

引文格式: 刘菲菲, 刘松平, 李治应, 等. 复合材料蒙皮-加强筋接头缺陷单脉冲超声表征与评估[J]. 航空制造技术, 2023, 66(22): 36-45.
LIU Feifei, LIU Songping, LI Zhiying, et al. Characterisation and evaluation of defects in composite skin-rib joint using mono-pulse ultrasonic method[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(19): 36-45.

复合材料蒙皮-加强筋接头缺陷单脉冲超声表征与评估*

刘菲菲¹, 刘松平^{1,2}, 李治应¹, 李乐刚¹, 杨玉森¹, 傅天航¹, 常海峰¹

(1. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024;

2. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

[摘要] 蒙皮-加强筋接头是一种非常重要的碳纤维复合材料壁板结构连接形式, 因蒙皮-加强筋接头几何外形、内部铺层、缺陷行为与取向等都很复杂, 蒙皮-加强筋接头区的缺陷表征、检测与评估一直是业内关注的技术难点和焦点。本文提出了一种利用单脉冲超声波在蒙皮-加强筋接头产生的反射行为的缺陷表征与评估新方法, 试验结果表明, 单脉冲超声波在复合材料蒙皮-加强筋接头区产生的反射信号具有非常好的时域可分辨性, 回波信号达到1个脉冲周期时, 表面检测盲区可以达到单个铺层厚度(约 0.125 mm), 可对分层、脱黏、胶接层、树脂层以及连接接头铺层变化等进行超声表征和评估, 检出缺陷大小的最小偏差为 0.0 mm, 最大偏差为 1.0 mm; 检出分层深度定位偏差小于 0.5 个复合材料预浸料铺层。从而为复合材料蒙皮-加强筋接头提供了一种非常有效的超声表征与评估新方法, 已经取得了很好的实际检测应用效果。

关键词: 复合材料; 单脉冲超声(MU); 无损检测; 缺陷评估; 超声反射行为; 蒙皮-加强筋接头

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.22.036



刘菲菲

研究员, 博士, 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。

随着复合材料技术的发展, 许多先进的飞机型号都设计采用了大量的复合材料结构^[1-2], 一些非常关键的飞机结构, 例如, 机翼、机身等, 均已设计采用了复合材料结构^[2]。特别是基于各种复合材料蒙皮-加强筋连接的复合材料承力结构中的设计应用, 普遍受到业内的广泛关注。一方面, 这类复合材料结构的设计、制造难度大、尺寸大, 结构也较为复杂; 另一方面, 这类结构通常属于承载比较大的受力结构, 对其内部的缺陷/损伤的容限要求通常比较高。而复合材料结构中的连接部位在这类受力结构中又起到加强和载荷的传递作用。因此, 复合材料壁板接头部位质量对整个结构的承载和受力

传递尤为重要。由于这类复合材料结构的铺层曲率变化大, 制造工艺复杂, 纤维铺叠存在几何变化等, 对成型过程中模具的贴膜度要求非常高, 从而增加了在蒙皮-加强筋接头产生缺陷的风险。因此, 复合材料蒙皮-加强筋连接区缺陷表征与评估一直是业内高度关注的焦点。

目前有关复合材料无损检测, 行业内开展过超声检测^[3-6]、X射线检测^[7-9]、红外检测^[10-12]、激光电子散斑检测(ESPI)^[13]、高频脉冲涡流检测^[14]、微波检测^[15]、Terahertz (THz) 检测^[16]等方面的研究。然而, 这些研究没有涉及蒙皮-加强筋接头的无损表征与评估, 而且仅从检测方法上, X射线、红外、ESPI、涡流、微

* 基金项目: 科技部国家重点研发项目(2021YFB3401700)。

波等检测方法也不适合复合材料蒙皮-加强筋连接接头的缺陷准确表征与评估。相比而言,超声是一种比较可行的检测方法,因为复合材料超声评估与超声波在其内部的传播行为密切相关^[17]。而蒙皮-加强筋接头内部结构(如铺层)及缺陷的存在将会改变入射声波在其内部的传播行为,基于此变化可以用于复合材料及其特殊部位的缺陷表征与评估。但通常需要针对被检测的复合材料接头部位及其特点,研究建立相应的连接部位超声评估方法。针对复合材料圆柱形筒体加强筋部位的粘接缺陷检测,Bastianini等^[18]研究了超声接触回波法评估的可检性,但不适合本文中提出的蒙皮-加强筋接头的超声表征与评估。

由于复合材料铺层结构的特征,采用常规超声检测存在检测分辨率低和表面检测盲区大的问题。因此,超声检测中的分辨率和表面缺陷的检出能力一直是复合材料检测领域非常关注的技术问题^[18-20],蒙皮-加强筋接头的超声评估需要超声检测表面盲区和检测分辨率达到单个复合材料铺层的厚度。

本文针对复合材料蒙皮-加强筋接头铺层与几何特征、成型工艺特点、可能存在的缺陷行为,研究了一种单脉冲超声方法(Mono-pulse ultrasonic technique, MU);分析了入射声波在蒙皮-加强筋接头区的纵波反射行为、入射方向选择、回波信号接收和脉冲宽度确定方法;设计制备了含有预制缺陷和实际工艺缺陷的碳纤维复合材料蒙皮-加强筋接头试样;构建了MU检测系统;研究了含有不同缺陷的复合材料蒙皮-加强筋接头的超声信号特征与形成机制;分析了超声脉冲回波信号和成像特征形成规律;构建了复合材料蒙皮-加强筋接头缺陷超声表征与评估方法和判据。系列试验结果表明,采用MU新方法可以得到非常高质量的

时域可分辨的单脉冲超声回波信号;显著地改善了入射声波在蒙皮-加强筋接头区形成的超声信号的时域可分辨性,更加有利于提高蒙皮-加强筋接头区缺陷检出和定性定量能力,大大改进了检出缺陷的深度定位的准确性;通过MU信号的时域特征及其成像特征可以有效地进行蒙皮-加强筋接头区富树脂、分层、脱黏的表征与识别及评估;表面检测盲区达到1个复合材料铺层厚度(约0.125 mm);检出缺陷大小偏差最小可达0.0 mm,最大不超过1.0 mm,检出缺陷的深度定位偏差和厚度测量偏差最小可达0.6%。为复合材料结构蒙皮-加强筋接头提供了一种非常有效的缺陷检测与评估方法,已经取得了很好的实际检测应用效果。

1 单脉冲超声方法和检测系统

1.1 单脉冲超声方法

如图1(a)所示,利用超声换能器向被检测复合材料蒙皮-加强筋接头区发射脉冲超声波 u_0^I ,此脉冲超声通过耦合介质(如水),传播到蒙皮-加强筋接头区,并与蒙皮-加强筋接头相互作用,在其内部形成反射脉冲声波 $u_n^R = \sum_{i=0}^n u_i^R$ 。图1中, u_0^I 表示入射声波; u_i^R 表示反射声波, $i=0, 1, \dots, n$; t 为声波传播时间; v_i^R 为接收

