

# RTM 复合材料中分层缺陷的超声表征及量化分析

史俊伟, 刘松平\*, 刘菲菲, 杨玉森

(中国航空制造技术研究院复合材料技术中心, 北京 101300)

**摘要:** 以 ZT7H/QY8911 碳纤维增强树脂基 RTM 工艺成型复合材料为研究对象,通过预埋单层聚四氟乙烯薄膜 (PTFE) 模拟不同尺寸( $\phi=3\text{ mm}, 6\text{ mm}, 10\text{ mm}$ )和不同深度(近上表面、中间深度、近下表明)的分层缺陷,制备了 RTM 复合材料超声检测试样。基于水浸式超声反射法对缺陷进行超声 A-Scan、B-Scan 和 C-Scan 检测表征,并对检测结果进行量化分析。结果表明:超声反射法对 RTM 复合材料层压板中分层缺陷具有定性、定量检测能力,超声 A-Scan 检测信号中幅值、相位、时域渡越等特征量与缺陷的尺寸、深度、性质等具有相关性,超声 B-Scan 检测可以对缺陷深度进行表征,超声 C-Scan 可以对缺陷尺寸进行表征,深度方向检测分辨率达 1 个铺层厚度,缺陷尺寸的检测偏差 $\leq 1.0\text{ mm}$ 。

**关键词:** RTM 复合材料; 超声无损检测; 脉冲反射法; 超声 A-Scan; 超声 B-Scan; 超声 C-Scan

**中图分类号:** TB332      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2096-8000(2020)06-0068-06

## 1 前 言

树脂传递模塑 (Resin Transfer Molding, RTM) 作为一种复合材料液体成型工艺,被普遍认为是相对先进且具有广泛应用前景的复合材料成型工艺<sup>[1]</sup>。该工艺是将预先制备好的干态纤维增强体结构放置在闭合模具中,然后在闭合模具中渗透液态树脂,液态树脂流动充满闭合模具并浸润纤维增强体,最终固化成型<sup>[2]</sup>。RTM 工艺非常适合制造复杂结构的整体成型复合材料制件,具有性能/质量比好、成型效率高、成本低、减少装配时间等优点,RTM 复合材料制件在结构整体化设计和减重优化中发挥出重要作用,被广泛应用于航空航天、军工、汽车、船舶等领域。

俄罗斯民机 MS-21 采用 RTM 工艺制造液体成型翼梁和壁板结构件,庞巴迪 C 系列飞机采用 RTM 工艺制造外翼盒段,波音 787 和空客 A380 采用 RTM 工艺制备后压力框、垂尾和机翼壁板等复杂结构制件,在减重、降低成本和工时等方面均取得了优异效果<sup>[3,4]</sup>;国内也开发了工艺性和力学及耐热性优良的液体成型树脂体系,耐温范围涵盖  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在机翼壁板、机身壁板、发动机叶片和机匣多个型号中实现了工程应用<sup>[5,6]</sup>。

RTM 复合材料在成型过程中由于树脂注入引入空气,导致其内部产生分层、干斑、缺胶、微气孔、孔隙、纤维屈曲、树脂富集和浸润不充分等缺陷<sup>[7]</sup>,严重削弱 RTM 复合材料制件的力学性能和结构强度。在诸多缺陷类型之中,分层缺陷对材料的剪切

强度、弯曲强度、抗拉和抗压强度,以及疲劳寿命等有显著的影响,对分层缺陷的定性/定量检测是评价 RTM 复合材料制件质量的一项重要指标<sup>[7]</sup>。

超声检测是 RTM 复合材料缺陷检测中应用最为广泛的一种无损检测技术,受到了国内外学者的广泛关注,其研究工作主要分为两类:一是针对材料内部的宏观缺陷,需要对宏观缺陷的性质、位置、尺寸、深度等进行定性、定量的检测。例如,陆铭慧等<sup>[7]</sup>基于 RTM 复合材料中缺陷对超声反射特性的影响,对 RTM 复合材料中疏松、分层、夹杂及气泡等宏观缺陷进行超声表征与分析;亓淑源等<sup>[8]</sup>采用空气耦合超声 C 扫描对注射温度下数值体系对碳纤维织物的浸润流动行为进行实时检测;张尧州等<sup>[9]</sup>采用超声扫描探头结合单面/双面透明模具实时检测 RTM 成型完全浸润而未固化时的缺陷;Shiino 等<sup>[10]</sup>采用超声 C 扫描中特征参数的衰减检测 RTM 复合材料成型过程中的数值流动情况;刘松平等<sup>[11]</sup>采用超声成像方法检测 RTM 缝合液体成型复合材料层压结构的冲击损伤缺陷,并基于超声 B-Scan 成像结果分析复合材料层压结构的冲击损伤机制。二是针对材料内部的孔隙类型缺陷,超声通常无法定量检出每个孔隙,或者精确地、逐一地检出每个孔隙的检测成本太高,需要对孔隙缺陷进行量级化的数值评估。例如,陆铭慧等<sup>[12,13]</sup>先后基于超声衰减法和非线性超声检测方法对 RTM/纺织复合材料中的孔隙缺陷进行定量检测与数值化评估,建立了超声特征

