

超声波喷水穿透法在先进复合材料检测中的应用

赵建华 罗明 吴时红 何双起 赵伟栋

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 介绍了超声波喷水穿透法的检测原理及自行研制的四轴自动超声波喷水穿透 C 扫描检测系统。利用该检测系统对包括平板试样件,大厚度模压件,以及筒形结构件等先进复合材料进行超声波喷水穿透法检测,结果表明该方法对先进复合材料中存在的孔隙、裂纹、脱粘和分层等缺陷能有效检出。

关键词 超声波喷水穿透法,先进复合材料,缺陷

Application of Ultrasonic Squirter Transmission Method in Detection of Advanced Composite Materials

Zhao Jianhua Luo Ming Wu Shihong He Shuangqi Zhao Weidong

(Aerospace Research Institute of Material & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract The basic theory of ultrasonic squirter transmission method and the four-axes automatic ultrasonic squirter transmission C-scan system were introduced. Several advanced composite materials including the flat plate sample, the heavy section forming and the cylinder structure were studied by the system and method. The results show that the defects such as pore, crack, sticky point and lamination in the advanced composite materials can be effectively detected by this method.

Key words Ultrasonic squirter transmission method, Advanced composite materials, Defects

0 引言

先进复合材料具有卓越的比强度、比模量、良好的抗疲劳特性、材料性能的可设计性和易加工性等优点,被广泛应用于如卫星支架、大梁、大型运载火箭的发动机壳体、压力容器、太阳能帆板等结构^[1]。受到成型工艺的制约,复合材料在制备过程中产生孔隙、裂纹、脱粘和分层等缺陷^[2]。缺陷会降低复合材料结构的使用寿命,如果关键部位存在裂纹、脱粘和分层等致命缺陷,将造成灾难性的后果。因此,对复合材料内部缺陷进行无损检测具有极其重要意义。

目前,用于复合材料的无损检测技术较多,包括射线、超声、激光全息照相、红外成像等技术,其中,超声检测技术能够有效地检测出先进复合材料中的分层、孔隙和脱粘等危险性缺陷,被广泛应用在航空、航天领域复合材料构件的生产过程中。本文介绍了采用超声波喷水穿透法对一些先进复合材料构件进行检测的实例。

1 超声波穿透法的原理

超声波穿透法采用两个探头,分别置于被检复合材料相对的两个面,一个作为发射探头、另一个作为接收探头,由接收探头接收穿过被检复合材料的超声波。

检测时,如果复合材料内部存在缺陷,则超声波在穿透复合材料过程中被其内部缺陷反射、散射和吸收,穿透波信号幅度降低或消失(图1)。通过监测穿透波信号幅度的变化实现对复合材料内部缺陷的检测。穿透法检测只能检测在声传播路径中相对声束而言尺寸较大的单个缺陷或投影面积之和较大的多个缺陷(例如,缺陷截面面积占声束截面的 25% ~ 50%)^[3]。

超声波穿透法因耦合方式不同可以有接触式穿透法(使用耦合剂)、液浸穿透法、喷水穿透法(图2)、空气耦合穿透法和柔性探头穿透法。其中超声波喷水穿透法是在先进复合材料构件检测方面应用

非常成熟的一种检测方式。该方式需要设计专用的喷水探头套,利用压力驱动水从喷水探头套喷嘴高速射出,形成喷射水柱,实现发射、接收探头与复合材料之间非接触声耦合方式检测。由于采用非接触方式,有效地改善了复合材料构件表面不规则或突起部位对探头耦合状况的影响,超声波喷水穿透法能够实现每秒数百毫米甚至更高速度的自动检测。超声波喷水穿透法在检测时,发射探头和接收探头及喷射水柱的对中状态影响着穿透波信号幅度。出现偏离,则穿透波信号幅度将降低甚至消失,因此保持探头和喷射水柱的对中非常重要。

