碳纤维复合材料层板冲击损伤的 空气耦合兰姆波成像检测

饶璐雅 陈果 卢超 石文泽

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063)

文 摘 非接触式超声兰姆波方法能够对大面积复合材料板材进行快速检测,在自动成像检测上有着突出的优势。针对碳纤维/树脂基复合材料(CFRP)层压板采用空气耦合超声探头激励出 A0 模态兰姆波。在含冲击损伤的层板试样的同一侧激发和接收兰姆波进行扫描检测,针对冲击损伤区域以互相正交的两个方向进行兰姆波扫查,获得了不同位置的检测信号。对比在有无缺陷处板材中兰姆波传播信号的特征,对采集信号进行频域分析,以无缺陷处信号值为基准,利用信号差异系数(SDC)作为特征值,将扫查信号数据采用特征值全加和全乘的数据融合方法进行了缺陷形貌重构成像。成像结果能够良好的体现出冲击损伤的位置和两个方向的尺寸大小。

关键词 碳纤维复合材料,冲击损伤,兰姆波成像 空气耦合超声 中图分类号:TB332;TB559 DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.05.015

Imaging of CFRP Plate Impact Damage Using Air-Coupled Lamb Waves

RAO Luya CHEN Guo LU Chao SHI Wenze

(Key Lab. of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract The non-contact ultrasonic Lamb wave method can detect the large area composite sheet quickly and has the outstanding advantages in the automatic imaging detection. A0 mode lamb waves were excited by air-coupled ultrasonic probes for carbon fiber reinforced resin (CFRP) composites laminates. The Lamb waves were scanned and detected on the same side of the sample with the impact damage, and the Lamb waves were scanned in two directions which are orthogonal to each other to obtain the detection signals at different positions. Based on the characteristics of the Lamb wave propagation signal in the without defects and with defects plates, the frequency domain analysis of the acquisition signal is carried out. It is caculated for signal difference coefficient (SDC) based on no defects area signal. And SDC is used as characteristic value, the scanning imaging is achieved form characteristic value by using full summation algorithm and full multiplication algorithm data fusion method. Contrast of the amplitude imaging scan, the SDC imaging results are able to reflect the position of impact damage more, and it can show the impact size in two directions.

Key words CFRP, Impact damage, Lamb wave imaging, Air-coupled ultrasonic

收稿日期:2017-04-12

通信作者:卢超,教授、硕士研究生导师,主要研究方向为声学无损检测新技术。E-mail: luchaoniat@163.com

基金项目:国家自然科学基金(51265044,11374134);江西省自然科学基金(20114BAB202008);航天科技创新基金(天科研[2013]1143号); 江西省研究生创新专项资金项目(YC20165-S329)

第一作者简介: 饶璐雅,1992年出生,硕士研究生,主要研究空气耦合超声检测技术

0 引言

碳纤维复合材料以其比模量大、设计性好、耐疲 劳、可大面积整体成型等优点得到了越来越多的运 用,而在对材料性能及完整性要求比较高的领域,如 使用在飞机上蒙皮的碳纤维层板在服役期间,可能遭 受到来自冰雹、碎石、工具坠落等各种情况的冲击而 造成结构损伤,长期使用过程对整体结构的安全性造 成严重的威胁。因此掌握了解冲击损伤及其检测方 法是复合材料设计、工艺制造关注的焦点,尤其在航 空航天领域,碳纤维层板的性能完整性直接影响着结 构的重大安全问题^[1-3]。

空气耦合技术无需耦合剂、无二次污染,适用于 在役快速检测,复合材料空气耦合超声C扫描检测 仪器及系统开发发展日渐成熟并逐渐投入实际使用, 目前空气耦合C扫描检测只能使用一发一收穿透式 检测方法,发射和接收探头在材料两侧放置逐点扫 查^[4-6]。然而在役检测情况下,如在飞机蒙皮复合材 料检测中,只能够在材料一侧放置探头,可采用兰姆 波检测方法满足实际要求,由于兰姆波传播范围大的 特点,结合空气耦合超声技术能够大大的加快扫描检 测速度。

非接触空气耦合超声检测换能器和信号处理技术的快速发展,推动了基于超声兰姆波方法的复合材料层板飞机结构件的现场无损检测技术实现。英国帝国理工大学的 C-astaings 等采用有限元方法和实验研究了金属板中空气耦合超声兰姆波的激发、传播和接收问题。采用全局矩阵数值方法和实验研究了复合材料板中空气耦合兰姆波的激发与传播特性,研究结果表明,A0模式兰姆波最容易被激发和接收,接收信号具有最高的信噪比^[7-9]。检测方式上采用双探头(一发一收)同侧放置。根据两探头的倾斜角度不同,布设方式分为透射回波法和散射反射回波法。很好的实现了空气耦合兰姆波对预制分层缺陷的复合材料扫描检测。而复合材料层状各项异性结构中的兰姆波频散曲线理论计算相比各向同性材料复杂

