

复合材料夹芯结构的数字化敲击检测技术研究

詹绍正, 宁 宁, 杨鹏飞, 王 丹

(中国飞机强度研究所全尺寸飞机结构静力/疲劳航空科技重点实验室, 西安 710065)

[摘要] 从复合材料夹芯结构的无损检测需求出发, 简述了基于敲击力时间判据的数字化敲击检测技术原理, 介绍了便携式数字化敲击检测成像系统的设计过程, 针对不同结构类型和不同损伤尺寸的夹芯结构试件开展了敲击检测试验验证, 并对检测结果进行了讨论和分析。试验证明数字化敲击检测技术能够有效检测蜂窝夹芯结构和泡沫夹芯结构中的分层和脱粘缺陷。

关键词: 复合材料; 夹芯结构; 分层; 脱粘; 敲击检测; 成像

Composite Sandwich Structure Digital Tap Test Technology Research

ZHAN Shaozheng, NING Ning, YANG Pengfei, WANG Dan

(Aeronautics Science and Technology Key Laboratory of Full Scale Aircraft Structure and Fatigue,
Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

[ABSTRACT] In this article, with the demand of composite sandwich NDT, the tap force time criterion theory of digital tap test was introduced. The portable tap test imaging system was designed. To different type and damage dimension sandwich structure, the tap test validate experiment was studied, and the NDT experiment results were discussed and analyzed. The experiment proves that the digital tap test technique can effectively detect the delamination and debonding defects of honeycomb and foam sandwich structures.

Keywords: Composite; Sandwich structure; Delamination; Debonding; Tap test; Imagination

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.090

复合材料夹芯结构具有比强度高、比模量高、质量轻、抗弯和耐疲劳、电磁波透射性强、隔音隔热性能好等优点, 在航空航天、交通运输、建筑、船舶等行业有着广泛的用途^[1]。复合材料夹芯结构通常是由比较薄的上、下蒙皮和中间比较厚的芯子固化胶接而成, 上蒙皮和下蒙皮一般是树脂基碳纤维增强复合材料、树脂基玻璃纤维增强复合材料、树脂基芳纶纤维增强复合材料构成的面板, 常见的夹芯材料包括蜂窝芯、泡沫芯等。所以, 目前常用的夹芯结构主要有蜂窝夹芯结构和泡沫夹芯结构两种^[2]。

蒙皮分层、蒙皮与芯子脱粘、冲击损伤是复合材料夹芯结构中最常见、对结构危害性较大的3种损伤形式, 也是无损检测重点关注的对象。目前, 复合材料夹芯结构主要应用于有人飞机结构的罩体(天线罩、整流罩)、舵面(方向舵、升降舵)、副翼等次承力结构部位以及无人飞机的机身等主结构上。这些结构的共同特点是尺寸较大、形状复杂, 这给无损检测工作带来较大的挑战。尤其是针对运营飞机维护中的外场原位检测,

如何在较短的时间内完成对结构全面、准确的检测评价, 成为摆在无损检测人员面前的一个重要技术问题。

敲击检测技术是应对薄壁结构和浅层损伤检测最快捷和有效的无损检测技术之一, 在航空、航天和风电等领域, 敲击检测技术被广泛用于复合材料结构损伤的检测与识别^[3-9]。传统的敲击法是通过硬币或者专用工具敲击结构体表面, 操作人员通过“回声”的变化来判断结构体是否异常。其主要原理是当物件中存在较大缺陷时, 人耳所听到的由敲击产生的声音会比较沉闷, 否则声音清脆^[10-13]。这种敲击检测方法通过声音以及敲击手感获得信息, 检测人员凭借积累的经验对信息进行分析, 从而得到判定结果。其优点是方便、快捷、易于实现且成本低廉。缺点是严重依赖于操作人员的经验和主观判断, 环境噪声会影响对敲击声音信号的识别, 易造成误判和漏判。而且检测结果不利于保存, 复检或多次敲击时, 检测结果的一致性较差, 已无法满足现代信息化和工程管理的需要。

