

## 大曲率复合材料结构的缺陷特征与超声检测

郝威<sup>1</sup> 李明<sup>2</sup> 王颖春<sup>1</sup>

(1. 沈阳飞机工业(集团)有限公司理化测试中心, 沈阳, 110034;

2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司工程技术中心, 沈阳, 110034)

**摘要:**采用超声回波法对大曲率碳纤维增强树脂基复合材料零件进行超声 A-扫描,并对缺陷进行定位。结合缺陷区域和非缺陷区域的细观形貌金相图、宏观表面状态以及厚度测量结果的对比分析,讨论了缺陷形态与其回波波形的对应关系,以及缺陷可能的形成原因。结果表明,缺陷在细观尺度上呈现多处分层、气孔和孔隙密集缺陷,在宏观尺度上表现为零件表面贫胶与厚度增厚。缺陷的性质与超声 A-扫描的检测结果相吻合,缺陷的位置集中在零件大曲率部位,其形成原因与复合材料制造工艺密切相关。

**关键词:**大曲率复合材料;超声回波法;缺陷细观形貌;零件外观状态;制造工艺

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2017)S-0056-06

## Characteristics of Defects and Its Ultrasonic Defection in Large Curvature Composites

HAO Wei<sup>1</sup>, LI Ming<sup>2</sup>, WANG Yingchun<sup>1</sup>

(1. Physical and Chemical Testing Center, Shenyang Aircraft Industry (group) Co., LTD, Shenyang, 110034, China;

2. Engineering and Technology Center, Shenyang Aircraft Industry (group) Co., LTD, Shenyang, 110034, China)

**Abstract:** Ultrasonic echo A-scan method is adopted to scan large curvature carbon fiber reinforced composites and locate the defects areas. The results of metallographic microscopic analyses, thickness measuring and component surface conditions between healthy area and defect area are compared to investigate the relationships between the micro-morphology of defects and ultrasonic pulse wave characteristics, as well as the causes of the defects. The delamination, air hole, and volume porosity in defect area result in poor resin in surface, thickening of the component and special ultrasonic propagation and attenuation. The defects located in large curvature position are closely related to the manufacturing process.

**Key words:** large curvature composites; ultrasonic echo method; micro-morphology of defects; component apparent condition; manufacturing process

复合材料由于其相对密度小、比强度和比模量大、化学稳定性高等优良的综合性能,已被广泛应用于航空航天等诸多领域。然而作为一种多相材料,复合材料在生命周期中的各个阶段,包括原材料的采购、中间材料的制作、制件的最后成型和使用服役过程中,都存在诸多不确定因素<sup>[1]</sup>。例如在

制造过程中由于环境、原材料、工艺规范和结构设计不合理等因素,均可能产生各种各样的制造缺陷<sup>[2]</sup>。这些缺陷的产生、扩展和积累将会加剧材料的环境与应力腐蚀,严重降低结构的各项力学性能,最终影响结构的使用寿命。而缺陷的定位、定性和定量主要通过无损检测的方法来判定。因此,

收稿日期: 2017-05-15; 修订日期: 2017-06-20

通信作者: 郝威, 女, 工程师, E-mail: vickysol@126.com.

引用格式: 郝威, 李明, 王颖春. 大曲率复合材料结构的缺陷特征与超声检测[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(S): 56-61. HAO Wei, LI Ming, WANG Yingchun. Characteristics of defects and its ultrasonic defection in large curvature composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(S): 56-61.

缺陷的控制技术和检测技术是目前先进复合材料领域的重要研究内容。目前,复合材料层合板(包括等厚、非等厚和 L 形层合板)制造缺陷的形成机理研究已经采用数值模拟和实验研究的手段取得了有一定进展<sup>[3-6]</sup>,但是结构复杂的零件制造缺陷与工艺控制和超声信号之间的关联仍有待于深入研究<sup>[7-8]</sup>。

