

复合材料超声检测复合缺陷多层成像实验分析

何梅洪^{1,2} 杨涛^{1,2} 张斌² 杜宇² 牛雪娟²

(1 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

(2 天津工业大学机械工程学院, 天津 300387)

文 摘 传统的超声 B 扫描和 C 扫描检测,并不能完全地展现复合材料复合缺陷的全貌,具有一定的局限性。本文通过实验的方法,对人工预制缺陷试样进行了水浸超声 C 扫描成像检测。在超声 C 扫描底波幅值成像原理的基础上,通过一次扫描,获取不同层深位置的超声反射信号进行切片 C 扫描成像,利用不同层深位置的切片 C 扫描图像观察材料内部的缺陷。实验结果表明,利用超声 A、B、C 扫描成像与切片 C 扫描成像相结合的方法对复合材料中的复合缺陷进行多角度成像,能够对复合材料内部的复合缺陷进行全方位的清晰显示。

关键词 复合材料,复合缺陷,超声检测,切片 C 扫描

中图分类号:TB559

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.05.017

Experiment Analysis of Multi Imaging by Ultrasonic Testing of Complex Defects in Composite Material

HE Meihong^{1,2} YANG Tao^{1,2} ZHANG Bin² DU Yu² NIU Xuejuan²

(1 Advanced Mechatronics Equipment Technology Tianjin Area Major Laboratory, Tianjin 300387)

(2 School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387)

Abstract The traditional ultrasonic B scan and C scan detection are unable to fully show overall perspective of composite defects in composites. In this paper, the specimen with an artificial prefabricated flaw was detected by immersion ultrasonic C scan imaging through the experimental method. Based on the principle of ultrasonic C scan the bottom wave amplitude imaging, through one scan, ultrasonic reflected signals were acquired in different depth position to form slice C scan imaging and slice C scan images were used for observe defects inside the material. Experimental results have shown that, complex defects in composite materials can be multi angle imaging and full range of clearly displayed by combined ultrasonic A, B, C scan imaging method with slice C scan imaging method.

Key words Composite material, Complex defect, Ultrasonic testing, Slice C scan

0 引言

复合材料构件在制造和使用过程中,不可避免的出现孔隙、疏松、空洞、夹杂、分层等缺陷和损伤,会严重影响材料的力学性能^[1-2]。因此,对复合材料构件进行无损检测研究就具有重要意义。

超声检测是用于复合材料缺陷检测的一种最为

重要的方法^[3-6]。目前国内外已有关于复合材料超声检测方面的研究^[7-10]。Stubbs David A^[11]将超声 C 扫描技术用于陶瓷基复合材料的孔隙率的检测评价;Y. Onur Kas^[12]利用超声 C 扫描技术评估 RTM 复合材料中微孔的数量。刘松平等^[13]将超声检测用于复合材料冲击损伤的检测与评估中,并得到超声 C

收稿日期:2015-07-15

基金项目:国家自然科学基金(11372220);教育部留学回国人员科研启动基金。

作者简介:何梅洪,1990年出生,硕士研究生,研究方向为复合材料损伤检测。E-mail:hemeihongqq@126.com

通讯作者:杨涛,教授,yangtao@tipu.edu.cn

扫描成像方式能够准确直观的再现复合材料冲击损伤区域及其分布、面积等。

然而,传统 C 扫描成像过程中,只能获得沿复合材料层深方向一个平面的投影,对于处于同一平面位置却分布在不同层的复合型缺陷不能得到有效的检测,因此会出现漏检情况,导致对缺陷或者损伤程度的错误评估。针对此问题,本文采用超声扫描检测系统,利用切片 C 扫描成像技术,对复合材料中同一平面位置却分布在不同层深的复合缺陷进行超声检测。通过超声 B 扫描、C 扫描和切片 C 扫描图像全面展现复合材料内部缺陷的详细信息。

