

引文格式: 刘菲菲, 周正干, 刘松平, 等. 复合材料结构修理高分辨率超声断面成像检测与缺陷评估 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(21): 24-31.
LIU Feifei, ZHOU Zhenggan, LIU Songping, et al. Cross-sectional imaging and defect evaluation of composite repairs using high-resolution ultrasonic technique[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(21): 24-31.

复合材料结构修理高分辨率超声断面成像检测与缺陷评估*

刘菲菲^{1,2}, 周正干¹, 刘松平^{2,3}, 杨玉森^{2,3}, 张连旺²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100191;

2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

3. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

[摘要] 针对碳纤维树脂基复合材料结构修理, 研究了一种高分辨率超声 (High-resolution ultrasonic, HU) 方法, 构建了 HU 检测系统, 设计制备了复合材料结构修理试件, 研究了修理区 HU 信号时域行为, 开展了系列复合材料结构修理 HU 断面可视化成像试验研究, 试验结果表明, 利用 HU 方法, 回波信号的质量、时域可分辨性均明显优于常规超声方法; 对于 4.5mm 厚碳纤维复合材料结构修理试件, 基于 HU 信号估测的特征尺寸评估结果与设计值接近 0 偏差; 利用 HU 断面成像及其图像灰度分布规律, 可以非常直观地揭示未修理区、修理区形貌、修理连接界面、修理区缺陷、修理区局部树脂、内部微结构等修理行为细节, 可以非常直观和清晰地检出复合材料结构修理区近表面一层和近底面一层及其中间深度位置的 $\phi 6\text{mm}$ 缺陷和局部树脂; 成像分辨率可达单个复合材料铺层厚度 (约 0.125mm)。从而为复合材料结构修理提供了一种具有很好的实际检测应用效果的可视化检测与评估方法。

关键词: 无损检测与评价; 复合材料; 高分辨率超声技术; 缺陷; 复合材料结构修理; 超声成像

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.21.024



刘菲菲

研究员, 主要研究方向为复合材料及焊接无损检测与评价技术、信号处理与可视化、智能化自动化检测技术及仪器设备研发与应用。

随着复合材料在航空航天等领域的广泛应用^[1-2], 复合材料无损检测的研究和应用受到高度关注。通常要求复合材料制件必须进行 100% 无损检测, 而超声是目前普遍采用的一种无损检测方法, 相关的文献报道也比较多, 包括超声 C 扫描检测方法^[3-5]、超声 Lamb 波^[6-8] 和导波检测方法研究^[9]、激光超声检测方法^[10] 等。但很少涉及复合材料修理检测与评估。

试验研究表明, 复合材料在长期受力情况下, 存在产生疲劳和分层的风险^[11-12]。因此, 随着复合材料结构在飞机上的大量使用和服役年限的增长, 复合材料结构损伤案例不断

增加, 复合材料结构修理已经成为业内的技术焦点。由于修理材料、修理工艺、环境条件等与制造阶段复合材料基体结构显著不同, 导致一些在复合材料结构制造环境条件下所研究和建立的检测方法、检测技术、缺陷表征方法、缺陷判据不能完全适用于复合材料修理检测。因此, 近年来, 复合材料结构修理无损检测与评定受到越来越多的关注。文献 [13-15] 介绍了利用红外热成像方法进行复合材料修理损伤的检测试验研究, 但这种检测方法需要复杂的热加载和精确地控制热加载量以及热加载的均匀性, 制件表面的颜色变化也容易

* 基金项目: 国家自然科学基金 (61571409, 60727001)。

产生伪指示,导致深层损伤和缺陷的检出能力非常受限,难以得到检出损伤或缺陷的准确定量定性方面的信息。Choi等^[16]针对复合材料蜂窝结构试样中冲击引起的分层损伤,研究了电子散斑干涉(Electronic speckle pattern interferometry, ESPI)检测方法对试样中分层损伤的可检性。文献[17]研究了GRP复合材料中冲击损伤ESPI可检性,也需要对被检测试样进行热或力加载,使损伤的存在能够引起试样表面可检出的面外位移或应变,缺陷检出效果强烈依赖加载和加载量的准确控制,但同样难以检出深层损伤和缺陷,难以实现检出损伤或缺陷的准确定量定性。利用低能量X射线方法,虽然可以很好地实现复合材料无损检测与缺陷评估^[18-19],但在修理条件下,通常不适合采用X射线检测方法,而且X射线方法对复合材料中的分层检出困难。文献[20]采用脉冲回波激光超声方法,研究了复合材料修理检测与缺陷评估的可检性,但激光超声在检测信号接收技术方面一直没能取得理想的突破,严重制约了这种方法的工程实用性研发与推进。文献[21-22]针对复合材料修理试样开展了Lamb波检测方面的试验研究,但由于飞机复合材料结构复杂的几何特征会带来复杂的导波模式转换,从而容易产生伪指示信号,影响缺陷的判别,Lamb波在复合材料中的衰减非常严重和较低的频率,明显制约了Lamb波的缺陷检出能力和导波在飞机复合材料结构及其修理中的实际检测应用。

综上,超声是一种非常适合复合材料及复合材料损伤与修理区检测的无损检测方法。但超声检测需要首先建立缺陷判据,为此,必须通过高质量的超声检测系统,在复合材料修理区形成高质量的超声信号,既要有足够的穿透能力,又要有很好的分辨率和很小的表面检测盲区。在复

合材料结构制造阶段,为了提高声波在复合材料中的穿透能力、规避超声检测盲区问题,可以采用穿透法和/或者适当降低检测频率,但这会降低入射声波对小缺陷的检出能力和检测分辨率,同时在修理阶段,通常超声穿透法不适用。因此,文献[4-5]介绍的一些面向制造阶段的复合材料结构超声检测方法,不适合复合材料结构修理检测,但为复合材料修理检测研究提供了方法参考。