许多,张海燕等^[10]对传递矩阵方法进行改进,所得 到的全局矩阵方法具有较好的稳定性,能有效地计算 兰姆波的频散曲线。利用理论计算的频散曲线更好 的指导兰姆波模态的选择和激发方式。柯微娜^[11] 对空气耦合超声检测复合材料缺陷进行三维的数值 模拟与实际实验结果比较,激发的 A0 模态兰姆波在 理论和实验中都能够很好地检测出复合材料中的缺 陷。在此基础上,兰姆波成像检测可以得到反映复合 材料损伤的直观显示,对层板结构大面积快速检测有 着很好地工程运用优势。本文利用空气耦合超声兰 姆波对复合材料的扫描方法、成像特征值以及信息融 合进行了研究,实现了一种可行的成像检测方法。

1 复合材料层板兰姆波

兰姆波技术适合于板材的大面积快速检测。而 不同于各向异性材料,复合材料中传播的兰姆波更为 复杂。实现兰姆波的检测,首要分析复合材料中兰姆 波的传播特性,得到适合的模态和激发频率。本文中 研究对象为碳纤维增强树脂基层压板(CFRP)。板 厚4.1 mm,为单向层压板,共36 层,铺层方式为 [(45/-45)₁₈]s,碳纤维复合材料板试样的工程参数 见表1。

为理解复合材料各项异性的层状结构的兰姆波频散特性,利用基于全局矩阵算法的 Disperse 软件计算得到研究对象层压板 0°方向的兰姆波的频散曲线,见图1。

通常板中产生兰姆波信号会选择较低的激励频 率,低于某些模态的截止频率,从而简化板中的声场 情况,实验对象频散曲线显示当频率小于 0.7 MHz 时只有 A0 和 S0 两种模态,且低频率的兰姆波频散 严重且灵敏度不高,因此选用中心频率为 0.4 MHz 的空气耦合超声换能器作为兰姆波激励源。为指导 兰姆波激励方式分析了频率为 0.4 MHz 时 A0 和 S0 模式的波结构在板中的分布,图 2 中虚线离面位移分 量 U_x,实线为面内位移分量 U_z。

表1 碳纤维复合材料板试样的工程参数

Tab. 1	Engineering	parameters	of	CFRP	plate	sample
--------	-------------	------------	----	------	-------	--------

ρ /kg·m ⁻³	<i>E</i> ₁₁ ∕GPa	<i>Е</i> ₂₂ ∕GРа	<i>Е</i> ₃₃ /GPa	G ₁₂ ∕GPa	<i>G</i> ₁₃ ∕GPa	<i>G</i> ₂₃ ∕GРа	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
1600	172	11.6	11.6	7.8	7.8	3.9	0.36	_	0.55



图 1 4.1 mm 碳纤维树脂基层压板频散曲线

Fig. 1 Disperse curve of 4.1 mm CFRP laminate



(b) A0 模态



Fig 2 Displacement along thickness in 0.4MHz Frequency 4.1mm CFRP plate

可见,在相同的能量密度时,A0模态具有较大的 离面位移分量,具有更为明显垂直于板面的震动位 移,因此采用 A0模态兰姆波能够使得空气换能器更 好地获得声波信号。空气耦合超声传感器以空气作 为耦合介质,采用斜入射法激励相应的 A0 模态兰姆 宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2017 年 第5期 波,需要满足 snell 定律 sinα = c_l/c_p,以此计算相应激 励角度。声波在空气中的传播速度为 340 m/s,0.4 MHz 频率下 A0 模态相速度为 1 559.2 m/s,计算得 到空气耦合超声换能器沿层合板法线倾斜 12.6°以 激发 A0 模态兰姆波信号。

兰姆波在传播过程中,会不断向空气中泄漏,即 泄漏兰姆波。兰姆波的传播方向是平行于板平面的, 因此由 snell 定理可知兰姆波从板中传播到空气中的 出射角与空气传播到板中的入射角相等。为了激发 和接收 A0 模态的兰姆波,将空气换能器一发一收的 方式进行检测。实验装置如图 3 所示,固定两个换能 器,一个发射声波信号激发板中的兰姆波,一个接收 泄漏兰姆波信号,相对待检测复合材料板倾斜相同的 角度相对摆放,在两探头之间的板中区域传播兰姆 波。

