

# 基于虚拟时间反转的空气耦合超声板材 腐蚀缺陷概率损伤成像<sup>\*</sup>

常俊杰 吴中权 徐洋

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063)

**摘要:** 为达到导波非接触式自动化检测,基于空气耦合超声检测技术,利用 A0 模态 lamb 波对铝板中预置的 0.5 mm 和 1 mm 深度的凹槽模拟的腐蚀缺陷进行正交扫查以获取缺陷的位置信息,分别以 lamb 波波包的能量和 lamb 波虚拟时间反转重构信号与原始信号的相关系数为损伤指数来表征缺陷大小,最后基于概率损伤成像方法,使用全乘法对缺陷损伤指数进行融合成像。成像结果显示使用虚拟时间反转算法成像结果要比常规的能量算法成像效果好,结果显示缺陷的位置和形状与实际情况较吻合,对缺陷的深度有较好的区分能力。

**关键词:** 空气耦合超声;lamb 波;损伤指数;虚拟时间反转;概率损伤成像

中图分类号: TG115.28+5 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

## Probabilistic damage imaging of plate corrosion defects by air-coupled ultrasound based on virtual time reversal

Chang junjie Wu zhongquan Xu yang

(Key Laboratory of Nondestructive Testing Technology, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University,  
Nanchang 330063, China)

**Abstract:** In order to achieve guided wave non-contact automatic inspection, based on air-coupled ultrasonic inspection technology, the A0 mode lamb wave is used to orthogonally scan the corrosion defects of the preset 0.5 mm and 1 mm depth grooves in the aluminum plate to obtain the defect. Location information, using the energy of the lamb wave packet and the correlation coefficient between the lamb wave virtual time reversal reconstruction signal and the original signal as the damage index to characterize the size of the defect. Finally, based on the probabilistic damage imaging method, the full multiplication method is used to calculate the defect damage index. Fusion imaging. The imaging results show that the imaging results of the virtual time reversal algorithm are better than those of the conventional energy algorithm. The results show that the position and shape of the defect are more consistent with the actual situation, and it has a better ability to distinguish the depth of the defect.

**Keywords:** air-coupled ultrasound;lamb wave;damage index;virtual time reversal;probabilistic damage imaging

### 0 引 言

金属板材在建筑、汽车、航空航天等领域有着广泛的运用,但由于环境以及加载应力等因素,金属板材制品容易遭到腐蚀破坏,表现为点状腐蚀扩展成块状凹坑,直接导致板材减薄,危害结构安全<sup>[1]</sup>。由于不少金属板材制品是封闭结构,例如压力容器、罐体等,无法使用 x 射线来进行检测,由于污染原因,也无法使用渗透检测,磁粉检测等方法。由于这类板材厚度较小,使用超声体波检测时盲区太大,所以

一般多使用超声导波进行检测。

目前,薄板中的超声导波激励技术使用较多的是接触式压电超声和电磁超声。电磁超声相比常规的接触式压电超声有着不需耦合剂的优势,可以在一定范围内提高探头<sup>[2-3]</sup>,提高了检测效率。随着技术的发展,空气耦合超声检测技术初步得到使用,空气耦合超声探头与常规接触式压电探头在原理上相同;不同的是,空气耦合超声探头的耦合层使用的是与空气声阻抗较为相近的多孔材料,解决了压电片与空气声阻抗失配问题<sup>[4]</sup>,提高了超声波从晶片到

收稿日期:2021-09-19

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(11464030)项目资助

空气中的导出率,空气耦合超声检测系统使用高功率前置放大器来补偿声波的衰减,使探头能够捕捉到空气中微弱的超声信号。

空气耦合超声技术以空气作为耦合剂,具有如下优点:避免耦合剂对被检材料的腐蚀或污染;可以对超薄材料和疏松多孔材料等绝大部分材料使用斜入射或穿透法进行扫描检测<sup>[5-7]</sup>;不需要检测人员持握探头,探头提高程度大大提高,可达10 cm以上;最重要的是,无需繁琐地布置探头或晶片阵列。这些优点推动了空气耦合超声朝着自动化检测发展,如张曼等<sup>[8]</sup>利用空气耦合超声穿透法对软包锂电池内部气泡缺陷进行自动C扫查成像,体现了空气耦合超声检测技术特有的优势。