针对碳纤维树脂基复合材料结构修理,研究了一种高分辨率超声(High-resolution ultrasonic, HU)检测方法,利用发射单元向被检测复合材料结构修理区发射高分辨率超声波,然后,接收来自修理区的超声回波,转换成高质量的超声信号,用于修理区检测与缺陷准确评估。基于HU方法,构建了高分辨率超声检测系统,设计制备了碳纤维复合材料层压结构修理试样,开展了系列的HU方法试验研究和HU断面成像试验研究,试验结果表明,利用HU方法,可以在复合材料修理试样中产生高质量的超声回波信号,极大地改善了检测信号的时域可分辨性、成像质量、分辨率和检测效果;利用HU断面成像,可以快速准确地揭示复合材料结构修理区断面修理行为细节,确定修理区的断面几何形貌、修理界面及其几何拓扑特征,揭示修理区不同

深度和位置的缺陷及其分布、修理区内部树脂及其分布行为、基体铺层行为等细节,实现了复合材料结构修理的准确检测与缺陷精细评估,从而为复合材料结构修理提供了一种非常适用的高分辨率超声可视化检测与评估方法。

HU方法与试件

1 检测方法和超声系统

在其他条件一定时,理论上,提高超声波的频率,有利于改进检测分辨率和减少表面检测盲区,如图1所示,对于频率为 f_n 的超声波,在单周条件下时,其时域占宽可近似地表示为:

$$t_n = \frac{1}{f_n} \quad (1)$$

图1中 Δh 表示近表面深度范围; t_n 表示声波信号单个周期时域占宽; t 表示声波传播时间;1表示入射声波信号;2表示来自试样表面的声波反射信号;3表示来自试样底面的声波反射信号;4表示来自试样近表面 Δh 内的缺陷回波信号。

当来自试样近表面深度范围 Δh 内的缺陷回波信号4正好位于来自试样表面的声波反射信号2的时域占宽范围 t_n 内时,会造成在时域范围内难以分辨回波信号2和4,从而影响 Δh 范围内的缺陷识别与检出,同样的情况在试样的底面也会出现,由式(1)和图1可知, Δh 可近似表示为:

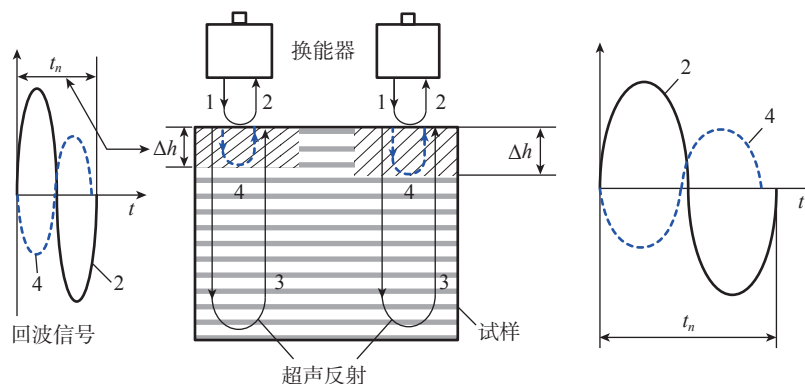


图1 反射声波信号的频率、时域占宽对表面盲区、分辨率的影响

Fig.1 Effect of echo signal frequency and time-domain width on ultrasonic detection surface dead zone and resolution

$$\Delta h = \frac{1}{2} v \times t_n \times N \quad (2)$$

其中, v 为试样中的声速。由式(1)、(2)和图1可知,在 $N=1$ 的条件下,考虑到当来自试样近表面 Δh 内的缺陷回波信号4与来自试样表面的声波反射信号2出现半波长叠加时的可分辨性时,时域上具有可分辨性,参见图1,这里可以近似地取

$$\Delta h = 0.25\lambda N \quad (3)$$

其中, λ 为声波在复合材料中的波长; N 为回波信号时域周期数,无量纲。

在非常极限情况下,取 $N=1$,则表面盲区约为入射声波的 $1/4$ 个波长,例如,以单个铺层厚度约 0.125 mm 碳纤维预浸料复合材料层压结构和实际测量的声速 3106 m/s 为例,如果要达到分辨出近表面单个铺层深度的缺陷,即 $\Delta h \approx 0.125\text{ mm}$,则由式(3)可知,所选用的超声波波长约为 0.25 mm ,对应频率约为 6.2 MHz 。但频率的提高会显著增加声衰减,严重时会造成超声不可检。因此,在其他条件一定时,减少 N 是提高超声在复合材料中的检测分辨率、降低盲区的重要途径。

为此,研究提出了一种 $N=1$ 的高分辨率超声检测方法,实现复合材料结构修理的高分辨率超声可视化检测与评估。超声检测系统采用中国航空制造技术研究院/中航复合材料有限责任公司刘松平、刘菲菲团队研制的 CUS-21J 超声扫描成像检测系统,构成试验研究用的复合材料

修理高分辨率超声检测系统,它主要由超声单元、信号处理单元、扫描机构、扫描控制单元、计算机单元和 FJ-1 换能器等构成,如图2所示(其中对1、2、3、4的描述同图1),其中,通过 FJ-1 换能器和超声单元产生单个脉冲周期的高分辨率波形信号。通过手动或自动扫描方式移动 FJ-1 换能器,实现对修理区不同位置的超声信号记录和采集以及超声成像,换能器与试样表面之间可以选择水膜耦合,也可以采用喷水或局部液浸耦合,可以实现复合材料结构修理的手动和自动扫描检测。其中超声单元、信号处理单元可以构成便携的超声仪器,也可以独立地用于外场复合材料结构修理的超声手动扫查检测与评估。

