

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.11.019

基于重叠预埋物的超声纵向精度检测方法

傅天航,刘松平,李乐刚

(中国航空制造技术研究院复合材料技术中心,北京 101300)

摘要:碳纤维增强复合材料超声无损检测中,要求超声检测仪搭配超声换能器使用时在超声纵向精度能够达到 1 层预浸料的厚度。为了测试超声检测仪搭配超声换能器使用时的超声纵向精度,提出了一种基于内嵌重叠预埋物检测块的超声纵向精度检测方法。采用此方法,测试了 3 种型号超声检测仪搭配 3 种型号超声换能器使用时的超声纵向精度和超声脉冲周期数。测试结果表明, FCC-D-1 超声检测仪搭配 FJ-1 超声换能器使用时具有最好的超声纵向精度(1 层预浸料厚度,约为 0.13 mm)和超声脉冲周期数(1 周)。

关键词:碳纤维增强复合材料;超声;无损检测;超声纵向精度

中图分类号: V258+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)11-0095-07

Ultrasonic Longitudinal Accuracy Testing Method Based on Overlapped Inserts

Fu Tianhang, Liu Songping, Li Legang

(AVIC Manufacturing Technology Institute, Composite Technology Center, Beijing 101300, China)

Abstract : In the ultrasonic nondestructive testing of carbon fiber reinforced composites, it is required that the ultrasonic longitudinal accuracy of the ultrasonic detector with ultrasonic transducer can reach the thickness of one layer of prepreg. In order to test the ultrasonic longitudinal accuracy of ultrasonic detector with ultrasonic transducer, a testing method based on a test block with overlapped inserts is proposed. By using this testing method, the ultrasonic longitudinal accuracy and the number of ultrasonic pulse periods of three types of ultrasonic detectors with three types of ultrasonic transducers are tested. The test results show that the FCC-D-1 ultrasonic detector with FJ-1 ultrasonic transducer has the best ultrasonic longitudinal accuracy (thickness of 1 layer of prepreg, about 0.13 mm) and the number of ultrasonic pulse cycles (1 cycle).

Keywords : carbon fiber reinforced composites ; ultrasonic ; nondestructive testing ; ultrasonic longitudinal accuracy

超声检测是一门综合技术,集传感器技术、信号处理技术、模式识别和图像显示等技术于一体,已广泛应用于医疗、交通、航空航天、冶金等领域^[1]。在超声检测技术众多应用领域中,超声无损检测技术一直都是研究的热点,是工业生产中保证产品质量与使用性能的重要手段。当今世界各发达国家都越来越重视超声无损检测技术的发展。国外无损检测的文献资料中,有关超声无损检测内容的比例约占 45%^[2]。

近些年,我国在飞机制造领域有了很大进展,突破性成果是碳纤维增强复合材料在飞机结构上大

量应用,这也是衡量飞机先进程度的重要指标。与金属结构相比,碳纤维增强复合材料(CFRC)的强度-质量比更高,可大大降低飞机质量^[3-6]。具有不同检测灵敏度的多种无损检测方法可用于 CFRC 无损检测与评价,如涡流^[7]、X 射线^[8-9]、超声^[10-14]、声发射^[15]、红外热成像^[16]。对于 CFRC,在众多无损检测方法中,超声无损检测是最有效和应用最广的检测方法^[17-22]。超声无损检测是使用超声换能器产生超声波,超声波将传播并与介质相互作用,会因缺陷、分层或界面分离引起的材料密度变化而被反射,从而实现超声无损检测。

通信作者: 傅天航,工程师,主要从事复合材料无损检测研究 E-mail : fu_19860805@163.com

收稿日期: 2020-09-07

引用格式: 傅天航,刘松平,李乐刚. 基于重叠预埋物的超声纵向精度检测方法 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(11):95-101.

Fu Tianhang, Liu Songping, Li Legang. Ultrasonic longitudinal accuracy testing method based on overlapped inserts[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11):95-101.

