



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112131718 A

(43) 申请公布日 2020.12.25

(21) 申请号 202010926430.1

(22) 申请日 2020.09.07

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 路玲玲 吴博文 宋宏伟 邢晓冬 李明起 赖姜

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理事务所(普通合伙) 11390

代理人 焦海峰

(51) Int. Cl.

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 17/14 (2006.01)

G06F 111/10 (2020.01)

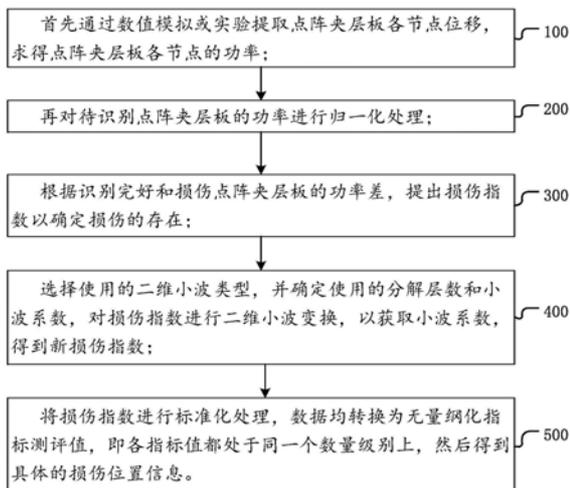
权利要求书2页 说明书4页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于结构时域响应的点阵夹层板损伤识别方法

(57) 摘要

本发明提供一种基于结构时域响应的点阵夹层板损伤识别方法,首先通过数值模拟或实验提取点阵夹层板各节点位移,求得点阵夹层板各节点的功率;然后对功率进行归一化处理;根据识别完好和损伤点阵夹层板的功率差,提出损伤指数以确定损伤的存在;选择使用的二维小波类型,并确定使用的分解层数和小波系数,对损伤指数进行二维小波变换,以获取小波系数,得到新损伤指数;将损伤指数进行标准化处理,数据均转换为无量纲化指标测评值,即各指标值都处于同一个数量级别上,然后得到具体的损伤位置信息。本发明通过时域的方法可以直接应用于具有非线性、高阻尼或高模态密度的结构,而且不需要在实验中提取难以获得的高阶数据,可以直接处理初始数据识别损伤,减少计算误差。



1. 一种基于结构时域响应的点阵夹层板损伤识别方法,其特征在于,包括如下步骤,  
步骤100,首先通过数值模拟或实验提取点阵夹层板各节点位移,求得点阵夹层板各节点的功率;

步骤200,再对待识别点阵夹层板的功率进行归一化处理;

步骤300,根据识别完好和损伤点阵夹层板的功率差,提出损伤指数以确定损伤的存在;

步骤400,选择使用的二维小波类型,并确定使用的分解层数和小波系数,对损伤指数进行二维小波变换,以获取小波系数,得到新损伤指数;

步骤500,将损伤指数进行标准化处理,数据均转换为无量纲化指标测评值,即各指标值都处于同一个数量级别上,然后得到具体的损伤位置信息。

2. 根据权利要求1所述的损伤识别方法,其特征在于,

所述步骤100中,计算功率的公式为:

$$\psi_{xy} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s_{xy}^2(t) dt \quad (1)$$

其中,T表示激励周期, $s_{xy}(t)$ 表示节点坐标为(x,y)的位移, $\psi_{xy}$ 表示节点坐标为(x,y)的功率。

3. 根据权利要求2所述的损伤识别方法,其特征在于,

所述步骤200中,归一化的公式为:

$$\phi_{xy} = \frac{\psi_{xy} - \psi_{\min}}{\psi_{\max} - \psi_{\min}} \quad (2)$$

$\phi_{xy}$ 为夹层板节点坐标为(x,y)的功率归一化, $\psi_{\min}$ 表示夹层板中各节点上最小的功率, $\psi_{\max}$ 表示夹层板中各节点上最大的功率。

4. 根据权利要求3所述的损伤识别方法,其特征在于,

提出损伤指数的公式如下:

$$D_{xy} = \phi_{xy}^* - \phi_{xy} \quad (3)$$

其中 $\phi_{xy}^*$ 代表损伤夹层板节点坐标为(x,y)的功率, $\phi_{xy}$ 代表未损伤夹层板节点坐标为(x,y)的功率;

