

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108209

基于倒置声学黑洞的弹性波汇聚检测研究*

曾周末¹, 李广智¹, 黄新敬¹, 李 健¹, 杜立普²

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072;

2. 宁夏回族自治区水利工程建设中心 宁夏 751000)

摘 要:传统的嵌入式声学黑洞(ABH)以材料的幂律裁剪方式达到阻抗的变化,实现弹性波的汇聚或控制,但同时也破坏了材料本身结构,减小了材料的刚度,限制了其在检测领域作为增敏结构的应用。本文提出一种倒置粘贴式的 ABH 结构,在一定范围内其厚度变化符合幂律衰减规律,尺寸小巧,易于粘附于被测物体表面而不破坏被测物。有限元仿真结果显示,倒置 ABH 在中高频激励下在圆心附近有着 7 倍左右的弹性波汇聚效果。激光多普勒测振仪扫描测试表明,倒置 ABH 结构具备良好的弹性波汇聚效果,可将弹性波放大 2~4 倍。将光纤布拉格光栅(FBG)粘贴在该倒置 ABH 表面,采用强度解调,构成具有汇聚放大作用的弹性波传感器,在无损检测等方面具备重要的应用价值。

关键词: 声学黑洞;弹性波检测;传感器;光纤布拉格光栅

中图分类号: TH82 TB2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410

Elastic wave focusing detection based on the inverted acoustic black hole

Zeng Zhoumo¹, Li Guangzhi¹, Huang Xinjing¹, Li Jian¹, Du Lipu²

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Ningxia Hui Autonomous Region Water Conservancy Project Construction Center, Ningxia 751000, China)

Abstract: Traditional acoustic black hole (ABH) changes the impedance by power law cutting of the material to achieve elastic wave focusing or control. But, at the same time, the material structure is destroyed, the rigidity of the material is reduced, and its application is limited in the field of elastic wave detection as a sensibilization structure. In this article, an upside-down adhesive ABH structure is proposed. In a certain range, its thickness change conforms to the power attenuation law, and it is small and easy to attach to the surface of the object to be measured without damaging the object. Finite element simulation results show that the inverted ABH has about 7 times of elastic wave amplification effect near the center of the circle under medium and high frequency excitation. Scanning test with the laser Doppler vibrometer shows that the inverted ABH has good elastic wave focusing effect and can amplify the elastic wave about 2-4 times. fiber Bragg grating(FBG) is bonded on the surface of the inverted ABH and the intensity demodulation is utilized to form an elastic wave sensor with focusing and amplification effect, which has important application value in the domain of nondestructive testing.

Keywords: acoustic black hole; elastic wave detection; sensor; fiber Bragg grating

0 引 言

20 世纪 80 年代,加拿大物理学家 Unruh^[1]首次提出只吸收声音的人造声学黑洞。声学黑洞(acoustic black hole, ABH)是黑洞的一个声学类比,以固体中的声波类

比时空中的光波,即声波不能逃离的开放区域边界及其内部。传统声学黑洞基于“有效势”概念,通过设计材料的参数分布以幂律裁剪来实现材料阻抗的变化,引起弹性波相速度和群速度的改变,从而实现波能量的聚集或控制^[2]。

现有研究表明,声学黑洞的厚度变化符合幂函数的

收稿日期:2021-07-07 Received Date: 2021-07-07

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0808600)、国家自然科学基金(61803280, 61973227, 62073233)项目资助

衰减规律^[3],且指数不小于2,即 $h(x) = \varepsilon x^m (m \geq 2)$ 时,弹性波传播至ABH区域时波速减小,波长变短。这种特性使得声学黑洞在能量聚集、局部振动控制、降噪等方面有着很大的应用潜力。理想情况下,当ABH的厚度减小到0时,波速衰减为0,不会发生尖端反射且在此处波幅趋于无穷大。实际条件下由于加工工艺的限制,难以实现理想的ABH结构,在结构厚度减小到一定值时产生截断,即使很小的截断厚度也会对ABH性能产生很大的影响,但是在非完美的声学黑洞结构中,依然能实现宽频能量的聚集。

在ABH具体结构方面,典型的一维ABH结构有楔形梁结构以及处于空间角度对于楔形梁结构进行改良的螺旋结构^[4];典型的二维ABH结构分为幂律变化的圆坑结构和槽型结构。特殊地,Wei等^[5]基于声学变换方法设计出了任意形状的ABH。

