



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112730613 B

(45) 授权公告日 2022.04.05

(21) 申请号 202011520671.2

(22) 申请日 2020.12.21

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112730613 A

(43) 申请公布日 2021.04.30

(73) 专利权人 厦门大学  
地址 361005 福建省厦门市思明区思明南路422号

(72) 发明人 李卫彬 江畅

(74) 专利代理机构 厦门南强之路专利事务所  
(普通合伙) 35200

代理人 马应森

(51) Int. Cl.  
G01N 29/04 (2006.01)

(56) 对比文件

US 2017367683 A1, 2017.12.28

CN 102539536 A, 2012.07.04

审查员 李韦韦

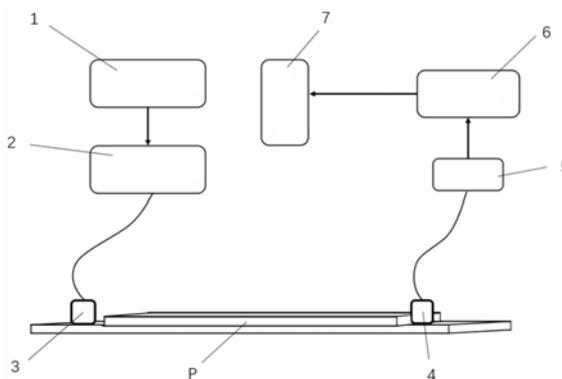
权利要求书1页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

一种复合板粘接层性能退化评估方法

(57) 摘要

一种复合板粘接层性能退化评估方法,属于材料测试技术领域。在被测复合板的表面设置能激励出超声水平剪切导波的超声激励换能器以及能接收超声导波的低频超声接收换能器,固定两个换能器之间合理的距离;通过信号发生器及功率放大器调制出超声脉冲周期数n的加汉宁窗的超声脉冲信号输入超声激励换能器,使用低通滤波器对接收的信号进行低通滤波,使用示波器观察、提取处理后的信号;使用计算机对滤波后的波包信号进行宽度为 $\tau$ 的时域截断,进行快速傅里叶变换,获得该超声水平剪切导波在被测复合板中传播时产生的静态兰姆波信号的强度;对比测试完好试件中的检测结果,评估出所测复合板的粘接层性能退化程度。敏感度高、检测范围大、效率高。



1. 一种复合板粘接层性能退化评估方法,其特征在于包括以下步骤:

1) 在被测复合板的表面设置能激励出超声水平剪切导波的超声激励换能器以及能接收超声导波的低频超声接收换能器,固定超声激励换能器、低频超声接收换能器之间合理的距离d;

2) 通过信号发生器及功率放大器调制出超声脉冲周期数n的加汉宁窗的超声脉冲信号输入至超声激励换能器中,使用低通滤波器对换能器接收的信号进行低通滤波,并使用示波器观察、提取处理后的信号;

在步骤1)和2)中,所述合理的距离d与超声脉冲周期数n需满足以下关系式:

$$\frac{d}{c_g^{SH}} + \frac{n}{f_1} - \frac{d}{c_g^{S0}} = \frac{1}{f_2}$$

其中, $n \geq 6$ , $f_1$ 为超声激励换能器的中心频率, $f_2$ 为低频超声接收换能器的中心频率, $c_g^{SH}$ 为基频SH导波的群速度, $c_g^{S0}$ 为被测复合板在零频时的S0模态导波的群速度;

3) 使用计算机对滤波后的波包信号进行宽度为 $\tau$ 的时域截断,对其进行快速傅里叶变换,获得该超声水平剪切导波在被测复合板中传播时产生的静态兰姆波信号的强度;

所述对滤波后的波包信号进行宽度为 $\tau$ 的时域截断, $\tau$ 需满足:

$$\tau = \frac{1}{f_2}$$

其中, $f_2$ 为低频超声接收换能器的中心频率;

4) 对比测试完好试件中的检测结果,评估出所测复合板的粘接层性能退化程度。

2. 如权利要求1所述一种复合板粘接层性能退化评估方法,其特征在于在步骤4)中,所述对比测试完好试件中的检测结果,评估出所测复合板的粘接层性能退化程度的具体步骤为:使用相同规格的完好复合板试件,实施步骤1)~3),得到一个基准测量结果 $M_0$ ,然后将被测的性能退化复合板的结果M,对比于 $M_0$ , $M/M_0$ 越大,则复合板粘接层的性能退化程度越严重。