2 试件

复合材料结构修理试件采用多向层压结构,试件中含有修理区,在修理区预置有模拟分层,采用手工铺贴,热压罐固化成型,试件的材料为中航复合材料有限责任公司生产的 9916-II/CCF300 预浸料,厚度约 4.5 mm ,试件大小约 $350\text{ mm} \times 320\text{ mm}$; 试件的修理补片用材料为 TC350-1/IM7,构成与基体结构相一致的多向铺层层压结构,其设计厚度约 4.5 mm (36个铺层),修理用胶膜厚度约 0.13 mm 。首先在试件中心位置制备带坡口的圆锥形修理区,其一侧的直径 ϕ_1 约 280 mm ,另一侧的直径 ϕ_2 约 100 mm ,如图3所示,然后,按照修理

区的大小和形状制备补片,在基体修理区锥形破口表面放置有胶膜,使补片通过胶膜与基体结构保持贴合,最后,将整个试件一起采用真空袋密封进行固化,在补片、补片中近表面一个铺层位置 F_1 、近底面一个铺层位置 F_3 和中间深度位置 F_2 分布预置有 $\phi 6\text{ mm}$ 的分层缺陷。

试验结果与讨论

1 HU 信号时域表征与分析

图4是一组来自复合材料修理试件中4个不同部位检测位置点的典型超声回波信号,采用 NU、HU 两种模式,对应频率均为 5 MHz 。图4中, v_1^F 、 v_1^B 是在 HU 模式下依次来自试件非修理区表面、底面及底面的反射回波信号, $v_1^{B'}$ 是 v_1^B 的二次反射; v_2^F 、 v_2^D 、 v_2^B 是在 HU 模式下分别来自试件修理补片中心区表面、近表面和底面的反射回波信号; v_3^F 、 v_3^D 、 v_3^B 是 HU 模式下分别来自试件修理连接界面区表面、近表面和底面的反射回波信号; v_4^F 、 v_4^B 是在 NU 模式下依次来自试件非修理区表面、底面及底面的反射回波信号, $v_4^{B'}$ 是 v_4^B 的二次反射回波信号。

图4(a)~(c)是 HU 模式下的超声结果,其中图4(a)是来自修理试件中非修理区的典型超声回波信号 u_1^r (v_1^F , v_1^B , $v_1^{B'}$); 图4(b)是来自修理试件中修理补片中心区的典型超声回波信号 u_2^r (v_2^F , v_2^D , v_2^B); 图4