其中,功率的公式还可以表示为:

$$\psi_{xy,p} = (\phi_p^{xy})^2 \int_{\omega_{p1}}^{\omega_{p2}} \left| \frac{\phi_p^a / m_p}{\omega_p^2 - \omega^2 + j\omega(\alpha + \beta\omega_p^2)} \right|^2 F_{xa}(\omega) d\omega = A(\phi_p^{xy})^2 \quad (4)$$

其中 $\psi_{xy,p}$ 是位于带宽(wp1,wp2)中的第p阶功率值, $\psi_{xy}$ 是具有特定带宽 $[\omega_{p1}, \omega_{p2}]$ 的所有 $\psi_{xy,p}$ 的和; $\alpha$ 和 $\beta$ 是模态质量和刚度的阻尼系数; $\phi_p^{xy}$ 和 $\phi_p^a$ 是在点(x,y)和激励点a处的第p阶模态位移; $F_{xa}(\omega)$ 为激励点a处的输出功率谱密度; $\omega_p$ 和 $\omega$ 分别代表结构的固有频率和外部激励频率;n是要考虑的模态数;

由此确定,“模态功率” $\psi_{xy,p}$ 和模态位移的平方 $(\phi_p^{xy})^2$ 仅差一个系数A,所以,可用功率差,

即公式(3)进行损伤识别,损伤指数 $D_{xy}$ 即可识别出损伤的存在。

5. 根据权利要求1所述的损伤识别方法,其特征在于,所述步骤400中,使用的二维小波为Biorthogonal小波。
6. 根据权利要求5所述的损伤识别方法,其特征在于,所述步骤400中选择的分解层数为第一层。
7. 根据权利要求6所述的损伤识别方法,其特征在于,所述步骤400中选择的小波系数为对角细节分量,为新的损伤指数 $\beta_{xy}$ 。
8. 根据权利要求1所述的损伤识别方法,其特征在于,所述步骤500中,对新的损伤指数 $\beta_{xy}$ 进行标准化处理的公式如下:

$$Z_{xy} = \frac{\beta_{xy} - \bar{\beta}_{xy}}{\sigma_{\beta_{xy}}} \quad (6)$$

其中, $Z_{xy}$ 为新的损伤指数, $\bar{\beta}_{xy}$ 和 $\sigma_{\beta_{xy}}$ 分别代表损伤指数的平均值和标准偏差, $x, y$ 分别为各节点的横纵坐标。

9. 根据权利要求8所述的损伤识别方法,其特征在于,所述损伤指数 $Z_{xy}$ 设置为5,以滤出其他因素引起的微小峰值; $Z_{xy}=0$ 如果 $|Z_{xy}| < 5$ 。

## 一种基于结构时域响应的点阵夹层板损伤识别方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及点阵夹层板领域,特别是涉及一种可以有效剔除连接点奇异性对损伤识别的影响,而仅利用结构时域响应即可确认点阵夹层板内损伤位置和数量的损伤识别方法。

### 背景技术

[0002] 点阵夹层板具有许多优良的性能,例如高刚度,高强度,良好的抗冲击性,良好的隔热性和隔音性。正是由于其许多优异的性能,点阵夹层板被广泛用于航空航天,土木工程,交通运输等领域。然而,由于制造工艺复杂和长期使用,不可避免地会产生多种缺陷,例如面板与夹层之间的剥离,面板与芯层的损坏,这些缺陷可能会降低承载能力和其他机械性能。因此,结构健康监测(SHM)对结构损伤的检测至关重要。

[0003] 现在的点阵夹层板结构形式多样,使得各项性能得以提升,但是这种结构的变化对损伤的识别造成了很大困难,并带来如下一些新的问题:

[0004] (1) 点阵夹层板在形式上更为复杂,因此传统的无损检测方法效果不是那么明显;

[0005] (2) 增加了结构的刚度和质量从而使得结构的动力学性质更为复杂,这在一定程度上影响了基于振动模态的损伤识别;

[0006] (3) 夹层板损伤类型丰富,不同位置、类型的损伤对结构动特性影响不同,需要能够识别多种类型的结构损伤。

### 发明内容

[0007] 本文发明的目的是提供一种可以有效剔除连接点奇异性对损伤识别的影响,而仅利用结构时域响应即可确认点阵夹层板内损伤位置和数量的损伤识别方法。

[0008] 具体地,本发明提供一种基于结构时域响应的点阵夹层板损伤识别方法,包括如下步骤,

[0009] 步骤100,首先通过数值模拟或实验提取点阵夹层板各节点位移,求得点阵夹层板各节点的功率;

