



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109696480 A

(43)申请公布日 2019.04.30

(21)申请号 201910170024.4

(22)申请日 2019.03.07

(66)本国优先权数据

201810445281.X 2018.05.10 CN

(71)申请人 南昌航空大学

地址 330000 江西省南昌市丰和南大道696号

(72)发明人 李秋锋 李昕 卢超 陈果

周瑞琪 黄丽霞 齐添添

(74)专利代理机构 南昌洪达专利事务所 36111

代理人 刘凌峰

(51)Int.Cl.

G01N 29/14(2006.01)

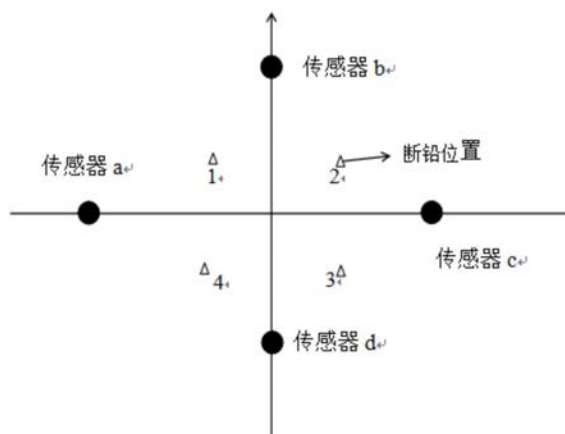
权利要求书3页 说明书6页 附图6页

## (54)发明名称

一种基于改进时间反转算法的玻璃纤维复合材料声发射源定位成像方法

## (57)摘要

本发明公开了一种基于改进时间反转算法的玻璃纤维复合材料声发射源定位成像方法,首先按照传感器分布划分监测区域,在不同监测区域内几处特殊位置利用时差法测定声速,并以此为依据确定各监测区域声速值;然后根据时间反转理论,推导出时间反转加载后各传感器再次接收到的时间反转信号,提高声发射源处的振动能量和幅值;最后根据不同监测区域的声速值,对监测区域各像素点进行时间反转成像,实现声发射源的准确定位。这种采用区域划分处理的时间反转定位成像方法适用于内部结构不均匀的其他各向异性材料声发射源定位,具有重要的实际应用价值。



1. 一种基于改进时间反转算法的玻璃纤维复合材料声发射源定位成像方法, 在检测区域内设定一个坐标系, 分别在横轴和纵轴上布置四个声发射传感器; 由于玻璃纤维复合材料的各向异性, 导致材料各传播方向声速差异较大, 通过在各象限内选择几个特殊位置利用时间反转聚焦处理后的散射信号进行时差法求解, 确定各象限内的平均声速值, 将四个象限划为四个声速区; 通过四个传感器采集到的声发射源发出的声发射信号, 利用时间反转聚焦增强算法实现对声发射源处的聚焦和增强; 最后按照各声速区内的声速值进行成像处理, 实现玻璃纤维复合材料实时损伤声发射源的准确定位成像; 其特征在于方法步骤如下:

步骤一: 选定一块长为600mm, 宽为600mm, 厚度为6.7mm的玻璃纤维复合材料作为实验试块, 用一个声发射传感器固定在试块中间位置, 采用铅笔断芯的方式在试块上从距离试块100mm开始, 以100mm为步长测量不同距离处声波的衰减, 通过衰减实验确定两探头间的最佳间距为300mm;

步骤二: 在检测区域内设定一个坐标系, 以原点为中心分别在横轴和纵轴上放置四个声发射传感器, 各传感器距离原点均为150mm, 即各轴上的两个传感器都相距300mm;

步骤三: 在坐标系的各个象限内设定一个激励点, 该点到两个坐标轴的垂直距离相等, 即该点到所在象限内的两个声发射传感器的距离相等, 同时该点到所在象限外的两个声发射传感器的距离相等。然后分别在各激励点采用铅笔断芯的方式发出模拟声发射信号, 通过四个声发射传感器采集到该激励点发出的模拟声发射信号, 然后对接收到的信号进行时间反转增强处理, 并取信号包络线, 以包络线最大峰值作为到达时刻, 根据各激励点到各个传感器的距离差与各个传感器接收到声发射信号的时间差求出各个点所在象限的声速值, 并将各个象限划分为四个声速区;

步骤四: 在试块的检测区域内进行监测, 当在监测区域内四个声发射传感器接收到声发射源发出的声发射信号 (实验采用铅笔断芯的方式模拟声发射源发出声发射信号), 将接收到的声发射信号进行时间反转增强处理, 得到各个传感器接收到损伤处的散射信号, 并取信号包络线, 确定各传感器经过时间反转加载后在声发射源处散射被重新接收的时刻;

步骤五: 分别采用四个声速区的声速值, 利用四点圆弧定位方法计算损伤处对传感器时间反转加载信号的散射时刻, 然后根据经过时间反转增强处理后的各传感器接收到损伤处的散射信号, 重建检测区域波动图, 最后比较四个重建波动图中最大幅值, 取幅值最大的重建波动图作为声发射源定位成像图, 确定幅值最大的像素坐标位置即为声发射源位置。

2. 根据权利要求1所述的一种基于改进时间反转算法的玻璃纤维复合材料声发射源定位成像方法, 其时间反转增强算法特征在于: 对声发射传感器接收到的声发射源发出的信号 (无论是采用采用铅笔断芯方式激励信号还是材料损伤自身发出的信号), 利用改进的时间反转达到增强信号信噪比的效果。