1 检测系统

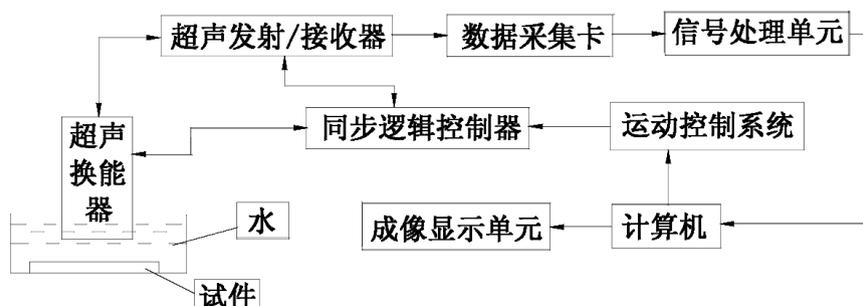


图 1 水浸超声扫描系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of water immersion ultrasonic scanning system

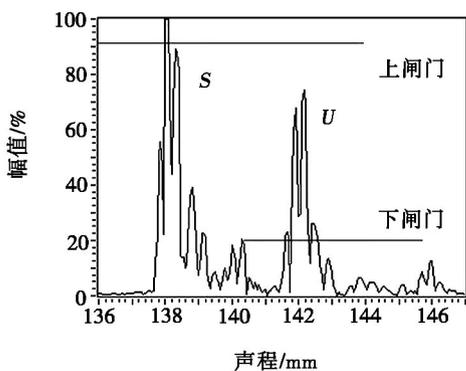
1.2 超声检测复合缺陷成像分析

利用图 1 系统,在检测系统计算机和分析软件的共同作用下,能够对被检测试件进行超声 A、B、C 扫

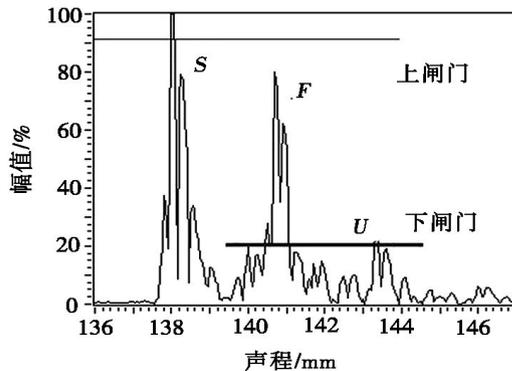
1.1 系统组成

检测系统为三轴水浸超声扫描检测系统见图 1。运动控制器控制一个三自由度的机械扫描装置,实现竖直方向超声探头的上下调整对焦和水平方向的自动扫描。超声发射/接收器通过超声换能器发射超声波并接收从被测试件反射回来的超声回波,反射回波经过滤波、放大后被高速数据采集卡采集并送入信号处理单元。同步逻辑控制器控制超声发射/接收器,以保证超声信号的发射和采集与机械运动同步。最后将经过数据信号处理单元处理过的信息存入计算机进行再分析,通过成像显示系统进行成像显示。

描和切片 C 扫描。超声检测时,典型的完好区和有缺陷处的超声 A 扫描波形分别如图 2 所示。



(a) 完好区



(b) 缺陷处

图 2 复合材料中的超声 A 扫描波形

Fig. 2 Ultrasonic A scan waveform in composite materials

A 扫描波形图中,需要利用上闸门套住整个反射波并调节下闸门的位置使其套住整个底面回波 U,以获取整个超声反射信号的信息。图 2(b)中表面回波 S 和底面回波 U 之间缺陷回波 F 的出现可以直接用来判断该处缺陷的存在,并且利用表面回波 S 和缺陷

波 F 之间的声程差,通过计算,也可以求得缺陷的层深位置。

(1) B 扫描和 C 扫描成像分析。提取计算机中整个扫描平面的底面回波高度并与不同的颜色对应,通过计算分析,就可以得到整个试件扫描平面的图

像,即 C 扫描图像,C 扫描图像中的坐标与被测试件的尺寸完全对应。因此,通过 C 扫描图像就可以发现缺陷或者损伤在复合材料平面的分布情况^[14]。提取扫描路径任意一行中每点的扫描信号,通过数据重构,同样可以得到垂直于扫描试件平面的试件断面的图像,即 B 扫描图像,B 扫描图像中横坐标与换能器在试样上扫描的实际位置一一对应,纵坐标与试件的厚度严格对应。因此,通过 B 扫描图像就可以揭示缺陷或者损伤在复合材料厚度方向的分布。B 扫描和 C 扫描图像中可以根据所显示颜色的差别区分缺陷的存在与否。