1 数字化敲击检测原理

数字化敲击检测是在传统敲击法的基础上发展起来的一项检测技术,也是基于振动基础理论,它的基本原理可以用图 1 所示的简化弹簧质量模型来表达^[14]。

基于振动基本理论,对于一个单自由度的振动系统,若忽略振动过程中遇到的阻力,其固有振动频率与系统的刚度系数和质量有关,且满足式(1)的规律^[14-15]:

$$f_n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

式中, f_n 为固有频率, k 为刚度系数, m 为质量。

当敲击锤敲击结构时,英国帝国理工的 Cawley 教授首先提出了简化的弹簧模型,即当被检测对象中存在缺陷时,它相当于在完好的结构中串联了一个因缺陷所引起的弹簧^[15],如图 2 所示,图中 k_d 是缺陷对应的弹性系数; k_c 是敲击时锤头与结构的接触系数。

假设锤头的质量为 m , 撞击时的速度为 v , 弹性系数为 k , 对于一个完整的周期,其振动时间 T 为:

$$T = \frac{1}{f_n} = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2)$$

由此可见,对于局部敲击检测,当敲击锤质量一定时,其敲击力的持续时间仅与被敲击区的局部刚度有关,且两者间近似满足式(3)规律。通过传感器测量敲击锤头从接触结构到脱离结构的敲击力持续时间,即可对被测区是否存在缺陷进行正确的评判,敲击检测示意图如

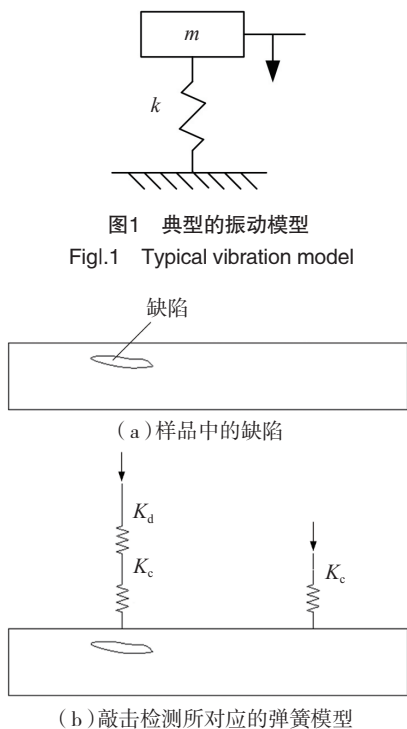


图2 局部敲击的简化模型
Fig.2 Simplified spring model of local tap test

图 3 所示;当被检测结构中存在缺陷时,其对应区的刚度系数降低,使得敲击力持续时间较正常结构明显增长。

$$t = \frac{\pi}{\omega} = \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3)$$

因此,在实际敲击检测时,通过事先在被测结构对比试块的完好区进行敲击采集基准信号波形,后续检测中将被测结构每一敲击点的敲击信号波形与基准信号波形进行比对分析,即可判断出所在敲击区是否存在缺陷。

2 检测系统设计

基于上述的敲击检测原理,结合传统手动敲击检测技术的便捷性和高效率优势,设计开发了一套数字化敲击检测成像系统。该系统主要由手动敲击锤、数据采集模块和计算机软件系统 3 部分组成,见图 4。

敲击锤既作为激励源对被测对象进行敲击激励,同时又作为信号采集器实现对敲击反作用力的信号采集,是数字化敲击检测系统中的重要组成部分。图 5 所示为数字化敲击锤的结构设计图和手工敲击检测示意图。整个锤体采用轻质铝合金加工,组装后全部质量约为 25g(含传感器),手工敲击检测时速度较低(约 0.2m/s)。因此,敲击检测时对结构件带来的冲击能量较低,不足以对结构造成冲击伤害,可以保证检测时的安全。