[0010] 步骤200,再对待识别点阵夹层板的功率进行归一化处理;

[0011] 步骤300,根据识别完好和损伤点阵夹层板的功率差,提出损伤指数以确定损伤的存在;

[0012] 步骤400,选择使用的二维小波类型,并确定使用的分解层数和小波系数,对损伤指数进行二维小波变换,以获取小波系数,得到新损伤指数;

[0013] 步骤500,将损伤指数进行标准化处理,数据均转换为无量纲化指标测评值,即各指标值都处于同一个数量级别上,然后得到具体的损伤位置信息。

[0014] 本发明通过时域的方法可以直接应用于具有非线性、高阻尼或高模态密度的结构,而且不需要在实验中提取难以获得的高阶数据,可以直接处理初始数据识别损伤,减少计算误差。

[0015] 本发明还可以有效剔除连接点奇异性对损伤识别的影响,通过时域的方法处理初始数据识别损伤,实现多个损伤的识别。

### 附图说明

[0016] 图1是本发明一个实施方式的损伤方法流程图;

[0017] 图2是本发明一个实施方式的模型胞圆示意图;

[0018] 图3是本发明一个实施方式的SPTC损伤模型示意图,其中:(a) SD1, (b) SD2, (c) MD1, (d) MD2;

[0019] 图4是本发明一个实施方式的损伤识别结果示意图,其中,(a) SD1, (b) SD2, (c) MD1, (d) MD2;

[0020] 图5是本发明一个实施方式的激励频率对识别结果的影响示意图,其中,(a) 1000Hz, (b) 4000Hz;

[0021] 图6是本发明一个实施方式的采样频率对识别结果的影响示意图,其中,(a) 2500Hz, (b) 5000Hz。

### 具体实施方式

[0022] 以下通过具体实施例和附图对本方案的具体结构和实施过程进行详细说明。

[0023] 如图1所示,在本发明的一个实施方式中,公开一种基于结构时域响应的点阵夹层板损伤识别方法,包括如下步骤,

[0024] 步骤100,首先通过数值模拟或实验提取点阵夹层板各节点位移,求得点阵夹层板各节点的功率;

[0025] 计算功率的公式为:

$$[0026] \quad \psi_{xy} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s_{xy}^2(t) dt \quad (1)$$

[0027] 其中,T表示激励周期, $s_{xy}(t)$ 表示节点坐标为(x,y)的位移, $\psi_{xy}$ 表示节点坐标为(x,y)的功率。

[0028] 步骤200,再对待识别点阵夹层板的功率进行归一化处理;

[0029] 对功率进行归一化处理才可以使功率的变化具有相对显著性,然后功率的变化也可以突出损伤,其中,归一化的公式为:

$$[0030] \quad \phi_{xy} = \frac{\psi_{xy} - \psi_{\min}}{\psi_{\max} - \psi_{\min}} \quad (2)$$

[0031]  $\phi_{xy}$ 为夹层板节点坐标为(x,y)的功率归一化, $\psi_{\min}$ 表示夹层板中各节点上最小的功率, $\psi_{\max}$ 表示夹层板中各节点上最大的功率。

[0032] 步骤300,根据识别完好和损伤点阵夹层板的功率差,提出损伤指数以确定损伤的存在;

[0033] 提出损伤指数的公式如下:

$$[0034] \quad D_{xy} = \phi_{xy}^* - \phi_{xy} \quad (3)$$

[0035] 其中  $\phi_{xy}^*$  代表损伤夹层板节点坐标为  $(x, y)$  的功率,  $\phi_{xy}$  代表未损伤夹层板节点坐标为  $(x, y)$  的功率;

[0036] 功率的公式还可以表示为:

$$[0037] \quad \psi_{xy,p} = (\phi_p^{xy})^2 \int_{\omega_{p1}}^{\omega_{p2}} \left| \frac{\phi_p^a / m_p}{\omega_p^2 - \omega^2 + j\omega(\alpha + \beta\omega_p^2)} \right|^2 F_{xa}(\omega) d\omega = A(\phi_p^{xy})^2 \quad (4)$$

