

# 胶结波纹夹芯板水浸超声相控阵检测

袁振圣<sup>1</sup> 赵宏达<sup>1</sup> 陈振茂<sup>1</sup> 慈军<sup>2</sup> 卢天健<sup>1</sup> 耿丽<sup>3</sup>

(1 西安交通大学航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室 710049 西安; 2 广东顺德西安交通大学研究院 528300 佛山;

3 东莞市永强汽车制造有限公司 523407 东莞)

**摘要:** 首次采用水浸相控阵超声检测方法对加工或使用过程中的胶结波纹夹芯板粘结质量进行了无损检测, 与射线、激光、常规超声等检测方法相比, 该方法具有分辨率高、检测速度快等优点; 设计制作了具有 2mm~50mm 不同尺寸脱粘缺陷的波纹夹芯板试样并进行了漏粘、脱粘缺陷人工检测实验, 研究了本文方法的检测可行性和检测精度(精度至少可达 2mm)。

**关键词:** 水浸超声; 超声相控阵; 波纹夹芯板; 胶接不良

**中图分类号:** TB553 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11776/cjam.31.03.B005

## 1 引 言

超轻夹芯板是近年来出现的一种新型金属栅格材料, 具有超轻、高比刚度、高比强度、强韧性、易优化设计、高能量吸收等多种优异性能。它在航空航天、建筑、汽车制造、船舶等领域具有广泛的应用前景, 而其力学性能的好坏很大程度上取决于面板和波纹夹芯层的粘接质量<sup>[1]</sup>。

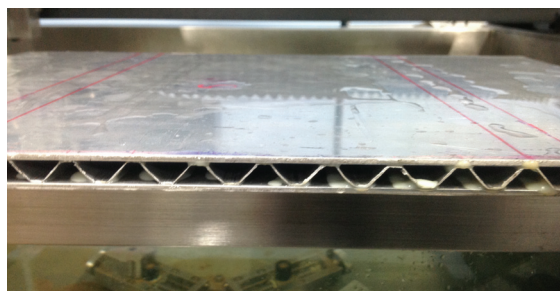


图1 铝制波纹夹芯板  
Fig.1 Aluminum sandwich plate

图 1 为一种典型超轻波纹板-波纹夹芯板实物图。该波纹夹芯板材料由上下面板和波纹形芯板胶接而成, 上下面板与芯板采用的金属材料均为铝合金, 胶结材料采用环氧树脂胶。由于加工工艺的限制, 胶接部位可能出现脱粘, 从而导致材料整体性能下降, 严重时可能影响结构安全。因此, 对粘接质量进行有效无损检测, 确保其没有过大缺陷从而避免危害的发生非常重要。目前国内外对于界面脱粘、漏粘所采用的无损检测方法主要有射线、微波、激光、超声等<sup>[2-6]</sup>。由于胶结脱粘对射线的吸收性, 射线检测不适用于本问题; 微波检测能够有效检测非金属材料脱粘, 但不能测量脱粘、漏粘的面积, 同时对于金属面板条件下脱粘的应用非常困难; 激光全息可用于脱粘检测, 但国内对此方法的研究起步较晚、技术尚不成熟, 也不宜于现场使用; 传统的超声直接接触法通常为手动检测, 需要接触媒介, 检测效率较低, 且不宜用于较薄工件, 对于本问

基金项目: 国家 973 项目课题(2011CB610303); 国家磁约束聚变项目(2013GB113005); 国家自然科学基金(51277139; 11021202); 广东省科技厅粤港关键领域重点突破项目(2011A091200008)

收稿日期: 2013-07-01

修回日期: 2014-03-18

第一作者简介: 袁振圣, 男, 1987 年, 西安交通大学力学系, 博士生; 研究方向——电磁机械耦合结构力学及结构无损检测。

通讯作者: 陈振茂, E-mail: chenzm@mail.xjtu.edu.cn

题有一定难度。

水浸超声相控阵检测方法采用高频探头可获得较高的分辨率, 同时相控阵探头可以灵活调整聚焦深度, 从而应用于不同厚度的工件, 且利用电子扫查可大大提高检测效率。针对波纹夹心板漏粘缺陷的检测, 本文首次提出了采用超声水浸相控阵的方法, 并通过模拟试件进行实际检测来验证方法的有效性。