飞机整流罩多采用复合材料制造。为了适应飞行过程中的气动要求,整流罩外形必须是流线型。大曲率的特点会为复合材料的制造带来诸多困难,也会提高零件自身的缺陷敏感度<sup>[9]</sup>。因此,大曲率整流罩的缺陷控制与检测评价尤为重要。本文针对某大曲率碳纤维增强树脂基复合材料整流罩构件特点,通过超声 A-扫描、金相成像,结合对该构件宏观状态、厚度尺寸以及工艺过程的研究,对缺陷产生的原因以及形态进行分析和评估,进而揭示该类大曲率复合材料层压结构内部的损伤分布及其形成规律,并针对性地提出预防措施,达到减少缺陷的目的。

## 1 试验方法

### 1.1 零件

某复合材料整流罩为蜂窝组成的夹层结构,尖端大曲率部分为复合材料织物预浸料层压结构。缺陷区域位于零件 R 角区域,曲率半径约 40 mm,角度约 92°。另一侧非缺陷区 R 角处的曲率半径约 55 mm。

### 1.2 超声检测方法及设备

超声检测所用设备为英国声纳 A-扫描超声探伤仪,型号为 Masterscan 380,所用超声换能器为晶片直径 6 mm、带延迟块的直探头,频率分别为 5 MHz。探头和样品间采用水作为耦合剂。探头在零件上按照规定的扫描路径移动,以使声束全部覆盖零件待检测部位。当超声波波形出现突变时,以此处为中心沿径向缓慢移动探头检测波形变化最显著的位置,从而画出缺陷边界。

### 1.3 金相检测方法及设备

利用超声 A-扫描标记出零件的缺陷区域后,在缺陷区域和非缺陷区域分别切割试样,切割方向分别沿织物方向的 0°/90°和 45°/-45°方向。在锯切过程中,防止振动、碰撞等以避免引入新的缺陷。使用磨抛机对已切割的试样截面进行抛光处理,磨抛机转速为 750 r/min,分别采用耐水金相砂纸 150,280,400,600 目对切割面研磨,每次研磨后用清水清洗,直至试样解剖截面光滑、平整、细观结构清晰可见。采用 OLYMPUS GX51 显微摄像机采集已切割抛光的试样截面图像,分析缺陷处复合材

料试样抛面的细观形貌。

### 1.4 零件厚度测量

采用游标卡尺测量零件缺陷区和非缺陷区厚度,并与标准数模上零件厚度比对。

### 1.5 零件制造过程工艺研究

观测预浸料的粘性、预浸料与工装、预浸料与预浸料之间的铺覆性,以及预浸料的变形程度。观察零件固化结束后表面吸胶材料的吸胶程度,以及零件最终的表面状态。

## 2 结果与讨论

### 2.1 超声波波形分析

通过对该类零件进行大量的超声 A-扫描检测实验,超声波的波形图大致可以分为两种,如图 1, 2 所示。

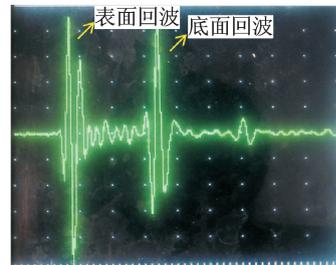


图 1 第一种典型的超声波波形

Fig. 1 The first kind of typical ultrasonic wave

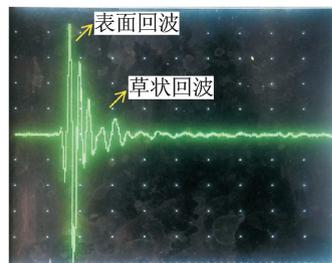


图 2 第二种典型的超声波波形

Fig. 2 The second kind of typical ultrasonic wave

第一种典型的超声波波形如图 1 所示。超声波的表面回波和底面回波清晰可见,且波幅较高,二者之间没有其他回波,在该扫描区域缓慢移动探头时,超声波形基本保持不变。这种典型波形通常表示零件内部无缺陷<sup>[10]</sup>。

第二种典型的超声波波形如图 2 所示。超声波表面回波清晰可见且波幅较高,在表面回波后出现草状的回波,回波波幅明显低于表面回波,且无法判断底面回波的位置及波幅。这种典型波形表示超声脉冲全部被缺陷反射,且零件内部垂直声束传播方向上的单层投影缺陷面积小于声束横截面积的缺陷,无明显层间缺陷回波,也无明显的面回