信号采集模块采用集成化的数据采集卡,其包括放大电路、AD 转换电路、输出缓存电路等模块单元,采集

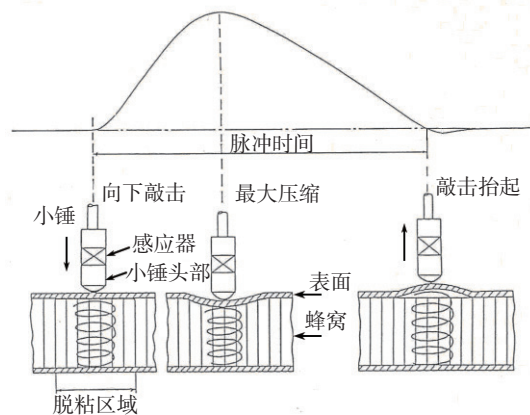


图3 局部敲击检测的力持续时间截取示意图
Fig.3 Schematic diagram of the local tap test force duration

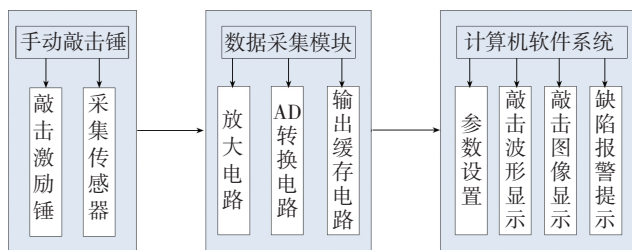


图4 数字化敲击检测系统框图
Fig.4 Block diagram of the digital tap test system

卡设计成 PCI 板卡形式,内嵌在便携式工控机的 PCI 插槽内实现与主机间的通信。

计算机软件系统主要包含人机交互单元模块、敲击力波形显示模块、敲击区域检测图像显示单元模块、报警单元模块及数据处理存储单元模块等几部分;其中人机交互单元模块用来实现检测参数设置,敲击力波形显示模块用来显示敲击过程中每一敲击点的敲击力波形图,实现类似超声波检测中的 A 扫描信息显示,帮助检测者根据敲击力波形判断当前敲击区的质量状态;敲击区域检测图像显示模块用来显示整个敲击区域的完整敲击图像,实现类似超声波检测中的 C 扫描显示,该图像中包含了敲击的位置信息和整个敲击区的质量状态信息,通过敲击区的检测图像检测者可以直观地看出敲击区中存在的缺陷轮廓和大小尺寸。报警单元模块实现敲击过程中对每一敲击点质量的警示显示,数据处理和存储模块主要实现检测波形和图像文件的存储及调用载入。图 6 所示为手动敲击检测示例及检测系统软件界面。

图 6 所示的敲击 C 扫描图像信息中包含了检测区的每一敲击点的位置信息和质量状态信息,其中质量状态信息通过实际敲击检测信号与基准信号比对分析获得;位置信息的获取采取网格划分和点-点对应方式获得,即事先按照所需检测间距对被检测区进行网格划分,并在软件系统中生成同样大小和数量的成像区域网格,实际敲击检测时,按照预定敲击路径进行敲击实施和约定数据采集,保证被测结构检测区网格与系统软件成像区网格的一一对应关系,从而实现位置信息的获取。

3 测试与试验验证

采用构建的敲击检测系统对含有脱粘缺陷的试验件进行敲击检测测试,图 7 分别给出了完好区和脱粘缺陷区在不同敲击力度下获得的敲击力波形。图 7 中显示,脱粘缺陷区比完好区的敲击力持续时间长,而且随