## 一种复合板粘接层性能退化评估方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于材料测试技术领域,尤其是涉及利用非线性超声波对材料性能进行非破坏性评估和表征的基于导波非线性静态响应的一种复合板粘接层性能退化评估方法。

### 背景技术

[0002] 超声导波是目前超声无损检测和材料评估领域中发展较为迅速的研究热点。相比于传统超声检测中所采用的体波(纵波或横波)检测技术,其优势主要为:在波导介质(如薄板、圆管等)中超声波传播的距离更远,衰减更小,所历经的材料区域更广,检测效率更高等等。此外,非线性超声检测利用含微观缺陷材料对超声波的非线性调制作用,可以使用较大波长的超声波检测较小的缺陷,与线性超声检测相比,具有检测灵敏度更高的优势,从而实现材料的早期微观损伤检测和材料性能评估。然而,目前使用超声导波进行材料的非线性超声检测还具有相当的困难。困难之一在于,板中的超声导波中,绝大部分的导波模态都具有频散的特性:基波的频率变化时,其相速度和群速度皆有变化;因此,使用导波进行无损检测时,往往在超声信号激励和信号分析时需要更复杂的预处理和后处理过程。困难之二在于,目前绝大部分的非线性导波检测都采用单一的超声激励源,当基波在介质中传播时,会产生二次谐波乃至三次谐波,利用二次谐波或三次谐波的生成强度变化可以对材料进行微损伤检测和性能评估;然而这种利用导波二次谐波的产生来进行非线性超声检测的方法,往往需要其二次谐波的相速度和基频导波的相速度相等,即相匹配条件(或同步条件)。在这种条件下,能实现非线性导波无损检测的导波模态对并不多,无法满足一些特定的检测场合。

[0003] 当前,复合材料在交通运输、土木工程、航空航天等领域获得越来越多的应用。针对复合材料板的粘接层性能退化的无损检测问题,超声水平剪切导波具有一定的检测优势。一方面,水平剪切导波在介质中传播时主要为面内位移,因此受到面外介质的干扰较少,获得的检测信号信噪比相对较高;另一方面,水平剪切导波的非线性效应对粘接层中的微小缺陷较为敏感,有利于粘接层的性能退化评估。然而,基于前述的导波频散特点和模态选择难点,目前利用水平剪切导波的二次谐波或三次谐波生成的检测方式还有局限,难以实现灵活的、高敏感度的复合板粘接层性能退化的检测和评估。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于针对逐点式超声检测的效率低下、超声导波模态选择和分析难等问题,提供一种敏感度高、检测范围大、效率高、灵活的基于导波非线性静态响应的一种复合板粘接层性能退化评估方法。

[0005] 本发明包括以下步骤:

[0006] 1) 在被测复合板的表面设置能激励出超声水平剪切导波的超声激励换能器以及能接收超声导波的低频超声接收换能器,固定超声激励换能器、低频超声接收换能器之间合理的距离 $d$ ;

[0007] 2) 通过信号发生器及功率放大器调制出超声脉冲周期数 $n$ 的加汉宁窗的超声脉冲信号输入至超声激励换能器中,使用低通滤波器对换能器接收的信号进行低通滤波,并使用示波器观察、提取处理后的信号;

[0008] 3) 使用计算机对滤波后的波包信号进行宽度为 $\tau$ 的时域截断,对其进行快速傅里叶变换,获得该超声水平剪切导波在被测复合板中传播时产生的静态兰姆波信号的强度;

[0009] 4) 对比测试完好试件中的检测结果,评估出所测复合板的粘接层性能退化程度。

[0010] 在步骤1)和2)中,所述合理的距离 $d$ 与超声脉冲周期数 $n$ 需满足以下关系式:

$$[0011] \quad \frac{d}{c_g^{SH}} + \frac{n}{f_1} - \frac{d}{c_g^{S0}} = \frac{1}{f_2} \quad (n \geq 6)$$

[0012] 其中, $f_1$ 为超声激励换能器的中心频率, $f_2$ 为低频超声接收换能器的中心频率, $c_g^{SH}$ 为基频SH导波的群速度, $c_g^{S0}$ 为被测复合板在零频时的S0模态导波的群速度。

