

引文格式: 章清乐, 刘松平, 刘菲菲. 大型复合材料蜂窝夹芯结构 X 射线数字成像自动化快速扫描检测技术[J]. 航空制造技术, 2022, 65(13): 78-83.

ZHANG Qingle, LIU Songping, LIU Feifei. Fast inspection of large-scale composite honeycomb sandwich structures using automated X-ray digital radiography scanning imaging technique[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(13): 78-83.

大型复合材料蜂窝夹芯结构 X 射线数字成像 自动化快速扫描检测技术

章清乐¹, 刘松平^{1,2}, 刘菲菲¹

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

[摘要] X 射线数字成像(X-ray digital radiography)检测方法广泛应用于工业生产的许多领域,已成为复合材料蜂窝夹芯结构的重要检测方法,对于大型复合材料蜂窝夹芯结构,需要提高 X 射线数字成像检测效率。针对大型复合材料蜂窝夹芯结构特点及其检测要求,提出了一种 X 射线数字成像自动化扫描成像检测方法,介绍了大型复合材料蜂窝夹芯结构的 X 射线数字成像自动化扫描检测系统的设计特点、关键单元的参数选型。利用所研制的大型复合材料蜂窝夹芯结构 X 射线数字成像自动扫描检测设备、确定的检测参数和设计制备的实际大型蜂窝夹芯结构件,开展了系列的检测试验研究。试验和实际检测应用结果表明,采用 X 射线数字成像自动化扫描检测方法可以实现大型蜂窝夹芯结构的快速可视化检测,检测分辨率可达 3.2 LP/mm,取得了很好的检测效果。

关键词: 复合材料蜂窝夹芯结构; X 射线; 数字射线成像; 自动化扫描成像; 快速可视化检测

Fast Inspection of Large-Scale Composite Honeycomb Sandwich Structures Using Automated X-Ray Digital Radiography Scanning Imaging Technique

ZHANG Qingle¹, LIU Songping^{1,2}, LIU Feifei¹

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

2. AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] X-ray digital radiography detection method has been widely used in many fields of industrial production, and has become an important detection method of composite honeycomb sandwich structure. For large composite honeycomb sandwich structure, it is necessary to improve the detection efficiency of X-ray digital radiography. According to the characteristics and detection requirements of large composite honeycomb sandwich structure, an automated scanning imaging detection method of X-ray digital imaging was proposed, and the design characteristics and parameter selection of key units of the automated scanning detection system for large composite honeycomb sandwich structure were introduced. Using the developed X-ray digital imaging automatic scanning detection equipment, the determined detection parameters and the actually designed and prepared large honeycomb sandwich structure, a series of testing experiments were carried out. The experimental and practical application results show that the X-ray digital imaging automatic scanning detection method can realize the rapid visual detection of large honeycomb sandwich structure, the detection resolution can reach 3.2 LP/mm, and obtain a good detection effect.

Keywords: Composite Honeycomb sandwich structures; X-ray; Digital radiography; Automated scanning imaging; Rapid visual detection

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.13.078

大型复合材料夹芯结构在航空工业领域有着广泛应用,常用于制作各种壁板、翼面、壳体等大型结构件^[1],主要由复合材料蒙皮和蜂窝芯材构成,其最常见的芯材是芳纶纸蜂窝芯和铝蜂窝芯。蜂窝夹芯结构胶接固化完成后需使用无损检测方法进行检测,以确定蜂窝芯的内部质量是否符合产品质量要求。对于复合材料蒙皮的检测,通常采用超声方法^[2-4],也有激光剪切散斑^[5]、红外热波成像、CT成像^[6]方面的研究报道。但是由于超声波在蜂窝芯格内部衰减很大,无法对芯格缺陷进行成像检测;激光剪切散斑、红外热波成像一般只适合于浅表缺陷的检测,也不适合蜂窝芯格内部的缺陷检测;CT检测对于小型结构件检测具有优势,但对于大型结构件,很难实现,所以这些方法不适合大型复合材料蜂窝夹芯结构的蜂窝质量检测。对于蜂窝夹芯结构,通常采用射线方法检测其存在的芯格断裂、芯格压缩、节点分离(脱开)、芯格夹杂、芯格与边缘构件脱粘等缺陷^[7]。