在关于ABH中弹性波的传播、汇聚方面,Conlon等^[6]将多个二维ABH以周期性规律布置在薄板结构中,计算分析了薄板结构中的振动和辐射响应,研究发现缩小ABH的中心孔径尺寸,能够大大提高ABH对于一定频率下弹性波的汇聚效应。Bayod^[7]对含有ABH的梁和板结构进行实验观察和分析,结果表明声学黑洞效应在中高频范围内的有效性。Li等^[8]建立了ABH的动力学传播模型,分析解释了其传播效应。Huang等^[9-10]通过功率流和弹性波轨迹的预测等方法分析了ABH的能量聚集特性。Schiller等^[11]通过分析发现非完美ABH效应将使结构产生高能量的密度区域,研究表明能量并不集中于中心位置,而是偏移在多个点。Huang等研究了弯曲波在这种广义ABH结构中的能量聚焦特性,从几何声学近似的角度进行了数值积分,分析了波的传播特性,并讨论了几何参数对ABH结构中弯曲波聚集特性的影响。研究表明弯曲波经过多次反射,聚集于中心平台的多个点上,且各点声波存在一定的相位差。Tang等^[12]利用基于拉格朗日方程的小波分解半解析模型,研究薄壁结构中弯曲波传播特性,数值计算结果表明,其系统损耗因子和能量分布均显著增加。Du等^[13]研究了ABH直径、方向、数量和截断厚度对ABH圆板的影响,为ABH的结构优化提供了理论支持。

上述ABH结构都是以牺牲结构刚度的幂律裁剪方式来实现ABH效应,虽然具备良好的ABH效应,但破坏了板梁材料本身的结构,限制了其在特定场合的应用。因此,本文提出一种倒置的ABH结构,该结构可以粘附于材料表面而不破坏被测结构、不降低其强度。开展仿真和实验,验证其具备良好的弹性波汇聚放大能力,证明其在无损检测等方面具有很大的潜力。

1 倒置声学黑洞模型与仿真

1.1 倒置声学黑洞模型

本文提出的倒置的声学黑洞模型如图1所示。在 $r_1 < r < r_2$ 时,声学黑洞的厚度符合幂律变化 $h(r) = \varepsilon r^m (m = 6)$,其中 $h(r)$ 为距离圆心 r 处的厚度; ε 为常数; m 称为声学黑洞效应指示因子,为尽量减小倒置ABH尺寸,增大弹性波的汇聚效果, m 定为6。在 $r < r_1$ 区域内, $h(r) = h_1$, h_1 称为截断厚度。理想情况下,当 $h_1 = 0$ 时,能量将全部汇聚在圆心处,位移大小将趋近于无限大。

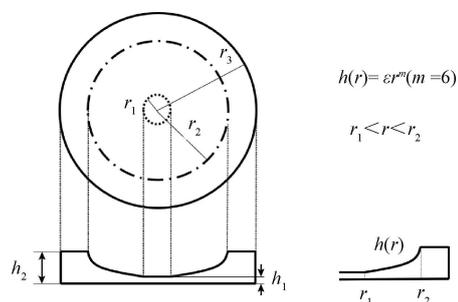


图1 倒置ABH模型

Fig. 1 The inverted ABH model

倒置的ABH与二维ABH截面对比图如图2所示。实际受到加工工艺和结构刚度的限制, h_1 不可能为0,ABH区域无法吸收全部弹性波,有一定的入射波被反射,弹性波汇聚点也将略偏于圆心。

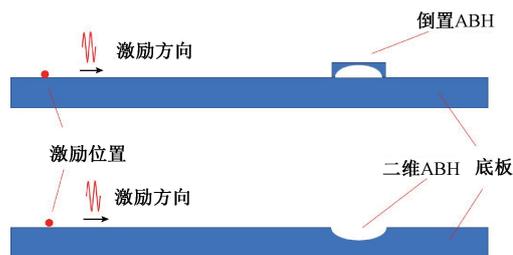


图2 倒置ABH与传统的减材ABH对比图

Fig. 2 Comparison between the inverted ABH and the conventional ABH

倒置ABH结构参数如表1所示。

1.2 倒置声学黑洞仿真

1) 有限元模型

为研究倒置ABH结构中波的聚集效应,选用COMSOL有限元软件进行仿真,其中,底板材质为铝,倒置声学黑洞材料为树脂。网格划分如图3所示。

表 1 ABH 参数
Table 1 ABH parameters

| 参数 | 值 |
|--|-------|
| 材料密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | 1 150 |
| 材料弹性模量/GPa | 200 |
| 材料泊松比 | 0.4 |
| r_1/mm | 5 |
| r_2/mm | 10 |
| r_3/mm | 10.5 |
| h_1/mm | 0.1 |

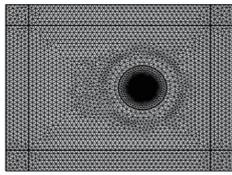


图 3 网格剖分
Fig. 3 Grid division

底板四周矩形区域为低反射边界,到达边界的弹性波不会发生反射,消除因反射波产生的仿真误差^[14],而在实际应用中,由于材料尺寸较大,反射波往往也可忽略。激励信号为三计数脉冲信号^[15],表达式为 $0.5[1 - \cos(2\pi f_0 t/n)] \sin(2\pi f_0 t)$,其中 f_0 为激励信号频率, $n = 3$ 。激励位置如图 4 所示,线激励距离圆心 30 mm。

