



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110045019 A

(43)申请公布日 2019.07.23

(21)申请号 201910379806.9

(22)申请日 2019.05.08

(71)申请人 南昌航空大学

地址 330063 江西省南昌市丰和南大道696号

(72)发明人 张柏源 陈尧 纪霖轩 冒秋琴
马啸啸 刘晟 刘宏 付桂英

(74)专利代理机构 南昌市平凡知识产权代理事务
所 36122

代理人 张文杰

(51)Int.Cl.

G01N 29/04(2006.01)

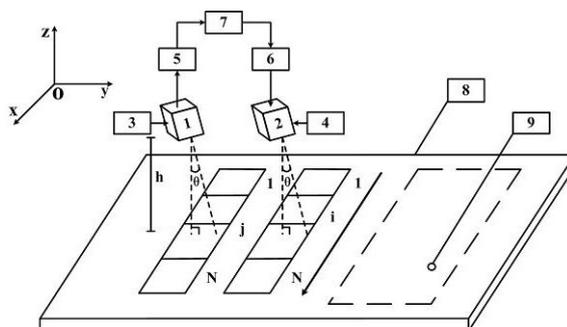
权利要求书2页 说明书6页 附图3页

(54)发明名称

一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法

(57)摘要

本发明公开了一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法。不同于传统的超声阵列信号采集,其只针对单声速介质,空气耦合阵列信号的采集还需要考虑声波在空气中的传播时间。因此,分别采用驻波法和波速法测得空气中的声速 c_a 和兰姆波在板中的传播速度 c_g 。采到的空气耦合超声兰姆波阵列信号以 $N_{ti} \times N_{tj} \times A$ 三维矩阵形式存在,将采集到的空气耦合超声兰姆波阵列信号进行成像网格区域的划分,根据探头布置位置、缺陷位置以及声波传播速度,计算出各个扫描路径的延时时间,按照声波的延时法则,实现信号的延时叠加全聚焦成像。本发明有望将高质量超声全聚焦技术拓展至薄板空气耦合超声兰姆波成像检测,有效提高缺陷检出能力。



1. 一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测装置,包括接收探头、发射探头、接收探头高度角度调节装置、发射探头高度角度调节装置、信号接收器、信号发生器、主机;其特征在于,将发射探头和接收探头置于待测薄板上方,待测薄板内部有缺陷,接收探头高度、角度调节装置连接接收探头,接收探头连接信号接收器,信号接收器连接主机,主机连接信号发生器,信号发生器连接发射探头,发射探头高度、角度调节装置连接发射探头。

2. 根据权利要求1所述的一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测装置,其特征在于:发射探头和接收探头各自具备独立的步进装置,可单独控制探头的步进方向;每步进一次,检测装置会对发射探头进行激励,射入待测薄板产生超声兰姆波,经由待测薄板传播后被接收探头接收,在检测装置中形成A型扫描信号,最后通过全聚焦技术对接收到的信号进行成像处理。

3. 一种根据权利要求1所述的薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法,其特征在于方法步骤如下:

(1) 将待测薄板水平置于检测台,将发射和接收两个空气耦合超声探头悬空放置于待测薄板同侧;

(2) 利用接收探头高度角度调节装置和发射探头高度角度调节装置将接收探头和发射探头在 yo_z 平面沿薄板法线逆时针方向旋转角度 θ ;

(3) 探头以脉冲反射式的一发一收式检测方法发射和接收空气耦合超声兰姆波信号;

(4) 全矩阵数据采集与存储;

(5) 声速测定;

(6) 通过改进全聚焦技术对接收到的信号进行成像处理。

4. 根据权利要求3所述的一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法,其特征在于步骤(4)中的具体步骤为:

(1) 将探头以1mm为步进间距沿 ox 方向移动,发射探头的步进位置设为 $1, 2 \cdots i \cdots N$,接收探头的步进位置设为 $1, 2 \cdots j \cdots N$,通过步进装置使发射探头依次在 $1, 2 \cdots i \cdots N$ 位置发射超声波,在发射探头的每个步进位置上,令接收探头分别在 $1, 2 \cdots j \cdots N$ 位置接收超声波;

(2) 扫查完一次后,接收探头共计接收到 $N \times N$ 个A型扫描信号,将这 N^2 个信号以矩阵 $A_{11}, A_{12}, A_{13} \cdots A_{ij} \cdots A_{NN}$ 的顺序存储起来,信号之间通过“;”隔开,每个信号所对应的下角标表示发射探头和接收探头所在的步进位置,例如,信号 A_{ij} 表示发射探头在位置 i 发射,接收探头在位置 j 接收到的信号。