射线检测技术作为五大常规无损检测方法之一,已经历了数十年的发展,无论是理论还是检测标准与工艺,已是一项非常成熟、完善的检测方法^[8-9]。随着电子技术及机械自动化技术的发展,将射线检测技术由采用胶片为主的方法引向了采用数字成像法^[10],也同时推动了检测过程的自动化和智能化,从而促进了射线检测技术的推广应用^[11-12]。正是由于在检测效率及环境节能方面的突出优势,许多用户在配置射线检测设备时,在满足检测要求的情况下,将数字射线作为首选。

数字射线与常规胶片法射线相比具有以下优点:(1)数字探测器面板代替了胶片,节省了检测成本,不产生固废;(2)数字射线照射可直接进行数字成像,不消耗显影液、定影液,节省了检测成本,不产生废液;(3)数字射线检测结果直接进行电脑成像及处理,不需要暗室处理的过程,节省了人工成本,同时提高了检测效率;(4)数字射线检测单幅图像曝光时间短,可连续扫描成像,节省了操作时间,提高了检测效率;(5)数字射线的检测结果可在电脑上进行快速处理分析,尺寸测量、灰度调节、数据的存储及传输等更加方便。

数字射线与常规胶片法射线相比不足有:(1)数字面板探测器由许多个像素单元组成,目前单个像素尺寸虽然达到几十微米甚至更小,但与胶片相比在分辨率上还是有一定的差距;(2)对于结构复杂的零件,数字探测器无法放置在最佳照射部位,甚至无法检测,没有胶片灵活;(3)数字探测器价格昂贵,还需配备相应的机械装置,一次性投入费用高。

由于蜂窝芯的特殊结构特征,在检测透照后得到理想的检测结果是蜂窝芯格呈规则六边形形态。受射

线锥束投影的影响,射线检测图像中蜂窝芯格呈六边形的区域范围很小,尤其是较大厚度的零件,检测图像中有很大部分区域出现蜂窝芯格投影重叠^[13-14]。一个大型蜂窝构件,要实现蜂窝芯格投影不重叠成像,往往需要上百次的透照成像,常规的胶片法实施困难,普通的数字射线检测设备也不容易实现,而大型复合材料蜂窝夹芯结构的X射线自动化扫描成像检测技术是解决该问题的有效手段。X射线自动化扫描成像检测技术在欧美国家发展很快,技术成熟度高,已广泛应用于航空航天、汽车制造等众多技术领域,智能化和自动化程度较高,其相关标准体系也比较完善;国内目前数字射线成像检测技术处于快速发展阶段,尤其是近几年颁布了关于数字射线成像检测应用的多个标准,如GB/T 35388—2017《无损检测 X射线数字成像检测 检测方法》^[15]等,使得数字射线成像检测的应用更加广泛,但在X射线数字成像自动化和检测结果智能化评估方面有待进一步提高,在与X射线数字成像密切相关的高品质射线机和探测器的自主研发方面,与国外先进水平相比,尚有一定的差距。

本文介绍了大型复合材料蜂窝夹芯结构的数字射线自动化设备的设计特点和关键单元的参数选型,提出了一种数字X射线自动化扫描成像检测方法。利用所研制的大型复合材料蜂窝夹芯结构的数字射线自动化设备和设计制备的大型蜂窝夹芯结构件开展数字射线自动化检测试验研究,确定合理的检测参数,并验证检测效果。

1 X射线数字成像自动化扫描系统设计

1.1 设备组成

大型复合材料蜂窝夹芯结构数字射线自动化检测设备主要包括射线机系统、自动化运动控制系统、数据采集及处理系统、门机安全控制系统、监控系统、检测工装等,设备构成如图1所示。

1.2 射线照射系统选择

射线照射系统包括铅房、辐射安全系统、射线机。其中铅房及辐射安全系统应符合国家及地方相关法律法规的标准,对于射线机,尽量选择铍窗口的软X射线机,其指标至少达到以下要求:

- (1)具有恒电位工作模式,能够稳定地连续输出X射线;
- (2)最低管电压不高于20 kV,调节步进不大于0.1 kV;
- (3)管电流不小于2 mA,调节步进不大于0.1 mA;
- (4)焦点不大于1.0 mm;
- (5)具有冷却系统,具备很好的散热功能。

1.3 自动化扫描系统

自动化扫描系统主要是实现探测器、射线管及被检零件相对位置的移动,主要由机械系统及运动控制系统组成,其中机械系统一般设计成龙门形结构形式,见图2。

1.3.1 机械系统

由于蜂窝芯格成像需使其投影呈六边形,尽量避免投影的重叠,所以要始终保持中心射线束的照射方向与蜂窝芯格轴线一致。机械系统应至少具有8轴自由度运动控制功能,包括X、C、Z₁、Z₂、Y₁、Y₂、A₁、A₂,每轴的功能如下:

- (1) X轴,实现探测器、射线管与零件水平方向的相对位置移动;
- (2) C轴,实现探测器、射线管与零件周向方向的相对位置移动;
- (3) Z₁轴、Z₂轴,分别实现探测器、射线管的上下方向的位置移动;
- (4) Y₁轴、Y₂轴分别实现 SDD (射线管与探测器的距离)和 SOD (射线管与被检零件的距离)的调节;
- (5) A₁轴、A₂轴分别实现探测器、射线管的角度调整;
- (6) 运动控制精度要求除 C轴、A₁轴、A₂轴外,其

他轴的重复定位精度一般不低于0.2 mm, C轴、A₁轴、A₂轴的重复定位精度不低于0.5°;

(7) A₁轴、A₂轴应具有相对位置跟踪功能,在Z₁轴、Z₂轴相对位置变化时,应能自动调整探测器和射线管的角度,使射线与探测器面始终保持垂直状态。

1.3.2 运动控制系统

运动控制系统是实现自动化扫描的关键部分,其设计的优劣直接影响检测的灵活性、高效性及安全性,运动控制系统应能实现如下功能:

- (1) 各轴相对位置的调整及锁定功能;
- (2) 各轴相对位置节点编辑功能,可实现手动编辑和自动编辑功能,并能根据已经编好的节点程序自动运动,对于使用过的运动轨迹,系统应有记忆功能;
- (3) 位置异常报警功能,在运动过程中若出现误操作或机械部位与被检零件碰撞时,能够自动停机并报警;
- (4) 能实现与成像软件通信功能,并能按照扫描系统的指令进行节点运动。

1.4 数据采集及处理单元

1.4.1 探测器

探测器是数字射线成像的核心部分,其性能直接影响了数字射线的检测结果,在选用探测器时,应选用成像速度快、连续运行稳定性好、分辨率高的探测器,空间分辨率一般不低于2.0 LP/mm。

1.4.2 采集及处理软件

采集及处理软件除具备常规的图像采集、优化、灰度调节、尺寸测量、图像缩放、图像增强、边缘锐化等常规的功能外,还应具有以下功能:

- (1) 自动扫描控制功能,能与运动控制系统通信,根据已经编制的扫描轨迹进行自动扫描成像,并储存结果;
- (2) 自动拼接功能,对已经采集的图像,根据采集图像时所处的相对位置、扫描步进,进行检测图像拼接,拼接后的图像应能覆盖被检零件的所有被检区;
- (3) 具有实时成像和静态成像功能,在进行扫描前,需使用实时成像方法找到蜂窝芯格的轴线方向,并调节机械系统使射线束照射方向与蜂窝芯格轴线一致,然后设置扫描参数,进行自动扫描、静态成像。

