技术在水下构件安全检测领域具有巨大的应用潜力.然而,在水下构件缺陷识别方面的研究工作仍然较少,特别是将激光超声技术结合 FBG 传感技术应用于水下构件安全检测领域的研究还未见报道.此外,已有的研究工作在信号检测过程中普遍依赖于水听器设备,水听器无法适用于空气环境中,而本文提出的 π PS-FBG 传感器在水下和空气环境中均能够使用,在信号传输介质的通用性方面适用性更强.

本文构建了一套集成激光超声技术与 π PS-FBG 传感技术的无损检测系统,旨在解决水下高压、腐蚀等恶劣环境下的板材表面缺陷检测问题.本文以 6061 铝合金(Al 6061)板材为测试样品,进行了不同水深下的激光超声检测实验,并与空气中超声信号传播进行比较.研究了激励源与 π PS-FBG 在不同距离时,超声信号在时域上的延迟.根据实验测量,分析了 π PS-FBG 响应的激光激励的首个超声波信号与缺陷反射波的信号.通过测量的超声波波速与传播时间实现了 Al 6061 板材的缺陷定位.

1 激光超声作用原理

1.1 金属材料中激光超声原理

脉冲激光激励金属试件会产生以热弹性膨胀为主导的物理机制,当金属表面受到激光束的辐照后会吸收部分的激光能量,随着吸收的能量传递到激励点的周围区域,会形成一个瞬态非均匀温度场,引起热膨胀,导致金属内部的晶格相互挤压,从而产生局部振动和超声波.根据激光功率密度 I_0 的大小,可以将激励机制进一步分为热弹机制和烧蚀机制.激光的功率密度 $I_0 = E / (t_0 \pi r_0^2)$,其中, E 为脉冲激光的能量, t_0 为脉冲激光的上升时间, r_0 为激光源的光斑半径.如附录图 S1(a)所示,在热弹机制下,即 $I_0 < 10^7$ W/cm² 时^[12],激光的功率密度不足以达到金属试件的损伤阈值,试件只在热膨胀机制的作用下产生超声波,不会受到激光烧蚀的影响,从而实现无损检测.当 $I_0 \geq 10^7$ W/cm² 时^[13],试件会受到激光入侵而产生消融、坑陷或表面层蒸发等形变,物质汽化从试件表面喷射出等离子体.这就是烧蚀机制,其原理如附录图 S1(b)所示.本实验为实现无损检测,采用了低于烧蚀阈值的脉冲激光功率密度,此条件下,以热弹机制激励金属板材产生超声波.

1.2 水中激光致声原理

在水环境中,激光声转换机制与固体中的激光超声机制具有相似性,同样可根据激光能量密度区分为热膨胀、汽化和光击穿 3 种主要形式.热膨胀机制发生在较低的能量密度条件下,此时水中的激励点温度尚未上升至沸点.由于水的非均匀加热导致的热膨胀压力差,进而产生超声波,在此机制下,光声转换效率通常低于 0.1%^[14].当处于汽化机制时,随着激光源功率的逐渐增大,水中激励点的局部温度上升至沸点,引起水沸腾和水蒸气的膨胀爆炸,从而产生超声波,该机制下的光声转换效率为 1% 左右^[12].当激光功率进一步增加到液体的击穿阈值(10^7 W/cm²)时,水中特定深度的位置将产生光击穿现象,导致水中物质发生电离形成等离子体,并伴随产生超声波.这就是光击穿机制,此机制的光声转换效率达到 10%~30%^[12].本文中激光功率密度,需要满足金属热弹机制的要求,因此未达到液体的光击穿阈值,在水中脉冲激光主要以汽化机制激发超声波.

2 实 验

为研究脉冲激光激励水下金属板材产生超声波的特性,并利用 π PS-FBG 传感器在水-金属界面接收超声信号以及探测板材的表面缺陷.本文搭建了如附录图 S2 所示的实验装置.激光超声激励部分采用调 Q 的脉冲 Nd:YAG 激光器作为激发超声场的光源,其中心波长为 1 064 nm,脉冲宽度为 8 ns,脉冲能量的调谐范围为 30~50 mJ,激光光斑半径为 0.25 mm,其他参数见附录表 S1 和表 S2.选用 Al 6061 板作为金属试

件,三维尺寸为 $200\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,所设缺陷距离板材的短边界 60 mm 、深度 1.5 mm 、宽度 0.5 mm .将板材置于装水的容器中,控制水面与板材上表面的距离在 $1\sim 5\text{ cm}$ 范围之内.通过调整位于试件上方的透镜位置,实现激光脉冲光束相对于试件表面的正离焦状态,并根据水深度的变化调节离焦量,在空化效应与热膨胀的共同作用下增强超声信号^[15].