收稿日期: 2019-10-08

基金项目: 牙体组织声成像方法研究 (61571409)

作者简介: 史俊伟 (1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事复合材料及焊接无损检测技术方面的研究。

通讯作者: 刘松平 (1962-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为复合材料及焊接无损检测与评估, liuspjng2014@163.com。

参数和 nonlinear 特征参数与孔隙率的线性关系; Luo 等<sup>[14]</sup> 基于仿真和试验两个角度研究了两种不同厚度的 RTM 层压板中孔隙率与超声衰减系数的相互关系; Duong 等<sup>[15]</sup> 综合超声 C-Scan 和 B-Scan 检测图像给出 RTM 层压板中孔隙的 2D 表征结果。

本文在 RTM 复合材料层压板中预埋单层聚四氟乙烯薄膜(PTFE)模拟分层缺陷, 制备 RTM 复合材料超声检测试样, 采用水浸式超声反射法对模拟缺陷进行检测, 采用 A-Scan、B-Scan 和 C-Scan 检测结果对模拟缺陷进行不同角度的表征, 对检测结果进行量化分析, 进而研究超声反射法对 RTM 复合材料层压板中分层类型缺陷的定性、定量检测能力。

## 2 实验部分

### 2.1 实验样品

实验材料为 ZT7H/QY8911 国产 T700 碳纤维/双马 RTM 树脂复合材料, 采用 RTM 成型工艺制备 RTM 复合材料层压板超声检测对比试样, 试样尺寸约为 160 mm×160 mm, 铺层分别为 $[-45^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}]_s$ 、 $[-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/(-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ})_3]_s$ 、 $[-45^{\circ}/0^{\circ}/(-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ})_7]_s$ , 厚度分别为 2 mm、6 mm 和 12 mm。在试样内部通过预埋单层聚四氟乙烯薄膜的方法模拟分层缺陷, 单层聚四氟乙烯薄膜厚度约为 0.2 mm, 分层缺陷的大小分别为  $\phi 3$  mm、 $\phi 6$  mm 和  $\phi 10$  mm, 考虑到需要分析检测方法对近表面缺陷的检出能力, 在近上表面 1 层~2 层之间、1/2 厚度位置和近下表面 1 层~2 层之间分别预埋不同深度的缺陷。图 1 为 RTM 复合材料层压板超声检测对比试样的尺寸设计图。

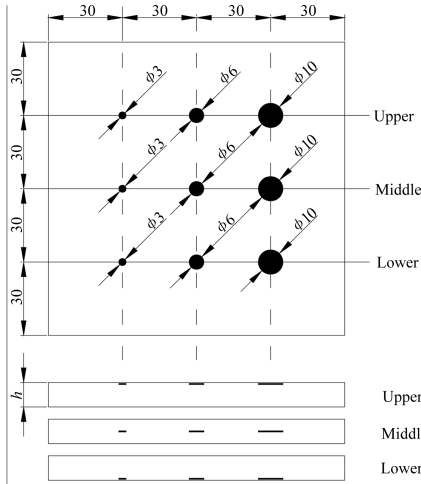


图 1 RTM 复合材料超声检测对比试样的尺寸设计图  
Fig. 1 Geometry dimension of RTM composite blocks

### 2.2 实验方法及仪器

图 2 为水浸式超声反射法的检测示意图。超声反射法采用一个探头兼作发射和接收换能器, 入射声波经由 RTM 复合材料层压板检测入射面传播到底面, 再由底面反射回入射面, 通过脉冲反射波的幅值、相位、时间渡越等特征信息进行缺陷的检测。