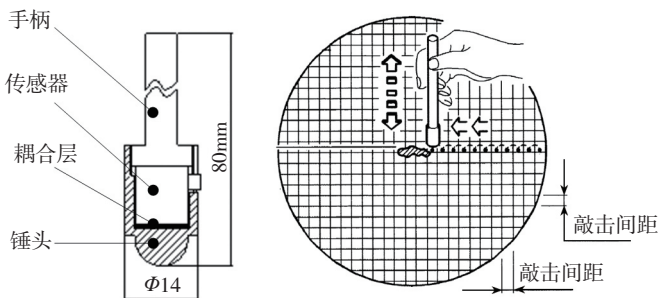


图5 数字敲击锤及手动敲击检测示意图

Fig.5 Schematic diagram of the digital tap hammer and the manual tap test

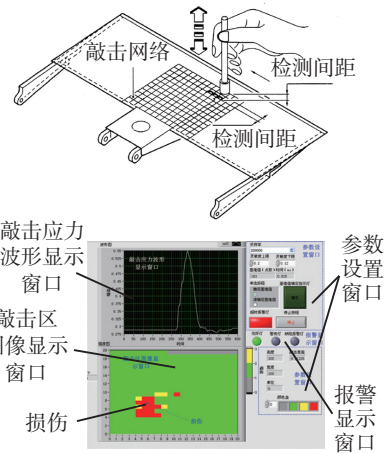
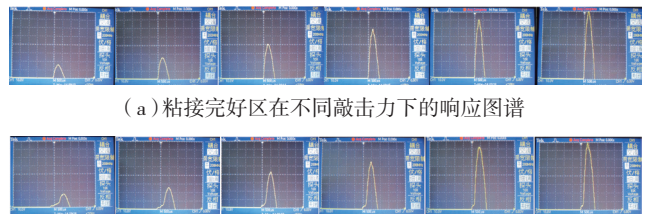
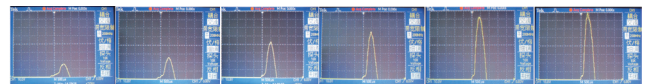


图6 手动敲击检测示例及检测系统软件界面

Fig.6 Manual tap test and system software interface



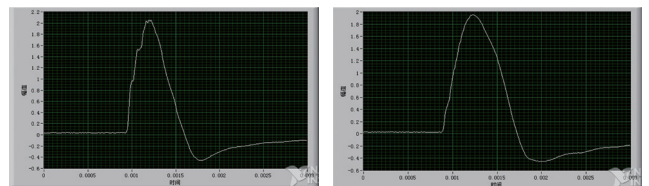
(a) 粘接完好区在不同敲击力下的响应图谱



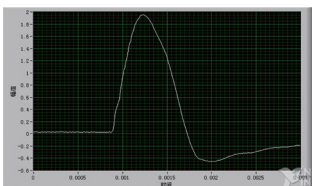
(b) 脱粘区在不同敲击力下的响应图谱

图7 敲击响应随敲击力的变化图谱

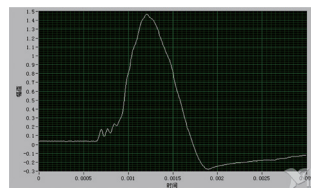
Fig.7 Tap force respond atlas of different tap force



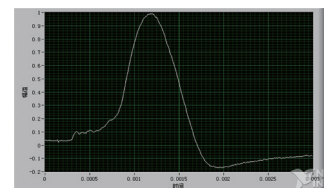
(a) 完好区敲击波形图



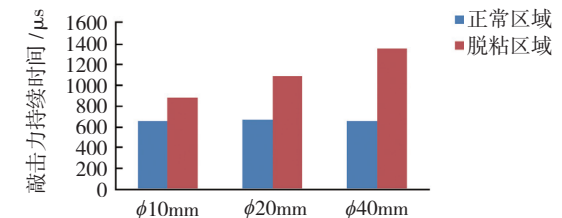
(b) $\phi 10\text{mm}$ 脱粘区敲击波形



(c) $\phi 20\text{mm}$ 脱粘区敲击波形



(d) $\phi 40\text{mm}$ 脱粘区敲击波形



(e) 不同尺寸缺陷区与完好区的敲击力持续时间对比图

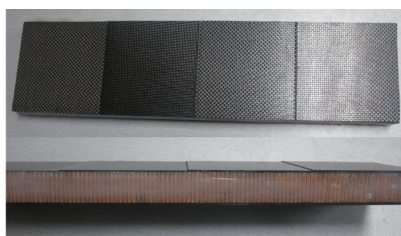
图8 相同蒙皮厚度下不同缺陷尺寸的敲击应力波形对比

Fig.8 Tap test force contrast curve of the same skin depth with different flaw dimension