声波信号。由于 u_n^R 是来自蒙皮-加强筋接头区内部材料对 u_0^I 的弹性响应,当蒙皮-加强筋接头区内部的微结构、界面连接行为发生变化或者出现缺陷时,会影响蒙皮-加强筋接头区对 u_0^I 的弹性响应,当这种弹性响应足够明显时,就会引起显著的声波反射行为,进而在蒙皮-加强筋接头区形成 u_n^R , u_n^R 经换能器压电转换为对应的脉冲回波信号 $v_n^R = \sum_{i=0}^n v_i^R$,如果能够使 v_n^R 中的每个脉冲回波信号 v_i^R 在时域上可分辨,就有可能确定发生弹性响应变化的区域和位置,进而用于蒙皮-加强筋接头缺陷的表征与评估。影响 v_i^R 时域可分辨行为的因素主要有:(1) v_i^R 的脉冲回波信号宽度 t_w (图1(b));(2)构成 v_i^R 的单个脉冲回波信号的宽度 t_T (图1(c));(3)构成 v_i^R 的脉冲个数,即脉冲周期数 N (图1(b)和(c))。其中, t_w 与 t_T 和 N 有关,即 $t_w = N \times t_T$ 。对于垂直入射超声纵波检测, t_w 直接影响超声波在复合材料蒙皮-加强筋接头区的表面检测盲区和纵向分辨率。如图1所示,使入射声波从蒙皮一侧垂直入射,为了能够提取到来自不同铺层间可能存在缺陷的超声反射信号,实现蒙皮-加强筋接头缺陷的超声表征和评估,尽量使入射声波脉冲宽度 t_w 满足式(1)的要求。

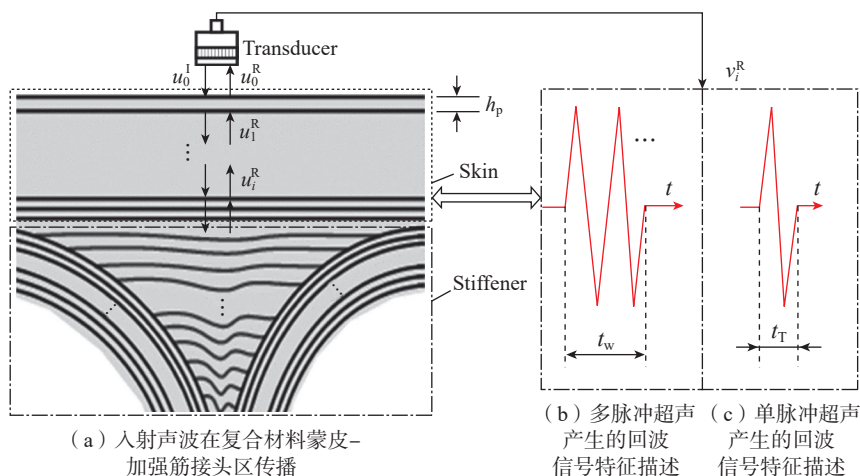


图1 蒙皮-加强筋连接接头单脉冲超声方法原理

Fig.1 Principle illustration of mono-pulse ultrasonic (MU) method for composite skin-rib joint

$$t_w \leq \frac{2h_p}{v_p} \quad (1)$$

式中, h_p 为单个复合材料铺层的厚度; v_p 为入射声波在复合材料铺层中的传播速度。

在其他条件一定时,提高超声波的频率有助于减小 t_w ,但频率的提高会显著增加超声波在复合材料中的衰减,进而影响缺陷的检出和表征。在频率一定的情况下,减少脉冲周期数 N 就成为一种非常有效的方法。为此,采用具有单脉冲特性的脉冲超声信号作为入射声波信号,进行蒙皮-加强筋接头缺陷的超声表征和评估。

1.2 单脉冲超声检测系统

为了得到单脉冲超声波,可以利用单脉冲电子单元产生超声激励信号,此激励信号激励单脉冲超声换能器产生单脉冲超声波。这里采用自主研发的 CUS-21J 超声扫描成像检测系统和 FCC-D-1 复合材料检测仪器,构建复合材料蒙皮-加强筋连接区单脉冲超声检测试验系统,分别用于复合材料蒙皮-加强筋连接区单脉冲超声行为研究、信号特征分析和成像试验分析,CUS-21J 和 FCC-D-1 均可提供单脉冲超声波信号的发射和接收。其中,CUS-21J 超声扫描成像检测系统主要由超声单元、信号处理单元、扫描机构、扫描控制单元、计算机单元等构成,其基本组成如图 2 所示。采用自主研发的 FJ-1 和 FJ-2 高分辨率复合材料超声换能器。利用 FCC-D-1 复合材料检测仪器对蒙皮-加强筋连接区试样进行扫查检测,以获取试样中对应每个检测位置点的超声特征信号和其对应的实际位置,以便进行取样分析,构建基于单脉冲超声回波信号特征的复合材料蒙皮-加强筋连接区缺陷表征与评估方法。利用 CUS-21J 对复合材料蒙皮-加强筋连接区试样进行单脉冲超声扫描成像检测,验证构建的复合材料蒙皮-加强筋连接

接头单脉冲超声检测与评估方法。

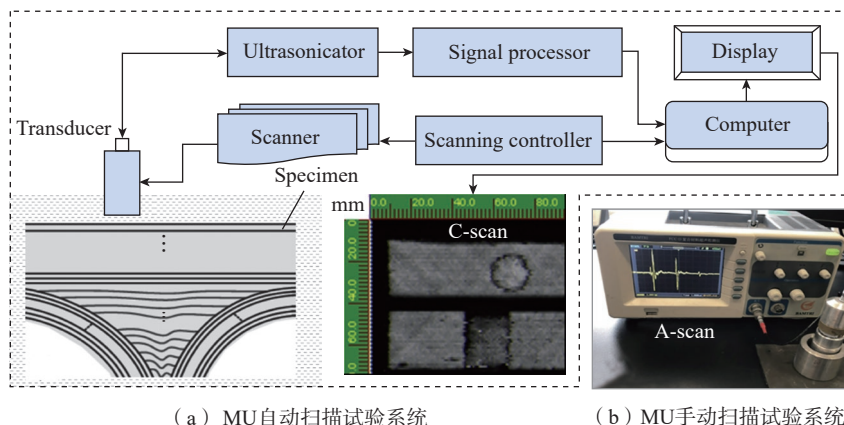
1.3 试样设计制备

为了利用单脉冲超声行为进行复合材料蒙皮-加强筋接头缺陷的超声表征与评估,设计了 3 类复合材料试样。

第 1 组试样(试样 1): 复合材料层压结构试样,模拟复合材料蒙皮-加强筋中的蒙皮区分层,在该试样中,分别在距离上(近表面第 1 个铺层和第 2 个铺层界面之间)、下表面第 1 个铺层深度位置(近底面第 1 个铺层和第 2 个铺层界面之间,即近表面第 39 个铺层和第 40 个铺层界面之间)和 1/2 深度位置(第 20~21 个铺层界面)预置有 $\phi 3$ mm 的模拟分层,用于验证在单脉冲条件下的超声波表面检测盲区极限和不同深度分层的检出能力。其中, C_1 为位于试样近表面第 1~2 个铺层界面的分层; C_2 为位于试样 1/2 厚度(对应第

19~20 个铺层界面位置)的分层; C_3 为位于试样近底面(对应第 39~40 个铺层界面位置)的分层。试样厚度约 5 mm (40 个预浸料铺层),试样的尺寸见表 1。

第 2 组试样(试样 2): 典型的复合材料蒙皮-加强筋接头试样,在蒙皮-加强筋连接界面预置有 R 和 C 类两类脱黏,其中 R 类脱黏中的 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为矩形脱黏,C 类脱黏中的 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 为圆形脱黏,脱黏的分布如图 3 所示(其中, h 为试样的厚度; L_1 为试样的宽度; L_2 为试样的长度),R 和 C 类脱黏分别位于复合材料接头两侧加强筋-蒙皮胶接界面,脱黏的大小见表 2。采用聚四氟乙烯薄膜模拟蒙皮-加强筋胶接界面脱黏,用于验证所建立的单脉冲超声方法对蒙皮-加强筋接头区连接界面脱黏的检出能力和检出缺陷的准确性。



