DOI: 10.3901/JME.2013.16.057

基于声-超声检测的薄钢板多焊点结构完整性评价技术*

陈振华 卢超 陆铭慧 李秋锋

(南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063)

摘要: 将声-超声检测方法用于汽车专用薄钢板多焊点点焊接头漏焊或脱落的快速检测中。采用波形和模态分析方法研究声-超声检测波在多焊点点焊结构中的传播机理, 以此为基础提出相应的声-超声检测特征值评价点焊结构的完整性。试验中通过直探头激发和接收声-超声检测信号, 通过对比钢板中声-超声检测信号的时频分布与理论频散曲线可确定结构中声-超声检测信号的模态组成, 主要能量模态为 A0 模态 Lamb 波。研究显示 A0 模态兰姆波通过焊核在点焊结构中传播, 发生相互叠加并在时频域上形成波包能量序列。该波包能量序列在时频域上的分布与焊核位置具有对应关系, 通过时频分布中各波包的能量起伏能够直观判断焊核漏焊、脱落及其问题焊核的位置。此外还提出能够评价多焊点接头完整性的特征参数, 对于提高检测效率、降低检测成本具有重要意义。

关键词: 声-超声 点焊 时频分析 兰姆波

中图分类号: TG115

Integrity Evaluation on Spot Welded Construction of Thin Steel Sheet Based on Acousto-ultrasonic Technique

CHEN Zhenhua LU Chao LU Minghui LI Qiufeng

(Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract: Acousto-ultrasonic technique is introduced for rapid testing on unweld and pull out of spot weld of thin steel sheet. The method of waveform and modal analysis is used to study the testing mechanism, and then the characteristic value which can be used for evaluating the integrity of the spot welded construction is obtained. In the research, normal transducers are used to excite and receive acousto-ultrasonic wave, and the main component of the testing wave is A0 modal Lamb wave according to the comparison between the testing signal's time-frequency distribution and theoretical frequency dispersion curves. As the wave propagates through the weld spot, the testing signals are received as discontinuous wave packets ranged in time domain which correspond to the location of the weld spots. Results reveal that the energy of wave packets distributed in time and frequency domain can be used to discovery unweld and pull-out of weld spot, and the location of problem weld spot also can be decided. Besides, the study proposes the characteristic value which can be used to evaluate the integrity of spot weld construction, and is meaningful for developing testing efficiency and decreasing testing cost.

Key words: Acousto-ultrasonic Spot weld Time-frequency analysis Lamb wave

0 前言

在汽车制造中, 电阻点焊是主要的生产工艺, 广泛用于低碳钢、高强钢和镀层钢等的焊接^[1-3]。电

阻点焊的超声检测方法一般采用脉冲反射法和超声 C 扫描成像法, 只能逐点检测, 大面积点焊接头的超声检测费时费力^[4-5]。研究一种能够直接评价点焊结构完整性的超声检测方法对于提高检测效率、降低检测成本具有重要意义。声-超声检测技术的相关报道主要包括声-超声检测的金属板材损伤、板材胶接层质量、复合材料板质量检测以及其他各种材料制件的健康检测^[6-9]。随着分析手段的不断进

* 国家自然科学基金(11104129)和无损检测技术教育部重点实验室开放基金(ZD201029001)资助项目。20121019 收到初稿, 20130310 收到修改稿

步,研究方法也从单一的应力波因子构造与评估转变为检测信号的波形分析和模态分析^[10-11]。模态分析指出若被测件厚度接近或小于检测波长,被测板中则形成导波,板中传播的声波模式主要为兰姆波形式^[12-14]。与应力波因子分析法相比,波形分析与模态表征具有物理意义明确、分析手段丰富、对不连续的识别与定位较为精确,容易进行信号解释与噪声剔除等优点。

本文采用波形和模态分析方法研究多焊点点焊薄板试件中的声-超声信号的模态组成及传播特征,研究声-超声方法检测多焊点点焊接头的漏焊或脱焊。通过 Choi-Williams 时频分布方法分析声-超声检测信号,获得了漏焊或脱焊板材中检测信号在时频域上的能量分布特征,并且提出了能够用于评价多焊点完整性的特征参数。研究成果能够直观快速检测多焊点的漏焊或脱焊,提高检测效率及降低检测成本。

1 声-超声检测信号的模态分析

采用 Choi-Williams 时频分布方法分析声-超声检测中应力波信号的模态构成。发射接收探头均为中心频率 0.5 MHz 的纵波直探头。钢板尺寸为 450 mm×200 mm×1.2 mm 的 BUSD 汽车用钢板,探头布置如图 1 所示。