超声无损检测过程中,需要超声检测仪和超声换能器匹配使用,匹配后的检测能力直接影响CFRC的内部质量和使用安全。因此,国内外针对超声检测仪和超声换能器,发布了相应的标准用于测试检测能力。国内如《JB/T 9214-2010 无损检测 A 型脉冲反射式超声检测系统工作性能测试方法》、《JJG 746 超声探伤仪检定规程》、《GB/T 18694-2002 无损检测超声检验探头及其声场的表征》、《GB/T 11345-2013 焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定》等。国外如《ASTM E317-16 不使用电子测量仪器评估超声脉冲回波检测仪器和系统性能特性的标准操作规程》等。

超声纵向精度是指分辨超声波传播方向上两个缺陷的能力。对于CFRC,内部为层结构,每层厚度约为0.13 mm,常见的分层、孔隙和夹杂等缺陷一般位于层与层之间。因此,对超声检测仪搭配超声换能器使用时的超声纵向精度有很高的要求,需能够分辨两个相邻铺层的缺陷,即超声纵向精度能够达到单层预浸料厚度。上述这些标准均使用专用的电子仪器或金属试块,但CFRC在材料性质、成型工艺、成品制作状态、几何尺寸加工以及无损检测要求等方面均与金属材料有很大的不同,使用上述标准进行的测试无法代表所使用的超声检测仪和超声换能器在CFRP中的检测能力。针对此问题,笔者提出了一种专门用于CFRC超声无损检测仪纵向检测精度的阶梯式嵌入物的CFRC试块,并基于此CFRC试块,测了不同超声检测仪搭配不同超声换能器情况下的超声纵向精度和超声脉冲周期数。

1 声学检测原理

1.1 声学原理

超声波是一种机械波,是机械振动在介质中的传播,在超声波传播路径上的质点,会在超声波到达时在平衡位置附近振动。超声波在固体中进行传播时,会由于介质的粘滞性造成质点之间的内摩擦,从而使一部分声能转变为热能,造成声波的衰减;同时,超声波在固体中传播也满足反射和透射原理。超声无损检测主要是基于超声波在液体或固体中传播时发生的反射和透射特性,通过测量介质中某一点的声压实现缺陷的检测。

如图1所示,超声波在入射到两介质界面时,会产生反射和透射。

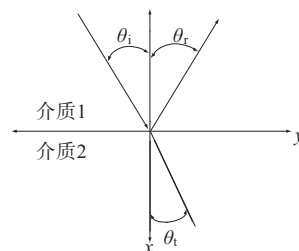


图1 超声波的入射、反射和折射

当入射角为 θ_i 时,入射声压沿 x 方向的分量 P_i 为:

$$P_i = P_{ia} e^{j(\omega t - \frac{\omega}{C_1} x \cos \theta_i - \frac{\omega}{C_1} y \sin \theta_i)} \quad (1)$$

则反射声压沿方向的分量为:

$$P_r = P_{ra} e^{j(\omega t + \frac{\omega}{C_1} x \cos \theta_r - \frac{\omega}{C_1} y \sin \theta_r)} \quad (2)$$

则透射声压沿方向的分量为:

$$P_t = P_{ta} e^{j(\omega t - \frac{\omega}{C_2} x \cos \theta_t - \frac{\omega}{C_2} y \sin \theta_t)} \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中, ω 为声源简谐振动的圆频率; C_1 为介质1中的声速, C_2 为介质2中的声速。

由此可知两介质分界面上反射声压和入射声压之比 r_p 为:

$$r_p = \frac{P_{ra}}{P_{ia}} = \frac{\rho_2 c_2 \cos \theta_i - \rho_1 c_1 \cos \theta_t}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t} \quad (4)$$

两介质分界面上透射声压和入射声压之比 t_p 为:

$$t_p = \frac{P_{ta}}{P_{ia}} = \frac{2\rho_2 c_2 \cos \theta_i}{\rho_2 c_2 \cos \theta_i + \rho_1 c_1 \cos \theta_t} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知,反射声压和透射声压仅与声波的入射角度、透射角度以及介质1的密度、介质2密度、介质1中的声速、介质2中的声速有关。

1.2 CFRC 声学特性分析

CFRC为层结构,缺陷延伸方向基本与表面平行。因此,在进行超声无损检测时,通常要求入射波垂直于CFRC表面,即 $\theta_i = \theta_t = 0$ 。则式(4)、(5)可简化为:

$$r_p = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (6)$$

$$t_p = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \quad (7)$$

由此可知,反射声压强度和透射声压强度仅与两种介质的密度和声速有关。

CFRC中常见的缺陷为分层,其密度与空气接近,即 $\rho_2 \approx 340 \text{ m/s}$, $c_2 \approx 1.29 \text{ kg/m}^3$ 。CFRC密度 $\rho_1 \approx 1.60 \text{ kg/m}^3$,声速 $c_1 \approx 3000 \text{ m/s}$,则超声波传播到CFRP与缺陷的界面时:

$$r_p = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \approx -0.83 \quad (8)$$