1.5 检测图像分辨率

检测图像分辨率是数字射线检测的重要技术指标,为了获得较高的图像分辨率,满足大型复合材料蜂窝夹芯结构检测要求,本文重点考虑以下5个方面。

- (1) 焦点尺寸的选择。理论上选用的焦点尺寸越小,工件投影的几何不清晰度越小,获得的图像分辨率越高;但焦点尺寸过小,不利于大型复合材料蜂窝夹芯

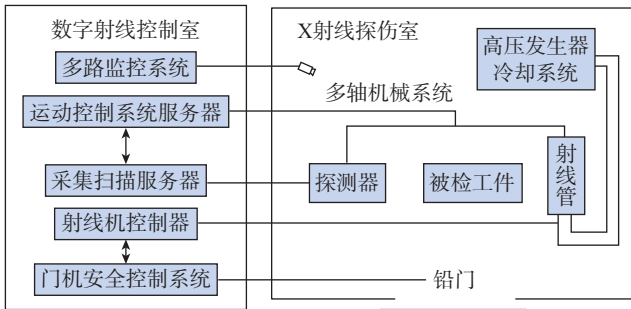


图1 大型复合材料蜂窝夹芯结构数字射线自动化检测设备基本组成
Fig.1 Illustration of direct radiography automatic testing equipment for large-scale composite honeycomb sandwich structures

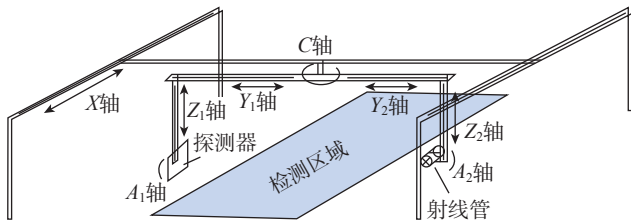


图2 大型复合材料蜂窝夹芯结构数字射线自动化扫描系统的基本构成
Fig.2 Basic composition of direct radiography automatic testing equipment for large-scale composite honeycomb sandwich structures

结构的快速检测,为此,本文在研究中选择了 0.4 mm 的 X 射线焦点。

(2) 电压电流的选择。在保证能够穿透被检测工件的情况下,应选择较低的管电压和较大的管电流,以提高系统的图像分辨率,为此在本文研究中,针对大型复合材料蜂窝夹芯结构的特点,选择了 70 kV 以下的软 X 射线。

(3) 放大倍数的选择。在其他条件一定时,选择合理的放大倍数有助于图像分辨率的改善,在本文研究过程中,通过式(1)^[15] 计算得出检测系统的最佳放大倍数,并通过调节探测器、被检工件、射线管的相对位置(调节图 2 中 Y_1 和 Y_2 轴),使检测时的图像放大倍数接近系统的最佳放大倍数,可获得较好的图像分辨率。

$$M_{\text{opt}} = 1 + \left(\frac{2SR_b}{d} \right)^2 \quad (1)$$

式中, M_{opt} 为最佳放大倍数; SR_b 为系统基本分辨率; d 为射线机焦点尺寸。

(4) 图像采集模式。使用静态成像模式,即在每个运动节点处,探测器、被检工件、射线管处于相对静止的状态下进行图像采集。虽然实时成像可提高检测效率,但在运动过程中,图像会产生运动不清晰度,不利于检测分辨率的提高,在其他条件一定时,选择相对静止的图像采集模式有助于改善图像分辨率。

(5) 在实际检测开始前和结束后,必须对图像分辨率进行测试验证,图像分辨率达到相关标准或技术要求时方可进行图像评定。

1.6 检测工装

检测工装应能将检测工件固定在探测器与射线管之间,考虑到蜂窝结构的刚性特征,夹持工具的夹持部位应选用柔性材料,避免用力过大损伤零件。在设计检测工装时,应避开机械运动系统的运动范围,以免造成碰撞。

2 试样与设备

2.1 试样

本试验选择某飞机型号的复合材料蜂窝夹芯零件作为实际的检测对象,尺寸为 1200 mm × 1000 mm × 50 mm。其中,蒙皮厚度 5 mm,芳纶纸蜂窝厚 5~45 mm,芯格尺寸为 4 mm。

2.2 设备及工艺参数选择

所用的检测设备为 FDR-160 数字射线自动成像检测设备,该设备满足上文设计基本要求,由中航复合材料有限公司刘松平带领团队自主研发(图 3)。该设备采用数字探测器面板,像素尺寸为 0.2 mm,经放大透