[0013] 在步骤3)中,所述对滤波后的波包信号进行宽度为 $\tau$ 的时域截断, $\tau$ 需满足:

$$[0014] \quad \tau = \frac{1}{f_2}$$

[0015] 其中, $f_2$ 为低频超声接收换能器的中心频率。

[0016] 在步骤4)中,所述对比测试完好试件中的检测结果,评估出所测复合板的粘接层性能退化程度的具体步骤为:使用相同规格的完好复合板试件,实施步骤1)~3),得到一个基准测量结果 $M_0$ ,然后将被测的性能退化复合板的结果 $M$ ,对比于 $M_0$ , $M/M_0$ 越大,则复合板粘接层的性能退化程度越严重。

[0017] 本发明基本原理是:利用超声换能器测量出水平剪切导波在复合板中传播时所产生的非线性静态响应强度,来表征复合板粘接层的性能退化程度;其所产生的非线性静态响应强度越大,试件的性能退化程度越高。本发明属于非线性超声导波检测,但无需基频的水平剪切导波满足特定的相速度和群速度条件,且检测灵敏度较高。

[0018] 与现有技术相比,本发明具有以下突出的优点:

[0019] 1. 超声水平剪切导波在复合材料板中传播时,会由于复合板粘接层中的微观缺陷(如空隙、闭合脱粘等)而引发超声波的非线性静态响应,其响应强度与超声导波所历经区域内的材料性能退化程度(或损伤程度)成正比;本发明基于超声水平剪切导波的非线性静态响应与复合板粘接层性能退化之间的正相关关系,利用测量水平剪切导波在弱非线性介质中会产生零频的静态响应信号而对被测材料进行检测和评估。

[0020] 2. 本发明结合了超声导波和非线性超声检测两者的优势,既提高了超声检测、评估复合板粘接层性能退化的效率,同时也充分利用了超声检测中的非线性响应对材料微观结构变化和早期损伤较为敏感的特点。

[0021] 3. 本发明通过一定的超声导波激励和测量手段,获取该超声波在被检试件中传播时产生的非线性静态响应信号,对比在完好试件中测量的结果,评估出被检复合板的粘接层性能退化程度。

[0022] 4. 本发明提供测量水平剪切导波在复合板中传播时产生的非线性静态响应的具体测量方法,该非线性静态响应对复合板粘接层的性能退化较为敏感,而且该发明方法的

测量系统和信号处理手段相对简洁有效。

[0023] 5. 本发明克服逐点式超声检测的效率低下问题,同时克服超声导波模态选择和分折难的问题,能以较高的敏感度实现复合板粘接层性能退化的高效检测和评估。

### 附图说明

[0024] 图1是本发明实施系统及接线示意图。

[0025] 图2是本发明激励换能器中激发的加窗水平剪切导波基频信号与经过粘接层性能退化的复合板后用低频接收换能器接收到的导波信号示意图。

### 具体实施方式

[0026] 以下实施例将结合附图对本发明作进一步说明。

[0027] 参见图1,本发明实施例超声激励和测量的过程需使用的系统包括:超声信号发生器1、功率放大器2、超声激励换能器3、低频超声接收换能器4、滤波器5、示波器6、计算机7。所述超声信号发生器1用于激励出水平剪切导波,超声信号发生器1的输出端接功率放大器2,功率放大器2的输出端接超声激励换能器3,超声激励换能器3和低频超声接收换能器4设在复合板试件P上,低频超声接收换能器4的输出端接滤波器5,滤波器5用于对低频超声接收换能器4接收的信号进行低通滤波,滤波器5的输出端接示波器6,示波器6用于观察、提取处理后的信号,示波器6与计算机7相连。

[0028] 本发明实施例包括以下步骤:

[0029] 1) 在被测性能退化的复合板试件P上设置一能激励出水平剪切导波的超声激励换能器3,其中心频率为 $f_1$ ;

[0030] 2) 在被测复合板试件P上距离超声激励换能器3一定距离 $d$ 处设置一能传感沿导波传播方向的振动的低频超声接收换能器4,其中心频率为 $f_2$ ;