图1 试验布置(mm)

Choi-Williams 分布能够较好地抑制交叉项且具有较高的时频聚集性和分辨率,这里采用该分布分析检测信号。图 2a 是检测信号的时域波形,图 2b 是相应的 Choi-Williams 分布,图 2b 中的白色线条是通过 Disperse 软件绘制的理论频散曲线。将检测信号时频分布与 Disperse 软件计算得到的频散曲线对比以确定检测信号的模态组成。图 2b 显示,用 0.5 MHz 直探头在 1.2 mm 厚 BUSD 钢板中激励的声-超声检测信号主要是 A0 和 S0 模态。A0 模态处于 0.5 MHz 附近、频散较小,检测信号的主要能量集中在 A0 模态;S0 模态处于 3.5 MHz 附近、频散较小,但能量相对较低。由于检测波在板中以探头为中心向外辐射,由扩散及焊核附近多次反射引起

的声波衰减较大,通过焊核传播到接收探头的信号较小;因此,需要选择在声-超声检测信号中能量较高的 A0 模态作为检测的目标信号。

(a) 检测信号波形

(b) 检测信号的Choi-Williams分布

图2 BUSD 钢板中声-超声检测信号的时频分析

2 声-超声信号的模态分析

2.1 试验方法

试验中制备了 5 焊点 BUSD 钢板点焊搭接试样,钢板尺寸为 200 mm×450 mm×1.2 mm,搭接宽度为 40 mm,焊点间距为 40 mm。检测探头为中心频率 0.5 MHz、直径 20 mm 的纵波直探头。收发探头关于焊点中心连线对称布置,两探头连线过中间焊核中心点,探头间距为 150 mm,如图 3 所示。声-超声检测信号易受探头布置、耦合条件等外部因素的影响。因此,检测时应特别重视调整探头的位置及距离,并尽量保证声学耦合的一致性。

图3 试样结构及探头布置(mm)

2.2 点焊结构中声-超声信号传播机理及模态结构

图 4 为多焊点点焊结构的声-超声检测接收信号的时域波形与频谱分布。检测信号在时域上是由几个波包组成一个串脉冲;图 4b 的频谱分布显示,

检测信号能量主要分布在 0.5 MHz 附近, 在 2.8 MHz 附近存在少量分量, 这与在单块板上激励的声-超声信号的频谱分布相同。

图 4 完好点焊结构的检测波形及频谱分布

采用 Choi-Williams 分布研究多焊点结构中声-超声检测信号的模态结构及试件中声波传播机理, Choi-Williams 分布能够反映声-超声检测信号的时频特性。图 5a 显示, 声-超声检测信号在 0.5 MHz 附近的声波能量远大于 2.8 MHz 附近的高频声波能量。由于时频分析过程中自动对能量做了归一化处理, 因此高频分量在二维时频分布图上难以辨别。为了增强高频能量信号在时频分布上的显示, 本研究采用高通滤波方法将高频微弱信号单独提取出来后再对其进行时频分析, 在不增加噪声干扰的同时获得了高频微弱信号在时频域上的分布细节, 如图 5b 所示。

图 5 点焊结构中声-超声检测信号的时频分布

图 5 显示, 检测信号各模态能量均以间断波包串列式的沿时间方向分布。这种分布特点是由点焊结构中声-超声检测信号的传播特性决定的, 声-超声检测信号通过焊核传播, 焊核与探头的相对位

置决定检测信号的声程并进而决定声波叠加情况。图 6 为点焊结构声-超声检测波传播的示意图, 检测波以探头为中心向板 A 中辐射声波并形成 A0 和 S0 模态的 Lamb 波, 该 Lamb 波以焊核为通路进入板 B 被探头接收, 焊点与检测探头的相对位置决定声波传播的声程, 经相对于检测探头连线对称的两焊核传播的检测波信号具有相同声程, 相互叠加增强形成波包; 而经非对称焊核传播的检测信号具有一定声程差, 反映在时频图上就是时域上以一定的间距 (声程差) 形成间断的能量波包。