这表示入射声波会反射大约 83%。式 (8) 中的负号表示缺陷反射回波信号的相位与入射声波相位相反。

因此,可在 CFRC 内预埋密度和声速与 CFRC 差异很大的异物,用于模拟 CFRC 中分层缺陷,从而对超声检测仪及超声换能器的检测性能进行评估。

2 超声纵向精度检测方法

针对 CFRC 的特点,设计了一种内嵌重叠预埋物的检测试块,用于超声纵向精度的检测,如图 2 所示。试块长 $L=100$ mm,宽 $W=80$ mm,厚度 $H=5$ mm。

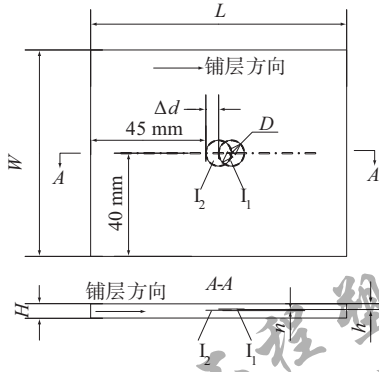


图 2 检测试块设计图

试块中预埋了 2 个部分重叠的圆形预埋物 I_1 和 I_2 ,直径 $D=10$ mm,预埋物 I_1 和 I_2 在垂直于铺层方向间隔层数 $n=1$,预埋物 I_1 和 I_2 在平行于铺层方向间隔 $\Delta d=D/2=5$ mm。预埋物 I_1 距试块表面的距离。

根据上述 CFRC 声学检测原理,移动超声换能器至任意预埋物 I_1 上方,使预埋物 I_1 的反射回波信号 R_1 幅值达到最大;调节超声检测仪增益,使预埋物 I_1 的反射回波信号 R_1 幅值达到满屏刻度的 80%;向 I_2 方向缓慢移动超声换能器,使预埋物 I_1 和 I_2 反射回波信号 R_1 和 R_2 幅值相近且达到最高,如图 3 所示。图 3 中, N 为试块表面回波信号, F 为底面回波信号。

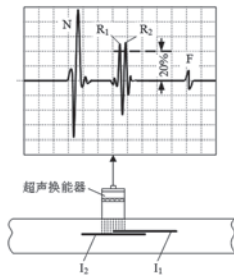


图 3 超声纵向精度检测方法

当预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 在满屏刻度 20% 位置与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 分离,视为能够区分预埋物 I_1 和 I_2 。此时,若 h_1 为 CFRC 单层厚度,则超声纵向精度 A_L 为:

$$A_L = h_1 \times n = h_1 \quad (9)$$

当预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 在满屏刻度 20% 位置没有与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 分离,视为无法区分预埋物 I_1 和 I_2 ,则超声检测仪及匹配使用的超声换能器的超声纵向精度无法达到一层预浸料厚度,不建议进行 CFRC 的超声无损检测。

3 超声纵向精度检测条件

3.1 超声检测仪

使用的超声检测仪为中航复合材料有限责任公司生产的 FCC-B-1 超声检测仪 (如图 4 所示) 和 FCC-D-1 超声检测仪 (如图 5 所示),以及英国声纳公司生产的 700M 超声检测仪 (如图 6 所示)。其中, FCC-B-1 为模拟式超声检测仪, FCC-D-1 和 700M 为数字式超声检测仪。



图 4 FCC-B-1 超声检测仪



图 5 FCC-D-1 超声检测仪



图 6 M 超声检测仪

3.2 超声换能器

超声换能器为中航复合材料有限责任公司生产的 FJ-1 超声换能器和 FJ-1W 超声换能器以及美国通用电气公司生产的 ALPHA 超声换能器,见图 7。其中, FJ-1 和 ALPHA 频率为 5MHz, FJ-1W 频率为 2.25MHz。