波,只有表面回波和若干草状回波<sup>[10]</sup>。

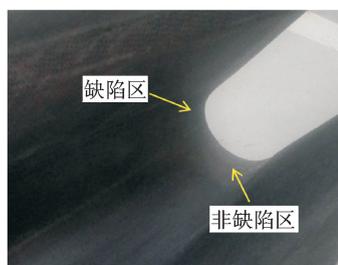


图3 零件缺陷区和非缺陷区取样位置图

Fig. 3 Sample location of defect area and good area in the composite

## 2.2 剖面细观形貌分析

第二种典型波形均在零件曲率最大的R角部位,如图3中缺陷区所示。不同零件中的缺陷区出现的位置一致,具有比较明显的规律性;其余部位的波形图为第一种典型波形。为了更具有可比性,金相试验中观察的剖面取自零件的两侧R角部位,如图3中缺陷区和非缺陷区所示。这两处的预浸料的铺层数量一致,区别在于非缺陷区处零件曲率小于缺陷处零件曲率。

非缺陷区对应的剖面细观形貌如图4,5所示,剖面切割方向分别是预浸料织物的 $45^\circ/-45^\circ$ 和 $0^\circ/90^\circ$ 方向。图中复合材料纤维束之间树脂区分布均匀,且纤维束与树脂的界面粘结较好,富树脂区较少,未发现密集孔隙、分层等缺陷。

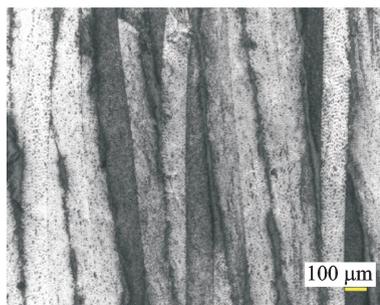


图4 非缺陷区 $45^\circ/-45^\circ$ 织物方向剖面细观形貌

Fig. 4 Section of micro-morphology corresponding to the good area in  $45^\circ/-45^\circ$  fabric direction

缺陷区对应的剖面细观形貌如图6,7所示,剖面切割方向分别是预浸料织物的 $45^\circ/-45^\circ$ 和 $0^\circ/90^\circ$ 方向。可以看出剖面图中主要有3种类型缺陷,即预浸料织物层与层之间的分层、单层预浸料织物不同纤维束之间的大气孔、单束纤维束之间的密集孔隙,在图中分别以a/b/c表示这三类典型缺陷。这些缺陷出现在不同深度的铺层中。在垂直于声束的传播方向上,分层最长投影长度约为 $1\ 300\ \mu\text{m}$ ,单层预浸料不同纤维束间的大气孔最长投影长度约为 $1\ 100\ \mu\text{m}$ ,纤维束之间的孔隙投

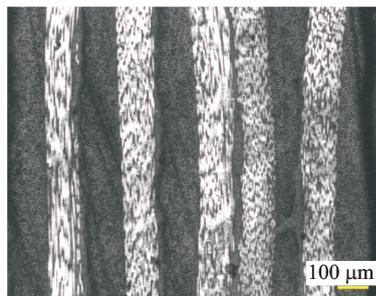


图5 非缺陷区 $0^\circ/90^\circ$ 织物方向剖面细观形貌

Fig. 5 Section of micro-morphology corresponding to the good area in  $0^\circ/90^\circ$  fabric direction

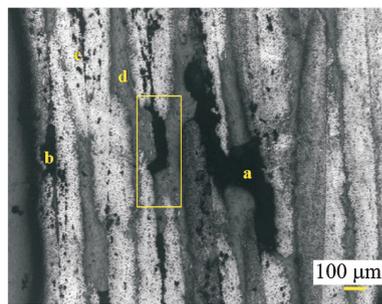
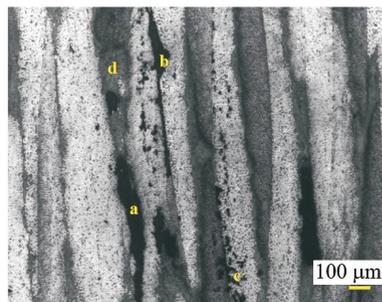