图 6 结构中声-超声波形传播示意图

探头接收声波的声程由焊核位置决定; 由中间焊核 1 传播的声波声程 d 最小, 最先到达接收探头; 随着其他焊核远离焊核 1, 声程逐渐变大; 以中间焊核对称的两焊核传播的声波声程相等 (焊核 1 与 1', 2 与 2'), 相互叠加形成波包。因此, 接收信号在时域上表现为间断的波包序列, 与时频分布相对应表现为一定频率范围内随时间排列的波包串。时频分布中的波包与各焊核的辐射声波相对应, 时域位置分别为 55~65 μs 、68~80 μs 、90 μs 附近。

3 多焊点接头完整性检测

试验制备了漏焊情况不同的多焊点试件, 板材同上, 漏焊位置分别为焊核 1、2、3, 如图 6 所示。由于 A0 模态能量高、频散低, 因此通过低通滤波方法滤除 S0 模态, 只采用 A0 模态的时频分布用于检测。图 7 为各漏焊试样声-超声检测信号的时频分布, 图 7a 的时频分布图对应焊核 1 漏焊, 在 55~65 μs 范围内无能量分布与漏焊位置一致, 68~80 μs 和 90 μs 附近较高能量分别对应完好焊核 2 和 3; 图 7b 中 68~80 μs 范围内的能量显著降低对应焊核 2 漏焊, 此时焊核 2 处无声-超声信号通过, 造成时频分布上对应区域 (68~80 μs) 能量降低, 55~65 μs 和 90 μs 附近较高能量对应完好焊核 1 和 3; 图 7c 中 90 μs 附近能量显著降低对应焊核 3 漏焊, 焊核 3

处无声-超声检测信号通过造成时频分布图上 $90\ \mu\text{s}$ 附近能量降低, 而 $55\sim 65\ \mu\text{s}$ 和 $68\sim 80\ \mu\text{s}$ 范围内较高能量反映完好焊核 1 和 2。综上, 声-超声检测信号的时频能量图能够直观反映薄 BUSD 钢板多焊点接头的漏焊情况。

图7 不完整点焊结构的声-超声检测信号时频分析

本研究还定义了声-超声检测的能量特征值用于判定多焊点接头的完整性, 能量特征 P 定义为

$$P = \int_{f_1}^{f_2} p(f) df$$

式中, $p(f)$ 为信号的功率谱分布, $[f_1\ f_2]$ 为频率积分区间, 此处频率积分区间为 $[0\ 1]$ 。

由于声-超声检测信号对检测过程较为敏感。为了确定各能量特征值的稳定性, 每种点焊结构情况记录 5 个检测信号, 具体方法是每记录一个检测信号后再重新调整探头位置记录下一个信号。分别计算每次测量的能量特征值。图 8 为不同漏焊情况及完好情况下 A0 模态信号的能量特征值 P_A 的分布, 分布图显示尽管各点焊结构的多次测量值 P_A 存在一定波动, 但整体的变化趋势是一致的; 完好结构的能量特征值明显较高且易于分辨; 因此, 可以通过检测信号中 A0 模态的能量特征值 P_A 确定点焊结构的完整性。

图8 不同漏焊情况下特征值分布

与完好焊核的信号能量相比, 焊核 1 和 2 漏焊时的检测信号能量较为接近, 较之完好结构有较大降低; 焊核 3 漏焊时能量降低最小。主要原因是由于声-超声检测信号的声程的增大导致其衰减也随之增大, 试件中由焊核 3 进入接收探头的声波能量最小。由此可知, 探头只能在一定的间距下检测一定范围的焊点, 过远的焊点会因声波相对太弱而难以检测。实际检测中可通过增大探头发射能量, 提高探头间距来增大检测范围。然而, 由于探头距离增大导致传播的声程变长、经各焊点传播声波的声程差却变化不大, 而脉冲宽度会由于 A0 模态频散特性而随声程增大变宽, 由各焊核传播的声波将发生复杂的位移叠加造成在时频域难以分辨, 难以与各焊核相对应, 检测波能量变化由于复杂叠加而难以评价。因此, 在声-超声检测中, 调整探头距离, 进而确定最佳的检测范围是非常关键的。

4 结论

(1) 薄板点焊结构的声-超声检测信号由多种模态的兰姆波构成, 可以采用 Lamb 的模态分析法进行分析。检测波由 A0 模态和 S0 模态的兰姆波组成, 其中 A0 模态兰姆波为检测信号的主体部分。

(2) 多焊点薄板试样的声-超声检测信号(A0 和 S0 模态)以焊核为通路传递至接收探头。经对称焊核传播的声波相互叠加形成波包, 经多组对称焊点传播至接收探头形成一定频率范围内时域上分布的波包序列。检测信号时频分布显示, 当某一焊点位置发生漏焊或脱落时, 与之对应的时频分布能量将显著降低。由此可确定多焊点点焊结构的漏焊焊点及其位置。