照布置,分辨率可达 3.2 LP/mm (图 4),低对比度分辨力可分辨 0.1 mm 聚酯类材料;射线机为钨窗口软 X 射线机,电压范围为 20~160 kV,电流 0.1~11.2 mA,焦点尺寸 0.4/1.0 mm 可选;具有 11 轴机械系统,可实现复杂结构自动化扫描成像检测,扫描检测范围可达 6000 mm × 3000 mm × 1200 mm。对于复合材料夹芯结构的检测,穿透厚度主要是保证所采用的射线强度能够穿透蒙皮即可,试验中零件的穿透厚度为 2 倍的蒙皮厚度,根据复合材料曝光曲线确定使用的电压,具体工艺参数见表 1。

3 结果与分析

3.1 检测结果

某型复合材料蜂窝夹芯结构为数字射线自动化扫描结果如图 5 和 6 所示。其中图 5 是整个复合材料蜂窝夹芯结构的数字射线检测结果(其中的垂直黑色灰度分布带为蜂窝拼接区)。

图 6 是对应图 5 中区域 A~D 4 个不同成像区的局部放大图像。

3.2 检测结果分析

从图 5 中的检测结果可以观察整体零件内部结构状况,包括零件内部的结构变化,还可以看出零件在中



图 3 FDR-160X 数字射线自动成像检测系统
(来自中航复材及其团队)

Fig.3 FDR-160 direct radiography automatic imaging detection system (From ACC)

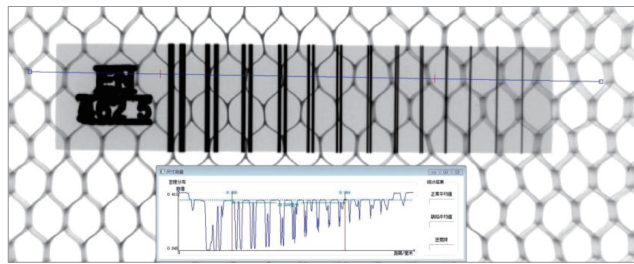


图 4 FDR-160X 数字射线自动成像检测系统分辨率测量结果
(3.2 LP/mm)

Fig.4 Measured resolution of FDR-160 direct radiography automatic imaging detection system (3.2 LP/mm)

表1 蜂窝夹芯零件数字射线自动化检测工艺参数

Table 1 Experimental parameters of direct radiography automatic testing for honeycomb sandwich parts

工艺参数	数值
电压/kV	55
电流/mA	5
焦点/mm	0.4
扫描步进/mm	50
扫描速度/(mm·s ⁻¹)	100
扫描方式	自动轨迹
分辨率/(LP·mm ⁻¹)	3.2
积分时间/ms	200
合并帧数/个	5
拼接像素	400×400

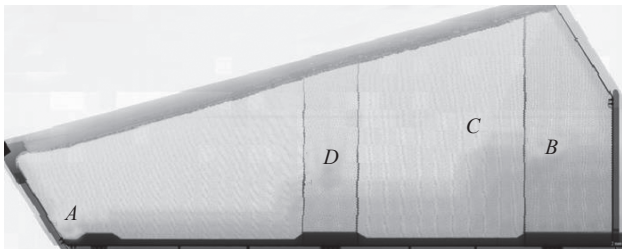


图5 复合材料蜂窝夹芯结构数字射线自动扫描结果
Fig.5 Results of direct radiography automatic testing for honeycomb sandwich structures