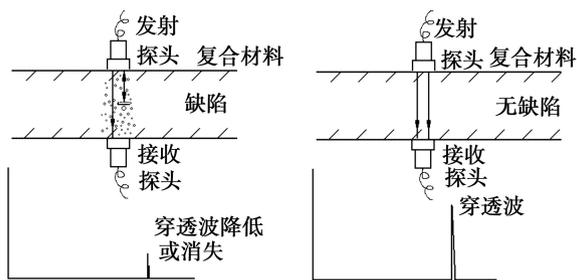


图1 超声波穿透法检测示意图

Fig. 1 Illustration of ultrasonic transmission method

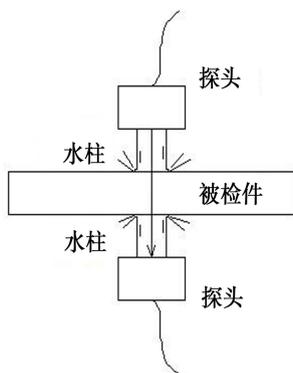


图2 喷水穿透法

Fig. 2 Ultrasonic squirter transmission method

2 检测设备

检测设备为自行开发研制的四轴超声波喷水穿透检测系统。发射探头和接收探头(包括喷水探头套)为联动装置,能够实现 x 、 y 和 z 轴三个方向的运动,配合独立的 φ 旋转轴,可以实现对平板件、筒形和锥形等形状复合材料构件的自动化检测。

系统由计算机数据处理及成像系统、超声波探伤仪及发射和接收探头(喷水探头套)、信号采集单元、运动控制单元、机械扫描机构和循环水系统组成(图3)。系统以计算机数据处理及成像系统为核心,具有运动控制、信号采集处理、C扫描成像和缺陷定位等功能。

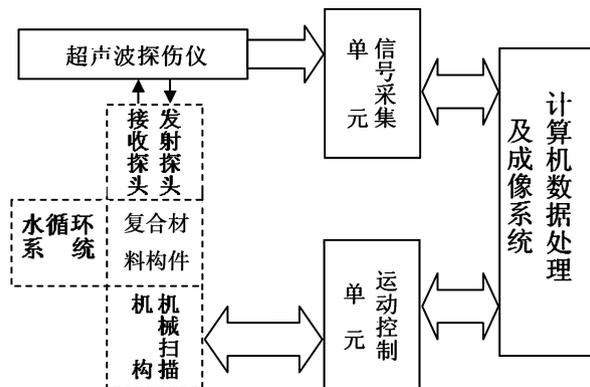


图3 超声波喷水穿透检测系统的工作原理示意图

Fig. 3 Illustration of the ultrasonic squirter transmission C-scan system

3 先进复合材料构件的检测应用

3.1 平板样件的检测应用

为配合碳纤维增强某树脂基材料平板样件的工艺研究,开展相应的超声检测研究。由于被研究材料比碳环氧树脂对超声波的衰减更严重,不宜选择超声波反射法进行,通过实验确定采用超声波喷水穿透法进行检测效果较佳。

检测参数建立在对该材料缺陷试样的试验基础上。缺陷试样采用在平板样件中嵌入不同尺寸薄膜的方式模拟缺陷。通过选取不同的检测参数(包括探头、检测灵敏度、扫描速率、扫描行距和采样间距)对缺陷试样进行试验,得到一系列的C扫描图像。其中,典型的C扫描图像见图4所示。获得的缺陷测量尺寸与实际薄膜缺陷尺寸对比结果见表1。可知,尽管缺陷的检出尺寸与设计尺寸略有变化,但缺陷均能够被检出,该结果对应的检测参数满足要求。

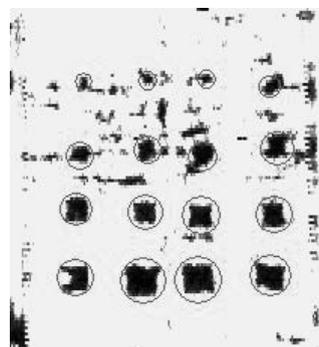


图4 碳纤维增强树脂基缺陷试样C扫描图

Fig. 4 C-scan result of the carbon fiber reinforced composite sample containing defects