(2)切片 C 扫描成像分析。图 1 系统在对复合材料层合板进行扫描检测时,A 扫描波形中每点的表面回波 S 和底面回波 U 之间的声程差与被检测试件该点的厚度之间成正比例关系。因此,S 与 U 之间的每一点就对应被测试件的相应厚度位置,每一点的超声反射信号就是对应厚度位置的反射信号。提取被测试件来自厚度方向同一深度的超声反射信号,在同一平面进行成像显示,就可以得到同一深度的超声扫描图像,即切片 C 扫描图像,切片 C 扫描图像中的坐标与被测试件的尺寸完全对应。这种切片 C 扫描成像方法与超声 C 扫描成像方法类似,区别在于,C 扫描成像方法利用的底面回波成像,而切片 C 扫描利用的是被切截面的反射回波进行成像。因此,切片 C 扫描可以得到被检测试件内部缺陷或者结构的详细信息,对复合材料复合型缺陷的检测和评估非常有益。将超声 B 扫描、C 扫描与切片 C 扫描结合可以实现复合材料缺陷的成像检测与准确的定量评估。

2 实验

为了验证采用的超声检测方法和超声检测系统在复合材料复合缺陷检测中的准确性,制作了一块带有复合型分层缺陷的碳纤维树脂基复合材料试样,试样是由纤维取向为 $[0^\circ/90^\circ]_{6s}$ 的预浸料铺层组成的层压结构,其单个预浸料铺层厚度为 0.13 mm。在试样中预制了 7 个边长为 10 mm 的正方形分层缺陷,主要分为三类:

(1)同一水平位置有两个分布在不同层的复合缺陷 D_{11} 与 D_{12} ,它们分别在第 6 个和第 7 个与第 12 个和第 13 个铺层之间;

(2)同一水平位置有三个分布在不同层的复合缺陷 D_{21} 、 D_{22} 与 D_{23} ,它们分别在第 6 个和第 7 个、第 12 个和第 13 个铺层与第 18 个和第 19 个铺层之间;

(3)同一铺层但在不同水平位置的复合缺陷 D_{31} 、 D_{41} ,它们都在第 18 个和第 19 个铺层之间。

D_{11} 、 D_{21} 、 D_{31} 、 D_{41} 在不同的水平位置,其分布如图 3 所示。

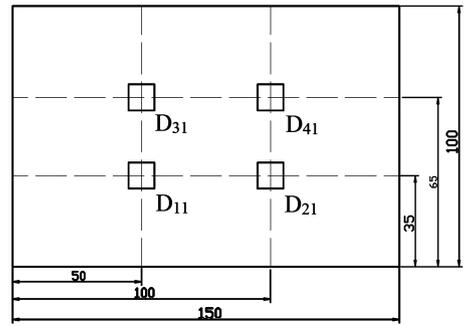


图 3 D_{11} 、 D_{21} 、 D_{31} 、 D_{41} 水平分布示意图

Fig. 3 Horizontal distribution diagram of D_{11} 、 D_{21} 、 D_{31} 、 D_{41}

3 结果分析

3.1 超声 B、C 扫描成像

对试样进行超声检测,调节 A 扫描波形中上、下闸门到合适的位置,以获得清晰的超声 C 扫描图像和 2 个断面 a、b 的超声 B 扫描图像。图 4 为试样超声 C 扫描图像,从图 4 中可以看出,1#、2#、3#、4#位置所显示颜色很明显区别于周围的颜色,因此做出判断,至少有四个缺陷分布在试样内部,缺陷大小相同,但不能确定缺陷在厚度方向的具体位置以及是否是单一缺陷。图 4 中左右两半部分的颜色不一致,是因为试样在加热成型过程中,所受压力不均匀导致的。

