

# 大厚度复合材料制件(内埋金属)的超声检测分析

张惠玲 张铁夫 江玉朗 赵亮

(航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

**文 摘** 采用超声波无损检测及金相试验方法研究了内埋金属件的大厚度复合材料实心部位的微观结构,发现采取 $0^\circ$ 纤维在金属件周围进行缠绕铺层时容易引起超声波的衰减,分析了超声波衰减的机理,首先预浸料中夹杂微小气泡引起孔隙率较低,形成了复合材料内部的疏松缺陷;其次由固化过程时内应力引起的微裂纹,导致超声波信号发生衰减;另外,纤维屈曲或局部树脂分布不均匀对超声波也有一定影响。

**关键词** 复合材料,超声,无损检测,金相

中图分类号:TB332

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.04.027

## Ultrasonic-Destructive Testing Analysis on Large-Thickness Carbon Fiber Reinforced Composites Embedded With Metal Components

ZHANG Huiling ZHANG Tiefu JIANG Yulang ZHAO Liang

(Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074)

**Abstract** In this article, micro-scale structures of a solid part of large-thickness composites embedded with a metal adapter were studied through ultrasonic non-destructive testing and metallographic microscopy. Decay of ultrasonic intensity was observed when the metal adapter was wrapped around by  $0^\circ$  unidirectional carbon fibers reinforced prepregs. Mechanisms for the ultrasonic decay were analyzed. First, it was micro-scale air bubbles included in prepregs that caused high porosity and formed internal looseness in composites. Second, micro-cracks caused by inner stress during the curing cycle were found responsible for ultrasonic decay. Third, fiber buckling deformation and localized resin also had effects on ultrasonic waves.

**Key words** Composites, Ultrasonic, Non-destructive testing, Metallographic microscopy

### 0 引言

碳纤维增强树脂基复合材料中的缺陷类型一般包括孔隙、夹杂、裂纹、疏松、分层、纤维卷曲、富胶或贫胶等<sup>[1]</sup>。而超声检测技术是目前用于复合材料最有效的无损检测方法之一<sup>[2]</sup>,由于声波在不同介质界面处会产生反射、折射现象,造成在声波传播方向上能量的散失<sup>[3]</sup>,超声无损检测就是根据超声波进入复合材料后透射波或反射波的能量、波形及其相位来判断制件内部质量。而复合材料的厚度即超声波的行程和其衰减也有很大关系,即超声波衰减在厚度方向上的累积叠加会使整个构件厚度方向的波损耗大大增加<sup>[4]</sup>。此外,制件的结构特点及铺层方式也有可能影响超声波的传播和衰减。

本文主要针对某复合材料产品接头实心区域的超声检测进行分析。该产品接头实心区域厚度较大

(27.4 mm),且 $0^\circ$ 纤维采取缠绕铺层。该部位超声无损检测经常出现类似疏松缺陷的信号,为了更准确地了解该部位内部质量的真实情况,希望能通过破坏性解剖试验,观察磨制的金相试样中纤维、树脂状态及孔隙分布情况,为改善产品内部质量提供依据,并了解这些情况与超声波衰减的对应关系<sup>[5]</sup>,为完善超声无损检测方法提供参考。

### 1 实验

#### 1.1 原材料

增强材料为日本东丽公司生产的 T700 碳纤维(12K T700S-50C),基体树脂为西安飞机制造公司生产的 HD03 环氧树脂(A 组合和 B 组合)。

#### 1.2 固化工艺

采用模压成型工艺,其固化工艺如图 1 所示:室温 $\rightarrow 90^\circ\text{C}$ ,保温 30 min $\rightarrow 130^\circ\text{C}$ ,保温 30 min $\rightarrow$ 加压 $\rightarrow$