## 2 水浸超声检测系统的构成及工作原理

水浸超声检测系统由硬件和软件两部分组成。超声检测仪、超声探头、多轴运动控制系统、水槽、卡盘、工控机构成了检测系统的硬件部分; 信号采集处理、硬件通信、数据输出、运动系统控制软件构成了检测系统的软件部分。

运动控制系统能够实现六轴运动, 分别为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  轴平动和  $A$ 、 $B$ 、 $W$  轴转动, 使探头在空间有六个方向的自由度, 保证了探头能够垂直于复杂曲面形状的工件, 提高了检测系统的适用范围和缺陷的检测精度。本文均采用超声相控阵探头检测试件, 通过平面扫查的方式, 检测波纹板脱粘、漏粘情况。

水浸超声的定量检测精度受探头位置、角度、被测板件状态等因素的影响较大<sup>[7]</sup>, 为了获得较好的检测结果, 本文采取了以下措施来保证检测结果的可靠性。

1) 通过调整试件水平度和探头垂直度保证超声波垂直入射。纵波在水中的传播速度约是在铝中速度的 4 倍, 当声束从水中进入铝中时, 为通过  $C$  扫图像获得各粘接界面的回波情况, 保证声束的垂直入射至关重要。

为保证超声波垂直入射, 通过观察试件表面 4 个角的表面反射波位置来调整试件的整体水平度, 以保证其表面处于水平状态。扫描前仔细调整探头对试件上面板的垂直度非常重要。本文所采用的水浸超声系统具有探头角度调整功能。为使声束垂直入射, 在手动调节探头的  $AB$  轴的同时, 应观察底面回波信号大小的变化情况, 使  $A$  扫中底面回波峰值最大, 以确保声束垂直于工件被检测面。

2) 合理设置探头的聚焦深度, 保证波束聚焦到被检测面。焦点是声能最集中处, 为了提高检测分辨率、获得清晰的  $C$  扫影像, 应使波束聚焦到粘接界面。通过探头架调节探头在  $Z$  轴方向的位置以及合

理设置相控阵探头的聚焦深度, 可使超声波束聚焦到底面附近。由于声束从水中进入试件时还会发生折射, 因此还要继续将探头在  $Z$  向的位置向下微调, 使声波焦点正好落到底面。

考虑到试件底面第一次回波的波峰受到界面反射声的干涉、叠加等影响因素最小, 因此将底面一次回波波峰作为主要分析对象信号。如图 2 所示, 表面、底面回波距离分别采用下式计算, 即

$$L_{S1} = 4(f - t), \quad L_{B1} = L_{S1} + t$$

其中:  $f$  为焦距;  $t$  为面板厚度;  $L_{S1}$  为  $A$  扫视图中第一次表面回波的刻度位置, 下标  $S1$  表示第一次表面回波;  $L_{B1}$  表示  $A$  扫视图中第一次底面回波的刻度位置, 下标  $B1$  表示第一次底面回波。

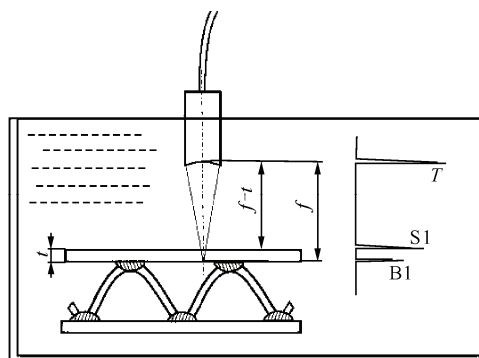


图2 水浸超声聚焦示意图

Fig.2 Schematic of probes focusing

3) 采用高频聚焦探头来保证获得高分辨率的  $C$  扫图像。水浸超声探头是专用于水浸超声波检测的超声波换能器, 为提高声束的指向性、避免其他干扰波, 本文采用了水浸相控阵探头, 能够有效地提高检测效率。

探头频率的选择要同时考虑检测分辨率和能量衰减的影响。高频探头具有较高的分辨率和检测灵敏度, 但其发射的超声能量有很大衰减。考虑到检测要求及实际情况, 本文检测频率取为 10MHz, 采样频率取为 100MHz。采用自发自收的聚焦探头发射纵波, 在试件表面垂直入射, 进行垂直超声波检测。

## 3 超声相控阵探头及试件检测

本实验采用由 128 个超声换能器单元排列成的一维线性阵列超声相控阵探头, 如图 3 所示。该探头可以分别调整每个阵元发射信号的波形、幅值、相位延迟, 使各阵元发射的超声波束在空间叠加合成, 形成发射聚焦和声束偏转等效果。



