DOI:10.19652/j.cnki.femt.2204390

基于空间滤波器的三明治装甲复合材料结构损伤监测研究

张 猛 江 剑 高 尚 张子瑞
(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘 要:三明治装甲复合材料因其大厚度多层多种复合材料结构导致难以准确获得 Lamb 波在结构中的传播速度,给损伤监测的准确性带来较大难度,而基于空间滤波器的结构健康监测技术能够在不依赖 Lamb 波传播速度的情况下进行损伤定位。基于此,利用空间滤波器损伤定位的方法,针对由氧化铝陶瓷,T700 碳纤维,TC4 钛合金 3 种材料构成的 5 mm 厚度的三明治装甲复合材料,在表面布置两组压电传感器阵列获得损伤相对于传感器阵列的角度,再利用公式计算出损伤位置。实验结果表明,该方法能够实现对 5 mm 厚度的三明治装甲复合材料进行损伤定位,且定位误差在 1 cm 以内。

关键词:结构健康监测;装甲复合材料;空间滤波器;Lamb 波;损伤定位
中图分类号: TG115.28 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**: 510.4010

Research on damage monitoring of sandwich armor composite structure based on spatial filter

Zhang Meng Jiang Jian Gao Shang Zhang Zirui
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Sandwich armor composite is difficult to accurately obtain the propagation velocity of Lamb waves in the structure due to its large thickness, multi-layer and multiple composite structures, which brings great difficulty to the accuracy of damage monitoring. The structure health monitoring technology based on spatial filter can locate the damage without relying on the speed of Lamb waves. Based on this, using the spatial filter damage location method, for a sandwich armor composite with a thickness of 5 mm composed of alumina ceramic, T700 carbon fiber and TC4 titanium alloy. Two sets of piezoelectric sensor arrays are arranged on the surface to obtain the angle of damage relative to the sensor arrays, and then use the formula to calculate the damage location. The experimental results show that the method can locate the damage of sandwich armor composites and the positioning error is within 1 cm.

Keywords: structure health monitoring; armor composites; spatial filter; Lamb wave; damage localization

0 引 言

自 20 世纪 60 年代以来,装甲材料向着“高强度、高硬度、高韧性、低密度”的方向发展[1]。由抗弹陶瓷材料为面板,金属材料为背板,夹层采用复合材料形成的三明治装甲复合材料具有高硬度、高防弹性能、低密度等特点满足了现代化的需求[2-3]。不过在层合装甲复合材料的长期使用中,很容易造成内部分层、基体开裂和纤维断裂等损伤,降低材料的性能和疲劳强度[4],如果没有及时发现和维修,会带来严重的安全隐患,所以对三明治装甲复合材料的损伤监测具有重要意义。

基于 Lamb 波的结构健康监测技术通过在结构上粘贴压点传感器,采集并分析 Lamb 波在结构中的响应信号进行损伤监测,具有对结构损伤敏感、监测范围大等优点,广泛应用于复合材料损伤监测研究[5-6]。杨宇等[7]在 2 mm 厚的 T300/BA9916 碳纤维增强环氧树脂基复合材料中,利用结构损伤概率曲线测定方法进行复合材料分层损伤监测研究。王丹宏等[8]利用 Lamb 波的能量和飞行时间计算各通道损伤因子监测碳纤维复合材料的疲劳损伤。但是,以上方法均是对单一或两种材料复合形

收稿日期:2022-10-06

成的小厚度结构进行监测。然而，多层结构的复合靶[9]、层状装甲复合材料[10]的厚度达到了 5 mm 以上。对于三明治装甲复合材料这种多层大厚度结构，多层材料之间层向横应力的不连续性会带来波速方向性变化，较大厚度导致 Lamb 波信号多模态和频散现象更加严重并且加重监测信号的衰减程度，导致很难准确获得 Lamb 波在三明治装甲复合材料中的传播速度，给损伤监测带来了困难。