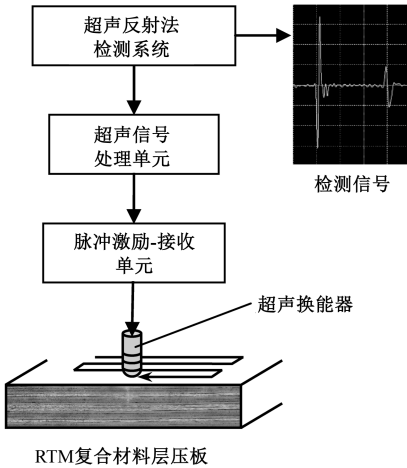


图 2 超声反射法检测示意图

Fig. 2 Ultrasonic pulse-echo reflection method

超声反射法采用中国航空制造技术研究院复合材料技术中心的 CUS-21J 水浸式超声扫描成像检测系统, 换能器采用 FJ 高分辨率宽带窄脉冲超声换能器, 中心频率为 5 MHz, 换能器晶片直径为  $\phi 30$  mm, 聚焦声柱直径为  $\phi 1.0$  mm, 焦距为 50 mm, 脉冲回波信号具备良好的单周特性, 与检测仪器匹配, 其近表面盲区不大于 0.15 mm 或单个复合材料铺层厚度。

### 2.3 缺陷表征方法

图 3 为 RTM 复合材料中缺陷表征方法示意图, 包括超声 A-Scan、B-Scan 和 C-Scan 检测。超声反射法 A-Scan 检测由脉冲超声换能器向 RTM 复合材料层压板内部发射入射声波, 当入射声波在材料内部的传播过程中遇到缺陷时, 会发生声波反射形成缺陷回波, 同时由于本文采用的换能器的聚焦声柱仅为  $\phi 1.0$  mm, 所以缺陷阻挡了全部的入射声波能量, 此时底面回波信号消失。基于超声 A-Scan 检测信号中的特征波幅值, 如缺陷回波和底面回波, 实现 RTM 复合材料层压板缺陷的定性、定量检测。超声 A-Scan 检测信号反映检测点处沿深度方向的一维数据, 横坐标表示沿深度方向传播的时间(通过声速

可转换为声程), 纵坐标表示声波幅值, 采样频率为 50 MHz, 采样深度为 600 点。

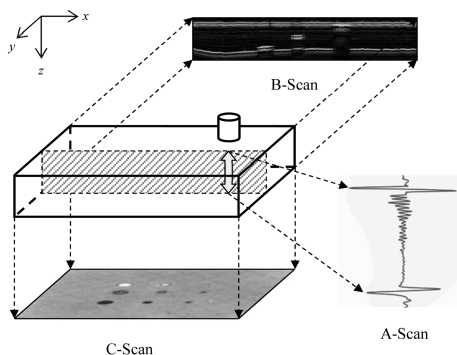


图 3 缺陷表征方法

Fig. 3 Methods for defect characterization

需要指出的是, 对于缺陷深度的判定需要基于缺陷回波与界波的渡越时间, 对于埋深在层压板近表面的缺陷, 其缺陷回波与界波在时域上相距很近, 如果换能器不具备单周特性, 缺陷回波很可能因淹没在多周界波中而不易辨识, 本文采用的聚焦换能器具有良好的单周特性, 近表面分辨力为一个铺层, 可以通过 RTM 复合材料超声检测试样中的近上表面缺陷进行验证。

超声反射法 B-Scan 检测以 A-Scan 检测信号为基础, 水平移动换能器进行线扫查, 其二维成像结果反映 RTM 复合材料层压板某一纵截面的特征, 表征缺陷沿厚度方向的分布特性。换能器沿水平方向移动, 横坐标表示换能器的水平扫查位置, 纵坐标表示超声波沿厚度方向的声波能量分布。本文基于超声反射法对 RTM 复合材料层压板进行 B-Scan 检测。超声反射法 B-Scan 检测覆盖界波至底波的时域范围, 幅值成像, 扫描速度为 90 mm/s, 增益为 68 dB。

超声 C-Scan 检测以 A-Scan 检测信号为基础, 水平移动换能器进行面扫查, 其二维成像结果反映 RTM 复合材料层压板沿厚度方向投影的结果, 横纵坐标表示换能器的位置, 成像灰度表示超声波沿水平方向的能量分布。本文基于超声反射法对 RTM 复合材料层压板进行 C-Scan 检测。超声反射法 C-Scan 检测以底波幅值成像, 扫描速度为 90 mm/s, 步进为 1 mm, 增益为 68 dB。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 超声 A-Scan 检测结果