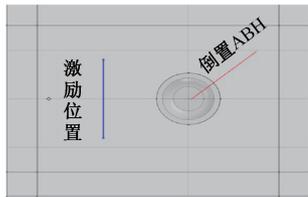


图 4 激励位置
Fig. 4 Excitation position

2) 弹性波信号的传播

以 50 kHz 为例说明弹性波的传播过程,图 5 为激励信号频率为 50 kHz、幅值为 0.5 N 时弹性波的传播。由图 5 可知,激发的弹性波由底板局部向声学黑洞区域扩散,当弹性波传至倒置 ABH 区域时,弹性波信号在结构圆心附近产生聚集,表明倒置的 ABH 结构具有很好的能量聚集效果。具体来说,当弹性波刚到达声学黑洞区域时,汇聚点的位置在偏离激励一侧,一段时间(3.6×10^{-5} s)后逐渐向靠近激励一侧偏移,在靠近激励一侧存在较短时间后(0.9×10^{-5} s),弹性波逐渐减小至基本消失。

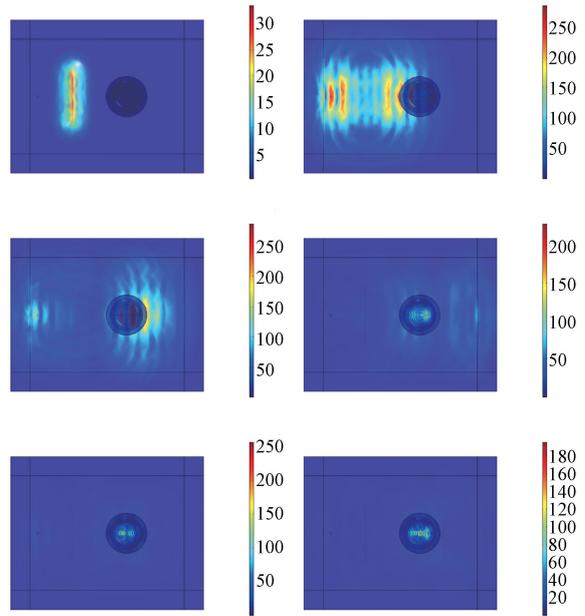


图 5 弹性波在倒置 ABH 上的传播
Fig. 5 Propagation of elastic waves on the inverted ABH

取倒置 ABH 远离激励一侧的位移最大值点,同时取底板相同距离下(30 mm)的同一条直线上一点,以 50 kHz 的激励为例,绘制法向位移波形,如图 6 所示从仿真的时间—位移图可以看出,倒置的 ABH 结构对于 50 kHz 的弹性波具有汇聚效果,放大效果约为 8.93 倍。

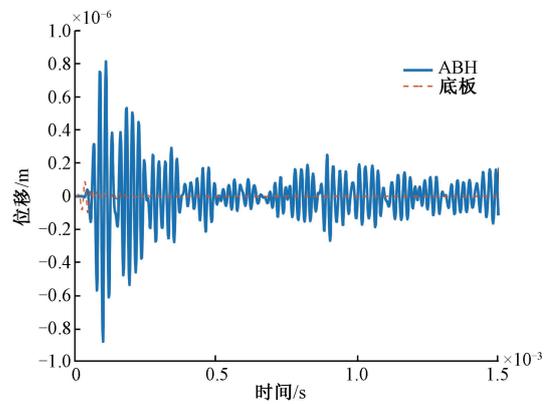


图 6 50 kHz 下底板和 ABH 的位移信号
Fig. 6 Displacement signal of baseboard and ABH at 50 kHz

3) 不同弹性波信号仿真分析

在距离倒置 ABH 中心 30 mm 的铝板处,施加从 10~200 kHz 频率的激励信号。绘制法向位移波形,结果表明在 30~160 kHz 的中高频范围内较好地还原出弹性波信号。而对于 30 kHz 以下、160 kHz 以上的信号无法还原出原波形。图 7 分别列出 20、40、80、160 kHz 的波形信号。

