

# 先进复合材料的无损检测

李志君

( 信息产业部电子第 39 研究所 西安 710065 )

**文 摘** 综合分析了碳纤维复合材料构件在成型和使用过程中造成的缺陷及损伤产生的原因,指出成型工艺原理和理论的非完美性、原材料因素、人为因素是复合材料成型过程中缺陷产生的主要原因。采用无损探伤技术对缺陷进行检测是复合材料构件质量保证的必要手段。对目前国内外用于复合材料构件的几种无损探伤方法进行了比较,认为超声法是复合材料常见缺陷检测的一种有效手段。并对超声检测技术的研究和应用进展进行了介绍。

**关键词** 树脂基复合材料,无损探伤,超声波,缺陷,损伤

## Non-Destructive Testing of Advanced Composites

Li Zhijun

( Institute of Electrical Equipment in Northwest Xi'an 710065 )

**Abstract** Reasons of formation of defects and damages in carbon composites during manufacturing process and service are analyzed, which can be attributed to the imperfection of composites manufacturing, poor quality of raw and processing materials, and unsuitable or wrong operation of workers. Non-destructive testing is an important method of insuring quality of the composites. Comparing with other non-destructive testing methods, the ultrasonic inspection can be considered an effective method of checking the common defects and damages in composites, and its development of studying and application is introduced in this paper.

**Key words** Polymer composites, NDT, Ultrasonic, Defect, Damage

### 1 前言

碳纤维复合材料是由纤维、基体、界面组成,其微观构造是一个复杂的多相体系,而且是不均匀和多向异性的。由于预浸料中常常含有低分子杂质、溶剂、水分等一些易挥发物,因而,极易在复合材料成型过程中形成孔隙、分层等缺陷。同时,在预浸料制作、铺放和固化过程中往往存在很多人因素和工艺质量的不稳定性,这使得复合材料构件的质量具有一定的随机性;而且,缺陷的存在是不可避免的,因此,对其中成型缺陷的有效检测,是复合材料构件质量保证的必要手段。

### 2 复合材料的缺陷与损伤

#### 2.1 成型过程中产生的缺陷

复合材料在成型过程往往会由于工艺原理和理论的非完美性而产生缺陷,如高温固化的复合材料会由于纤维与树脂基体热膨胀性能的失配而产生微裂纹,严重时甚至造成基体开裂。湿法制作的预浸料,由于其中的低沸点溶剂挥发不完全,固化成型过程中,在高温下的聚集、膨胀,因而在复合材料中产生孔隙,严重时可导致分层。

原材料因素,也是复合材料产生缺陷的一个主要原因。购买的预浸料中局部树脂含量不均匀、毛

收稿日期:2000-07-18

李志君,1968年出生,工程师,主要从事先进复合材料的研究工作

团、纤维弯曲会造成复合材料的贫胶、富胶和纤维曲屈。如果预浸料储存时间过长,则会在固化成型过程中,树脂的流动性变差而导致贫胶、富胶、纤维脱粘以至分层。由于我国的先进复合材料工业,仍以手工操作为主,所以人为因素的随机性是复合材料

产生缺陷的一个极为重要的原因,如夹杂、铺层错误、固化不完全等。如果这些缺陷不能及时发现,就会严重影响复合材料构件的使用性能,造成不可挽回的损失。复合材料构件中常见的缺陷见表 1<sup>[1]</sup>。

表 1 复合材料中常见的缺陷

Tab.1 Common defects in composites

缺陷	产生原因
孔隙	溶剂、低分子杂质的挥发,真空控制不当
贫胶、富胶	预浸料树脂不均匀或储存时间过长,固化工艺不当
夹杂(如隔离纸、PE 薄膜等)	操作失误或预浸料本身有夹杂
纤维曲屈与错位	预浸料本身有缺陷或操作不当
铺层错误	操作失误
固化不完全	预浸缺陷或固化工艺不当
基体开裂、分层	基体、纤维、模具热膨胀系数不匹配或储存时间过长
纤维缺陷	预浸料中纤维质量不好
粘结缺陷	粘结剂选择或固化不当

复合材料构件在成型过程中产生的缺陷,如果不能及时发现并进行适当的修补,就会对构件的后加工和使用性能产生严重影响,甚至会在二次加工中造成产品报废,因此,复合材料构件在加工和装配前必须进行无损检测。

## 2.2 使用过程中产生的缺陷

CFRP 构件在使用过程中往往会由于应力或环境因素而产生损伤以至破坏,其常见形式见表 2<sup>[2]</sup>。

表 2 复合材料构件的常见破坏形式

Tab.2 Common damages in composites

破坏形式	产生原因
纤维断裂与曲屈	过载或疲劳而导致应力屈服
纤维与基体界面开裂	吸湿、热疲劳、应力疲劳、基体老化
裂纹与分层	疲劳、基体老化
表面变色、粉化	基体环境老化
粘结破坏	胶粘剂老化、应力屈服