175℃, 240 min→室温。

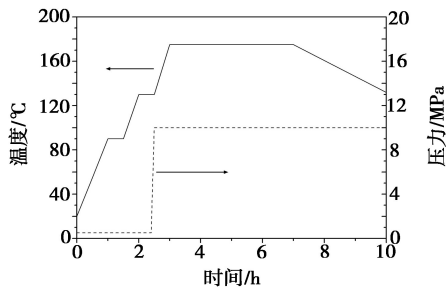


图1 层压板的成型工艺制度

Fig. 1 Curing curve for a laminate molding process

### 1.3 金相试样取样

使用 Newoscan-2 超声 C 扫描检测系统进行该产品无损检测, 超声透射波波强通常会随着入射波的增益的提高而提高, 也就是说, 在一定的门槛值下, 随着增益的提高根据透射波划定的信号异常区轮廓会相应缩小。制备信号异常区域的观测试样时, 金相试样的取样中心与疏松缺陷的几何中心一致, 尽量跨越不同增益下划定的超声波信号异常区域边界, 如图 2 所示。磨制与缺陷几何中心相邻的截面作为金相观测面, 如图 3 所示。

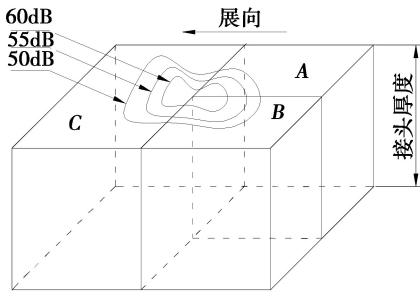


图2 取样示意图

Fig. 2 Sampling

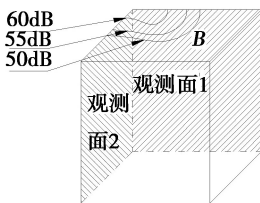


图3 观测面示意图

Fig. 3 Observation surface

## 2 结果与讨论

### 2.1 接头区域的铺层方式

为了保证复合材料产品接头区域的强度和刚度, 该区域的碳纤维需尽量连续, 铺层时 0° 纤维需绕过接头中部的两个芯轴。预浸料在缠绕铺层过程中不可避免地会出现不同程度的重叠和打结情况, 而这些情况会影响该区域的铺层的规整性, 可能对无损检测宇航材料工艺

结果造成干扰。

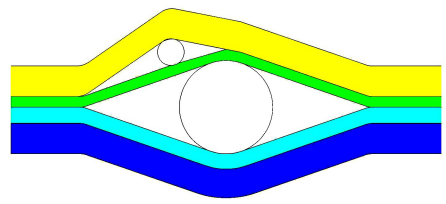


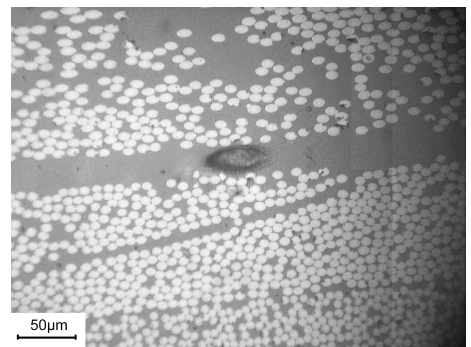
图4 接头区域 0°纤维缠绕示意图

Fig. 4 0 degree fibers wrapping around metal adapter

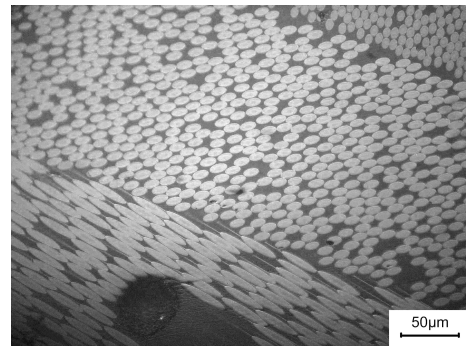
### 2.2 引起超声波损耗因素分析

#### 2.2.1 孔隙的影响

根据无损检测情况, 在接头部位共选择了 4 个超声波信号异常区域, 制备了 12 个金相试样。使用 NJL-1 型光学显微镜, 在总计 20 个观测面上随机拍摄了 360 张照片, 这些金相照片中一共有 5 张照片包含孔隙, 孔隙个数共 5 个。具体情况如图 5 所示。