图 4、图 5 分别为针对厚度  $h = 12$  mm 和  $h = 6$  mm 的 RTM 复合材料层压板超声检测对比试样中不同深度的模拟缺陷的超声 A-Scan 检测信号, 波形信号以三维瀑布图的形式表示。由图可见, RTM 复合材料中的分层缺陷在超声 A-Scan 检测结果中体现为缺陷回波信号 (由 D 标识, 下标 1、2、3 分别标识缺陷深度为近上表面、中间深度和近下表面) 在横坐标上的时域移动和在纵坐标上的能量变化。对于近表面缺陷, 因其在厚度方向上与上表面回波信号十分接近, 由于采用了具有单周特性的聚焦换能器, 所以可以清晰地辨识出 RTM 复合材料层压板中的近表面缺陷。

不同深度的缺陷表现出不同的特征: ①对于近上表面缺陷  $D_1$ , 其与界面回波 F 在时域上相差  $0.14 \times 10^{-6}$   $\mu$ s, RTM 复合材料中声速约为 2850 m/s, 所以缺陷  $D_1$  距离上表面约为 0.2 mm, 对应单层 RTM 复合材料厚度, 如图 4 所示; ②对于中间深度的缺陷  $D_2$ , 其缺陷二次波  $D_2'$  在时域上的位置与底波 B 相近, 检测时应注意区分两者; ③对于近下表面缺陷  $D_3$ , 其与底面回波信号 B 在时域上相差  $0.28 \times 10^{-6}$   $\mu$ s, RTM 复合材料中声速约为 2850 m/s, 所以缺陷  $D_3$  距离下表面约为 0.4 mm, 对应单层 RTM 复合材料与聚四氟乙烯薄膜的厚度之和, 如图 5 所示。

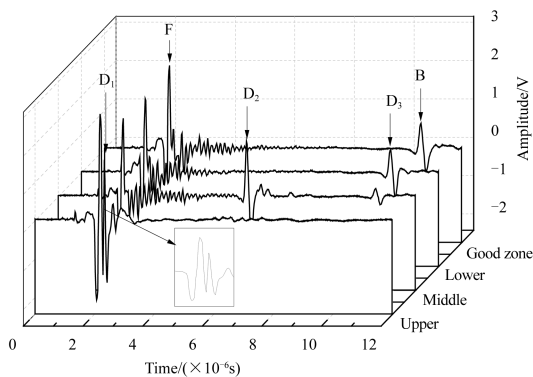


图 4 RTM 复合材料超声检测对比试样的超声 A-Scan 检测结果,  $h = 12$  mm

Fig. 4 Ultrasonic A-Scan results for RTM composite blocks,  $h = 12$  mm

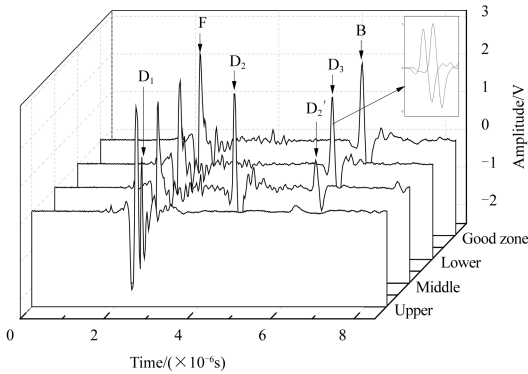


图5 RTM 复合材料超声检测对比试样的超声

A-Scan 检测结果,  $h=6\text{ mm}$

Fig. 5 Ultrasonic A-Scan results for RTM composite blocks,  $h=6\text{ mm}$

针对超声 A-Scan 检测信号中的相位信息,产生反射波的界面有三处,分别是水-RTM、RTM-PTFE 以及 RTM-水,根据表 1 所示的声学常数,声阻抗  $Z$  越大,其材料对声传播体现越“硬”。那么,当声波由水进入 RTM 时,相当于由软介质进入硬介质,则“水-RTM”界面为硬界面;同理,“RTM-PTFE”和“RTM-水”界面为软界面。超声 A-Scan 检测信号幅值与声压成正比,反射波的声压与入射波的声压在软界面处相位改变  $180^\circ$ ,所以底波 B、缺陷回波 D 两者相位一致,与界波 F 的相位相差  $180^\circ$ ,如图 4、图 5 中 A-Scan 信号的局部放大所示。

