

基于激光超声的铝合金搅拌摩擦焊典型缺陷检测及分析

郑德根¹, 陈华斌¹, 王继锋², 林 涛¹, 陈善本¹

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240; 2. 上海市特种设备监督检验技术研究院, 上海 200333)

摘 要: 利用不同搅拌摩擦焊(FSW)工艺参数获得 2219 铝合金薄板根部未焊合、隧道孔两种典型缺陷, 对比 X 射线检测结果, 采用激光超声对这两种典型 FSW 缺陷进行检测. 从时域上对采样信号峰值点及幅值进行分析, 并进一步运用 PSD-welch 功率谱法进行频域分析, 提取频域不同频段的能量, 结合时域最大幅值作为特征, 利用支持向量机建模并训练, 识别率达到 85%. 结果表明, 基于激光超声检测的时、频域特征能够有效对铝合金 FSW 两种典型缺陷进行分类识别, 从而为铝合金 FSW 缺陷检测提供一种技术途径.

关键词: 搅拌摩擦焊; 激光超声; 功率谱; 支持向量机

中图分类号: TG 409 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)07-0035-04

0 序 言

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是 1991 年英国焊接研究所提出的一种固态连接方法, 它具有焊接过程简单, 焊件力学性能好等优点, 应用于同种金属以及异种金属的焊接. 铝合金较活泼, 表面易氧化, 线膨胀系数大. 相比较传统焊接方法, 搅拌摩擦焊能够有效地避免气孔、裂纹等缺陷, 但不合理的工艺参数仍会导致各类缺陷的产生, 如何有效地检测并区分这些缺陷对于铝合金搅拌摩擦焊的工业应用有着重要的作用^[1].

传统的检测方法对于工件形状、尺寸及表面光滑度、检测环境均有一定要求, 同时易产生漏检. 激光超声检测技术自 20 世纪 70 年代提出以来, 不断被开发应用, 与传统的压电换能器技术相比, 激光超声技术具有非接触、宽带、激发源高保真及点源/点接收等优点, 因此它更有利于材料的无损评估和其它学科的应用, 如材料表征、缺陷检测、加工过程监测以及复杂形貌的工件或高温高压等恶劣环境下设备的监测等^[2].

文中对 2219 铝合金薄板 FSW 接头典型焊接缺陷的激光超声检测信号进行了时域及频域分析, 通过提取信号幅值和能量特征来实现对不同类型焊接缺陷的分类识别.

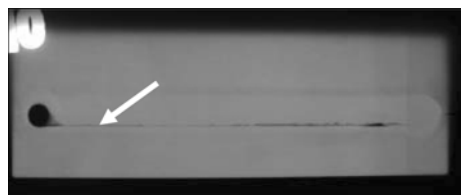
1 试验方法

铝合金搅拌摩擦焊典型缺陷有隧道孔、根部未焊合等, 试验通过控制搅拌摩擦焊参数获得完好成形、内部含隧道孔缺陷以及根部未焊合(表面缺陷)3 组试样^[3]. 采用的材料为铝合金 2219 系列板材, T62 热处理状态, 试板尺寸为 180 mm × 150 mm × 6 mm, 进行搅拌摩擦焊接, 搅拌头前进速度为 60 mm/min, 转速 600 r/min. 3 组试样工艺参数分别为: (1) 完好试样: 试板未阳极化, 侧面清除氧化膜, 搅拌头倾斜角度 2.5°, 长度 5.8 mm. (2) 焊缝出现隧道孔: 试板未阳极化, 未打磨, 搅拌头倾斜角度 0.5°, 长度 5.8 mm. (3) 焊缝根部未焊合: 试板未阳极化, 未打磨, 搅拌头倾斜角度 2.5°, 搅拌头长度 3.9 mm. 两种缺陷试样 X 射线检测结果如图 1 所示, X 射线对大尺度缺陷(如隧道孔、沟槽等)能够进行较好区分, 但对于尺寸较小的根部缺陷, 其检测灵敏度大大下降^[4].

2 激光超声检测

2.1 激光超声检测原理及方法

激光超声是利用高能量的激光脉冲与物质表面的瞬时热作用, 在固体表面产生热特性区, 然后利用这种小热层在材料内部向四周热膨胀扩散产生热应力, 从而通过这种热应力产生超声波. 根据激光器产生的能量不同, 激光超声分为两种产生机制. 当



(a) 隧道孔缺陷X射线检测



(b) 根部未焊合X射线检测

图 1 隧道孔及根部未焊合缺陷 X 射线检测

Fig. 1 X-ray of tunnel hole and incomplete penetration

能量较高时,物体达到蒸发温度,原子离开表面,形成气化区,反向作用于物体表面,产生超声波,称为热蚀效应;当能量较低时,只在固体表面产生热膨胀区,发生弹性变形,称为热弹效应^[5].