型号: a—FJ-1 ; a—FJ-1W ; a—ALPHA

图7 超声换能器

3.3 检测试块

根据前述内容制备了检测试块,如图8所示。材料为碳纤维复合材料,单层厚度 $h_1=0.13$ mm。

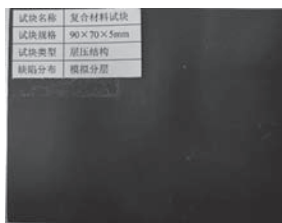


图8 检测试块

4 超声纵向精度检测与数据分析

4.1 超声纵向精度检测

(1) FCC-B-1 搭配 FJ-1 检测结果。

使用 FCC-B-1 超声检测仪搭配 FJ-1 超声换能器的典型超声 A- 显示信号如图9所示。图9中, R_1 为预埋物 I_1 的反射回波信号, R_2 为预埋物 I_2 的反射回波信号。从图9可以看到,预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 在满屏刻度 20% 位置明显与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 分离,根据式(9)可得 FCC-B-1 超声检测仪搭配 FJ-1 超声换能器时的超声纵向精度为:

$$A_{LBF}=h_1 \times n=0.13 \times 1=0.13 \text{ mm} \quad (10)$$

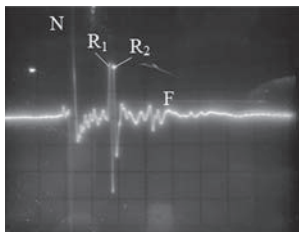


图9 FCC-B-1 / FJ-1 典型超声 A- 显示信号

(2) FCC-B-1 搭配 ALPHA 检测结果。

使用 FCC-B-1 超声检测仪搭配 ALPHA 超声换能器的典型超声 A- 显示信号如图10所示。图10中, R_1 为预埋物 I_1 的反射回波信号, R_2 为预埋物 I_2 的反射回波信号。从图10中可以看到,预埋物 I_1

反射回波信号 R_1 在满屏刻度 20% 位置明显与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 没有分离,则 FCC-B-1 超声检测仪搭配 ALPHA 超声换能器的超声纵向精度没有达到一层预浸料厚度。

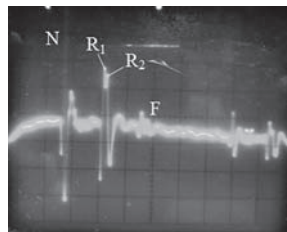


图10 FCC-B-1 / ALPHA 典型超声 A- 显示信号

(3) FCC-B-1 搭配 FJ-1W 检测结果。

使用 FCC-B-1 超声检测仪搭配 FJ-1W 超声换能器的典型超声 A- 显示信号如图11所示。

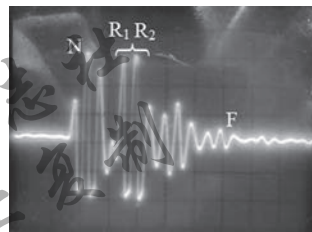


图11 FCC-B-1 / FJ-1W 典型超声 A- 显示信号

从图11可以看到,预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 已经与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 基本重合,无法区分 R_1 和 R_2 ,则 FCC-B-1 超声检测仪搭配 FJ-1W 超声换能器的超声纵向精度没有达到一层预浸料厚度。

(4) FCC-D-1 搭配 FJ-1 检测结果。

使用 FCC-D-1 超声检测仪搭配 FJ-1 超声换能器的典型超声 A- 显示信号如图12所示。

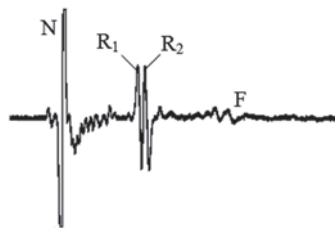


图12 FCC-D-1 / FJ-1 典型超声 A- 显示信号

图12中, R_1 为预埋物 I_1 的反射回波信号, R_2 为预埋物 I_2 的反射回波信号。从图12可以看到,预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 在满屏刻度 20% 位置明显与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 分离,根据式(9)可得 FCC-D-1 超声检测仪搭配 FJ-1 超声换能器时的超声纵向精度为:

$$A_{LDF}=h_1 \times n=0.13 \times 1=0.13 \text{ mm} \quad (11)$$

(5) FCC-D-1 搭配 ALPHA 检测结果。

使用 FCC-D-1 超声检测仪搭配 ALPHA 超声换能器的典型超声 A- 显示信号如图 13 所示。图 13 中, R_1 为预埋物 I_1 的反射回波信号, R_2 为预埋物 I_2 的反射回波信号。从图 13 中可以看到,预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 在满屏刻度 20% 位置明显与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 分离,根据式 (9) 可得 FCC-D-1 超声检测仪搭配 ALPHA 超声换能器时的超声纵向精度为:

$$A_{LDA}=h_1 \times n=0.13 \times 1=0.13 \text{ mm} \quad (12)$$

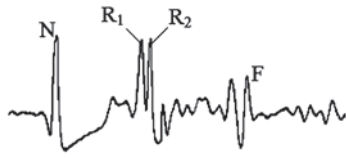


图 13 FCC-D-1 / FJ-1 典型超声 A- 显示信号

(6) FCC-D-1 搭配 FJ-1W 检测结果。

使用 FCC-D-1 超声检测仪搭配 FJ-1W 超声换能器的典型超声 A- 显示信号如图 14 所示。

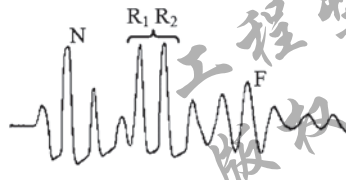


图 14 FCC-D-1 / FJ-1W 典型超声 A- 显示信号

从图 14 可看到,预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 已经与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 基本重合,无法区分 R_1 和 R_2 ,FCC-D-1 超声检测仪搭配 FJ-1W 超声换能器的超声纵向精度没有达到一层预浸料厚度。

(7) 700M 搭配 FJ-1 检测结果。

使用 700M 超声检测仪搭配 FJ-1 超声换能器的典型超声 A- 显示信号如图 15 所示。

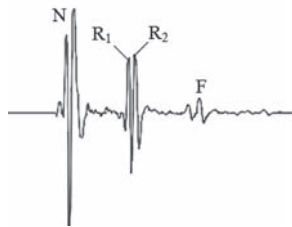


图 15 M / FJ-1 典型超声 A- 显示信号

图 15 中, R_1 为预埋物 I_1 的反射回波信号, R_2 为预埋物 I_2 的反射回波信号。从图 15 可以看到,预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 在满屏刻度 20% 位置明

显与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 分离,根据式 (9) 可得 700M 超声检测仪搭配 FJ-1 超声换能器时的超声纵向精度为:

$$A_{LMF}=h_1 \times n=0.13 \times 1=0.13 \text{ mm} \quad (13)$$

(8) 700M 搭配 ALPHA 检测结果。

使用 700M 超声检测仪搭配 ALPHA 超声换能器的典型超声 A- 显示信号如图 16 所示。图 16 中, R_1 为预埋物 I_1 的反射回波信号, R_2 为预埋物 I_2 的反射回波信号。从图 16 中可以看到,预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 在满屏刻度 20% 位置明显与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 分离,根据式 (9) 可得 FCC-D-1 超声检测仪搭配 ALPHA 超声换能器时的超声纵向精度为:

$$A_{LMA}=h_1 \times n=0.13 \times 1=0.13 \text{ mm} \quad (14)$$

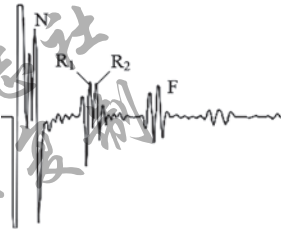


图 16 M / ALPHA 典型超声 A- 显示信号

(9) 700M 搭配 FJ-1W 检测结果。

使用 700M 超声检测仪搭配 FJ-1W 超声换能器的典型超声 A- 显示信号如图 17 所示。从图 17 可以看到,预埋物 I_1 反射回波信号 R_1 已经与预埋物 I_2 反射回波信号 R_2 基本重合,无法区分 R_1 和 R_2 ,则 700M 超声检测仪搭配 FJ-1W 超声换能器的超声纵向精度没有达到一层预浸料厚度。

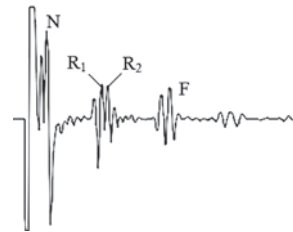


图 17 M / FJ-1W 典型超声 A- 显示信号

4.2 数据分析

表 1 是对不同超声检测仪搭配不同超声换能器进行超声纵向精度检测结果的对比。从表 1 可以看出, FJ-1 超声换能器具有 0.13 mm 的超声纵向检测精度,并且搭配 3 种型号的超声检测仪均能够达到 0.13 mm 的超声纵向检测精度。FJ-1W 超声换能器搭配 3 种超声检测仪的超声纵向检测精度均大于 0.13 mm,无法有效区分相邻两层的缺陷。