目前,对于板材缺陷已有多种超声导波成像技术。高飞等<sup>[9]</sup>基于lamb波的散射信号,使用lamb波椭圆成像方法波对蜂窝夹层复合材料结构双侧的脱粘损伤进行识别与成像,刘增华等<sup>[10]</sup>利用lamb波对各向同性复合材料板分层缺陷进行基于正交扫查的概率损伤成像。尹昱等<sup>[11]</sup>基于有限幅度法对疲劳损伤进行非线性超声检测。Yu等<sup>[12]</sup>提出了一种基于信号相关性的双曲成像算法,把移动窗口的似然搜索与阵列相结合,由单个阵列成员捕获不同lamb波的时差有效性用于精确定位板状结构的损伤。关立强等<sup>[13]</sup>采用椭圆定位技术和层析成像技术相结合的方法进行lamb波损伤检测和成像,减少扫查工作量。

以上检测方法都是基于接触式超声技术,需要人工布置多探头进行阵列采集数据,工作量大,效率极低。本文基于空气耦合超声技术,提出利用虚拟时间反转算法构造损伤指数,结合正交扫查损伤概率成像方法,利用lamb波实现缺陷的快速自动化扫查成像。

## 1 lamb波概率损伤成像

### 1.1 lamb波检测理论

lamb波是指在薄板中传播的横波和纵波耦合而成的沿板延伸方向传播的导波。由于lamb波相较于体波衰减减小、传播距离远等特性,近年来受到人们的广泛使用<sup>[14]</sup>。与常规的体波不同,导波具有频散特性,表现为导波速度随着频率的改变而改变。lamb波分为对称(S)型和反对称(A)型两种,这两种类型又分为若干种不同的模式,所以lamb波检测相比较于体波检测要复杂得多<sup>[15]</sup>。对于lamb波检测,高阶模式数量多且声速相近,在A信号上表现为波包间有重叠,波包信息被遮盖;模式阶数越高,频率也越高,而现今空气耦合超声探头频率多在1 MHz以下,这些因素决定了空气耦合超声lamb波检测只能使用0或1阶等低阶模式。

为确定板内可能含有哪些模式的lamb波,针对实验使用的3 mm厚铝板,绘制相速度频散曲线如图1所示。

由图1可知当频率为0.8 MHz以下时,只有3个模式,而对于0.2 MHz的空气耦合超声探头而言,只有A0和

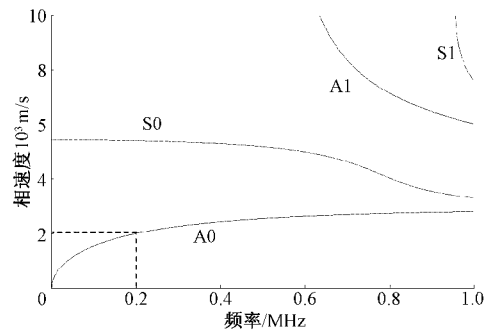


图1 3 mm铝板相速度频散曲线

S0两个模式。由于接收探头接收到的信号源于板表面质点对空气的振动,即板上质点在 $z$ 轴方向的离面移位,所以应该选择质点离面位移大的那一个模式。绘制A0和S0模式lamb波的波结构如图2所示。