假设声发射源发出信号为 $x(\omega)$ , 第 $i$ 个传感器接收到的信号为 $d_i(\omega, r)$ , ( $i=1, 2, 3, 4$ ), 令从声源处到第 $i$ 个传感器的传递函数为 $h_i(\omega)$ , ( $i=1, 2, 3, 4$ ), 这里的传递函数也包括压电元件的机电耦合系数, 则第 $i$ 个传感器收到的信号可表示为 $d_i(\omega, r) = x(\omega) \cdot h_i(\omega)$ , 对接收信号进行时反加载后, 声源损伤处得到的聚焦信号 $X(\omega)$ 可以表示为:

$$X(\omega) = \sum_i x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega); \quad (1)$$

式中  $\sum_i h_i^*(\omega) \cdot h(\omega)$  其实就是对声源信号的时间反转聚焦的一个叠加, 所以信号  $X(\omega)$  的波峰幅值较  $x(\omega)$  能够得到一个增强。 $X(\omega)$  只是理论上损伤处的聚焦信号, 经过聚焦信号将会有损伤处散射并再次传感器接收到, 那么各个传感器接收到的信号  $D_j(\omega, r)$ , ( $j=1, 2, 3, 4$ ) 可以表示为:

$$D_j(\omega, r) = X(\omega) \cdot h_j(\omega) = \sum_i d^*(\omega, r) \cdot h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega) \cdot h_j(\omega) \quad (2)$$

其中  $h_i(\omega)$  和  $h_j(\omega)$  表示声信号在介质中传播时由第  $i$  个到第  $j$  个传感器传播过程中传递函数。由于声发射源到各传感器的路径传递函数未知, 因此对公式 (2) 做了改进, 在公式两边同时乘以  $x(\omega) \cdot x(\omega)$ , 得到:

$$\begin{aligned} D'_j(\omega, r) &= D_j(\omega, r) \cdot x(\omega) \cdot x(\omega) \\ &= \sum_i x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega) \cdot h_j(\omega) \cdot x(\omega) \cdot x(\omega) \\ &= \sum_i (x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega)) \cdot (x(\omega) \cdot h_i(\omega)) \cdot (x(\omega) \cdot h_j(\omega)) \\ &= \sum_i d_i^*(\omega, r) \cdot d_i(\omega, r) \cdot d_j(\omega, r) \end{aligned} \quad (3)$$

公式 (3) 右侧整理后的物理意义很明确, 都分别表示各个探头接收到的信号,  $d_i^*(\omega, r)$  表示第  $i$  个探头接收到信号的时反信号,  $d_i(\omega, r)$  表示第  $i$  个探头接收到的信号,  $d_j(\omega, r)$  表示第  $j$  个探头接收到的信号。由于  $X(\omega)$  已经是经过时间反转后的聚焦信号, 各个传感器接收到该信号后再次聚焦, 因此信号的信噪比会大大提高, 经过上述处理, 上述信号全部为传感器直接接收的声源信号及其变换信号, 因此计算过程和难度将被大大的简化。

3. 根据权利要求1所述的一种基于改进时间反转算法的玻璃纤维复合材料声发射源定位成像方法, 其检测区域成像特征在于处理方法: 将各传感器接收到的声发射信号按照权利要求2处理后, 获得信号  $D_j(\omega, r)$ , 通过求取  $D_j(\omega, r)$  的包络线图, 包络线峰值对应的时间即为各传感器经过时间反转加载后在声发射源处散射被重新接收的时刻  $t_i$ , ( $i=1, 2, 3, 4$ ), 假设四个探头的位置分别为  $a(x_1, y_1)$ ,  $b(x_2, y_2)$ ,  $c(x_3, y_3)$ ,  $d(x_4, y_4)$ , 那么可按照公式 (4) 计算出声发射源的位置  $(x_0, y_0)$  以及信号由损伤处散射的时间  $t_s$ 。

$$\begin{cases} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 = v^2(t_1 - t_s)^2 \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 = v^2(t_2 - t_s)^2 \\ (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 = v^2(t_3 - t_s)^2 \\ (x_0 - x_4)^2 + (y_0 - y_4)^2 = v^2(t_4 - t_s)^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $v$  分别用四个声速区的声速值代入, 可得到四个不同的声发射源位置和散射时刻  $t_s$ 。然后按照声波的传播原理, 建立在散射时刻整个结构的波动图, 图中的每个像素点都与结构相对应, 每个像素点的像素值代表波动幅值, 在散射时刻每个点上的波动幅值可按照公式 (5) 和 (6) 计算获得:

$$A_{xy} = \sum_{i=1}^4 D_i(t_{ixy}) \quad (5)$$

$$t_{ixy} = t_s - \frac{\sqrt{(x \times p - x_i)^2 + (y \times p - y_i)^2}}{v} \quad (6)$$

式中 $v$ 代表声波的传播速度,代入的声速值与计算出散射时刻 $t_s$ 时的声速值一致, $p$ 代表图像的像素尺寸, $x_i$ 和 $y_i$ 则分别为第 $i$ 个传感器所对应的坐标, $A_{xy}$ 代表像素坐标点 $(x, y)$ 的幅值。同样,因为分别代入了四个声速值,所以也可以重建四个波动图。最后比较四个波动图中最大幅值,以振动幅值最大的波动图进行阈值成像,确定该成像图中幅值最大的像素坐标位置定为声发射源位置。

## 一种基于改进时间反转算法的玻璃纤维复合材料声发射源定位成像方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于声发射无损检测范围的一种新的声发射源定位成像方法,具体涉及的是一种基于改进时间反转算法的玻璃纤维复合材料声发射源定位成像方法。

