



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110333292 B

(45) 授权公告日 2022. 05. 10

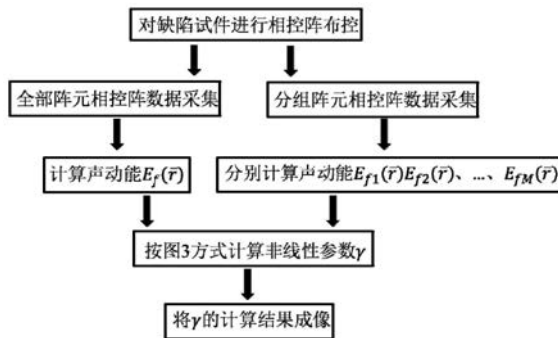
(21) 申请号 201910734625.3
 (22) 申请日 2019.08.09
 (65) 同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 110333292 A
 (43) 申请公布日 2019.10.15
 (73) 专利权人 天津市特种设备监督检验技术研究院(天津市特种设备事故应急调查处理中心)
 地址 300192 天津市南开区航天道32号
 (72) 发明人 王璇 郭勇 李菊峰 牛卫飞 杜非 赵聪 高鹏 张晋军 杨阳 贺柏达 李超月
 (74) 专利代理机构 天津才智专利商标代理有限公司 12108
 专利代理师 杨宝兰

(51) Int. Cl.
 G01N 29/06 (2006.01)
 (56) 对比文件
 CN 105004792 A, 2015.10.28
 王璇等. 超声非线性无损检测技术的研究现状.《化学工程与装备》.2019, (第4期), 第346-349页.
 焦敬品等. 基于不同相控聚焦模式的非线性超声阵列成像方法研究.《机械工程学报》.2016, 第52卷(第14期), 第15-24页.
 刘烽欢等. 等径封堵三通超声相控阵检测工艺研究.《化工设备与管道》.2018, 第55卷(第3期), 第61-64页.
 审查员 任华

权利要求书1页 说明书4页 附图2页

(54) 发明名称
 一种金属材料疲劳闭合裂纹的非线性成像方法

(57) 摘要
 本发明公开了一种金属材料疲劳闭合裂纹的非线性成像方法,包括以下步骤,A.对检测试件进行相控阵布控;B.分别对全部阵元相控阵和分组阵元相控阵数据采集;C.分别计算全部阵元相控阵对应的声动能 $E_f(\vec{r})$ 和分组阵元相控阵对应的声动能 $E_{f1}(\vec{r})$ 、 $E_{f2}(\vec{r})$ 、...、 $E_{fM}(\vec{r})$;D.计算非线性表征参数 γ 的分布;E.将 γ 的计算结果成像。有益效果是,由于采用普通相控阵设备即可完成检测,降低了检测成本;另外,由于分别对全部阵元相控阵和分组阵元相控阵数据采集和数据处理,因此实现检测精度高和金属疲劳损伤的快速定位,从而提高了金属材料早期疲劳损伤的检测精度;实现了金属材料早期疲劳损伤的快速定位、成像检测。



1. 一种金属材料疲劳闭合裂纹的非线性成像方法,其特征在于,包括以下步骤,

A. 对检测试件进行相控阵布置;对相控阵系统的换能器阵元进行布置,N个阵元的布置方式为一维阵列形式;将N个阵元进行分组,假设分为M组,则第1个阵元、第M+1个阵元、第2M+1个阵元为一组,第2个阵元、第M+2个阵元、第2M+2个阵元为一组,以此类推,得到M个分组相控阵阵列;