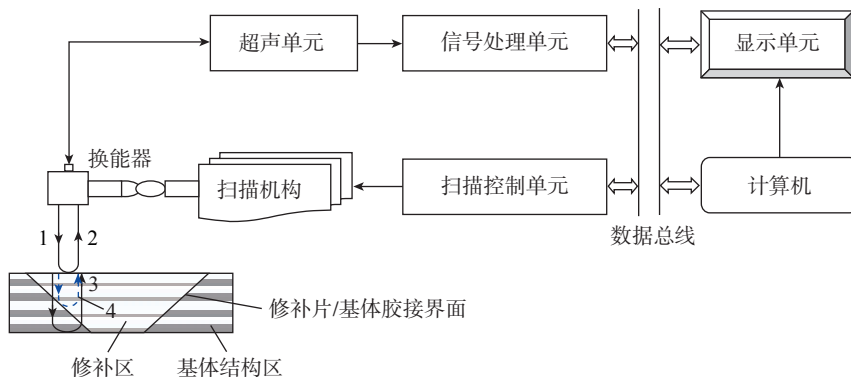


图2 HU 超声检测系统基本构成

Fig.2 Scheme of HU set-up

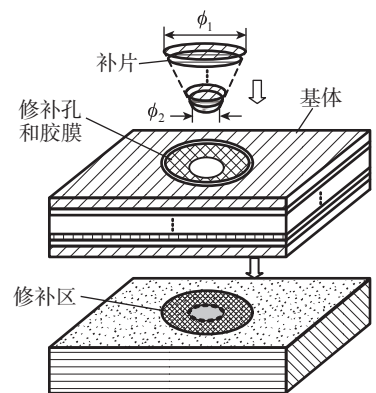


图3 复合材料试件和修理试件的结构示意图

Fig.3 Illustration of repair specimen

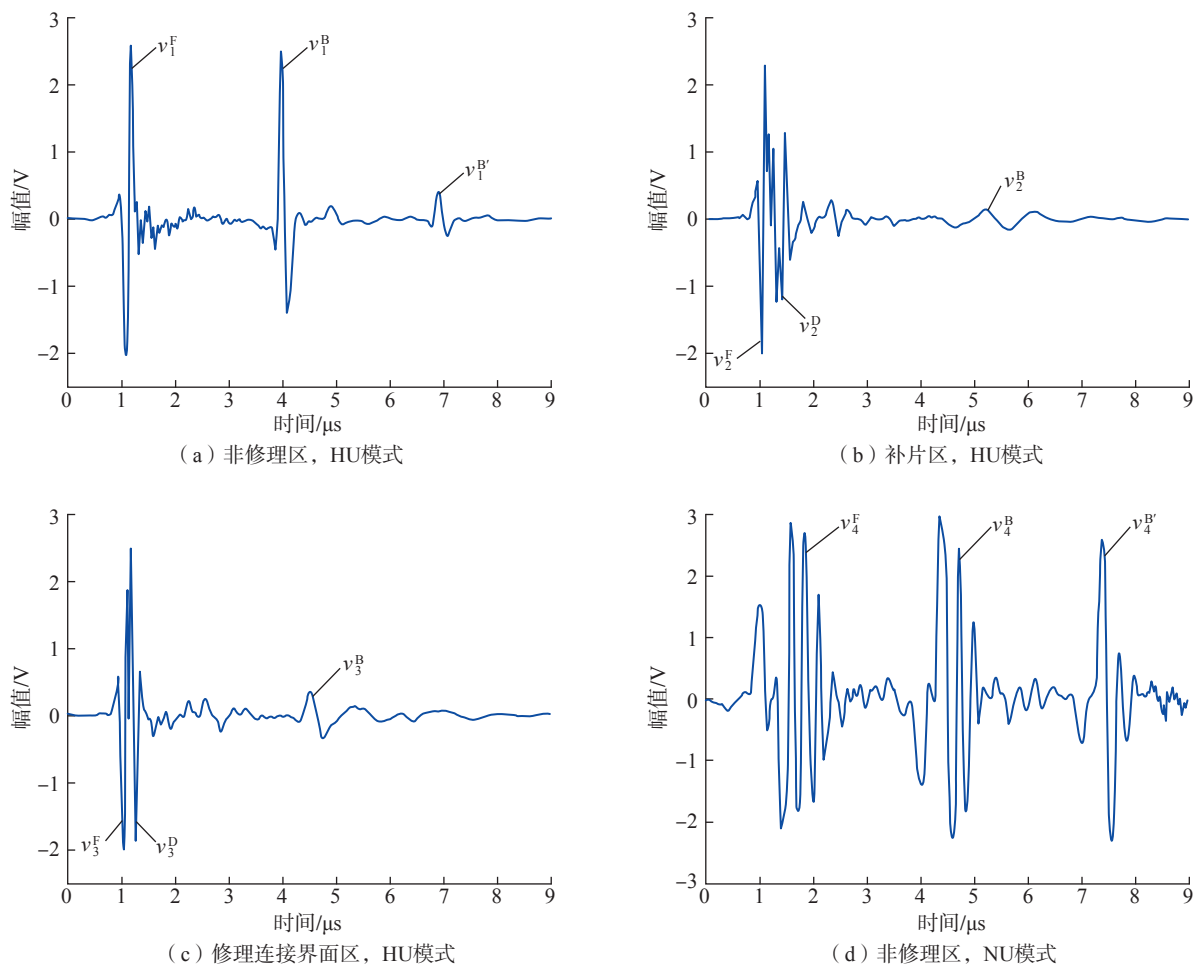


图4 来自复合材料修理试件的HU和NU超声回波信号特征比较

Fig.4 Comparison of echo signals from repair specimen using HU and NU modes

(c)是来自修理试件中修理界面区的典型超声回波信号 $u_3^r(v_3^F, v_3^D, v_3^B)$;图4(d)是NU模式下的超声结果,来自修理试件中非修理区的典型超声回波信号 $u_4^r(v_4^F, v_4^B, v_4^B)$ 。从图4(a)中的信号特征可以非常清晰地看出,在HU模式下,(1) $u_1^r(v_1^F, v_1^B, v_1^B)$ 在时域上呈现单周特性,可以看出,此时 $N=1, \lambda \approx 0.62\text{mm}$ (测量声速约为 3106m/s), $t_n \approx 0.24\mu\text{s}$,考虑到 $N=1$ 条件下的时域可分辨性,对应的 $\Delta h \approx 0.186\text{mm}$,而根据式(2)可知, $\Delta h \approx 0.155\text{mm}$,即此时,表面盲区可以接近单个铺层厚度(0.125mm),因此,在图4(a)中, v_1^F 与 v_1^B 在时域上呈现非常好的时域可分辨性,利用 v_1^F 与 v_1^B 之间的时间差(约 $2.90\mu\text{s}$),可以估测出试件

的厚度约 4.5mm ,与试件的设计厚度 4.5mm 非常吻合;(2)从 $u_1^r(v_1^F, v_1^B, v_1^B)$ 的高质量时域可分辨性可以看出,来自 v_1^B 的二次反射信号 $v_1^{B'}$,表面入射声波在试件中非修理区具有很好的穿透性;(3)如果试件内部没有缺陷,将会在试件中产生足够明显的 v_1^B 及其二次反射 $v_1^{B'}$ 。

从图4(b)中的信号特征可以看出,在HU模式下, $u_2^r(v_2^F, v_2^D, v_2^B)$ 同样呈现清晰的时域可分辨行为($N=1$),但相比图4(a)中的结果,其突出的变化是:(1)在 v_2^F 后面附近出现了 v_2^D ,这主要是来自补片区表面层的声波反射;(2) v_2^B 明显变小,这与 v_2^D 的出现和补片区的声波衰减比基体更明显有关,但 v_2^B 仍然可见;(3)从 $u_2^r(v_2^F, v_2^D, v_2^B)$ 的时域

可分辨性可以看出 v_2^B 比 v_1^B 明显后移,这主要是由于补片区厚度比试件中非修理区的厚度轻微增加和补片中声速减小引起的,因为补片区材料与基体所用材料不同。

图4(c)中的结果表明, $u_3^r(v_3^F, v_3^D, v_3^B)$ 在时域上同样呈现清晰的时域可分辨性,在 v_3^F 后面也出现了 v_3^D ,与图4(b)中的 v_2^D 一样, v_3^D 与 v_3^F 之间也呈现非常清晰的时域可分辨性,这非常有利于分辨修理区近表面的缺陷检出,利用 v_3^D 与 v_3^F 之间的时间差($\sim 0.12\mu\text{s}$),可以估测出 v_3^D 对应的深度约为 0.186mm ,表明 v_3^D 主要来自修理区试件表层的界面反射; v_3^B 比 v_2^B 明显,这表明在修理连接区,有更多的声波穿透了修理区。