[0038] 其中  $\psi_{xy,p}$  是位于带宽  $(\omega_{p1}, \omega_{p2})$  中的第  $p$  阶功率值,  $\psi_{xy}$  是具有特定带宽  $[\omega_{p1}, \omega_{p2}]$  的所有  $\psi_{xy,p}$  的和;  $\alpha$  和  $\beta$  是模态质量和刚度的阻尼系数;  $\phi_p^{xy}$  和  $\phi_p^a$  是在点  $(x, y)$  和激励点  $a$  处的第  $p$  阶模态位移;  $F_{xa}(\omega)$  为激励点  $a$  处的输出功率谱密度;  $\omega_p$  和  $\omega$  分别代表结构的固有频率和外部激励频率;  $n$  是要考虑的模态数。

[0039] 从式 (4) 可以看出, 对于单独的模态  $p$ , 由于  $\omega_p$ ,  $\omega$  和阻尼系数的相同变化, 分母保持相同。因此, 对于不同的响应点, 函数  $\psi_{xy,p}$  的唯一区别在于在点  $(x, y)$  处的模式位移  $\phi_p^{xy}$ , 因为  $\phi_p^a$  被定义为激励所在的参考点。A 可以看作是系数。公式 (4) 可以看出, 理论上通过系数 A 表示统计量  $\psi_{xy,p}$  和物理量  $\phi_p^{xy}$  之间的关系。

[0040] 损伤的存在会导致刚度的变化, 从而导致模态参数  $\phi_p^i$  的变化, 由公式 (4) 可以看出,  $\psi_{xy}$  和  $(\phi_p^{xy})^2$  可以通过不变的系数 A 来表示之间的线性关系, 所以损伤会在  $\psi_{xy}$  中体现。

[0041] 损伤指数  $D_{xy}$  即可识别出损伤的存在。

[0042] 步骤 400, 选择使用的二维小波类型, 并确定使用的分解层数和小波系数, 对损伤指数  $D_{xy}$  进行二维小波变换, 以获取小波系数, 得到新损伤指数;

[0043] 损伤指数  $D_{xy}$  可以识别出损伤的存在, 但通过小波变换 (WT) 处理, 可以更好的进行损伤定位。小波是一种振幅从零开始, 逐渐增大然后减小到零的波动, 其均值为零。结构响应中不可见的非连续性可以通过 WT 的响应分解来检测。

[0044] 在二维小波计算中要确定三个参数, 分别为小波的选择, 分解层数的选择和系数的选择。

[0045] 本实施方式在对比了 Symlets (sym3), Daubechies (db3), Biorthogonal (bior6.8) 和 haar 四种小波, 确定小波 bior6.8 对损伤最为敏感。

[0046] 通过实验计算可得, 小波分解的第一层对损伤最为敏感。

[0047] 计算二维小波变换系数, 可以得到四个分量信号 (即小波系数  $cA, cH, cV, cD$ ), 其中  $cA$  是小波概貌分量,  $cH$  是水平细节分量,  $cV$  是垂直细节分量,  $cD$  是对角细节分量, 对角细节分量  $cD$  被称为二维小波高频系数, 通过计算可得, 该系数对信号  $D_i^*$  中出现的任何非连续性和奇异点最为敏感。

[0048] 所以在本实施方式中采用小波 bior6.8 对第一层进行分解, 求得二维小波高频系数  $cD$ 。在振动模式下, 由于破损位置的刚度的突然降低, 能够检测出振幅小波系数, 也就是新损伤指数  $\beta_{xy}$ 。

[0049] 步骤 500, 将损伤指数进行标准化处理, 数据均转换为无量纲化指标测评值, 即各指标值都处于同一个数量级别上, 然后得到具体的损伤位置信息。

[0050] 对新损伤指数  $\beta_{xy}$  进行标准化处理的公式如下:

$$[0051] \quad Z_{xy} = \frac{\beta_{xy} - \bar{\beta}_{xy}}{\sigma_{\beta_{xy}}} \quad (6)$$

[0052] 其中,  $Z_{xy}$  为新的损伤指数,  $\bar{\beta}_{xy}$  和  $\sigma_{\beta_{xy}}$  分别代表损伤指数的平均值和标准偏差,  $xy$  分别为各节点的横纵坐标。

[0053] 将损伤指数  $Z_{xy}$  设置为 5, 以滤出其他因素引起的微小峰值;  $Z_{xy} = 0$  如果  $|Z_{xy}| < 5$ 。