B. 分别对全部阵元相控阵和分组阵元相控阵数据采集;每组阵元进行一次独立的并行聚焦过程,且聚焦点仍按照采用全部阵元聚焦时的位置选取;

C. 分别计算全部阵元相控阵对应的声动能 $E_f(\bar{r})$ 和分组阵元相控阵对应的声动能 $E_{f1}(\bar{r})$ 、 $E_{f2}(\bar{r})$ 、...、 $E_{fM}(\bar{r})$;利用全部阵元,设阵元数为N,并行聚焦模式,计算不同聚焦点 \bar{r} 处的基波频带内的声动能 $E_f(\bar{r})$;

$$E_f(\bar{r}) = \sum_{m=1}^N \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^2 |H_m(\bar{r}, \omega)|^2 d\omega \right) \quad (1)$$

其中 ω_1 为基波的起始频率, ω_2 为基波的终止频率, $H_m(\omega)$ 为第m个阵元的时域接收信号为 $h_m(\bar{r}, t)$ 的频谱,即有:

$$H_m(\omega) = \int_{t_r}^{t_r+T} h_m(\bar{r}, t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

之后仍通过式(1)计算每个分组下相控阵聚焦得到的基波频带内的声动能 $E_{f1}(\bar{r})$ 、 $E_{f2}(\bar{r})$ 、...、 $E_{fM}(\bar{r})$;

D. 计算非线性表征参数 γ 的分布;

E. 将 γ 的计算结果成像;

$$\gamma = \frac{\sum_{m=1}^M E_{f_m}(\bar{r}) - E_f(\bar{r})}{\sum_{m=1}^M E_{f_m}(\bar{r})} \quad (3)$$

其中 $E_{f_m}(\bar{r})$ 为第m组聚焦点处的基波频带内的声动能。

一种金属材料疲劳闭合裂纹的非线性成像方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种金属材料早期疲劳闭合裂纹检测的非线性成像方法。

背景技术

[0002] 金属材料或结构在交变载荷的反复作用下,会产生疲劳。疲劳是指在循环加载下,发生在材料某点处局部的、永久性损伤的递增过程。经足够的应力或应变循环后,随着疲劳损伤的累积,使材料产生疲劳微裂纹(闭合裂纹),微裂纹进一步扩展至宏观裂纹直至构件完全断裂,导致构件或结构的彻底失效,这就是材料疲劳失效过程中历经的全部寿命周期。产生疲劳损伤和疲劳裂纹属于材料寿命周期的早期阶段,并且占据了全部寿命周期的大部分时间。在实际工程中,当金属构件处于早期疲劳损伤阶段时,由于尚未形成可被检测到的宏观缺陷,常规无损检测技术通常难以将其发现。但对于长期处于往复交变载荷作用下的金属构件,一旦形成宏观裂纹,将迅速扩展,极有可能突然断裂,造成灾难性的事故。传统的无损成像方法(磁粉检测、X射线、声发射检测和超声检测等)只能发现已形成宏观开裂的大尺度缺陷。应用材料对超声波的非线性响应对设备、构件进行微小损伤无损检测是近年来研究的热点,是对材料微观缺陷评价方法的有效补充。目前常见的非线性检测方法研究包括基于传统超声的高次谐波检测法、基于传统超声的混频调制检测法和基于超声相控阵的非线性检测法。

[0003] 1、基于传统超声的高次谐波检测法

[0004] 目前,典型文献有:

[0005] (1)冯伟,万楚豪,刘斌,刚铁.7075铝合金疲劳损伤的多点快速非线性超声检测[J].机械工程学报,2018,54(10):23-28.该文献设计搭建多点快速检测系统,以不同程度疲劳损伤的铝合金为例研究疲劳过程中的超声非线性效应,结果表明,非线性系数对疲劳损伤的变化非常敏感,采用此方法可实现疲劳区域的初步定位检测。

[0006] (2)李海洋,潘强华,王召巴.金属表面疲劳损伤的非线性Rayleigh波成像方法[J].无损检测,2018,40(08):34-38.该文献提出了一种非线性Rayleigh表面波成像方法来实现金属表面疲劳损伤的检测。试验结果表明,非线性Rayleigh波成像方法可用于金属表面疲劳损伤的检测。