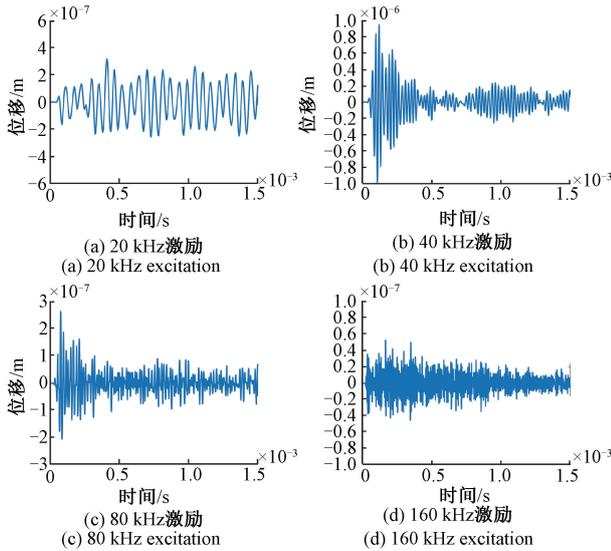


图7 不同频率下 ABH 位移信号

Fig. 7 ABH displacement signals at different frequencies

分别整理 10~200 kHz 的弹性波激励下倒置 ABH 底面法向位移、底板法向位移、法向位移放大倍数至表 2~4, 表中位移表示位移信号绝对值的最大值。

结果表明在 40 kHz 以上的中高频范围, 倒置 ABH 有着 7 倍左右的位移放大效果, 在此范围内倒置声学黑洞结构有着非常好的能量汇聚效果, 某些频率下放大效果接近 9 倍。而在 100~200 kHz 的范围, 声学黑洞结构也拥有 5 倍左右的位移放大效果, 而在低频范围(30 kHz 以下)倒置声学黑洞的能量汇聚效果不明显, 甚至会低于铝板上的弹性波信号。综上, 在 30~160 kHz 中高频范围内, 倒置 ABH 不仅可以不同程度的弹性波汇聚, 而且可以有效保存原波形信息; 而在 160 kHz 以上范围, 倒置 ABH 仍然具备良好的弹性波汇聚效果, 弹性波损失更加缓慢, 但会丢失原波形信息。

表 2 倒置 ABH 底面法向位移

Table 2 Normal displacement of the inverted ABH's bottom

| | | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 频率/kHz | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| 位移/m | 9.32×10^{-7} | 3.19×10^{-7} | 4.66×10^{-7} | 9.49×10^{-7} | 8.13×10^{-7} | 5.63×10^{-7} | 4.02×10^{-7} | 2.64×10^{-7} |
| 频率/kHz | 90 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | |
| 位移/m | 1.74×10^{-7} | 1.09×10^{-7} | 7.05×10^{-8} | 4.62×10^{-8} | 5.31×10^{-8} | 4.62×10^{-8} | 4.06×10^{-8} | |

表 3 底板法向位移

Table 3 Normal displacement of the baseboard

| | | | | | | | | |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 频率/kHz | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| 位移/m | 1.25×10^{-6} | 3.1×10^{-7} | 1.49×10^{-7} | 1.19×10^{-7} | 9.1×10^{-8} | 6.33×10^{-8} | 4.6×10^{-8} | 3.57×10^{-8} |
| 频率/kHz | 90 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 | |
| 位移/m | 2.77×10^{-8} | 2.24×10^{-8} | 1.53×10^{-8} | 5.17×10^{-9} | 7.42×10^{-9} | 5.17×10^{-9} | 8.27×10^{-9} | |

表 4 法向位移放大倍数

Table 4 Normal displacement magnification

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 频率/kHz | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 120 | 140 | 160 | 180 | 200 |
| 倍数 | 0.74 | 1.02 | 3.12 | 7.97 | 8.93 | 8.89 | 8.73 | 7.39 | 6.31 | 4.88 | 4.61 | 8.94 | 7.15 | 8.93 | 4.91 |

2 实验研究

2.1 激光测振仪验证

为验证上述仿真结果, 以 50 kHz 激励信号为例, 进行激光测振仪扫描实验。使用 Polytec 公司 PSV-500 激光测振仪对铝板和 ABH 进行位移测量^[16-17]。铝板上的输入弹性波信号由中心频率为 50 kHz 的压

电陶瓷换能器 (piezoelectric transducer, PZT) 激励产生。压电换能器的激励信号是由信号发生器产生 4 V、50 kHz、间隔 1 s 的脉冲信号经功率放大器放大 20 倍得到, 压电换能器距离倒置 ABH 30 mm。上位机采集振动位移信号后用 MATLAB 处理并绘图分析。实验底板材料为 6061 铝制方薄板, 边长 $a = 500$ mm, 板厚 $h = 5$ mm, 密度为 2.70 g/cm^3 , 弹性模量 68.9 GPa, 泊松比 0.33。倒置 ABH 结构置于底板中心。在倒置声学黑洞结构表面和待测铝板表面粘贴

反光纸,以增强激光漫反射光强,得到更精确的实验结果。实验中分别测量了倒置 ABH 结构和未放置倒置 ABH 的底板的位移信号。倒置 ABH 和铝板之间涂覆超声耦合剂以减少空气层振动而造成的能量损失。实验装置如图 8 所示。

