



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113899816 A

(43) 申请公布日 2022. 01. 07

(21) 申请号 202111061572.7

(22) 申请日 2021.09.10

(71) 申请人 国营芜湖机械厂

地址 241006 安徽省芜湖市湾里机场

申请人 哈尔滨工业大学

(72) 发明人 阚艳 范鑫 张平 程宗辉 朱萌

史维佳 李佳鑫

(74) 专利代理机构 哈尔滨市阳光惠远知识产权

代理有限公司 23211

代理人 张宏威

(51) Int. Cl.

G01N 29/07 (2006.01)

G01N 29/44 (2006.01)

权利要求书4页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

一种T型复合结构的超声无损检测装置及方法和R区检测方法及装置

(57) 摘要

一种T型复合结构的超声无损检测装置及方法和R区检测方法及装置,涉及无损检测领域。现有的T型复合结构缺陷检测精度低,没有一种能够准确检测R区的缺陷的方法。针对上述问题,本申请采用的技术方案为:标定超声波在被测复合材料内部沿各个方向的传播速度,采集超声波在材料内部传播时产生的反射回波进行成像;获取两种材料交界面处的反射回波强度,进行成像;从R区的背面进行检测;根据检测结果和成像结果判断。本申请采用逐层扫描的方式对T型复合结构进行在役超声无损检测,有效提高了T型复合结构的缺陷检测精度,同时利用从R区背面发射聚焦超声波的方法简化了R区检测的难点。可应用在航空航天领域中对T型复合结构检测的工作中。



1. 一种T型复合结构的R区缺陷的背面检测方法,其特征在于,所述方法为:

从R区的背面、顶层复合材料层外侧发射超声波信号、并采集回波信号,根据回波信号获得待检测的R区是否存在缺陷,并确定缺陷位置坐标。

2. 一种T型复合结构的R区缺陷的背面检测方法,其特征在于,所述方法包括:

标定超声波在被测顶层复合材料内部沿各个方向的传播速度;

对待检测的目标区域进行网格划分,得到多个网格点,逐一对每个网格点从R区背面、采用超声波相控阵进行检测:

针对超声波相控阵的第*i*个阵元,根据费马原理获取由超声相控阵的坐标为 $(x_i, z_i)$ 的第*i*个阵元发射超声波经过两层介质到达聚焦点P的传播时间 $T_i$ :

$$T_i = \min_{\substack{|x_s| \leq L/2 \\ z_s = H}} \left( \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (z_i - z_s)^2}}{c_1(\theta_i)} + \frac{\sqrt{(x_s - x_0)^2 + (z_s - z_0)^2}}{c_2} \right)$$

其中, $c_1$ 表示T型复合结构第一层介质的超声波传播速度, $c_2$ 示T型复合结构第二层介质的超声波传播速度, $(x_s, z_s)$ 表示超声波由第一层介质入射到第二层介质的入射点坐标, $(x_0, z_0)$ 表示在R区聚焦的点的坐标, $H$ 表示被测T型复合结构的顶层复合材料层顶层的厚度, $L$ 表示所述顶层复合材料层短边的长度, $\theta_i$ 表示超声波在第一层介质内部的传播方向;

通过现有技术中的优化算法获取 $x_s$ 和 $z_s$ 的值;

遍历超声相控阵的每个阵元获得每个阵元的传播时间,并筛选出最大的传播时间 $T_{\max}$ ;

获得每个阵元的激励延迟时间,所述第*i*个阵元的激励延迟时间 $T_j = T_{\max} - T_i$ ;

通过超声波相控阵发射超声波,并采集聚焦波束的反射回波信号,对第*i*个阵元的反射回波信号的反射时间叠加对应的接收延迟时间,所述接收延迟时间与第*i*个阵元的激励延迟时间 $T_j$ 相等;

将所有阵元计算对应的零延迟阵元从发射超声波到聚焦点后再返回零延迟阵元传播时间的回波信号并进行叠加和成像,若成像结果有相对明亮点,则表示在该点对应位置存在缺陷,否则该聚焦点位置不存在缺陷;所述的零延迟阵元为:激励信号无延迟时间的阵元。

3. 一种T型复合结构的R区缺陷的背面超声无损检测装置,其特征在于,所述装置包括:

传播时间 $T_i$ 获得模块,用于根据费马原理获得由相控阵的坐标为 $(x_i, z_i)$ 的第*i*个阵元从所述T型复合结构上部发射超声波经过两层介质到达聚焦点P的传播时间 $T_i$ :

$$T_i = \min_{\substack{|x_s| \leq L/2 \\ z_s = H}} \left( \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (z_i - z_s)^2}}{c_1(\theta_i)} + \frac{\sqrt{(x_s - x_0)^2 + (z_s - z_0)^2}}{c_2} \right)$$

公式中, $c_1$ 表示第一层介质的超声波传播速度, $c_2$ 示第二层介质的超声波传播速度, $(x_s, z_s)$ 表示超声波由第一层介质入射到第二层介质的入射点坐标, $(x_0, z_0)$ 表示发射超声波的聚焦点的坐标, $H$ 表示被测T型复合结构的顶层复合材料层顶层的厚度, $L$ 表示所述顶层复合材料层短边的长度, $\theta_i$ 表示发射超声波在第一层介质内部的传播方向;

坐标 $(x_s, z_s)$ 优化获取模块:用于通过优化算法获取 $x_s$ 和 $z_s$ 的值;

最大传播时间获取模块:用于对比所有阵元的传播时间,获得最大传播时间 $T_{\max}$ ;

激励延迟时间获取模块:用于根据 $T_j = T_{\max} - T_i$ 获得每个阵元的激励延迟时间;

回波信号延迟处理模块:用于对采集的聚焦波束的反射回波信号叠加对应的接收延迟时间、获得延迟后的回波信号,即:对第*i*个阵元的反射回波信号的反射时间叠加该该阵元的接收延迟时间,所述接收延迟时间与该阵元的激励延迟时间 $T_j$ 相等;

回波信号叠加模块,用于对所有阵元计算对应零延迟阵元从发射超声波到聚焦点后再返回零延迟阵元传播时间的回波信号并进行叠加和成像,获得成像结果;缺陷判断模块,用于根据成像结果判断是否有缺陷;

缺陷位置确定模块,用于根据判定为有缺陷对应的阵元,根据成像结果中的相对明亮点,确定该缺陷对应的阵元。

4. 一种T型复合结构的缺陷超声无损检测方法,其特征在于,所述方法为:

顶层复合材料层缺陷检测方法,具体为:标定超声波在被测顶层复合材料内部沿各个方向的传播速度,采集超声波在材料内部传播时产生的反射回波,进行成像,根据成像明暗度判断被测顶层复合材料中是否存在缺陷;

材料交界面缺陷检测方法,具体为:获取两种材料交界面处的反射回波强度,然后对两种材料交界面处的反射回波进行成像,根据成像明暗度判断两种材料交界处是否存在缺陷;

R区缺陷检测方法,具体为权利要求1所述一种T型复合结构的R区缺陷的检测方法。

5. 一种T型复合结构的缺陷超声无损检测方法,其特征在于,所述方法包括:

顶层复合材料层缺陷检测的步骤,该步骤进一步包括:

根据相控阵采集系统采用全矩阵捕获的方式采集超声波在复合材料内部传播时的反射回波;

