

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.24102601 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.24102601

引用格式: 高晓进, 梁成渝, 王丙阳, 等. 大厚度复合材料蜂窝夹芯结构超声检测方法[J]. 声学技术, 2025, 44(0): 1-7. [GAO Xiaojin, LIANG Chengyu, WANG Bingyang, et al. Ultrasonic detection method for large thick composite honeycomb sandwich structures[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(0): 1-7.]

大厚度复合材料蜂窝夹芯结构超声检测方法

高晓进^{1,2}, 梁成渝¹, 王丙阳¹, 付亮¹, 梅辉¹

(1. 西北工业大学材料学院, 陕西西安 710072; 2. 航天特种材料及工艺技术研究所材料测试中心, 北京 100074)

摘要: 新型飞行器的舱门、机翼、尾翼等结构大量采用了大厚度复合材料蜂窝夹芯粘接结构。针对该结构的材料组成和结构特点, 分析了常规超声反射法和超声穿透法检测蜂窝夹芯与面板粘接质量的适用性, 发现常规的超声反射法和穿透法均难以检测大厚度复合材料蜂窝夹芯结构的脱粘缺陷。提出了喷水耦合超声 C 扫描反射法和接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法结合的检测方法。采用提出的检测方法对含有人工缺陷的大厚度复合材料蜂窝夹芯粘接结构试样进行检测。检测结果表明, 采用提出的检测方法能够检出试样中 I 界面、II 界面的所有人工脱粘缺陷, 检测灵敏度优于 $\Phi 5$ mm 脱粘, 实现 60 mm 厚度的蜂窝夹芯与复合材料面板粘接质量的超声检测。

关键词: 复合材料; 大厚度; 蜂窝; 脱粘; 超声; 检测

中图分类号: TB559

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-00-0001-07

Ultrasonic detection method for large thick composite honeycomb sandwich structures

GAO Xiaojin^{1,2}, LIANG Chengyu¹, WANG Bingyang¹, FU Liang¹, MEI Hui¹

(1. Material Science and Engineering School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

2. Material Testing Center, Research Institute of Aerospace Special Materials and Process Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: The cabin doors, wings, tail fins and other structures of the new aircraft extensively adopt large-thick composite honeycomb sandwich bonding structures. Based on the material composition and structural characteristics of the structure, the applicability of conventional ultrasonic reflection and penetration methods for detecting the bonding quality between honeycomb sandwich and panel is analyzed. It is found that both conventional ultrasonic reflection and penetration methods are difficult to detect debonding defects in large thick composite honeycomb sandwich structures. A detection method combining water jet coupled ultrasonic C-scan reflection method and contact coupled high-resolution focused ultrasonic A-scan reflection method is proposed. The proposed detection method is used to detect samples of large thick composite honeycomb sandwich bonding structures containing artificial defects. The detect results show that the proposed testing method can detect all artificial debonding defects at the I and II interfaces in the sample, with a detection sensitivity better than that of the $\Phi 5$ mm debonding, achieving ultrasonic detection of the bonding quality between 60 mm honeycomb sandwich and composite panel.

Key words: composite; large thickness; honeycomb; debonding; ultrasonic; detection

0 引言

由于纤维增强树脂基复合材料具有小密度、高比强度、高比刚度、良好抗疲劳性、良好耐腐蚀性等优点, 航空航天飞行器中越来越多的构件采用复合材料^[1-3]。复合材料蜂窝夹芯结构由复合材料面板和内部蜂窝粘接而成, 密度比常规的纤维增强树

脂基复合材料小, 能够进一步减重, 已广泛应用于新型飞行器的舱门、机翼、尾翼等结构^[4-5]。随着飞行距离的增加和飞行环境越来越严苛, 复合材料蜂窝夹芯结构内部蜂窝和复合材料面板的厚度不断增加, 且采用新的复合材料体系和工艺制备。该结构的蜂窝和面板采用胶结工艺进行粘接, 生产过程中粘接界面容易产生脱粘缺陷。由于飞行器在工作时承受强烈的气流和振动载荷, 脱粘缺陷可能导致面板脱落和结构断裂, 造成严重后果。无损检测是保证复合材料蜂窝夹芯结构内部质量的有效手段。

目前, 针对纤维增强树脂基复合材料内部缺陷的无损检测, 学者们开展了红外检测^[6-7]、X 射线

收稿日期: 2024-10-26; 修回日期: 2024-11-23

基金项目: 航空科学基金(20230042053002)