(a) 试样 1#



(b) 试样 2#

图5 接头缠绕区典型的孔隙缺陷

Fig. 5 Typical eyelets in fiber-wrapping-area

疏松缺陷作为一种宏观缺陷是复合材料内部孔隙缺陷的宏观表现, 通常是较大的成群的弥散性孔隙缺陷。孔隙通常呈体积分布, 以孔隙率来衡量复合材料孔隙缺陷的严重程度<sup>[6]</sup>。

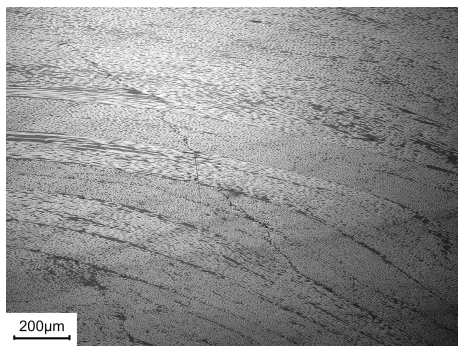
从金相试样可以看出, 产品内部孔隙率较低, 由孔隙引起的超声波衰减在宏观上表现为疏松缺陷。

#### 2.2.2 内部微裂纹的影响

在个别区域的试样观测面中发现有小尺寸微裂纹存在, 这些微裂纹尺寸较小(图 6), 长度通常为

100  $\mu\text{m}$  ~ 1 mm,其产生原因可能和固化过程中内应力作用有关。

产品压制过程中,树脂固化以及与纤维线胀系数不同而引起的复合材料内应力的产生,而纤维屈曲和



树脂的不均匀分布会造成这种内应力的增大,并在某一区域集中,应力集中达到临界值时,这些应力集中点周围的区域就会被破坏并不断延续,形成裂纹。

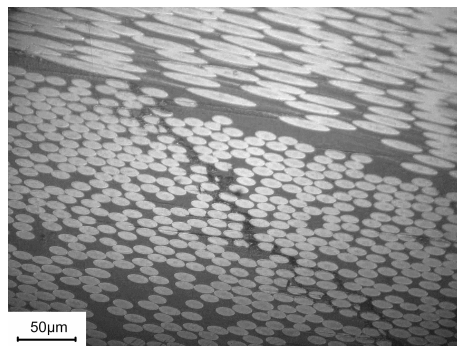


图6 典型的断续微裂纹

Fig. 6 Typical discontinuous micro-cracks

这种内应力引起的微裂纹沿着复合材料中薄弱的区域通道扩展,同时内应力得到释放直至达到平衡,由于裂纹扩展的通道主要为相对薄弱的基体树脂,也就是说,裂纹难以通过切断增强纤维扩展,复合材料的铺层较为复杂,当裂纹遇到与其扩展方向垂直的纤维束时就会受到强烈抑制,不利于微裂纹跨铺层扩展,因此,内应力引起的微裂纹通常较为细小,在应力集中区域附近放射状分布。由于这些微裂纹不在同一深度,无损检测时没有明显的分层波,通常被判

