

地磁场环境下铝合金 FSW 缺陷微磁信号特征提取研究

严毅琪¹ 付检平² 孙鹏宇¹ 程强强¹ 李 言¹ 夏桂锁¹

(1.南昌航空大学测试与光电工程学院,无损检测技术教育部重点实验室; 2.中国特种设备检测研究院)

摘 要 搅拌摩擦焊(FSW)作为一种新型的固相焊接方法,所形成的焊缝中易含有紧贴型、取向复杂的微细尺寸缺陷。针对铝合金 FSW 焊缝检测高精度、高分辨率的检测需求,根据 7A09 铝合金在地磁场环境下所具有的弱顺磁性,提出一种基于铝合金自身磁信号分布的微磁检测方法。通过高精度测磁传感器采集铝合金 FSW 焊缝表面微弱的磁感应强度变化信号,利用小波变换的多尺度性把焊缝缺陷处的磁异常信号精确地从复杂的原始磁感应强度信号中提取出来,将焊缝缺陷信息直观地映射到分离出的 d1 信号曲线上。结果表明,微磁检测方法对铝合金 FSW 焊缝中微细缺陷的检测精度可达到 0.2 mm,对缺陷位置的检测误差仅为 1.67%,能够实现对铝合金 FSW 焊缝全覆盖式、高可靠性的无损检测。

关键词 铝合金;搅拌摩擦焊;微磁检测;多尺度小波变换

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Feature Extraction of Micromagnetic Signal of Aluminum Alloy FSW Defects in Geomagnetic Field

Yan Yiqi¹, Fu Jianping², Sun Pengyu¹, Cheng Qiangqiang¹, Li Yan¹, Xia Guisuo¹

(1.School Testing and Optoelectronic Engineering, Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University; 2.China Special Equipment Inspection and Research Institute)

Abstract: As a newly developed technique, friction stir welding (FSW) is widely applied in the areas of solid-phase welding. The fine defects in the weld seam are in characteristics of multi-tropism and clingy. To achieve the high accuracy and high resolution for the inspection needs of aluminum alloy FSW weld inspection, a method of micro-magnetic testing method based on magnetic signal distribution was proposed according to the weak paramagnetism under a natural geomagnetic field for the 7A09 aluminum alloy. Specifically, a high-precision magnetic vector quantity sensor was used to collect magnetic induction intensity signal which changes slightly on the surface of weld and the magnetic anomaly signals of weld defects are accurately extracted from the complex original magnetic induction intensity signals through multi-scale property of wavelet transform, directly mapping weld defect information to the separated d1 signal curve. The results indicate that the micro-magnetic resolution for minor defects in aluminum alloy FSW welds can reach 0.2 mm, and the detection error of defect location is only 1.67%. Therefore, the micro-magnetic method can guarantee the non-destructive detection for aluminum alloy friction stir welding with complete coverage and high reliability.

Key Words: Aluminum Alloy, Friction Stir Welding, Micro-magnetic Detection, Multi-scale Wavelet Transform

铝合金作为应用最广泛的合金之一,凭借其高比强度、高比刚度以及优良的加工成形性,在航空航天、交通运输、石油化工等众多领域得到了广泛应用^[1~3]。搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)作为一种新型固相焊接技术,利用搅拌头高速旋转产生的摩擦热促使材

料发生塑性变形,所形成的焊缝部位不会存在金属的熔化,属于固态塑化焊接过程^[4,5]。FSW 技术被认为是连接同类和异种金属的最经济有效的方法之一,并使得多种硬铝和超硬铝合金成为可焊材料^[6]。FSW 在实际应用中由于受到装夹条件、焊接工艺参数以及材料表面状

收稿日期:2021-05-21;修改稿收到日期:2021-06-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61902168,61963026,51765049);江西省自然科学基金资助项目(20192BAB215045);航空科学基金资助项目(2019ZE056001)
第一作者简介:严毅琪,女,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:yyqsoftware@163.com
通信作者:程强强,男,1985 年出生,博士,南昌(330063),E-mail:chengqq@nchu.edu.cn
引用格式:严毅琪,付检平,孙鹏宇,等.地磁场环境下铝合金 FSW 缺陷微磁信号特征提取研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 533-1 538.
YAN Y Q, FU J P, SUN P Y, et al. Feature extraction of micromagnetic signal of aluminum alloy FSW defects in geomagnetic field[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 533-1 538.

况等因素的影响,在固相焊接接头中易形成紧贴型、细微以及取向复杂的缺陷,如沟槽、隧道型孔洞等,与常规的熔焊缺陷相比增加了检测难度^[7,8]。焊缝缺陷的存在不仅影响焊接件的使用性能,并且在一定程度上阻碍搅拌摩擦焊技术进一步的推广与应用^[9]。

目前用于 FSW 焊缝的检测技术有渗透、涡流表面检测技术以及适用于焊缝内部缺陷的超声、射线检测技术等。传统的渗透、涡流检测技术存在着较大的局限性,随着 FSW 应用范围的扩展,面对大量存在于压力容器等密封构件的封闭型焊缝缺陷,表面检测技术很难适用^[10]。超声检测具备较高的检测精度,并能够实现焊缝缺陷的定量检测,然而当前对于超声检测方法的研究主要集中在入射面规则的缺陷检测中,对于变曲线、变曲率的焊缝缺陷界面,超声波易在曲面上发生显著的聚集,散射特性与平面上相比产生明显增强,因此削弱了对复杂缺陷的检出能力^[11]。射线检测能够清晰地检测出 FSW 焊缝缺陷,并且检测结果可以长期保存,但是其检测的灵敏度低,对于焊缝中取向复杂的细小孔洞缺陷极易发生漏检,无法满足某些行业对于 FSW 高精度的严格质量控制要求^[12]。