(3) 通过 A0 模态检测信号的能量分布特征值评价点焊结构的完整性。试验显示, 之包含漏焊或焊点脱落的不完整点焊结构, 完整点焊结构的 A0 模态能量特征值明显较高, 结合 A0 模态时频分布图, 可以快速评价由于漏焊或焊核脱落引起的结构

缺陷问题。

参 考 文 献

- [1] 陈振华, 史耀武, 赵海燕. 薄镀锌钢板点焊超声成像分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(12): 274-278.
CHEN Zhenhua, SHI Yaowu, ZHAO Haiyan. Ultrasonic imaging analyses of spot welds on galvanized steel sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(12): 274-278.
- [2] WUNG P. A force based failure criterion for spot weld design[J]. Experimental Mechanics, 2001, 41: 107-113.
- [3] LONG Xin, SANJEEV K. Fatigue properties and failure characterization of spot welded high strength steel sheet[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(5): 879-886.
- [4] 史立丰, 郑祥明, 史耀武. 超声 C 扫描检测铝合金电阻点焊的焊核直径[J]. 无损检测, 2004(26): 34-36.
SHI Lifeng, ZHENG Xiangming, SHI Yaowu. Ultrasonic C-scan testing for determining the spot size of the resistance spot welding in aluminum alloy[J]. Nondestructive Testing, 2004(26): 34-36.
- [5] 陈振华, 史耀武, 焦标强, 等. 薄镀锌钢板点焊超声谐振检测[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 101-104.
CHEN Zhenhua, SHI Yaowu, JIAO Biaoqiang, et al. Ultrasonic low-frequency resonant test of spot welding of zinc-coated steel sheet[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4): 101-104.
- [6] KAUTZ H E, LERCH B A. Preliminary investigation of acoustic-ultrasonic evaluation of metal matrix composite specimens[J]. Materials Evaluation, 1991, 49(5): 607-612.
- [7] 艾春安, 刘瑜, 赵文才, 等. 固体火箭发动机结构粘接质量的声-超声检测[J]. 无损检测, 2009, 31(12): 974-976.
AI Chunan, LIU Yu, ZHAO Wencai, et al. Acousto-ultrasonic testing for bond quality in solid rocket motor structure[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(12): 974-976.
- [8] 张移山, 张蕾, 华庆祥, 等. 声-超声技术用于铝板损伤监控的实验研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(10): 1292-1296.
ZHANG Yishan, ZHANG Lei, HUA Qingxiang, et al. Experimental research on aluminum plate damage monitoring using acousto-ultrasonic technique[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(10): 1292-1296.
- [9] 袁方, 胡斌梁, 周知进. 基于声-超声技术的钢丝绳强检测方法的研究[J]. 机械设计与制造, 2010(7): 104-105.
YUAN Fang, HU Binliang, ZHOU Zhijin. Examination method research of steel wire intensity based on the acoustic-ultrasonic technology[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(7): 104-105.
- [10] TUA P S, QUEK S T, WANG Q. Detection of cracks in plates using piezo-actuated Lamb waves[J]. Smart Materials and Structures, 2004, 13: 643-660.
- [11] 陈振华, 史耀武, 赵海燕. 点焊试件中兰姆波传播的有限元模拟及其应用[J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 14-18.
CHEN Zhenhua, SHI Yaowu, ZHAO Haiyan. Finite element modulation of lamb wave propagation for nondestructive evaluation of spot weld [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 14-18.
- [12] 裴俊峰, 邓明晰, 胡庆林. 铝合金板材相对均匀性的声-超声评价研究[J]. 后勤工程学院学报, 2006(4): 98-101.
PEI Junfeng, DENG Mingxi, HU Qinglin. Nondestructive evaluation of relative uniformity of aluminous sheets using an acoustic-ultrasonic approach[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2006(4): 98-101.
- [13] HAYASHI T, KAWASHIMA K. Mode extraction from multi-modes of Lamb waves[J]. Review of Progress in Quantitative NDE, 2002, 21: 219-224.
- [14] CHO Y, ROSE J L. An elastodynamic hybrid boundary element study for elastic guided wave interactions with a surface breaking defect[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000, 37: 4103-4124.

作者简介: 陈振华(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为超声数字无损评价技术及系统, 已发表论文 10 篇。
E-mail: zhenhuachen@yeah.net