[0054] 本实施方式首先通过时域的方法可以直接应用于具有非线性、高阻尼或高模态密度的结构, 而且不需要在实验中提取难以获得的高阶数据, 可以直接处理初始数据识别损伤, 减少计算误差。该方法可以有效剔除连接点奇异性对损伤识别的影响。

[0055] 通过这种时域的方法可以处理初始数据识别损伤, 减少计算误差, 实现多个损伤的识别。通过此方法可以直接应用于非线性、高阻尼或高模态密度的结构。

[0056] 以下以具体实施例对本方法的处理过程进行验证说明。

[0057] 使用金字塔点阵夹层板 SPTC 模型, SPTC 模型胞元如图 2 所示。夹心胞圆的尺寸包括  $h = 8\text{mm}$ ,  $t = 1\text{mm}$  和  $\theta = 45^\circ$ , 面板的厚度为  $1\text{mm}$ , 沿着面板的长度和宽度方向分别有十个单元。

[0058] SPTC 由杨氏模量为  $200\text{GPa}$ , 泊松比为  $0.3$ , 质量密度为  $7800\text{kg/m}^3$  的不锈钢制成。SPTC 的边界条件是四边夹紧。在模拟中研究了 2 种情况, 包括单处损伤 (称为 SD1 和 SD2) 和不同程度的多处损伤 (MD1 和 MD2)。SD 包括单胞圆缺失和四分之一胞圆缺失。MD1 和 MD2 包含三处损伤, 一个单胞圆缺失, 半胞圆缺失和四分之一胞圆缺失。激励频率设置为  $500\text{Hz}$ , 采样频率为  $5000\text{Hz}$ , 激励位置在中心, 激励的幅值为  $1\text{N}$ 。

[0059] 夹心的损伤位置如图 3 所示, 图片分别显示了损伤 SD1, SD2, MD1 和 MD2。基于结构动力响应, 计算损伤指数  $Z_{xy}$ 。在图 4 中提供了不同情况的损伤下的结果, 在图 4 中, 深色矩形是受损单元的真实位置, 浅色圆圈是激励位置。它可以清楚地区分不同的损坏。

[0060] 从图 4 (a) 和 (b) 可以看出, 本方法可以区分同一位置的不同程度的损伤, 从图 4 (c) 和 (d) 还可以看出, 本方法可以有效地识别出不同程度的多个损伤。另外, 在图 4 中, 还发现在密度图上不同程度的损伤是不同的。例如, 可以通过等密度图中高密度区域的大小来区分半胞圆缺失和四分之一胞圆缺失, 当两个区域沿对角线分布时, 损伤则是单胞圆缺失, 结果表明, 该方法可以准确识别结构损伤的位置。

[0061] 为了验证该方法的普适性, 额外采用多种激励频率和采样频率进行证明。选择了两个额外的激励频率, 即  $1000\text{Hz}$ ,  $4000\text{Hz}$ , 结果如图 5 所示。

[0062] 又分别用  $2500\text{Hz}$  和  $5000\text{Hz}$  的采样频率计算。为了确保计算的准确性, 保持其他条件不变, 计算结果如图 6 所示。

[0063] 从图 5 和 6 可以看出, 改变激励频率和采样频率对损伤识别几乎没有影响。这几种情况都可以准确定位损伤位置。

[0064] 至此, 本领域技术人员应认识到, 虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示范性实施例, 但是, 在不脱离本发明精神和范围的情况下, 仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此, 本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。