基于空间滤波器的结构健康监测技术利用 Lamb 波在结构中传播时的空间一波数域特征，通过设置空间权重函数进而对特定空间方位的 Lamb 波信号进行滤波，进而获得声源相对于压电传感器阵列的角度，能够在不依赖 Lamb 波传播速度的情况下进行损伤定位[11]，避免了波速变化对损伤监测的影响。Engholm 等[12]在铝板上利用一种自适应波束形成技术的空间滤波器，能够抑制 Lamb 波多模式对损伤定位的影响。王瑜[13]在 2 mm 厚度的碳纤维复合材料上利用基于 Hilbert 变换的空间滤波器损伤成像方法，将空间滤波器算法应用到了复合材料结构损伤监测当中。

为解决三明治装甲复合材料由于大厚度带来的 Lamb 波信号多模态和频散更加严重，导致难以准确进行损伤定位的问题，本文利用空间滤波器算法，得到损伤相较于两组压电传感器阵列的角度再根据角度计算出损伤的位置坐标，从而实现 5 mm 厚度的三明治装甲复合材料的损伤定位，降低了三明治装甲复合材料由于大厚度带来的损伤监测难度。

1 损伤定位原理

1.1 空间滤波器算法原理

在三明治装甲复合材料结构表面上布置 M 个等间距压电传感器线性阵列，将线性阵列的中心点作为原点，线性阵列的轴线作为 x 轴建立二维直角坐标系，如图 1 所示。

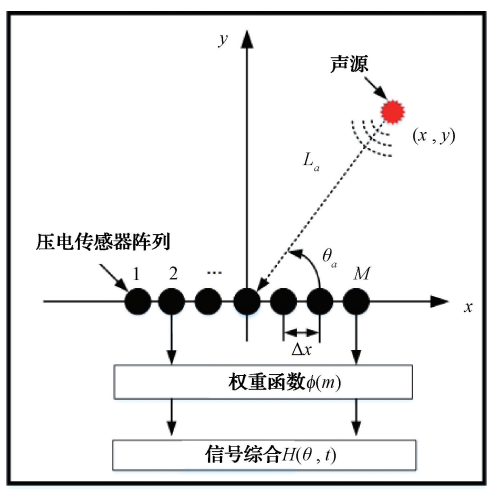


图 1 空间滤波算法原理

由图 1 可知，从左到右将各个压电传感器编号为 1，2，…，m，…，M，两个相邻传感器之间的中心距离为 Δx，在结构 (x,y)（未知量）处有一个声源激发 Lamb 波信号，中心频率为 ω_c，声源相对于压电传感器阵列中心的角度为 θ_a，距离为 L_a。在 t 时刻时，传感器阵列采集的空间域信号可表示为：

$$f(x)=[f(x_1,t),f(x_2,t),\cdots,f(x_m,t),\cdots,f(x_M,t)] \tag{1}$$

其中：

$$f(x_m,t)=\mathrm{e}^{\mathrm{i}\cdot(\varphi-k_a\cdot|\boldsymbol{L}_a-\boldsymbol{X}_m|)}=\mathrm{e}^{\mathrm{i}\cdot\varphi}\cdot\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\cdot k_a\cdot|\boldsymbol{L}_a-\boldsymbol{X}_m|} \tag{2}$$

$$|\boldsymbol{L}_a-\boldsymbol{X}_m|=\sqrt{L_a^2+x_m^2-2L_a\cdot x_m\cdot\cos\theta_a} \tag{3}$$

$$x_m=\frac{(2m-1-M)\cdot\Delta x}{2} \tag{4}$$

式中：k_a 和 φ 分别为声源激发出的 Lamb 波的波数和相位；$\boldsymbol{L}_a$ 为声源位置到传感器阵列中心的距离 L_a 的矢量；$\boldsymbol{X}_m$ 为 m 号压电传感器的 x 轴坐标 x_m 的矢量。

在式(1)中将空间滤波权重函数 $\phi(x_m)$ 添加给各个压点传感器信号，类比时间一频率域信号滤波器，如式(5)所示。

$$H(t)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\phi(x_m)\cdot f(x_m,t) \tag{5}$$

构造空间滤波权重函数为：

$$\phi(x_m)=\cos(k_x x_m)+\mathrm{i}\sin(k_x x_m) \tag{6}$$

式中：k_x 为线阵空间采样波数，$k_x=k_{\max}\cos\theta_a$，$k_{\max}$ 为传感器阵列的最大滤波波数，根据空间采用定理，$k_{\max}=\pi/\Delta x$。