π PS-FBG 是一种特殊类型的光纤光栅传感器,其栅区部分由两段布拉格光栅构成,在两段布拉格光栅之间引入了周期性的 π 相移跳变,从而导致反射光谱中存在一个狭窄的缺口,如图 1 所示.

π 相移光纤光栅反射光谱的缺口位置对应的是布拉格波长 $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda_0$,其中, n_{eff} 为纤芯有效折射率, Λ_0 为光栅周期.当 π PS-FBG 感应到超声波时,栅区会受机械应变的影响而发生光栅周期和光纤折射率的改变,从而导致布拉格波长的改变.因此可以通过解调出光纤光栅的中心波长偏移量间接探测栅区所受的应变,进而实现超声波的探测^[16].

实验中激光器激励点位置设置在距离缺陷 $70\sim 100\text{ mm}$ 范围内, π PS-FBG 传感器与激励点位于缺陷的同一侧以接收缺陷反射回波.由于可调谐激光技术能提供更高的测量灵敏度,适用于超高分辨率的动态应变测量^[17],利用可调谐分布式反馈激光器对光栅波长进行解调,光电探测器得到的光栅反射或透射光功率以电压漂移的形式表示超声波信号,并在示波器上显示.通过反射回波信号出现的时间与回波信号的特征实现表面缺陷的定位,以此达到对板材表面缺陷的无损检测.

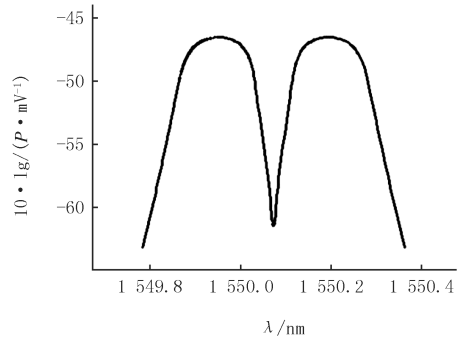


图1 π 相移光纤光栅反射光谱示意图

Fig.1 Schematic diagram of π phase shifted fiber grating reflection spectrum

3 结果与分析

3.1 信号分析

为了对比不同水深条件下的信号与空气中的信号,进行了详细地分析,结果如图 2 所示.通过对比可以看出,空气环境下的超声信号主要呈现出 3 个波形.其中, R1 是激励源产生的超声表面波直接传播到光栅传感器时所探测到的信号, R2 为传感器探测到的超声表面波经缺陷反射回来的信号, R3 为超声表面波遇到板材边界反射回来的信号.在水下环境中发现除 R1、R2 和 R3 波形外,还可以观测到 R4 信号.激光传播至空气与水界面时,由于超声波在水中只以纵波形式传播,可以判断 R4 为 π PS-FBG 接收到的超声纵波.以水深 2 cm 的数据为例,这 4 个波形的波速分别为 $2\,994.01\text{ m/s}$, $2\,832.24\text{ m/s}$, $3\,053.24\text{ m/s}$ 和 $1\,512.85\text{ m/s}$,与铝板中超声表面波的波速理论值 $2\,910\text{ m/s}$ ^[18] 和水中超声纵波的波速理论值 $1\,483\text{ m/s}$ ^[18] 相比,其相对误差分别为 2.8% , 2.6% , 4.9% 和 2% .均与理论值接近,可作为表面缺陷定位的有效依据.在本实验中,由于脉冲激光的能量较小,水中光声转换效率较低,因此 R4 波形相较于其他波形幅值更小,波形较难辨别.在金属板材中传播的超声表面波波形更加清晰,波速更快,可用于进一步研究板材表面缺陷的定位,也说明了粘贴在板材表面的 π PS-FBG 传感器对板材超声表面波探测的灵敏度更高,可以有效避免由于水中的干扰物反射超声波而产生的干扰信号.

3.2 缺陷定位

采用板材超声表面波的时域特征来分析信号与板材缺陷的位置关系.图 3 为改变激光激励源与裂纹缺陷之间的探测间距时, π PS-FBG 传感器接收到的超声响应信号.随着探测间距的等间隔增加, π PS-FBG 传感器的首波响应信号与裂纹缺陷反射信号的飞行时间(TOFD)均向后等间隔推迟,且振幅形成典型的脉冲波,其中缺陷反射信号振幅随距离的增加逐渐衰减.