[0007] 基于传统超声的高次谐波检测法利用超声波在试件传播过程中遇到微小损伤(非线性缺陷)时的非线性效应:在频域上产生与基波频率呈整数倍关系的高次谐波分量,通过谐波幅值或是非线性系数确定损伤,其中二次谐波与三次谐波的应用较广。

[0008] 该方法存在以下不足:

[0009] (1)要求使用幅值较大的超声激励方式以激励高次谐波,因而对检测系统要求相对较高;

[0010] (2)无法实现对早期疲劳缺陷的定位、定性以及成像。

[0011] (3)仪器本身会带来的系统非线性,影响实际判断。

[0012] 2、基于传统超声的混频调制检测法

[0013] 目前,已有的典型文献有:

[0014] (1)《基于小波的非线性超声异侧激励混频的微裂纹定位方法》(公开号为CN108709934A)

[0015] 该发明公开了一种基于小波的非线性超声异侧激励混频的微裂纹定位方法,通过仿真与实验相结合,获取能够表征混频信号特征频率的最佳参数。结果表明基于小波变换的非线性 λ 波异侧激励混频定位方法的正确性与可行性。

[0016] (2)《结构疲劳裂纹方向检测用非线性超声混频方法》(公开号为CN108872393A)

[0017] 该发明专利公开了结构疲劳裂纹方向检测用非线性超声混频方法,对各接收信号进行连续小波变换,提取混频波的幅值,进行混频声场指向性分析。结果表明,根据反射混频波传播方向随疲劳裂纹方向的变化规律计算疲劳裂纹方向。

[0018] 该方法存在以下不足:

[0019] (1)无法实现对早期疲劳缺陷的定性以及成像。

[0020] (2)非线性损伤分量很小、难以提取,采集到的信号幅值很小,不能满足检测判定需求,往往需要采用特殊的信号处理方法对超声信号进行修正,对信号处理要求较高。

[0021] (3)仪器本身会带来的系统非线性,影响实际判断。

[0022] 3、基于超声相控阵的非线性检测法

[0023] 目前,已有的典型文献有:

[0024] (1)《一种用于微裂纹检测的非线性超声相控阵成像方法》(公开号为CN105004792A)

[0025] 该技术方案利用并行和顺序两种聚焦方式在各聚焦点处基波能量损失差作为非线性响应表征,可以判别聚焦点处是否存在损伤。由于在两种聚焦模式下,系统非线性带来的影响在作差中可以消除,因此该方法完美的解决了系统非线性的影响问题。

[0026] 该方法存在以下不足:

[0027] (1)该方法的前提要求,是需要相控阵系统具有顺序聚焦能力,即相控阵仪器具有全矩阵捕获(FMC)功能,即在一个采集(探测)周期内,阵元采用单发多收工作模式:激发阵列中的某个单阵元,所有N个阵元同时接收,对设备要求较高;

[0028] (2)数据处理非常复杂、耗时,很难应用到实际的快速检验现场。

发明内容

[0029] 本发明所要解决的技术问题是,提供一种设备简单、无干扰、检测精度高,可快速定位、成像的疲劳损伤非线性成像方法。

[0030] 本发明所采用的技术方案是,一种金属材料疲劳闭合裂纹的非线性成像方法,包括以下步骤,

[0031] A.对检测试件进行相控阵布控;

[0032] B.分别对全部阵元相控阵和分组阵元相控阵数据采集;

[0033] C.分别计算全部阵元相控阵对应的声动能 $E_f(\vec{r})$ 和分组阵元相控阵对应的声动能 $E_{f_1}(\vec{r})$ 、 $E_{f_2}(\vec{r})$ 、 \dots 、 $E_{f_M}(\vec{r})$;

[0034] D.计算非线性表征参数 γ 的分布;

[0035] E.将 Y 的计算结果成像。

[0036] 所述步骤A对相控阵系统的换能器阵元进行布置, N 个阵元的布置方式为一维阵列形式;