对式(6)进行空间一波数域变换：

$$\Phi(k)=\int_{+\infty}^{-\infty}\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_x x}\mathrm{e}^{\mathrm{i}kx}\mathrm{d}x=2\pi\delta(k-k_x) \tag{7}$$

式中：

$$\delta(k-k_x)=\begin{cases}1, & k=k_x\\ 0, & k\neq k_x\end{cases}$$

从式(7)可以看出，波数为 $k=k_x$ 的信号可以通过式(6)构造的空间滤波权重函数 $\phi(x_m)$，而其他波数的信号则不能通过。

根据式(5)和(6)，基于一维传感器线性阵列对于 θ 角度滤波的空间滤波器响应合成信号为：

$$H(\theta,t)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}[\cos(k_{\max}x_m\cos\theta)+\mathrm{i}\sin(k_{\max}x_m\cos\theta)]f(x_m,t) \tag{8}$$

实验中，为了避免复数运算，而采集的 Lamb 波信号形式为实数，使用 Hilbert 变换构建 Lamb 波信号 $f(x_m,t)$ 的解析信号（复信号）$z(x_m,t)$：

$$z(x_m,t)=f(x_m,t)+\mathrm{i}f'(x_m,t) \tag{9}$$

根据式(8)和(9)，基于一维传感器线性阵列对于 θ 角度滤波的空间滤波器响应合成信号为：

$$H(\theta,t)=\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}[\cos(k_{\max}x_m\cos\theta)+$$

$$\mathrm{i}\sin(k_{\max}x_m\cos\theta)]z(x_m,t) \tag{10}$$

根据式(10)可知，设置 $\theta=0°\sim180°$ 为空间滤波角度，$\Delta\theta$ 为分辨率，利用空间滤波器算法对结构上的监测区域进行运算，得到角度-时间的结构损伤图像，整体数据处理流程如图 2 所示。最后再对所有目标点的像素值进行归一化处理，当目标单元点是损伤所在处时，幅值相较于非损伤目标单元点处大，随后进行阈值化处理，像素值最大处即为结构损伤相对于该传感器线性阵列的角度。