相比图4(a)中HU的结果,图4

(d)是在常规超声(Normal ultrasonic, NU)模式下来自修理试件中非修理区的典型超声回波信号 $u_4^r(v_4^F, v_4^B, v_4^{B'})$,从图4(d)中的信号特征可以非常清晰地看出,在NU模式下, $u_4^r(v_4^F, v_4^B, v_4^{B'})$ 在时域上呈现明显的多周特性,例如, v_4^F 的 N 接近5个周期数,对应时域占宽约 $1.68\mu\text{s}$,对应的 $\Delta h \approx 2.61\text{mm}$,为HU模式下的 v_1^F 的 Δh (0.186mm)的14倍,可见,NU模式下,一旦脱粘出现在试件近表面和底面深度位置时,漏检的风险会急剧增加,不过,在NU模式下,声波的穿透能力会更强些(参照 $v_4^B, v_4^{B'}$)。因此,在保证声波穿透能力的情况下,选择HU模式更适合复合材料修理的超声检测与缺陷准确评估,其他复合材料超声检测也适合这一原则。基于HU方法和高质量的回波信号,对实现复合材料结构修理的可视化检测与精细评估非常有益。

2 面成像分析

图5为来自试件修理区的超声断面扫描成像(即试件某个断面的B-扫描)结果,成像质量非常高,采用HU模式,横坐标单位为mm,表示修理区沿其中一个截面的宽度;纵坐标表示声波在试件厚度方向传播的时间,单位为 μs ,它代表均一化后的时间显示刻度,与声波在耦合介质和试件中的声速有关。图5(a)中NR1、NR2分别对应试件中左右两侧非修理区, RB1、RB2分别对应左右两侧修理界面区, CR为修理中心区, v_a^F, v_a^B 分别对应NR1区表面和底面; v_b^F, v_b^B 分别对应CR区表面和底面; v_c^F, v_c^B 分别对应RB1区表面和底面; v_d^D 对应RB1区修理胶接连接界面, $v_c^{D'}$ 是 v_c^D 的二次反射; v_d^F, v_d^B 分别对应RB2区表面和底面; v_d^D 对应RB2区胶接连接界面, $v_d^{D'}$ 是 v_d^D 的二次反射; v_e^F, v_e^B 分别对应NR2区表面和底面; F_1 为试件中补片近表面1个铺层深的分层, F_2 为试件中补片中间深度位置的分层, F_3 对应试件中补片近底面1个铺层深的分层; R_1 为补片内部局部树脂。

图5(a)中超声成像结果可以分为3部分:(1)非修理区,即NR1和NR2对应的图像部分;(2)补片/基体之间的修理界面连接区, RB1和RB2对应的图像部分;(3)修理中心区, CR对应的图像部分。在

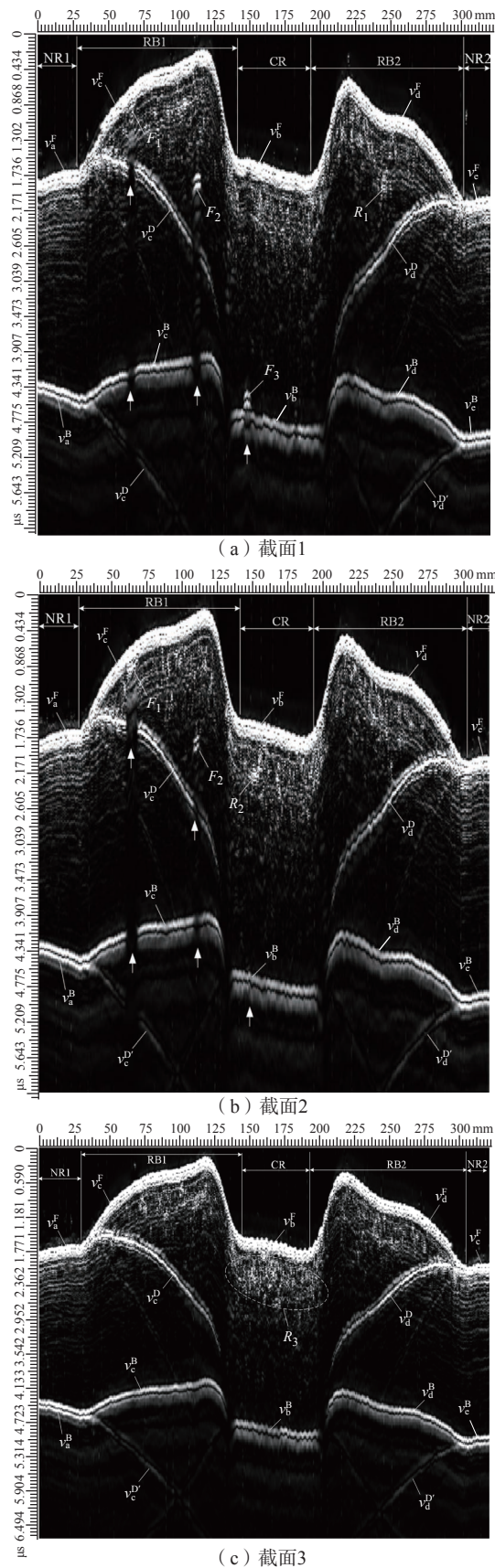


图5 试件修理区的HU断面成像结果

Fig.5 Ultrasonic cross-section imaging result of specimen repaired area using HU mode