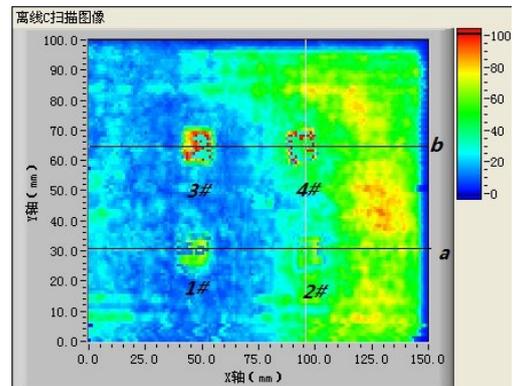


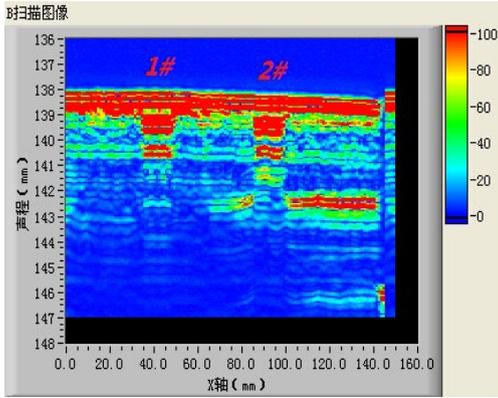
图 4 试样超声 C 扫描图像

Fig. 4 Ultrasonic C scanning image of the composite specimen

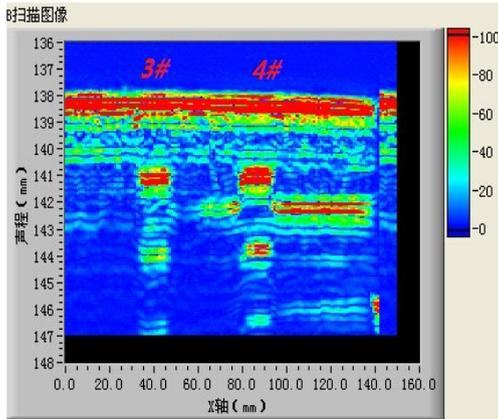
图 5(a) (b) 分别为两个断面 a、b 的超声 B 扫描图像。图中声程 138.3 和 142.3 mm 位置处的红色条状物,是分别由表面回波和底面回波所形成的。由图 5(a) 可以看出,1# 位置处,在厚度方向上有两处缺陷,2# 位置处,在厚度方向上有三处缺陷。由图 5(b) 可以发现,3# 和 4# 位置处,在厚度方向上都只有一处

缺陷。

分别提取 1[#]和 2[#]位置处的超声 A 扫描波,如图 6 所示。图 6(a)中 F₁ 与 F₂ 分别是缺陷 D₁₁与 D₁₂的回波信号;图 6(b)中 F₁、F₂ 与 F₃ 分别是缺陷 D₂₁、D₂₂与 D₂₃的回波信号。从图中缺陷回波的数量同样也可以发现 1[#]和 2[#]位置处分别有两处和三处缺陷,这与 B 扫描检测结果一致。因此,根据 B 扫描和 C 扫描图像,只能判断出 3[#]和 4[#]位置处的缺陷大小和位置,但对于 1[#]和 2[#]位置处的复合缺陷,并不能检测出每个缺陷的具体大小。



