

CFRP 夹层结构超声特征成像检测

陆铭慧 冯君伟 刘勋丰 陈巍

(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 采用便携式超声特征成像检测系统全波列采集检测信号,通过对缺陷特征信号的提取和重构,实现自动识别,可适用于曲面等不规则面的检测,定量精度达到 0.1 mm。实验结果表明低频窄带超声换能器能够减小铜网对声波的衰减和畸变,超声特征成像层析成像方法可以对表面铜网结构 CFRP 泡沫夹层中分层、冲击和脱粘缺陷进行识别并精确定位和定量。检测方法快捷准确、重复性好、可靠性高。

关键词 超声特征成像,表面铜网结构 CFRP 泡沫夹层,分层,冲击,脱粘

中图分类号:TB553

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2017.03.018

Ultrasonic Feature Imaging Testing of CFRP Sandwich Structure

LU Minghui FENG Junwei LIU Xunfeng CHEN Wei

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

Abstract Using the portable ultrasonic feature imaging testing system of full wave acquisition of test signal, can be realize through the extraction and reconstruction of defect feature signal, automatic identification of defects, which can be applied to the surface and irregular surface detection with quantitative accuracy of 0.1 mm. The experimental results show that the low-frequency narrowband ultrasonic transducer can reduce the copper net on the acoustic attenuation and distortion, ultrasonic feature imaging tomography method can identify layered surface copper net structure of CFRP foam sandwich defects effectively, accurate recognize the location of impact of defects and debonding defects and quantification. The detection method is fast, accurate, reproducible and reliable

Key words Ultrasonic feature imaging, Surface copper mesh CFRP foam sandwich, Delamination defect, Impact damage, Debonding defect

0 引言

CFRP 泡沫夹层具有比强度和比刚度高、表面平整、稳定性好、隔音与隔热性及耐腐蚀性好等优势^[1],由于 CFRP 导电性能比金属差,当飞机遭到雷击时,难以将高能量的电流传出去,从而导致大能量的聚集^[2],破坏材料结构进而影响飞机的安全性能,因此必须对飞机复合材料部件进行有效的雷击防护^[2]。表面铜网结构 CFRP 泡沫夹层是一种新型防雷击材料,它将表面胶膜和导电金属网结合为一体^[2],使用中将其铺设在有防雷击要求的 CFRP 外表面,通过导电金属网将雷击电流传递到机体放电部位即可达到良好雷击防护效果^[3]。制造、安装、维修和使用的过程中,不可避免地会受到外物的冲击^[4]。

这些低速冲击会对泡沫夹层结构的面板、夹芯及粘结层造成各种形式的损伤^[1]。

在役检测的目的不仅仅是及时发现和确认危险装置安全运行的隐患并予以消除,更重要的是根据所发现的早期缺陷及其发展程度^[5](如疲劳裂纹的萌生与发展),在确定其方位、尺寸、形状、取向和性质的基础上,还要对装置或构件能否继续使用及其安全运行寿命进行评价^[6]。

超声特征扫描成像检测(F-Scan)是一种通过提取超声信号特征进行成像的方法,即使用工控机将材料的超声信号进行全波列采集,然后提取储存在采集卡中的检测信号,经过数字滤波和处理后按不同的特征信号进行成像显示,由于被检测工件内部的不连

收稿日期:2016-11-11;修回日期:2017-04-14

第一作者简介:陆铭慧,1963 年出生,博士后,教授,主要从事超声检测研究及教学。E-mail:lunara@163.com

通信作者:冯君伟,1991 年出生,硕士,主要从事超声检测研究。E-mail:376692682@qq.com

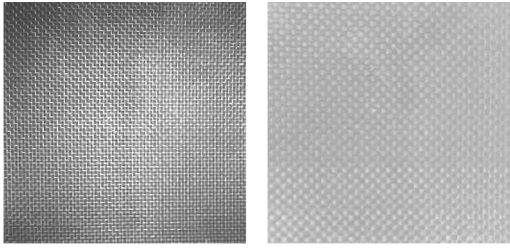
续,如缺陷或损伤的差异,声波在传播时会产生变形。F-Scan 通过对比较有缺陷和无缺陷处波形的差异,运用缺陷波或者底波进行层析成像实现缺陷的自动识别,提高缺陷的定量精度。F-Scan 中所说的特征包括超声波波形^[7]和缺陷的特征^[8]。