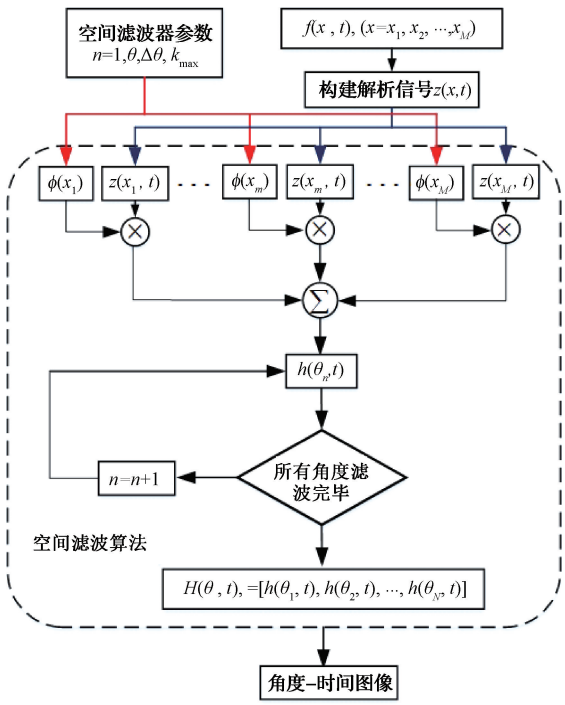


图 2　数据处理流程

1.2　损伤定位方法

在三明治装甲复合材料上布置两条相互平行的传感器阵列，两者的间距为 d ，如图 3 所示。

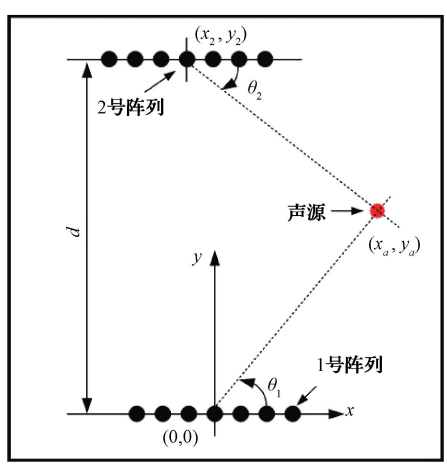


图 3　无波速损伤定位方法示意图

令图 3 的两条传感器线性阵列分别为 1 号阵列和 2 号阵列，以 1 号阵列的中心点作为坐标原点建立二维直角坐标系，2 号阵列的中心点坐标为 (x_2,y_2)。假设结构损伤的坐标点为 (x_a,y_a)，利用空间滤波器算法计算出损伤相对于 1 号阵列的角度 θ_1 和相对于 2 号阵列的角度 θ_2，则有：

$$\begin{cases}\tan\theta_1=\dfrac{y_a}{x_a}\\ \tan\theta_2=-\dfrac{y_a-y_2}{x_a-x_2}\end{cases} \tag{11}$$

其中，$\theta_1,\theta_2\neq90°$。

求解式(11)可得结构损伤的位置坐标为：

$$\begin{cases}x_a=\dfrac{y_2+x_2\tan\theta_2}{\tan\theta_1+\tan\theta_2}\\ y_a=\dfrac{\tan\theta_1(y_2+x_2\tan\theta_2)}{\tan\theta_1+\tan\theta_2}\end{cases} \tag{12}$$

当 $\theta_1=90°,\theta_2\neq90°$ 时，有：

$$\begin{cases}x_a=0\\ y_a=x_2\tan\theta_2+y_2\end{cases}$$

当 $\theta_1\neq90°,\theta_2=90°$ 时，有：

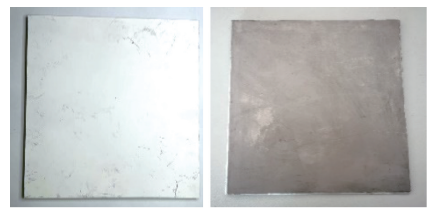
$$\begin{cases}x_a=x_2\\ y_a=x_2\tan\theta_1\end{cases}$$

可以得出，只需要利用空间滤波器算法计算出损伤相对于两个传感器阵列的角度就能够对三明治装甲复合材料进行损伤定位，该方法的不需要 Lamb 波在结构中的传播速度。

2　实验验证

2.1　三明治装甲复合材料结构

三明治装甲复合材料选用氧化铝陶瓷作为面板，T700 碳纤维作为夹层，TC4 钛合金作为背板，粘接剂选用适用于金属与非金属、陶瓷与金属之间的环氧 AB 胶水，减少高速冲击下出现分层损伤，避免层间崩落[14]。装甲复合材料尺寸大小为 200 mm×200 mm×5 mm，如图 4 所示。



(a) 正面　(b) 背面

图 4　三明治装甲复合材料

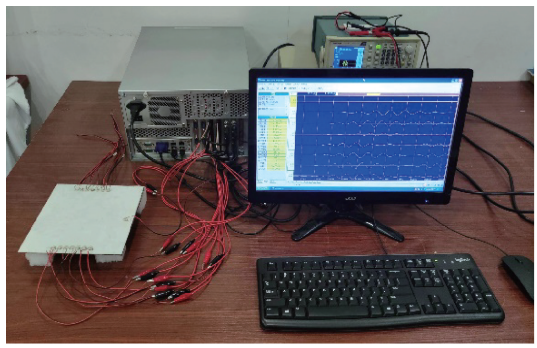
2.2　实验设备及过程

实验设备如图 5(a)所示，实验采用东田工控加固便携工控机和成都中科动态仪器 PCI4722 高速数据采集卡、多通道电荷放大器卡组成采集设备，进行信号采集保存。其