### 背景技术

[0002] 声发射是指材料在外力或者内力的作用下,其中某一局部源会迅速释放出能量而产生瞬态弹性波的一种现象。这种弹性波会包含该局部源的一些性质并传播到材料表面,放置在材料表面的声发射传感器能够捕捉到这些信息。而且根据所采集到信号的一些特点以及施加的外部条件,不仅可以了解缺陷现状,还能够了解这个缺陷之前的形成状况,甚至判断在之后的使用中发展的趋势,这一点也是其它无损检测方法难以做到的,所以用声发射技术可以判断缺陷的活动性和严重性。

[0003] 在声发射技术中,声源的信号通常都比较微弱,而且信号本身也具有多样性、突发性以及不确定性。要利用声发射技术之前,这些弱点还需要得到克服,如声发射由于是动态检测,很容易受到各种噪声的干扰,自身特性对材料也比较敏感,而且声波在结构中的传播过程也比较复杂,衰减、反射、模式转换都会使传感器接收到的信号与声发射源发出的初始信号存在很大的不同,导致声发射源识别的困难。在以往的很多情况中,利用声发射技术对材料检测和监测时,人们所感兴趣的声发射信号可能远远小于外部干扰的噪声,加上声发射源到传感器之间的传播路径、传感器本身的特性和声发射检测系统本身等多种因素的影响,最后接收到的声发射信号往往是非常复杂而又杂乱的多模式波与噪声的混叠。

[0004] 声发射源的定位方法主要有时差法和区域法,但这两种方法都有着其局限性。时差定位虽然比较精确,但也相对复杂,而且容易丢失很多比较低能量的信号,定位的效果也会被波速、波形、衰减以及构件的几何形状等因素影响,因而在实际中往往得到的结果也不太满意,同时也受到很多限制。区域定位虽然处理速度快,但是定位效果却比较差,定位出来的是一片区域,准确性不够,而且一般是在要求不高或者时差法较难应用的情况下使用。

[0005] 时间反转的优势是不需要先了解传播介质和传感器自身性质,就可以针对声波达到自适应聚焦和检测的一种方法。正是由于它的这一特点,使得时间反转在超声聚焦以及检测中得到了极大的发展和广泛的应用,也被越来越多的人所重视和关注。但是在对玻璃纤维复合材料进行检测定位时,发现由于材料存在严重的各项异性,现有的基于时间反转理论的定位方法偏差较大,无法确定损伤的准确位置。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是针对玻璃纤维复合材料实时监测的需要,提出一种基于改进时间反转算法的玻璃纤维复合材料声发射源定位成像方法。通过引入时间反转聚焦增强方法,采用时差法测量检测区域内各个区域内的声速值,并以此划分出不同声速区域;然后在监测过程中,对各传感器接收到的声发射源发出的信号进行时间反转聚焦增强处理;最后根

据不同区域的声速值计算聚焦时刻和聚焦位置处的振动幅值,重建检测区域波动图,比较四个重建波动图中最大幅值,取幅值最大的重建波动图作为声发射源定位成像图,实现玻璃纤维复合材料损伤声发射源的准确定位。

[0007] 本发明涉及利用声发射动态监测系统采集玻璃纤维复合材料损伤发出的声发射信号,按照改进时间反转算法进行处理,实现对该材料进行损伤监测和定位成像的方法。

[0008] 本发明的技术方案:一种基于改进时间反转算法的玻璃纤维复合材料声发射源定位成像方法,在检测区域内设定一个坐标系,分别在横轴和纵轴上布置四个声发射传感器。由于玻璃纤维复合材料的各向异性,导致材料各传播方向声速差异较大,通过在各象限内选择几个特殊位置利用时间反转聚焦处理后的散射信号进行时差法求解,确定各象限内的平均声速值,将四个象限划为四个声速区。通过四个传感器采集到的声发射源发出的声发射信号,利用时间反转聚焦增强算法实现对声发射源处的聚焦和增强。最后按照各声速区内的声速值进行成像处理,实现玻璃纤维复合材料实时损伤声发射源的准确定位成像。其特征在于方法步骤如下:

[0009] 步骤一:选定一块长为600mm,宽为600mm,厚度为6.7mm的玻璃纤维复合材料作为实验试块,用一个声发射传感器固定在试块中间位置,采用铅笔断芯的方式在试块上从距离试块100mm开始,以100mm为步长测量不同距离处声波的衰减,通过衰减实验确定两探头间的最佳间距为300mm。

[0010] 步骤二:在检测区域内设定一个坐标系,以原点为中心分别在横轴和纵轴上放置四个声发射传感器,各传感器距离原点均为150mm,即各轴上的两个传感器都相距300mm。

[0011] 步骤三:在坐标系的各个象限内设定一个激励点,该点到两个坐标轴的垂直距离相等,即该点到所在象限内的两个声发射传感器的距离相等,同时该点到所在象限外的两个声发射传感器的距离相等。然后分别在各激励点采用铅笔断芯的方式发出模拟声发射信号,通过四个声发射传感器采集到该激励点发出的模拟声发射信号,然后对接收到的信号进行时间反转增强处理,并取信号包络线,以包络线最大峰值作为到达时刻,根据各激励点到各个传感器的距离差与各个传感器接收到声发射信号的时间差求出各个点所在象限的声速值,并将各个象限划分为四个声速区。

[0012] 步骤四:在试块的检测区域内进行监测,当在监测区域内四个声发射传感器接收到声发射源发出的声发射信号(实验采用铅笔断芯的方式模拟声发射源发出声发射信号),将接收到的声发射信号进行时间反转增强处理,得到各个传感器接收到损伤处的散射信号,并取信号包络线,确定各传感器经过时间反转加载后在声发射源处散射被重新接收的时刻。