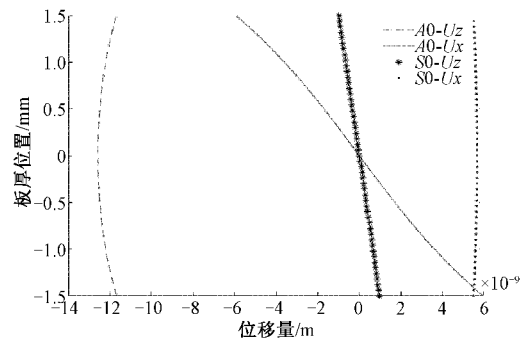


图2 3 mm铝板A0和S0模式lamb波波结构

图2的纵轴表示板在厚度方向的位置,横轴表示质点移位大小。由图可知A0模式lamb波的离面位移( $A0-U_z$ )要大S0模式的离面位移( $S0-U_z$ )10倍以上。所以应使用A0模式的lamb波进行缺陷扫查。由图1可知A0模式lamb波相速度 $v=2000$  m/s,根据snell折射定律可求得其对应的入射角 $\alpha$ 为:

$$\alpha = \arcsin(340/v) = 9.8^\circ \quad (1)$$

由于lamb波不是以相速度在传播,而是以包络形式的群速度在传播,所以为了验证接收到的波是否是A0模式的lamb,绘制3 mm厚铝板的群速度频散曲线如图3所示,由图可知当探头频率为0.2 MHz时,A0模式lamb波的群速度为3000 m/s,S0模式lamb波的群速度为5340 m/s。

如图4所示为空气耦合超声lamb波检测原理,当将探头倾斜角度 $\alpha$ 入射时,将在板内产生A0模式的lamb波,由于A0模式lamb波使板内质点有着较大的沿着 $z$ 轴方向的离面位移,板表面质点的振动将带动空气振动,所以板内质点的振动状态能通过空气这个介质而被接收探头接收到。由于lamb波充满于整个板内,所以无论缺陷位于板中哪个位置,都会影响lamb波的振动模式,使lamb波发生反射、散射或波形畸变,使得信号幅值和频率等发生改变,所以可以根据接收到的A0模式lamb波波包的幅值、能量、

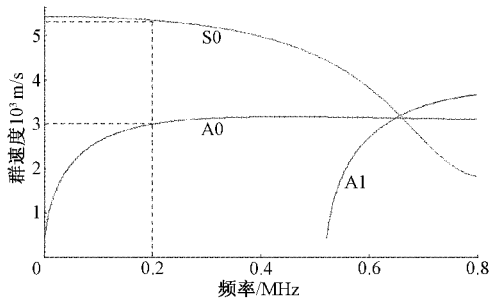


图 3 3 mm 铝板群速度频散曲线

频谱等参数与无缺陷时的参考信号之间的差异来表征铝板缺陷的严重程度。

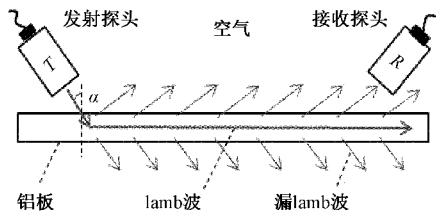


图 4 空气耦合超声 lamb 波检测原理

1.2 虚拟时间反转算法

超声成像的质量与用回波信号构造的损伤指数密切相关。对于概率损伤成像而言,目前使用较多的损伤指数有信号幅值、相位和信号波包能量,它们分别是在时域和能量衰减的角度来衡量缺陷对声波的作用大小,腐蚀缺陷会引起 lamb 波的畸变,却不一定能引起 lamb 波幅值或波包能量的显著改变,所以这两种损伤指数不一定能用来表征腐蚀缺陷。

考虑到腐蚀缺陷必将造成板材减厚,频厚积发生改变,缺陷的存在必将造成 lamb 波频率成分的变化,所以损伤指数可以在频域里进行构造。而虚拟时间反转算法便是一种从信号频域角度来衡量信号畸变的方法。

虚拟时间反转是指针对一发一收模式,截取接收探头接收到的有效信号,然后将其在时间轴上首尾翻转变成一个新的信号从发射探头激励出去,而再次被接收探头接收的过程,原理如图 5 所示。