表 1 材料声学常数

Table 1 Acoustic properties of materials

	密度	声速	声阻抗
	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$c/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$Z/(\times 10^3\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$
水	998	1483	1480
RTM	1580	2940	4708
PTFE	2170	1450	3200

图 6 为不同厚度的 RTM 复合材料层压板超声检测对比试样中不同深度的模拟缺陷的超声 A-Scan 检测信号横向对比。由图可见,超声 A-Scan 检测信号中的幅值、相位、时域渡越等特征量与缺陷的尺寸、深度、性质等具有相关性,可以基于 A-Scan 检测信号特征量的变化对 RTM 复合材料中的分层缺陷进行表征。

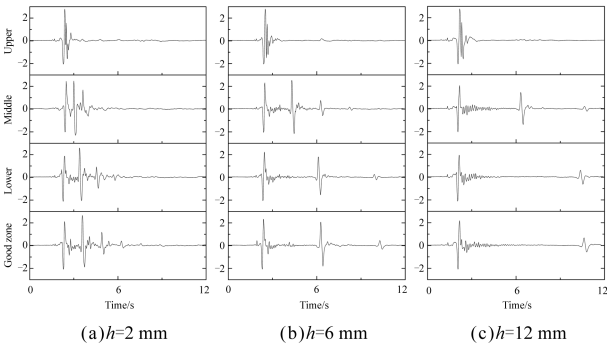


图 6 不同深度的模拟缺陷的超声

A-Scan 检测信号的对比

Fig. 6 Comparison for ultrasonic A-Scan results of various-thickness defects

3.2 超声 B-Scan 成像检测结果

图 7 为 RTM 复合材料超声检测对比试样的超声 B-Scan 检测结果。由图可见,超声 B-Scan 检测具有对缺陷深度的定量检测能力,不同深度的缺陷均可由超声 B-Scan 成像检测结果在纵坐标方向上的灰度分布清晰、直观地呈现出来。需要指出的是,对于近上表面的缺陷,因其可能会隐藏在界波的成像灰度之中,不易辨识,可以观察底波在对应的横坐标上的灰度成像进行复验,如果底波在此处没有灰度分布,说明在横坐标对应位置处有缺陷存在。

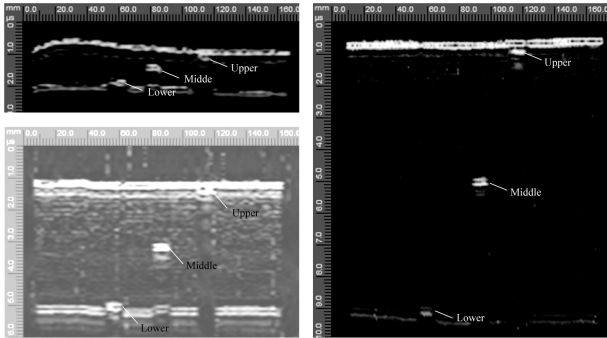


图 7 RTM 复合材料超声检测对比试块的  
超声 B-Scan 检测结果

Fig. 7 Ultrasonic B-Scan results for RTM composite blocks

表 2 以 RTM 复合材料超声对比试样中直径为  $\phi 10\text{ mm}$  的缺陷的超声 B-Scan 检测结果为例,进行缺陷深度的量化检测结果,由表可见,超声 B-Scan 检测方法对 RTM 复合材料中分层缺陷的深度具有定量检测能力,检测分辨率达 1 个铺层厚度。