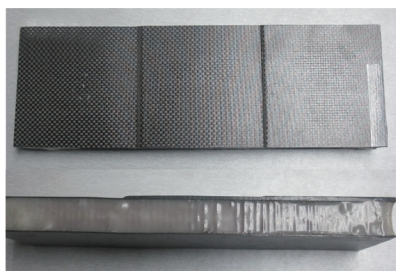
随着敲击力度的增加,获得的敲击力波形的幅值也随之增加,但其对应的敲击力持续时间变化不明显。由此可以得出,在正常的手工敲击检测力度范围内,敲击力持续时间仅与被敲击点的刚度有关,而对敲击力的大小不敏感。因此,这种基于敲击力持续时间判据的数字化敲击检测技术可以克服不同检测人员、不同检测次数带来的结果重复性差的问题。

图8、图9所示分别为相同蒙皮厚度下不同缺陷尺寸和不同蒙皮厚度下相同缺陷尺寸的敲击检测结果对比。图8所示的检测对象为蒙皮厚度0.5mm的蜂窝夹芯结构,其中包含直径分别为10mm、20mm和40mm的3个脱粘缺陷,脱粘缺陷均由通过放置聚四氟乙烯防粘膜的方式人工预制,由检测结果可以看出,缺陷尺寸越大,缺陷区与完好区的敲击力持续时间差异越明显。

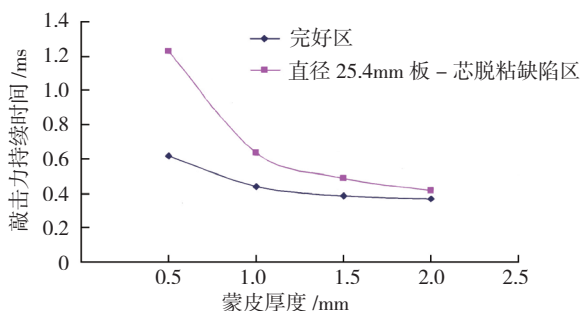
图9所示的试块为两块碳纤维蒙皮的蜂窝夹芯结构,试块1的蒙皮厚度分别为0.5mm、1.0mm、1.5mm、2.0mm 4个阶梯,试块2的蒙皮厚度分为1.5mm、2.5mm、3.5mm 3个阶梯,每个阶梯处均通过放置聚四氟乙烯



(a) 被测试块 1



(b) 被测试块 2

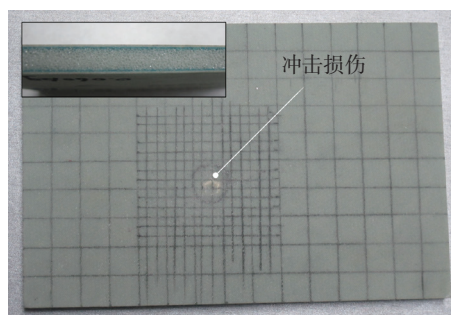


(c) 不同蒙皮厚度下敲击力持续时间对比曲线

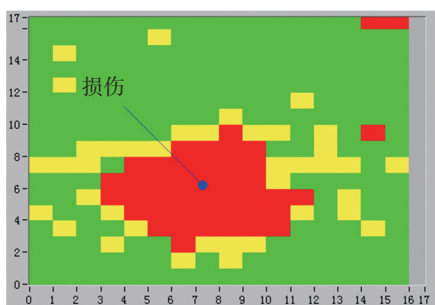
图9 不同蒙皮厚度下相同缺陷尺寸的敲击力持续时间对比曲线
Fig.9 Tap force duration contrast curve of different skin depth with same flaw dimension