作者简介: 高晓进(1987—), 男, 江西九江人, 博士, 高级工程师, 研究方向为无损检测。

通信作者: 梅辉, E-mail: meihui@nwpu.edu.cn

检测^[8-9]、太赫兹检测^[10]等技术的研究。但红外检测难以准确确定缺陷深度，且难以区分复合材料与蜂窝粘接胶膜上还是胶膜下脱粘；X射线检测由于透照方向的原因，无法检测复合材料与蜂窝脱粘缺陷；太赫兹检测目前仍不成熟，检测结果可靠性尚未被广泛认可。

超声检测是纤维增强树脂基复合材料应用最广泛、最有效的无损检测方法^[11-13]。目前超声检测已应用于小厚度复合材料蜂窝夹芯结构的无损检测^[14]。但由于大厚度复合材料蜂窝夹芯结构的蜂窝夹芯厚度大，导致超声波严重衰减，能量无法穿透；由于粘接面胶膜厚度较小，难以区别胶膜 I 界面（复合材料面板与胶膜的界面）和 II 界面（胶膜与蜂窝的界面）脱粘，常规超声检测方法难以检测。本文提出了大厚度复合材料蜂窝夹芯结构脱粘缺陷的超声检测方法，解决了该类结构的无损检测难题。

1 检测方法及原理

常用的超声检测方法有超声反射法和超声穿透法^[15]。采用超声反射法检测时，探头直接接触被检件表面，采用一个超声波探头发射和接收超声信号，如图 1 所示。超声反射法检测信号波形如图 2 所示。由于复合材料面板与蜂窝的粘接区域为蜂窝格截面，蜂窝格的蜂窝壁厚小于 1 mm，因此粘接的区域很小。常规的超声探头晶片尺寸大于 5 mm，

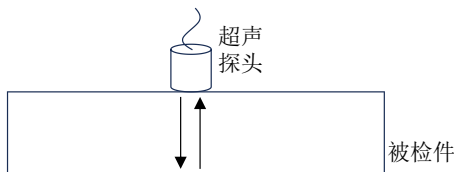
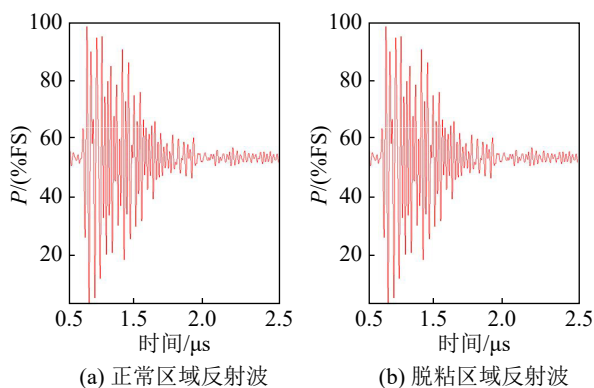


图 1 超声反射法检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of ultrasonic reflection method



(a) 正常区域反射波 (b) 脱粘区域反射波

图 2 超声反射法检测信号波形

Fig.2 Waveform of detection signal with ultrasonic reflection method

横向分辨力难以满足检测要求，且脱粘造成的信号变化很小，难以与正常区域区分，如图 2 所示。图 2 中纵坐标 P 表示信号幅度占满量程 (full scale, FS) 的百分比，下同。另外，复合材料面板厚度一般小于 5 mm，常规反射法检测时，在近表面盲区内，纵向分辨力难以满足检测要求，无法区分表面波和粘接波、胶膜的 I 界面、II 界面反射波。

超声穿透法检测示意图如图 3 所示。利用喷水的方式进行耦合。发射探头发射超声波信号，超声波信号经过上复合材料面板、蜂窝和下复合材料面板，接收探头接收超声波信号。由于蜂窝的厚度大，且蜂窝壁较薄，超声信号衰减大，传播路径的截面小，难以穿透。图 4 为采用 100 kHz 的低频高能超声波进行穿透法检测的超声信号波形，表明无法穿透该结构。