表1 超声纵向精度检测结果对比

超声检测仪类型	FJ-1	ALPHA	FJ-1W
FCC-B-1	0.13	> 0.13	> 0.13
FCC-D-1	0.13	0.13	> 0.13
700M	0.13	0.13	> 0.13

观察图9~图17可以发现,超声脉冲宽度也会影响超声纵向检测精度。超声脉冲宽度需要通过专门的电子仪器进行测量,但超声脉冲宽度最直观的表现形式是超声脉冲周期数。图18为通过分析图9~图11得到的FCC-B-1超声检测仪搭配不同超声换能器的超声脉冲周期数。

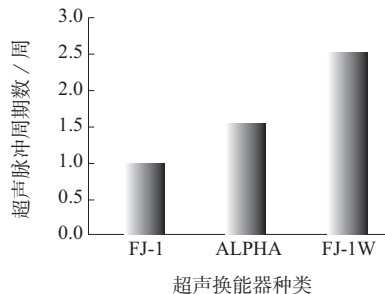


图18 FCC-B-1 超声脉冲周期数

图19为通过分析图12~图14得到的FCC-D-1超声检测仪搭配不同超声换能器的超声脉冲周期数。

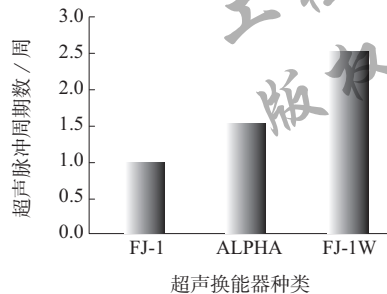


图19 FCC-D-1 超声脉冲周期数

图20为通过分析图15~图17得到的700M超声检测仪搭配不同超声换能器的超声脉冲周期数。

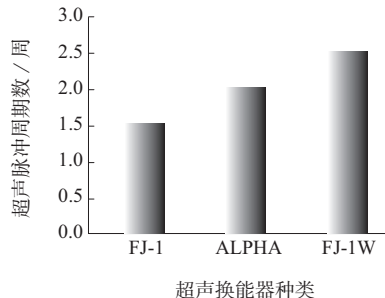


图20 700M 超声脉冲周期数

通过图18~图20中的数据可知,FCC-B-1和FCC-D-1超声检测仪搭配FJ-1超声换能器具有很

好的超声脉冲周期数,能够达到1个周期,因此在延超声波传播方向具有很好的检测能力。FJ-1W超声换能器搭配3种超声检测仪的超声脉冲周期数均在2周以上,因此在延超声波传播方向的检测能力较弱。这和超声纵向检测精度的试验结果一致。

5 结论

针对CFRC的材料特点 and 无损检测要求,制备了一种专门用于超声纵向精度检测的试块,并使用该检测试块,依据笔者提出的超声纵向精度检测方法,测试了FCC-B-1、FCC-D-1和700M超声检测仪搭配FJ-1、ALPHA和FJ-1W超声换能器的超声纵向精度。测试结果表明:

(1) FJ-1超声换能器搭配3种超声检测仪均能达到0.13 mm的超声纵向精度和1周的超声脉冲周期数;

(2) FCC-D-1和700M超声检测仪搭配FJ-1和ALPHA超声换能器时能够达到0.13 mm的超声纵向精度;

(3) FJ-1W超声换能器搭配3种超声检测时均无法达到0.13 mm的超声纵向精度,并且超声脉冲周期数均大于2周,无法分辨两相邻层的缺陷;

(4) 综合超声纵向精度的测试结果和超声脉冲周期数的统计结果,FCC-D-1超声检测仪搭配FJ-1超声换能器时具有最好的检测性能。

参考文献

- [1] 梁宏宝,朱安庆,赵玲. 超声检测技术的最新研究与应用[J]. 无损检测,2008,30(3):174-177.
Liang Hongbao, Zhu Anqing, Zhao Ling. The newly research and application of ultrasonic testing technique[J]. Nondestructive Testing,2008,30(3):174-177.
- [2] 罗雄彪,陈铁群. 超声无损检测的发展趋势[J]. 无损检测,2005,27(3):148-152.
Luo Xiongbiao, Chen Tiejun. Development trends of ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing,2005,27(3):148-152.
- [3] ABRATE S.Impact on laminated composite materials[J]. Applied Mechanics Reviews,1991,44(4):155-190.
- [4] ABRATE S. Impact on laminated composites: Recent advances. [J]. Applied Mechanics Review,1994,47(11):517-544.
- [5] Cantwell W J, Morton J. The impact resistance of composite materials-a review[J]. Composites,1991,22(5):347-362.
- [6] Aymerich F, Meili S. Ultrasonic evaluation of matrix damage in impacted composite laminates[J]. Composites Part B:Engineering,2000,31(1):1-6.
- [7] Mizukami K, Mizutani Y, Todoroki A, et al. Detection of in-