表2 超声 B-Scan 和 C-Scan 的量化检测结果

Table 2 Quantitative results of ultrasonic B-Scan and C-Scan

试块厚度 /mm		超声 B-Scan				超声 C-Scan		
		设计深度 $d$ /mm	时域渡越 <sup>1</sup> $t/\mu\text{m}$	检出深度 <sup>2</sup> $d'/\text{mm}$	深度偏差 <sup>3</sup> $\Delta$ /mm	设计直径 $\phi$ /mm	检出尺寸 <sup>4</sup> /mm	尺寸偏差 /mm
2	1 <sup>st</sup> ~ 2 <sup>nd</sup>	0.2	0.15	0.22	0.02	3	3.5×3.5	-0.5
	5 <sup>th</sup> ~ 6 <sup>th</sup>	1.0	0.65	0.93	-0.07	6	6.5×6.0	-0.5
	9 <sup>th</sup> ~ 10 <sup>th</sup>	1.8	1.18	1.68	-0.12	10	11.0×10.0	-1.0
6	1 <sup>st</sup> ~ 2 <sup>nd</sup>	0.2	0.15	0.22	0.02	3	3.5×3.5	-0.5
	15 <sup>th</sup> ~ 16 <sup>th</sup>	3.0	1.98	2.82	-0.18	6	6.5×6.5	-0.5
	29 <sup>th</sup> ~ 30 <sup>th</sup>	5.8	3.93	5.60	-0.20	10	10.5×10.0	-0.5
12	1 <sup>st</sup> ~ 2 <sup>nd</sup>	0.2	0.15	0.21	0.01	3	4.0×4.0	-1.0
	30 <sup>th</sup> ~ 31 <sup>th</sup>	6.0	4.24	6.04	0.04	6	6.5×6.5	-0.5
	59 <sup>th</sup> ~ 60 <sup>th</sup>	11.8	8.32	11.85	0.05	10	10.5×10.0	-0.5

注：<sup>1</sup>以直径为  $\phi 10\text{ mm}$  的缺陷的超声 B-Scan 检测结果为例,进行缺陷深度的量化评定;<sup>2</sup>RTM 复合材料中的声速为  $2850\text{ mm/s}$ ;<sup>3</sup> $\Delta = d - d'$ ;  
<sup>4</sup>以中间深度的超声 C-Scan 检测结果为例,进行缺陷尺寸的量化评定,检出缺陷的尺寸记为轮廓的长×宽。

3.3 超声 C-Scan 成像检测结果

图 8 为 RTM 复合材料超声检测对比试样的超声 C-Scan 检测结果。由图可见,超声 C-Scan 检测对缺陷尺寸具有平行于扫描平面的定量检测能力,不同尺寸的缺陷均可由超声 C-Scan 成像检测结果以灰度的形式清晰、直观地呈现出来,A、B、C 分别对应图 1 中标识近上表面缺陷、中间深度缺陷和近下表面缺陷。超声 C-Scan 检测方法能够有效检测出 RTM 层压板试样中的模拟分层缺陷,最小检出缺陷达  $\phi 3\text{ mm}$ ,检测深度范围达  $12\text{ mm}$ ,近表面分辨率达  $0.2\text{ mm}$ ,即单个 RTM 铺层厚度。

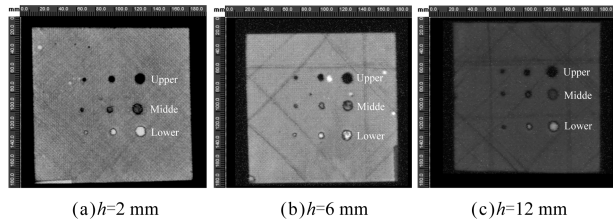


图 8 RTM 复合材料超声检测对比试样的超声 C-Scan 检测结果

Fig. 8 Ultrasonic C-Scan results for RTM composite blocks

表 2 以 RTM 复合材料超声对比试样内中间深度的缺陷的超声 C-Scan 检测结果为例,进行缺陷尺寸的量化检测结果,由表可见,超声 C-Scan 检测方法对 RTM 复合材料中的分层缺陷具有定量检测能

力,检测偏差  $\leq 1.0\text{ mm}$ 。

4 结 论

- (1) 采用具有单周特性的高分辨率换能器对 RTM 复合材料中的分层缺陷进行检测,能够从 A-Scan、B-Scan 和 C-Scan 等不同角度对缺陷进行定性、定量检测,清晰地辨识出 RTM 复合材料层压板中的近表面缺陷;
- (2) 超声 A-Scan 检测信号中的幅值、相位、时域渡越等特征量与缺陷的尺寸、深度、性质等具有相关性,可以基于 A-Scan 检测信号特征量的变化对 RTM 复合材料中的分层缺陷进行表征;
- (3) 超声 B-Scan 检测对 RTM 复合材料中分层缺陷的深度具有定量检测能力,检测偏差  $\leq 0.20\text{ mm}$ ,检测分辨率达 1 个铺层厚度;
- (4) 超声 C-Scan 检测对 RTM 复合材料中分层缺陷的尺寸具有定量检测能力,检测偏差  $\leq 1.0\text{ mm}$ 。

参考文献

[1] T. G. 古托夫斯基. 先进复合材料制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[2] 李培旭, 陈萍, 苏佳智, 等. 复合材料先进液体成型技术的航空应用与最新发展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(8): 99-104.