根据 TOFD 法,已知探测间距的等间隔变化距离 Δd 与相应传播表面波的衍射飞行时差 Δt ,可以得到超声波声速

$$c = \Delta d / \Delta t. \tag{1}$$

根据图 3 标定出 π PS-FBG 传感器首个响应表面波和缺陷反射波传播的间隔距离、到达时间及对应波速,如表 1 所示.

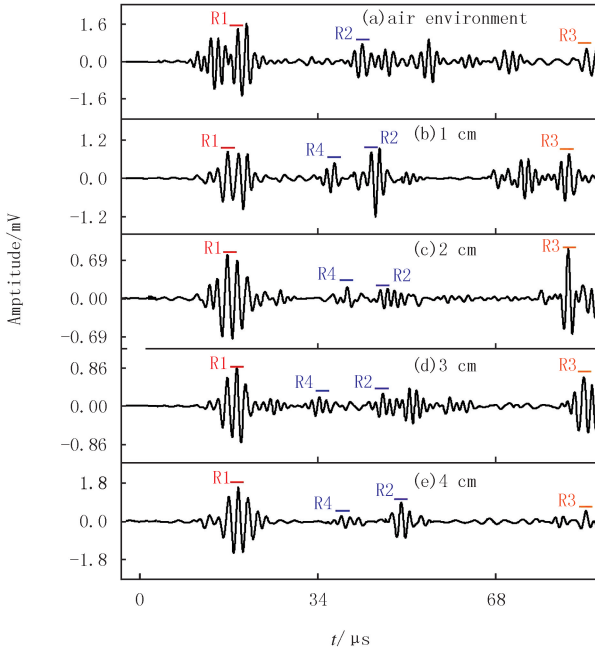


图2 在激励点距缺陷90 mm时不同水深下 π PS-FBG 传感器接收到的超声波信号

Fig.2 Ultrasonic wave received by π PS-FBG under different water depths at the distance of 90 mm between excited spot and the defect

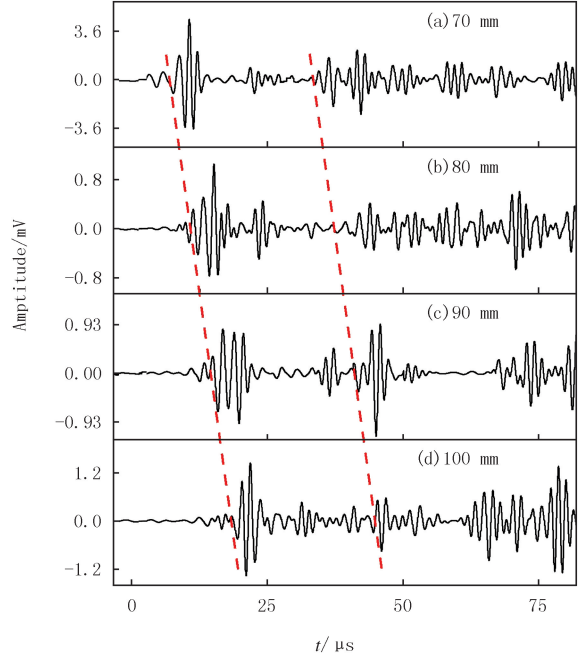


图3 在2 cm水深下激励点距缺陷不同距离时 π PS-FBG 传感器接收到的超声波信号

Fig.3 Ultrasonic wave received by π PS-FBG under 2 cm water depth at different distances between excited spot and defect

表 1 不同探测间距时超声响应信号飞行时间及对应表面波波速

Tab. 1 The TOFD and speeds of ultrasonic surface wave at different detection distances

首波传输 间距 Δd_1 /mm	π PS-FBG 传感器首波 到达时间 $\Delta t_1/\mu s$	对应表面波 波速 $c_1/(m \cdot s^{-1})$	缺陷反射波传输 间距 Δd_2 /mm	缺陷反射波到达 时间 $\Delta t_2/\mu s$	对应表面波波速 $c_2/(m \cdot s^{-1})$
30	10.5	2 857.14	110	36.3	3 030.30
40	14.3	2 797.20	120	43.9	2 733.48
50	16.8	2 976.19	130	45.0	2 888.88
60	21.0	2 857.14	140	46.8	2 991.45

根据表 1 数据可得 π PS-FBG 传感器响应的表面波平均波速分别为 2 871.91 m/s 和 2 911.02 m/s,与铝板中超声表面波波速的理论值 2 910 m/s 接近,误差率分别为 1.3% 和 0.03%. π PS-FBG 传感器在检测缺陷反射超声波信号时出现的误差主要是由于激光超声传播特性受到探测间距影响,探测间距的逐渐增加导致激光超声波信号在传播过程中能量持续耗散、信号逐渐衰减.超声波的散射和模态转换以及环境噪声的扰动虽然会对信号时域造成一定的误差,但从实验结果可以看出,其误差较小.