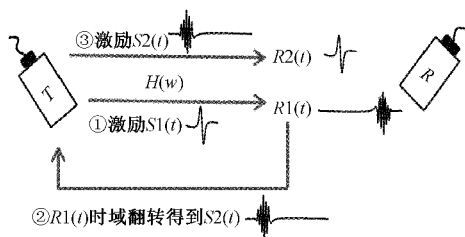


图 5 时间反转原理

第 1 次激励的时域信号  $S_1(t)$  对应的频域信号为  $S_1(\omega)$ , 第 1 次接收时域信号  $R_1(t)$  对应的频域信号为  $R_1(\omega)$ , 第 2 次激励的信号  $S_2(t)$  对应的频域信号为

$S_2(\omega)$ , 第 2 次接收信号  $R_2(t)$  对应的频域信号为  $R_2(\omega)$ 。由于时域信号在时域翻转等于频域共轭,所以假设频域信号的传递函数为  $H(\omega)$  后可得到关系式:

$$S_1(\omega) = FT(S_1(t)) \tag{2}$$

$$R_1(\omega) = FT(R_1(t)) \tag{3}$$

$$R_1(\omega) = S_1(\omega)H(\omega) \tag{4}$$

$$S_2(\omega) = \overline{R_1(\omega)} \tag{5}$$

$$R_2(\omega) = S_2(\omega)H(\omega) \tag{6}$$

联合式(2)~(6)可得:

$$R_2(t) = IFT\left(\frac{R_1(\omega)\overline{R_1(\omega)}}{S_1(\omega)}\right) \tag{7}$$

由式(7)可知,根据第 1 次激励信号  $S_1(t)$  和第 1 次接收信号  $R_1(t)$  便可以求得虚拟时间反转后的重构信号  $R_2(t)$ , 无需让发射探头重新激励反转后的信号,这就是虚拟时间反转算法。它解决了实际时间反转算法再次激励反转信号难的问题。若不存在缺陷,由于虚拟时间反转算法过程的线性关系,重构的  $R_2(t)$  归一化后将与  $S_1(t)$  完全相等;若腐蚀缺陷存在,则会破坏时间的可逆性,重构失效,重构得到的信号  $R_2(t)$  与  $S_1(t)$  产生差异。这个差异可以利用信号的互相关性,构建损伤指数  $DI$  来衡量,则:

$$DI = 1 - \frac{\left| \int_{t_1}^{t_2} S_1(t)R_2(t)dt \right|}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} S_1^2 dt \int_{t_1}^{t_2} R_2^2(t) dt}} \tag{8}$$

式中:  $t_1$  和  $t_2$  为截取的有效信号的起始和截止时间。损伤指数  $DI$  的范围为  $0 \sim 1$ , 0 表示虚拟时间反转重构信号与激励信号一致,表示无缺陷;当缺陷严重, lamb 波的畸变越大,重构的信号与激励信号差异越大,  $DI$  越接近 1。

1.3 损伤概率成像

由于空气耦合超声探头以空气作为耦合剂,不需要直接接触工件,所以发射探头和接收探头只需相对于铝板固定好倾斜角度便可以实现快速自动扫查。图 6 为缺陷扫查示意图,两探头同步沿着与 lamb 波传播方向的垂直方向移动扫查。一个方向扫查完成后沿着原扫查方向的垂直方向进行扫查,仅通过两次正交方向扫查就可以完成对缺陷的定位<sup>[16]</sup>。