为疏松缺陷。

### 2.2.3 纤维屈曲及树脂分布不均匀的影响

除高孔隙率形成的疏松缺陷之外,还有多种因素可能引起入射超声波的损耗,例如,纤维屈曲、局部树脂分布不均匀等<sup>[7]</sup>。

该产品接头实心区域设计要求缠绕铺层,所有0°纤维均需要绕过接头中心的芯轴,这样就不可避免的出现纤维的屈曲(图7)以及局部的树脂不均匀分布(图8)。

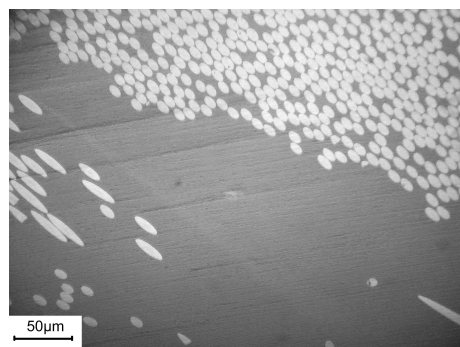


图7 典型的纤维屈曲现象

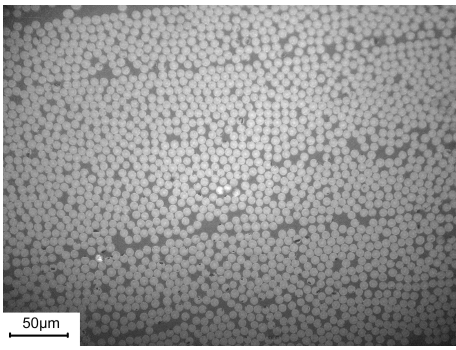
Fig. 7 Typical fiber buckling deformation

此外,产品厚度较大也是容易出现纤维屈曲和分布不均的原因。首先,产品厚度大,固化过程中的绝对出胶量就大,大量的树脂流动带动纤维偏离理论位置;其次,产品厚度大且有变化,在固化升温过程中,型腔内的预浸料温度不均匀,黏度及流动性的差异使预浸料在预压的作用下发生不规则流动。这类纤维屈曲和树脂不均匀分布现象在处在缠绕区域的各个区域的金相试样观测面内均存在非常明显的反映。图9中灰度越大说明超声穿透法检测的透射波波强越小,也就是说超声波的损耗越大,图中的河流状灰度纹路与缠绕铺层的区域及方向基本一致,说明缠绕

工艺的预浸料褶皱会使入射超声波产生较大的衰减。



(a) 局部树脂聚集



(b) 局部纤维聚集

图 8 典型的纤维不均匀分布

Fig. 8 Typical unevenly distributed fibers

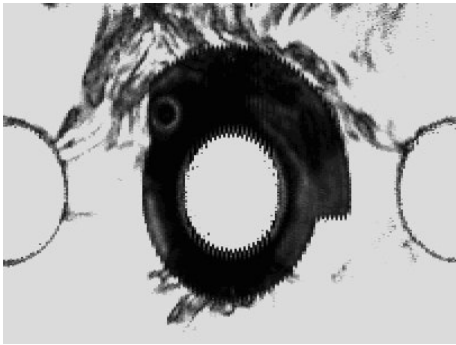


图 9 超声穿透法检测灰度图

Fig. 9 Grey scale image of ultrasonic penetrating testing

### 3 结论

金相试样观察结果表明,接头实心区域中的无损检测显示异常区域;

(1)所有观察面的孔隙率均较低;

(2)无损检测时的波损耗主要是由纤维的屈曲、局部不均匀分布造成的;

(3)不规整的铺层在固化内应力的作用下会在复合材料内部产生微裂纹,这种微裂纹对超声波的损耗也有一定贡献。

### 参考文献

- [1] 吴明复. 纤维增强复合材料的应用及其缺陷检测[J]. 航天工艺,1998(1):41
- [2] 陈以方,骆巍,陈玉宝,等. 复合材料的特征扫描成像检测[J]. 无损检测,2001,23(10):427~431
- [3] 西拉德J主编,陈积懋,余南廷译. 超声检测新技术[M]. 北京:科学出版社,2001:427-431
- [4] 赵建华,罗明,等. 超声波喷水穿透法在先进复合材料检测中的应用[J]. 宇航材料工艺,2012,42(4):105~108
- [5] 刘松平,刘霏霏. 快速无损检测方法与发展趋势[J]. 航空制造技术,2005(11):40-43
- [6] 耿荣生. 更快、更可靠、更直观——第16届世界无损检测会议综述[J]. 无损检测,2004,26(11):567
- [7] 史亦韦. 超声检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005

(编辑 任涛)