将铝板中超声波波速理论值代入式(1)进行缺陷定位,表 2 为利用 TOFD 法定位出接收点与缺陷之间距离的平均值,每组重复实验 10 次.为了验证实验的准确性,采用测量结果误差最大值计算相对误差.从结果来看,接收点与缺陷实际距离为 40 mm 的前 4 组和距离为 30 mm 的后 4 组数据,其测量的最大相对误差随着激励点与缺陷距离增大而逐渐减小.当距离 100 mm 时其检测最大误差小于 2%.对比前 4 组与后 4 组数据发现,缺陷位置检测精度和接收点与缺陷实际距离无关.

表 2 不同探测间距下超声信号预测接收点与缺陷距离及与实际距离对比

Tab. 2 Comparison of predicted distance between ultrasonic signal receiving point and defect and actual distance under different detection intervals

激励点距缺陷距离/mm	接收点与缺陷实际距离/mm	接收点与缺陷测量距离/mm	最大相对误差
70	40	37.1±0.2	7.8%
80	40	42.7±0.1	7.0%
90	40	41.4±0.1	3.8%
100	40	40.4±0.3	1.8%
70	30	31.3±0.1	4.7%
80	30	32.6±0.2	9.3%
90	30	29.3±0.2	3.0%
100	30	30.0±0.4	1.3%

4 结 论

以 Al 6061 为测试样品,搭建了一套基于激光超声和 π PS-FBG 的水下板材缺陷检测系统.实验发现水下 π PS-FBG 比空气环境中多接收到一个激光与水面作用产生的纵波信号.随着激励源与 π PS-FBG 距离的增加,超声信号在时域上逐渐延迟.实验中 π PS-FBG 测量的第一个超声波信号波速为 2 871.91 m/s,缺陷反射波的波速为 2 911.02 m/s,与铝板中超声表面波的速度接近,相对误差分别为 1.3%和 0.03%.在激励点与缺陷距离改变的情况下,发现缺陷位置检测精度和接收点与缺陷实际距离无关.另外,测量的缺陷位置的最大相对误差随着激励点与缺陷距离增大而逐渐减小,从而证明该技术可以准确确定板材表面缺陷位置.本研究工作为水下金属构件的在线服役状态检测提供了一种潜在应用技术,为水下构件缺陷无损检测提供可能的技术支持.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.02.08.0001).

参 考 文 献

- [1] 陈波,李伟,张人公,等.百米水深导管架水下裂纹检测方法选择及应用[J].机械工程师,2017(10):69-71.
CHEN B,LI W,ZHANG R G,et al.Selection and application of jacket cracks detection methods subsea within 100 m water depth[J].Mechanical Engineer,2017(10):69-71.
- [2] 许建荣,柳建新,李爱勇,等.水域大地电磁测深中水体对电磁场的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2007,38(3):567-573.
XU J R,LIU J X,LI A Y,et al.Liquid effect upon electromagnetic fields in water area MT exploration[J].Journal of Central South University(Science and Technology),2007,38(3):567-573.
- [3] 王尚可,刘文章,曲建夫,等.浅海声速剖面 and 沉积层对低频率声传播损失的影响[J].舰船科学技术,2018,40(9):100-104.
WANG S K,LIU W Z,QU J F,et al.Effect of sound velocity profile and sediment on low frequency sound transmission loss in shallow water[J].Ship Science and Technology,2018,40(9):100-104.
- [4] LI C,TANG J,CHENG C,et al.FBG Arrays for quasi-distributed sensing:A review[J].Photonic Sensors,2021,11(1):91-108.
- [5] 罗朝莉,朱冰,王波,等.铝板表面裂纹的激光超声检测与信号处理研究[J].电子测量与仪器学报,2023,37(10):41-52.
LUO Z L,ZHU B,WANG B,et al.Research on laser ultrasonic testing and signal processing of surface cracks in aluminum plate[J].Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,2023,37(10):41-52.
- [6] 朱彤,刘向前,周晶.基于光纤光栅传感技术的圆沉箱靠船墩结构健康监测[J].水运工程,2011(5):156-162.
ZHU T,LIU X Q,ZHOU J.Health monitor of berthing piers of cylinder caissons based on fiber grating sensing technology[J].Port & Waterway Engineering,2011(5):156-162.
- [7] 赵瑞,徐荣青,梁忠诚,等.激光激发水中产生超声波的实验研究[J].光学与光电技术,2009,7(4):83-86.
ZHAO R,XU R Q,LIANG Z C,et al.Laser-induced plasma ultrasound waves in water[J].Optics & Optoelectronic Technology,2009,7(4):83-86.
- [8] 朱海,李智忠,孙荣光,等.高灵敏度光纤光栅水下压力传感研究[J].光电子·激光,2007,18(5):536-538.
ZHU H,LI Z Z,SUN R G,et al.Research on fiber grating underwater pressure sensing with high sensitivity[J].Journal of Optoelectronics ·