防粘膜的方式预埋了直径为25.4mm的板-芯脱粘缺陷。由敲击检测结果可以看出,对于同一缺陷尺寸,蒙皮越薄,完好区和缺陷区的敲击力持续时间差异越明显;当蒙皮厚度达2mm时,两者差异较小,蒙皮厚度超过2mm,敲击检测方法无法探测到缺陷的存在。

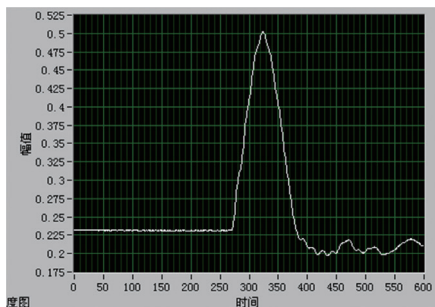
图10(a)所示为含冲击损伤的泡沫夹芯结构试块,试块蒙皮厚度约0.8mm,总厚度为8mm,表面目视可见



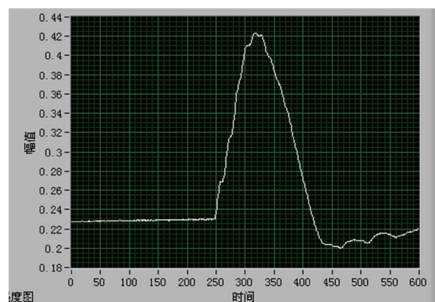
(a) 泡沫夹芯结构试件照片



(b) 敲击区检测图像



(c) 完好区敲击力波形图



(d) 冲击区敲击力波形图

图10 泡沫夹芯结构敲击检测试验结果
Fig.10 Tap test result of foam sandwich structure

冲击损伤尺寸约为 $\phi 3\text{mm}$, 图 10 (b)、(c)、(d) 为对冲击损伤区进行数字化敲击检测的结果, 敲击检测获得的冲击损伤尺寸约为 $14\text{mm} \times 12\text{mm}$; 图 11 所示为采用接

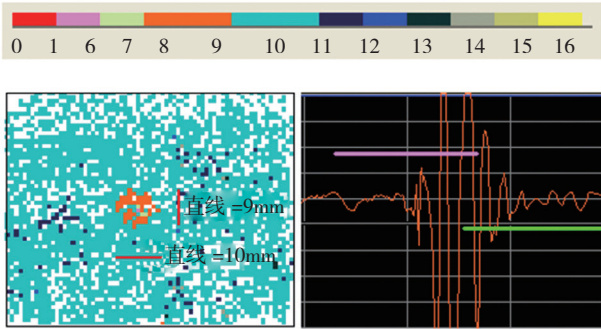
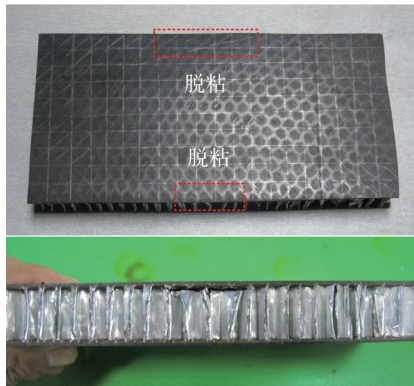
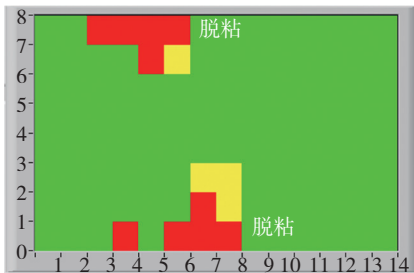