图3 超声相控阵探头  
Fig.3 Immersion phased array ultrasonic probe

图4中,由上到下分别表示时间延迟、换能晶片及其激励出的超声波的包络面。阵列换能器有两边向中间逐渐加大激励的时间延迟,可使合成的波阵面指向一个曲率中心,形成发射相控聚焦。通过调整延迟时间,可以实现对聚焦位置的调整。另外,阵列换能器的各个阵元依次等间隔地增加激励延迟,可使合成波阵面具有一定的指向性,形成斜入射超声波(见图5)。同样,通过调整延迟时间,可实现不同角度的斜入射超声波检测或扇形扫查。

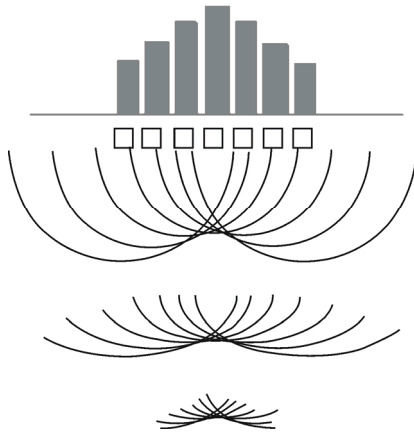


图4 相控聚焦模式原理  
Fig.4 Phased focusing principle

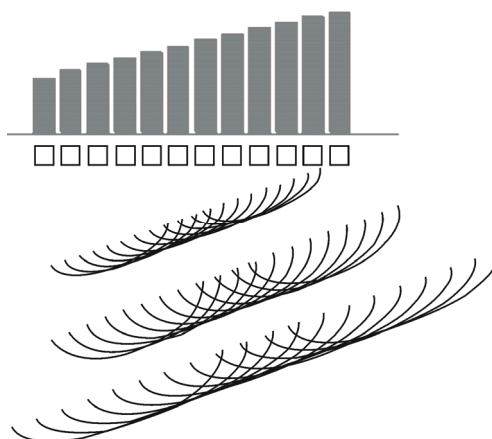


图5 相控阵斜入射检测原理  
Fig.5 Phased array detection principle of oblique incidence

本实验的水浸超声探伤流程如图6所示。检测时根据水距和检测工件的厚度,按前述方法将聚焦深度设置到待测工件面板的下表面。通过对水浸超

声C扫图像进行分析可确定波纹夹芯板的粘接质量。

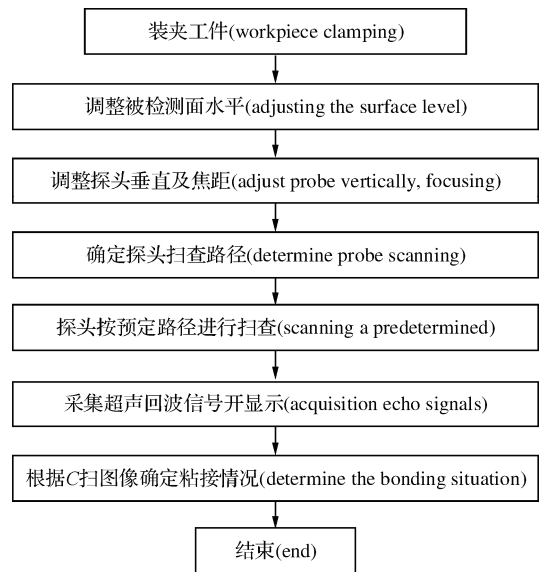
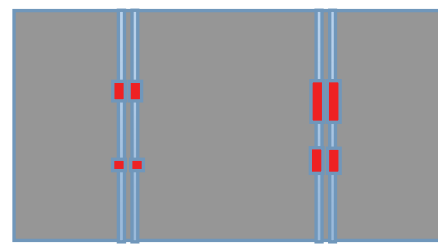
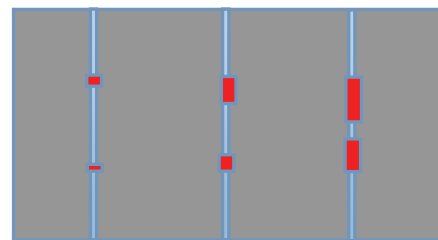


图6 水浸超声检测流程图  
Fig.6 Inspection procedure



(a) 工件1 (workpiece 1)



(b) 工件2 (workpiece 2)