- Laser,2007,18(5):536-538.
- [9] SAYAL V K, YADAV L L, MAHESHWARI K P. Effect of time profile of laser pulse on the excitation of sound signals in a liquid with a series of laser pulses[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(8): 1754-1761.
- [10] 章金龙. 基于光纤传感网络的连续梁桥施工监控技术研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
ZHANG J L. Based on the optical fiber sensing network of continuous girder bridge construction monitoring technology research[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014.
- [11] BAI X H, HU M L, GANG T T, et al. An ultrasonic sensor composed of a fiber Bragg grating with an air bubble for underwater object detection[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 112: 467-472.
- [12] 李鹏, 赵杨, 周志权, 等. 一种跨介质的水中-空气激光致声探测技术的研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(5): 63-71.
LI P, ZHAO Y, ZHOU Z Q, et al. Research on a cross medium water air laser acoustic detection technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 63-71.
- [13] SUN H B, ZHU J Y. Nondestructive evaluation of steel-concrete composite structure using high-frequency ultrasonic guided wave[J]. Ultrasonics, 2020, 103: 106096.
- [14] EGEREV S V, LYAMSHE V, et al. Optoacoustic sources in the oceanographic experiment[J]. Soviet Physics Acoustics, 1990, 36(5): 452-456.
- [15] 卢国鑫. 一种适用于水下环境激光超声材料检测的超声波强度增强方法及应用: CN114460012A[P]. 2022-05-10.
- [16] 郭古青, 尹梦科, 于隽雅, 等. 基于 π 相移光纤布拉格光栅的超灵敏超声传感器研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 29-35.
GUO G Q, YIN M K, YU J Y, et al. Research on ultra-sensitive ultrasonic sensor based on π phase-shifted fiber Bragg grating[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2022, 50(2): 29-35.
- [17] 刘琳霞, 徐利, 王晴岚. DFB半导体激光器啁啾系数的测量[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 34-38.
LIU L X, XU L, WANG Q L. Measurement of the chirp parameter in DFB semiconductor laser diode[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2018, 46(6): 34-38.
- [18] 魏坤霞. 无损检测技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2016.

Research on defect detection of underwater aluminum plate by laser ultrasonic based on π PS-FBG sensing technology

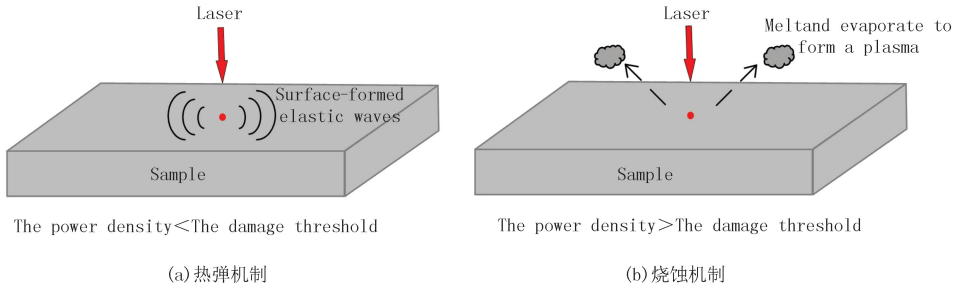
Guo Guqing, Bai Shengkang, Tian Yali, Gong Ting, Sun Xiaocong, Zhou Yueting, Qiu Xuanbing, Li Chuanliang