采用该检测参数对规格为 $360\text{ mm}\times 230\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 的平板样件进行检测,得到图5所示的C扫描图像。图像中不同像素点的灰度反映平板样件对应位

置的超声波穿透信号幅度情况。图像中部出现的纵向深色条状区对应的穿透信号幅度较低甚至非常微弱,两侧大面积浅色区域对应的穿透信号幅度则较高。截取深色区域的部位制作金相试样,其微观结构照片如图6所示。照片显示该位置不同层间存在多处分层和孔洞缺陷。

表1 缺陷的实测尺寸与设计尺寸的比较

Tab.1 Comparison of the size between the test result and the design result of the defect mm

薄膜缺陷尺寸	不同深度位置			
	1/5 板厚	2/5 板厚	3/5 板厚	4/5 板厚
10×10	7×8	9×6	8×7	12×11
15×15	14×11	10×15	13×15	14×17
20×20	15×16	15×14	17×16	17×17
25×25	16×17	22×21	22×20	19×18

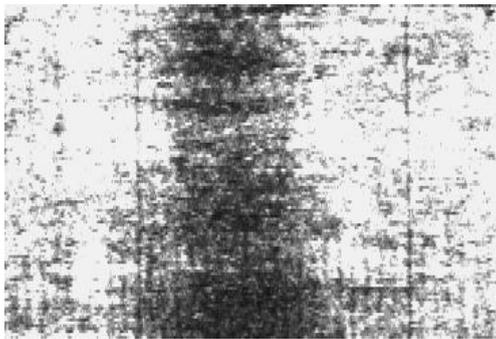


图5 碳纤维增强树脂基平板样品 C 扫描图

Fig.5 C-scan result of the carbon fiber reinforced flat plate

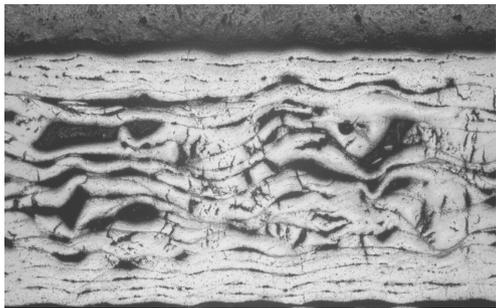


图6 平板样品微观结构金相照片

Fig.6 Metallograph of the flat sample's microstructure

3.2 大厚度模压件的检测应用

铺层工艺成型的大厚度模压件因声衰减严重,选用超声波喷水穿透法进行检测。图7为该复合材料制件的超声波 C 扫描图。在检测过程中,发现该制件的 C 扫描图与同类产品的检测结果明显不同,图中存在多处超声波穿透信号衰减严重的区域(图中的深色区域)。对该制件进行解剖分析,发现断面存在大量肉眼可见的孔洞缺陷(图8)。

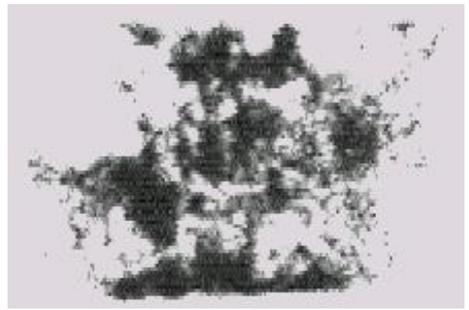


图7 大厚度模压件 C 扫描图

Fig.7 C-scan result of the heavy section forming

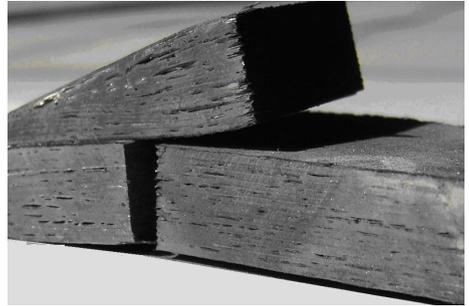


图8 大厚度模压件解剖照片

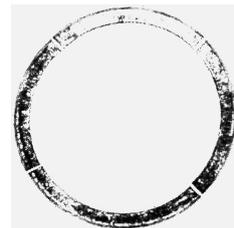
Fig.8 Cross-section of the heavy section forming