2 冲击损伤兰姆波检测

制作冲击损伤试件选用 4.1 mm 单向碳纤维树 脂基层压板,采用压缩空气气枪预制冲击损伤,可准 确控制冲头冲击能量,预制试验中冲头尺寸为 *q*16 mm,冲击能量为 15 J。以冲击点位置为中心,在待检 试件放置两个空气换能器采用一发一收的方式在复 合板同侧按照同一角度相对摆放,依据理论计算入射 角 12.6°,并进行一定微调激励和接受 A0 模态兰姆 波,使用空气耦合超声换能器的标称频率为 0.4 MHz、晶片尺寸为 14 mm×14 mm,高功率超声发射接 收器 JPR-600C 发射信号电压为 180(峰峰值)、11 个 周期的矩形脉冲激励。一发一收方式兰姆波扫查复 合材料冲击损伤区域如图 3 所示。

图 3 可可以看出,斜入射发激励产生的兰姆波在 板中的传播路径视作一条扫查线,两探头同时以扫查 线的垂直方向移动,扫查区域覆盖整个板面,采集多 组兰姆波信号进行分析。





图 3 一发一收方式兰姆波扫查复合材料冲击损伤区域





Fig. 4 Signal of lamb wave in different point

当扫查范围覆盖冲击损伤时,由于复合材料受冲 击部位存在的不连续性,兰姆波的原本传播规律会受 到一定的影响,进而会在接收信号中有一定的体现, 图 4 中,离扫查起点 30 和 60 mm 两处的信号幅值差 异较大,体现了均匀材料冲击试验后形成的不均匀 性,30 mm 处为冲击损伤区域中心,幅值有着明显的 衰减。

为得到复合材料板实验对象的缺陷图像重建,两 探头距离 60 mm,从复合板冲击试件的 0°和 90°铺层 方向,以 1 mm 为步进采集 60 组信号,得到 60 mm× 60 mm 范围内的兰姆波扫描信号采样。图 5 中两条 曲线分别是 0°和 90°铺层方向上的多组扫查信号的 幅值对比,可以看出在中心有冲击损伤的区域,幅值 在冲击损伤边缘区域两侧幅值锐减,达到扫查范围信 号幅值的极小值,在两个极小值之间,都有不太明显 中央极大值,在远离缺陷区域的地方,幅值基本保持 一致。





冲击损伤区域,兰姆波信号衰减严重,复合板的 冲击损伤缺陷形状不规则,多为分层和裂纹,相当于 有多个散射面,散射声场分布无规律,因此兰姆波在 原路径传播有衰减。利用信号特征改变的规律可以 判断整个扫描区域是否有不连续或不均匀现象。另 外,冲击损伤的兰姆波信号在边缘区域的泄漏兰姆波 衰减比冲击损伤中心区域更严重,在扫描范围内,根 据两个极小值点,可以判断一个方向维度上的尺寸大 小。

3 兰姆波扫描成像

利用一发一收模式下空气耦合兰姆波对碳纤维 复合板的冲击损伤扫描检测结果可以明显的体现沿 扫描方向的缺陷位置和长度。图6为基于幅值为特 征的D扫描成像,更直观的体现和重建冲击损伤对 材料造成的不连续图中扫描位置从0~60 mm,从20 ~40 mm 处幅值明显降低,是试样中冲击损伤区域。



图 6 冲击损伤 D 扫幅值成像



对于在利用超声兰姆波碳纤维复合材料层压板 结构中冲击损伤成像,本文使用表征信号差异方法提 取其缺陷波信号的特征值,用以作为扫查成像的依 据。根据每一对接收-发射端(*i*,*j*)的得到的导波信 号频域上的相对变化差值的均方根得到一个特征量, 作为信号差异系数(SDC)^[12]

$$SDC_{ij} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} \left[F^{d}(f) - F^{b}(f) \right]^2 df} / \int_{f_1}^{f_2} F^{b}(f)^2 df$$

式中, F^b 在无缺陷处传播的兰姆波的频域信号, F^d 为在冲击损伤处传播的兰姆波的频域信号。f 为频 率, f₁ 为截断频率的最低值, f₂ 为截断频率的最高值。 图 7 为两组兰姆波检测信号的频谱图,实线为无缺陷 区域的接收信号,虚线为经过冲击损伤区域接收的信 号,在频域中对比归一化幅值有明显的差异,是一种 评价波形间差异的方法,若在频域成分复杂的情况下 可以综合考虑信号差异。



图 7 A0 模态兰姆波基准信号和缺陷信号的频域分析 Fig. 7 Frequency spectra of signals in normal area and damage area for A0 mode