1 超声特征成像缺陷检测

1.1 带有人工缺陷的 CFRP 试样的制备

CFRP 泡沫夹层结构中碳纤维含量为 70%,铺层方式为 90°/单面铜网(网格直径 0.3 mm,面积 1 mm²),铺 10 层,泡沫为聚氨酯。

(1)分层缺陷:按缺陷的位置进行设计,将正方形金属片放入 CFRP 板中第 9 和第 10 层之间,之后,加热加压,放置 24 h,制成带分层缺陷的试样。同时设计无铜网的 CFRP 板,缺陷放置位置相同(图 1)。



(a) 有铜网 (b) 无铜网
图 1 分层缺陷试样

Fig.1 Delamination defect sample

(2)冲击缺陷:10 层碳纤维,表面铺有铜网,设计制作 100 mm×100 mm 低速冲击试验件。所造成的凹坑深度随着冲击能量的增加而增加。实验使用的冲击能量为 3.61 J,冲击点为试样正中心(图 2)。

(3)脱粘缺陷:在表面铜网 CFRP 板的基材和泡沫之间放置双层聚四氟乙烯薄膜,添加粘接剂,加热

加压,放置 24 h,制成脱粘缺陷试样(图 3)。

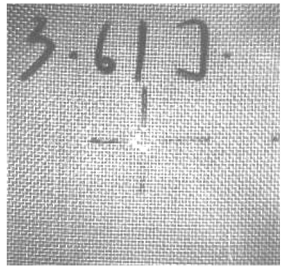


图 2 铜网结构冲击缺陷试样

Fig.2 Copper mesh impact defect sample

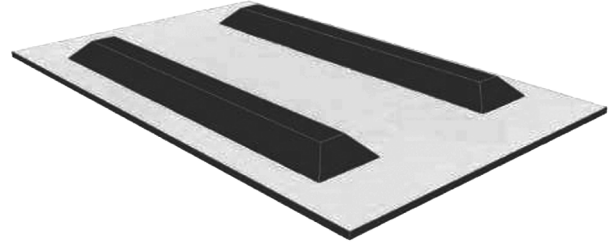


图 3 CFRP 泡沫夹层脱粘缺陷试样

Fig.3 CFRP Foam sandwich debonding defect sample

1.2 便携式超声特征成像检测系统

便携式超声特征扫描成像检测系统,如图 4 所示,上位机通过 PLC 发出脉冲信号和方向信号给步进电机,控制步进电机运动和方向。步进电机带动机械装置运动,机械装置通过丝杠传动给光栅尺,光栅尺编码信号反馈给同步电路,通过同步电路处理之后触发超声脉冲发射接收仪接收超声信号,保证采集卡采集超声信号与机械传动光栅编码同步。超声检测信号储存在采集卡中,由超声特征成像检测系统软件提取并处理成像。