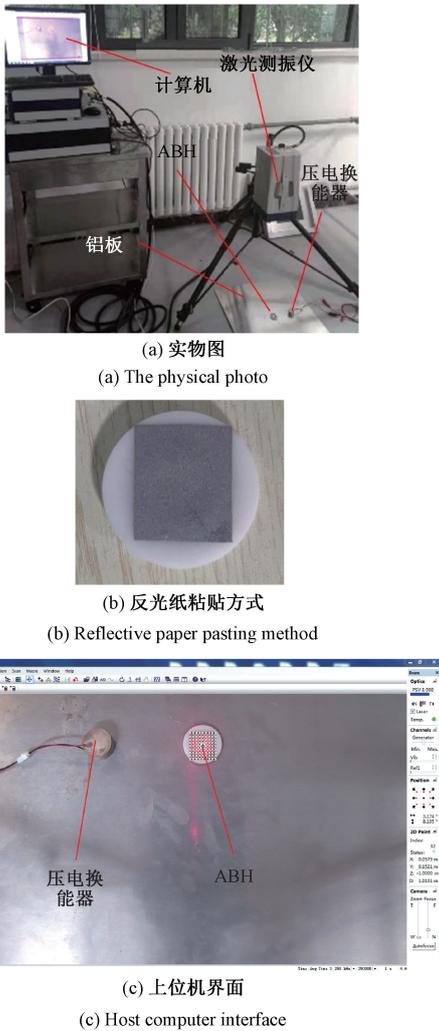


图 8 激光测振仪实验
Fig. 8 Laser vibrometer experiment

将 ABH 表面 9×9 个点的测量位移,用 MATLAB 处理以后绘制强度图如图 9 所示,图中数值为位移信号绝对值的最大值。可以看到第 1~4 次实验中,汇聚点在圆心偏离激励的位置;在第 5、6 次实验中,汇聚点向激励方向偏移,与仿真中得到的不同位置焦点持续时间基本一致。

采集到激光测振仪获取的最佳 ABH 汇聚点与底板上的位移波形,利用 MATLAB 分别绘制,如图 10 所示。可以看到,ABH 汇聚点处的位移大小为 3.29×10^{-9} m,

未粘贴 ABH 的铝板在相同激励下的位移为 8.65×10^{-10} m,放大效果约为 3.80 倍。而在非最佳汇聚时刻,汇聚效果也有两倍以上。放大倍数与仿真结果存在一定差距的主要原因为铝板与声学黑洞之间存在空气使得弹性波能量有损失。

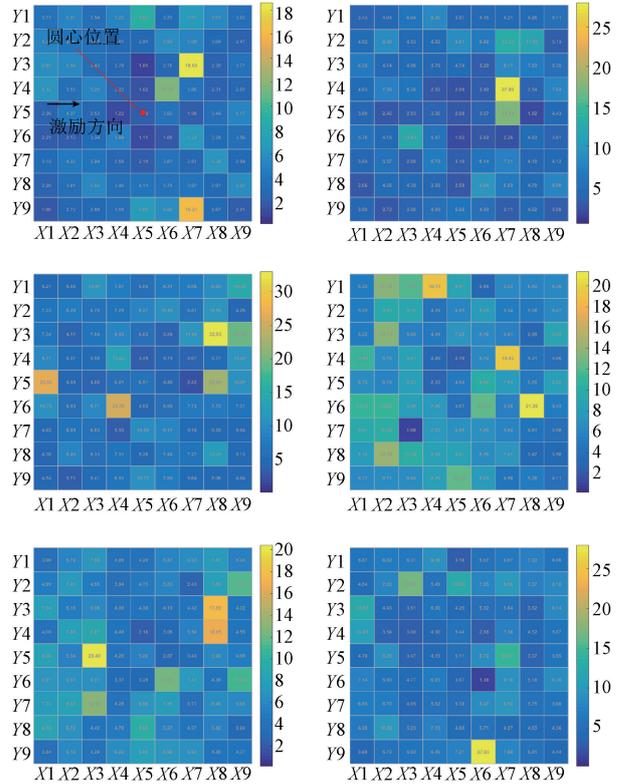
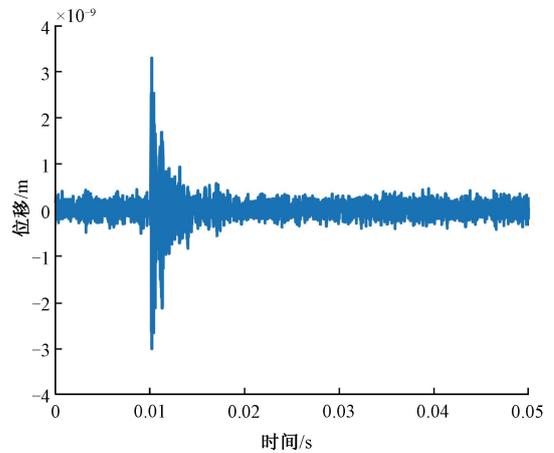