(College of Applied Sciences, Taiyuan University of Science and Technology; Shanxi Engineering Research Center of Precision Measurement and Online Detection Equipment; Shanxi Center of Technology Innovation for Light Manipulations and Applications, Taiyuan 030024, China)

Abstract: To evaluate the service status of metal components serving underwater, an underwater plate defect detection system based on laser ultrasound and π phase shift(PS) fiber Bragg grating(π PS-FBG) was developed. To study the propagation law of underwater laser ultrasound, laser ultrasound testing experiments were conducted on Al6061 sheet metal at different water depths. Compared with the propagation of ultrasonic signals in the air, experiments have found that underwater π PS-FBG receives an additional waveform of ultrasonic signals, which is the longitudinal wave signal generated by the first interaction between the laser and the water surface. As the distance between the excitation source and π PS-FBG increases, the delay of the ultrasonic signal in the time domain also increases. The wave velocity of the first ultrasonic signal excited by π PS-FBG laser received by π PS-FBG is 2 871.91 m/s, and the wave velocity of the defect-reflected wave is 2 911.02 m/s, which is close to the velocity of the ultrasonic surface wave in the aluminum plate, with relative errors of 1.3% and 0.03%, respectively. When the distance between the excitation source and the defect changes, it is found that the detection accuracy of the defect position is independent of the distance of the defect, and the relative error of positioning on the defect position decreases with the increase of the distance. This study provides a potential application technology for service status detection of underwater metal components (including South-to-North Water Diversion Project), which has certain significance for improving the safety and reliability of underwater structures.

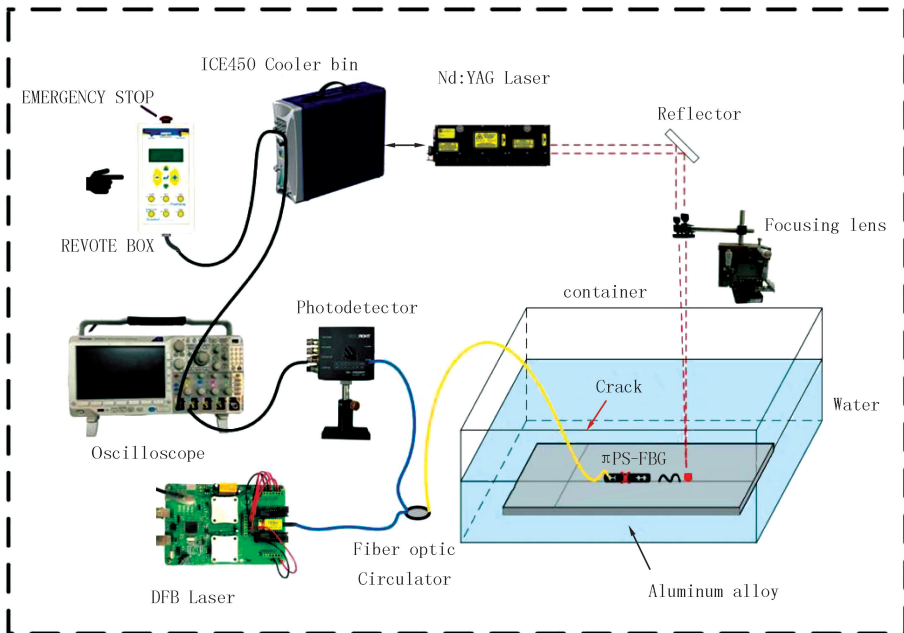
Keywords: laser ultrasound; π PS-FBG; Al6061; non destructive testing; defect localization; South-to-North Water Diversion Project

附录



图S1 激光激励机制原理图

Fig.S1 Principle diagram of laser excitation mechanism



图S2 基于 π PS-FBG 传感的激光超声检测系统实验装置示意图

Fig.S2 Schematic diagram of experimental setup of laser ultrasonic inspection based on π PS-FBG sensor

表 S1 Al6061 的化学成分

Tab. S1 Chemical composition of Al6061

元素	Mg	Si	Ti	Cr	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
质量分数/%	0.8~1.2	0.4~0.8	≤0.15	0.04~0.35	≤0.7	0.15~0.40	≤0.15	≤0.25	余量

表 S2 Al6061 的力学参数

Tab. S2 Mechanical parameters of Al6061

弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/K	密度/(kg · m ⁻³)	拉梅参数 λ /GPa	拉梅参数 μ /GPa
71	0.33	2.3E-5	2 700	51.81	26.69