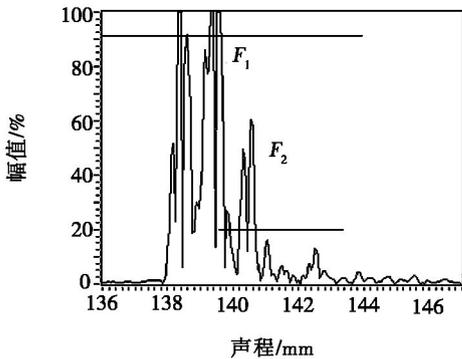
(a) a 断面



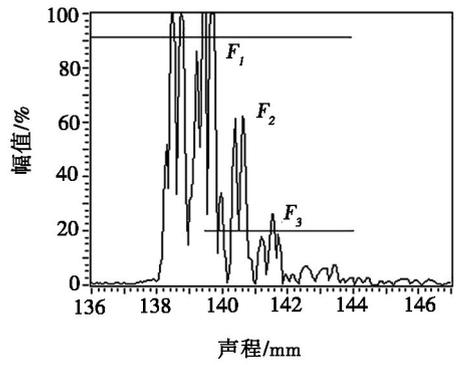
(b) b 断面

图 5 试样超声 B 扫描图像

Fig. 5 Ultrasonic B scanning images of the composite specimen



(a) 1[#]缺陷处



(b) 2[#]缺陷处

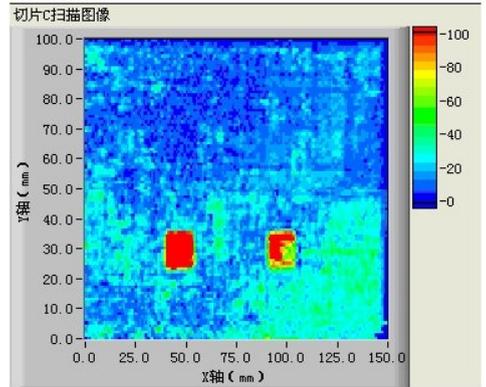
图 6 1[#]和 2[#]位置处的 A 扫描波形

Fig. 6 Ultrasonic A scan waveform at 1[#] and 2[#]

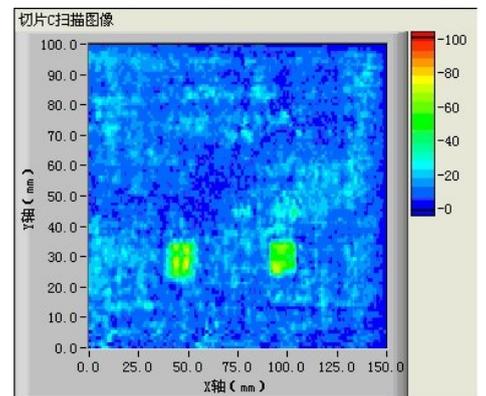
3.2 超声切片 C 扫描成像

为了更准确地判断出 1[#]和 2[#]位置处复合缺陷的详细情况,再对试样进行多次切片 C 扫描成像分析。

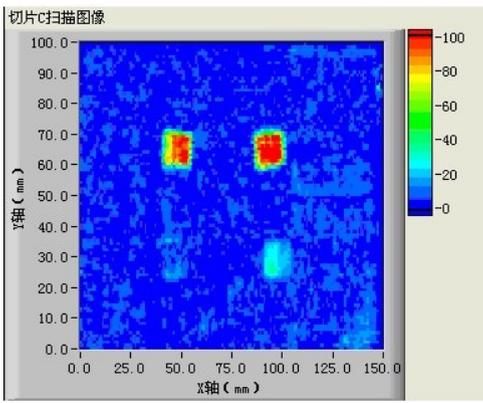
图 5 和图 6 显示,被测试件的厚度与扫描图像中 4 mm 声程(138.3 ~ 141.3 mm)相对应。图 6(a)中红色团状物代表的缺陷分别在声程 139.3、140.3 和 141.3 mm 位置处。因此,分别在声程 139.3、140.3 和 141.3 mm 处进行切片 C 扫描成像,切片厚度为 0.1 mm,得到的切片 C 扫描图像见图 7。



(a) 声程 139.3 mm 处



(b) 声程 140.3 mm 处



(c) 声程 141.3 mm 处

图 7 试样不同声程处的切片 C 扫描图像

Fig. 7 Ultrasonic slice C scanning images of the composite specimen at different acoustic path

从 7(a) 可以看出,声程 139.3 mm 处有两个边长都为 10 mm 的正方形缺陷,从 7(b) 可以看出,声程 140.3 mm 处也有两个边长为 10 mm 的缺陷,从 7(c) 可以看出声程 141.3 mm 处有三个边长为 10 mm 的正方形缺陷,并且图中竖直方向 60 ~ 70 mm 处的两个缺陷与超声 C 扫描中该位置处检测到的结果相同。通过切片 C 扫描图像完全展示了试件内部缺陷的大小情况。