NR1 和 NR2 区可以看到对应试件表面、底面的图像显示,即 v_a^F 和 v_a^B 所标示的白色条状灰度分布区, NR1 和 NR2 对应的图像分布表明,来自试件表面和底面的灰度分布非常清晰,其姿态的分布反映了试件表面的平整度,这与图 4 (a) 中的超声回波信号时域特性完全一致,即在 HU 模式,回波信号的时域可分辨性好,且具有单周特性,从而使超声成像结果特别清晰,因此,对于复合材料超声检测,回波信号的时域特性尤为重要,例如,在 NR1 区,当出现缺陷时,对应缺陷的成像灰度将会清晰地分布在 v_a^F 和 v_a^B 之间,从而会使缺陷识别更加容易和准确。在 NR1 和 NR2 区靠近试件上半部分,出现了非常微弱的少量的平行于 v_a^F 的浅亮色灰度带状灰度分布,反映的是试件内部的层间界面,由于声波衰减原因,来自试件下部分的层间反射几乎消失,因而在对应试件下部分的断面图像中,看不到浅亮色灰度带状灰度分布。最重要和有特色的成像特征是在修理区,包括 RB1 区、RB2 区和 CR 区;首先是在 RB1 区、RB2 区,试件表面出现了“山峰”型的高亮度条带型灰度分布,即 v_c^F 和 v_d^F 所标示的灰度分布,从修理区边缘开始上升,在修理胶接界面与补片通孔的边缘结束,左右对称分布,这一成像灰度分布特征反映了在修理边缘和修理通孔的修理行为和修理区的实际特点,因为在修理区,从基体表面到修理区存在轻微的几何过渡区,同理从胶接界面到补片通孔边缘也存在轻微的几何过渡区,因而在修理区的试件表面出现了“凹”型高亮度条带状灰度分布,即 v_b^F 所标示的灰度分布;其次,在 RB1 区、RB2 区,修理连接界面出现了向下的“瀑布”型的高亮度条带状灰度分布,位于补片两侧对称分布,即 v_c^D 和 v_d^D 所标示的灰度分布,这一成像灰度分布特征非常形象地反映了修理胶接界面几何特征,而且

从 v_c^D 和 v_d^D 所对应的白色条带状灰度图像特征可以清晰看出,入射声波不仅穿透了修理胶接界面,而且有足够明显的声波到达修理区试件的底波,还出现对应的二次反射灰度指示 (v_c^D 和 v_d^D 所指示的倒“八”字形带状浅亮色灰度带),也表明 v_c^D 和 v_d^D 所标示的灰度分布不是来自修理界面的脱黏,而是正常修理胶接行为所致。最为重要的图像灰度分布特征之一是出现在 RB1、RB2 区的高亮“白斑”,即 F_1 、 F_2 、 F_3 所标示的“白斑”,依次对应修理区的 3 个 $\phi 6\text{mm}$ 的预置分层缺陷,从“白斑”分布特征可以看出, F_1 靠近修理区试件的上表面, F_2 靠近修理区试件的中间深度位置, F_3 靠近修理区试件的底面位置,这与试件中 F_1 位于修理区近表面一个铺层深度位置、 F_2 位于修理区中间深度位置、 F_3 位于修理区近底面一个铺层深度位置完全一致,只是在横坐标方向的尺寸不完全一样,这与其所处的超声断层成像的截面位置有关; F_1 、 F_2 、 F_3 另一个非常显著的特征是,下面均存在超声“阴影”,即白色箭头所指示的垂直方向的矩形黑色灰度带所示,这是因为入射声波在分层周围产生反射引起的,也表明如果修理区存在缺陷,会在缺陷后面形成超声“阴影”,而在胶接界面 v_c^D 和 v_d^D 所指示的高亮度“瀑布”型条带状后面没有出现类似的超声“阴影”,也表明 v_c^D 和 v_d^D 是来自修理区胶接界面的声波反射,而不是胶接界面缺陷指示;同样的道理,可以判断 R_1 所指示的“白斑”区是来自修理补片内部的树脂反射,而不是缺陷指示。因此,根据超声断面成像中的灰度分布行为,可以清晰地修理界面的表征、修理缺陷的判别,也可以确定检出缺陷在修理区深度的分布细节;利用这种 HU 成像方法,还可以揭示修理区、修理界面、缺陷在试件厚度方向的拓扑情况。

图 5 (b) 是试件修理区另一相

邻断面位置的超声断面成像结果 (NR1、NR2、CR、 v_a^F 、 v_a^B 、 v_b^F 、 v_b^B 、 v_c^F 、 v_c^B 、 v_c^D 、 v_d^F 、 v_d^B 、 v_d^D 、 v_e^F 、 v_e^B 、 F_1 、 F_2 的描述同图 5 (a), R_2 为补片内部局部树脂),与图 5 (a) 中的断面位置相差 2mm,复合材料修理行为(同图 5 (a))包括修理区形貌、修理连接界面、补片区等在断面方向的几何拓扑情况同样非常清晰可见外,相比图 5 (a) 的成像结果,图 5 (b) 最为显著的图像分布变化是:(1) F_1 变得更加明显, F_2 变小, F_3 消失,这表明 F_1 主方向位于该截面位置, F_2 逐步离开此截面位置, F_3 离开了此截面位置;(2) R_1 消失,而 R_2 出现了,表明 R_1 几何尺寸很小,此时已经不在该截面位置,而 R_2 所指示的树脂区出现在了当前截面位置。因此,采用 HU 断面成像方法,可以直观地揭示修理区及其修理区缺陷的几何拓扑细节,这对于修理区的准确检测与缺陷精细评估,掌握修理区的修理行为,制定合理的修理工艺非常有益。