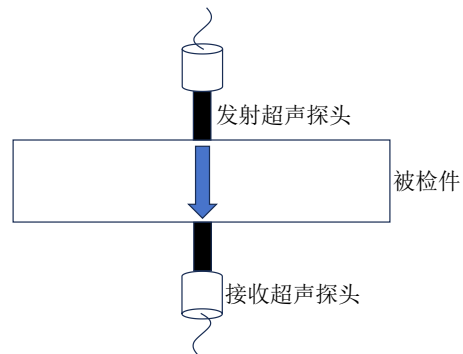


图 3 超声穿透法检测示意图

Fig.3 Schematic diagram of ultrasonic penetration method

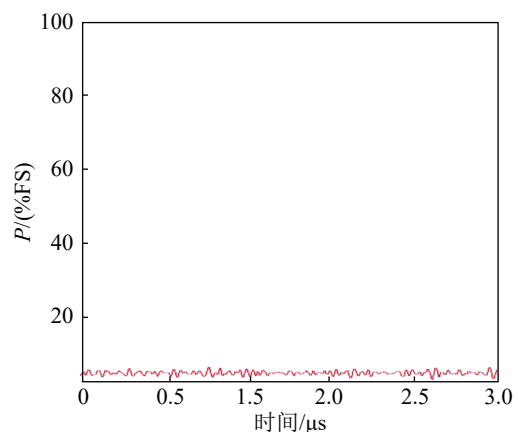


图 4 超声穿透法检测的信号波形

Fig.4 Waveform of the detection signal with ultrasonic penetration method

由分析可知，采用常规的超声反射法和穿透法均难以检测大厚度复合材料蜂窝夹芯结构的脱粘缺陷。本文提出采用喷水耦合超声 C 扫描反射法和接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法结合的方法来检测大厚度复合材料蜂窝夹芯结构的脱粘缺陷。首先采用喷水耦合超声 C 扫描反射法检测被

检件，提取粘接面反射信号进行 C 扫描成像，并根据 C 扫描图显示的缺陷位置确定脱粘缺陷的水平位置，并在被检件上、下两个面对应的位置做标记。之后，采用接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法分别从上、下两个面标记位置进行检测，根据超声 A 扫描波形判断脱粘缺陷在胶膜的 I 界面还是 II 界面。

喷水耦合超声 C 扫描反射法检测被检件示意图如图 5 所示。提取的超声信号如图 6 所示，超声 C 扫描成像时使用电子闸门提取粘接波进行成像，可直观反应粘接质量。

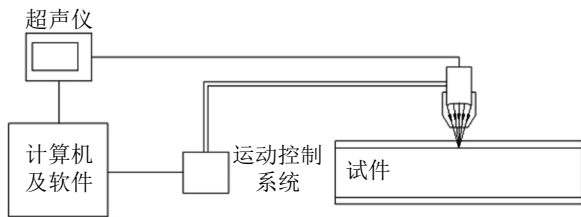


图 5 喷水耦合超声 C 扫描反射法检测示意图

Fig.5 Schematic diagram of water spray coupled ultrasonic C-scan reflection method

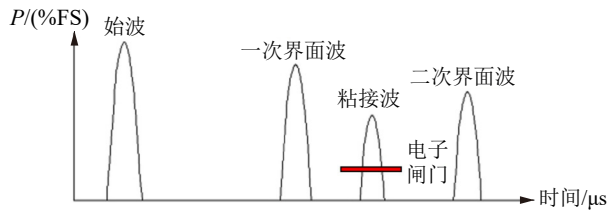


图 6 喷水耦合超声 C 扫描反射法检测信号波形

Fig.6 Waveform of detection signal with water spray coupled ultrasonic C-scan reflection method

接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法采用带水囊延迟块的高分辨力聚焦探头，同时具有高的横向分辨率和纵向分辨率。以焦点直径 $D=1\text{ mm}$ 、频率 $f=7.5\text{ MHz}$ 、脉冲周期数 $N=1$ 周为例进行计算。横向分辨率小于 $D/2=0.5\text{ mm}$ ，满足检测要求。构件中各材料的声学参数见表 1。超声波脉冲宽度 $w=N \times C_c / (2f)=0.21\text{ mm}$ 。大厚度复合材料蜂窝夹芯结构的复合材料面板厚度为 2~5 mm，胶膜的厚度为 0.3~0.5 mm，超声波宽度 w 小于复合材料面板和胶膜的厚度，说明 I 界面和 II 界面反射波能够被清晰地分辨，且能够确定缺陷的深度位置，因此纵向分辨力满足检测要求。

脱粘处和粘接正常的声压反射率满足式 (1) 和

式 (2):

$$\gamma_{\text{debond}} = \frac{Z_A - Z_C}{Z_A + Z_C} \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{bond}} = \frac{Z_F - Z_C}{Z_F + Z_C} \quad (2)$$

其中 γ_{debond} 为脱粘处的声压反射率， γ_{bond} 为粘接正常处的声压反射率， Z_A 为空气的声阻抗， Z_C 为复合材料的声阻抗， Z_F 为胶膜的声阻抗。根据式 (1) 和式 (2) 计算得到粘接正常处的声压反射率 $\gamma_{\text{bond}} \approx -100\%$ ，脱粘处的声压反射率 $\gamma_{\text{debond}} = -18\%$ ，说明粘接正常区域和脱粘区域的粘接波幅度变化明显。因此可以用来判断缺陷^[16]，检测结果具有很高的可靠性。