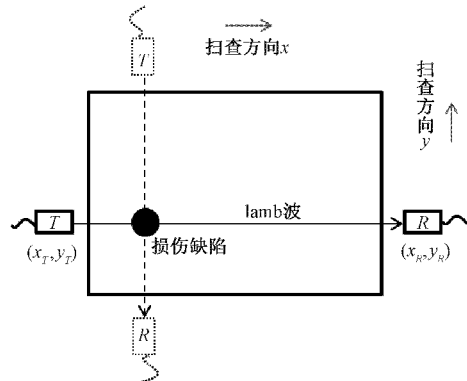


图 6 缺陷扫查示意图

探头在移动过程中接收到的信号反映的是在不同位置时探头宽度覆盖区域的整体情况,而不是探头中心对齐的位置,所以损伤指数还受探头宽度影响。如图7所示,探头发射出的声场能量以探头中心线向两侧逐渐衰减,衰减趋势可以用高斯函数表示。缺陷距离探头中心轴线越近,对信号的作用越大,反之越小。因为声场宽度近似为探头宽度 $D$ ,当缺陷距离探头中心轴线超过 $0.5D$ 时不会对信号产生影响。

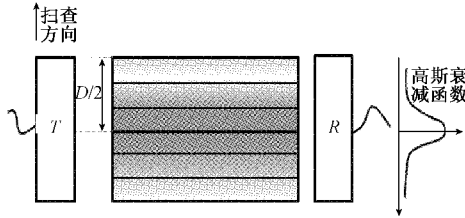


图7 平探头声场能量分布示意图

如图6所示,由于扫查方向平行于 $x$ 或 $y$ 轴方向,所以任一位置 $(x, y)$ 与该扫查路径下声场中心的距离可表示为:

$$R_{mn}(x, y) = \begin{cases} |y - y_T|, & y_T = y_R \\ |x - x_T|, & x_T = x_R \end{cases} \quad (9)$$

式中: $(x_T, y_T)$ 和 $(x_R, y_R)$ 分别是发射探头和接收探头的位置。利用高斯衰减函数来赋予探头声场范围内不同位置处缺陷的损伤权重 $E$ ,表示为:

$$R = R_{mn}(x, y) \quad (10)$$

$$E(R) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(2R/D)^2}{2}}, & R \leq 0.5D \\ 0, & R > 0.5D \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\sigma$ 为衰减系数, $D$ 为探头宽度。

对于缺陷的定量,引入损伤指数来表征缺陷损伤程度。若将扫查信号的波包能量与无缺陷参考信号波包能量的差异来衡量缺陷大小,则损伤指数可表示为:

$$DI_{mn} = \left| \frac{E_{ref} - \sum_{t=t_1}^{t_2} X_{mn}^2(t)}{E_{ref}} \right| \quad (12)$$

式中: $X_{mn}$ 为 $m$ 扫查方向(对于正交扫查 $m$ 取值 $x$ 或 $y$ )上的第 $n$ 个扫查信号 $DI_{mn}$ 为 $m$ 扫查方向上第 $n$ 个扫查信号求得的损伤概率。 $t_1$ 和 $t_2$ 为用于检测的 $\lambda$ 波波包的起始和截止时刻, $E_{ref}$ 为无缺陷时的 $\lambda$ 波参考信号的能量。同理,式(8)的基于虚拟时间反转的损伤指数可表示为:

$$DI_{mn} = 1 - \frac{\left| \sum_{t=t_1}^{t_2} S1_{mn}(t) R2_{mn}(t) \right|}{\sqrt{\sum_{t=t_1}^{t_2} S1_{mn}^2(t) \sum_{t=t_1}^{t_2} R2_{mn}^2(t)}} \quad (13)$$

为了提取缺陷的形状,提高检查的可靠性和准确性,利用全乘法对损伤指数进行融合。因此最终的概率损伤成像全乘法表示为:

$$P(x, y) = \prod_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} P_{mn}(x, y) = \prod_{m=1}^M \sum_{n=1}^{N_m} DI_{mn} \cdot E(R_{mn}(x, y)) \quad (14)$$