5. 根据权利要求3所述的一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法,其特征在于步骤(5)中的具体步骤为:

(1) 将发射探头和接收探头按一定间距相向放置,观测声波与其反射波所形成的驻波,根据改变半个波长的传播路程,驻波的波幅会变化一个周期,可以测得波长,再乘以频率,即可得到空气中的声速 c_a ;

(2) 再采用超声探头移动的位移差与A扫波形的时间差来计算兰姆波的群速度 c_g ,以待测薄板为研究对象,采用空气耦合超声探头,激励接收角设置为 θ 度,将接收探头沿着兰姆波的传播方向移动,重复采集多组数据以减少误差,接收探头每次移动的间隔为 Δx ,对接收探头接收到的数据进行希尔伯特变换,使得到的信号峰值更加准确,不同组信号的兰姆波波包极值点之间的时间相差为 Δt ,通过探头的移动距离差以及波形图中A扫波形的时间

差得到薄板中兰姆波的群速度 c_g 。

6. 根据权利要求3所述的一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法,其特征在于步骤(5)中的具体步骤为:

(1) 发射探头和接收探头与薄板法线之间的夹角为 θ ,两探头中心提离高度为 h ,设发射探头在 i 位置发出的兰姆波坐标为 (x_i, y_i) ,成像区域内任意聚焦点的坐标为 $p(x, y)$,接收探头(1)在 j 位置接收到兰姆波的坐标为 (x_j, y_j) ,利用发射位置、聚焦点、接收位置之间的几何关系,得到兰姆波由发射到接收所经历的声程为:

$$d = \frac{2h}{\cos\theta} + \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i + h * \tan\theta - y)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j + h * \tan\theta - y)^2} \quad (1)$$

当兰姆波在薄板中的声速为 c_g ,空气中的声速为 c_a 时,声波所经历的时间为:

$$t = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i + h * \tan\theta - y)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j + h * \tan\theta - y)^2}}{c_g} + \frac{2h}{\cos\theta * c_a} \quad (2)$$

(2) 根据直角三角形中斜边大于直角边,所以当散射点与发射探头和接收探头处于同一条直线上时声程最短,由几何关系可知,兰姆波传播的最短距离为:

$$d_{\min} = 2 \left(\frac{h}{\cos\theta} + (y - y_i) - h * \tan\theta \right) + w \quad (3)$$

式中 w 表示两探头对之间的中心间距,即可推导出兰姆波最短传播时间为:

$$t_{\min} = \frac{2 \left((y - y_i) - h * \tan\theta \right) + w}{c_g} + \frac{2h}{\cos\theta * c_a} \quad (4)$$

由此可得出延时时间为:

$$\Delta t = t - t_{\min} \quad (5)$$

(3) 接收探头接收到的信号以 $N_{t_i} \times N_{t_j} \times A$ 三维矩阵形式存在,其中下标 t_i 与 t_j 分别表示发射探头和接收探头所在的位置, A 表示接收到的A扫描信号,则每个发射接收对应对应的散射点回波幅值的总和可表示为:

$$I_0(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h(S_{ij}(t_{ij} - \Delta t)) \quad (6)$$

式中, S_{ij} 为位置 i 发出,位置 j 接收的兰姆波回波信号, $h()$ 为 S_{ij} 的希尔伯特变换式, $t - \Delta t$ 表示提取目标聚焦点幅值所需的时间。

一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及超声无损检测领域,具体为一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法。

背景技术

[0002] 作为一种新型的无损检测技术,非接触式空气耦合超声检测因其具有无需耦合剂、不会造成材料构件的二次污染、可单侧布置传感器进行在役检测等特点,弥补了传统超声检测的不足。再者,由于兰姆波在薄板中传播速度快、传播距离远、对层板中缺陷敏感等特点,结合空气耦合超声检测技术,使之成为当今薄板构件最为广泛的检测手段之一,得到国内外研究学者的高度认可。但由于是利用空气介质耦合,空气与换能器材料声阻抗严重不匹配,使得空气耦合超声换能器接收信号能量弱、脉冲余振长,因此目前空耦超声检测一般不使用自发自收式检测方法。特别是对于大型薄板的在役检测,只能在薄板同侧布置换能器,采用一发一收式空气耦合超声兰姆波检测方法。现有的透射式的一发一收式检测方法,接收到的缺陷回波信号不携带时间信息,只能判断缺陷是否存在,而不能获悉缺陷所在的位置。基于此,本发明提出一种同侧脉冲反射式空气耦合超声兰姆波一发一收式阵列成像方法。