[0013] 步骤五:分别采用四个声速区的声速值,利用四点圆弧定位方法计算损伤处对传感器时间反转加载信号的散射时刻,然后根据经过时间反转增强处理后的各传感器接收到损伤处的散射信号,重建检测区域波动图,最后比较四个重建波动图中最大幅值,取幅值最大的重建波动图作为声发射源定位成像图,确定幅值最大的像素坐标位置即为声发射源位置。

[0014] 本发明所述改进时间反转算法其特征在于:对声发射传感器接收到的声发射源发出的信号(无论是采用采用铅笔断芯方式激励信号还是材料损伤自身发出的信号),利用改进时间反转达到增强信号信噪比的效果。

[0015] 假设声发射源发出信号为 $x(\omega)$ ,第 $i$ 个传感器接收到的信号为 $d_i(\omega, r)$ , ( $i=1, 2, 3, 4$ ),令从声源处到第 $i$ 个传感器的传递函数为 $h_i(\omega)$ , ( $i=1, 2, 3, 4$ ),这里的传递函数也包括压电元件的机电耦合系数,则第 $i$ 个传感器收到的信号可表示为 $d_i(\omega, r) = x(\omega) \cdot h_i(\omega)$ ,对接收信号进行时反加载后,声源损伤处得到的聚焦信号 $X(\omega)$ 可以表示为:

$$[0016] \quad X(\omega) = \sum_i x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega); \quad (1)$$

[0017] 式中 $\sum_i h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega)$ 其实就是对声源信号的时间反转聚焦的一个叠加,所以信号 $X(\omega)$ 的波峰幅值较 $x(\omega)$ 能够得到一个增强。 $X(\omega)$ 只是理论上声源处的聚焦信号,传感器将会再次接收到由声源处散射回来的信号,那么各个传感器接收到的信号 $D_j(\omega, r)$ , ( $j=1, 2, 3, 4$ )可以表示为:

$$[0018] \quad D_j(\omega, r) = X(\omega) \cdot h_j(\omega) = \sum_i d_i^*(\omega, r) \cdot h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega) \cdot h_j(\omega) \quad (2)$$

[0019] 其中 $h_i(\omega)$ 和 $h_j(\omega)$ 表示声信号在介质中传播时由第 $i$ 个到第 $j$ 个传感器传播过程中传递函数。由于声发射源到各传感器的路径传递函数未知,因此对公式(2)做了改进,在公式两边同时乘以 $x(\omega) \cdot x(\omega)$ ,得到:

$$\begin{aligned} [0020] \quad D'_j(\omega, r) &= D_j(\omega, r) \cdot x(\omega) \cdot x(\omega) \\ &= \sum_i x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega) \cdot h_i(\omega) \cdot h_j(\omega) \cdot x(\omega) \cdot x(\omega) \\ &= \sum_i (x^*(\omega) \cdot h_i^*(\omega)) \cdot (x(\omega) \cdot h_i(\omega)) \cdot (x(\omega) \cdot h_j(\omega)) \\ &= \sum_i d_i^*(\omega, r) \cdot d_i(\omega, r) \cdot d_j(\omega, r) \end{aligned} \quad (3)$$

[0021] 公式(3)右侧整理后的物理意义很明确,都分别表示各个探头接收到的信号, $d_i^*(\omega, r)$ 表示第 $i$ 个探头接收到信号的时反信号, $d_i(\omega, r)$ 表示第 $i$ 个探头接收到的信号, $d_j(\omega, r)$ 表示第 $j$ 个探头接收到的信号。由于 $X(\omega)$ 已经是经过时间反转后的聚焦信号,各个传感器接收到该信号后再次聚焦,因此信号的信噪比会大大提高,经过上述处理,上述信号全部为传感器直接接收的声源信号及其变换信号,因此计算过程和难度将被大大的简化。

[0022] 本发明所述检测区域成像特征在于处理方法:将各传感器接收到的声发射信号按照权利要求2处理后,获得信号 $D_j(\omega, r)$ ,通过求取 $D_j(\omega, r)$ 的包络线图,包络线峰值对应的时间即为各传感器经过时间反转加载后在声发射源处散射被重新接收的时刻 $t_i$ , ( $i=1, 2, 3, 4$ ),假设四个探头的位置分别为 $S_1(x_1, y_1)$ ,  $S_2(x_2, y_2)$ ,  $S_3(x_3, y_3)$ ,  $S_4(x_4, y_4)$ ,那么可按照公式(4)计算出声发射源的位置 $(x_0, y_0)$ 以及损伤处散射的时间 $t_s$ 。

$$[0023] \quad \begin{cases} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 = v^2(t_1 - t_s)^2 \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 = v^2(t_2 - t_s)^2 \\ (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 = v^2(t_3 - t_s)^2 \\ (x_0 - x_4)^2 + (y_0 - y_4)^2 = v^2(t_4 - t_s)^2 \end{cases} \quad (4)$$

[0024] 式中 $v$ 分别用四个声速区的声速值代入,可得到四个不同的声发射源位置和散射时刻 $t_s$ 。然后按照声波的传播原理,建立在散射时刻整个结构的波动图,图中的每个像素点都与结构相对应,每个像素点的像素值代表波动幅值,在散射时刻每个点上的波动幅值可

按照公式 (5) 和 (6) 计算获得:

$$[0025] \quad A_{xy} = \sum_{i=1}^4 D_i(t_{ixy}) \quad (5)$$

$$[0026] \quad t_{ixy} = t_s - \frac{\sqrt{(x \times p - x_i)^2 + (y \times p - y_i)^2}}{v} \quad (6)$$