式中: $P(x, y)$ 为位置 $(x, y)$ 处总的损伤概率全乘值, $P_{mn}(x, y)$ 为第 $m$ 扫查方向上第 $n$ 个扫查路径对点 $(x, y)$ 处的损伤概率的贡献。对于正交扫查,只有 $x$ 和 $y$ 两个扫查方向, $M=2$ 。

## 2 实验步骤

### 2.1 空气耦合超声系统搭建

实验采用日本探头公司生产的非接触式空气耦合超声检测系统,包括NAUT21控制软件、超声信号发射接收器,前置放大器和三维扫查仪,实验布置如图8所示。空气耦合超声探头频率为0.2 MHz,探头尺寸为14 mm×20 mm。设置高低通滤波分别为0.1 MHz和0.3 MHz,激励电压350 V,矩形脉冲波数为4个,前置放大器增益为60 dB,电路增益23.8 dB,A信号波形平均数20,采样频率为20 MHz。



图8 实验设备

如图9所示,实验采用3 mm厚铝板,预置了两个正方形凹槽,槽深分别为左侧0.5 mm,右侧1 mm。探头前沿中心距铝板表面6 mm,沿 $x$ 轴方向扫查时两探头中心间距75 mm,沿 $y$ 轴方向扫查时两探头中心间距130 mm。实验扫查布置如图9所示,将探头相向倾斜相同角度 $9.8^\circ$ 固定后进行扫查,设置扫查仪每间隔1 mm自动采集一次波形数据, $x$ 轴方向采集130次, $y$ 轴方向采集60次,扫查区域为一个130 mm×60 mm规模的矩形。

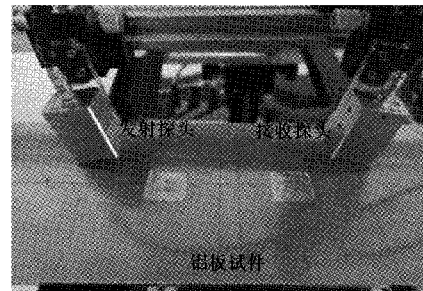


图9  $y$ 方向扫查示意图

### 2.2 扫查结果

探头沿着 $x$ 轴方向对铝板进行扫查,得到的 $x$ 方向扫查的信号如图10所示。

由图10可知波包到达时间为 $60 \mu\text{s}$ ,根据声波在空气中声程为12 mm,两探头中心距75 mm,计算得到该波包群速度为3 036 m/s,这与A0模态 $\lambda$ 波群速度3 000 m/s

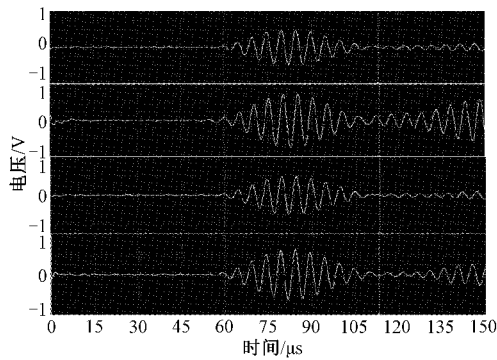


图 10  $x$  方向扫描波形

接近,表明该波包确为  $A_0$  模态  $\lambda$  波而不是  $S_0$  模态的  $\lambda$  波。图 10 中 4 个波形从上到下分别为图 11 中对应位置  $x=1,2,3,4$  处的扫描波形,分别对应于 0.5 mm 深凹槽的左边缘,正中间,右边缘和无缺陷处。

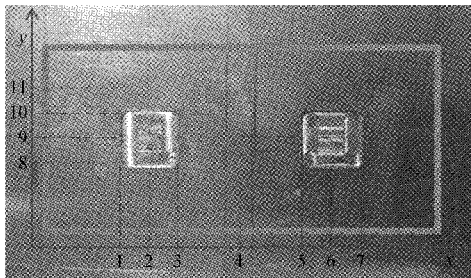


图 11 扫描区域

探头沿着  $y$  轴方向对铝板进行扫查,得到  $y$  方向的扫查信号如图 12 所示,图 12 中 4 个波形从下到上分别是图 11 中对应位置  $y=8,9,10,11$  处的扫描波形,分别对应于凹槽缺陷的下边缘,正中间,上边缘和无缺陷处。