对所述的反射回波结合经过速度修正的全聚焦算法进行成像;

根据成像的明暗度判断被测顶层复合材料中是否存在缺陷,成像结果中相对亮度高的像素点对应的阵元位置存在缺陷;

材料交界面缺陷检测的步骤,该步骤进一步包括:

对两种材料的交界面进行网格划分,或者多个网格点;

根据每个网格点的位置确定对应的阵元的检测位置;

针对每个网格点进行检测,具体为:

采集相控阵中第*i*个阵元到第*j*个网格点的传播时间 $t_{ij}$ ;

根据

$$\Delta t_i = \max(t_1, t_2, \dots, t_N) - t_i \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

获得第*i*个阵元的延迟时间 $\Delta t_i$ ;其中, $t_i$ 表示第*i*个阵元的激励时间;

采用延迟激励方式激励相控阵的每个阵元,所述延迟激励方式,是指将第*i*个阵元的激励时间延迟时间 $\Delta t_i$ 的激励方式;

采集所有回波信号;

对采集的所有回波信号进行成像,根据成像的明暗度判断被测材料交界面中是否存在缺陷,成像结果中相对亮度高的像素点对应的阵元位置存在缺陷R区缺陷检测的步骤,该步骤为权利要求1所述的一种T型复合结构的R区缺陷的检测方法。

6. 根据权利要求5所述的一种T型复合结构的缺陷超声无损检测方法,其特征在于,所

述的对所述的反射回波结合经过速度修正的全聚焦算法进行成像的步骤包括：

采集第*i*个阵元到待见区域内的待检聚焦点的传播距离；

采集第*i*个阵元与所述聚焦点之间的沿垂直方向的偏转角度；

根据声速拟合公式中求解声速，所述的声速为待采集的反射回波的方向的声速；

根据线性插值算法结合现有技术中的换能器接收到的信号采集与所述信号对应的像素点的回波信号；所述的换能器用于将电信号转换为超声信号。

将所有像素点的回波信号进行成像。

7. 根据权利要求5所述的一种T型复合结构的缺陷超声检测方法，其特征在于，所述的材料界面缺陷检测的步骤中，对采集的所有回波信号进行成像的方法包括：

采用对数压缩的方式对采集的反射回波进行成像，所述的对数压缩的方式具体为通过下述公式：

$$g = c \times \log_{10}(1+f),$$

其中，*c*为常数，*f*表示原始图像的每一点像素的幅值，*g*表示经过对数压缩之后的每一点像素的幅值。

8. 根据权利要求6或7所述的一种T型复合结构的缺陷超声在役检测方法，其特征在于，所述的标定超声波在被测复合材料内部沿各个方向的传播速度的方法为：

利用超声液浸背反射法测量超声波在被测复合材料部分方向的传播速度，然后利用多项式线性拟合方式获取复合材料内部超声波传播速度与传播方向的函数关系，给定测试数据 $p_i, q_i$ ，其中 $i = 1, 2, \dots, M$ ， $p_i$ 表示超声波的传播方向， $q_i$ 表示超声波的传播速度，使得拟合曲线 $y = \varphi(x)$ 与给定测试数据的偏差最小，表示成矩阵的形式为：

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N p_i & L & \sum_{i=1}^N p_i^n \\ \sum_{i=1}^N p_i & \sum_{i=1}^N p_i^2 & L & \sum_{i=1}^N p_i^{n+1} \\ M & M & O & M \\ \sum_{i=1}^N p_i^n & \sum_{i=1}^N p_i^{n+1} & L & \sum_{i=1}^N p_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ M \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ M \\ q_n \end{bmatrix},$$

求解这个矩阵方程，得到多项式的所有系数，获得拟合曲线，确定超声波在复合材料内部任意方向的传播速度。

9. 根据权利要求8所述的一种T型复合结构的缺陷超声在役检测方法，其特征在于，所述的获取反射回波的方法为：利用C扫的方式进行检测，具体为：

对粘接界面进行网格划分，根据粘接界面网格点的位置确定超声相控阵探头的检测位置，然后计算相控阵所有阵元到待测网格点的传播时间 $t_{ij}$ ，所述的 $t_{ij}$ 表示相控阵第*i*个阵元到第*j*个网格点的传播时间，根据传播时间差异获取相控阵各个阵元的激励延迟时间 $t_i$ ，所述的激励延迟时间通过以下公式获取：

$$\Delta t_i = \max(t_1, t_2, K, t_N) - t_i \quad (i = 1, 2, K, N),$$

通过相控阵获取交界面处的反射回波。

10. 一种T型复合结构的缺陷超声无损检测装置，其特征在于，所述装置包括：

顶层复合材料层缺陷检测模块，用于标定超声波在被测顶层复合材料内部沿各个方向

的传播速度,采集超声波在材料内部传播时产生的反射回波进行成像,根据成像明暗度判断被测顶层复合材料中是否存在缺陷;

材料界面缺陷检测模块,用于获取两种材料界面处的反射回波强度,对两种材料界面处的反射回波进行成像,根据成像明暗度判断两种材料交界处是否存在缺陷;

R区缺陷检测模块,具体为权利要求3所述一种T型复合结构的R区缺陷的检测装置。

## 一种T型复合结构的超声无损检测装置及方法和R区检测方法 及装置

### 技术领域

[0001] 本申请涉及无损检测技术领域,具体涉及到T型复合结构的无损检测技术领域。

### 背景技术

[0002] 一种由复合材料和金属材料粘接形成的T型复合结构广泛应用于航空航天领域,对于复合材料,其内部容易产生分层缺陷,会严重影响结构件的承载能力和使用寿命,而且由于在两种材料的交界面处存在粘接,也容易产生脱粘缺陷,影响结构原有性能。除了上述两种缺陷外,T型结构中普遍存在R角,受空间尺寸和形状的限制,R角区域的曲率半径一般较小,零件的截面几何形状突然变化,局部应力远大于名义应力,R角区域发生应力集中现象,从而使得R区内部容易产生裂纹等缺陷。因此T型复合结构的高精度在役无损检测对于保证结构质量具有重要意义,超声相控阵灵活可控的合成波束模式使其在复杂构件的缺陷检测方面已经表现出较大的应用潜力。

[0003] 波音公司提出一种层压材料测试方法和系统(LAMINATE MATERIAL TESTING METHOD AND SYSTEMS,欧洲专利公开号:EP1759195B1),该方法利用一定的先验条件进行检测,即首先获取与被测平板尺寸相同的完好平板的回波数据作为参考数据,然后将实测数据与参考数据对比,判断被测平板内部是否存在缺陷。

[0004] 华南理工大学提出一种复合材料界面脱粘的相控阵超声波检测方法(一种复合材料界面脱粘的相控阵超声波检测,公开号:CN103901108),利用超声波在复合材料内部传播时,遇到复合材料脱粘界面处发生反射,产生的回波信号进行数据处理后可以判断缺陷存在情况。该方法存在的问题在于:需要对比复合材料界面粘接良好时的超声波检测图像和可能发生界面脱粘时的超声波检测图像,才能判断复合材料内部是否存在脱粘缺陷。