3.3 筒形结构件的检测应用

某筒形结构件由耐高温性能优越的复合材料制成,该材料对超声波的衰减比碳环氧复合材料更为严重,故采用超声波喷水穿透法进行检测。图9为筒形结构件的检测结果。圆柱面的超声波 C 扫描图中发现一条平行于母线方向的长条形深色条纹区,在其周边同时存在多处点状深色区。其中,长条形深色条纹尺寸约为 330 mm×17 mm。端框的超声波 C 扫描图中约 60% 的面积为深色区。



(a) 圆柱面 C 扫描展开图



(b) 端框截取后的 C 扫描图

图9 筒形结构件 C 扫描结果

Fig.9 C-scan result of the cylinder structure composite

分别截取对应圆柱面和端框 C 扫描图中的深色区域,制作金相试样。圆柱面金相试样截面分布有大量孔洞缺陷,测算孔隙率约为 11.7% ~ 15.8%。分

析端框金相试样微观结构的典型照片(图10)。照片中不均匀地分布着多处毫米级的分层和孔洞缺陷,其中a位置有一条长度为4 mm的分层缺陷,b位置有一条长度为8 mm的分层缺陷。检测结果表明,超声波喷水穿透法能够有效地检测出筒形结构件内部的分层和孔洞缺陷。

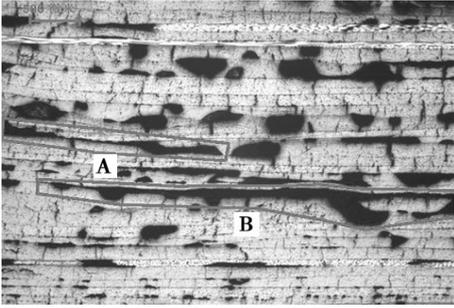


图10 筒形结构件金相试样微观结构照片
Fig. 10 Metallograph of the cylinder structure composite's microstructure

4 结论

通过超声波喷水穿透法在先进复合材料的检测应用,表明该方法能够有效地检测出先进复合材料内部的分层和严重的孔洞缺陷。由于超声波喷水穿透法依据穿透信号幅度衰减情况检测缺陷,而不同类型的缺陷可能衰减性能是相同的,如孔洞和分层的衰减性能可能相同,因此对于缺陷性质判别存在困难,但可结合其他的检测手段,进一步完善检测结果。

参考文献

- [1] 王耀先. 复合材料结构设计[M]. 北京: 化工工业出版社, 2011: 8
- [2] 唐桂云, 等. 先进复合材料的无损检测[J]. 纤维复合材料, 2006(3): 33
- [3] BS EN 583-3: 1997《Non-destructive testing-Ultrasonic examination-Part 3: Transmission technique》

(编辑 任涛)

《宇航材料工艺》论文编排格式

稿件编排格式如下(以下每个□代表一个空格):

(二宋)文 题

空一行

(四楷)作者姓名

(小五宋)(作者单位□地名□邮编)

空一行

(五黑)□□文□摘□(五楷)(下接文摘内容,转行顶格排,以下同)

(五黑)□□关键词□(五楷)(下接3~8个关键词,词间用逗号隔开)

空一行

(外体三白正)英文文题

空一行

(外体小四白正)作者姓名汉语拼音

(外体小五白正)(对外英文单位名称□英文地名□邮编)

空一行

(外体五黑正)□□Abstract□(外体五白正)(下接文摘内容)

(外体五黑正)□□Key words□(外体五白正)(3~8个关键词,词间用逗号隔开)

空一行

(五黑)1□(一级标题)

(五宋)□□(正文)

(五黑)1.1□(二级标题)

(五宋)□□(正文)

(五黑)1.1.1□(三级标题)

(五宋)□□(正文)

.....

(小五黑)□□致谢□(小五宋)(内容)

(五黑)□参考文献(格式参照 GB/T 7714-2005 著录)