[0003] 与传统的成像技术相比,全聚焦(Total Focusing Method,TFM)成像技术具有更高的检测信噪比、分辨率和缺陷的检测能力,其依赖于全矩阵(Full Matrix Capture,FMC)数据采集技术。然而,同侧脉冲反射式空气耦合超声兰姆波一发一收式检测方法的被检对象为空气-薄板构成的双声速介质,而且使用该方法检测时收发探头并不在同一个位置。由于上述状况导致难以准确获取缺陷信号回波时间,因而常规自发自收式TFM成像延时法则不再适用于上述检测方法。为克服以上困难,本发明在分别测定声波在薄板中传播速度和空气中传播速度的基础上,算得不同探头间距、提离高度、倾斜角度下的空耦探头-空气-薄板声波传播路径,然后结合薄板中兰姆波和空气中声波的传播速度,推导出适用于同侧脉冲反射式空气耦合超声兰姆波一发一收式检测的全聚焦延时法则。最后,利用该延时法则进行延时叠加,实现薄板空气耦合超声兰姆波检测的超声全聚焦成像,有效提高缺陷检出能力。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法,以解决现有检测技术中兰姆波回波信号分辨率与信噪比较低的问题,本发明基于全聚焦成像的基本原理,对传统全聚焦方法进行改进,使之适用于薄板空气耦合超声兰姆波的成像检测。

[0005] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测装置,包括接收探头、发射探头、接收探头高度角度调节装置、发射探头高度角度调节装置、信号接收器、信号发生器、主机;其特征在于,将发射探头和接收探头置于待测薄板上方,待测薄板内部有缺陷,接收探头高度、角度调节装置连接接收探头,接收探头连

接信号接收器,信号接收器连接主机,主机连接信号发生器,信号发生器连接发射探头,发射探头高度、角度调节装置连接发射探头。

[0006] 进一步,所述发射探头和接收探头各自具备独立的步进装置,可单独控制探头的步进方向;每步进一次,检测装置会对发射探头进行激励,射入待测薄板产生超声兰姆波,经由待测薄板传播后被接收探头接收,在检测装置中形成A型扫描信号,最后通过全聚焦技术对接收到的信号进行成像处理。

[0007] 本发明解决其技术问题所采用的另一种技术方案是:一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测方法,其特征在于方法步骤如下:

[0008] (1) 将待测薄板水平置于检测台,将发射和接收两个空气耦合超声探头悬空放置于待测薄板同侧;

[0009] (2) 利用接收探头高度角度调节装置和发射探头高度角度调节装置将接收探头和发射探头在 yoz 平面沿薄板法线逆时针方向旋转角度 θ ;

[0010] (3) 探头以脉冲反射式的一发一收式检测方法发射和接收空气耦合超声兰姆波信号;

[0011] (4) 全矩阵数据采集与存储;

[0012] (5) 声速测定;

[0013] (6) 通过改进全聚焦技术对接收到的信号进行成像处理。

[0014] 进一步,所述步骤(4)中全矩阵数据采集与存储的具体步骤为:

[0015] (1) 将探头以1mm为步进间距沿 ox 方向移动,发射探头的步进位置设为 $1,2\cdots i\cdots N$,接收探头的步进位置设为 $1,2\cdots j\cdots N$,通过步进装置使发射探头依次在 $1,2\cdots i\cdots N$ 位置发射超声波,在发射探头的每个步进位置上,令接收探头分别在 $1,2\cdots j\cdots N$ 位置接收超声波;

[0016] (2) 扫查完一次后,接收探头共计接收到 $N\times N$ 个A型扫描信号,将这 N^2 个信号以矩阵 $A_{11},A_{12},A_{13}\cdots A_{ij}\cdots A_{NN}$ 的顺序存储起来,信号之间通过“;”隔开,每个信号所对应的下角标表示发射探头和接收探头所在的步进位置,例如,信号 A_{ij} 表示发射探头在位置 i 发射,接收探头在位置 j 接收到的信号。

[0017] 进一步,所述步骤(5)中声速测定的具体步骤为:

[0018] (1) 将发射探头和接收探头按一定间距相向放置,观测声波与其反射波所形成的驻波,根据改变半个波长的传播路程,驻波的波幅会变化一个周期,可以测得波长,再乘以频率,即可得到空气中的声速 c_a ;

[0019] (2) 再采用超声探头移动的位移差与A扫波形的时间差来计算兰姆波的群速度 c_g ,以待测薄板为研究对象,采用空气耦合超声探头,激励接收角设置为 θ 度,将接收探头沿着兰姆波的传播方向移动,重复采集多组数据以减少误差,接收探头每次移动的间隔为 Δx ,对接收探头接收到的数据进行希尔伯特变换,使得到的信号峰值更加准确,不同组信号的兰姆波波包极值点之间的时间相差为 Δt ,通过探头的移动距离差以及波形图中A扫波形的时间差得到薄板中兰姆波的群速度 c_g 。