[0037] 所述步骤C利用全部阵元(设阵元数为 N),并行聚焦模式,计算不同聚焦点 \vec{r} 处的基波频带内的声动能 $E_f(\vec{r})$ 。

$$[0038] \quad E_f(\vec{r}) = \sum_{m=1}^N \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^2 |H_m(\vec{r}, \omega)|^2 d\omega \right) \quad (1)$$

[0039] 其中 ω_1 为基波的起始频率, ω_2 为基波的终止频率, $H_m(\omega)$ 为第 m 个阵元的时域接受信号为 $h_m(\vec{r}, t)$ 的频谱,即有:

$$[0040] \quad H_m(\omega) = \int_{t_r}^{t_r+T} h_m(\vec{r}, t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

[0041] 之后仍通过式(1)计算每个分组下相控阵聚焦得到的基波频带内的声动能 $E_{f1}(\vec{r})$ 、 $E_{f2}(\vec{r})$ 、 \dots 、 $E_{fM}(\vec{r})$ 。

[0042] 本发明的有益效果是,由于采用普通相控阵设备即可完成检测,降低了检测成本;另外,由于分别对全部阵元相控阵和分组阵元相控阵数据采集和数据处理,因此实现检测精度高和金属疲劳损伤的快速定位,从而提高了金属材料早期疲劳损伤的检测精度;实现了金属材料早期疲劳损伤的快速定位、成像检测。

附图说明

[0043] 图1是本发明超声相控阵实验示意图;

[0044] 图2是本发明相控阵分组方法;

[0045] 图3 是本发明分组相控阵算法示意图;

[0046] 图4 是本发明成像算法流程图。

具体实施方式

[0047] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细说明:

[0048] 如图1-图4所示,本发明一种金属材料疲劳闭合裂纹的非线性成像方法,包括以下步骤:

[0049] A.对检测试件进行相控阵布置;对相控阵系统的换能器阵元进行布置, N 个阵元的布置方式为一维阵列形式;将 N 个阵元进行分组,假设分为 M 组,则第1个阵元、第 $M+1$ 个阵元、第 $2M+1$ 个阵元为一组,第2个阵元、第 $M+2$ 个阵元、第 $2M+2$ 个阵元为一组,以此类推,得到 M 个分组相控阵阵列。

[0050] B.分别对全部阵元相控阵和分组阵元相控阵数据采集;每组阵元进行一次独立的并行聚焦过程,且聚焦点仍按照采用全部阵元聚焦时的位置选取(即按照与全部阵元聚焦时相同阵元不变的延时法则)。

[0051] C.分别计算全部阵元相控阵对应的声动能 $E_f(\vec{r})$ 和分组阵元相控阵对应的声动能 $E_{f1}(\vec{r})$ 、 $E_{f2}(\vec{r})$ 、 \dots 、 $E_{fM}(\vec{r})$;利用全部阵元(设阵元数为 N),并行聚焦模式,计算不同聚焦点 \vec{r} 处的基波频带内的声动能 $E_f(\vec{r})$ 。

$$[0052] \quad E_f(\vec{r}) = \sum_{m=1}^N \left(\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^2 |H_m(\vec{r}, \omega)|^2 d\omega \right) \quad (1)$$

[0053] 其中 ω_1 为基波的起始频率, ω_2 为基波的终止频率, $H_m(\omega)$ 为第 m 个阵元的时域接收信号为 $h_m(\vec{r}, t)$ 的频谱,即有:

$$[0054] \quad H_m(\omega) = \int_{t_r}^{t_r+T} h_m(\vec{r}, t) e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

[0055] 之后仍通过式(1)计算每个分组下相控阵聚焦得到的基波频带内的声动能 $E_{f1}(\vec{r})$ 、 $E_{f2}(\vec{r})$ 、 \dots 、 $E_{fM}(\vec{r})$ 。