图 9 倒置 ABH 的 6 次实验汇聚效果
Fig. 9 Inverted ABH's focusing effectiveness in six experiments



(a) ABH 汇聚点
(a) ABH focusing point

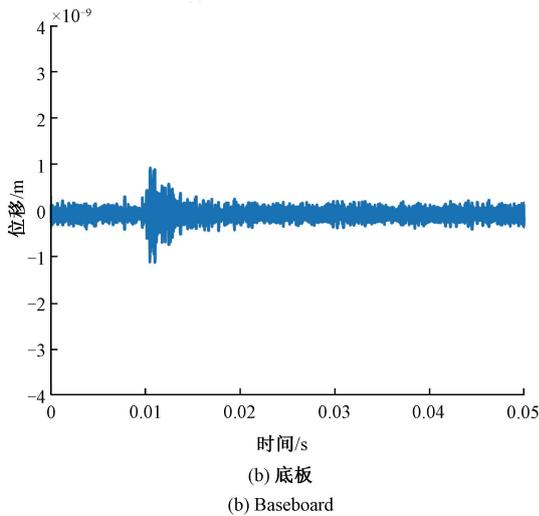


图 10 ABH 和底板位移信号
Fig. 10 ABH and baseboard's displacement signals

2.2 光纤光栅传感

光纤布拉格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 的传感机理是当光源射入栅区时,大部分的光会通过栅区,而特定波长的光则会发生反射,这个波长量称为 FBG 的中心波长,应变和温度是能显著改变 FBG 中心波长的物理量^[18]。

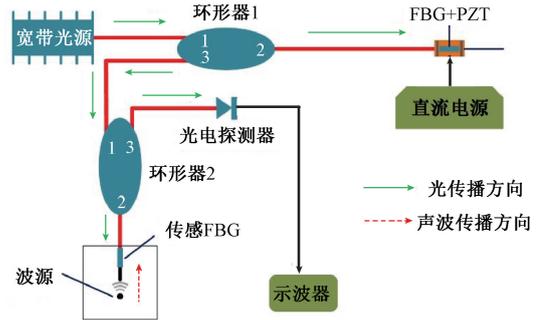
FBG 栅区部分用紫外固化光学胶粘贴在 r_1 范围内,粘贴前以一定预紧力拉伸^[19],确保光纤可以随着结构位移而发生形变,实验光纤光栅中心波长为 1 550 nm。粘贴 FBG 粘贴方式如图 11 所示。



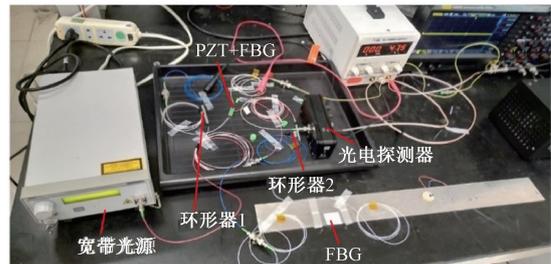
图 11 FBG 粘贴方式
Fig. 11 FBG bonding manner

解调部分采用实验室自研的双 FBG+PZT 强度解调系统。该系统由宽带光源、环形器、FBG+PZT 构成的匹配 FBG、传感 FBG、光电探测器和示波器组成。宽带光源的作用是为系统提供宽带输入光;匹配 FBG 由一个与传感 FBG 波长相近、其他光学参数相同的 FBG 施加一定预紧力整体粘贴于压电陶瓷的一个端面上制成,作用是传感 FBG 进行波长匹配^[20-21],波长匹配指的是通过改变 PZT 两端施加的驱动电压,使得匹配 FBG 发生拉伸或者压缩,从而改变匹配 FBG 的中心波长;环形器可以隔离

光路,避免光反射回光源造成损耗。如图 12 所示,宽带光源首先产生宽带光通过环形器 1 的 2 端入射到匹配 FBG 中,匹配 FBG 反射满足 Bragg 条件的窄带光由环形器 1 的 2 端输入,并从 3 端输出。窄带光通过环形器 2 的 2 端输出至传感 FBG,传感 FBG 的反射光由环形器 2 的 2 端输入、经环形器 2 的 3 端输出给光电探测器,最终输出的光信号为两个 FBG 光谱重叠部分以达到强度解调的效果。光电探测器将光信号转为电压信号,在示波器上显示并存储。



(a) 原理图
(a) Schematic diagram



(b) 实物图
(b) Experimental diagram

图 12 双 FBG+PZT 解调系统
Fig. 12 Dual FBG+PZT demodulation system

激励信号由信号发生器产生 4 V、50 kHz 的正弦信号经功率放大器放大 20 倍获得,施加到中心频率为 50 kHz 的压电换能器上,在铝板上激发出弹性波。激励位置距离倒置 ABH 中心 30 mm。底板和倒置 ABH 的 4 次测量结果如表 5 所示,表中电压量^[22]为电压信号峰峰值的 1/2。