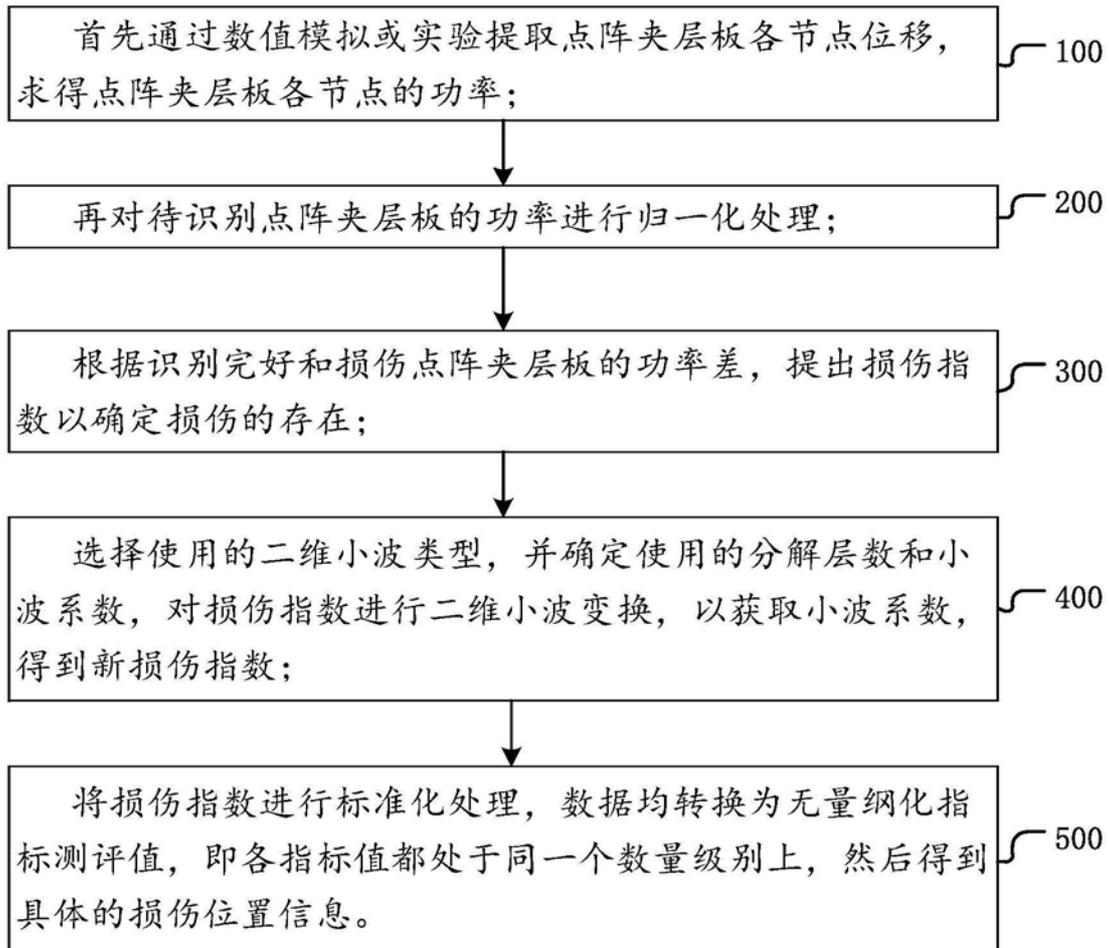


图1

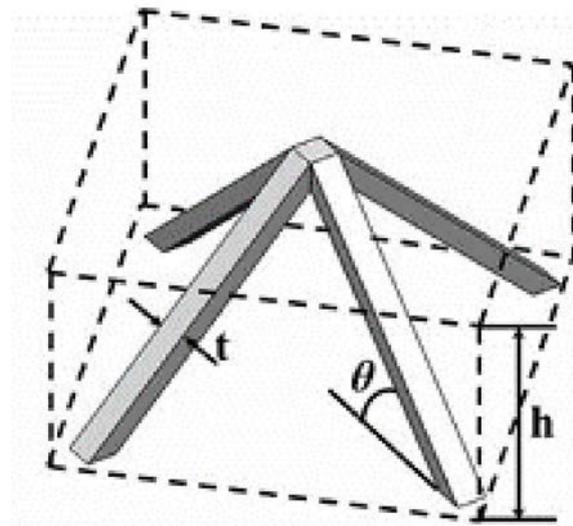


图2