图6 缺陷区 $45^\circ/-45^\circ$ 剖面细观形貌

Fig. 6 Section of micro-morphology corresponding to the defect area in  $45^\circ/-45^\circ$  fabric direction

影直径约为 $25\ \mu\text{m}$ 。单个缺陷的投影面积均小于声束横截面积,因此波形图没有明显的层间缺陷回波出现,而是表现为草状回波。但是这些不同层面的缺陷在垂直声束传播方向上的投影可以相互叠加并连成一个整体,覆盖了探头发生声束的横截面,在超声波传播过程中,声束被全部反射,因此波形图上底面回波的位置和波幅不明显。

剖面形貌图中还可以看出缺陷区域预浸料织物的不同层之间、同一层预浸料的不同纤维束之间、单个纤维束中不同的碳纤维单丝之间均有富树脂区出现(图6,7中d所代表的区域),且富树脂区要远大于无缺陷区域的剖面图(图4,5)。此外,剖面图中还可以看出预浸料织物的纤维不连续以及纤维的扭曲变形,如图6,7中方框标注区域。可能产生这些现象的原因一是预浸料在铺叠的过程中过度拉伸或扭曲,导致织物局部变形严重,织物的

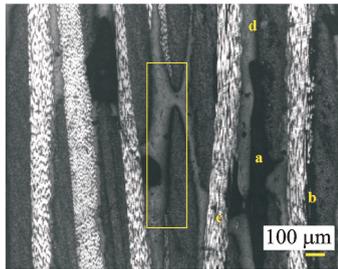
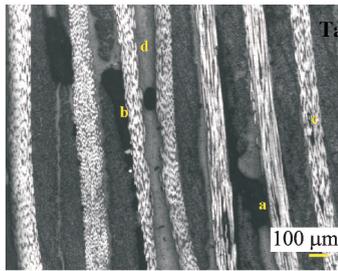


图7 缺陷区 0°/90°剖面细观形貌

Fig. 7 Section of micro-morphology corresponding to the defect area in 0°/90° fabric direction

图6和图7中a处为典型预浸料层间缺陷,b处为典型单层预浸料不同纤维束间缺陷,c为典型单束纤维束之间的孔隙密集,d为典型富树脂区;方框部分为典型纤维扭曲或不连续区域。

单个网格从正方形变为菱形,由此产生的孔隙由树脂填充,造成富树脂与纤维在视野中不连续;二是预浸料即使被扭曲也无法适应在大曲率工装上的铺叠,铺叠过程中需要对预浸料进行剪切,造成纤维被切断,接缝处产生的孔隙由树脂填充造成富树脂。

### 2.3 厚度宏观统计结果

为了宏观地反应缺陷区和非缺陷区的差异,这里分别在4件零件表面相同的缺陷位置和非缺陷位置上各选取3点,采用卡尺测量厚度,与理论数模上相应位置测量的零件厚度做比较,统计结果如表1所示。

为了更有可比性,非缺陷区也取自零件的R角部位。只是非缺陷区零件曲率小于缺陷区零件曲率。由于零件在阴模工作上成型,R角位于零件下方,树脂向下流动会在一定程度上造成R角部位富树脂,使缺陷区和非缺陷区的实测厚度均大于理论厚度。但是,缺陷区域实测厚度与理论厚度的偏差要远大于非缺陷区域,由此可以推测缺陷区域富树脂区较非缺陷区多,这一点也与剖面细观观察结果一致。

### 2.4 零件缺陷分析

大曲率复合材料零件R角处结构尺寸和内部质量一直是零件制造工艺中控制的重点和难点<sup>[2]</sup>。在同样的成型工艺下,制件构形越复杂的部位出现

表1 零件缺陷区和非缺陷实测厚度与理论厚度比较

	缺陷区域		
	点1	点2	点3
理论值 $h_0$ /mm	2.087	2.102	
实测值( $n=4$ )	点1	点2	点3
$h_1$ /mm	$2.400 \pm 0.156$	$2.483 \pm 0.217$	$2.331 \pm 0.156$
实测值与理论值偏差/%	15.0	18.1	11.0