(a) MU自动扫描试验系统

(b) MU手动扫描试验系统

图 2 MU 超声检测试验系统基本组成

Fig.2 Basic composition of MU ultrasonic test system

表 1 复合材料蒙皮-加强筋接头试样的几何特征参数

Table 1 Geometric feature parameters of composite skin-rib joint specimens mm

试样	h	h_1	h_2	h_3	h_4	L_1	L_2	W_1	W_2
1	5.0	—	—	—	—	100	150	—	—
2	8.5	4.0	2.0	6.5	40	184	440	60	28
3	4.5	3.0	1.5	3.0	70	224	174	98	42
4	7.5	3.0	1.5	6.0	70	224	174	98	42
5	7.0	3.0	1.5	5.5	110	224	64	224	110

第3组试样(试样3~5):选自实际的复合材料蒙皮-加强筋接头,在蒙皮-加强筋连区没有人工预置的缺陷,主要用于验证所建立的单脉冲超声方法对实际蒙皮-加强筋接头区缺陷表征与评估的检测效果。得到复合材料蒙皮-加强筋连接界面实际工艺缺陷及其对应的单脉冲超声信号特征,以便建立面向实际蒙皮-加强筋接头成型工艺的单脉冲超声表征与评估方法及缺陷判据。

所有试样均为树脂基碳纤维复合材料多向铺层结构,由中国航空制造技术研究院复合材料技术中心制造,所用预浸料均由中航复合材料有限责任公司制造和提供。

2 试验结果与分析

2.1 蒙皮分层的单脉冲超声反射行为

图4是来自试样1的一组典型的单脉冲超声回波信号 v_n^R ,其中,黑色曲线是来自试样1中好区的单脉冲超声回波信号;红色曲线是来自试样1中深度为1个铺层厚度(0.125 mm)的分层(C_1 分层)的单脉冲超声回波信号;蓝色曲线是来自试样1中深度为距离试样底面1个铺层厚度(0.125 mm)的分层(C_3 分层)的单脉冲超声回波信号;绿色曲线是来自试样1中1/2深度(20个铺层厚度,约2.5 mm)的分层(C_2 分层)的单脉冲超声回波信号。

从单脉冲超声回波信号(黑色

曲线)的 v_n^R 可以非常清晰地看出:(1)入射声波 u_0^I 在试样1中形成非常清晰且幅值足够大的回波信号 v_n^R , v_n^R 中包括来自试样表面的回波信号 v_0^R 、底面回波信号 v_b^R 以及其二次反射信号 v_b^R ,且没有出现其他的额外声波信号,这表明,在单脉冲超声波条件下,入射声波在试样1内部无缺陷部位具有很好的穿透行为;(2)从 v_n^R 的时域特性可以非常清晰地看出, v_0^R 和 v_b^R 具有非常好的单周特性,用 $v_0^R\{N\approx 1, t_T\approx 0.26\ \mu\text{s}, v_{pp}\approx 4.52\ \text{V}\}$ 、 $v_b^R\{N\approx 1, t_T\approx 0.32\ \mu\text{s}, v_{pp}\approx 3.20\ \text{V}, t_{b-0}\approx 3.22\ \mu\text{s}\}$ 表示 v_0^R 和 v_b^R 的时域特性,这里 v_{pp} 表示 v_0^R 和 v_b^R 的峰峰值, V, t_{b-0} 表示 v_0^R 和 v_b^R 之间的时间差;(3) v_b^R 的时域宽度(0.32 μs)比 v_0^R 的时域宽度(0.26 μs)明显变大,这主要来自声波在复合材料中频散现象。利用 $t_{b-0}\approx 3.22\ \mu\text{s}$ 和试样1的厚度(约5 mm),可以得出单脉冲超声在复合材料中的传播速度约为3106 m/s。

从图4中单脉冲回波信号(红色曲线)中的 v_n^R 则可以非常清晰地看出:(1)当分层 C_1 出现在近表面第1~2个铺层界面时,来自分层的单脉冲超声信号在时域上仍然清晰可分辨,如信号 $v_{C_1}^R$ 所标示的脉冲回波信号所示,且 $v_{C_1}^R\{N\approx 1, t_T\approx 0.36\ \mu\text{s}, v_{pp}\approx 2.20\ \text{V}, t_{C_1-0}\approx 0.10\ \mu\text{s}\}$,根据 t_{C_1-0} 可以估测分层 C_1 的深度约为0.155 mm,约合1.24个铺层,与 C_1 的理论厚度仅相差0.03 mm,0.24个铺层;(2) v_b^R 仍然可见,同样具有很好的时域单周行为 $v_b^R\{N\approx 1, t_T\approx 0.50\ \mu\text{s}, v_{pp}\approx 0.58\ \text{V}, t_{b-0}\approx 3.22\ \mu\text{s}\}$,但相比黑色曲线中回波信号 v_b^R ,其幅值明显减小,约减小14 dB,而且,此时 v_b^R 仍然可见,这主要是由于有少量入射声波穿过了分层 C_1 ;(3)相比黑色曲线回波信号 v_0^R ,红色曲线中回波信号 $v_0^R\{N\approx 1, t_T\approx 0.22\ \mu\text{s}, v_{pp}\approx 4.55\ \text{V}\}$ 略大,而且在 v_0^R 附近出现了 $v_{C_1}^R$,由于 $v_{C_1}^R$ 与 v_0^R 之间仅相差1个复合材料铺层(约0.125 mm,即0.08 μs),因此, $v_{C_1}^R$ 与

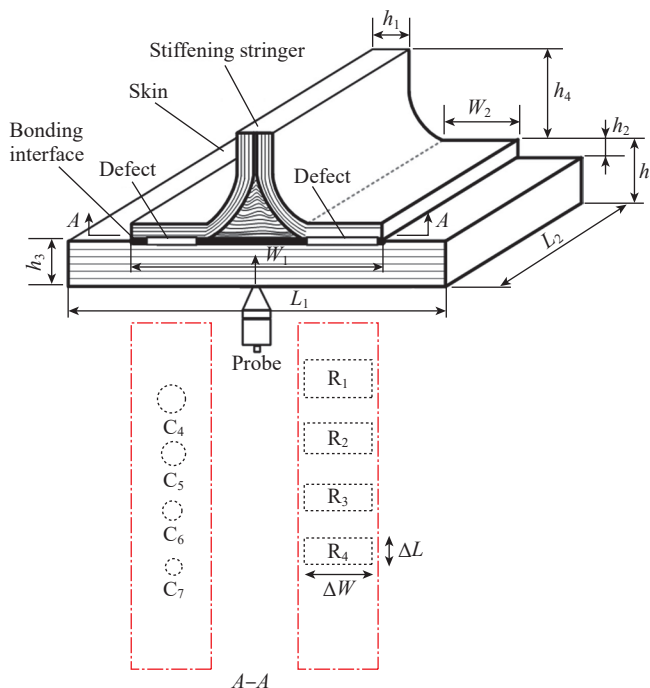


图3 复合材料蒙皮-加强筋接头及缺陷分布(试样2)

Fig.3 Composite skin-rib joint and defect distribution (sample 2)

表2 复合材料蒙皮-加强筋接头的脱黏大小(试样2)

Table 2 Debonding size of composite skin-rib joint (sample 2)

R类脱黏 ($\Delta W \times \Delta L$)				C类脱黏 (Φ)			
R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
26 × 22	26 × 18	26 × 14	26 × 9	19	13	9	6

v_0^R 在时域上非常紧贴,出现了部分叠加,造成 $v_{C_1}^R$ 的波形失真,不过,这完全不影响对近表面第 1~2 个铺层界面之间的分层 (C_1) 的判别检出,也没有改变它们的时域单周特性,根据 $v_{C_1}^R$ 与 v_0^R 之间的传播时间 t_{C_1-0} 可以估测分层 C_1 的深度 (约 0.155 mm)。