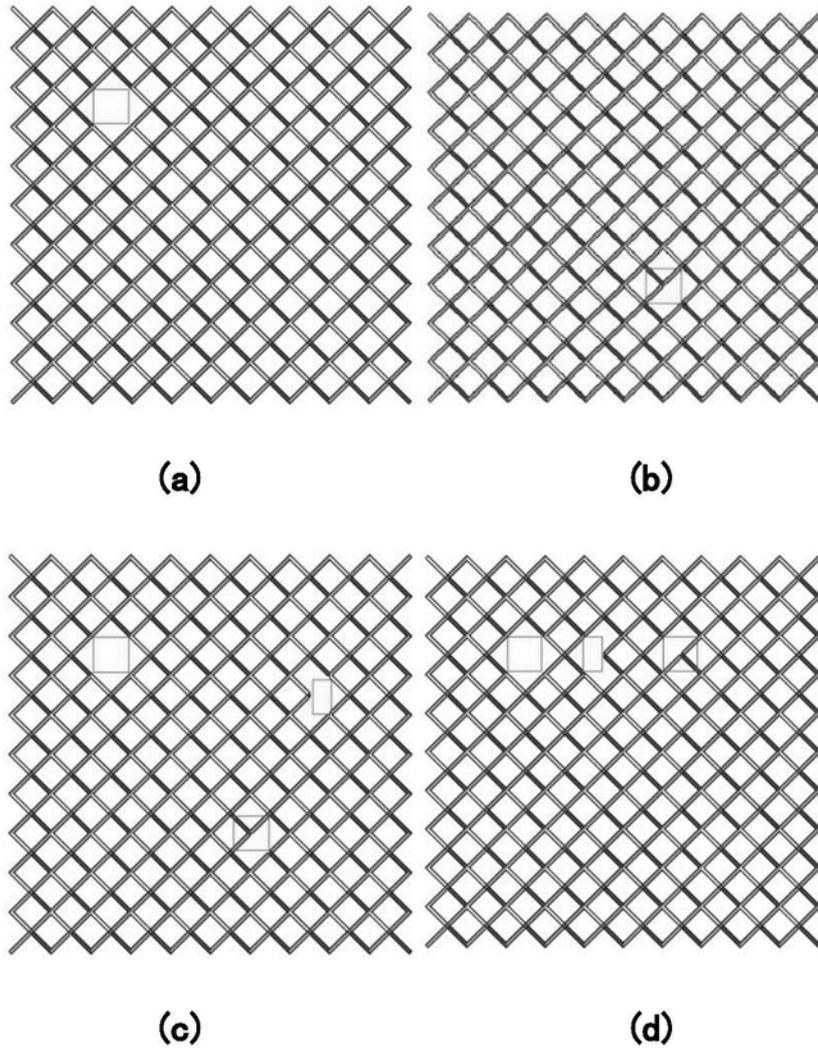


图3

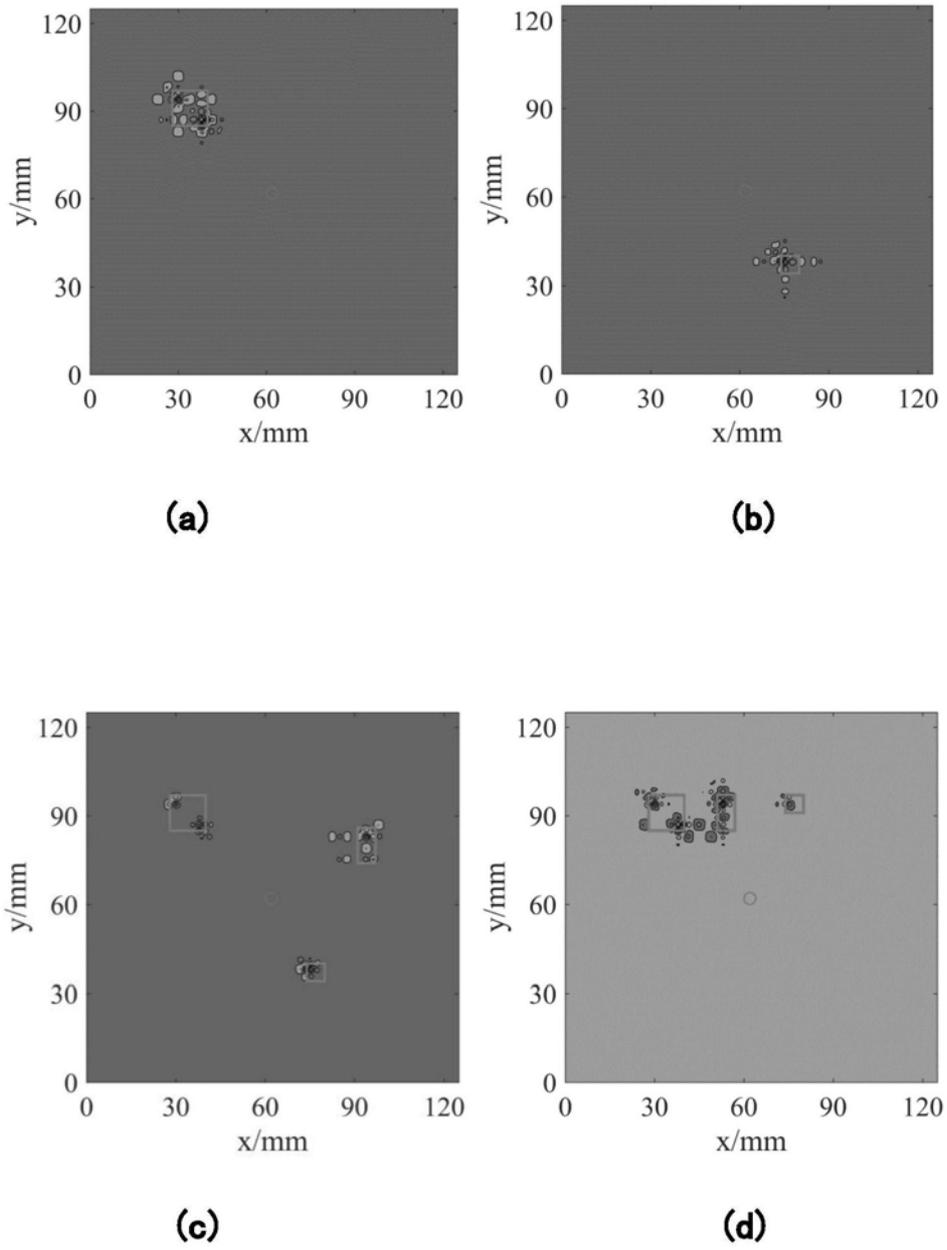


图4