复合材料损伤的产生、扩展与积累会加剧材料的环境与应力腐蚀,加速材料的老化,造成材料的耐湿热性能严重下降,强度与刚度的急剧损失,大大降低材料的使用寿命,有时会造成灾难性后果<sup>[3]</sup>,所以

复合材料构件在使用过程中的定期检测,就显得极为重要,也越来越受到人们的重视。

## 3 复合材料的无损检测

检测复合材料的微观破坏和内部缺陷,用常规的机械和物理实验方法显然不能满足其检验后的使用要求,必须对制件进行无损探伤。无损检测技术(NDT)是在不损害材料/工件使用性能的前提下,用于检测其特征质量,确定其是否已达到特定的工程技术要求,是否还可以继续服役的技术方法。它也是检验产品质量、保证产品使用安全、延长产品寿命的必要的可靠技术手段。复合材料构件的无损检测技术见表 3<sup>[4]</sup>。

由表 3 可以看出,X 射线法、超声法、声发射法等仍是复合材料最核心的无损检测方法。近年来,这些方法已在自动化技术、探测器技术、信息处理和数据存储等方面取得了很大进展,特别是在航空航天领域的复合材料构件的制造中发挥了极为重要的作用。在复合材料的无损检测中,超声波检测是其中应用最为广泛的方法之一。尤其是超声 C 扫描,由于显示直观、检测速度快,已成为飞行器零件等大型复合材料构件普遍采用的检测技术。

表3 复合材料的无损检测技术

Tab. 3 NDT methods for composite inspection

方法	适用范围	优点	缺点
目视法	表面裂纹与损伤	快速、简便、低成本	人为因素太大
渗透法	表面贯穿裂纹与分层	简便、可靠、快速	检测前必须清洁工件, 渗透油、显形液有污染
超声波法	内部缺陷(疏松、分层、夹杂、孔隙、裂纹)检测, 厚度测量, 材料性能表征	易于操作、快速、可靠、灵敏度高、精确度高便携, 可精确确定缺陷的位置与分布	操作者必须经过专门培训, 需使用耦合剂, 不同缺陷要使用不同的探头
X射线法	表面微裂纹、孔隙、夹杂(特别是金属夹杂), 贫胶、纤维断裂等	灵敏度高, 可提供图像, 进行灵活的实时检测, 可检测整体结构	射线对人体有害, 操作者必须经过专门培训, 需要图像处理设备
声发射法	载荷试验过程中的裂纹产生与扩展	只需要接收传感器	裂纹产生的信号与噪音信号很难区分
热成像法	厚度较薄复合材料的缺陷检测	提供全场图像	要求工件表层有较好的热吸收率
声波法	较大的物理缺陷如, 脱胶、分层、裂纹孔隙等	操作简单, 直观, 可自动化显示, 不需前处理	仅适于较大缺陷的检测

## 4 复合材料的超声波检测

### 4.1 超声法无损检测的特点

超声波是指频率在 20 kHz 以上的声波, 它们的波长与材料内部缺陷的尺寸相匹配<sup>[5]</sup>。根据超声波在材料内部缺陷区域和正常区域的反射、衰减与共振的差异, 来确定缺陷的位置与大小。按测定方法分类, 超声波检测主要有脉冲反射法、穿透法和反射板法。它们各有特点, 应根据不同的缺陷来选择合适的检测方法。

超声波不仅能检测复合材料构件中的分层、孔隙、裂纹和夹杂等缺陷, 而且, 在判断材料的疏密、密度、纤维取向、曲屈、弹性模量、厚度等特性和几何形状等方面的变化也有一定的作用。对于一般小而薄、结构简单的平面层压板及曲率不大的构件, 宜采用水浸式反射板法; 对于小或稍厚的复杂结构件, 无法采用水浸式反射板法时, 可采用水浸或喷水脉冲反射法和接触带延迟块脉冲反射法; 对于大型结构和生产型的复合材料构件的检测宜采用水喷穿透法或水喷脉冲反射法。由于复合材料组织结构具有明显的各项异性, 而且性能的离散性较大, 因而, 产生缺陷的机理复杂且变化多样, 而且, 复合材料构件的声衰减大, 航空航天领域的复合材料制件又多为薄型构件, 由此引起的噪声和缺陷反射信号的信噪比