从图 4 中蓝色曲线回波信号则可以非常清晰地看出: (1) 当分层 C_3 出现在近底表面第 1~2 个铺层界面时,来自分层 C_3 的单脉冲超声信号在时域上清晰可分辨,如蓝色曲线回波信号 $v_{C_3}^R$ 所标示的脉冲回波信号所示,此时有 $v_{C_3}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.22 \mu s, v_{pp} \approx 1.70 V, t_{C_3-0} \approx 3.12 \mu s\}$, 这里, t_{C_3-0} 表示 $v_{C_3}^R$ 与 v_0^R 之间的时间差; (2) v_b^R 消失, $v_{C_3}^R$ 非常微弱; (3) 相比黑色曲线回波信号 v_0^R , 在黑色曲线回波信号中的 v_0^R 幅值有轻微的下降,但是其他时域特性没有出现明显变化,即此时有 $v_0^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.24 \mu s, v_{pp} \approx 4.37 V\}$; (4) 根据 t_{b-0} (3.22 μs) 和 t_{C_3-0} (3.12 μs), 以及所测量的声速 (3106 m/s), 分层距离试样 1 底面的深度约为 0.155 mm, 约合 1.24 个铺层, 非常接近单个复合材料的标称厚度 0.125 mm。

从图 4 中绿色曲线回波信号则可以非常清晰地看出: (1) 当分层 C_2 出现在试样 1 的 1/2 深度位置时,来自分层的单脉冲超声信号 $v_{C_2}^R$ 和部分来自试样底面的 v_b^R 在时域上非常清晰可分辨,如回波信号 $v_{C_2}^R$ 和 v_b^R 所标示的单脉冲回波信号所示,此时有 $v_{C_2}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.20 \mu s, v_{pp} \approx 3.72 V, t_{C_2-0} \approx 1.58 \mu s\}$, $v_b^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.40 \mu s, v_{pp} \approx 1.04 V, t_{b-0} \approx 3.20 \mu s\}$, $v_{C_2}^R$ 和 v_b^R 在时域上时间差 $t_{b-C_2} \approx 1.62 \mu s$; (2) 相比黑色曲线回波信号 v_0^R ($v_{pp} \approx 3.20 V$), 绿色曲线回波信号 v_b^R ($v_{pp} \approx 1.04 V$) 明显减少,这是因为大部分声波在分层 C_2 处产生了反射; (3) 绿色曲线回波信号的时域特性与其他 3 种回波信号完全一致,而且 $v_0^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.26 \mu s, v_{pp} \approx 4.45 V\}$ 几乎与黑色曲线回波信号 v_0^R 相同; (4) 根据 t_{C_2-0} (1.58

μs) 以及所测量的声速 (3106 m/s), 分层 C_2 距离试样 1 表面的深度约为 2.454 mm, 约合 19.630 个铺层, 与实际预置的分层深度 (20 个铺层) 仅相差约 0.370 个铺层。因此,在单周超声条件下,可以非常准确地确定检出分层所在的铺层位置,这对准确找出分层产生原因、进行工艺优化以及制定修补方案和分析分层对结构的力学性能影响等都具有非常现实的意义和指导作用; (5) 根据 t_{b-0} (3.20 μs), 可以得到 v_b^R 距离试样表面约 4.970 mm, 约合 39.757 个铺层, 与试样 3 的 40 个铺层厚度仅相差 0.243 个铺层。结合 v_b^R 中的 t_T ($\approx 0.40 \mu s$) 及其波形特征,表明 v_b^R 是来自试样底面的反射,而不是 $v_{C_2}^R$ 的二次反射。 $v_{C_2}^R$ 为入射声波在 C_2 与试样底面之间的反射信号,且 $v_{C_2}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.36 \mu s, v_{pp} \approx 0.20 V\}$, 明显比 v_b^R 小。 $v_{C_2}^{R'}$ 为 $v_{C_2}^R$ 的二次反射。因此,利用单脉冲超声技术可以帮助准确地确定检出缺陷的深度和判别来自缺陷的多次反射行为,这非常有利于提高缺陷检测准确性。

图 4 中结果还表明,来自分层的

单脉冲超声信号的相位与 v_0^R 相同,与 v_0^R 相反,而且来自分层的单脉冲超声信号的 t_T 要比来自试样底面超声信号的 t_T 小 0.14~0.30 μs 。可见,在实际检测中,单周超声波条件非常有利于根据超声信号的时域宽度判别是来自近底面的分层还是底面反射,从而为近底面缺陷的可靠检出提供了一种有效识别机制。

因此,利用单周超声技术不仅可以实现近表面和近底面一个铺层深度分层的准确检出,还可以准确给出实际分层所在的铺层深度,其最大偏差为 0.370 个铺层,最小偏差为 0.243 个铺层,均小于 1 个铺层。非常有利于准确确定检出缺陷所在的铺层位置。

2.2 蒙皮-加强筋接头的单脉冲超声反射行为

图 5 是来自复合材料蒙皮-加强筋连接试样 3 位置①(对应黑色曲线)和位置②(对应红色曲线)的单脉冲超声试验结果。从黑色曲线回波信号可以非常清晰地看出, v_n^R 主要由 v_0^R 、 v_{b1}^R 、 v_{b2}^R 、 $v_{b2}^{R'}$ 、 $v_{b2}^{R''}$ 、 $v_{b2}^{R''}$ 组成,分别来自入射声波在试样 3 蒙皮表面、蒙

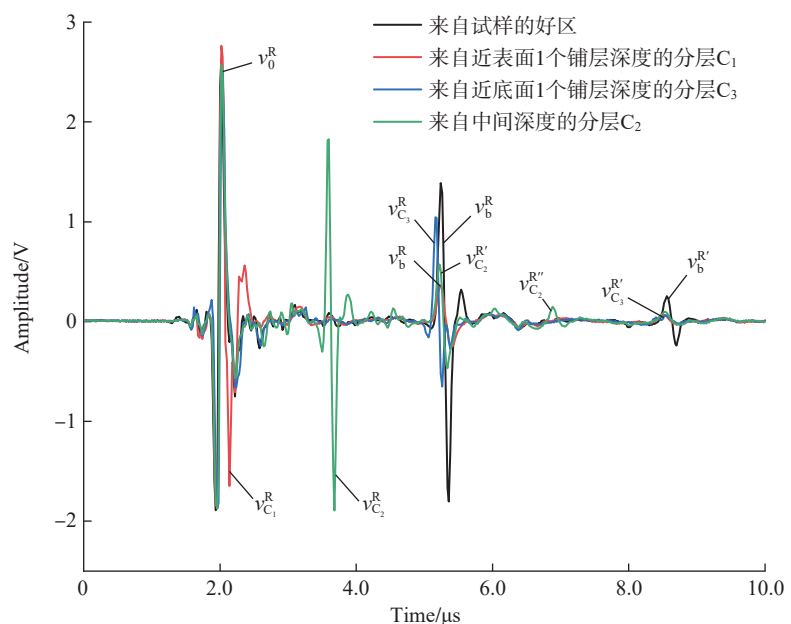


图 4 来自试样 1 的典型单脉冲回波信号及其时域特征

Fig.4 Typical MU echo signals and its time domain characteristics from specimen 1

皮-加强筋连接接头以及加强筋底面的单脉冲超声波 u_0^R 、 u_{b1}^R 、 u_{b2}^R 回波信号, 以及 u_{b2}^R 在蒙皮-加强筋连接接头-加强筋底面之间的一次反射 $v_{b2}^{R'}$ 、二次反射 $v_{b2}^{R''}$ 、三次反射 $v_{b2}^{R'''}$ 。分别表示为

$$v_0^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.36 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 4.51 \text{ V}, \text{Sgn}(\phi_0) = 1\}$$

$$v_{b1}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.40 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 0.76 \text{ V}, t_{b1-0} \approx 1.92 \mu\text{s}, \text{Sgn}(\phi_{b1}) = -1\}$$

$$v_{b2}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.29 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 1.44 \text{ V}, t_{b2-b1} \approx 1.08 \mu\text{s}, t_{b2-0} \approx 3.00 \mu\text{s}, \text{Sgn}(\phi_{b2}) = -1\}$$