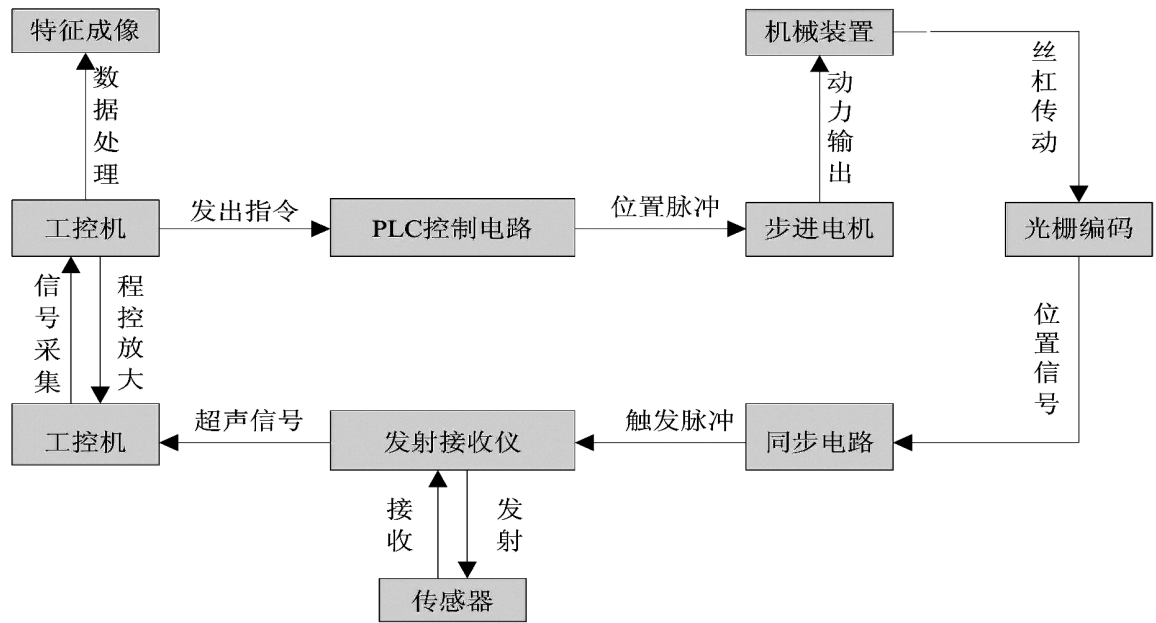


图 4 便携式超声特征扫描成像检测系统框图

Fig.4 Portable feature-scan acoustic imaging system

2 缺陷识别工艺

超声波在铜网介质中传播,波形存在散射衰减,不仅降低了缺陷波和底面反射波的幅值,而且产生了很多种各不相同的波形,即林状回波。而实际的缺陷反射波也可能被其覆盖。不管是提高探伤仪的发射电压,还是增加增益,“林状回波”也同时增强。为了增加材料的强度和稳定性,在材料的内部,局部部位增加加强筋,超声波在其部位传播时,层状回波和结构回波变得复杂多样。现场检测的材料较薄、外形不平整呈弧形,冲击损伤和脱粘缺陷受表面结构的影响,不一定有明显的回波,缺陷的位置可能出现在表面及其近表面,因此,现场检测难度大,声波影响因素多,波形不光有损耗,还有畸变、展开、叠加和干涉。

不同频率的换能器对材料进行测试,如图 5 所

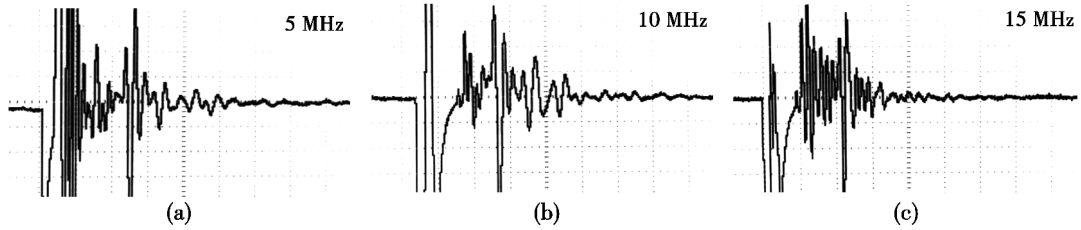
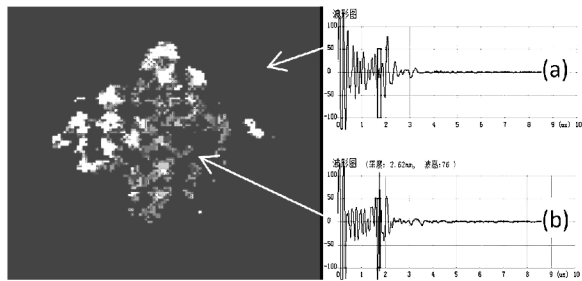