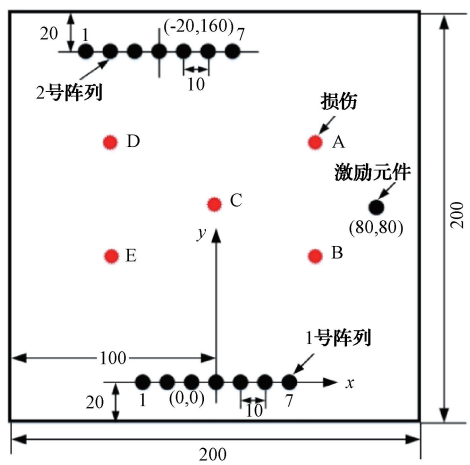
中采集卡的采样率为 1 kHz～50 MHz，交流信号的精度为±0.5%(1 kHz)，采集的模拟信号幅值范围为±10 V，最大存储深度(sa)为 16 M。激励信号由泰克 AFG2021 型信号发生器产生，激励信号设置为中心频率为 50 kHz 的窄带调制五波峰正弦信号作为激励信号，其表达式为：

$$I(t)=\left[H(t)-H\left(\frac{N}{f_c}\right)\right]\cdot\left(1-\cos\frac{2\pi f_c t}{N}\right)\sin(2\pi f_c t) \tag{13}$$

式中：f_c 是 Lamb 波的中心频率为 50 kHz；N 是波峰数为 5；$H(t)$ 是 Heaviside 阶梯函数。



(a) 实验设备



(b) 传感器阵列和损伤位置布置

图 5　无波速损伤定位实验

实验采用海鹰公司的直径为 10 mm、厚度为 0.55 mm 的 PZT-51 型压电传感器，其相对介电常数为 2 100，工作频率最高可达 4 MHz。实验使用 502 胶水直接将压电传感器粘贴固化在结构上以减少声波损失。实验设置两条传感器阵列如图 5(b)所示。两条传感器阵列的压电传感器标号从左到右依次为 1～7，传感器间距为 12 mm，保证各个传感器之间相对紧凑的同时又留有些许空隙。为防止边界反射对实验结果造成影响，传感器阵列和结构边界的距离为 20 mm。以 1 号传感器阵列中心为原点建立二维平面坐标系，则 2 号传感器阵列的中心坐标为(−20 mm，160 mm)。在传感器阵列的上方粘贴一个压电传感器作为激励元件，坐标为(80 mm，80 mm)。为减少实验损耗，损伤采用粘贴质量块(砝码)的方式改变结构局部应力来模拟损伤，原因是 Lamb 波在传播过程中遇到质量块和实际损伤的作用机制一样会发生信号散射[15]。本实验设置模拟损伤点为 A～E，具体坐标为表 1 所示。

表 1　模拟损伤位置坐标

损伤点	位置坐标/mm	相对于 1 号阵列的角度 θ_1/(°)	相对于 2 号阵列的角度 θ_2/(°)
A	(50，120)	67.4	29.7
B	(50，40)	38.7	59.7
C	(0，80)	90.0	76.0
D	(−50，120)	112.6	126.9
E	(−50，40)	141.3	104.0

实验设置采集频率为 5 MHz，采样总长度为 10 000 点，预采样 2 000 点，触发电压 300 mV。使用信号发生器发出±10 V 的 5 波峰 Lamb 波信号作为激励信号进行实验验证。实验流程大致为在结构处于健康状态时，激励元件产生激励信号，两组传感器分别采集响应信号作为健康基准信号；结构添加模拟损伤 A 后激励元件再产生激励信号，两组传感器分别采集响应信号作为损伤信号；撤除模拟损伤 A 后再依次添加并撤除模拟损伤 B～E，重复上述过程。信号采集结束后分别进行损伤定位，损伤定位流程如图 6 所示。