(2)

式中, $\text{Sgn}(\phi_0)$ 为 v_0^R 的相位, $\text{Sgn}(\phi_0) = 1$ 表示 v_0^R 先出现负半周, 再出现正半周; $\text{Sgn}(\phi_{b1})$ 为 v_{b1}^R 的相位, $\text{Sgn}(\phi_{b1}) = -1$ 表示 v_{b1}^R 与 v_0^R 相位相反; $\text{Sgn}(\phi_{b2})$ 为 v_{b2}^R 的相位, $\text{Sgn}(\phi_{b2}) = -1$ 表示 v_{b2}^R 与 v_0^R 相位相反; t_{b1-0} 为 v_0^R 与 v_{b1}^R 之间的时间差; t_{b2-0} 为 v_0^R 与 v_{b2}^R 之间的时间差; t_{b2-b1} 为 v_{b2}^R 与 v_{b1}^R 之间的时间差。

从黑色曲线单脉冲回波信号可以看出: (1) 当换能器位于试样 3 的位置①时, 在 v_n^R 中出现了 3 个明显的特征信号, 分别如黑色曲线单脉冲回波信号中 v_0^R 、 v_{b1}^R 、 v_{b2}^R 所指示的脉冲信号, 其对应峰值 A_F 、 A_{b1} 、 A_{b2} 及其相对变化 ΔA_{Fb1} 、 ΔA_{Fb2} 如表 3 所示, A_{b1} 比 A_F 明显小 (约小 3.75 V), A_{b2} 比 A_F 小约 2.73 V, 而 A_{b2} 比 A_{b1} 明显大 (1.02 V), 这表明有足够的入射声波可以穿过蒙皮-加强筋胶接界面传播到加强筋底面形成反射声波, 这将非常有利于利用单脉冲超声波进行蒙皮-加强筋胶接界面的缺陷检测与评估; (2) v_{b1}^R 和 v_{b2}^R 具有相同的相位特性, 且其相位与 v_0^R 的相位相反; (3) 根据 t_{b1-0} 可以得出试样 3 的蒙皮厚度约为 2.982 mm, 约合 23.85 个铺层, 这与试样 3 的加强筋蒙皮厚度 h_3 (3.0 mm, 24 个铺层, 见表 1) 仅

相差 0.018 mm (约合 0.15 个铺层); (4) 根据 t_{b2-b1} 可以得出试样 3 的加强筋厚度约为 1.678 mm, 约合 13.42 个铺层, 比试样 3 的加强筋厚度 h_2 (1.5 mm, 12 个铺层, 见表 1) 大 0.178 mm, 约合 1.42 个铺层, 这是因为利用 t_{b2-b1} 估测加强筋厚度时, 包含了蒙皮-加强筋之间的胶膜厚度 (胶膜的标称厚度约 0.15 mm), 因此, 如果减去胶膜的影响, 估测试样 3 的加强筋厚度约为 1.528 mm, 约合 12.22 个铺层, 与加强筋蒙皮厚度 h_3 的厚度仅相差 0.028 mm。为了消去胶膜对 h_3 的影响, 可以利用 v_{b2}^R 、 $v_{b2}^{R'}$ 、 $v_{b2}^{R''}$ 、 $v_{b2}^{R'''}$ 之间的时间差 $t_{b2-b2} \approx 0.99 \mu\text{s}$ 、 $t_{b2'-b2} \approx 0.91 \mu\text{s}$ 、 $t_{b2''-b2} \approx 0.90 \mu\text{s}$ 的平均值 $0.93 \mu\text{s}$ 进行 h_3 的准确测量, 此时, 试样 3 的加强筋测量厚度约 1.449 mm, 约合 11.60 个铺层, 与 h_3 的理论厚度仅相差 0.051 mm, 约合 0.400 个铺层。再次表明在单脉冲超声波条件下, 非常有利于得到蒙皮-加强筋的准确几何厚度值, 这将对固化工艺的优化和复合材料接头厚度精细控制非常有帮助。

图 5 中的单脉冲回波信号 (红色曲线) 是来自复合材料蒙皮-加强筋连接试样 3 位置②的单脉冲超声试验结果, 可以同样非常清晰地看出, v_n^R 主要由 v_0^R 、 v_{b1}^R 、 v_D^R 、 $v_{D_i}^R$ 组成。显然, v_0^R 、 v_{b1}^R 分别来自入射声波在试样 3 蒙皮表面、蒙皮-加强筋连接界面的单脉冲超声波 u_0^R 、 u_{b1}^R 的反射。分别表示为

$$v_0^R \{N \approx 1, v_{pp} \approx 5.02 \text{ V}, \text{Sgn}(\phi_0) = 1\}$$

$$v_{b1}^R \{N \approx 1, v_{pp} \approx 0.57 \text{ V}, t_{b1-0} \approx 1.92 \mu\text{s}, \text{Sgn}(\phi_{b1}) = -1\}$$

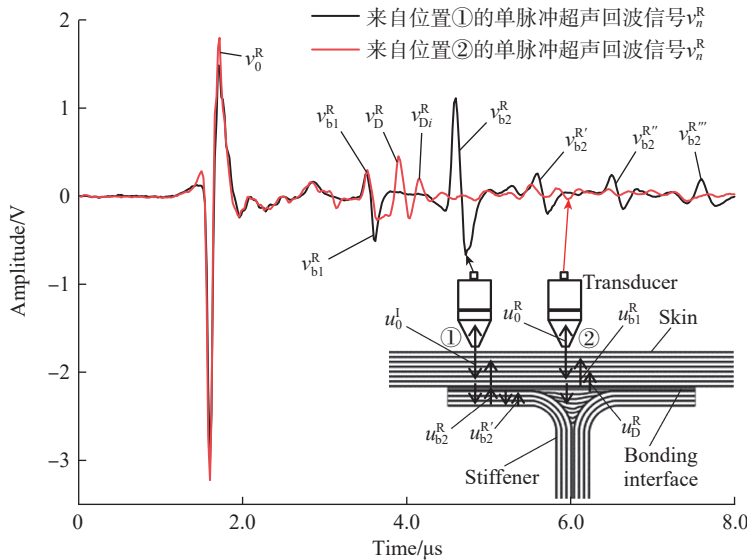


图 5 试样 3 检测位置①和②及其对应的单脉冲超声回波信号 v_n^R
Fig.5 MU echo signal v_n^R from position ① and ② in specimen 3

表 3 试样 3 中位置①和②的 v_0^R 、 v_{b1}^R 、 v_{b2}^R 、 v_D^R 幅值和相位分布
Table 3 Amplitude and phase of v_0^R 、 v_{b1}^R 、 v_{b2}^R 、 v_D^R in specimen 3 position ① and ②

位置	A_F/V	A_{b1}/V	A_{b2}/V	A_D/V	$\Delta A_{Fb1}/dB$	$\Delta A_{Fb2}/dB$	$\Delta A_{FD}/dB$	$\text{Sgn}(\phi_F)$	$\text{Sgn}(\phi_{b1})$	$\text{Sgn}(\phi_{b2})$	$\text{Sgn}(\phi_D)$
①	4.51	0.76	1.78	—	15.5	8.1	—	1	—	-1	—
②	5.02	0.57	—	0.71	18.9	—	17.0	1	-1	—	1

注: $\Delta A_{Fb1} = 20 \lg \frac{A_F}{A_{b1}}$, dB; $\Delta A_{Fb2} = 20 \lg \frac{A_F}{A_{b2}}$, dB; $\Delta A_{FD} = 20 \lg \frac{A_F}{A_D}$, dB。

$$v_0^R \{N \approx 1, v_{pp} \approx 0.70 \text{ V}, t_{D-b1} \approx 0.38 \mu\text{s}, \text{Sgn}(\phi_{b2})=1\} \quad (3)$$