2 试样设计及试验系统参数

2.1 试样设计

因被检件要求检测的最小脱粘缺陷为 $\Phi 5\text{ mm}$ ，采用 $\Phi 5\text{ mm}$ 、 $\Phi 10\text{ mm}$ 、 $\Phi 15\text{ mm}$ 的两层聚四氟乙烯薄膜置于胶膜的 I 界面、II 界面模拟脱粘缺陷的方式制作试样。复合材料面板的厚度为 5 mm，蜂窝夹芯厚度为 60 mm。试样采用材料为 T700/环氧树脂，制备工艺为热压罐成型。试样示意图如图 7 所示。

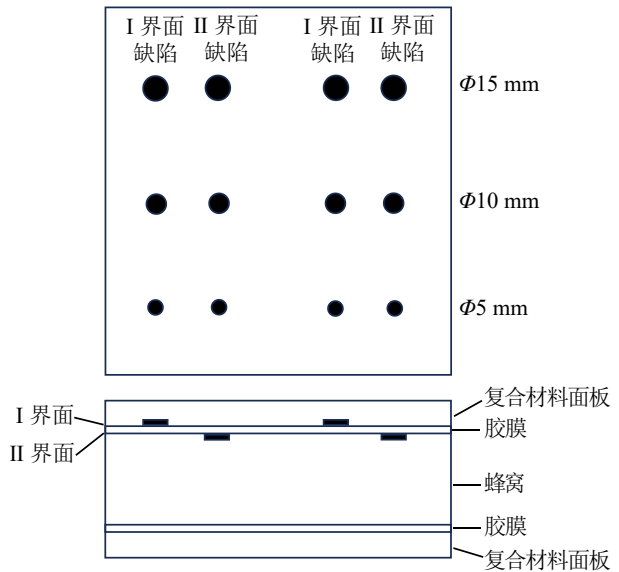


图 7 试样示意图

Fig.7 Schematic diagram of the sample

2.2 喷水耦合超声 C 扫描反射法系统参数

超声 C 扫描无损检测系统为自制 RH-Cscan。超声探头的频率为 5 MHz、晶片直径为 $\Phi 10\text{ mm}$ 、焦距为 63.5 mm。采样间距为 0.5 mm。扫查步进为 1 mm。耦合方式为喷水耦合。水柱直径为 5 mm。

表 1 材料参数

Table 1 Parameter of the material

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	纵波声速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	声阻抗/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
CFRP	1.60×10^3	3.20×10^3	5.12×10^6
胶膜	1.40×10^3	2.54×10^3	3.56×10^6
空气	1.29	340.00	438.60

耦合间距为 62 mm。灵敏度为正常区域粘接时反射波幅度占超声仪满量程的 40%。扫查速度为 $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ；缺陷阈值设置为小于正常区域粘接反射波幅度-6 dB，或大于正常区域粘接反射波幅度+6 dB。调节电子闸门位置和宽度，使其只套住粘接波，提取闸门的超声波信号峰值进行成像。超声 C 扫描图像显示的灰度图，反射波幅度为 100% 时对应的灰度值 (RGB) 为 255，反射波幅度为 0 时对应的灰度值 (RGB) 为 0。

2.3 接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法系统参数

超声仪选用 NDT systems 公司的 NDTs-90。超声探头的频率为 5 MHz、脉冲宽度为 1 个周期、晶片直径为 13 mm、焦点直径为 1.0 mm、焦距为 63.5 mm；耦合延迟块为水囊。扫查步进为 2 mm。耦合方式为接触水膜耦合。灵敏度设置为正常区域粘接反射波幅度为超声仪满量程的 40%。缺陷阈值设置为超声仪满量程的 60%。扫查速度为 $\leq 50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.4 数字射线系统参数

复合材料数字射线 (digital ray, DR) 无损检测系统的系统参数为：管电压为 250 keV；管电流为 3 mA；焦点尺寸为 0.4 mm；透射方向为试样表面的法线。

2.5 工业计算机层析成像系统参数

复合材料计算机层析成像 (computed tomography, CT) 无损检测系统的系统参数为：管电压为 350 keV；管电流为 3 mA；焦点尺寸为 0.4 mm。