[0027] 式中 $v$ 代表声波的传播速度,代入的声速值与计算出散射时刻 $t_s$ 时的声速值一致, $p$ 代表图像的像素尺寸, $x_i$ 和 $y_i$ 则分别为第 $i$ 个传感器所对应的坐标, $A_{xy}$ 代表像素坐标点 $(x, y)$ 的幅值。同样,因为分别代入了四个声速值,所以也可以重建四个波动图。最后比较四个波动图中最大幅值,以振动幅值最大的波动图进行阈值成像,确定该成像图中幅值最大的像素坐标位置定为声发射源位置。

[0028] 本发明与现有技术相比具有的特点是:声发射检测技术是一种实时动态检测技术,主要检测对象为各向同性的金属材料(铁、铝、铜等),各个方向的声速比较稳定,声波传播路径简单,研究已经趋于成熟。但是对于内部结构不均匀的各向异性玻璃纤维复合材料,由于铺设角度、厚度以及铺设工艺的不同,对声波的传播产生很大的影响,各个方向的声速也有较大差异,导致常规采用平均声速进行计算的时差定位法效果极差,无法获得准确定位信息。本次发明的定位方法就是通过测量不同区域的声速划分出几个声速区,然后通过对传感器接收到的声发射信号进行时间反转增强处理后,计算出各传感器反向加载后在损伤声源处散射回来的信号,取信号包络线波形作为成像处理信号,最后利用不同声速值分别重建检测区域波动图,比较四个重建波动图中最大幅值,取幅值最大的重建波动图作为声发射源定位成像图,并以信号叠加后包络线峰值像素点的位置作为所监测区域的声发射源。这种采用区域划分处理的时间反转定位成像方法适用于内部结构不均匀的其他各向异性材料声发射源定位,具有重要的实际应用价值。

## 附图说明

[0029] 图1为本发明的传感器分布及模拟激励点位置示意图。

[0030] 图2为本发明的点1激励信号后各传感器时间反转计算包络线图。

[0031] 图3为本发明的实验测试模拟激励位置分布图。

[0032] 图4为本发明的A点激励信号后各传感器采集到的信号波形图。

[0033] 图5为本发明的A点激励信号后各传感器时间反转计算包络线图。

[0034] 图6为本发明的检测区域最终成像定位图。

## 具体实施方式

[0035] 选定一块长为600mm,宽为600mm,厚度为6.7mm的玻璃纤维复合材料作为实验试块,用一个声发射传感器固定在试块中间位置,采用铅笔断芯的方式在试块上从距离试块100mm开始,以100mm为步长测量不同距离处声波的衰减,通过衰减实验确定两探头间的最佳间距为300mm。

[0036] 在检测区域内设定一个坐标系,以原点为中心分别在横轴和纵轴上放置四个声发射传感器a、b、c、d,如图1所示,各传感器距离原点均为150mm,即各轴上的两个传感器都相距300mm。由于玻璃纤维复合材料个各向异性,导致材料各处声速差异较大,在坐标系的各



个象限内设定一个特定激励点,如图1中1、2、3、4点,坐标分别为1(-50,50),2(50,50),3(50,-50),4(-50,-50),点1到传感器a和b等距( $S_1=111.8\text{mm}$ ),到c和d等距( $S_2=206.2\text{mm}$ ),同理,点2到传感器b和c等距( $S_3=111.8\text{mm}$ ),到a和d等距( $S_4=206.2\text{mm}$ ),点3到传感器a和b等距( $S_5=206.2\text{mm}$ ),到c和d等距( $S_6=111.8\text{mm}$ ),点4到传感器a和d等距( $S_7=111.8\text{mm}$ ),到b和c等距( $S_8=206.2\text{mm}$ )。故在点1处,到传感器a和d与到探头c,b距离差约为 $\delta S=94.4\text{mm}$ ,同理,计算其它3个点的距离差均约为94.4mm。然后分别在四个激励点采用铅笔断芯的方式发出模拟声发射信号,每次激励点发出信号都由四个声发射传感器采集到,并将信号按照公式(3)进行时间反转处理,分别计算得到各个传感器反向加载后由声源处散射回来的信号,取得各信号包络线的最大值处的时间,如图2所示,点1的激励信号到达传感器a和b与传感器c和d的时间差为 $\delta t=53.4\mu\text{s}$ ,计算后点1所在象限的速度约为1767m/s。同理,可以分别求出点2、点3、点4所在象限的速度分别约为1990m/s、2110m/s、1567m/s,四个象限分别定义为四个声速区。

[0037] 四个声速区确定以后,开展定位测试实验,实验仍然采用铅笔断芯的方式模拟声发射源发出声发射信号,在检测区域选择了6个激励点进行实验测试,具体如图3所示,为了方便冲击检测区域波动图,将坐标原点定在检测区域左上角位置,因此四个传感器坐标分别为a(0,150),b(150,0),c(300,150),d(150,300),6个测试激励点坐标见表1所示。在A点激励模拟声发射信号后,四个传感器分别采集收到声发射源信号波形如图4所示,将信号按照公式(3)进行时间反转处理,分别计算得到各个传感器反向加载后由声源处散射回来的信号 $D_j(\omega, r)$ ,取得各信号包络线的峰值处的时间,如图5所示,包络线峰值对应的时间即为各传感器经过时间反转加载后在声发射源处散射被重新接收的时刻 $t_i$ ,( $i=1,2,3,4$ )。

[0038] 表1实验测试6个模拟激励点坐标

[0039]

激励点	激励点坐标 (mm)
A	(120,80)
B	(150,80)
C	(120,220)
D	(150,220)
E	(220,180)
F	(220,120)