从单脉冲回波信号(红色曲线)中的 v_n^R 可以看出,当换能器位于试样 3 的接头立筋上方位置②时,在 v_n^R 中出现了 3 个明显的特征信号,分别为 v_0^R 、 v_{b1}^R 、 v_D^R 所指示的脉冲信号,其对应峰峰值 A_F 、 A_{b1} 、 A_D 及其相对变化 ΔA_{Fb1} 、 ΔA_{FD} 如表 3 所示, A_{b1} 比 A_F 明显小(约小 18.9 dB), A_D 比 A_F 小约 17.0 dB,而 A_D 比 A_{b1} 则略大, v_D^R 与 v_0^R 具有相同的相位特征。从图 4 红色和绿色曲线的试验结果可以看出,对于分层缺陷,其对应的单脉冲超声信号的相位相对于 v_0^R 的相位会出现反转,而在图 5 红色曲线回波信号中, v_D^R 没有出现明显的相位翻转,这表明 v_D^R 不是来自分层的声波反射。而且在 v_D^R 之后还出现了多个微小的反射信号 v_{D1}^R , 这表明 v_D^R 也不是仅仅来自蒙皮-加强筋连接界面的反射声波。由于位置②位于蒙皮-加强筋连接接头填充区,因此, v_D^R 和 v_{D1}^R 的出现及其特征应与蒙皮-加强筋连接接头填充区带来的微结构变化有关。

图 6 是来自蒙皮-加强筋连接试样 4 位置②的典型单脉冲超声回波信号 v_n^R 。在 v_n^R 中,同样可以明显地观察到 v_0^R 、 v_{b1}^R 、 v_D^R (由 v_{D1}^R 和 v_{D2}^R 组成),与图 5 红色曲线回波信号不同的是,在图 6 中, v_{b1}^R 与 v_D^R 在时域上彼此非常靠近,而且还出现了来自蒙皮区的单脉冲超声反射信号,如 v_d^R 所指示的信号,其特征参数为

$$\begin{aligned} &v_0^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.36 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 5.20 \text{ V}, \text{Sgn}(\phi_0)=1\} \\ &v_{b1}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.26 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 0.51 \text{ V}, t_{b1-0} \approx 3.84 \mu\text{s}, \text{Sgn}(\phi_{b1})=-1\} \\ &v_{D1}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.28 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 0.30 \text{ V}, t_{D1-0} \approx 4.24 \mu\text{s}, \text{Sgn}(\phi_D)=1\} \\ &v_{D2}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.34 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 0.19 \text{ V}, t_{D2-D1} \approx 0.38 \mu\text{s}, \text{Sgn}(\phi_D)=1\} \\ &v_d^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.34 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 0.28 \text{ V}, t_{d-0} \approx 1.24 \mu\text{s}, \text{Sgn}(\phi_d)=-1\} \quad (4) \end{aligned}$$

根据 t_{b1-0} 可以得到试样 4 的蒙皮

厚度 h_3 约为 5.964 mm (比 h_3 的理论厚度 6 mm 小 0.036 mm), 约合 47.712 个铺层(比 h_3 的理论 48 个铺层小 0.288 个铺层), 厚度和铺层偏差约 0.6%。根据 t_{D2-D1} 可以估测对应树脂区的厚度约为 0.513 mm。

图 7 是来自试样 5 中蒙皮-加强筋连接部位的一组典型单脉冲超声回波信号,其中蓝色曲线回波信号来自试样 5 中蒙皮-加强筋连接部位好区的单脉冲超声反射信号,包括

v_0^R (来自蒙皮-加强筋连接试样表面的单脉冲超声反射)、 v_{b1}^R (来自蒙皮-加强筋连接界面的单脉冲超声反射)和 v_{b2}^R (来自加强筋蒙皮底面的单脉冲超声反射), v_{b2}^R 为 v_{b1}^R 的二次反射,其特征参数为

$$\begin{aligned} &v_0^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.36 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 3.690 \text{ V}, \text{Sgn}(\phi_0)=1\} \\ &v_{b1}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.42 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 0.533 \text{ V}, t_{b1-0} \approx 3.58 \mu\text{s}, \text{Sgn}(\phi_{b1})=-1\} \\ &v_{b2}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.42 \mu\text{s}, v_{pp} \approx 0.922 \end{aligned}$$

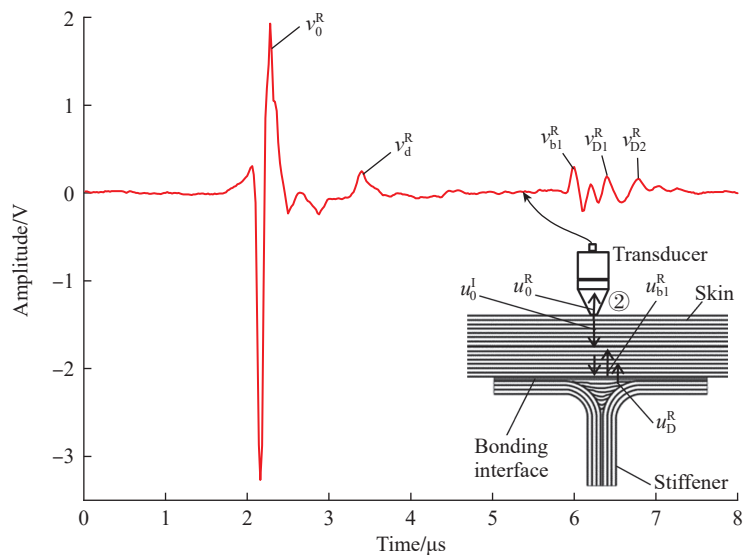


图 6 试样 4 检测位置②及其对应的单脉冲超声回波信号 v_n^R
Fig.6 MU echo signal v_n^R from position ② in specimen 4

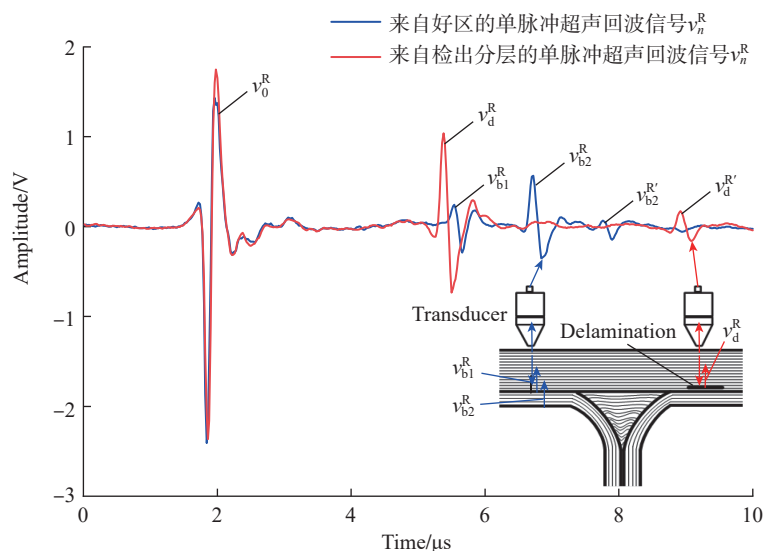


图 7 试样 5 中检测蒙皮-加强筋连接部位好区和检出分层的单脉冲超声回波信号 v_n^R
Fig.7 MU echo signal v_n^R from defect-free and detected delamination zones in specimen 5

$$V, t_{b2-b1} \approx 1.18 \mu s, \text{Sgn}(\phi_{b2}) = -1 \}$$

$$v_{b2}^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.32 \mu s, v_{pp} \approx 0.215$$

$$V, t_{b2-b1} \approx 1.04 \mu s, \text{Sgn}(\phi_{b2}) = 1 \} \quad (5)$$

图7蓝色曲线回波信号及其特征表明,在正常蒙皮-加强筋连接界面区:(1)会同时出现 v_{b1}^R 和 v_{b2}^R ,且 v_{b2}^R 比 v_{b1}^R 大;(2)会出现 v_{b2}^R 的多次反射信号 v_{b2}^R ;(3) v_{b1}^R 会呈现“M”形状。根据 t_{b1-0} 可以得到试样5的蒙皮厚度 h_3 约为 5.560 mm(比 h_3 的理论厚度 5.5 mm 大 0.06 mm),约合 44.48 个铺层(比 h_3 的理论 44 个铺层大 0.48 个铺层)。根据 t_{b2-b1} 可以估测加强筋蒙皮的厚度 h_2 约为 1.832 mm,根据 $t_{b2'-b1}$ 估测 h_2 约为 1.620 mm,更接近 h_2 的理论厚度 1.5 mm。