低, 不易分辨<sup>[6]</sup>, 所以在使用时应选用合适的方法进行检测。

### 4.2 超声检测的应用

超声检测技术, 特别是超声 C 扫描, 由于显示直观、检测速度快, 已成为飞行器零件等大型复合材料构件普遍采用的检测技术。ICI Fiberite 公司采用 9 轴式 C 扫描, 对蜂窝泡沫夹芯等复杂结构的复合材料构件进行无损检测。麦道公司专为曲面构件设计的第五代自动超声扫描系统, 可在九个轴向运动, 并能同时保证脉冲振荡器与工件表面垂直<sup>[7]</sup>。该系统可以完成二维和三维的数据采集, 可确定大型复杂构件内的缺陷尺寸。由波音民用飞机集团等单位组成的研究小组, 用超声波研究了复合材料机身层合板结构的冲击强度和冲击后的剩余强度, 结果表明, 超声波不仅可以检测损伤, 而且能确定损伤对复合材料构件承载能力的影响。Dows 公司的先进复合材料实验室, 还用超声波确定了各种损伤参数(深度、形状、面积、直径以及分层频率等)与有机纤维复合材料压缩强度的关系。为了适应复合材料制造过程的在线监控, 还发展了用脉冲激光在复合材料生产中产生超声波的检测系统。该系统已成功地应用于远距离、非接触式复合材料固化过程的在线检测监控, 其功能包括温度分布图、固-液态界面、微观

结构、再生相(疏松、夹杂)、粘流—粘滞特性的检测<sup>[8]</sup>。

## 5 结语

由于复合材料是一种复杂的多相体系,在其原材料的采购、中间材料的制作和制件的最后成型中,存在着诸多不定的影响因素,这使得复合材料构件的内部缺陷和加工、使用时的结构损伤不可避免。同时,先进复合材料构件大多应用于航空航天领域,其结构的可靠性和安全性是设计成败的关键,所以复合材料构件内部缺陷与损伤的无损检测就显得极为重要。近年来,我国复合材料无损检测技术得到了飞速的发展,X射线法、超声检测法和声发射法已成为最为核心的检测方法,其中超声检测技术,特别是超声C扫描,由于显示直观、检测速度快,已成为飞行器零件等大型复合材料构件普遍采用的检测技术。但是,我国复合材料无损检测技术的发展还远不能适应复合材料应用技术的发展,还没有得到一些复合材料构件制造企业的高度重视,这对我国复合材料工业的发展极为不利。只有很抓技术进步、加强宣传与应用推广,才能使无损检测技术成为

我国复合材料健康工业发展的有力保障。

## 参考文献

- 1 耳东. 复合材料无损检测的新进展. 航空制造工程, 1994;(5):33
- 2 于雪云. 复合材料方向舵、垂尾超声检测方法和应用研究. 见: 航空航天工业部科学技术研究院编. 航空复合材料技术成果文集, 航空工业出版社, 1993:278
- 3 陈积懋, 张颖. 复合材料无损检测的新进展. 航空工艺技术, 1998;(5):17
- 4 余南廷, 陈积懋编著. 复合材料无损检测与评定. 中国航空学会, 1997:152
- 5 Josep H B et al. Model based control of voice and product thickness during autoclave curing of carbon/epoxy composite laminates. Journal of Composite Materials, 1995;(8):1 000~1 023
- 6 Prosser W H et al. Advanced waveform based acoustic emission detection of matrix tracking in composites. Material Evaluation, 1995;53(9):1 052
- 7 Kristen weight. An overview of NDE methods for thick composites and proposal for analysis of computed technology data. ADA288733, 1994
- 8 Robert E, Green J R. Nondestructive characterization of material properties. Mechanical Engineering, 1987:268

(上接第 27 页)

5 花崎伸作. CFRP 切削工具磨耗机构. 见: 日本机械学会论文集(C 编), 1994;(60):297~302

6 King W, Grab P. Quality definition and assesment in drilling of FRP. Annals of the CIPP, 1989;38(1):119~123

7 胡凡. 复合材料钻削加工技术的研究. 北京航空航天大学硕士论文, 1985

8 Inoue H. Study on the cutting mechanism of GFRP. Proc. Int. Symp. Comp. Mat. and Struct., 1986;(3):1 110~1 115

9 韩荣第, 于启勋. 难加工材料切削加工. 机械工业出版社, 1994:116~124

10 Ramulu M, Faridnia M, Garbini J L, Jorgensen J E. Machining of graphite/epoxy composite materials with polycrystalline diamond (PCD) tools. ASME, 1991;113:430~436

11 刘晋春, 赵家齐. 特种加工. 机械工业出版社, 1994:

129~193

12 张卫山译. 单向石墨/环氧复合材料的纯水射流切割及磨料水射流切割. 宇航材料工艺, 1995;(5):52~56

13 Schucker D, Veas G. Laser material processing of composite materials. In: Proceedings of the ASM 1993 Materials Congress. Pittsburgh, Pennsylvania, 1993;(10):17~21

14 Wallbank J, Pashby I R, Kim Y H. A comparison between the chip forming behavior and the surface integrity in reinforced and non-reinforced polymeric materials. Materials Park, OH, ASM International, 1992;(1):205~211

15 Johansson J O, Chandrasekaran H. Surface Quality in Aluminium Alloy Matrix Composites—evaluation of Finish Ground Alumina Fibre Reinforced Material. 1995:1~20