采用 Quantel 脉冲激光器,脉冲重复频率为 10 Hz,波长 532 nm,脉宽 4.2 ns. 使用 AIR-1550-TWM 光纤式光折变干涉仪作为接收器,波长为 1 550 nm,带宽 125 MHz,同时配合双通道数字示波器 Tektronix TDS3032B 显示检测结果,带宽为 300 MHz,如图 2 所示.

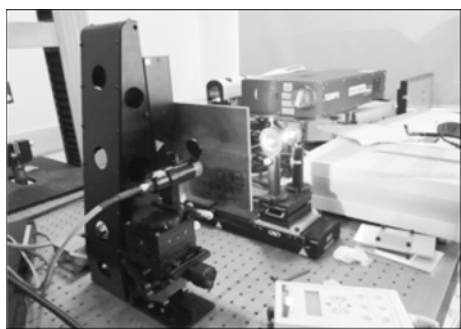


图 2 激光超声检测示意图

Fig. 2 Schematic of laser ultrasonic testing

试验中在焊缝背面用脉冲激光器激发超声波,在试件中传播,在背面上另一点位置接收信号,发射点与接收点距离大致与焊缝宽度相当,这样获得的信号既包含从表面传播过来的表面波,又包含底面反射的回波,同时还带有缺陷的反射波信号. 干涉仪(TWM-1550)接收后,输入差分电路将振动位移转换为振动速度,然后传入数字示波器进行 A/D 转换,进行计算机存储.

2.2 信号采集与预处理

根据采样定律,当采样频率 f 大于信号中最高

频率 2 倍($f \geq 2f_{\max}$),采样之后的数字信号才能够完整保留原始信号中的信息,同时在频域分析时不产生混叠,根据试验激光超声检测设备的特性,检测信号的最高频率可达几十兆赫兹,故选用采样频率为 250 MHz,采样点数为 10 000 个点. 在实际检测中缺陷沿焊缝纵向分布,为从统计学角度获得每一组试样的特征,使激光光源沿着焊缝纵向移动,每隔 1 mm,依次逐点发射脉冲,得到多个点的检测数据. 由于信号接收形式为非接触式,每个接收点距离试板面的垂直距离会对幅度产生影响,所以在信号分析之前需要对信号进行能量归一化处理,归一化参数由仪器获得. 图 3 为 3 组试样的部分原始检测信号,每条曲线代表一个检测点,原始检测点数分别为 21, 21, 41. 剔除明显杂乱点后选取 20, 20, 40 个点的的数据用于后续频域分析.

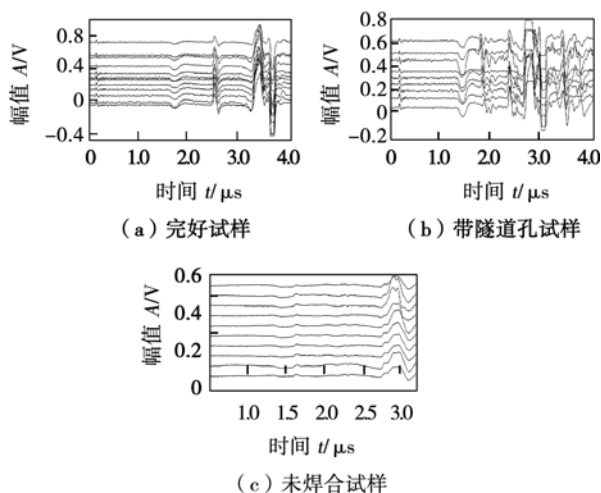


图 3 原始检测信号

Fig. 3 Original signal

2.3 信号时域及频域分析

2.3.1 时域分析

时域分析时,首先对完好试样取一个点的采集信号,时域波形如图 4 所示.

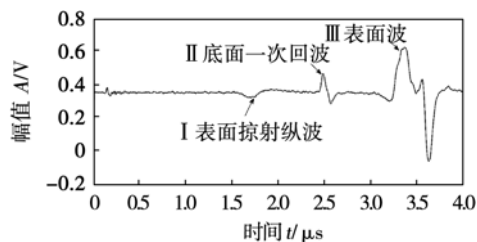


图 4 完好试样检测信号

Fig. 4 Wave type of perfect specimen signal

从图 4 中可以看到几处峰值,根据激光超声激

发基本原理,激光源可以激发出表面波和体波. 表面波是沿试板表面传播的波,其幅值最大,即图4中Ⅲ处,故可以通过表面波到达的时间 t_R 以及波速 C_R 计算得到激发源距离接收点的垂直距离 D ,即

$$D = t_R C_R \quad (1)$$

而Ⅰ,Ⅱ处分别为表面掠射纵波和底面一次回波,判断依据是各类波到达的时间不同. 在厚度为 H 的试板中,各类波到达的时间如下.