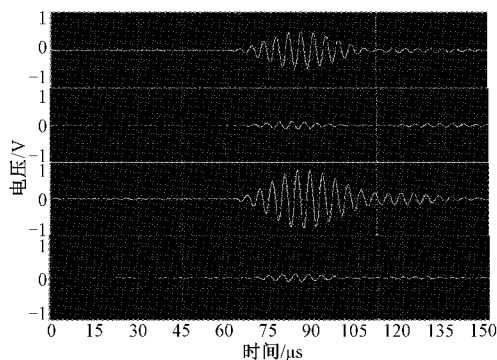


图 12  $y$  方向扫描波形

分别计算  $x$  和  $y$  轴两个正交方向上扫查信号基于波包能量得到的损伤指数,绘制如图 13 所示。由于  $\lambda$  波在凹槽端角处散射严重的缘故,当  $\lambda$  波遇到凹槽边缘时能量急剧变小,但在缺陷中间位置时却要比无损伤位置时波包能量大,这可能是由于凹槽位置减厚造成  $\lambda$  模式发生改变,能量泄露减少而造成的。在位置  $x=5,6,7$  处有同样的规律。

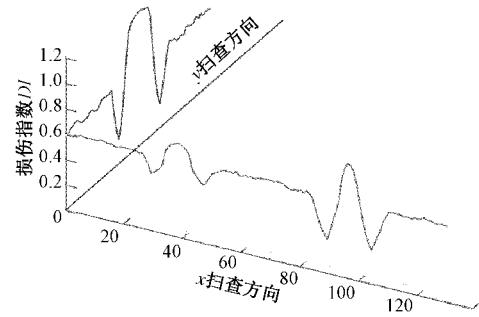


图 13 基于波包能量的损伤指数分布

分别计算  $x$  和  $y$  轴两个正交方向上扫查信号基于虚拟时间反转算法构造的损伤指数,绘制如图 14 所示。

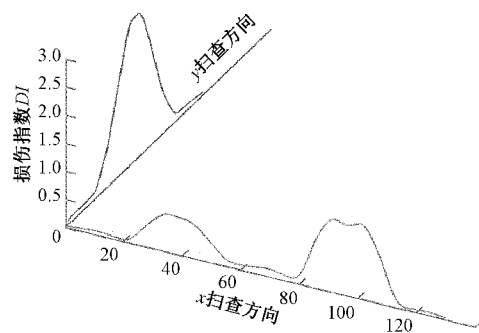


图 14 虚拟时间反转损伤指数分布

利用全乘法对图 13 和 14 得到的结果进行二维概率损伤成像,结果如图 15 和 16 所示,图像颜色越深,表示缺陷越严重,其中方框为凹槽的实际轮廓位置。

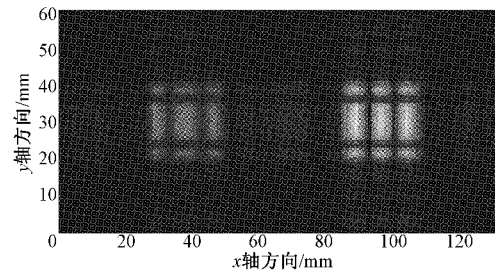


图 15 波包能量差异指数概率损伤成像

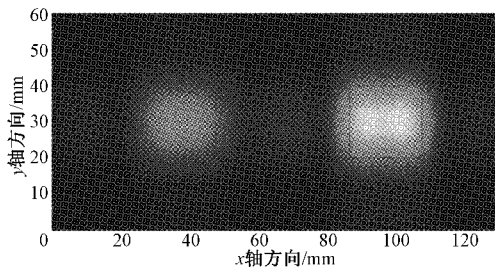


图 16 虚拟时间反转指数概率损伤成像

### 3 结 论

基于空气耦合超声波衰减大的特点,根据波结构图选

择离面位移较大的 A0 模态 Lamb 波进行缺陷检测,利用频散曲线计算得到 3 mm 铝板 0.2 MHz 的 A0 模态 Lamb 波的激励角度。基于 Lamb 波遇到缺陷发生畸变的特性,利用虚拟时间反转重构信号与原信号的差异作为损伤指数来衡量缺陷的严重程度,通过  $x$  和  $y$  两个正交方向的扫查实现对缺陷的二维定位,最终将损伤指数与位置信息匹配后进行二维成像。结果显示缺陷图像与实际缺陷的位置和大小都较为符合,通过图像灰度能够明显区分出 0.05 mm 和 0.1 mm 深度的缺陷;且利用虚拟时间反转算法构造的损伤指数进行成像的效果要好于使用波包能量差异进行的成像。

### 参考文献

- [1] 亓云飞,董彩常,李超. 点状腐蚀对铝壳船舶体板材力学性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(1): 98-101.
- [2] 胡松涛,石文泽,卢超,等. 钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速成像检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 35-46.
- [3] 李望,吴长青,赵炜炜,等. 电磁超声检测技术的应用[J]. 电子测试, 2021(3): 115-116, 126.
- [4] 卞加聪,胡文祥,周八妹. 多匹配层空气耦合压电超声换能器[J]. 应用声学, 2018, 37(1): 96-100.