表 5 FBG 测量的放大倍数
Table 5 FBG measured magnification

| 实验次数 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------|------|-------|-------|-------|
| 底板/mV | 69.4 | 76.9 | 86.7 | 62.2 |
| ABH/mV | 91.6 | 108.3 | 101.2 | 133.2 |
| 平均放大倍数 | 1.47 | | | |

第2次实验结果绘制底板和 ABH 的时间—电压时域和频域波形曲线分别如图 13 和 14 所示。放大倍数大约为 1.47 倍。由于弹性波信号经历从铝板传至倒置 ABH 结构再至光纤光栅的过程,且汇聚点位置与光纤位置可能存在偏差,使得弹性波的实际放大倍数小于激光扫描结果。

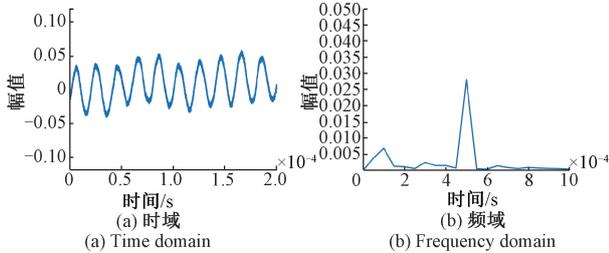


图 13 FBG 测得的底板上的信号

Fig. 13 Signals measured by FBG on baseboard

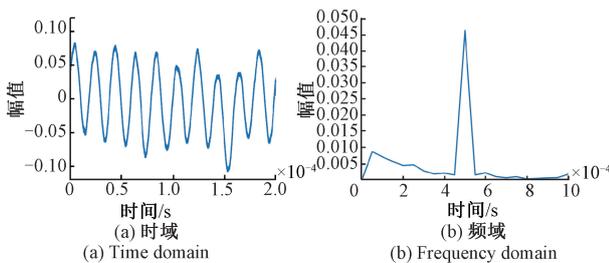


图 14 FBG 测得的 ABH 上的信号

Fig. 14 Signals measured by FBG on ABH

3 结 论

本文提出了一种倒置可粘贴的 ABH 结构,该结构在 30~200 kHz 的中高频范围均有着良好的弹性波汇聚效果且在 30~160 kHz 范围内能够较好地复现原信号波形。仿真结果表明,倒置 ABH 对于中高频范围内的弹性波具备 7 倍以上的位移汇聚放大效果。以 50 kHz 激励信号为例,激光测振仪扫描实验表明,倒置 ABH 具有 2~4 倍的位移放大效果。将光纤光栅粘贴在倒置 ABH 表面,构成了光纤光栅传感器,相比裸光纤具备更高的灵敏度。进一步的研究方向是增加光纤光栅与 ABH 之间、ABH 和待测材料间的耦合度,减小弹性波信号在空气层的损失。

参考文献

[1] UNRUH W G. Experimental black-hole evaporation? [J]. *Physical Review Letters*, 1981,

46(21): 1351-1353.

[2] 方恒忠,周开虎,宋玉明. 声学黑洞简介[J]. *大学物理*, 2013, 32(1): 30-32,41.

FANG H ZH, ZHOU K H, SONG Y M. An Introduction to acoustic black holes [J]. *University Physics*, 2013, 32(1): 30-32,41.

[3] 黄薇,季宏丽,裘进浩,等. 二维声学黑洞对弯曲波的能量聚集效应[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(9): 51-57,92.

HUANG W, JI H L, QIU J H, et al. Energy aggregation effect of a two-dimensional acoustic black hole on curved waves [J]. *Vibration and Shock*, 2017, 36(9): 51-57, 92.

[4] PELAT A, GAUTIER F, CONLON S C, et al. The acoustic black hole: A review of theory and applications [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 476: 115316.

[5] WEI Q, CHENG Y, LIU J. Acoustic omnidirectional superabsorber with arbitrary contour [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(9): 094105.

[6] CONLON S C, FAHNLIN J B. Numerical analysis of the vibroacoustic properties of plates with embedded grids of acoustic black hole [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2015, 137(1): 447-447.

[7] BAYOD J J. Experimental study of vibration damping in a modified elastic wedge of power-law profile [J]. *Journal of Vibration & Acoustic*, 2011, 133(6): 1754-1754.

[8] LI X, QIAN D. Analysis on vibration energy concentration of the one-dimensional wedge-shaped acoustic black hole structure [J]. *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 2018, 29(10): 2137-2148.