图 8 对比了两个方向的扫描采用信号的 SDC 值,明显看出 SDC 值的差异表征出材料存在的不连 续性,突显差异的位置信息更符合成像检测的缺陷可 视化习惯,因此根据此差值运用 SDC 计算可以作为 兰姆波扫查冲击损伤缺陷判断的特征值。首先对应 检测区域范围区间相应的像素点群 *p*(*x*,*y*)。SDC 值 为成像特征值,将在 0°和 90°两个相互垂直方向扫的 扫描信号的 SDC 值进行特征值全加和特征值全乘的 信息融合处理,得到二维空间的信息。

$$p = p_1(x, y) + p_2(x, y)$$

 $p = p_1(x, y) \times p_2(x, y)$
宇航材料工艺 http://www.yhelgy.com 2017 年 第5期

根据特征值全乘和全加的图像融合成像方法得 到 60 mm×60 mm 扫描范围内的成像结果,在图 9 和 图 10 中可以看到图像中心有幅值明显不同的区域, 即为冲击损伤区域,根据相应的区域可以得到正交的 两个方向上缺陷存在的范围。对比全加和全乘法,可 以看出,全乘相比成像质量要好,缺陷的分辨率更高, 对定位缺陷的位置和判断缺陷的大小准确度更高。



图 9 特征值全加融合成像结果



图 11 为冲击损伤区域的空气耦合穿透式 C 扫成 像结果,对比兰姆波成像结果的缺陷区域,横向和纵 向的尺寸分别为 21 和 16 mm,与 C 扫描的大小结果 基本一致,空气耦合兰姆波检测对碳纤维层板的冲击 损伤的成像精度比 C 扫检测结果精度略低,而兰姆 波方法在两个方位进行扫查可以节省大量的扫查时 间对缺陷位置快速定位。





Fig. 10 Full multiplication algorithm SDC fusion image results





4 结论

(1)空气耦合兰姆波方法可以在多层结构的复合材料板材激发 A0 模态兰姆波,并接收泄漏兰姆波信号;

(2)兰姆波经过冲击损伤区域幅值会大幅衰减, 中央区域有峰值的出现,但是均不明显。以缺陷的中央位置为中心,两边的衰减现象有着一定的对称性。

(3)利用信号差异系数(SDC)作为指示缺陷存 在概率的特征值能够准确的在数值上体现,可以作为 冲击缺陷成像检测的参考;

(4)特征值全加和全乘的数据融合方法能够将 多条兰姆波传播路径上的信号特征体现,并得到缺陷 位置和两个方向上的尺寸重建,结果表明全乘法的成 像精度和效果更优良。

参考文献

[1] 何为,关志东,王进.带表面防护层复合材料的低速 冲击及冲击后压缩性能试验研究[J].复合材料学报,2014,31 (2):487-494.

[2] 刘松平,刘菲菲,史俊伟,等.复合材料冲击损伤高分 辨率超声成像检测与损伤行为分析[J].机械工程学报,2013, 49(22):16-23.

[3]周睿,关志东,贾云超.分层缺陷对复合材料层板压 缩性能的影响[J].北京航空航天大学学报,2015,41(2):311 -317.

[4] 刘菲菲,刘松平,郭恩明. 复合材料层压结构冲击损 伤超声成像评估[J]. 无损检测,2014(11):2-5,41.

[5] 刘松平,傅天航,刘菲菲,等. 复合材料冲击损伤超 声回波特性及其成像检测[J]. 航空制造技术,2011(15):82-85.

[6] 危荃,金翠娥,周建平,等. 空气耦合超声技术在航 空航天复合材料无损检测中的应用[J]. 无损检测,2016(8): 6-11.

[7] CASTAINGS M, CAWLEY P. The generation, propagation, and detection of Lamb waves in plates using air-coupled ultrasonic transducers [J]. The Journal of Acoustic of Society of American, 1996,100(5): 3070-3077.

[8] RAMADAS C, PADIYAR J, BALASUBRAMANIAM K.Lamb wave based ultrasonic imaging of interface delamination[J]. NDT&E International, 2011, 44(5):523-530.

[9] CASTAINGS M, HOSTEN B. Lamb and SH waves generated and detected by air-coupled ultrasonic transducers in composite material plates[J]. NDT&E International,2001,34:249 ~ 258.

[10] 张海燕,刘镇清,吕东辉. 全局矩阵法及其在层状 各向异性复合板中 Lamb 波传播特性研究中的应用[J]. 复合 材料学报,2004,21(2):111-116.

[11] 柯微娜. 空气声换能器无损检测复合板材缺陷的实验和三维数值模拟[D]. 同济大学,2009.

[12] SONG F, HUANG G L. Online guided wave-based debonding detection in honeycomb sandwich structures[J]. AIAA JOURNAL,2012,50:2.