图 5 (c) 是试件修理区另一断面位置的 HU 断面成像结果 (NR1、NR2、CR、 v_a^F 、 v_a^B 、 v_b^F 、 v_b^B 、 v_c^F 、 v_c^B 、 v_c^D 、 v_d^F 、 v_d^B 、 v_d^D 、 v_e^F 、 v_e^B 、 F_1 、 F_2 的描述同图 5 (a), R_3 为补片内部局部树脂),除了与图 5 (a) 和 (b) 中的断面成像结果一样,复合材料修理行为包括修理区形貌、修理连接界面、补片区等在断面方向的几何拓扑情况同样非常清晰可见外,也能清晰地看到 NR1 和 NR2 区基体中的铺层形态,如图 5 (c) 中白色箭头所指示的浅白色波纹状条线灰度分布所示,但图 5 (c) 最为显著的图像分布变化是 F_1 、 F_2 、 F_3 消失,这是因为修理区缺陷不在当前成像截面位置。从图 5 (a)~(c) 中可以清晰地看出,在修理区补片内部的树脂分布明显比基体中的树脂分布多,而且呈现显著的离散分布特征,如图 5 (c) 中椭圆形白色虚线所标示的白斑分布所

示,此外,铺层形态也不如试件基体中清晰,这跟基体材料及其成型工艺条件与修理用补片材料及其工艺条件密切相关。因此,采用HU断面成像方法,还可以直观地揭示修理区与基体之间的内部微结构变化,这对选择合适的修理材料和制定合理的修理工艺非常有指导意义。

3 修理效果评估

图4结果表明,在单脉冲周期条件下,利用来自复合材料修理部位的超声回波信号及其变化规律,可以进行修理区的修理效果评估,在非修理部位, v_i^B 的幅值会明显增加,这里, $i=1,2,3$ 。例如,在非修理区, v_1^B 的幅值约为 11.76dB (图4(a)); 在修理补片区, v_2^B 的幅值约为 -9.84dB (图4(b)); 在修理区连接界面区, v_3^B 的幅值约为 -3.02dB (图4(c)), 可见,来修理区的底波信号要比非修理区的底波幅值小 14~22dB, 进一步地,基于 v_i^B 及其变化,可以进行修理区的修理效果评估: 在其他条件一定时, v_i^B 越大,表明修理效果越好,极限的情况是 $(v_2^B, v_3^B) \rightarrow v_1^B$, 这可以通过构建修理函数评估复合材料的实际效果,目前正在开展相关的建模和试验验证研究。

利用图5中的成像结果与特征,可以进行复合材料修理区的修理效果评估,在非修理区, v_a^F 、 v_c^F 和 v_a^B 、 v_c^B 呈现清晰、高亮图形学特征,这里用 ε_0 表示, ε_0 形态变化平缓(与实际复合材料结构有关); 而在修理区,会出现“山峰”图形学特征(用 ε_1 表示)、“凹形”图形学特征(用 ε_2 表示)、“瀑布”图形学特征(用 ε_3 表示)、超声“阴影”图形学特征(用 ε_4 表示),而且, ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 与 ε_0 呈现显著不同图形学特征。因此,基于 ε_k (这里 $k=0,1,2,3,4$) 及其图形学与灰度分布,可以实现修理区的修理效果评估,即在其他条件一定时, ε_1 越趋向 ε_0 的图形特征,修理效果越好; ε_2 和 ε_3 图形学特征越弱化,修理效果越好; 出现

ε_4 图形学特征,表示修理界面存在缺陷,亦表明修理效果不好。因此,在单周脉冲特性条件下,基于修理区的超声成像特征所呈现出来的图形学规律,通过构建相应的图形学修理函数将可以实现复合材料结构修理效果的确切评估,目前正在开展相关的建模和试验验证研究。

结论

(1) 不同频率模式脉冲声波在碳纤维树脂基复合材料修理试件中具有显著不同的时域信号特征,在HU模式下,回波信号的时域占宽达到 0.186mm,接近单个复合材料修理铺层厚度,从而使HU方法的表面检测盲区和分辨率达到单个复合材料修理铺层厚度(约 0.125mm),非常有利于复合材料修理区的缺陷准确检测和精细评估,基于HU回波信号时域行为,其厚度方向的评估结果与复合材料修理试件的设计值之间最小偏差接近 0。

(2) 利用HU断面超声成像,可以更加直观和准确地揭示复合材料修理行为,包括未修理区、修理界面、修理区形貌、修理区缺陷、局部树脂及其分布、修理区微结构特征等几何拓扑细节,这对于复合材料修理的准确检测与缺陷精细评估,优化修理工艺、改善修理行为、最大限度恢复复合材料结构使用性能、确保复合材料结构的安全服役等,具有十分重要的作用和益处。采用HU断面成像,可以非常直观和清晰地检出复合材料修理区近表面一层和近底面一层及其中间深度位置的 $\phi 6\text{mm}$ 缺陷、局部树脂及其在修理区的分布细节,成像分辨率可达单个复合材料铺层厚度($\sim 0.125\text{mm}$)。

(3) 在单脉冲周期条件下,利用来自复合材料修理部位的超声回波信号及其变化规律,可以进行修理区的修理效果评估; 在非修理区超声成像的图形学特征变化平缓,而在修理区,

会出现“山峰”、“凹形”、“瀑布”、超声“阴影”等图形学特征,根据超声断面成像所形成的这些图形学特征,可以进行复合材料修理区的修理效果评估,从而为复合材料结构修理区的精细表征和修理缺陷的准确检测与评估提供了一种非常有效的方法,目前已经在复合材料结构及其结构修理中得到了很好的实际检测应用。

致谢

该项研究中的试验设备与试样的制备由中国航空制造技术研究院复合材料中心和中航复合材料有限责任公司提供,相关的试验研究在复合材料中心检测与评估试验室完成,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] SHARMA S, SUDHAKARA P, NIJJAR S, et al. Recent progress of composite materials in various novel engineering applications[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(14): 28195-28202.
- [2] ZHANG Xuesong, CHEN Yongjun, HU Junling. Recent advances in the development of aerospace materials[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.
- [3] RUŽEK R, LOHONKA R, JIRONC J. Ultrasonic C-scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification[J]. NDT & E International, 2006, 39(2): 132-142.
- [4] HASIOTIS T, BADOGIANNIS E, TSOVALIS N G. Application of ultrasonic C-scan techniques for tracing defects in laminated composite materials[J]. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2011, 2011(3): 192-203.
- [5] KERSEMANS M, MARTENS A, VAN DEN ABEELE K, et al. Detection and localization of delaminations in thin carbon fiber reinforced composites with the ultrasonic polar scan[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2014, 33(4): 522-534.
- [6] TAN K S, GUO N, WONG B S, et al. Experimental evaluation of delaminations in composite plates by the use of Lamb waves[J]. Composites Science and Technology, 1995, 53(1): 77-84.
- [7] SU Z Q, YE L, LU Y. Guided Lamb waves for identification of damage in composite

structures: A review[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 295(3–5): 753–780.