[0020] 进一步,所述步骤(5)中通过改进全聚焦技术对接收到的信号进行成像处理的具体步骤为:

[0021] (1) 发射探头和接收探头与薄板法线之间的夹角为 θ ,两探头中心提离高度为 h ,设

发射探头在*i*位置发出的兰姆波坐标为 (x_i, y_i) , 成像区域内任意聚焦点的坐标为 $p(x, y)$, 接收探头(1)在*j*位置接收到兰姆波的坐标为 (x_j, y_j) , 利用发射位置、聚焦点、接收位置之间的几何关系, 得到兰姆波由发射到接收所经历的声程为:

$$[0022] \quad d = \frac{2h}{\cos\theta} + \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i + h * \tan\theta - y)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j + h * \tan\theta - y)^2} \quad (1)$$

[0023] 当兰姆波在薄板中的声速为 c_g , 空气中的声速为 c_a 时, 声波所经历的时间为:

$$[0024] \quad t = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i + h * \tan\theta - y)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j + h * \tan\theta - y)^2}}{c_g} + \frac{2h}{\cos\theta * c_a} \quad (2)$$

[0025] (2) 根据直角三角形中斜边大于直角边, 所以当散射点与发射探头和接收探头处于同一条直线上时声程最短, 由几何关系可知, 兰姆波传播的最短距离为:

$$[0026] \quad d_{\min} = 2 \left(\frac{h}{\cos\theta} + (y - y_i) - h * \tan\theta \right) + w \quad (3)$$

[0027] 式中 w 表示两探头对之间的中心间距, 即可推导出兰姆波最短传播时间为:

$$[0028] \quad t_{\min} = \frac{2 \left((y - y_i) - h * \tan\theta \right) + w}{c_g} + \frac{2h}{\cos\theta * c_a} \quad (4)$$

[0029] 由此可得出延时时间为:

$$[0030] \quad \Delta t = t - t_{\min} \quad (5)$$

[0031] (3) 接收探头接收到的信号以 $N_{t_i} \times N_{t_j} \times A$ 三维矩阵形式存在, 其中下标 t_i 与 t_j 分别表示发射探头和接收探头所在的位置, A 表示接收到的A扫描信号, 则每个发射接收对应对应的散射点回波幅值的总和可表示为:

$$[0032] \quad I_0(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h(S_{ij}(t_{ij} - \Delta t)) \quad (6)$$

[0033] 式中, S_{ij} 为位置*i*发出, 位置*j*接收的兰姆波回波信号, $h()$ 为 S_{ij} 的希尔伯特变换式, $t - \Delta t$ 表示提取目标聚焦点幅值所需的时间。

[0034] 本发明的有益效果是:

[0035] (1) 非接触式空气耦合超声检测具有无需耦合剂、不会造成材料构件的二次污染、可单侧布置传感器进行在役检测等优点;

[0036] (2) 全聚焦成像结果与原始图像相比, 具有更高的检测信噪比、分辨率和缺陷的检测能力;

[0037] (3) 不同于传统的超声阵列信号采集, 其只针对单声速介质, 空气耦合阵列信号的采集还需要考虑声波在空气中的传播时间。因此, 分别采用驻波法和波速法测得空气中的声速 c_a 和兰姆波在板中的传播速度 c_g 。采到的空气耦合超声兰姆波阵列信号以 $N_{t_i} \times N_{t_j} \times A$ 三维矩阵形式存在, 将采集到的空气耦合超声兰姆波阵列信号进行成像网格区域的划分, 根据探头布置位置、缺陷位置以及声波传播速度, 计算出各个扫描路径的延时时间, 按照声波的延时法则, 实现信号的延时叠加全聚焦成像。本发明有望将高质量超声全聚焦技术拓展至薄板空气耦合超声兰姆波成像检测, 有效提高缺陷检出能力。

附图说明

[0038] 下面结合附图对本发明进一步说明。

[0039] 图1为本发明的空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测示意图；

[0040] 图2为本发明的空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测几何关系图；

[0041] 图3为本发明的待测薄板中缺陷的形状大小及位置图；

[0042] 图4为本发明的圆形通孔缺陷B扫图像图；

[0043] 图5为本发明的圆形通孔缺陷时域全聚焦图像图；

[0044] 在图中,1、接收探头,2、发射探头,3、接收探头高度、角度调节装置,4、发射探头高度、角度调节装置,5、信号接收器,6、信号发生器,7、主机,8、待测薄板,9、待测薄板内部缺陷。