3 检测结果及分析

3.1 喷水耦合超声 C 扫描反射法检测结果

按照 2.2 节中确定的检测参数，采用喷水耦合超声 C 扫描反射法对含预置人工缺陷的试样进行检测，得到超声 C 扫描图像如图 8 所示。由图 8 可知，超声 C 扫描图像中显示的缺陷位置、外轮廓和形状与实际人工缺陷几乎一致，I 界面脱粘显示的颜色为白色，II 界面脱粘显示的颜色为黑色。

采用超声 C 扫描软件的测量功能分别测量图 8 中所有缺陷的面积，数据见表 2。由表 2 可知，检测得到的预置人工缺陷面积与实际值误差均小于 10%。因此，喷水耦合超声 C 扫描反射法能够准确地显示出预置缺陷。检测完成后在试样表面分别标记缺陷位置。

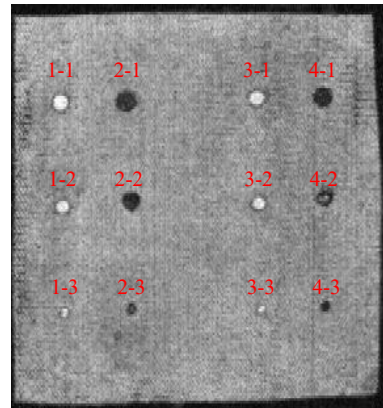


图 8 试样超声 C 扫描图

Fig.8 Ultrasonic C-scan image of the sample

表 2 试样超声 C 扫描图中缺陷面积统计

Table 2 Statistics of defect area in the ultrasonic C-scan image

缺陷位置	缺陷类型	缺陷面积/ mm^2		误差/%
		测量值	实际值	
1-1	I 界面脱粘	331.00	314.00	5.00
1-2	I 界面脱粘	84.00	78.50	6.00
1-3	I 界面脱粘	21.00	19.63	8.00
2-1	II 界面脱粘	327.00	314.00	4.00
2-2	II 界面脱粘	84.00	78.50	6.00
2-3	II 界面脱粘	21.00	19.63	7.00
3-1	I 界面脱粘	324.00	314.00	3.00
3-2	I 界面脱粘	83.00	78.50	5.00
3-3	I 界面脱粘	21.00	19.63	6.00
4-1	II 界面脱粘	320.00	314.00	2.00
4-2	II 界面脱粘	84.00	78.50	6.00
4-3	II 界面脱粘	21.00	19.63	8.00

超声 C 扫描中灰度值 (RGB 值) 与反射信号的幅度 P 成正比关系，即 $\text{RGB}=0\sim 255$ ，对应反射信号的幅度 $P=0\sim 100\% \text{FS}$ ，满足 $\text{RGB}=255\times P$ 。根据超声 C 扫描图统计检测出的人工缺陷处的灰度值及反射信号幅度见表 3。其中，正常区域随机取 6 个点计算平均值正常区域 $\text{RGB}=145(P=56.9\% \text{FS})$ 。

表 3 超声 C 扫描图中缺陷的灰度值及反射信号幅度
Table 3 Values scale and amplitudes of reflected signal of defects in ultrasonic C-scan images

行	RGB(P)			
	第1列	第2列	第3列	第4列
1	39 (15.30%FS)	213 (83.50%FS)	49 (19.20%FS)	229 (89.80%FS)
2	39 (15.30%FS)	221 (86.70%FS)	32 (12.50%FS)	246 (96.50%FS)
3	39 (15.30%FS)	242 (94.90%FS)	36 (14.10%FS)	254 (99.60%FS)

将超声 C 扫描图中缺陷的波幅与正常区域波幅的比值进行统计结果见表 4。其中，比值为缺陷处的波幅除以正常区域的波幅。

表 4 超声 C 扫图中缺陷的反射信号幅度与正常区域的比值
Table 4 The ratio of amplitudes of reflect signal of defects in C-scan ultrasonic images to that of normal areas

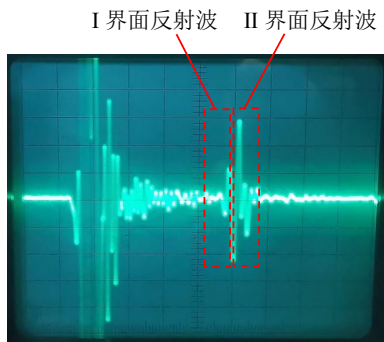
行	比值			
	第1列	第2列	第3列	第4列
1	0.27	1.46	0.34	1.58
2	0.27	1.52	0.22	1.70
3	0.27	1.67	0.25	1.75