[0040] 最后分别采用四个声速区的声速值1767m/s、1990m/s、2110m/s、1567m/s,与各传感器坐标值和 $t_i$ 代入公式(4)计算出不同声速情况下的损伤处散射的时间 $t_s$ 。再根据公式(5)和(6),用信号 $D_j(\omega, r)$ 分别重建检测区域波动图,像素取 $1 \times 1\text{mm}^2$ 计算,当声速为1767m/s时,计算得出检测区域内最大幅值为3.13;当声速为1990m/s时,计算得出检测区域内最大幅值为3.75;当声速为2110m/s时,计算得出检测区域内最大幅值为3.97;当声速为1567m/s时,计算得出检测区域内最大幅值为2.83,经过比较,取幅值最大为3.97即当声速为2110m/s时的检测区域波动图作为最终的成像定位图,如图6所示,其中图6(b)是经过95%的阈值处理后的成像定位结果,最大幅值处的坐标为(110,75),即为最终对声发射源的定位结果,以两个传感器间的最大间距300mm来计算,误差为3.7%。按照同样的步骤,依次完成其他5个模拟激励点的信号采集、数据处理、重建波动图及声源定位,具体定位结果和误差见表2,

结果表明定位相对误差控制在5%以内,符合声发射定位误差标准,相比声发射仪器定位误差要小得多。

[0041] 表2对6个模拟激励点处理定位结果

[0042]

激励点	激励点坐标 (mm)	定位坐标 (mm)	定位误差
A	(120,80)	(110,75)	3.7%
B	(150,80)	(147,88)	2.8%
C	(120,220)	(116,209)	3.9%
D	(150,220)	(153,214)	2.2%
E	(220,180)	(216,179)	1.4%
F	(220,120)	(215,128)	3.1%

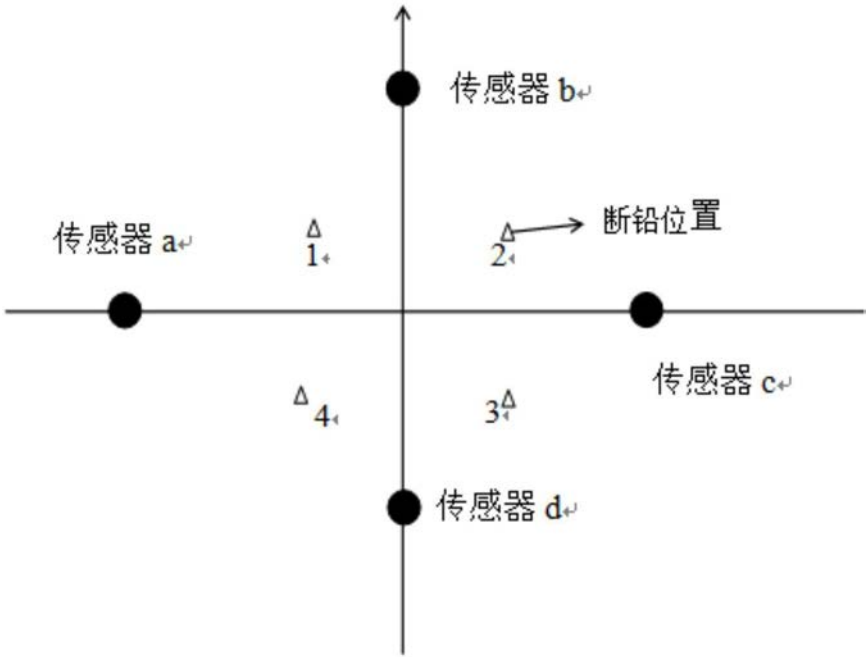
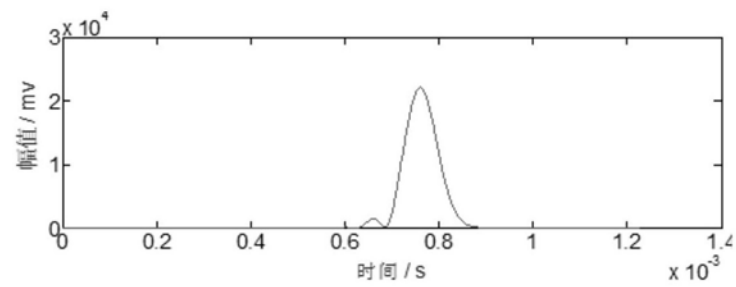
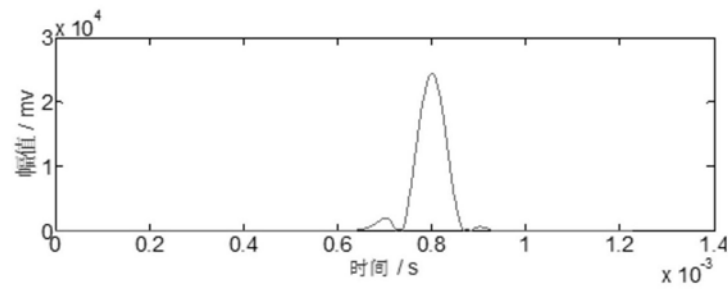