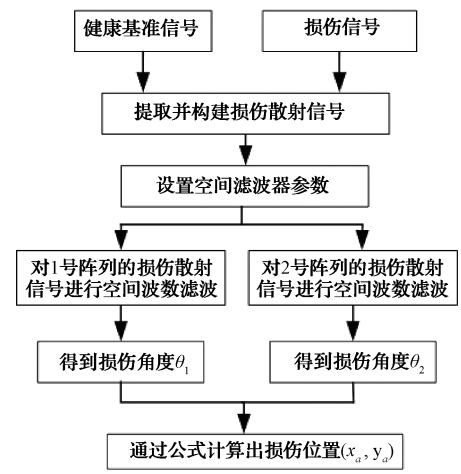
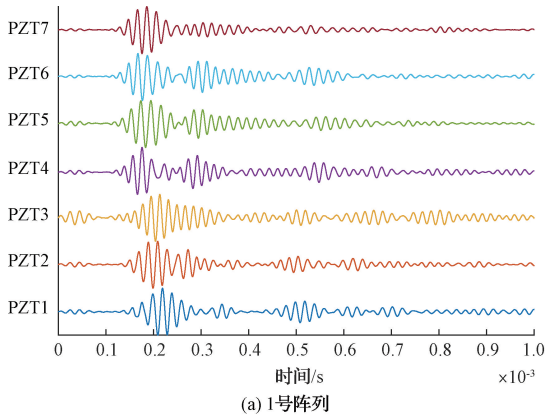


图 6　损伤定位流程

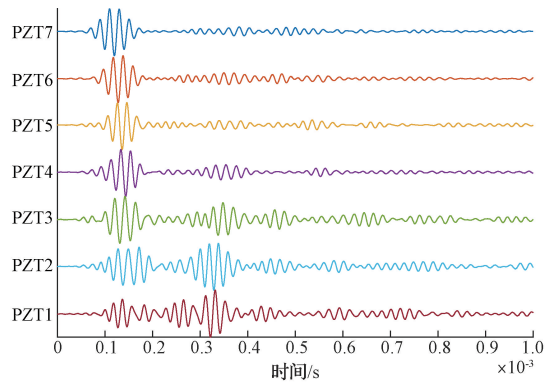
2.3　实验结果分析

由于传感器位置不同，产生的信号幅度会有差异，将采集的所有信号进行归一化处理。以 A 号模拟损伤为例，两条压电传感器阵列采集到的健康基准信号如图 7 所示，添加模拟损伤后采集的损伤信号如图 8 所示。健康基准信号减去损伤信号提取的损伤散射信号并做归一化处理后如图 9 所示。