图 5 不同探头、同一位置材料中的波形图

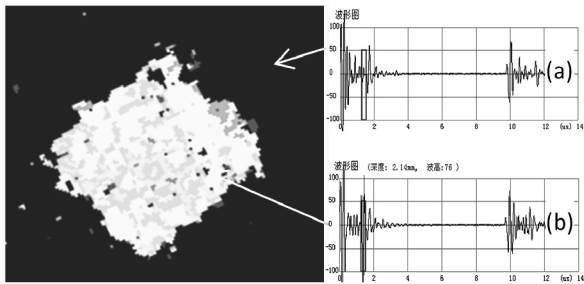
Fig.5 Different probes, the same location in the material waveform

3 结果与讨论

对分层缺陷试样进行超声特征扫描成像检测,如图 6 所示。



(a) 有铜网



(b) 无铜网

图 6 分层缺陷特征成像

Fig.6 Delamination defect map

通过调节闸门的高度和闸门的范围,选择合适的位置。使用缺陷波进行成像,图中无缺陷的位置幅值低,呈现为黑色,有缺陷的位置幅值高,自动用颜色标

示。高频换能器散射强、低频换能器灵敏度低,由图可知超声换能器在使用频率 15 MHz 时,超声信号衰减快,波形散射严重,界面波和底波之间林状回波较多,缺陷波无法识别;超声换能器在使用频率 10 MHz 时,林状回波相对较少,但波形已经发生畸变,起跳点上移,缺陷定量精度下降;超声换能器在使用频率 5 MHz 时,传播能力强,声波的绕射强,铜网对声波的干扰降低,林状回波少,因此,选择 5 MHz 的换能器效果最佳。声束变钝和脉冲宽度增加,限制了检测灵敏度的提高,因此使用定制低频窄带探头。为了防止表面及其近表面的缺陷漏检,可在探头前端加入一定厚度的楔块,保证界面波相对较窄,同时使用层析成像方法,有效的避免结构回波的干扰。

注出来,从而获得清晰的图像。上图为有铜网结构分层缺陷试样,从图中可知,超声波经过铜网时,波形发生散射衰减,一部分声波无法被接收,因此缺陷成像中有局部缺失,从波形图中可知(a)波形图为无缺陷处的波形,底波明显,幅值较高,(b)波形图为缺陷处的波形,缺陷波较高,声波大部分在到达底面之前进行反射接收,因此底波降低明显,幅值较低;下图为无铜网结构分层缺陷试样,从图中可知,缺陷图像信息完整,声波衰减小,幅值较高。通过超声层析能自动判断缺陷的大小以及缺陷的深度。

对冲击损伤试样进行超声特征扫描成像检测,如图 7 所示。

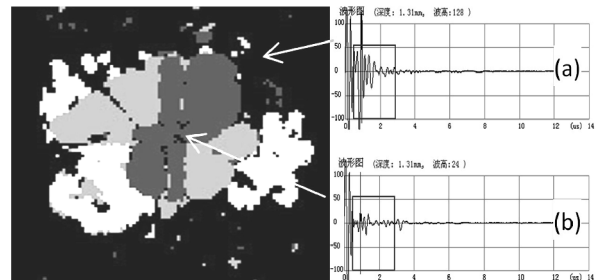


图 7 冲击损伤特征成像

Fig.7 Impact damage map

通过调节闸门的高度和闸门的范围,选择合适的位置。使用深度信息进行成像,从图中可知,冲击部位纤维断裂,声波传播过程中散射强,同时由于声波

方向发生改变,反射波无法被接收,因此底波幅值降低严重,无冲击部位,底波清晰,幅值较高,通过超声层析,获得清晰的特征扫描图像,从图中可知,冲击缺陷深度方向上每一层开裂的大小和方向,冲击缺陷的整体形貌特征和最大的冲击损伤面积。

黏接剂选择不当或固化不完全此种材料容易出现泡沫与基体材料的脱粘缺陷,进行检测时发现无聚四氟乙烯薄膜处泡沫与碳纤维板之间的界面波很低,

大部分甚至消失。证明母材与泡沫之间粘接性能良好。放置聚四氟乙烯薄膜处,波形明显,证明母材与泡沫之间存在脱粘缺陷,泡沫本身属于吸波材料,如果不存在缺陷无界面回波,出现缺陷存在界面回波,因此可以很容易地判断。对脱粘缺陷试样进行超声特征扫描成像检测,如图 8 所示,母材和泡沫之间的声阻抗差异较大,同时泡沫属于吸波材料。