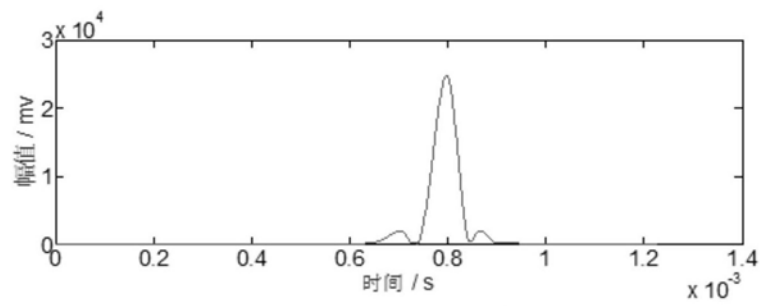
图1



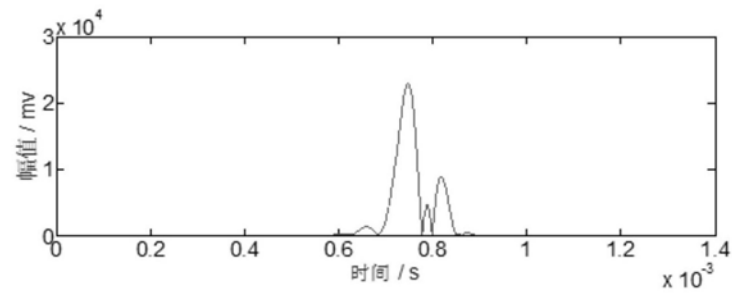
(a) 传感器 a 采集信号处理结果



(b) 传感器 b 采集信号处理结果



(c) 传感器 c 采集信号处理结果



(d) 传感器 d 采集信号处理结果

图2