[3] Torregrosa A. Some of the topics in composites research projects in japan[C]//Aiaa/asme/asce/ahs/asc Structures, Structural Dynam-



ics, &Materials Conference. 2013.

[ 4 ] 陈卢松. 复合材料液体成型工艺在民用飞机领域的应用进展 [J]. 塑料, 2018, 47(2) : 93-96.

[ 5 ] 包建文, 蒋诗才, 张代军. 航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势[J]. 科技导报, 2018, 36(19) : 52-63.

[ 6 ] 张璇. 三维机织复合材料机匣 RTM 成型仿真分析[J]. 塑料科技, 2018, 46(6) : 88-92.

[ 7 ] 陆铭慧, 王俊东, 张毅萍, 等. RTM 碳纤维复合材料宏观缺陷超声表征及分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(4) : 70-74.

[ 8 ] 亓淑源, 李波, 李刚, 等. RTM 快速成型环氧树脂时间-温度-转变图的构建及其碳纤维/环氧树脂复合材料评价[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8) : 1804-1812.

[ 9 ] 张尧州, 刘刚, 唐邦铭, 等. RTM 成型过程中微观缺陷在线检测技术研究[J]. 材料工程, 2009( s2) : 462, 465.

[ 10 ] Shiino M Y, Maria O H C, Voorwald H J C. Evaluation of stitched fabric composite processed by RTM in quasi-static test[J]. Procedia Engineering, 2011, 10( none ) : 2603-2608.

[ 11 ] 刘松平, 刘菲菲, 郭恩明. 利用超声成像分析不同复合材料层压结构冲击损伤行为[J]. 机械工程学报, 2014, 50(20) : 1-7.

[ 12 ] 陆铭慧, 林娜. RTM/纺织复合材料孔隙率非线性超声方法研究[J]. 航空制造技术, 2013, 425(5) : 89-93.

[ 13 ] 陆铭慧, 刘磨, 张雪松, 等. RTM 玻璃纤维/E51 环氧树脂复合材料孔隙含量对超声特征参数的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(2) : 291-297.

[ 14 ] Luo J F, Yin H W, Li W Y, et al. Numerical and experimental study on the heat transfer properties of the composite paraffin/expanded graphite phase change material[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 84: 237-244.

[ 15 ] Duong N T, Duclos J, Bizet L, et al. Relation between the ultrasonic attenuation and the porosity of a RTM composite plate[J]. Physics Procedia, 2015, 70: 554-557.

ULTRASONIC CHARACTERIZATION AND QUANTITATIVE ANALYSIS

FOR DELAMINATION IN RTM COMPOSITES

SHI Jun-wei, LIU Song-ping\*, LIU Fei-fei, YANG Yu-shen

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

**Abstract:**Regarding ZT7H/QY8911 carbon fiber reinforced resin matrix composites as research object, this paper prepared specimens using resin transfer molding processes (RTM) with simulated delamination by imbedding polytetrafluoroethylene (PTFE) film with different diameters ( $\phi = 3\text{ mm}$ ,  $6\text{ mm}$ ,  $10\text{ mm}$ ) and different depth (near-upper-surface, mid-depth and near-lower-surface). Delamination was visually detected and quantitatively analyzed by ultrasonic A-Scan, B-Scan and C-Scan based on water-immersed ultrasonic pulse-echo reflection method. The result shows that the ultrasonic pulse-echo reflection method possesses qualitative and quantitative testing capacity for detecting delamination in RTM composite. The amplitude, phase and transit time of ultrasonic A-Scan signal have correlations with the size, depth and property of delamination. Ultrasonic B-Scan can characterize the defect depth as images with depth detection resolution up to one-ply thickness, while ultrasonic C-Scan can characterize the defect size as images with size detection deviation  $\leq 1.0\text{ mm}$ .

**Key words:**RTM composite; ultrasonic nondestructive testing; pulse-echo reflection; ultrasonic A-Scan; ultrasonic B-Scan; ultrasonic C-Scan