[0056] D.计算非线性表征参数 γ 的分布;利用全部阵元聚焦与 M 组分别聚焦之和在聚焦点处激励的线性响应及成像结果完全相同,但两种方式在聚焦点处激发的非线性响应即激励带宽内(基波)的能量损失有很大的差别。

[0057] 例如,考虑只有二次谐波滋生的情况:仍假设相控阵系统包含 N 个阵元,对于一个阵元在聚焦点处引起的线性响应部分振幅可设为 Y ,如果该聚焦点为缺陷位置,则二次谐波的振幅与 Y^2 成正比,那么二次谐波的能量则与 Y^4 成正比,即基波的能量损失与 Y^4 成正比。对于利用全部阵元聚焦的情况,在聚焦点处引起的总的线性响应部分振幅为 NY ,则能量损失则为 $(NY)^4$ 。

[0058] 对于分组聚焦的情况,每个组内聚焦点处的线性响应部分振幅为 $\frac{NY}{M}$,而聚焦点的能量损失则为 $(\frac{NY}{M})^4$, M 组能量损失和为 $M * (\frac{NY}{M})^4$ 。

[0059] 这样一来,全部阵元聚焦在聚焦点处基波频带内的能量损失将是分组聚焦时和值的 M^3 倍,随着分组数的增加,能量差将会逐渐增加,成像结果也会变得愈加明显。对于实际的超声系统,当然不止于产生二次谐波,可以预见能量差会更加明显。

[0060] E.将 γ 的计算结果成像。

$$[0061] \quad \gamma = \frac{\sum_{m=1}^M E_{fm}(\vec{r}) - E_f(\vec{r})}{\sum_{m=1}^M E_{fm}(\vec{r})} \quad (3)$$

[0062] 其中 $E_{fm}(\vec{r})$ 为第 m 组聚焦点处的基波频带内的声动能。

[0063] 通过计算不同聚焦点的 γ 值分布则得到了非线性缺陷的成像结果,并且由于当采用全部阵元聚焦时和分组聚焦时的实验条件完全相同,这样系统非线性到来的影响在作差中可以完全消除。

[0064] 本发明由于采用普通相控阵设备即可完成检测,降低了检测成本;另外,由于分别对全部阵元相控阵和分组阵元相控阵数据采集和数据处理,因此实现检测精度高和金属疲劳损伤的快速定位,从而提高了金属材料早期疲劳损伤的检测精度;实现了金属材料早期疲劳损伤的快速定位、成像检测。

[0065] 值得指出的是,本发明的保护范围并不局限于上述具体实例方式,根据本发明的基本技术构思,也可用基本相同的结构,可以实现本发明的目的,只要本领域普通技术人员无需经过创造性劳动,即可联想到的实施方式,均属于本发明的保护范围。