[9] HUANG W, JI H L, QIU J H, et al. Wave energy focalization in a plate with imperfect two-dimensional acoustic black hole indentation [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2016, 138(6): 061004.

[10] HUANG W, JI H L, QIU J H, et al. Analysis of ray trajectories of flexural waves propagating over generalized acoustic black hole indentations [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 417: 216-226.

- [11] SCHILLER N H, LIN S C S, CABELL R H, et al. Design of a variable thickness plate to focus bending waves [M]. New York: Proceedings of the ASME Noise Control and Acoustics Division Conference, 2012.
- [12] TANG L L, LI C. Enhanced acoustic black hole effect in beams with a modified thickness profile and extended platform [J]. Journal of Sound and Vibration, 319: 116-126.
- [13] DU X F, HUANG D C, FU Q D, et al. Effects of acoustic black hole parameters and damping layer on sound insulation performance of abh circular plate [J]. Applied Science, 2019, 9(27): 5366.
- [14] DENG J, ZHENG L, GAO N S. Broad band gaps for flexural wave manipulation in plates with embedded periodic strip acoustic black holes [J]. International Journal of Solids and Structures, 2021, 224: 111043.
- [15] 王博涵, 杨德庆, 夏利福. 内嵌声学黑洞薄板振动特性数值模拟方法研究 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(4): 30-39.
- WANG B H, YANG D Q, XIA L F. Numerical simulation of vibration characteristics of thin plate with embedded acoustic black hole [J]. Chinese Ship Research, 2019, 14(4): 30-39.
- [16] FEURTADO P A, CONLON S C. Wavenumber transform analysis for acoustic black hole design [J]. Acoustical Society of America, 2016, 140(1): 718-727.
- [17] ZHAO L X, LAI C Q, YU M. Modified structural Luneburg lens for broadband focusing and collimation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144: 106868.
- [18] 洪成雨, 鲍成志, 武亚军, 等. 增材制造制备性能可控的FBG压力传感器研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 30-38.
- HONG CH Y, BAO CH ZH, WU Y J, et al. Study on preparation of FBG pressure sensor with controllable properties by additive manufacturing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 30-38.
- [19] 江舒, 李涛, 林杰俊, 等. 船用光纤光栅应变传感器开发与应用研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 35-42.
- JIANG SH, LI T, LIN J J, et al. Development and application of marine fiber grating strain sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 35-42.
- [20] SCHENATO L, RONG Q Z, SHAO Z H, et al. Highly sensitive FBG pressure sensor based on a 3D-printed transducer [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(18): 4784-4790.
- [21] FU T L, CHEN T, LI J, et al. Broadband elastic wave detection based on dual FBGs capable of automatically matching the spectra [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(11): 115119.
- [22] 许兆文, 盛秋琴, 施可彬, 等. 光纤光栅振动传感实验研究 [J]. 南开大学学报(自然科学版), 2001(2): 79-81, 87.
- XU ZH W, SHENG Q Q, SHI K B, et al. Experimental study on fiber grating vibration sensing [J]. Journal of Nankai University (Natural Science edition), 2001(2): 79-81, 87.

作者简介



曾周末, 1982年和1985年于华中工学院分别获得学士学位和硕士学位, 1993年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院讲席教授、博士生导师, 主要研究方向为检测技术及仪器。

E-mail: zhzmeng@tju.edu.cn

Zeng Zhoumo received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Huazhong University of Science and Technology in 1982 and 1985, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 1993. He is currently a professor and a Ph. D. advisor in the School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interest includes detection technology and instrument.



李广智, 2019年于天津科技大学获得学士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士研究生, 主要研究方向为基于声人工结构的管道泄漏检测。

E-mail: gzli4555@tju.edu.cn

Li Guangzhi received his B. Sc. degree from Tianjin

University of Science and Technology in 2019. He is currently a master student in the School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His research interest is pipeline leak detection based on acoustic artificial structure.



黄新敬 (通信作者), 2010年和2016年于天津大学分别获得学士学位和博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为管道缺陷检测, 声人工结构传感器, 智能感知, 磁声检测。

E-mail: huangxinjing@tju.edu.cn

Huang Xinjing (Corresponding author) received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Tianjin University in 2010 and 2016, respectively. He is currently an associate professor and a

master advisor in the School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include pipeline defect detection, acoustic artificial structure sensor, intelligent perception, magnetic and acoustic detection.



杜立普, 2012年于河海大学获得学士学位, 2015年于长春理工大学获得硕士学位, 现为宁夏回族自治区水利工程建设中心工程师, 主要研究方向为水利自动化信息化。

E-mail: dulipu@163.com

Du Lipu received her B. Sc. degree from Hohai University in 2012 and received her M. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2015. She is currently an engineer at Ningxia Hui Autonomous Region Water Conservancy Project Construction Center. Her main research direction is water conservancy automation and informatization.