具体实施方式

[0045] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及具体实施方式,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施方式仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0046] 参见图1至图5,本发明是这样来工作和实施的,一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测装置,采用型号为NAUT的高灵敏度非接触式空气耦合超声信号采集系统,该系统由JPR600C的高功率信号发射/接收器、探头高度、角度调节装置、前置放大器、信号采集卡及主机等装置组成。其特征是:信号发射/接收探头布置在待测薄板同侧,用高度、角度调节装置调节信号发射/接收探头的中心提离高度和信号发射/接收探头在 yo z平面上沿薄板法线逆时针方向的偏转角度,信号接收探头连接前置放大器,采用前置放大器放大接收信号,可根据接收探头的中心频率调节放大器的档位,对接收信号进行0~60dB的增幅,前置放大器连接信号采集卡,信号采集卡用于记录并保存实验数据,信号采集卡连接主机,主机连接 JPR600C高功率信号发生/接收器,高功率信号发生/接收器连接信号发射探头,发射脉冲信号设置为汉宁窗脉冲波。发射探头和接收探头各自具备独立的步进装置,可单独控制探头的步进方向,发射探头和接收探头的步进距离设置为1mm,步进次数设置为N,将发射探头的步进位置设为 $1, 2 \cdots i \cdots N$,接收探头的步进位置设为 $1, 2 \cdots j \cdots N$,通过步进装置使发射探头依次在 $1, 2 \cdots i \cdots N$ 位置发射超声波,在发射探头的每个步进位置上,令接收探头分别在 $1, 2 \cdots j \cdots N$ 位置接收超声波,扫查完一次后,接收探头共计接收到 $N \times N$ 个A型扫描信号。然后分别采用驻波法和波速法测得空气中的声速 c_a 和兰姆波在板中的传播速度 c_g ,算得不同探头间距、提离高度、倾斜角度下的空耦探头-空气-薄板声波传播路径,结合薄板兰姆波和空气中声波的传播速度,推导出适用于同侧脉冲反射式空气耦合超声兰姆波一发一收式检测的全聚焦延时法则。最后,利用延时法则进行延时叠加,实现薄板空气耦合超声兰姆波检测的超声全聚焦成像。

[0047] 一种薄板空气耦合超声兰姆波全聚焦成像检测,包括如下步骤:

[0048] 1. 装置(工作原理)

[0049] 将发射探头2和接收探头1置于待测薄板8上方,待测薄板8内部有缺陷9,接收探头高度、角度调节装置3连接接收探头1。接收探头高度、角度调节装置3用于调节接收探头1的中心提离高度和接收探头1在 yo z平面沿薄板法线逆时针方向的旋转角度,接收探头1连

接信号接收器5,信号接收器5接收到的信号经前置放大器放大,信号接收器5连接主机7,主机7用于发射和接收相应指令并在指定软件上呈现信号波形,记录并保存实验数据,主机7连接信号发生器6,信号发生器6用于激发脉冲信号,发射脉冲信号设置为汉宁窗脉冲波,并放大脉冲功率,信号发生器6连接发射探头2,发射探头高度、角度调节装置4连接发射探头2,通过发射探头高度、角度调节装置4调节发射探头2的中心提离高度和发射探头2在yoz平面沿薄板法线逆时针方向的旋转角度后,发射探头2发射信号,在待测薄板8中激发适宜模态的超声兰姆波。发射探头2和接收探头1各自具备独立的步进装置,可单独控制探头的步进方向。每步进一次,检测系统会对发射探头2进行激励,射入待测薄板8产生超声兰姆波,经由待测薄板8传播后被接收探头1接收,在检测系统中形成A型扫描信号,最后通过全聚焦技术对接收到的信号进行成像处理。

[0050] 2. 被检测薄板信息和探头角度选取原则

[0051] 本发明采用同侧一发一收反射式激励接收空气耦合超声兰姆波信号,选取A0模式兰姆波作为检测波,待测薄板8长600mm,宽400mm,厚2mm,在待测薄板8中加工的通孔缺陷。缺陷的形状大小及位置如图3所示。发射探头2和接收探头1为中心频率0.2MHz的空气耦合超声平探头,晶片大小为 14×20 mm。两探头中心间距为85mm,提离高度为30mm,使两探头在yoz平面沿薄板法线逆时针方向旋转12度,发射探头2距离待检试件的边界为300mm,发射-接收探头中间放置一块海绵,其目的是防止发射探头2发射的直达波直接被接收探头1所接收以及空气中的噪声对泄漏兰姆波的影响。