- [5] 常俊杰,罗文斌,陈志恒,等. 基于空气耦合超声对泡沫材料探伤的应用研究[J]. 传感技术学报, 2020, 33(11): 1655-1660.
- [6] 齐燕军,刘书奎,靖洪文,等. 基于空气耦合非线性共振频率偏移的混凝土损伤评估[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(10): 106-111.
- [7] 侯亚峰,李光亚,王艳玲,等. 基于空气耦合超声的纸张粗化检测系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 120-124.
- [8] 张曼,王明泉,杨顺民,等. 基于空耦超声的聚合物锂离子电池缺陷检测[J]. 电池, 2020, 50(2): 196-199.
- [9] 高飞,姬鼎丞,王军伟,等. 航天器蜂窝夹层结构脱粘损伤的导波检测与成像方法[J]. 航天器工程, 2021, 30(1): 57-63.
- [10] 刘增华,樊军伟,何存富,等. 基于概率损伤算法的复合材料板空气耦合 LAMB 波扫描成像[J]. 复合材料学报, 2015(1): 227-235.
- [11] 尹昱,陈振华,肖峰,等. 不锈钢疲劳微损伤的非线性超声检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 68-73.
- [12] YU L, CHENG L, SU Z Q. Correlative sensor array and its applications to identification of damage in platelike structures[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2012, 19(8): 650-671.
- [13] 关立强,祝伟光,李义丰. Lamb 波时间反转椭圆定位和层析成像混合技术研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 191-201.
- [14] 何存富,郑明方,吕炎,等. 超声导波检测技术的发展、应用与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1713-1735.
- [15] 刘增华,王娜,何存富,等. 基于压电陶瓷片的 LAMB 波单模态激励及缺陷检测的实验研究[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(10): 1453-1458.
- [16] 胡亚男,赵娜,张旭,等. 基于概率损伤算法的铝板电磁超声 Lamb 波扫描成像[J]. 无损检测, 2019, 41(2): 1-7.

### 作者简介

常俊杰,副教授,主要从事超声无损检测的应用技术研究及检测设备的研发等工作。

E-mail: junjiechang@hotmail.com

吴中权(通信作者),硕士研究生,主要从事超声无损检测技术和信号处理方面的研究。

E-mail: 434562223@qq.com

徐洋,研究生,主要从事超声无损检测和超声探头设计方向。

E-mail: 2067511815@qq.com