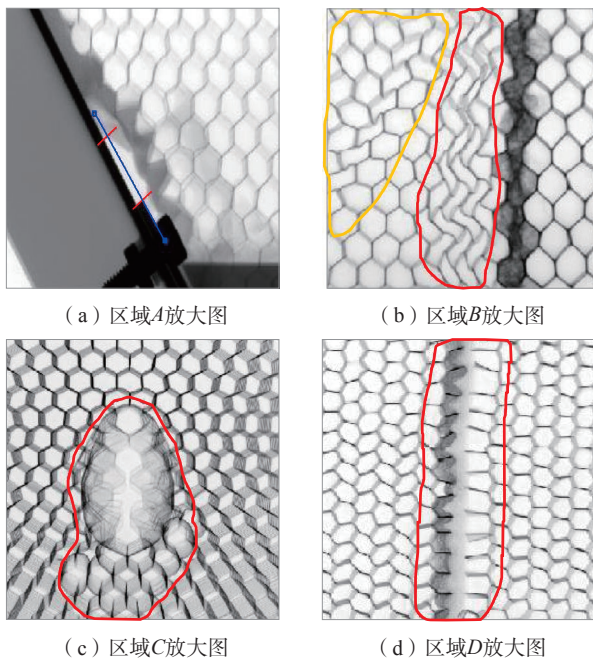


图6 局部放大结果

Fig.6 Local amplification result

间部位存在蜂窝芯拼接区。但由于图像显示压缩原因,在图5中难以看出蜂窝区的芯格细节,从而不利于蜂窝芯格缺陷的评判。为此,需要利用图6中局部放大图像进行射线检测结果的评判。

(1)在图6(a)中,蜂窝芯格结构显示清晰,芯格分布均匀,芯格投影未见重叠区域,蜂窝芯格节点粘接良好,发现一处发泡胶与端肋脱粘缺陷,长度约为10.5 mm。

(2)在图6(b)中,蜂窝芯格结构显示清晰,蜂窝拼缝粘接良好,拼缝左部蜂窝变芯格压缩变形明显,压缩变形区域蜂窝芯格壁弯曲变形,蜂窝芯格尺寸变小。图6(b)中黄色区域变形轻微,蜂窝芯格最小尺寸约为正常尺寸的1/2;红色区域蜂窝芯格压缩变形严重,共计两排,经测量,蜂窝芯格压缩变形后的尺寸小于正常尺寸的1/2。

(3)在图6(c)中,蜂窝芯格结构显示清晰,芯格分布均匀,红色区域内存在1处蜂窝芯格压塌、节点脱开的缺陷,压塌芯格27个,节点脱开2个,图像下部出现的蜂窝芯格投影重叠区域,考虑为压塌缺陷产生时,局部蜂窝芯格受力引起了芯格壁方向发生了改变。

(4)在图6(d)中,蜂窝芯格结构显示清晰,芯格分布均匀,芯格投影未见重叠区域,红色区域内存在1处拼接不足缺陷,未粘接蜂窝芯格13个。拼缝两侧蜂窝芯格投影不呈规则六边形,应为蜂窝芯格受力变形导致。由于蜂窝芯格变形,导致拼缝间距过大,是产生拼接不足缺陷的主要原因。

从检测分析结果可以看出,通过数字射线自动化检测设备进行大型蜂窝件的检测,可以检测出蜂窝芯存在的节点脱开、拼接不足、发泡胶脱粘、芯格压塌等缺陷,不仅自动化程度高,检测结果清晰、可靠,而且由于在检测过程中对产品检测区域进行了节点分配,在发现缺陷时,还可根据缺陷所在的节点信息在零件上进行精确的定位。值得指出的是,在进行大型复合材料蜂窝夹芯结构X射线数字成像检测时,确定评定区范围需要考虑芯格影像变形区的问题(图6(c))。一般蜂窝芯格的变形超过1/3~1/2时的影像区,不宜作为检测结果的有效评定区,所以在进行大型复合材料蜂窝夹芯结构X射线数字成像检测时,要充分考虑相邻扫描检测区域的影像有效连接的问题。

4 结论

(1)利用所研制的大型复合材料蜂窝数字射线自动化检测设备可以很好地实现大型复合材料蜂窝零件可视化检测,快速得到整体检测结果以及结构变化区分布特征。

(2) 利用局部图像分析可以实现被检测零件的细节放大,便于芯格缺陷评判,不仅适用于大型蜂窝夹芯结构,也可兼顾其他夹芯结构和复合材料零部件的检测,其灵活的结构设计及先进的成像评判方法,减少了人为失误,显著提高了检测效率和检测准确度,并且已经在实际检测过程中得到了验证。随着工业生产中自动化、智能化水平的提升,大型蜂窝数字射线自动化检测设备必将得到更加广泛的应用和推广。