由表 4 可知，第 1 列和第 3 列的缺陷超声波幅度小于正常区域，且均不大于正常区域的 0.34 倍；第 2 列和第 4 列的缺陷穿透波波幅大于正常区域的波幅，且均不小于正常区域的 1.52 倍。结果说明采用喷水耦合超声纵波反射 C 扫描检测法检测缺陷处的超声信号幅度与正常区域幅度差别较大，检测结果的可靠性较高。

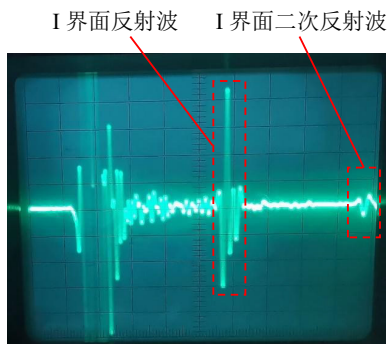
3.2 接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法检测结果

按 2.3 节中确定的参数，本文采用接触耦合高分辨率聚焦超声 A 扫描反射法对标记的每个缺陷位置进行检测，得到的信号波形图如图 9 所示。图 9(a) 为正常区域的超声反射波波形；图 9(b) 为 I 界面人工脱粘缺陷处 (缺陷为 1-1、1-2、1-3、3-1、3-2、3-3) 超声反射波波形；图 9(c) 为 II 界面人工脱粘缺陷处 (缺陷为 2-1、2-2、2-3、4-1、4-2、4-3) 超声反射波波形。粘接波反射波幅度统计结果如表 5 所示。

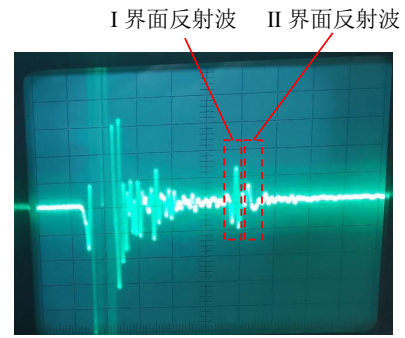
超声波传播路径如图 10 所示。由图 9 可知，



(a) 正常区域的超声反射波波形



(b) I 界面人工脱粘缺陷超声反射波波形



(c) II 界面人工脱粘缺陷超声反射波波形

图 9 接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法反射信号波形
Fig.9 Waveform of reflected signal with contact coupled high resolution focused ultrasonic A-Scan reflection method

表 5 人工缺陷反射波幅度值统计
Table 5 Statistics of artificial defect reflection waves amplitude

缺陷位置	缺陷类型	粘接面反射波幅度/%FS
1-1	I界面脱粘	75.00
1-2	I界面脱粘	80.00
1-3	I界面脱粘	77.00
2-1	II界面脱粘	20.00
2-2	II界面脱粘	23.00
2-3	II界面脱粘	25.00
3-1	I界面脱粘	76.00
3-2	I界面脱粘	78.00
3-3	I界面脱粘	80.00
4-1	II界面脱粘	26.00
4-2	II界面脱粘	25.00
4-3	II界面脱粘	23.00
正常区域	—	40.00~60.00

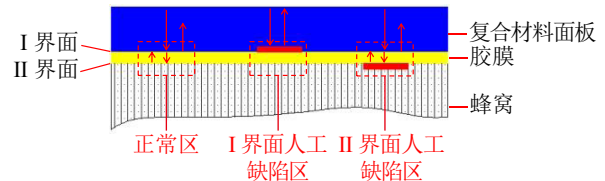


图 10 接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法信号传播过程
Fig.10 Signal propagation process of contact coupled high-resolution focused ultrasonic A-scan reflection method

正常区域可观察到超声波信号在 I 界面和 II 界面产生的反射信号，反射波的峰峰值为 52%；第 1 列、第 3 列缺陷区域只能观察到 I 界面的反射信号，不能观察到 II 界面的反射信号，反射波的峰峰值增加为 75%，且能观察到 I 界面脱粘的二次反射波。这是因为：在 I 界面放置了人工模拟脱粘缺陷，超声波传播到 I 界面时，被人工缺陷中空气层几乎全部反射，反射波幅度也会增大，且无法传播至 II 界面。第 2、第 4 列缺陷区域能观察到 I 界面的反射信号和 II 界面的反射信号，反射波的峰峰值降低为 25%。这是因为：在 II 界面放置了人工模拟脱