[0005] 中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心提出一种用于复合材料R区的超声相控阵检测装置(一种用于复合材料R区的超声相控阵检测装置,公开号:CN107014900B),参见图5、图6,该装置利用水囊作为柔性超声耦合模块,实现超声探头与待检测R区之间的耦合,即:填充超声探头与待测R区之间的空间,无需液体耦合剂来实现相控阵与被测对象的耦合,而且柔性耦合模块的自适应性使其可以应用于不同曲率半径R区的超声检测。该方法存在的问题在于:当R区位于结构件内部,即检测装置无法达到的位置时,则无法实现对R区缺陷的检测。

[0006] 中航复合材料有限责任公司提出一种复合材料T型连接区液体自耦合换能器及检测方法(复合材料T形连接区液体自耦合超声换能器及检测方法,公开号:CN106770683B),参见图7,该方法基于宽带窄脉冲反射检测原理,通过液体自耦合,明显改善超声换能器与被检复合材料结构T形连接区表面的声学耦合效果与检测信号稳定性。该方法存在的问题在于:需要利用手动或机械自动扫描方式,才能实现对复合材料结构T形连接区的覆盖检测。

## 发明内容

[0007] 本申请解决的问题为：现有的方法对T型复合结构的R区检测不方便、且存在由于声学耦合效果差而导致检测效果差的问题，以及针对T型复合结构的不同层的检测需要利用不同的装置进行检测，测量过程复杂，测量成本高的问题。

[0008] 本申请采用的方案为：

[0009] 一种T型复合结构的R区缺陷的背面检测方法，所述方法为：

[0010] 从R区的背面、顶层复合材料层外侧发射超声波信号、并采集回波信号，根据回波信号获得待检测的R区是否存在缺陷，并确定缺陷位置坐标。

[0011] 一种T型复合结构的R区缺陷的背面检测方法，所述方法包括：

[0012] 标定超声波在被测顶层复合材料内部沿各个方向的传播速度；

[0013] 对待检测的目标区域进行网格划分，得到多个网格点，逐一对每个网格点从R区背面、采用超声波相控阵进行检测：

[0014] 针对超声波相控阵的第i个阵元，根据费马原理获取由超声相控阵的坐标为 $(x_i, z_i)$ 的第i个阵元发射超声波经过两层介质到达聚焦点P的传播时间 $T_i$ ：

$$[0015] \quad T_i = \min_{\substack{|x_s| \leq L/2 \\ z_s = H}} \left( \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (z_i - z_s)^2}}{c_1(\theta_i)} + \frac{\sqrt{(x_s - x_0)^2 + (z_s - z_0)^2}}{c_2} \right)$$

[0016] 其中， $c_1$ 表示T型复合结构第一层介质的超声波传播速度， $c_2$ 示T型复合结构第二层介质的超声波传播速度， $(x_s, z_s)$ 表示超声波由第一层介质入射到第二层介质的入射点坐标， $(x_0, z_0)$ 表示在R区聚焦的点的坐标，H表示被测T型复合结构的顶层复合材料层顶层的厚度，L表示所述顶层复合材料层短边的长度， $\theta_i$ 表示超声波在第一层介质内部的传播方向；

[0017] 通过现有技术中的优化算法获取 $x_s$ 和 $z_s$ 的值；

[0018] 遍历超声相控阵的每个阵元获得每个阵元的传播时间，并筛选出最大的传播时间 $T_{\max}$ ；

[0019] 获得每个阵元的激励延迟时间，所述第i个阵元的激励延迟时间 $T_j = T_{\max} - T_i$ ；

[0020] 通过超声波相控阵发射超声波，并采集聚焦波束的反射回波信号，对第i个阵元的反射回波信号的反射时间叠加对应的接收延迟时间，所述接收延迟时间与第i个阵元的激励延迟时间 $T_j$ 相等；

[0021] 将所有阵元计算对应的零延迟阵元从发射超声波到聚焦点后再返回零延迟阵元传播时间的回波信号并进行叠加和成像，若成像结果有相对明亮点，则表示在该点对应位置存在缺陷，否则该聚焦点位置不存在缺陷；所述的零延迟阵元为：激励信号无延迟时间的阵元。

[0022] 一种T型复合结构的R区缺陷的背面超声无损检测装置，所述装置包括：

[0023] 传播时间 $T_i$ 获得模块，用于根据费马原理获得由相控阵的坐标为 $(x_i, z_i)$ 的第i个阵元从所述T型复合结构上部发射超声波经过两层介质到达聚焦点P的传播时间 $T_i$ ：

$$[0024] \quad T_i = \min_{\substack{|x_s| \leq L/2 \\ z_s = H}} \left( \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (z_i - z_s)^2}}{c_1(\theta_i)} + \frac{\sqrt{(x_s - x_0)^2 + (z_s - z_0)^2}}{c_2} \right)$$

[0025] 公式中， $c_1$ 表示第一层介质的超声波传播速度， $c_2$ 示第二层介质的超声波传播速

度,  $(x_s, z_s)$  表示超声波由第一层介质入射到第二层介质的入射点坐标,  $(x_0, z_0)$  表示发射超声波的聚焦点的坐标,  $H$  表示被测 T 型复合结构的顶层复合材料层顶层的厚度,  $L$  表示所述顶层复合材料层短边的长度,  $\theta_i$  表示发射超声波在第一层介质内部的传播方向;

[0026] 坐标  $(x_s, z_s)$  优化获取模块: 用于通过优化算法获取  $x_s$  和  $z_s$  的值;

[0027] 最大传播时间获取模块: 用于对比所有阵元的传播时间, 获得最大传播时间  $T_{\max}$ ;

[0028] 激励延迟时间获取模块: 用于根据  $T_j = T_{\max} - T_i$  获得每个阵元的激励延迟时间;

[0029] 回波信号延迟处理模块: 用于对采集的聚焦波束的反射回波信号叠加对应的接收延迟时间、获得延迟后的回波信号, 即: 对第  $i$  个阵元的反射回波信号的反射时间叠加该该阵元的接收延迟时间, 所述接收延迟时间与该阵元的激励延迟时间  $T_j$  相等;

[0030] 回波信号叠加模块, 用于对所有阵元计算对应零延迟阵元从发射超声波到聚焦点后再返回零延迟阵元传播时间的回波信号并进行叠加和成像, 获得成像结果; 缺陷判断模块, 用于根据成像结果判断是否有缺陷;

[0031] 缺陷位置确定模块, 用于根据判定为有缺陷对应的阵元, 根据成像结果中的相对明亮点, 确定该缺陷对应的阵元。

[0032] 一种 T 型复合结构的缺陷超声无损检测方法, 所述方法为:

[0033] 顶层复合材料层缺陷检测方法, 具体为: 标定超声波在被测顶层复合材料内部沿各个方向的传播速度, 采集超声波在材料内部传播时产生的反射回波, 进行成像, 根据成像明暗度判断被测顶层复合材料中是否存在缺陷;

[0034] 材料交界面缺陷检测方法, 具体为: 获取两种材料交界面处的反射回波强度, 然后对两种材料交界面处的反射回波进行成像, 根据成像明暗度判断两种材料交界处是否存在缺陷;

[0035] R 区缺陷检测方法, 具体为权利要求 1 所述一种 T 型复合结构的 R 区缺陷的检测方法。

[0036] 一种 T 型复合结构的缺陷超声无损检测方法, 所述方法包括:

[0037] 顶层复合材料层缺陷检测的步骤, 该步骤进一步包括:

[0038] 根据相控阵采集系统采用全矩阵捕获的方式采集超声波在复合材料内部传播时的反射回波;

[0039] 对所述的反射回波结合经过速度修正的全聚焦算法进行成像;

[0040] 根据成像的明暗度判断被测顶层复合材料中是否存在缺陷, 成像结果中相对亮度高的像素点对应的阵元位置存在缺陷;

[0041] 材料交界面缺陷检测的步骤, 该步骤进一步包括:

[0042] 对两种材料的交界面进行网格划分, 或者多个网格点;

[0043] 根据每个网格点的位置确定对应的阵元的检测位置;

[0044] 针对每个网格点进行检测, 具体为:

[0045] 采集相控阵中第  $i$  个阵元到第  $j$  个网格点的传播时间  $t_{ij}$ ;

[0046] 根据

[0047]  $\Delta t_i = \max(t_1, t_2, \dots, t_N) - t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )

[0048] 获得第  $i$  个阵元的延迟时间  $\Delta t_i$ ; 其中,  $t_i$  表示第  $i$  个阵元的激励时间;

[0049] 采用延迟激励方式激励相控阵的每个阵元, 所述延迟激励方式, 是指将第  $i$  个阵元



的激励时间延迟时间  $\Delta t_i$  的激励方式；

[0050] 采集所有回波信号；

[0051] 对采集的所有回波信号进行成像,根据成像的明暗度判断被测材料界面中是否存在缺陷,成像结果中相对亮度高的像素点对应的阵元位置存在缺陷R区缺陷检测的步骤,该步骤为权利要求1所述的一种T型复合结构的R区缺陷的检测方法。

[0052] 进一步,所述的对所述的反射回波结合经过速度修正的全聚焦算法进行成像的步骤包括:

[0053] 采集第i个阵元到待见区域内的待检聚焦点的传播距离;

[0054] 采集第i个阵元与所述聚焦点之间的沿垂直方向的偏转角度;

[0055] 根据声速拟合公式中求解声速,所述的声速为待采集的反射回波的方向的声速;

[0056] 根据线性插值算法结合现有技术中的换能器接收到的信号采集与所述信号对应的像素点的回波信号;所述的换能器用于将电信号转换为超声信号。

[0057] 将所有像素点的回波信号进行成像。

[0058] 进一步,所述的材料界面缺陷检测的步骤中,对采集的所有回波信号进行成像的方法包括:

[0059] 采用对数压缩的方式对采集的反射回波进行成像,所述的对数压缩的方式具体为通过下述公式:

[0060]  $g = c \times \log_{10}(1+f)$ ,

[0061] 其中,c为常数,f表示原始图像的每一点像素的幅值,g表示经过对数压缩之后的每一点像素的幅值。

[0062] 进一步,所述的标定超声波在被测复合材料内部沿各个方向的传播速度的方法为:

[0063] 利用超声液浸背反射法测量超声波在被测复合材料部分方向的传播速度,然后利用多项式线性拟合方式获取复合材料内部超声波传播速度与传播方向的函数关系,给定测试数据  $p_i, q_i$ , 其中  $i=1, 2, \dots, M$ ,  $p_i$  表示超声波的传播方向,  $q_i$  表示超声波的传播速度,使得拟合曲线  $y=\varphi(x)$  与给定测试数据的偏差最小,表示成矩阵的形式为:

$$[0064] \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N p_i & L & \sum_{i=1}^N p_i^n \\ \sum_{i=1}^N p_i & \sum_{i=1}^N p_i^2 & L & \sum_{i=1}^N p_i^{n+1} \\ M & M & O & M \\ \sum_{i=1}^N p_i^n & \sum_{i=1}^N p_i^{n+1} & L & \sum_{i=1}^N p_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ M \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ M \\ q_n \end{bmatrix},$$

[0065] 求解这个矩阵方程,得到多项式的所有系数,获得拟合曲线,确定超声波在复合材料内部任意方向的传播速度。

[0066] 进一步,所述的获取反射回波的方法为:

[0067] 利用C扫的方式进行检测,具体为:

[0068] 对粘接界面进行网格划分,根据粘接界面网格点的位置确定超声相控阵探头的检测位置,然后计算相控阵所有阵元到待测网格点的传播时间  $t_{ij}$ ,所述的  $t_{ij}$  表示相控阵第i个阵元到第j个网格点的传播时间,根据传播时间差异获取相控阵各个阵元的激励延迟时

间 $t_i$ ,所述的激励延迟时间通过以下公式获取:

[0069]  $\Delta t_i = \max(t_1, t_2, K, t_N) - t_i (i=1, 2, K, N)$ ,

[0070] 通过相控阵获取交界面处的反射回波。

[0071] 一种T型复合结构的缺陷超声无损检测装置,所述装置包括:

[0072] 顶层复合材料层缺陷检测模块,用于标定超声波在被测顶层复合材料内部沿各个方向的传播速度,采集超声波在材料内部传播时产生的反射回波进行成像,根据成像明暗度判断被测顶层复合材料中是否存在缺陷;

[0073] 材料交界面缺陷检测模块,用于获取两种材料交界面处的反射回波强度,对两种材料交界面处的反射回波进行成像,根据成像明暗度判断两种材料交界处是否存在缺陷;

[0074] R区缺陷检测模块,具体为权利要求3所述一种T型复合结构的R区缺陷的检测装置。

[0075] 本申请的有益之处在于:

[0076] 本发明针对R区的检测采用的是“背面检测方法”,与现有方法比较的优点有:

[0077] 现有同类技术,为了解决超声换能器与待检测R区之间的声学耦合问题,采用的都是在超声换能器与待检测的R区之间如何设置耦合材料的技术手段,例如:专利文献CN107014900B中,设计了一种检测装置,在超声换能器与R区之间设置了水囊作为在耦合模块,为了适应不同的R区的角度,参见图5和图6,设计了相应的支撑结构以使水囊适应不同的R区夹角,进而实现水囊充分与R区表面接触,提高超声换能器与待测R区之间的声学耦合效果与检测信号稳定性效果。专利文献CN106770683B,则是改进了超声换能器的结构,在超声传感器1A与待测R区之间设计了耦合腔1C,该耦合腔1C用于容纳液体耦合剂,进而实现了在检测过程中,超声传感器与待测R区之间充满液体耦合剂,从而达到提高声学耦合效果与检测信号稳定性的效果。综上所述,在针对T型复合结构的R区无损检测技术领域,为了解决由于R区形状特殊而导致的超声换能器与待检测的R区之间的声学耦合效果与检测信号稳定性的问题,采用的技术手段都是如何使超声换能器与R区之间的耦合剂充满、进而保证声学耦合效果的设计思路。

[0078] 本申请所述的R区的检测技术完全摒弃了上述解决问题的思路,克服了现有技术的偏见,采用全新的设计思路,完全没有考虑如何设计耦合剂或者耦合材料的问题,且没有考虑R区的夹角大小的问题。本申请采用了完全不同的设计思路,即:在检测过程中,将超声换能器设计在T型结构的顶层复合材料层上,从R区的背面发射超声波实现无损检测,参见图4,B所指方向为超声检测的入射方向。该方法无需考虑“耦合剂”或者耦合材料问题,超声波通过T型结构顶层复合材料层入射至R区,实现无损检测。该方法与现有技术相比较的优点还有:1、无需考虑R区夹角大小的问题;2、无需使用耦合剂或耦合材料;3、使用检测T型复合材料层的检测设备即可,无需特制检测设备。