由图 7～9 可知，当 Lamb 波信号经过损伤区域时，信

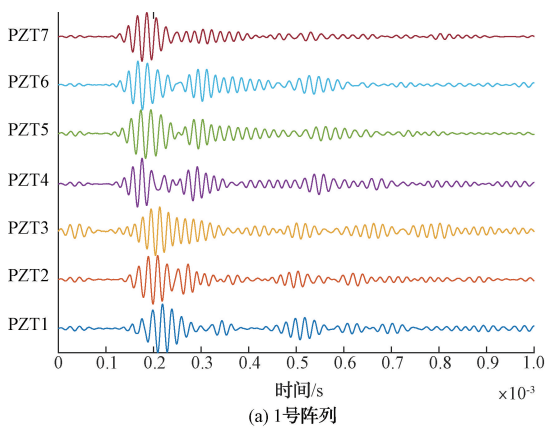


(a) 1号阵列

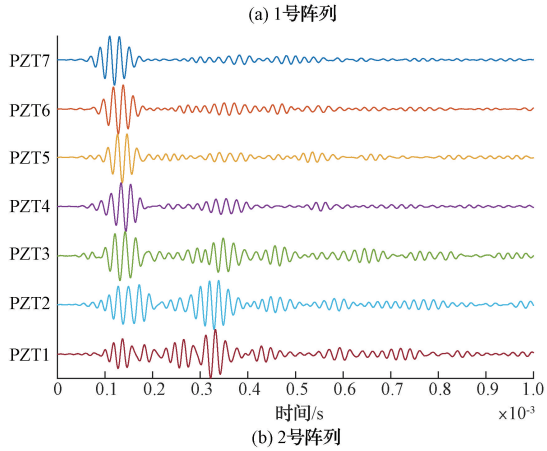


(b) 2号阵列

图 7　两条压点传感器阵列健康基准信号

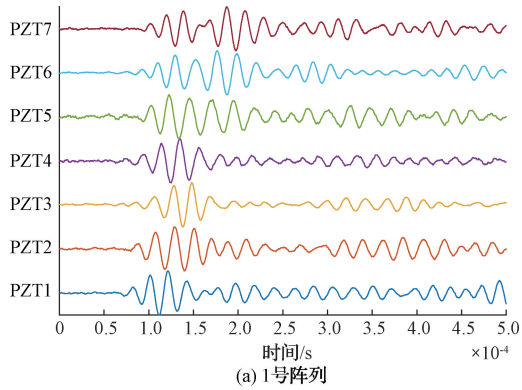


(a) 1号阵列

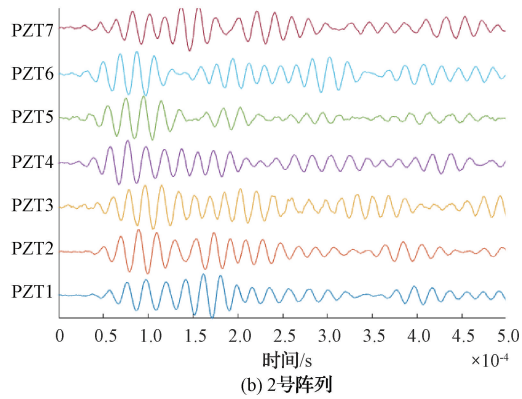


(b) 2号阵列

图 8　两条压点传感器阵列损伤信号



(a) 1号阵列



(b) 2号阵列

图 9　两条压点传感器阵列损伤散射信号

号会发生散射，幅值会下降，同时相位也会有所改变。设置空间滤波角度 $\theta=0°\sim180°$、分辨率 $\Delta\theta=0.5°$，利用空间滤波算法分别对两条压点传感器阵列的损伤散射信号进行运算，并对所有目标点的像素值进行归一化处理后得到的角度－时间损伤概率图像如图 10 所示。根据图 10 的结果再进行阈值化处理可以得到 A 号模拟损伤相对于 1 号传感器阵列的角度 $\theta_1=69°$，相对于 2 号传感器阵列的角度 $\theta_2=32.5°$。

将计算结果代入式(12)可得出损伤定位的结果为：

$$\begin{cases} x_a = 45.4\ \text{mm} \\ y_a = 118.3\ \text{mm} \end{cases}$$

实际损伤位置为(50 mm，120 mm)，与之相比，定位结果的横向误差为 4.6 mm，纵向误差为 1.7 mm，径向误差为 4.9 mm。

根据上述损伤定位流程，分别对其余模拟损伤点进行损伤定位，定位结果如表 2 所示。由此可得，该方法能够实现对 200 mm×200 mm×5 mm 大小的三明治装甲复合材料的损伤定位，且具有较好的定位精度，最小径向误差为 4.9 mm，最大径向误差为 8.7 mm。

3　结　论

本文在以氧化铝陶瓷，T700 碳纤维，TC4 钛合金构成的 200 mm×200 mm 大小，厚度为 5 mm 的三明治装甲复合材料上利用空间滤波器损伤定位的方法进行损伤监测