(3) 试验表明, X 射线数字成像自动化快速扫描检测技术检测分辨率可达 3.2 LP/mm,具有非常好的实际检测应用效果。

参考文献

- [1] 史俊伟,刘松平,程文礼. 复合材料蜂窝夹层结构制件的超声可视化无损检测[J]. 无损检测, 2015, 37(3): 39-43, 46.
- SHI Junwei, LIU Songping, CHENG Wenli. Visible ultrasonic nondestructive testing methods for composite honeycomb sandwich structure[J]. Nondestructive Testing, 2015, 37(3): 39-43, 46.
- [2] 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, 38(8): 6-11.
- WEI Quan, JIN Cuie, ZHOU Jianping, et al. Application of air-coupled ultrasonic technology for nondestructive testing of aerospace composites[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(8): 6-11.
- [3] 刘松平,刘菲菲. 先进复合材料无损检测技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2017.
- LIU Songping, LIU Feifei. Advanced NDT & E techniques for composites[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2017.
- [4] 周正干,孙广开,马保全,等. 先进复合材料超声无损检测新技术的应用[J]. 科技导报, 2014, 32(9): 15-20.
- ZHOU Zhenggan, SUN Guangkai, MA Baoquan, et al. Application of new developed techniques for ultrasonic nondestructive testing for advanced composite materials[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(9): 15-20.
- [5] 程文,张宏菊. 激光剪切散斑检测技术在飞机复合材料检测中的应用[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2012, 27(4): 80-83, 94.
- CHENG Wen, ZHANG Hongju. The application of laser shearography speckle testing airplane composite structures[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2012, 27(4): 80-83, 94.
- [6] 董方旭,王从科,凡丽梅,等. X 射线 CT 成像检测方法对复合材料内部分层缺陷检测结果的影响研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(3): 86-91.
- DONG Fangxu, WANG Congke, FAN Limei, et al. Influence of X-ray CT imaging detection method on testing results of delamination defects in composite material[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(3): 86-91.
- [7] 卢鹏,危荃,敖波,等. 铝蜂窝夹芯结构的数字成像检测研究[J]. 失效分析与预防, 2014, 9(6): 340-346.
- LU Peng, WEI Quan, AO Bo, et al. Digital imaging detection

of aluminum-honeycomb sandwich structure[J]. Failure Analysis and Prevention, 2014, 9(6): 340-346.

[8] 郑世才. 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材: 射线检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

ZHENG Shicai. Training materials for qualification and certification of NDT personnel in national defense science and technology industry: Radiographic testing[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.

[9] 董方旭,王从科,凡丽梅,等. X 射线检测技术在复合材料检测中的应用与发展[J]. 无损检测, 2016, 38(2): 67-72.

DONG Fangxu, WANG Congke, FAN Limei, et al. The application and development of detection of composite materials by X-ray nondestructive testing techniques[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38(2): 67-72.

[10] 郑世才. 数字射线无损检测技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

ZHENG Shicai. Digital ray nondestructive testing technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.

[11] NIKISHKOV Y, AIROLDI L, MAKEEV A. Measurement of voids in composites by X-ray computed tomography[J]. Composites Science and Technology, 2013, 89: 89-97.

[12] RIQUE A M, MACHADO A C, OLIVEIRA D F, et al. X-ray imaging inspection of fiberglass reinforced by epoxy composite[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2015, 349: 184-191.

[13] 唐桂云,王云飞,王宝瑞. 碳纤维复合材料蜂窝夹层结构的无损检测方法研究[J]. 纤维复合材料, 2011(1): 30-32.

TANG Guiyun, WANG Yunfei, WANG Baorui. Study on nondestructive testing for carbon fiber composite honeycomb sandwich parts[J]. Fiber Composites, 2011(1): 30-32.

[14] 王丙阳,周炳如,晏峰峰. 实时成像技术在钎焊蜂窝结构检测上的应用[J]. 无损检测, 2013, 35(4): 53-56.

WANG Bingyang, ZHOU Bingru, YAN Fengfeng. The real-time imaging detection technology of brazing metal honeycomb[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(4): 53-56.

[15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 无损检测 X 射线数字成像检测 检测方法: GB/T 35388—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Nondestructive testing X-ray digital imaging detection detection method: GB/T 35388—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

通讯作者: 章清乐,工程师,主要从事复合材料无损检测方法研究和应用。

(责编 七七)