[8] OCHÓA P, INFANTE V, SILVA J M, et al. Detection of multiple low-energy impact damage in composite plates using Lamb wave techniques[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 80: 291–298.

[9] RAIŠUTIS R, KAŽYS R, ŽUKAUSKAS E, et al. Application of ultrasonic guided waves for non-destructive testing of defective CFRP rods with multiple delaminations[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(5): 416–424.

[10] KARABUTOV A A, PELIVANOV I M, PODYMOVA N B. Nondestructive evaluation of graphite-epoxy composites by the laser ultrasonic method[J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2000, 36(6): 497–500.

[11] CHAKRAPANI S K, BARNARD D J. Fatigue damage evaluation of carbon fiber reinforced composites using nonlinear resonance spectroscopy[J]. *NDT & E International*, 2020, 116: 102331.

[12] MÜLLER J P, DELL'AVVOCATO G, KRANKENHAGEN R. Assessing overload-induced delaminations in glass fiber reinforced

polymers by its geometry and thermal resistance[J]. *NDT & E International*, 2020, 116: 102309.

[13] GARNIER C, PASTOR M L, EYMA F, et al. The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using non-destructive testing[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(5): 1328–1336.

[14] ZHENG K Y, CHANG Y S, WANG K H, et al. Improved non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites using pulsed thermograph[J]. *Polymer Testing*, 2015, 46: 26–32.

[15] POUDEL A, MITCHELL K R, CHU T P, et al. Non-destructive evaluation of composite repairs by using infrared thermography[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(3): 351–363.

[16] CHOI M, PARK J, KIM W, et al. Inspection of impact damage in honeycomb composite by ESPI, thermography and ultrasonic testing[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2008, 22(9n11): 1033–1038.

[17] ZHANG Z Y, RICHARDSON M O W, WISHEART M, et al. ESPI non-destructive testing of GRP composite materials containing impact damage[J]. *Composites Part A: Applied Science*

and Manufacturing, 1998, 29(7): 721–729.

[18] LIU S P, LIU F F, ZHANG Q L, et al. Non-destructive characterisation and evaluation of manufacturing defects in SiC_f/SiC composites using the relative energy attenuation behaviour of X-rays[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(16): 26044–26054.

[19] LIU F F, LIU S P, ZHANG Q L, et al. Quantitative non-destructive evaluation of drilling defects in SiC_f/SiC composites using low-energy X-ray imaging technique[J]. *NDT & E International*, 2020, 116: 102364.

[20] LEE Y J, LEE J R, IHN J B. Composite repair patch evaluation using pulse-echo laser ultrasonic correlation mapping method[J]. *Composite Structures*, 2018, 204: 395–401.

[21] KOH Y L, CHIU W K, RAJIC N. Integrity assessment of composite repair patch using propagating Lamb waves[J]. *Composite Structures*, 2002, 58(3): 363–371.

[22] DIAMANTI K, SOUTIS C, HODGKINSON J M. Non-destructive inspection of sandwich and repaired composite laminated structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65(13): 2059–2067.

Cross-Sectional Imaging and Defect Evaluation of Composite Repairs Using High-Resolution Ultrasonic Technique

LIU Feifei^{1,2}, ZHOU Zhenggan¹, LIU Songping^{2,3}, YANG Yusen^{2,3}, ZHANG Lianwang²

(1. Beihang University, Beijing 100191, China;

2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

3. AVIC Composite Corporation Ltd, Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] The recovery of composite structure using performance is closely related to the repair quality. Repair quality is associated with defects in repair area. Complex repair behavior and conditions increase the difficulty and uncertainty in non-destructive testing and evaluation (NDT & E) of composite repair. A high-resolution ultrasonic (HU) technique was proposed to characterize carbon-fiber composite repair behaviors and detect defects induced in repair zones. A HU detection system was constructed. The composite repair specimen was manufactured. The time-domain behaviors of the HU signals in repaired area were studied. A series HU experiments were carried out to the repaired specimen using HU cross-sectional imaging technique. The experimental results show that the quality and time-domain resolution of HU echo signals are obviously better than conventional ultrasonic method; the estimated thickness based on the HU signals is close to 0 deviation from its design value for a 4.5mm thick carbon-fiber composite repaired specimen; the detail repair behaviors, such as repaired area, repaired area morphology, repaired bonding interfaces topography, defects and local resin zones in repaired area, internal microstructures, are very clear and intuitively revealed using the HU cross-sectional imaging and image grayscale distributions; the $\phi 6$ mm defects located at near the specimen surface and bottom layers and middle depth are detected clearly and intuitively; the imaging resolution is up to the thickness of a single ply (~ 0.125 mm). Thus, it provides a very effective and powerful detection and evaluation for composite repairs, and good practical application has been obtained.

Keywords: Nondestructive testing and evaluation; Composites; High-resolution ultrasonic technique (HU); Defects;

Composite repair; Ultrasonic imaging

(责编 阳光)