图7 工件缺陷设置示意图  
Fig.7 Schematic of defects preset

为验证方法的有效性,设计制作了两种具有不同缺陷大小的铝质波纹夹芯板。制成如图1所示的典型试件,其具体尺寸及缺陷设置如图7所示,具体尺寸如下。

1) 工件1:板长40mm,宽30mm,厚度2mm,长度方向上有20条粘接线,如图7(a)所示,在其中4条粘接线处设置了长度分别为10mm、20mm、30mm、50mm的漏粘缺陷各两处(于相邻粘接线面板上)。

2) 工件2:板长40mm,宽30mm,厚度2mm,长度方向上有20条粘接线,如图7(b)所示,在其

中 3 条粘接处设置了长度为 2mm、5mm、10mm、20mm、30mm、50mm 的漏粘缺陷各一处。

### 4 实验结果与分析

应用上述的水浸超声实验装置及超声相控阵探头, 对工件 1 和工件 2 进行了检测, 并提取 C 扫在工件底面上的回波信号, 进行了信号分析。具体的实验结果如下。

#### 1) 工件 1 检测结果

如图 8 所示(图中红线只是位置标尺), 图中圈出的部分依次为 50mm、30mm、20mm、10mm 缺陷的

C 扫结果, 可以清晰地看出漏粘区域与完好区域具有明显不同, 对于类似的漏粘缺陷可采用该方法很好地检测。但由于检测速度不同, 缺陷长度只是一个相对值, 只能在同一幅图的结果中分辨出缺陷的相对大小。

#### 2) 工件 2 检测结果

如图 9 所示(图中红线只是位置标尺), 由图结果可见: 10mm 到 50mm 的预设缺陷可以非常清晰地被检出; 5mm 和 2mm 的缺陷从 C 扫结果中也能看出明确差异, 可被检出。