表面掠射纵波到达时间为

$$t_L = D / C_L \quad (2)$$

一次回波到达时间为

$$t_1 = \frac{2 \sqrt{(D/2)^2 + H^2}}{C_L} \quad (3)$$

式中: C_L 为纵波速度,由于横波信号比较弱,淹没在纵波信号中,因此只考虑纵波反射.

铝合金表面波速度 $C_R = 3\ 200$ m/s,纵波速度 $C_L = 6\ 260$ m/s,横波速度 $C_S = 3\ 040$ m/s,由图4知表面波到达的时间为 3.1×10^{-6} s,计算得到表面纵波、一次回波到达的时间依次为 1.6×10^{-6} s, 2.5×10^{-6} s,如图4中Ⅰ,Ⅱ处,原始信号图3a出现的峰值点依次代表表面掠射纵波、一次回波、表面波,图3b中除了在上述时间点处出现峰值外,还有其它的峰值点出现,图3c中信号幅值发生了变化,这些新的峰值点以及变化的幅值反映了缺陷信息. 对于两类缺陷,分别取一个点做时域分析,如图5所示.

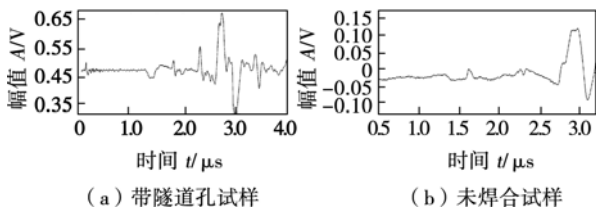


图5 缺陷试样检测信号

Fig. 5 Detection signal of sample with defects

从图5a所示区域可以看出,相对完好试样对应区域,在表面掠射纵波和一次底面回波之间,存在其它回波信号,即隧道孔缺陷的一次反射回波,时间上位于时域图中 $1.3 \sim 2.3 \mu\text{s}$ 之间的 $1.7 \mu\text{s}$ 处,缺陷的多次反射回波情况复杂,不作深入分析. 由此时间计算得孔洞到试件上表面距离为1 mm. 图5b中表面缺陷,表面波幅度明显低于其它两类试样,这是因为表面波为宽频信号,当其经过表面缺陷时,一部分高频信号由于波长较小而被反弹回去,故接收到的信号强度只为原始信号的一部分. 根据表面波幅值的强弱可以得到表面缺陷深度大小信息,同时当

检测点和接收点位于缺陷同侧时,可以根据表面波到达的时间以及表面缺陷反射回波到达的时间对缺陷进行定位^[6].

2.3.2 频谱分析及缺陷分类

由上述时域图可以看出,缺陷信息虽能够从时域中反映出来,但是信号强度较弱,根部未焊合缺陷仅在幅度上有所表现,不能达到良好的区分效果,因此有必要在频域上对该信号作进一步分析. 频谱分析以傅里叶变换为基础,对于离散信号 $x(n)$,其离散傅里叶变换(DFT)公式为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (4)$$

式中: n, k 为序列号; N 为信号序列的点长度,文中采用功率谱分析,Fourier变换和功率谱密度估计存在关系为

$$S(f) = \frac{1}{N} |X(f)|^2 \quad (5)$$

在离散的频率点 $f = k\Delta f$,有

$$S(k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2 \quad (6)$$

式中: $S(f)$ 为连续功率谱密度; $S(k)$ 为离散功率谱密度; $X(f)$ 为离散信号 $x(n)$ 的傅立叶变换; Δf 为频域上相邻离散点的频率差. 采用PSD-Welch法,即用改进的平均周期图法来求取随机信号的功率谱密度估计,对目标信号进行重叠分段,并对每一段信号加窗,进行功率谱估计,最后再取平均作为整个序列的功率谱估计^[7]. 图6为PSD-Welch法功率谱图,对三类试样各个点的信号(表面纵波、底面一次回波和表面波)进行功率谱估计,取其中一组进行对比. 由于检测信号频带较宽,为保证较好的频率分辨率,抑制频谱泄露,使用汉宁窗,选取窗长度256,分段重叠128.