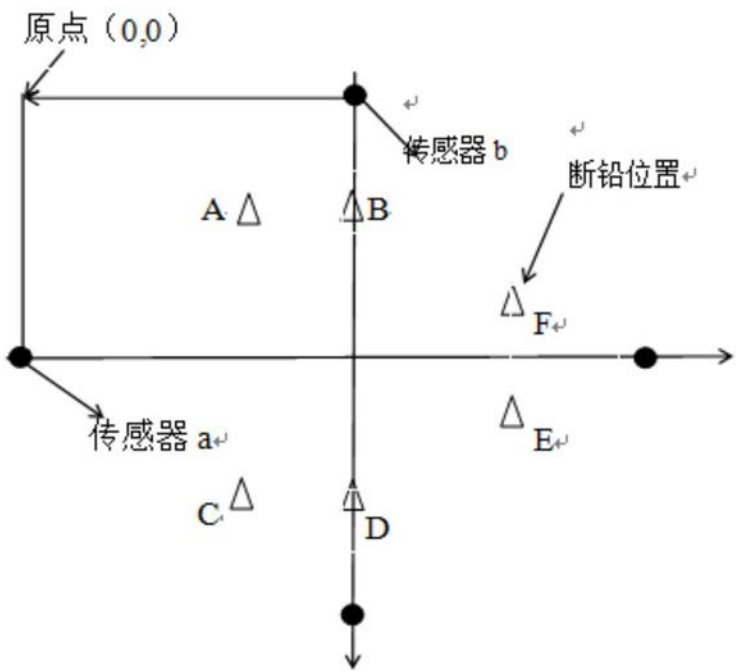


图3

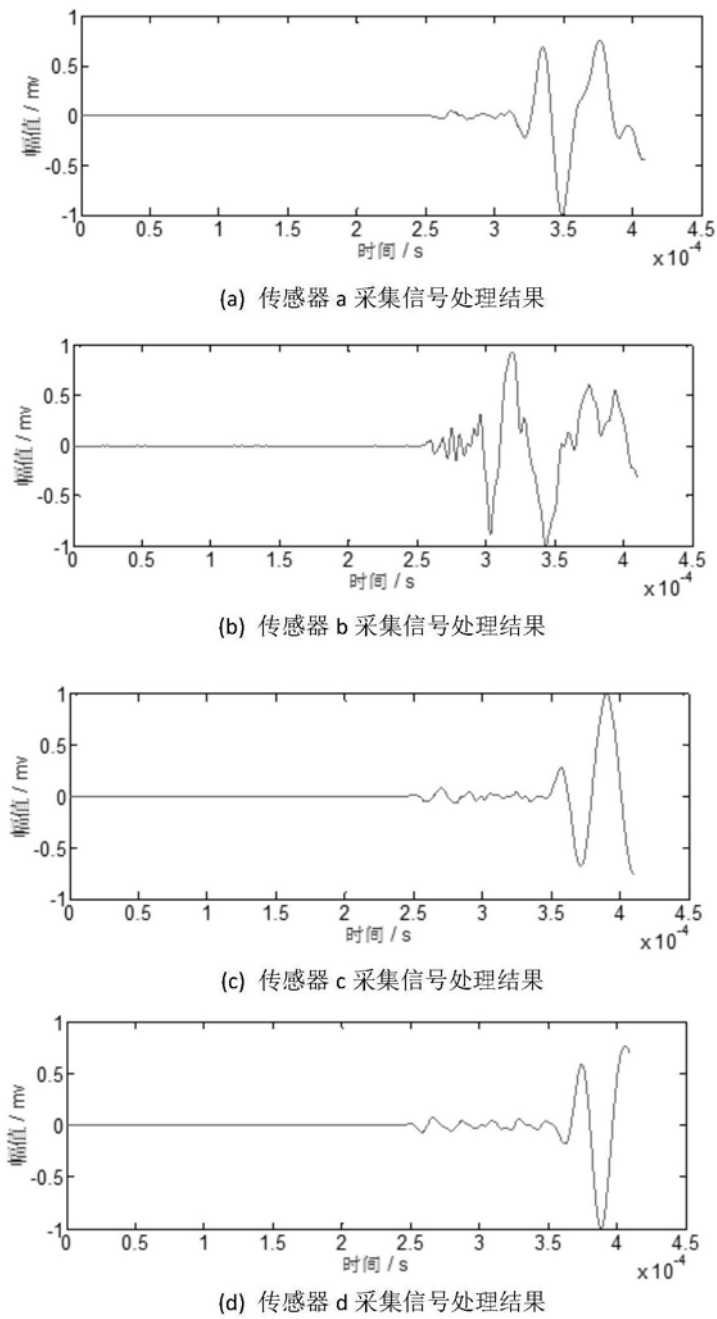


图4

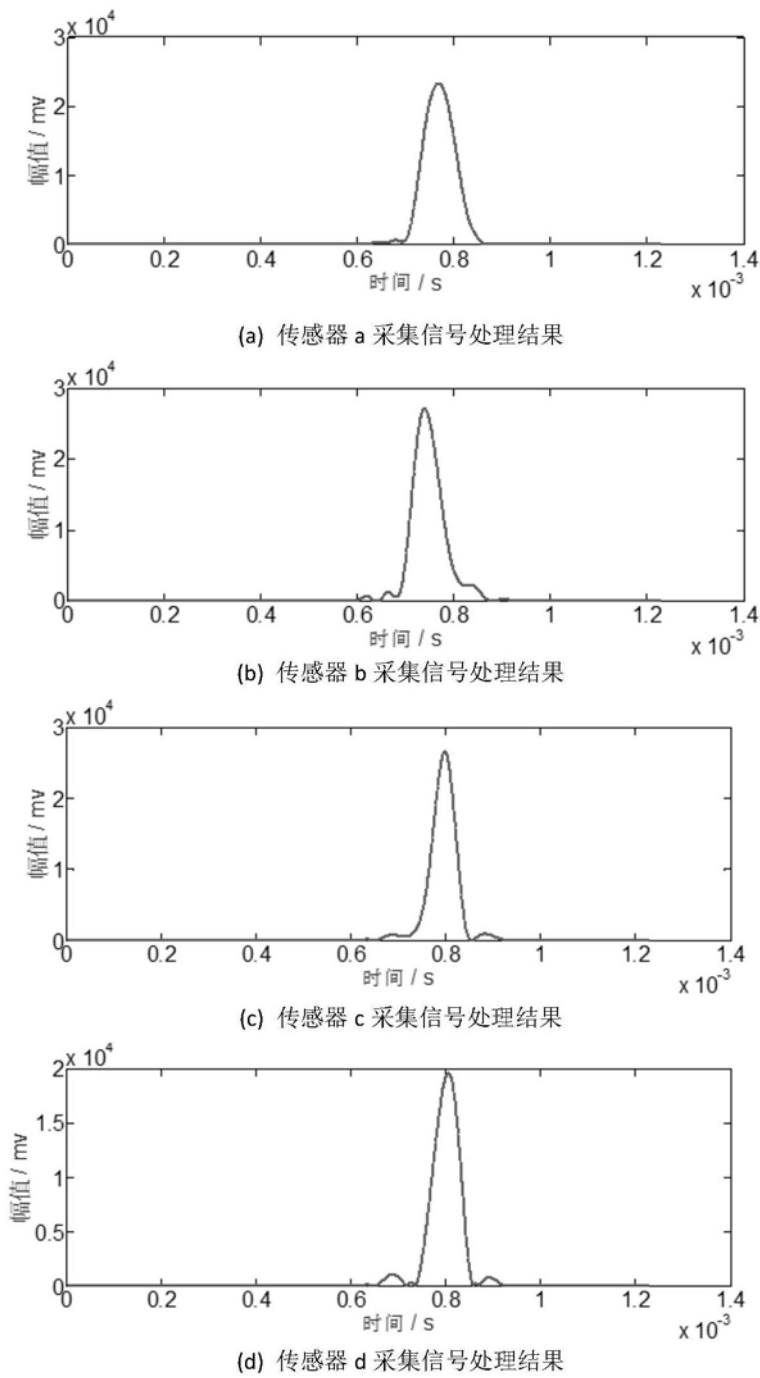


图5

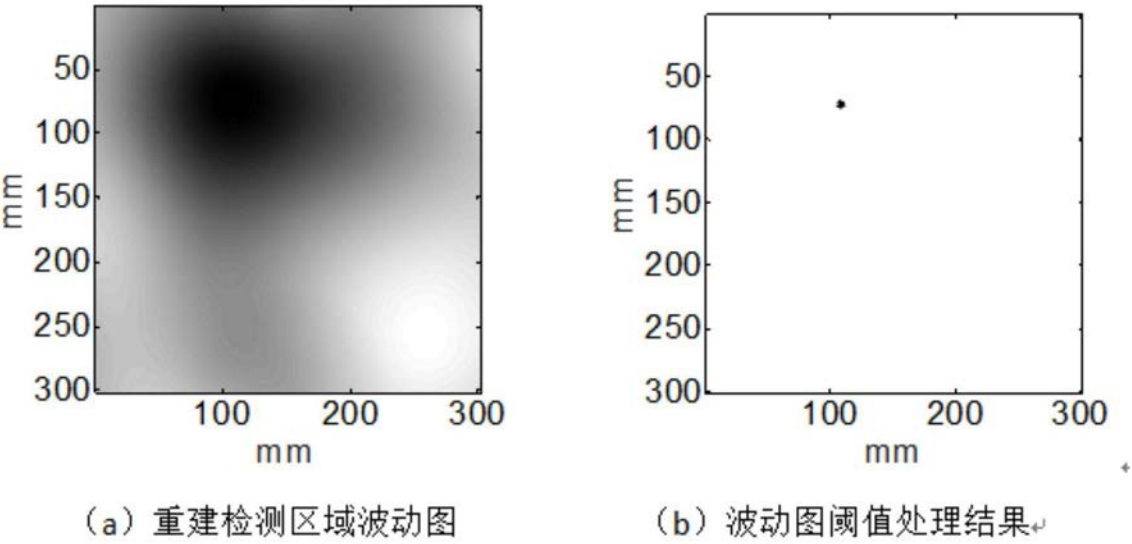


图6