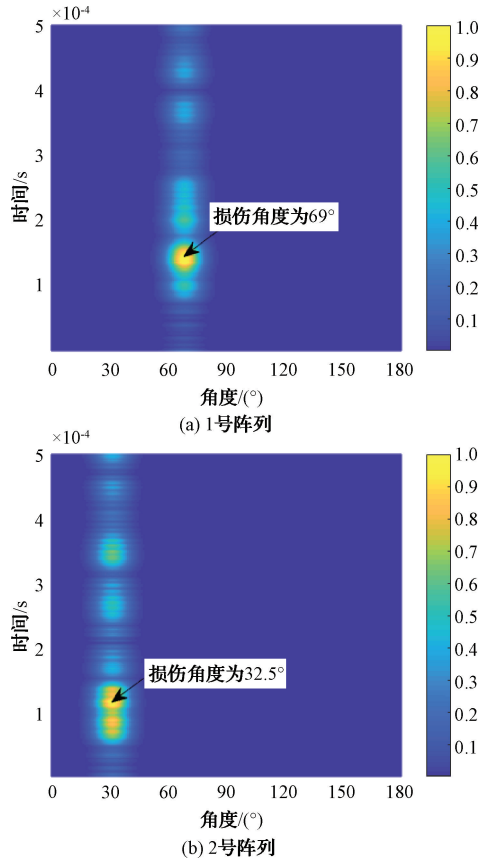


图 10 角度-损伤概率图像

表 2 模拟损伤定位结果

损伤点	θ_1/(°)	θ_2/(°)	定位结果坐标/mm	径向误差/mm
A	69.0	32.5	(45.4,118.3)	4.9
B	41.5	62.5	(43.3,38.3)	6.9
C	92.0	78.5	(−2.6,74.5)	6.1
D	114.0	122.5	(−50.2,112.7)	7.3
E	136.5	100.0	(−41.3,39.2)	8.7

研究,实验结果表明该方法能够实现对 5 mm 厚度的三明治装甲复合材料进行损伤定位且定位误差在 1 cm 以内,最小误差仅为 4.9 mm。该方法不依赖 Lamb 波在结构中的传播速度,计算量较小,效率高,同时可以避免 Lamb 波的波速差异对损伤定位的影响,对 Lamb 波在三明治装甲复合材料上进行结构健康监测具有一定程度的参考价值。

参 考 文 献

[1] 付华彪, 谭昕龙. 复合材料在坦克装甲车辆上的应用分析[J]. 中国高新科技, 2018 (2): 76-78.

[2] 赵宇宏, 景舰辉, 陈利文, 等. 装甲防护陶瓷－金属叠层复合材料界面研究进展[J]. 金属学报, 2021, 57(9): 1107-1125.

[3] HU P C, CHENG Y S, ZHANG P, et al. A metal/UHMWPE/SiC multi-layered composite armor against ballistic impact of flat-nosed projectile[J]. Ceramics International, 2021, 47(16): 22497-22513.

[4] 王珍. 陶瓷/金属复合材料的陶瓷损伤特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.

[5] 康永乐,邱雷. 导波结构健康监测中损伤因子的研究和应用[J]. 国外电子测量技术,2021,40(6):113-119.

[6] 沈意平,吴迪,张博南,等. 钢轨裂纹导波检测的柔性压电复合材料传感技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2021,42(11):62-70.

[7] 杨宇, 王莉, 刘国强, 等. 一种基于导波的复合材料层压板冲击损伤识别率确定方法[J]. 纤维复合材料, 2020, 37(3): 40-46.

[8] 王丹宏,叶波,段启明,等. 基于 Lamb 波能量和飞行时间的碳纤维复合材料疲劳损伤成像[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(4):205-213.

[9] 张鹏, 王志军, 马武伟, 等. 高速弹体侵彻钢/陶瓷/超高分子量聚乙烯纤维/钢实验[J]. 兵器材料科学与工程,2016,39(5):104-109.

[10] GUO G D, ALAM SHAH, PEEL LARRY D. An investigation of deformation and failure mechanisms of fiber-reinforced composites in layered composite armor [J]. Composite Structures, 2022, DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.115125.

[11] WANG Y, YUAN S F, QIU L. Improved wavelet-based spatial filter of damage imaging method on composite structures [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 665-672.

[12] ENGHOLM M, STEPINSKI T, OLOFSSON T. Imaging and suppression of Lamb modes using adaptive beamforming [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(8): 085024.

[13] 王瑜. 基于空间滤波器的结构健康监测研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

[14] SHEN Y H, WANG Y W, DU S F, et al. Effects of the adhesive layer on the multi-hit ballistic performance of ceramic/metal composite armors[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 1496-1508.

[15] 刘相,严刚,汤剑飞. 基于应力波的复合材料圆柱壳结构损伤概率成像研究[J]. 复合材料科学与工程, 2021(9):5-11.

作者简介

张猛，硕士研究生，主要研究方向为结构健康监测。
E-mail：2861496059@qq.com

江剑，副教授，主要研究方向为测控技术及仪器、计算机控制技术、图像处理及识别。
E-mail：343824722@qq.com

高尚，讲师，主要研究方向为结构健康监测、无线传感器网络、测控技术与仪器。
E-mail：shang.gao@njust.edu.cn

张子瑞，硕士研究生，主要研究方向为结构健康监测、无线传感器网络。
E-mail：2298604227@qq.com