[0079] 基于上述R区的无损检测方法,针对T型复合材料的检测方法也变得更简单,只需要一套设备,就能够实现对T型复合材料中的不同位置的缺陷进行检测,有效提高了T型复合结构的缺陷检测效率以及检测信号的稳定性,进而提高了检测精度;根据成像结果是否有高亮点对检测结果进行判断,无需对比标准件。

[0080] 本发明所述的T型复合结构的R区检测技术、以及针对整个T型复合结构的检测技术,能够实现无损检测,且无需考虑检测空间问题,适用于对在役的T型复合结构进行无损

检测,无需拆卸器件,能够有效的提高工作效率。

### 附图说明

[0081] 图1为T型复合材料结构示意图;

[0082] 图2为本申请提出的超声检测的流程图;

[0083] 图3为本申请提出的粘接界面5C扫检测的原理图;

[0084] 图4为本申请多层介质的声束传播的原理图;

[0085] 其中,1为顶层复合材料,2为底层金属材料,3为R区,4为相控阵探头,5为粘接界面,6为声束聚焦点,B为检测R区时的超声波入射方向,是在R区的背面。

[0086] 图5、图6为现有专利文献CN107014900B(一种用于复合材料R区的超声相控阵检测装置)中公开的复合材料R区的所述检测装置示意图,其中,图5是针对工件R区角度为 $90^\circ$ 时、检测状态示意图,图6为工件R区角度为钝角时的检测状态示意图。

[0087] 图7为现有专利文献CN106770683B(一种复合材料T型连接区液体自耦合换能器及检测方法)的检测原理示意图。

### 具体实施方式

[0088] 下面参照附图对本发明做进一步说明。

[0089] 实施方式一、本实施方式提出了一种T型复合结构的R区缺陷的背面检测方法,其特征在于,所述方法为:

[0090] 从R区的背面、顶层复合材料层外侧发射超声波信号、并采集回波信号,根据回波信号获得待检测的R区是否存在缺陷,并确定缺陷位置坐标。

[0091] 实施方式二、结合图1和4说明本实施方式,本实施方式是对实施方式一提出的一种T型复合结构的R区缺陷的背面检测方法的进一步限定,所述方法为:

[0092] 标定超声波在被测顶层复合材料内部沿各个方向的传播速度;

[0093] 对待检测的目标区域进行网格划分,得到多个网格点,逐一对每个网格点从R区背面、采用超声波相控阵进行检测:

[0094] 针对超声波相控阵的第*i*个阵元,根据费马原理获取由超声相控阵的坐标为 $(x_i, z_i)$ 的第*i*个阵元发射超声波经过两层介质到达聚焦点P的传播时间 $T_i$ :

$$[0095] \quad T_i = \min_{\substack{|x_s| \leq L/2 \\ z_s = H}} \left( \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (z_i - z_s)^2}}{c_1(\theta_i)} + \frac{\sqrt{(x_s - x_0)^2 + (z_s - z_0)^2}}{c_2} \right)$$

[0096] 其中, $c_1$ 表示T型复合结构第一层介质的超声波传播速度, $c_2$ 示T型复合结构第二层介质的超声波传播速度, $(x_s, z_s)$ 表示超声波由第一层介质入射到第二层介质的入射点坐标, $(x_0, z_0)$ 表示在R区聚焦的点的坐标,H表示被测T型复合结构的顶层复合材料层顶层的厚度,L表示所述顶层复合材料层短边的长度, $\theta_i$ 表示超声波在第一层介质内部的传播方向;

[0097] 通过现有技术中的优化算法获取 $x_s$ 和 $z_s$ 的值;

[0098] 遍历超声相控阵的每个阵元获得每个阵元的传播时间,并筛选出最大的传播时间 $T_{\max}$ ;

[0099] 获得每个阵元的激励延迟时间,所述第*i*个阵元的激励延迟时间 $T_j = T_{\max} - T_i$ ;

[0100] 通过超声波相控阵发射超声波,并采集聚焦波束的反射回波信号,对第*i*个阵元的反射回波信号的反射时间叠加对应的接收延迟时间,所述接收延迟时间与第*i*个阵元的激励延迟时间 $T_j$ 相等;

[0101] 将所有阵元计算对应的零延迟阵元从发射超声波到聚焦点后再返回零延迟阵元传播时间的回波信号并进行叠加和成像,若成像结果有相对明亮点,则表示在该点对应位置存在缺陷,否则该聚焦点位置不存在缺陷;所述的零延迟阵元为:激励信号无延迟时间的阵元。

[0102] 本实施方式的有益之处在于:在检测过程中,将超声换能器设计在T型结构的顶层复合材料层上,从R区的背面发射超声波实现无损检测,参见图4,B所指方向为超声检测的入射方向。该方法无需考虑“耦合剂”或者耦合材料问题,超声波通过T型结构顶层复合材料层入射至R区,实现无损检测。该方法与现有技术相比较的优点还有:1、无需考虑R区夹角大小的问题;2、无需使用耦合剂或耦合材料;3、使用检测T型复合材料层的检测设备即可,无需特制检测设备。采用全新的不同于现有技术的设计思路,完全没有考虑现有技术中需要考虑的“如何设计耦合剂”或者“如何选取耦合材料”的问题,克服了现有技术的偏见。

[0103] 实施方式三、本实施方式提出了一种T型复合结构的R区缺陷的背面超声无损检测装置,所述装置包括:

[0104] 传播时间 $T_i$ 获得模块,用于根据费马原理获得由相控阵的坐标为 $(x_i, z_i)$ 的第*i*个阵元从所述T型复合结构上部发射超声波经过两层介质到达聚焦点P的传播时间 $T_i$ :

$$[0105] \quad T_i = \min_{\substack{|x_s| \leq L/2 \\ z_s = H}} \left( \frac{\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (z_i - z_s)^2}}{c_1(\theta_i)} + \frac{\sqrt{(x_s - x_0)^2 + (z_s - z_0)^2}}{c_2} \right)$$

[0106] 公式中, $c_1$ 表示第一层介质的超声波传播速度, $c_2$ 示第二层介质的超声波传播速度, $(x_s, z_s)$ 表示超声波由第一层介质入射到第二层介质的入射点坐标, $(x_0, z_0)$ 表示发射超声波的聚焦点的坐标,H表示被测T型复合结构的顶层复合材料层顶层的厚度,L表示所述顶层复合材料层短边的长度, $\theta_i$ 表示发射超声波在第一层介质内部的传播方向;

[0107] 坐标 $(x_s, z_s)$ 优化获取模块:用于通过优化算法获取 $x_s$ 和 $z_s$ 的值;

[0108] 最大传播时间获取模块:用于对比所有阵元的传播时间,获得最大传播时间 $T_{\max}$ ;

[0109] 激励延迟时间获取模块:用于根据 $T_j = T_{\max} - T_i$ 获得每个阵元的激励延迟时间;