粘缺陷, 超声波传播到 I 界面, 超声信号与正常区域一致, 可继续往下传播, 传播至 II 界面的人工缺陷处时, II 界面的人工缺陷会对超声信号衰减, 且与正常区域的 II 界面相比, 人工模拟脱粘缺陷 II 界面的平整度和粗糙度增加, 导致 II 界面的超声反射波幅度进一步降低。因此, 超声信号传播至 II 界面时, 反射波幅度会减小。由上述分析可知, 接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法检测试件时, 能够准确检测出试件中所有的 I 界面和 II 界面脱粘。

本文提出的超声检测方法采用的是反射信号。不同于穿透法, 本文方法中超声波信号不用传播至蜂窝内部, 只需在复合材料面板和粘接层传播。因此, 提出的检测方法对蜂窝的厚度没有限制, 能够检测任意厚度的蜂窝。

本文采用的超声波频率为 5 MHz, 理论检测灵敏度为波长的一半, 即 $\frac{\lambda}{2} = \frac{C}{2f} = \frac{3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{2 \times 5 \text{ MHz}} = 0.3 \text{ mm}$, 理论上能发现最小 $\Phi 0.3 \text{ mm}$ 的缺陷, 但由于超声波焦点尺寸为 1 mm, 对于大于焦点尺寸的缺陷检测结果可靠性较高, 因此可发现的最小脱粘缺陷尺寸为 $\Phi 1 \text{ mm}$ 。

为进一步验证超声检测结果, 采用 DR 法和工业 CT 方法的检测结果进行对比分析。

3.3 DR 法检测结果

按照 2.4 节中确定的检测参数采用 DR 检测方法进行检测, 得到的图像如图 11 所示。从图 11 中可观察到 12 个缺陷, 与超声检测的结果一致, 同时也能检测出蜂窝的形状。

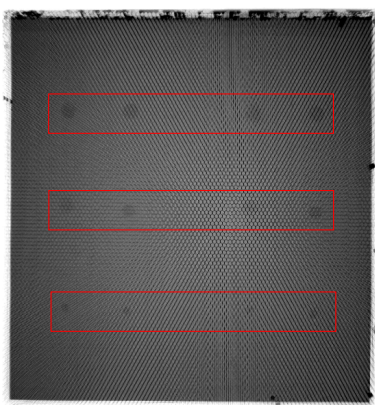


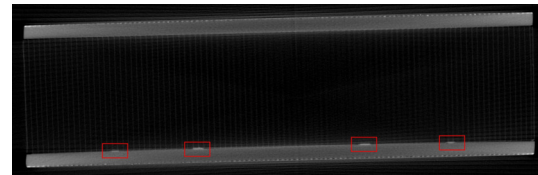
图 11 DR 检测图像

Fig.11 Detection image with DR method

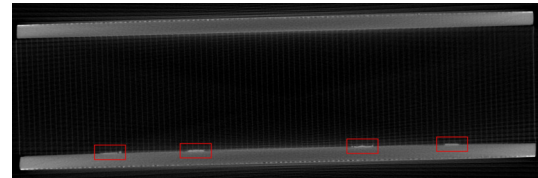
3.4 工业 CT 法检测结果

按照 2.5 节中确定的检测参数, 采用工业 CT 检测方法进行检测。分别选取超声检测第 1 行、第 2 行、第 3 行缺陷高度位置进行 CT 断层图像重建, 得到的图像如图 12 所示。由图 12 可

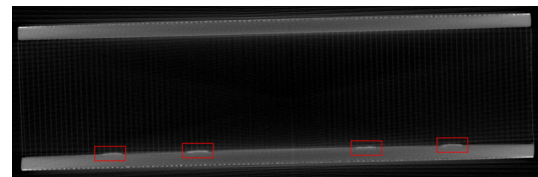
知, 超声检测出的 3 行缺陷处均存在人工缺陷, 与超声检测结果一致。受空间分辨率的影响, CT 图像无法分辨缺陷是在 I 界面还是 II 界面。



(a) 第 1 行缺陷



(b) 第 2 行缺陷



(c) 第 3 行缺陷

图 12 CT 图像

Fig.12 Detection image with CT method

4 结论

本文提出了喷水耦合超声 C 扫描反射法和接触耦合高分辨力聚焦超声 A 扫描反射法结合的检测方法。本文采用提出的检测方法对含有人工缺陷的大厚度复合材料蜂窝夹芯粘接结构试样进行检测, 得到以下结论:

(1) 本文提出的方法能够检测出蜂窝厚度为 60 mm 的大厚度复合材料蜂窝夹芯结构试样中的 $\Phi 5 \text{ mm}$ 及以上尺寸的 I 界面和 II 界面人工脱粘缺陷, 且对蜂窝的厚度没有限制;