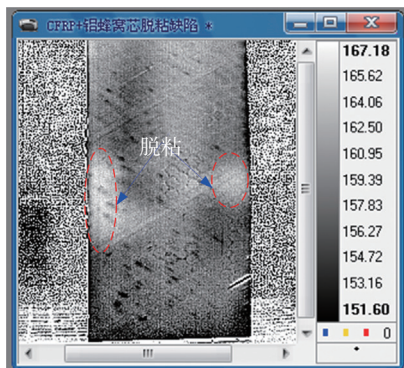
图 11 泡沫夹芯结构试块超声 C 扫描结果
Fig.11 Ultrasonic C-scan result of foam sandwich structure



(a) 被测试件



(b) 敲击检测结果



(c) 热成像检测结果

图 12 混合蜂窝夹芯结构试块检测结果
Fig.12 Test results of mixture honeycomb sandwich structure

触式脉冲反射法超声 C 扫描系统对该试件冲击区的检测结果, 获得的冲击损伤尺寸为 $10\text{mm} \times 9\text{mm}$ 。由此可见, 无论是敲击检测还是超声 C 扫描检测, 都能够检出结构内部由冲击引起的表面目视不可见部分损伤; 但敲击检测获得的损伤尺寸比超声 C 扫描检测获得的损伤尺寸偏大, 笔者分析产生这种现象的原因是手工敲击检测的精度有限加上敲击间距划分不够精细所致。

图 12 所示为碳纤维蒙皮 + 铝蜂窝芯的混合蜂窝结构试块及检测结果, 图 12 (a) 为试块照片, 试块蒙皮厚度为 1mm 厚碳纤维层板, 蜂窝芯材为铝蜂窝芯, 试块总厚度约 15mm ; 图 12 (b) 为采用数字化敲击检测获得的结果, 发现两侧边各存在一处板 - 芯脱粘缺陷。图 12 (c) 为红外热成像检测结果, 与敲击检测结果基本一致, 验证了两侧脱粘缺陷的真实存在。

4 结论

(1) 基于敲击力持续时间原理的数字化敲击检测技术能够直观地反应出被测结构中刚度的变化, 且对敲击力的大小不敏感, 可以用于复合材料夹芯结构中蒙皮分层缺陷、蒙皮与芯子间脱粘缺陷和冲击损伤的检测。

(2) 数字化敲击检测避免了传统敲击检测技术的人为主观制约因素, 检测结果也更为准确, 提升了敲击检测技术的适用性和可靠性。

(3) 所设计的便携式数字化敲击检测系统能够实现敲击区域的每个敲击点的敲击力波形和整个敲击区的图像显示, 并可进行质量状态的实时报警, 实现了敲击检测技术的数字化、可视化和可存储性。但基于手动敲击成像方式的缺陷定量检测精度稍差, 还有待进一步研究提升和优化。

参考文献

[1] 晁灿. 复材夹芯结构连接设计研究 [J]. 科技视界, 2016(16): 119.
CHAO Can. Composite sandwich structure junction design research [J]. Science & Technology Vision, 2016(16): 119.
[2] 段国晨, 赵景丽, 张明, 等. 全高度泡沫夹芯结构胶接共固化制造工艺 [J]. 粘接, 2016(7): 71-73.
DUAN Guochen, ZHAO Jingli, ZHANG Ming, et al. Cocuring process of foam sandwich structure for UVA [J]. Adhesion, 2016(7): 71-73.
[3] 曲亚林, 宁宁, 詹绍正. 蜂窝夹芯结构的无损检测技术 [J]. 航空制造技术, 2011, 54(20): 78-81.
QU Yalin, NING Ning, ZHAN Shaozheng. NDT technology of honeycomb sandwich structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(20): 78-81.
[4] 张迪, 朱亮禹, 吴万震. 飞机复合材料敲击检测信号的小波去噪新方法 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(6): 27-31.
ZHANG Di, ZHU Liangyu, WU Wanzhen. New wavelet denoising (下转第 100 页)