[0110] 回波信号延迟处理模块:用于对采集的聚焦波束的反射回波信号叠加对应的接收延迟时间、获得延迟后的回波信号,即:对第*i*个阵元的反射回波信号的反射时间叠加该该阵元的接收延迟时间,所述接收延迟时间与该阵元的激励延迟时间 $T_j$ 相等;

[0111] 回波信号叠加模块,用于对所有阵元计算对应零延迟阵元从发射超声波到聚焦点后再返回零延迟阵元传播时间的回波信号并进行叠加和成像,获得成像结果;缺陷判断模块,用于根据成像结果判断是否有缺陷;

[0112] 缺陷位置确定模块,用于根据判定为有缺陷对应的阵元,根据成像结果中的相对明亮点,确定该缺陷对应的阵元。

[0113] 本实施方式的有益之处在于:为实施方式一提出的检测方法中,数据处理的部分设计了一种采用计算机软件实现的数据处理装置,所述的数据处理装置能够存入计算机可读介质内,便于用户使用。

[0114] 实施方式四、结合图1-4说明本实施方式,本实施方式提出了一种T型复合结构的缺陷超声无损检测方法,所述方法为:

[0115] 顶层复合材料层缺陷检测方法,具体为:标定超声波在被测顶层复合材料内部沿各个方向的传播速度,采集超声波在材料内部传播时产生的反射回波,进行成像,根据成像明暗度判断被测顶层复合材料中是否存在缺陷;

[0116] 材料交界面缺陷检测方法,具体为:获取两种材料交界面处的反射回波强度,然后对两种材料交界面处的反射回波进行成像,根据成像明暗度判断两种材料交界处是否存在缺陷;

[0117] R区缺陷检测方法,具体为权利要求1所述一种T型复合结构的R区缺陷的检测方法。

[0118] 实施方式五、结合图1-4说明本实施方式,本实施方式是对实施方式四提出的一种T型复合结构的缺陷超声无损检测方法的进一步限定,所述方法包括:

[0119] 顶层复合材料层缺陷检测的步骤,该步骤进一步包括:

[0120] 根据相控阵采集系统采用全矩阵捕获的方式采集超声波在复合材料内部传播时的反射回波;

[0121] 对所述的反射回波结合经过速度修正的全聚焦算法进行成像;

[0122] 根据成像的明暗度判断被测顶层复合材料中是否存在缺陷,成像结果中相对亮度高的像素点对应的阵元位置存在缺陷;

[0123] 材料交界面缺陷检测的步骤,该步骤进一步包括:

[0124] 对两种材料的交界面进行网格划分,或者多个网格点;

[0125] 根据每个网格点的位置确定对应的阵元的检测位置;

[0126] 针对每个网格点进行检测,具体为:

[0127] 采集相控阵中第*i*个阵元到第*j*个网格点的传播时间 $t_{ij}$ ;

[0128] 根据

[0129]  $\Delta t_i = \max(t_1, t_2, \dots, t_N) - t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )

[0130] 获得第*i*个阵元的延迟时间 $\Delta t_i$ ;其中, $t_i$ 表示第*i*个阵元的激励时间;

[0131] 采用延迟激励方式激励相控阵的每个阵元,所述延迟激励方式,是指将第*i*个阵元的激励时间延迟时间 $\Delta t_i$ 的激励方式;

[0132] 采集所有回波信号;

[0133] 对采集的所有回波信号进行成像,根据成像的明暗度判断被测材料交界面中是否存在缺陷,成像结果中相对亮度高的像素点对应的阵元位置存在缺陷R区缺陷检测的步骤,该步骤为实施方式一中提出的一种T型复合结构的R区缺陷的检测方法。

[0134] 实施方式六、结本实施方式是对实施方式五提出的一种T型复合结构的缺陷超声无损检测方法的进一步限定,所述的对所述的反射回波结合经过速度修正的全聚焦算法进行成像的步骤包括:

[0135] 采集第*i*个阵元到待见区域内的待检聚焦点的传播距离;

[0136] 采集第*i*个阵元与所述聚焦点之间的沿垂直方向的偏转角度;

[0137] 根据声速拟合公式中求解声速,所述的声速为待采集的反射回波的方向的声速;

[0138] 根据线性插值算法结合现有技术中的换能器接收到的信号采集与所述信号对应

的像素点的回波信号;所述的换能器用于将电信号转换为超声信号。

[0139] 将所有像素点的回波信号进行成像。

[0140] 实施方式七、本实施方式是对实施方式五提出的一种T型复合结构的缺陷超声检测方法的进一步限定,所述的材料交界面缺陷检测的步骤中,对采集的所有回波信号进行成像的方法包括:

[0141] 采用对数压缩的方式对采集的反射回波进行成像,所述的对数压缩的方式具体为通过下述公式:

$$[0142] \quad g=c \times \log_{10}(1+f),$$

[0143] 其中,c为常数,f表示原始图像的每一点像素的幅值,g表示经过对数压缩之后的每一点像素的幅值。

[0144] 实施方式八、本实施方式是对实施方式六或七提出的一种T型复合结构的缺陷超声在役检测方法的进一步限定,所述的标定超声波在被测复合材料内部沿各个方向的传播速度的方法为:

[0145] 利用超声液浸背反射法测量超声波在被测复合材料部分方向的传播速度,然后利用多项式线性拟合方式获取复合材料内部超声波传播速度与传播方向的函数关系,给定测试数据 $p_i, q_i$ ,其中 $i=1, 2, \dots, M$ , $p_i$ 表示超声波的传播方向, $q_i$ 表示超声波的传播速度,使得拟合曲线 $y=\varphi(x)$ 与给定测试数据的偏差最小,表示成矩阵的形式为:

$$[0146] \quad \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N p_i & L & \sum_{i=1}^N p_i^n \\ \sum_{i=1}^N p_i & \sum_{i=1}^N p_i^2 & L & \sum_{i=1}^N p_i^{n+1} \\ M & M & O & M \\ \sum_{i=1}^N p_i^n & \sum_{i=1}^N p_i^{n+1} & L & \sum_{i=1}^N p_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ M \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ M \\ q_n \end{bmatrix},$$

[0147] 求解这个矩阵方程,得到多项式的所有系数,获得拟合曲线,确定超声波在复合材料内部任意方向的传播速度。

[0148] 实施方式九、本实施方式是对实施方式八提出的一种T型复合结构的缺陷超声在役检测方法的进一步限定,所述的获取反射回波的方法为:利用C扫的方式进行检测,具体为:

[0149] 对粘接界面进行网格划分,根据粘接界面网格点的位置确定超声相控阵探头的检测位置,然后计算相控阵所有阵元到待测网格点的传播时间 $t_{ij}$ ,所述的 $t_{ij}$ 表示相控阵第 $i$ 个阵元到第 $j$ 个网格点的传播时间,根据传播时间差异获取相控阵各个阵元的激励延迟时间 $t_i$ ,所述的激励延迟时间通过以下公式获取:

$$[0150] \quad \Delta t_i = \max(t_1, t_2, K, t_N) - t_i \quad (i=1, 2, K, N),$$

[0151] 通过相控阵获取交界面处的反射回波。

[0152] 本实施方式的有益之处在于:只需要一套设备,就能够实现对T型复合材料中的不同位置的缺陷进行检测,有效提高了T型复合结构的缺陷检测效率以及检测信号的稳定性,进而提高了检测精度。