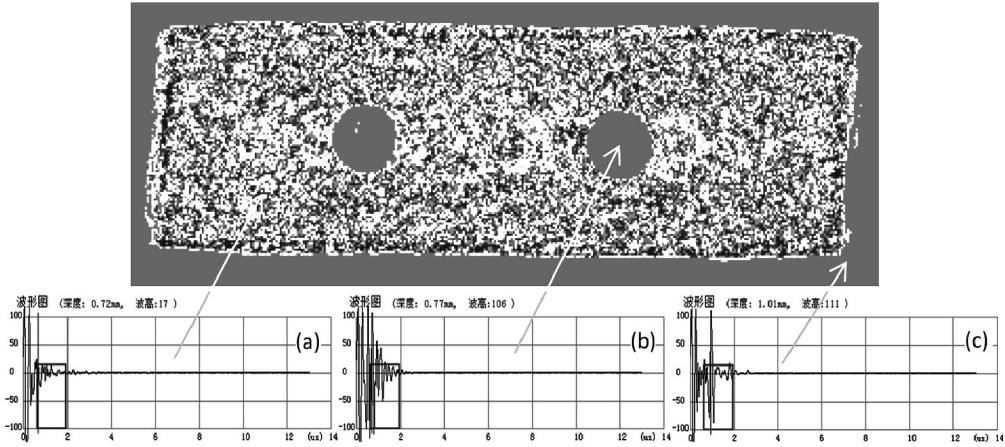


图 8 脱粘缺陷特征成像

Fig.8 Debonding defect map

超声波到达泡沫之后,只有很少的一部分反射回来被探头接收,大部分都被泡沫吸收无法反射回来,因此界面波会较低。通过调节闸门的高度和闸门的范围,选择合适的位置。使用界面波进行成像,由(a)波形图可知,泡沫区域,声波衰减较大,无界面波出现,(c)波形图可知,母材区域,底波明显,幅值较高,(b)波形图可知,脱粘区域,界面波明显,幅值较高。通过超声层析,获得清晰的特征扫描图像,从图中可知,圆形区域为脱粘缺陷,密密麻麻的黑白区域为泡沫,外围纯色为母材区域。脱粘缺陷大小和深度可自动识别。

4 结论

(1) 超声特征成像层析成像方法可以有效的对表面铜网结构 CFRP 泡沫夹层中分层缺陷、冲击缺陷和脱粘缺陷进行识别并精确定位和定量。

(2) 设计并制作的低频窄带超声换能器传播能力强,声波的绕射强,铜网对声波的干扰降低,林状回波少,减小铜网对声波的衰减和畸变。

(3) 便携式成像系统可适用于曲面等不规则面

的检测,定量精度达到 0.1 mm。

(4) 检测方法快捷准确,检测结果重复性好、可靠性高。

参考文献

- [1] 王杰.复合材料泡沫夹层结构低速冲击与冲击后压缩性能研究[D].上海交通大学,2013.
- [2] 龚佑宏,韩舒,杨霓虹,等.表面铜网结构 CFRP 铣削加工性能研究[J].航空制造技术,2015(19):40-42.
- [3] 朱健健,李梦.航空复合材料结构雷击损伤与雷击防护的研究进展[J].材料导报,2015,29(17):37-42.
- [4] 徐颖.复合材料层合板冲击损伤及冲击后疲劳寿命研究[D].南京航空航天大学,2007.
- [5] 王蕾.在用压力容器无损检测技术的原理和应用[J].化学工程与装备,2011(7):170-171.
- [6] 吴伟.基于 PLC 和触摸屏的磁粉探伤控制器研制[D].南昌航空大学,2007.
- [7] 刘勋丰,朱毅.特殊结构的超声特征成像检测[C]//全球华人无损检测高峰论坛.2011.
- [8] 邓延.先进复合材料超声 C 扫描检测技术研究[D].西北工业大学,2006.