[0031] 3) 利用超声信号发生器1以及功率放大器2调制出频率为 $f_1$ 、周期数为 $n$ 的加汉宁窗的超声脉冲信号,并输入步骤1)所设置的超声激励换能器3中;

[0032] 4) 使用滤波器5对低频超声接收换能器4接收的信号进行低通滤波,并使用示波器6观察、提取处理后的信号;

[0033] 5) 使用计算机7对滤波后的波包信号进行宽度为 $\tau$ 的时域截断,对其进行快速傅里叶变换,提取其中频率为 $f_2$ 的频谱信号强度 $M$ ;

[0034] 6) 使用相同规格的完好复合板试件,实施上述步骤1)~5),得到一个基准测量结果 $M_0$ ,将被测的性能退化复合板的结果 $M$ 对比于 $M_0$ , $M/M_0$ 越大,则其粘接层的性能退化程度越严重。

[0035] 在检测过程中,为保证不同复合板试件的测量过程一致,激励和接收超声换能器与试件之间的耦合状态需稳定一致。测量中两个超声换能器需要被安置在不同试件上相同的固定位置处。检测过程中使用的超声信号发生器至少为双通道,从而可以对激励信号进行加窗。激励出的超声脉冲信号的周期数 $n$ ,以及激励和接收换能器之间的距离 $d$ 应满足:

$$[0036] \quad \frac{d}{c_g^{SH}} + \frac{n}{f_1} - \frac{d}{c_g^{S0}} = \frac{1}{f_2} \quad (n \geq 6)$$

[0037] 作傅里叶变换前的时域截断波包信号的宽度应满足  $\tau = \frac{1}{f_2}$ ；其中， $f_1$  为超声激励换能器的中心频率， $f_2$  为低频超声接收换能器的中心频率， $c_g^{SH}$  为基频SH导波的群速度， $c_g^{S0}$  为该复合板在零频时的S0模态导波的群速度。

[0038] 为验证所测信号确实为基频水平剪切导波在复合板中传播时所产生的非线性静态响应信号，可在实施本发明前进行多次不同传播距离的测量。若所测信号的波包群速度为该试件中S0模态在零频时的群速度，且静态响应信号强度随传播距离的增加而增加，则证实所测信号确为需要测量的静态响应信号。

[0039] 本发明激励换能器中激发的加窗水平剪切导波基频信号与经过粘接层性能退化的复合板后用低频接收换能器接收到的导波信号示意图参见图2。若直接对接收信号作傅里叶变换，频谱中位于频率 $f_2$ 处的信号强度可作为一种静态响应信号的指标，用于复板粘接层的性能退化评价。

[0040] 以下给出本发明的原理：超声波在含有位错、滑移、孔洞、腐蚀、裂纹等微观组织结构不均匀的介质材料中传播时，会发生波形畸变，产生双倍频二次谐波、三倍频三次谐波，以及零频的静态响应信号等，这些新产生的、除基频超声信号以外的信号被都称为超声波的非线性响应。一般而言，材料的微观组织结构越不均匀（微观缺陷越多，或性能退化越严重），超声波的非线性响应越明显。基于测量超声水平剪切导波在复合板中传播时粘接层与导波的相互作用后的超声信号，可以反演出该复合板材料相关力学性能。

[0041] 本发明一方面可以利用水平剪切导波检测效率相比超声体波检测效率更高的优点，另一方面通过测量超声的非线性响应而提高超声检测和评估材料早期微损伤的产生和性能退化的能力。当使用本发明测量的导波静态响应信号强度越大，则被测的复合板粘接层含有的微观损伤越多，其性能退化越严重。此外，本发明是基于测量水平剪切导波在复合板中产生的非线性静态响应的方法，不受限于导波的模态选择和相速度匹配等问题，测量过程简洁有效。