(2) 接触耦合高分辨聚焦超声 A 扫描反射法在第 1、第 3 列缺陷区域只能观察到 I 界面的反射信号, 不能观察到 II 界面的反射信号, 反射波的峰峰值增加到 75%, 第 2、第 4 列缺陷区域能观察到 I 界面的反射信号和 II 界面的反射信号, 反射波的峰峰值降低到 25%;

(3) DR 法和工业 CT 法的检测结果进一步验证了本文超声检测方法的有效性。

参考文献

- [1] 顾颖卓, 李敏, 李艳霞, 等. 飞行器结构用复合材料制造技术与工艺理论进展[J]. 航空学报, 2015, 36(8): 2773-2797.
GU Yizhuo, LI Min, LI Yanxia, et al. Progress on manufactur-

- ing technology and process theory of aircraft composite structure[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, **36**(8): 2773-2797.
- [2] 李军, 刘燕峰, 倪洪江, 等. 航空发动机用树脂基复合材料应用进展与发展趋势[J]. *材料工程*, 2022, **50**(6): 49-60.
LI Jun, LIU Yanfeng, NI Hongjiang, et al. Application progress and development trend of resin matrix composites for aero engine[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2022, **50**(6): 49-60.
- [3] 高晓进, 周金帅, 江柏红. CFRP 蒙皮-CFRP 胶接质量的原位超声检测技术[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(4): 32-38.
GAO Xiaojin, ZHOU Jinshuai, JIANG Baihong. On-equipment ultrasonic testing technology of bonding quality of CFRP skin-cfrp[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018(4): 32-38.
- [4] 章清乐, 刘松平, 刘菲菲. 大型复合材料蜂窝夹芯结构 X 射线数字成像自动化快速扫描检测技术[J]. *航空制造技术*, 2022, **65**(13): 78-83.
ZHANG Qingle, LIU Songping, LIU Feifei. Fast inspection of large-scale composite honeycomb sandwich structures using automated X-ray digital radiography scanning imaging technique[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, **65**(13): 78-83.
- [5] JING L, WANG Z H, NING J G, et al. The dynamic response of sandwich beams with open-cell metal foam cores[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2011, **42**(1): 1-10.
- [6] 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.
- [7] THUMMERER G, MAYR G, BURGHOLZER P. 3D photo-thermal imaging of subsurface defects in composite materials[J]. *NDT& E International*, 2021, **122**: 102476.
- [8] GARCEA S C, WANG Y, WITHERSP J. X-ray computed tomography of polymer composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, **156**: 305-319.
- [9] 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.
- [10] STRAG M, SWIDERSKI W. Defect detection in aramid fiber-reinforced composites via terahertz radiation[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2022, **42**(1): 19.
- [11] 杨红娟, 杨正岩, 杨雷, 等. 碳纤维复合材料损伤的超声检测与成像方法研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, **40**(8): 4295-4317.
YANG Hongjuan, YANG Zhengyan, YANG Lei, et al. Progress in ultrasonic testing and imaging method for damage of carbon fiber composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, **40**(8): 4295-4317.
- [12] 杨亮, 蔡桂喜, 刘芳, 等. 碳纤维复合材料制孔结构超声无损检测及评价[J]. *中国机械工程*, 2023, **34**(19): 2327-2332.
YANG Liang, CAI Guixi, LIU Fang, et al. Ultrasonic nondestructive testing and evaluation of CFRP hole-making structures[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, **34**(19): 2327-2332.
- [13] 高晓进. 金属夹心 CFRP 复合材料超声检测方法[J]. *声学技术*, 2019, **38**(5): 526-531.
GAO Xiaojin. An ultrasonic detection method for metal sandwich CFRP composite[J]. *Technical Acoustics*, 2019, **38**(5): 526-531.
- [14] 郝威, 李明, 徐莹, 等. 复合材料蜂窝夹芯缺陷超声检测模拟研究[J]. *机械科学与技术*, 2023, **42**(8): 1362-1365.
HAO Wei, LI Ming, XU Ying, et al. Ultrasonic testing simulation research of honeycomb core defects in composite sandwich structure[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2023, **42**(8): 1362-1365.
- [15] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会. 超声检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [16] 张祥林, 谢凯文, 姜迎春. 复合材料板-板粘接结构超声检测[J]. *无损探伤*, 2011, **35**(4): 18-20,23.
ZHANG Xianglin, XIE Kaiwen, JIANG Yingchun. Ultrasonic inspection of composite board-to-board bonding structure[J]. *Nondestructive Testing Technology*, 2011, **35**(4): 18-20,23.