图7红色曲线回波信号来自试样5中蒙皮-加强筋连接部位检出分层的单脉冲超声反射信号,包括 v_0^R (来自蒙皮-加强筋连接试样表面的单脉冲超声反射)、 v_d^R (来自蒙皮-加强筋连接界面附近分层的单脉冲超声反射)和 $v_d^{R'}$ (来自 v_d^R 的二次反射)。其特征参数为

$$v_0^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.36 \mu s, v_{pp} \approx 3.95$$

$$V, \text{Sgn}(\phi_0) = 1 \}$$

$$v_d^R \{N \approx 1, t_T \approx 0.42 \mu s, v_{pp} \approx 1.77$$

$$V, t_{d-0} \approx 3.40 \mu s, \text{Sgn}(\phi_d) = -1 \}$$

$$v_d^{R'} \{N \approx 1, t_T \approx 0.38 \mu s, v_{pp} \approx 0.33$$

$$V, t_{d'-d} \approx 3.54 \mu s, \text{Sgn}(\phi_{d'}) = -1 \} \quad (6)$$

图7红色曲线回波信号及其特征表明,在蒙皮-加强筋连接检出分层部位:(1) v_{b2}^R 会消失;(2) v_d^R 比 v_{b1}^R 明显大;(3) $\text{Sgn}(\phi_d) = -1$;(4) v_d^R 不会呈现“M”形状。根据 t_{d-0} 可以估测检出分层的深度约为 5.280 mm,约合 42.242 个铺层。根据 $t_{d'-d}$ 估测检出分层的深度约为 5.498 mm,约 43.981 个铺层。均比试样5的蒙皮的理论厚度 h_3 的 44 个铺层小,这表明分层位于蒙皮-加强筋连接界面近上表面铺层界面。

2.3 蒙皮-加强筋缺陷的单脉冲超声 C 扫描检测与评估

图8是试样2中的单脉冲超声 C 扫描结果,水平方向为扫描方向(蒙皮-加强筋连接接头长度方向),垂直方向为步进方向(蒙皮-加强筋连接接头宽度方向)。从蒙皮一侧进行 C 扫描,扫描速度为 50 mm/s,步进量

为 1.0 mm,数字增益 8 dB。从单脉冲超声 C 扫描结果可以非常清晰看出脱黏的大小及其分布,检出脱黏大小如表4所示。从图8的 C 扫描结果可以看出,位于试样2中蒙皮-加强筋胶接界面之间的矩形脱黏 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 和圆形脱黏 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 均能有效地检出,且实际检出脱黏的大小与脱黏的设计大小基本一致。脱黏的设计值与 C 扫描检出大小最大偏差为 1 mm,见表2和表4。可见在单脉冲条件下,不仅可以得到非常清晰的 C 扫描图像,而且还非常有利于准确地对蒙皮-加强筋连接界面的检出缺陷进行定量评估。

从图9的试验结果可以看出,在单脉冲超声条件下,蒙皮-加强筋连接区和蒙皮-加强筋填充界面区同样具有不同的 C 扫描灰度分布特征:(1)蒙皮-加强筋连接区,灰度分布整体上比较均匀,这是因为此时用于产生 C 扫描的 v_{b2}^R 来自试样的底面单脉冲超声反射,当试样内部没有缺陷时, v_{b2}^R 不会出现明显的变化;(2)在蒙皮-加强筋连接区对应的灰度

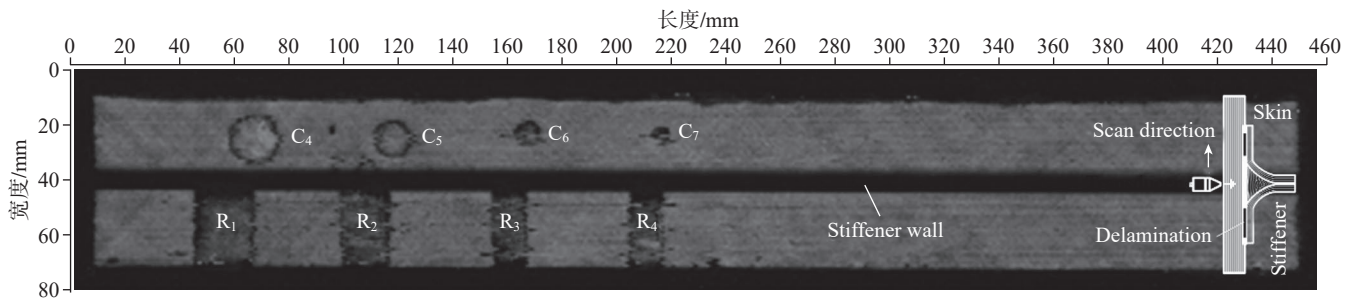


图8 试样2的单脉冲 C 扫描结果
Fig.8 MU C-scan results of specimen 2

表4 试样2中的脱黏单脉冲超声 C 扫描检出大小及其偏差
Table 4 Sizes and variation of detected debonding in specimen 2 by MU C-scan

项目	R 类脱黏				C 类脱黏			
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇
x (ΔL)	22	18	14	9	20	13	9	6
y (ΔW)	26	26	26	26	18	14	10	7
偏差	0	0	0	0	1	1	1	1