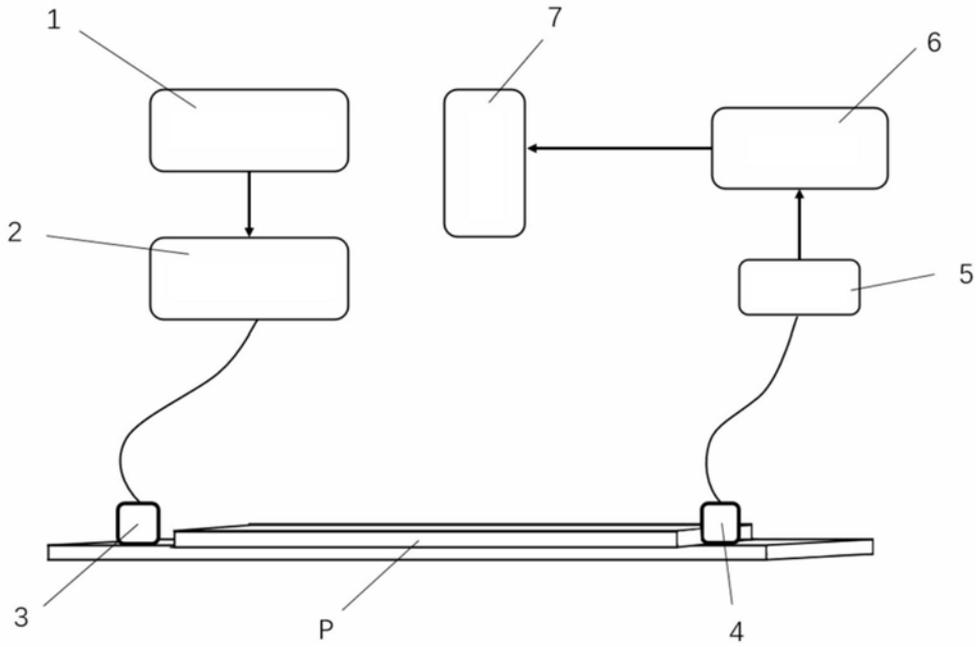


图1

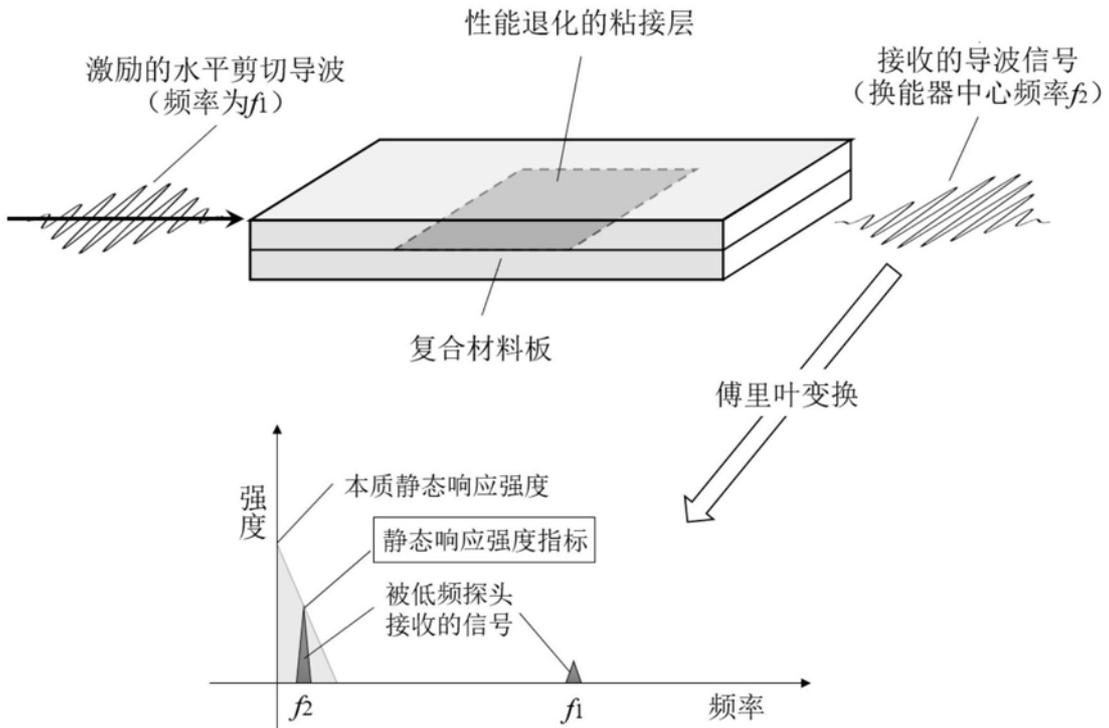


图2