[0052] 3. 信号采集(步进方式、全矩阵数据采集和保存)

[0053] 将发射探头2和接收探头1的步进距离设置为1mm,步进次数设置为N。这样,发射探头2的步进位置为 $1, 2 \cdots i \cdots N$,接收探头1的步进位置为 $1, 2 \cdots j \cdots N$ 。当发射探头2在步进位置1时发射超声波,接收探头1在步进装置的步进下在 $1, 2 \cdots j \cdots N$ 位置接收超声波,共计得到N个A型扫描信号。以此类推,通过步进装置使发射探头2依次在 $2, 3 \cdots i \cdots N$ 位置发射超声波,依次在每个步进位置上,令接收探头1在 $1, 2 \cdots j \cdots N$ 位置接收超声波。扫描完一次后,接收探头1共计接收到 $N \times N$ 个A型扫描信号,将这 N^2 个信号以矩阵 $A_{11}, A_{12}, A_{13} \cdots A_{ij} \cdots A_{NN}$ 的顺序存储起来,信号之间通过“;”隔开。每个信号所对应的下角标表示发射探头2和接收探头1所在的步进位置。例如,信号 A_{ij} 表示发射探头2在位置i发射,接收探头1在位置j接收到的信号。

[0054] 4. 声速 c_a 、 c_g 的测定

[0055] 本发明采用驻波法测定空气中的声速 c_a 。将发射探头2和接收探头1按一定间距相向放置,观测声波与其反射波所形成的驻波,根据改变半个波长的传播路程,驻波的波幅会变化一个周期,可以测得波长,再乘以频率,即可得到空气中的声速 c_a 。再通过超声探头移动的位移差与A扫波形的时间差来计算兰姆波的群速度 c_g 。以2mm厚的待测薄板8为研究对象,采用0.2MHz空气耦合超声探头,激励接收角为12度。将接收探头1沿着兰姆波的传播方向移动,重复采集多组原始时域信号以减少误差,接收探头1每次移动的间隔为 Δx ,对接收探头1接收到的原始时域信号进行希尔伯特变换,使得到的信号峰值更加准确,不同组信号的兰姆波波包极值点之间的时间相差为 Δt 。通过探头的移动距离差以及波形图中A扫波形的时间差即可算出兰姆波的群速度 c_g 。

[0056] 5. 同侧空耦超声兰姆波全聚焦成像

[0057] 发射探头2和接收探头1与薄板法线之间的夹角为 θ 、探头中心提离高度为h。设发

射探头2在*i*位置发出兰姆波的坐标为 (x_i, y_i) , 成像区域内一任意聚焦点的坐标为 $p(x, y)$, 接收探头1在*j*位置接收到兰姆波的坐标为 (x_j, y_j) 。利用发射位置、聚焦点、接收位置之间的几何关系, 得到由位置*i* (x_i, y_i) 发出的兰姆波到达聚焦点 $p(x, y)$ 后, 被接收探头在位置*j* (x_j, y_j) 接收时所经历的声程为

$$[0058] \quad d = \frac{2h}{\cos \theta} + \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i + h * \tan \theta - y)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j + h * \tan \theta - y)^2} \quad (1)$$

[0059] 当兰姆波在薄板中的声速为 c_g , 空气中的声速为 c_a 时, 声波所经历的时间为:

$$[0060] \quad t = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i + h * \tan \theta - y)^2} + \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j + h * \tan \theta - y)^2}}{c_g} + \frac{2h}{\cos \theta * c_a} \quad (2)$$

[0061] 如图2, 根据直角三角形中斜边大于直角边, 可得当*i* = *j*时, 发射位置*i*和接收位置*j*到散射点距离最短, 即散射点与发射探头2和接收探头1处于同一条直线上。由几何关系可知, 此时兰姆波的传播距离为:

$$[0062] \quad d_{\min} = 2 \left(\frac{h}{\cos \theta} + (y - y_i) - h * \tan \theta \right) + w \quad (3)$$

[0063] 式中*w*表示两探头对之间的中心间距, 即可推导出兰姆波最短传播时间为:

$$[0064] \quad t_{\min} = \frac{2 \left((y - y_i) - h * \tan \theta \right) + w}{c_g} + \frac{2h}{\cos \theta * c_a} \quad (4)$$