上述结果说明本文提出的检测方法对胶结波纹夹芯板的漏粘脱粘缺陷检测的精度至少可以达到 2mm, 能够满足工程需要。

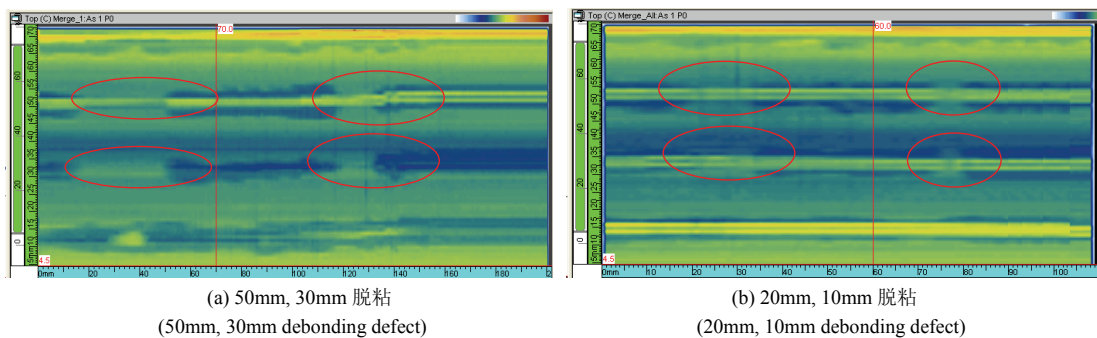


图 8 工件 1 缺陷检测结果  
Fig.8 Defect testing result of workpiece 1

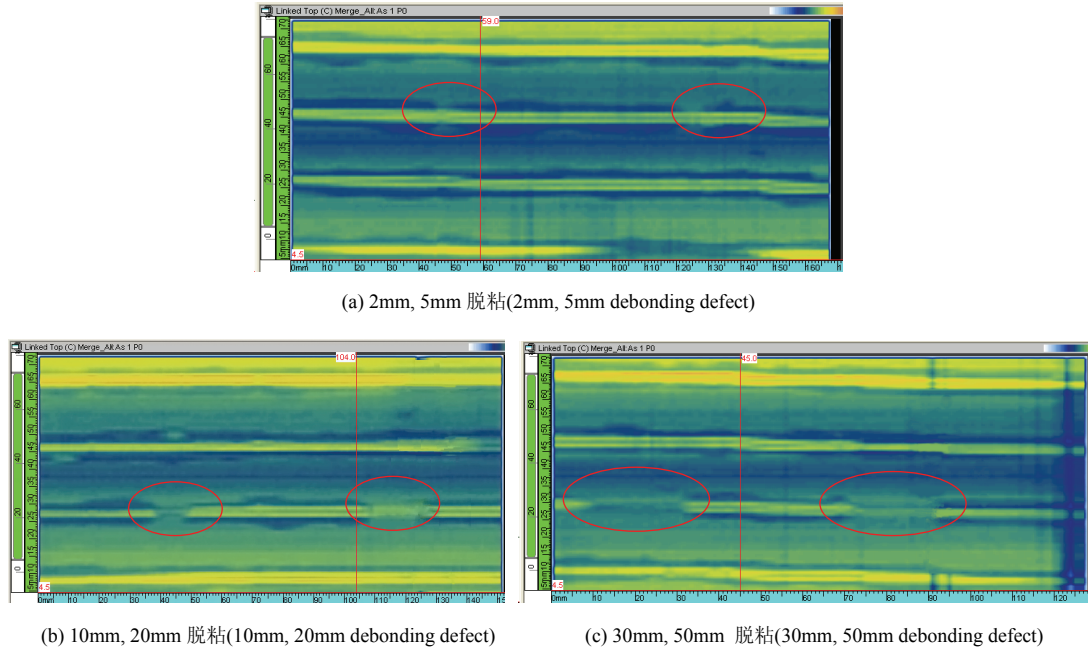


图 9 工件 2 缺陷检测结果  
Fig.9 Defect testing result of workpiece 2

### 5 结束语

本文采用水浸相控阵超声检测方法对波纹夹

芯板的漏粘缺陷进行了检测。采用超声相控阵探头与单探头相比能够成倍地提高检测效率, 其聚焦深度可调, 使得检测更为灵活、适用范围更广。本文设计制作了具有 2mm 到 50mm 不同尺寸漏粘缺陷

的人工检测试件,利用所提方法进行了检测实验。结果表明,采用本文方法可以有效检出 2mm 的脱粘缺陷,能够满足夹芯板制备和相关产品在役检测的需要。

### 参 考 文 献 (References)

- [1] 卢天健, 刘涛, 邓子辰. 多孔金属材料多功能化设计的若干进展[J]. 力学与实践, 2008, 30(1): 1-9. (Lu Tianjian, Liu Tao, Deng Zichen. Multifunctional design of cellular metals: a review[J]. Mechanics in Engineering, 2008, 30(1): 1-9 (in Chinese)).
- [2] 刘冬冬, 师芳芳, 张碧星. 超声相控阵技术在管材检测中的应用[J]. 无损检测, 2013, 35(5): 1-3. (Liu Dongdong, Shi Fangfang, Zhang Bixing. Application of ultrasonic phased array technology in tube detection[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(5): 1-3 (in Chinese)).
- [3] 杨风暴, 韩焱. 金属与非金属粘接质量的声阵列检测方法[J]. 测试技术学报, 2001, 15(4): 225-229. (Yang Fengbao, Han Yan. A microphone array detecting method for the detection of adhesive quality between metallic and nonmetallic components[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2001, 15(4): 225-229 (in Chinese)).
- [4] 潘亮, 董世运, 徐滨士, 等. 相控阵超声检测技术研究与应用概况[J]. 无损检测, 2013(5): 26-29. (Pan Liang, Dong Shiyun, Xu Binshi, et al. The review of study and application of phased array ultrasonic testing technology[J]. Nondestructive Testing, 2013(5): 26-29 (in Chinese)).
- [5] 鲍晓宇, 施克仁, 陈以方, 等. 超声相控阵系统中高精度相控发射[J]. 清华大学学报, 2004, 44(2): 153-156. (Bao Xiaoyu, Shi Keren, Chen Yifang, et al. High-precision phased ultrasonic transmission in phased array ultrasonic systems[J]. Journal of Tsinghua University, 2004, 44(2): 153-156 (in Chinese)).
- [6] Birring Anmol S. Ultrasonic phased array for weld testing[J]. Materials Evaluation, 2008, 66(3): 282-284.
- [7] 张东利, 左勇斌, 陈振茂. 金属栅格夹心板焊部缺陷的水浸超声定量检测研究[J]. 测试技术学报, 2010, 24(1): 43-48. (Zhang Dongli, Zuo Yongbin, Chen Zhenmao. Quantitative NDE of lattice sandwich metal plate by using ultrasonic immersed focusing method[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2010, 24(1): 43-48 (in Chinese)).