[0153] 实施方式十、一种T型复合结构的缺陷超声无损检测装置,其特征在于,所述装置

包括：

[0154] 顶层复合材料层缺陷检测模块，用于标定超声波在被测顶层复合材料内部沿各个方向的传播速度，采集超声波在材料内部传播时产生的反射回波进行成像，根据成像明暗度判断被测顶层复合材料中是否存在缺陷；

[0155] 材料交界面缺陷检测模块，用于获取两种材料交界面处的反射回波强度，对两种材料交界面处的反射回波进行成像，根据成像明暗度判断两种材料交界处是否存在缺陷；

[0156] R区缺陷检测模块，具体为权利要求3所述一种T型复合结构的R区缺陷的检测装置。

[0157] 上述各实施方式是本发明所要求保护的技术方案的举例说明，本发明所要求保护的技术方案不局限于上述实施方式所列举的具体方案，还可以是上述各个实施方式所记载的技术特征的合理组合。

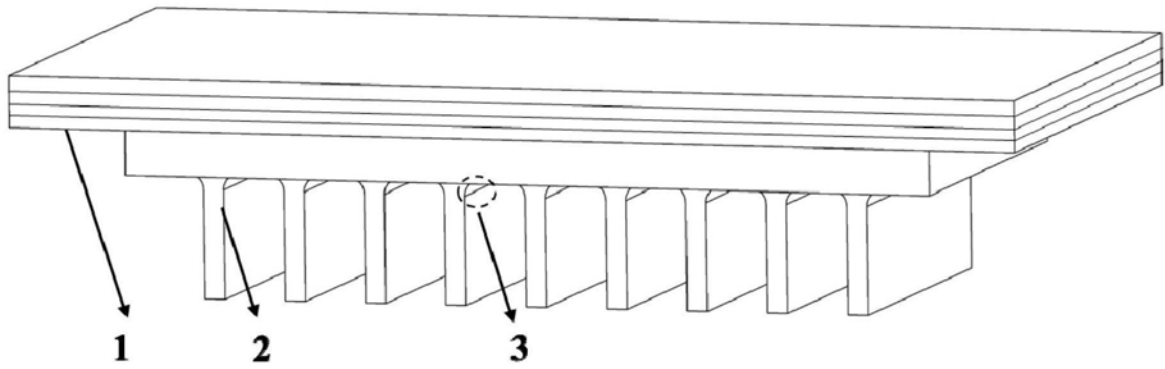


图1

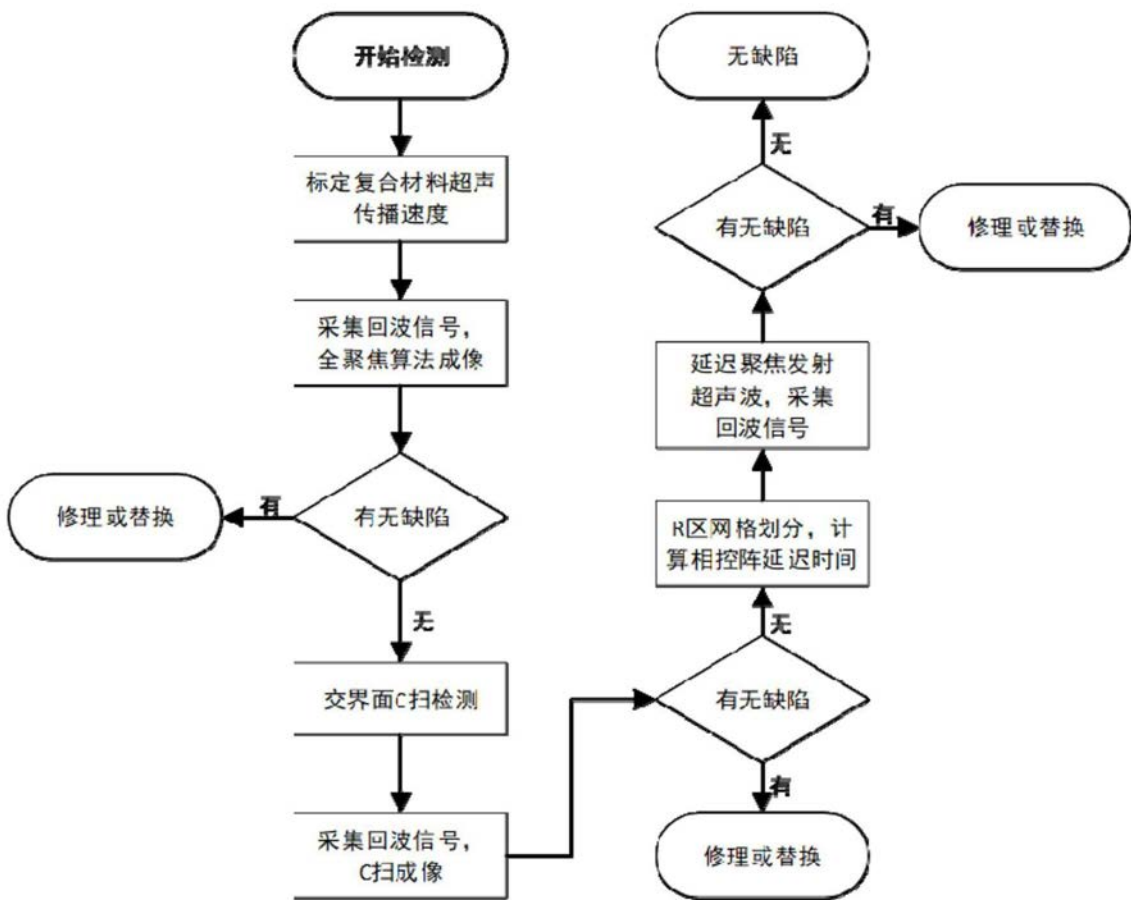


图2



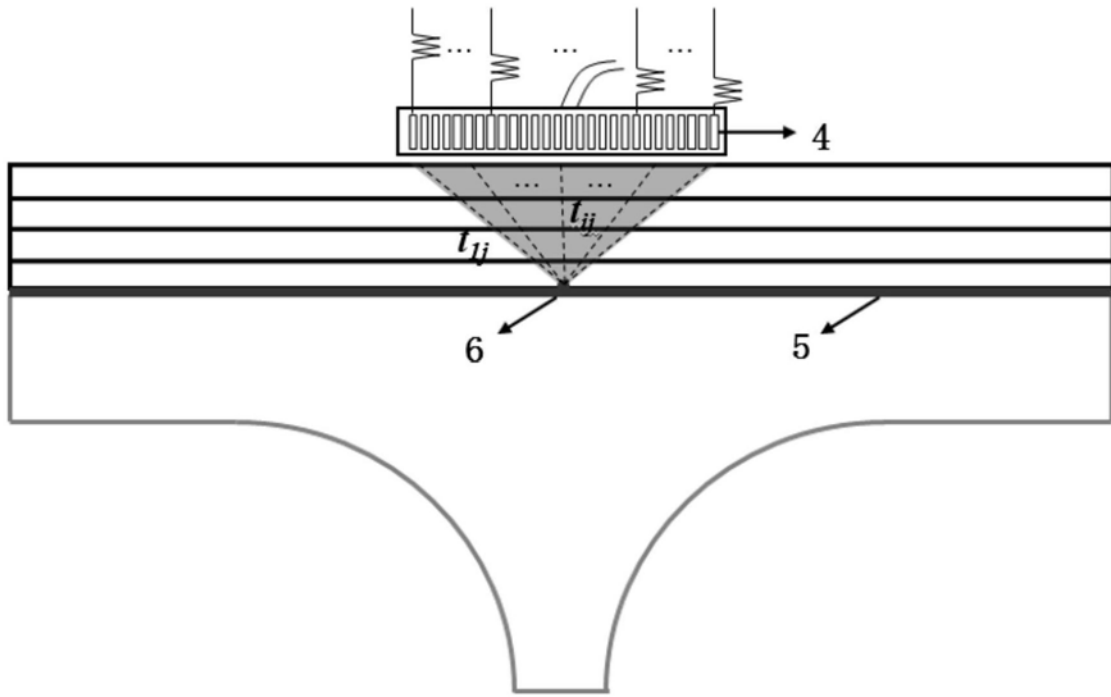


图3

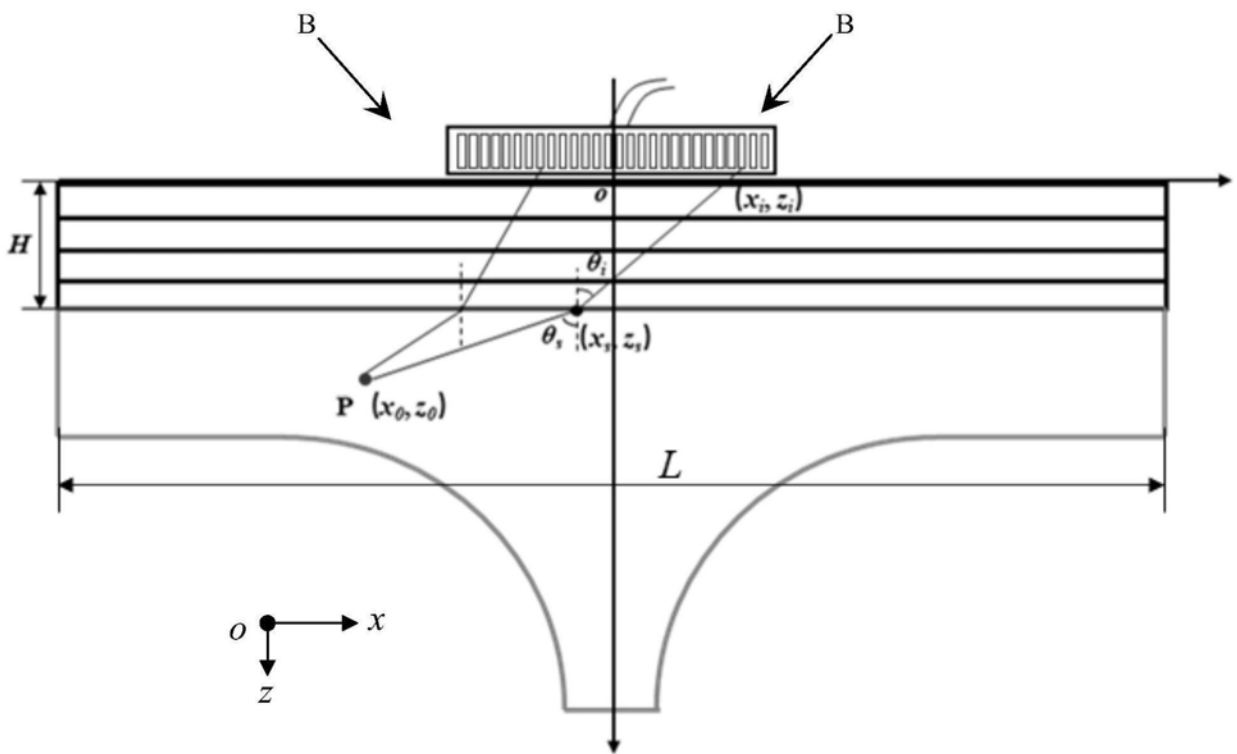


图4

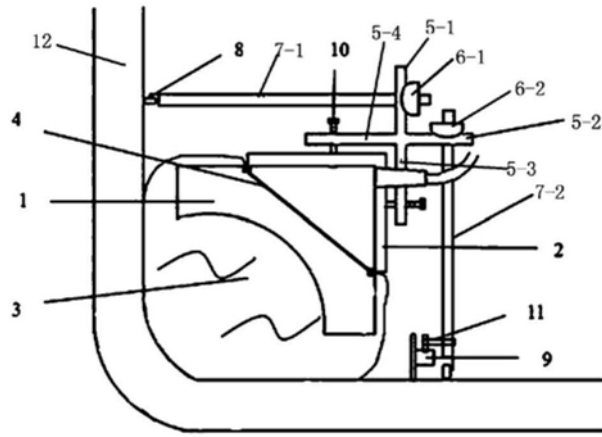


图5

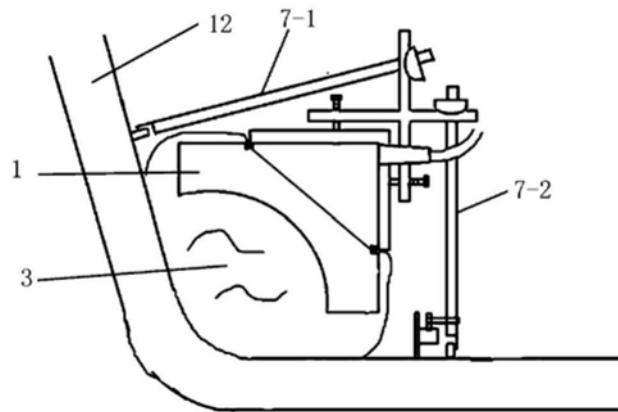


图6

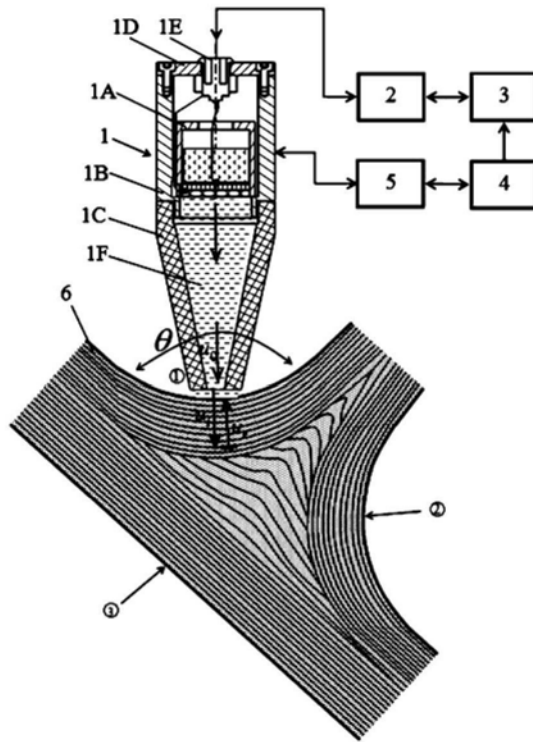


图7