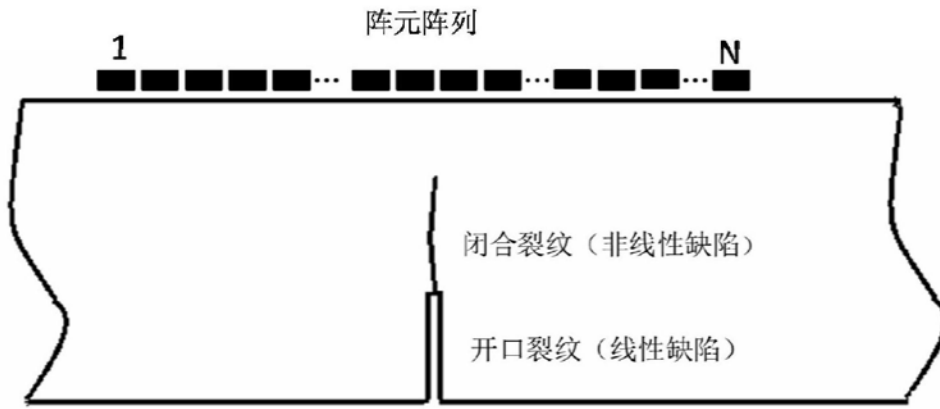


图1

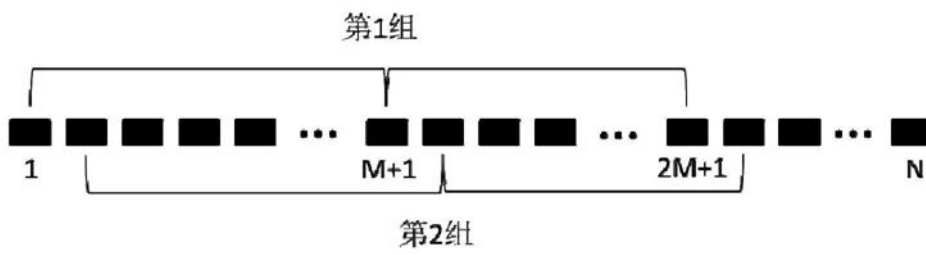


图2

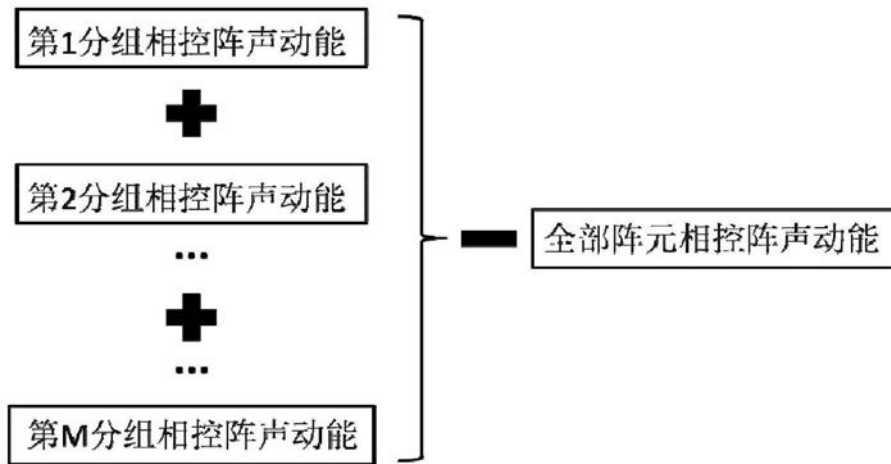


图3

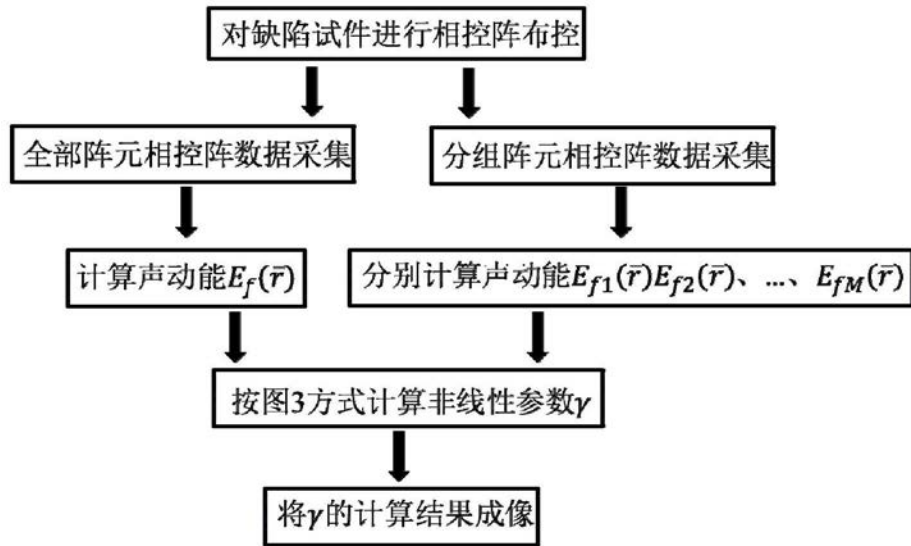


图4