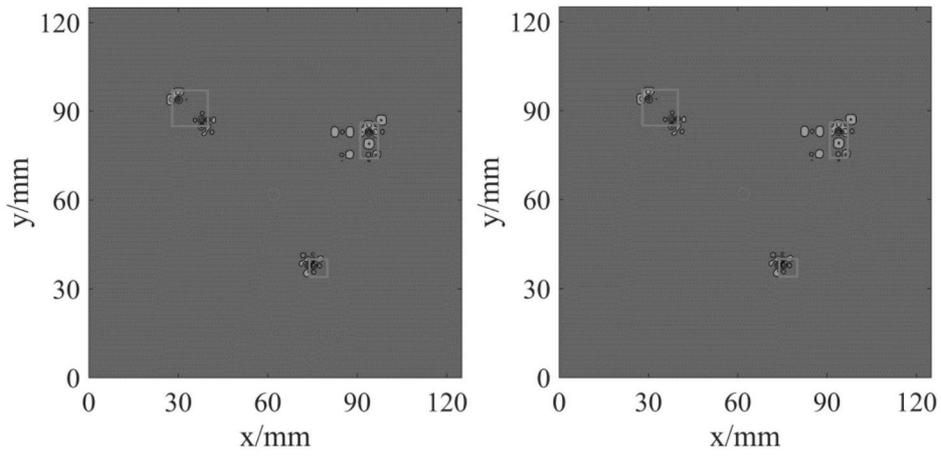


图5

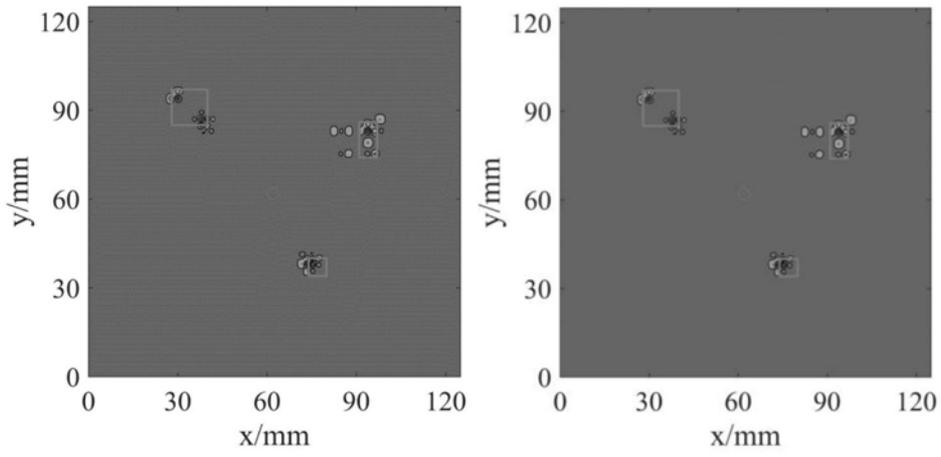


图6