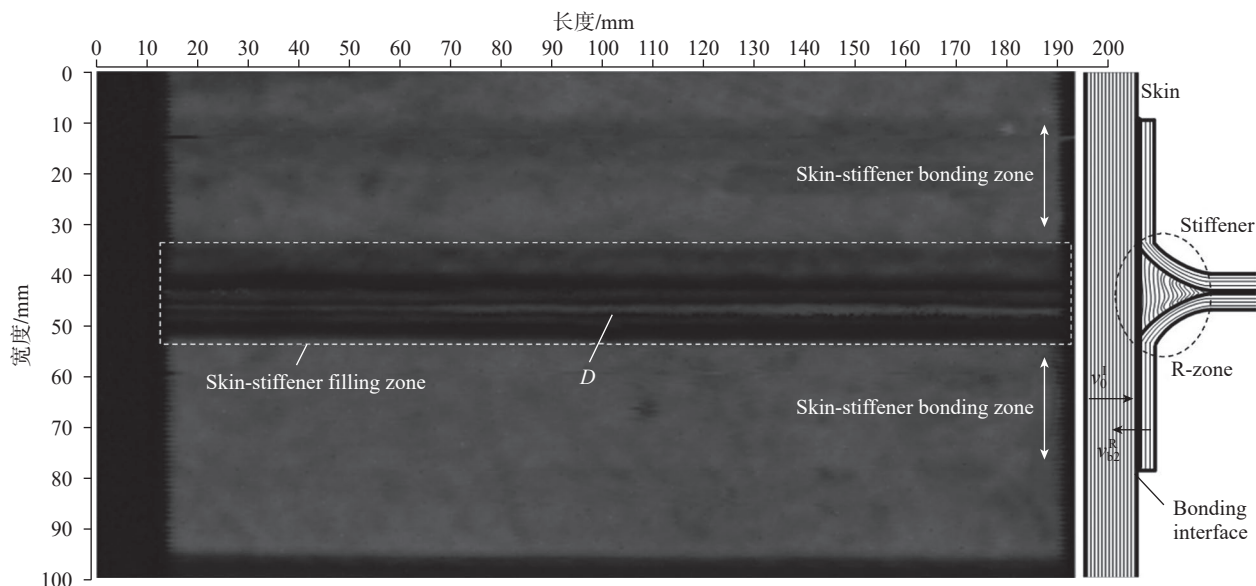


图9 来自试样3中 v_D^R 的单脉冲超声 C 扫描结果
Fig.9 MU C-scan results of v_D^R from specimen 3

总体说要比蒙皮-加强筋填充区的灰度要明亮,这是因为在单脉冲超声波条件下,入射声波在蒙皮-加强筋区底面产生了更为明显的反射行为;(3)在蒙皮-加强筋填充区,呈现出不同的C扫描图像的灰度分布,如图9中D所指示的长条形白色灰度区,这与蒙皮-加强筋填充界面区的树脂层有关,因为随着蒙皮-加强筋连接区的微结构变化, v_D^R 会发生变化(图5和6),但这种变化与试样1中的分层的单脉冲超声信号存在非常明显的时域特征差别(图4)。因此,在单脉冲超声条件下,利用来自 v_D^R 的C扫描及其灰度分布规律,同样可以实现对蒙皮-加强筋胶接界面的超声表征与缺陷评估。

3 结论

(1)在垂直纵波条件下,利用单脉冲超声波与复合材料蒙皮-加强筋连接区相互作用产生的反射行为,可以获得高质量单脉冲回波信号,在此条件下,入射声波在蒙皮-加强筋胶接界面、分层、脱黏区产生的回波信号具有不同的幅值、相位、波形等时域特征,依据这些时域特征及其变

化,可以有效进行蒙皮-加强筋连接部位的缺陷表征、识别和准确的定性定量评估。

(2)系列的单脉冲超声检测结果表明,在单脉冲超声条件下,复合材料表面检测盲区可以达到单个铺层厚度;可以有效检出复合材料中的分层、蒙皮-加强筋胶接界面脱黏、胶接界面层、蒙皮-加强筋连接部位的树脂区;可以实现分层、脱黏及胶接界面以及树脂层的判别;可以确定分层、脱黏、胶接界面的准确铺层深度位置、蒙皮-加强筋界面铺层微结构的变化;分层深度定位偏差小于0.5个预浸料铺层。

(3)利用单脉冲超声C扫描,可以实现蒙皮分层、蒙皮-加强筋胶接界面脱黏的准确定量评估,其检出大小与设计大小的最小偏差0.0mm,最大偏差在1.0mm内。从而为复合材料蒙皮-加强筋胶接界面提供了一种非常有效的超声检测与缺陷定性定量评估方法。

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 X S, CHEN Y J, HU J L. Recent advances in the development of aerospace materials[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2018, 97: 22-34.

[3] OCHÔA P, VILLEGAS I F, GROVES R M, et al. Diagnostic of manufacturing defects in ultrasonically welded thermoplastic composite joints using ultrasonic guided waves[J]. NDT & E International, 2019, 107: 102126.

[4] CIECIELAĞ K, KĘCIK K, SKOCZYLA S, et al. Non-destructive detection of real defects in polymer composites by ultrasonic testing and recurrence analysis[J]. Materials, 2022, 15(20): 7335.

[5] PAPA I, LOPRESTO V, LANGELLA A. Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2021, 4(1): 37-42.

[6] HARIZI W, CHAKI S, BOURSE G, et al. Mechanical damage characterization of glass fiber-reinforced polymer laminates by ultrasonic maps[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 70: 131-137.

[7] SHIPUNOV G S, NIKIFOROV A S, BARANOV M A, et al. The study of the possibility of X-ray inspection of fiber-optic sensors embedded into the structure of a polymer composite material[J]. IOP Conference Series:

Materials Science and Engineering, 2021, 1100(1): 012029.

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

[10] LU T Y, CHEN X H, WANG H, et al. Comparison of low-velocity impact damage in thermoplastic and thermoset composites by non-destructive three-dimensional X-ray microscope[J]. Polymer Testing, 2020, 91: 106730.

[11] MAYR G, PLANK B, SEKELJA J, et al. Active thermography as a quantitative method for non-destructive evaluation of porous carbon fiber reinforced polymers[J]. NDT & E International, 2011, 44(7): 537–543.

[12] THUMMERER G, MAYR G, BURGHOLZER P. 3D photothermal imaging of subsurface defects in composite materials[J]. NDT & E International, 2021, 122: 102476.

[13] RŮŽEK R, LOHONKA R, JIRONČ J. Ultrasonic C-scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification[J]. NDT & E International, 2006, 39(2): 132–142.

[14] MOOK G, LANGE R, KOESER O. Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(6): 865–873.

[15] ABU-KHOUSA M, SALEH W, QADDOUMI N. Defect imaging and characterization in composite structures using near-field microwave nondestructive testing techniques[J]. Composite Structures, 2003, 62(3–4): 255–259.

[16] STRĄG M, SWIDERSKI W. Defect detection in aramid fiber-reinforced

composites via terahertz radiation[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2022, 42(1): 1–9.

[17] CHANG J J, ZHENG C L, NI Q Q. The ultrasonic wave propagation in composite material and its characteristic evaluation[J]. Composite Structures, 2006, 75(1–4): 451–456.

[18] BASTIANINI F, DI TOMMASO A, PASCALE G. Ultrasonic non-destructive assessment of bonding defects in composite structural strengthenings[J]. Composite Structures, 2001, 53(4): 463–467.

[19] RUIZ N, VERA P, CURPIÁN J, et al. Matching pursuit-based signal processing method to improve ultrasonic flaw detection in NDT applications[J]. Electronics Letters, 2003, 39(4): 413.

[20] RUIZ-REYES N, VERA-CANDEAS P, CURPIÁN-ALONSO J, et al. High-resolution pursuit for detecting flaw echoes close to the material surface in ultrasonic NDT[J]. NDT & E International, 2006, 39(6): 487–492.

Characterisation and Evaluation of Defects in Composite Skin–Rib Joint Using Mono-Pulse Ultrasonic Method

LIU Feifei¹, LIU Songping^{1,2}, LI Zhiying¹, LI Legang¹, YANG Yusen¹, FU Tianhang¹, CHANG Haifeng¹

(1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

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

[ABSTRACT] The skin–rib joint is a very important form in carbon fiber composite panels. Because of the complex in geometric structure, internal layer, defect behavior and orientation of fibers therein, defect characterisation, detection and evaluation have been the technical difficulties and focus in their applications. In this paper, a new method for defect characterization and evaluation is proposed using mono-pulse ultrasonic (MU) wave. The experimental results show that the echo signals resulted from the skin–rib joints have very good time-domain resolution under MU reflection condition. When echo signal is close to one pulse cycle, the ultrasonic surface detection dead zone can reach a single layer thickness (about 0.125 mm). Delamination, disbanding, adhesive layer, resin layer and internal layer variation in the skin–rib joints can be characterized, detected and evaluated. The minimum deviation of detected defect is close to 0.0 mm, and the maximum deviation is about 1.0 mm compared with their designed sizes. The depth positioning deviation of detected defect is less than 0.5 prepreg ply thickness. It provides a very effective ultrasonic characterisation and evaluation method for the composite panels. Good practical application has been obtained.

Keywords: Composites; Mono-pulse ultrasonics (MU); Non-destructive testing; Defect evaluation; Ultrasonic reflection behavior; Skin–rib joint

(责编 阳光)