比较图 7 中缺陷的颜色不同可以发现,图 7(a) 中的缺陷颜色较图 7(b) 中的缺陷颜色更深,说明超声波衰减程度相比较而言较弱,图 7(a) 中缺陷更靠近试件的上表面。图 7(c) 中,由于竖直方向 25 ~ 35 mm 处缺陷的厚度方向还有两处缺陷,导致超声衰减严重,该处厚度方向接收到底面回波 U 的幅值低,而 60 ~ 70 mm 处两个缺陷厚度方向没有其他缺陷,因此会导致同一声程位置处,缺陷显示的颜色不同。

将试样的 24 个铺层与扫描图像中的 4 mm 声程 (138.3 ~ 141.3 mm) 相对应,则声程 139.3、140.3 和 141.3 mm 处分别对应厚度方向的第 6、12 和 18 个铺层。通过切片 C 扫描所检测到的这些位置处的缺陷与预设的缺陷一致。

4 结论

(1) 采用超声检测技术,可以有效提取复合材料中的反射信号,利用反射信号和超声 C 扫描、B 扫描成像技术能够检测到复合材料中的缺陷和缺陷的位置。

(2) 基于入射波在复合材料内部缺陷区形成的反射声波信息,在 A 扫描波形的基础上,提取厚度方

向不同层深位置的缺陷反射信号,通过图像重构能够得到复合材料在不同层深位置的切片 C 扫描图像,可以观察到其内部的损伤情况。

(3) 将超声 C 扫描、B 扫描与超声切片 C 扫描成像相结合,能够对复合材料中的复合缺陷进行有效检测,并且进行多角度展示,为复合材料复合缺陷或损伤的检测和定量评估,提供了一种有效的超声成像检测方法和可视化分析方法。

参考文献

- [1] 张丽华,范玉清. 复合材料在飞机上的应用评述[J]. 航空制造技术,2006(3):64-66
- [2] 王恒生,程艳婷. 复合材料在航空领域中的研究与应用进展[J]. 化工科技,2013,21(2):67-70
- [3] 倪永红. 无损检测技术在航天复合材料及构件中的应用[J]. 宇航材料工艺,1993(4):75-78
- [4] 葛邦,杨涛,高殿斌,等. 复合材料无损检测技术研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2009(6):67-71
- [5] Ben. B. S, Ben. B. A, Kweon. S. H et al. Ultrasonic based method for damage identification in composite materials [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design 2012,8(4):297-309
- [6] Hsu, D. K. Ultrasonic nondestructive evaluation of composite materials and structures [J]. For the Advancement of Material and Process Engineering, 2010,46(1):38-45
- [7] 张颖,何双起. 碳/环氧复合材料管形件超声底板反射检测法[J]. 宇航材料工艺,2012,43(3):96-98
- [8] 吴时红,何双起,陈颖. 金属薄板超声无损检测[J]. 宇航材料工艺,2007,37(6):124-126
- [9] 郭冠华,王丹,贺小玉,等. 碳纤维复合材料板冲击损伤计算机超声检测[J]. 无损检测,2011,33(11):42-45
- [10] 李建文,徐彦霖,王增勇,等. 超声底波成像方法研究[J]. 无损检测,2005,27(9):457-459
- [11] Stubbs David A, Zawada Larry P. Detection of porosity in glass ceramic matrix composites using an ultrasonic multiple-gate C-scan technique [J]. Materials Evaluation, 1996,54(7):827-831
- [12] Kas Y Q, Kaynak C. Ultrasonic (C-scan) and microscopic evaluation of resin transfer molded epoxy composite plates [J]. Polymer Testing, 2005,24(1):114-120
- [13] 刘松平,傅天航,刘菲菲,等. 复合材料冲击损伤超声回波特性及成像检测[J]. 航空制造技术,2011(15):82-85
- [14] 刘松平,刘菲菲,史俊伟,等. 复合材料冲击损伤高分辨率超声成像检测与损伤行为分析[J]. 机械工程学报, 2013(22):89-96

(编辑 任涛)