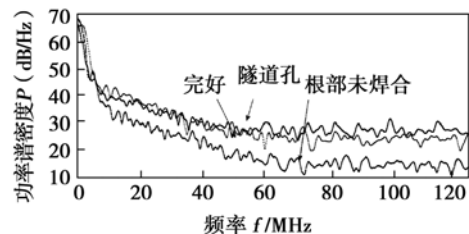


图6 PSD-Welch法功率谱图

Fig. 6 Power spectrum diagram under PSD-Welch

从图6中看出,3种信号均为宽频信号,能量主要集中在 $0 \sim 20$ MHz区间,忽略高频段噪声信号,在低频段,谱图峰值无明显规律性,故不采用峰值点作为特征识别,而低频段能量存在显著差异,隧道孔试

样能量最高、未焊和试样最低,这是由于隧道孔的存在会产生多种反射波,而根部未焊合如前所述,表面的缺陷使得能量被反弹了一部分,故接收的信号强度最低。接下来采用支持向量机(SVM)选择 0 ~ 5 MHz, 5 ~ 10 MHz, 10 ~ 20 MHz 三段的平均能量和其时域的最大幅值等特征作为模型输入,预处理和归一化处理采用 RBF 核函数映射至高维空间,设置 γ 和 C , 其中 γ 为径向基核函数中的系数, C 为惩罚系数。训练数据为 60 组,不同参数的测试结果如表 1 所示。

表 1 测试结果

Table 1 Testing result of SVM

惩罚系数 C	核函数系数 γ	样本数 N	正确率 $p(\%)$	均方根误差 E
0.1	1.000 0	20	50	1.25
0.1	0.100 0	20	60	1.15
0.1	0.010 0	20	85	0.15
0.1	0.001 0	20	60	0.85
0.1	0.000 1	20	50	1.25

计算结果表明,当采用 $C = 0.1$, $\gamma = 0.01$ 时,FSW 典型缺陷分类识别率达到 85%,均方根误差(E)为 0.15,能够较好区分不同类型缺陷。

3 结 论

(1) 设计并制备了 FSW 典型缺陷试样,利用峰值信息可以判断有无缺陷回波进行隧道孔缺陷定性分析,通过回波时间进行缺陷深度方向定位;利用表面波幅值大小能够对根部未焊合缺陷的大小进行判定。

(2) 通过 PSD-Welch 法对信号进行了频域分析,给出了典型缺陷试样的低、中、高 3 个频段能量,根部未焊合能量最低。

(3) 构建了功率谱低频能量特征和幅值为输入变量的 FSW 缺陷分类支持向量机模型,分类识别率

达到 85%,均方根误差为 0.15,基本能够对缺陷类型进行有效识别。

参考文献:

- [1] 曹立杰. 铝合金搅拌摩擦焊缺陷的研究进展[J]. 表面技术, 2009, 38(3): 68-71.
Cao Lijie. Research progress of detect on aluminium alloys in friction stir welding[J]. Surface Technology, 2009, 38(3): 68-71.
- [2] 钱梦騄. 激光超声学的若干进展[J]. 声学技术, 2002, 21(12): 19-24.
Qian Menglu. Progress in laser ultrasonics[J]. Technical Acoustics, 2002, 21(12): 19-24.
- [3] 王 廷, 朱丹阳, 刘会杰, 等. 7050-T7451 铝合金的搅拌摩擦焊接试验分析[J]. 焊接学报, 2009, 30(8): 109-112.
Wang Ting, Zhu Danyang, Liu Huijie, et al. Experimental investigation of friction stir welding of 7050-T7451 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(8): 109-112.
- [4] 周正干, 滕升华, 江 巍, 等. 焊缝 X 射线检测及其结果的评判方法综述[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 85-89.
Zhou Zhenggan, Teng Shenghua, Jiang Wei, et al. A review of evaluation methods of X-ray detection results of weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(3): 85-89.
- [5] 姚 楠. 激光超声技术的应用及发展[J]. 舰艇电子工程, 2010, 30(3): 20-22.
Yao Nan. Application and development of laser ultrasonic technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2010, 30(3): 20-22.
- [6] Moura A, Lomonosov A, Hess P. Depth evaluation of surface-breaking cracks using laser-generated transmitted Rayleigh waves[J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103(8): 0849111.
- [7] 杨晓明, 晋玉剑, 李永红. 经典功率谱估计 welch 法的 matlab 仿真分析[J]. 电子测试, 2011(7): 101-104.
Yang Xiaoming, Jin Yujian, Li Yonghong. Matlab simulation and analysis of the welch method in the classical power spectrum estimation[J]. Electronic Test, 2011(7): 101-104.
- [8] 杨 芳. 基于支持向量回归(SVR)的材料热加工过程建模[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

作者简介: 郑德根,男,1988 年出生,硕士研究生. 主要研究方向为搅拌摩擦焊缺陷检测. Email: agenda@163.com

通讯作者: 陈华斌,博士,副教授. Email: hbchen@sjtu.edu.cn