缺陷的比例越高,越简单的部位则反之<sup>[7]</sup>。对于大曲率零件要充分考虑到预浸料的铺覆变形能力。在工装表面曲率最复杂的部位,当预浸料的铺覆变形能力不能满足模具或零件铺层的变形量时,容易造成纤维局部拉伸扭曲变形严重,从而导致预浸料织物的不同层之间、同一层预浸料的不同纤维束之间、单个纤维束中不同的碳纤维单丝之间发生不同程度的分离,从而形成空腔。当预浸料变形较大也不能满足铺覆要求时,还会使用切断纤维的方式来满足铺叠,这种情况同样会造成该处曲率最复杂的部位出现空腔。这些空腔在固化时一部分被树脂填充,形成富树脂区;而没有被填充的空腔则形成分层、气孔、孔隙等缺陷。

除了预浸料与模具的配合问题外,固化过程中的压力传递和树脂流动也会影响零件的质量。相比于曲率较小的R角区域,曲率较大的R角部位橡胶软膜传压的均匀性更低,因此该处预浸料密实度更差。而树脂流动包括两种形式:一是沿垂直于层板方向流进吸胶层;二是在层板内沿平行于纤维的方向流出体系<sup>[7]</sup>。在等厚层压板结构中,树脂只沿厚度方向流动,即一维压缩条件下的一维流动,此时温度分布和压力传递较为均匀,出现缺陷的比例较低。但在此类大曲率U型零件中,第二种树脂的流动方式则不可忽略。此时树脂流动与纤维密实可能是多维压缩/多维流动,会造成纤维密实程度的降低,出现缺陷的概率增加<sup>[7]</sup>。相比于曲率较小的R角区域,大曲R角部位的原有空腔会进一步增加树脂的二维流动性和纤维滑移程度,使预浸料密实程度更差,进而产生分层、气孔、孔隙和富树脂等缺陷。

图8为零件缺陷区域表面打磨掉1/4层预浸料后的表面照片,箭头所指处为肉眼可见缺陷,与剖面细观观察结果一致,表面零件固化后内部仍有较多的空腔。图9中可以看出缺陷区域表面有贫胶现象,并且该处零件固化结束后,表面的吸胶材料几乎没有吸出树脂。结合前面的结果可以推断,表面的贫胶现象是由于该处内部空腔较多,预浸料树脂需要填充内部空腔,因此表面树脂含量相对不足。

因为复合材料的各向异性和零件结构的不对称



图8 缺陷区域打磨后表面状态(箭头所指为缺陷)

Fig.8 State of defect area after the composite surface grinding

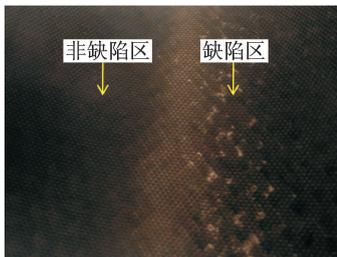


图9 缺陷区和非缺陷区零件表面状态

Fig.9 Surface conditions of defect area and good area in the composite

性会引起热膨胀系数和热应变的各向异性,所以铺层之间的相互制约会使零件内部产生残余应力。再加上零件内部多富树脂区和缺陷的存在,当受到外界冲击作用时,原有缺陷会引起内部应力集中,富树脂区的强度和抗冲击性能又较差,因此造成零件缺陷进一步扩大。我们在实际工作中对零件进行超声A-扫描时也发现缺陷扩大的现象。由此可见,对零件制造缺陷的控制与检测对零件整个生命周期的结构质量都十分重要。

### 3 结 论

本文采用超声A-扫描方法对大曲率碳纤维增强树脂基复合材料零件缺陷进行了扫描评估,结合零件缺陷区域和非缺陷区域的细观形貌解剖图,讨论了缺陷形态与其回波波形特征的对应关系。再对比分析缺陷区域和非缺陷区域的零件表面状态和厚度测量结果,对缺陷产生的原因作了进一步的推测。得出结论如下:

(1)超声A扫描能够对大曲率复合材料缺陷进行定位检测,其波形特征与缺陷截面形貌特征相一致。

(2)零件缺陷区域细观尺度上呈现多处不连续微裂纹和孔隙密集缺陷,同时存在多处富树脂区;宏观尺度上表现为零件表面贫胶与厚度增厚。其成因可能是预浸料在铺叠过程中内部纤维架桥形成多处空腔,树脂倾向填充内部空腔形成富树脂区,而表面

则因树脂含量相对不足形成贫胶。

(3)大曲率零件铺叠过程中要充分考虑预浸料的铺覆变形能力。预浸料变形严重或过多的纤维剪切处理,会造成内部富树脂区或缺陷增多。同时,压力传递不均,树脂的二维流动和纤维的滑移也会影响零件质量。合理的铺层设计和工艺补偿可能有助于缺陷问题的解决。

### 参考文献:

- [1] 沈建中,林俊明. 现代复合材料的无损检测技术[M]. 北京:国防工业出版社,2016.  
SHEN Jianzhong, LIN Junming. Nondestructive testing technology of modern composite materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [2] 程文礼,邱启艳,陈静. 热压罐成型复合材料固化变形机理及控制研究[J]. 材料导报,2012, 26: 410-414.  
CHENG Wenli, QIU Qiyang, CHEN Jing. Study on the cure-induced deformation mechanism and control of composite structures in autoclave process [J]. Materials Review, 2012, 26: 410-414.
- [3] 汪赫男,张佐光,顾轶卓. 环氧复合材料层板热压成型孔隙缺陷影响因素[J]. 复合材料学报,2007,24(5): 55-60.  
WANG Henan, ZHANG Zuoguang, GU Yizhuo. Effects of different factors on the void defect in epoxy composite laminates in hot pressing process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(5): 55-60.
- [4] 李艳霞,李敏,张佐光,等. L形复合材料层板热压工艺密实变形过程的树值模拟[J]. 复合材料学报,2008,25(3):78-83.  
LI Yanxia, LI Min, ZHANG Zuoguang, et al. Numerical simulation on consolidation and deformation of L-shaped composite laminate in autoclave process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(3): 78-83.
- [5] 陈超,张娅婷,顾轶卓,等. 碳纤维/环氧复合材料孔隙缺陷的工艺影响因素研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2014,5:51-55.  
CHEN Chao, ZHANG Yating, GU Yizhuo, et al. Study of the effects of processing conditions on void defect in carbon fiber/epoxy composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014,5: 51-55.
- [6] 王铮,梁菁,史丽君,等. 复合材料层板超声检测缺陷评定方法分析[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44: 138-141.  
WANG Zheng, LIANG Jing, SHI Lijun, et al. Measurement for ultrasonic contact inspection on defect in carbon fiber-reinforced composite[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44:138-141.
- [7] 王雪明,谢富原,李敏. 热压罐成型复合材料复杂结构

- 对制造缺陷的影响规律[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 757-762.
- WANG Xueming, XIE Fuyuan, LI Min. Effect rules of complex structure on manufacturing defects for composites in autoclave molding[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(4): 757-762.
- [8] 王雪明, 谢富原. 复合材料构件分层缺陷的概率分析方法与量子理论模型[J]. 航空学报, 2013, 33(5): 72-76.
- WANG Xueming, XIE Fuyuan. Probabilistic analysis method and sub-cluster theory model of delamination for composite components [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 33(5): 72-76.
- [9] 陈伟, 许希武. 复合材料双曲率壳屈曲和后屈曲的非线性有限元研究[J]. 复合材料学报, 2008, 25(2): 178-187.
- CHEN Wei, XÜ Xiwu. Buckling and post buckling response analysis of the doubly-curved composite shell by nonlinear FEM[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(2): 178-187.
- [10] 王国, 孙颖, 李嘉禄. 超声评价碳/环氧三维编织复合材料的实验分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009, 6: 39-85.
- WANG Guo, SUN Ying, LI Jialu. Experimental study on ultrasonic evaluation of carbon/epoxy 3D braided composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2009, 6: 39-85.