[0065] 由此可得出延时时间为:

$$[0066] \quad \Delta t = t - t_{\min} \quad (5)$$

[0067] 接收探头1接收到的信号以 $N_{t_i} \times N_{t_j} \times A$ 三维矩阵形式存在, 其中下标 t_i 与 t_j 分别表示发射探头2 和接收探头1所在的位置, *A*表示接收到的A扫描信号。发射-接收探头对的数量为 N^2 个, 则每个发射接收对应对应的散射点回波幅值的总和可表示为:

$$[0068] \quad I_0(x, y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h(S_{ij}(t_{ij} - \Delta t)) \quad (6)$$

[0069] 式中, S_{ij} 为位置*i*发出, 位置*j*接收的兰姆波回波信号, $h()$ 为 S_{ij} 的希尔伯特变换式, $t - \Delta t$ 表示提取目标聚焦点幅值所需的时间。

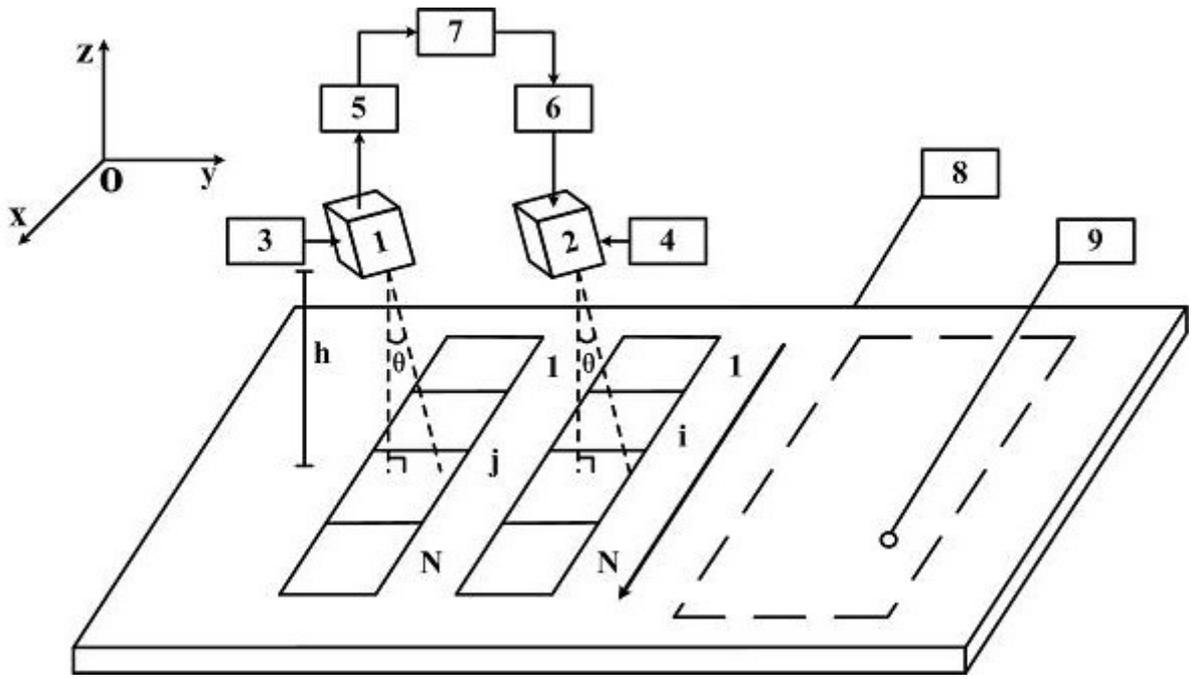


图1

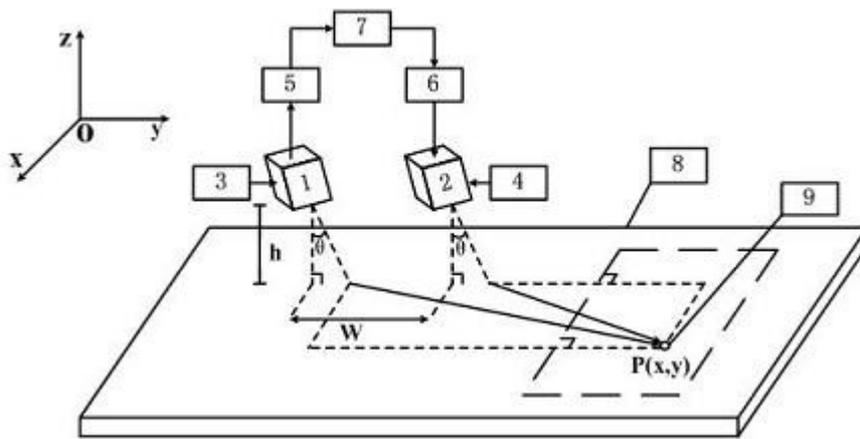


图2

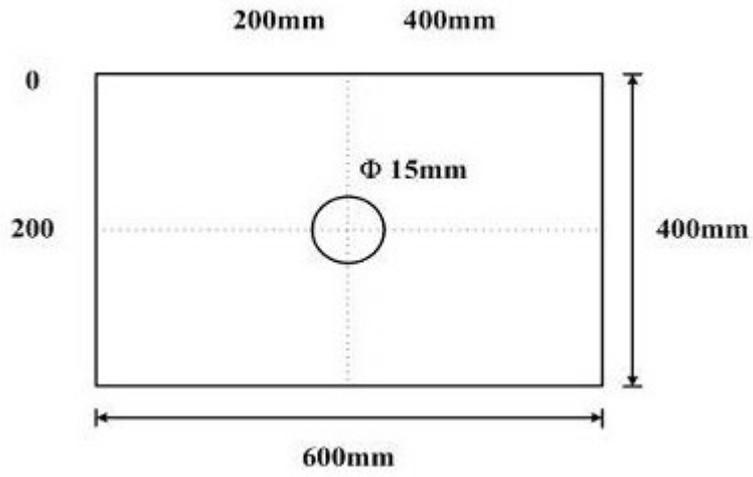


图3

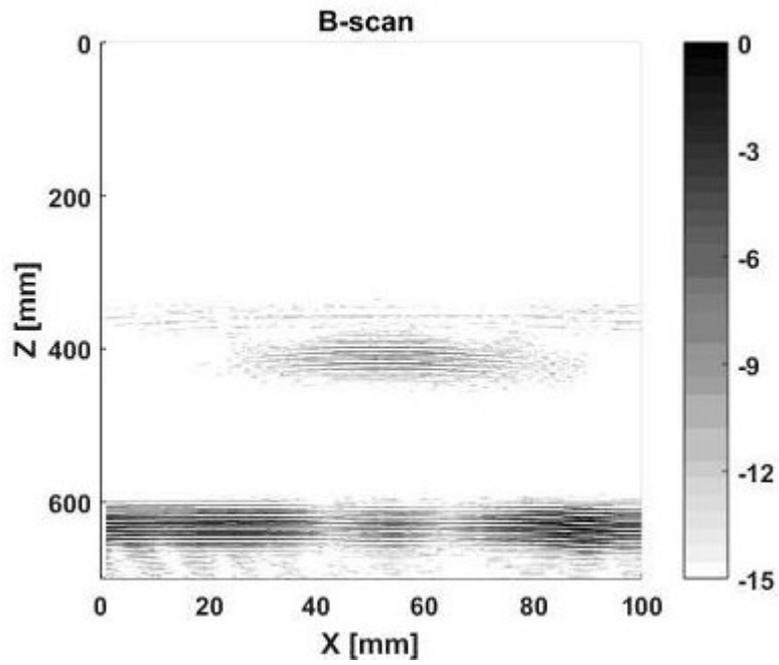


图4

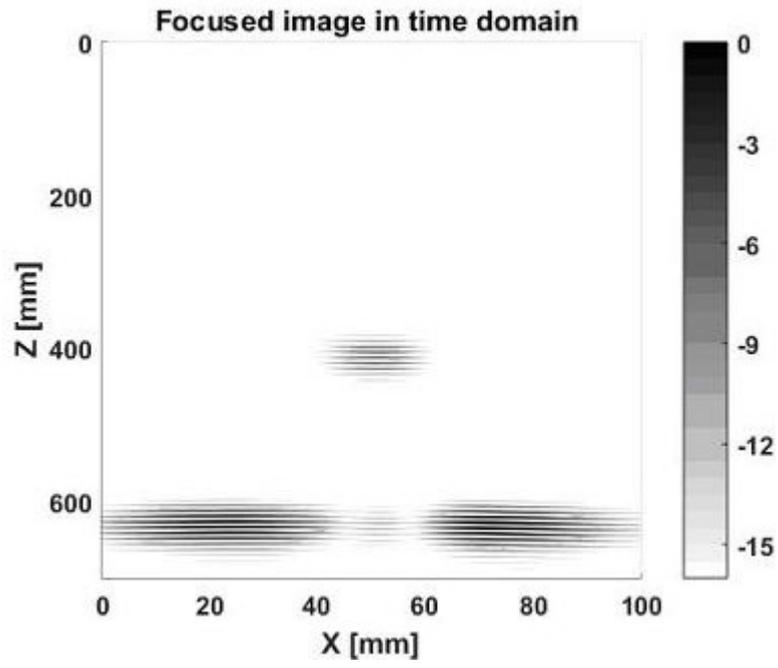


图5