- plane and out-of-plane fiber waviness in unidirectional carbon fiber reinforced composites using eddy current testing[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 86:84–94.
- [8] Garcea S C, Wang Y, Withers P J. X-ray computed tomography of polymer composites [J]. Composites Science and Technology, 2018, 156:305–319.
- [9] Nikishkov Y, Airolidi L, Makeev A. Measurement of voids in composites by X-ray Computed Tomography[J]. Composites Science and Technology, 2013, 89:89–97.
- [10] Chakrapani S K, Dayal V. The interaction of Rayleigh waves with delaminations in composite laminates[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2014, 135(5):2 646–2 653.
- [11] Marhenke T, Neuenschwander J, Furrer R, et al. Modeling of delamination detection utilizing air-coupled ultrasound in wood-based composites [J]. NDT & E International, 2018, 99:1–12.
- [12] Karabutov A A, Podymova N B, Belyaev I. The influence of porosity on ultrasound attenuation in carbon fiber reinforced plastic composites using the laser-ultrasound spectroscopy[J]. Acoustical Physics, 2013, 59(6):667–673.
- [13] Pain D, Drinkwater B W. Detection of fibre waviness using ultrasonic array scattering data[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(3):215–227.
- [14] Smith R A. Use of 3D ultrasound data sets to map the localised properties of fibre-reinforced composites[D]. Nottingham:University of Nottingham, 2010.
- [15] 于金涛,丁明理. 复合材料声发射信号传播特性试验研究 [J]. 电机与控制学报, 2012(8):107–112.
- Yu Jintao, Ding Mingli. Experimental research for propagation of acoustic emission signals across composites[J]. Electric Machines and Control, 2012(8):107–112.
- [16] 孟令民,周克印,王崇高,等. Z-pin 增强复合材料层合板缺陷的红外检测技术研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2019(5):31–37.
- Meng Lingmin, Zhou Keyin, Wang Chonggao, et al. Research on the infrared testing technology for defect in the Z-pin reinforced composite laminates[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2019(5):31–37.
- [17] Su Zhongqing, Zhou Chao, Hong Ming, et al. Acousto-ultrasonic-based fatigue damage characterization:linear versus nonlinear signal features[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45(1), 225–239.
- [18] Li C, Pain D, Wilcox P D, et al. Imaging composite material using ultrasonic arrays [J]. NDT & E International, 2013, 53, 8–17.
- [19] Caminero M Á, García-Moreno I, Rogriguez G P, et al. Internal damage evaluation of composite structures using phased array ultrasonic technique:Impact damage assessment in CFRP and 3D printed reinforced composites[J]. Composites Part B, 2019, 165, 131–142.
- [20] Dattoma V, Nobile R, Panella F W, et al. Optimization and comparison of ultrasonic techniques for NDT control of composite material elements[J]. Procedia Structural Integrity, 2018(12):9–18.
- [21] Amenabar I, Mendikute A, López-Ariza A, et al. Comparison and analysis of nondestructive testing techniques suitable for delamination inspection in wind turbine blades[J]. Composites Part B: Engineering, 42(5):1 298–1 305.
- [22] Asif M, Khan M A, Khan S Z, et al. Identification of an effective nondestructive technique for bond defect determination in laminate composites-A technical review[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(26):3 589–3 599.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2019 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会,共编辑、出版了 20 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术,以及文献综述、评论等,突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》,以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘,现以优惠价格(含邮费)销售,欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》,优惠价 400 元/套。

2. 2000 ~ 2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘,优惠价 300 元/盘。本光盘除收录 2000 ~ 2019 年 20 本《论文集》的全部内容外,还包括约 4 000 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址:山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位:《工程塑料应用》杂志社

邮 编:250031

电 话:(0531)85878223 85878057 85878278

传 真:(0531)85947355

银行汇款

户 名:山东非金属材料研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

帐 号:1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.net>