针对当前常规 FSW 焊缝检测方法检测效率低、适用范围存在局限性以及易漏检等问题,本课题提出了一种应用于铝合金 FSW 焊缝缺陷的微磁无损检测技术。首先利用高精度测磁传感器采集焊缝表面微弱的磁感应强度信号。在地磁场环境下,为了从微弱而复杂的磁信号中提取出有效的缺陷磁异常信号,将小波方法引入到微磁信号处理中,利用多尺度小波变换对获取的原始磁感应强度信号进行缺陷信号特征分离,从而更加直观地对焊缝中存在的缺陷进行识别,以期铝合金 FSW 焊缝全覆盖式、高可靠性的无损检测提供参考。

1 微磁检测原理

微磁检测是一种基于天然地磁场的被动式无损检测方法,在检测过程中无需施加强磁激励,可以避免对被检构件的使用性能造成不利影响。该检测方法的核心内容是利用高精度测磁传感器对材料表面的磁感应强度进行测量,可以捕捉到由材料内部缺陷引起的异常磁感应强度变化,通过对获取的磁异常变化信号进行提取、分析,进而可以判断出材料内部存在缺陷的位置。微磁检测方法在使用过程中无需对检测材料表面进行预处理,并且检测灵敏度高,尤其适用于各种碳钢类铁磁性材料的缺陷检测,对合金钢管道缺陷的分辨率可达 0.1 mm^[13]。同时对于镍基高温合金、钛合金等非铁磁性材料存在的内部缺陷同样具备较好的检测效果,能够

检测出钛合金扩散焊中埋深 60 mm、直径 0.01 mm 的紧贴型缺陷^[14,15]。

铝合金具备与纯铝相似的磁学特性,其相对磁导率为 1.000 02。在开放式的恒定微弱地磁场环境中,铝合金由于受到地磁场作用被磁化,自身的磁感应强度略有增强,从而表现出一定的弱顺磁性^[16]。当位于地磁场中的铝合金材料内部组织形态是均匀连续时,磁感应线被均匀约束在材料中,利用高精度测磁传感器测得的铝合金材料表面磁感应强度信号变化较为平缓,无明显剧烈波动产生。若铝合金材料内部存在不连续缺陷(如孔洞、夹渣),在孔洞缺陷中由于充斥着低磁导率的空气介质,磁感应线通过气隙孔洞时会产生弯曲并从缺陷邻近部位通过,引起缺陷中的磁感应线通量减少;在含有高磁导率的铁磁性夹杂缺陷时,由于缺陷处的相对磁导率大于铝合金材料正常组织结构处的相对磁导率,磁感应线将从缺陷处密集通过,引起该处磁感应线通量激增。磁感应线通量的局部不均都会引起该处铝合金材料的相对磁导率发生一定程度的改变,从而导致铝合金材料表面的磁感应强度信号产生畸变。通过高精度测磁传感器对异常磁感应强度信号的检测就可以实现铝合金 FSW 焊缝的缺陷识别^[17]。微磁检测原理示意图见图 1。

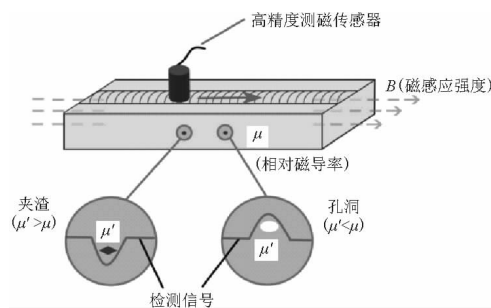


图 1 微磁检测原理

Fig.1 Principle of micro-magnetic detection technology

2 试验方法

2.1 试验材料

试验材料选用尺寸为 10 mm 厚的 7A09 高强铝合金轧制板材,采用平板对焊,焊件尺寸为 180 mm×100 mm,其主要化学成分见表 1。

表 1 7A09 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 7A09 aluminum alloy %

ω_B								
Cr	Cu	Mn	Ti	Zn	Mg	Si	Fe	Al
0.15~0.30	1.2~2.0	≤0.10	≤0.10	5.1~6.1	2.0~3.0	≤0.50	0.45	余量

2.2 试验方法

采用自主研发的微磁焊缝检测系统对铝合金 FSW 焊缝表面的磁感应强度信号进行采集,焊缝检测系统主要由控制界面、数据驱动系统和数据处理系统组成,图 2 为微磁焊缝检测系统框架。

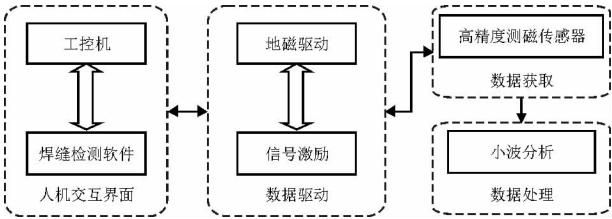


图 2 微磁焊缝检测系统框架

Fig.2 The framework of micromagnetic weld detection system

试验中用来获取数据的高精度测磁传感器为磁通门传感器,测量范围为 $\pm 3 \times 10^5$ nT,分辨率为 0.1 nT,封装后用以焊缝缺陷检测。在微弱的地磁场驱动下,铝合金内部的磁矩方向会和外界的磁场方向趋向一致,铝合金 FSW 焊缝中存在的微小缺陷会引起材料表面磁感应强度发生异常的波动,通过配备的高精度测磁传感器对获取的磁感应强度异常信号进行分析,可以对焊缝中存在的缺陷情况进行判定。

3 试验结果与分析

3.1 检测结果

为验证微磁检测方法的可靠性和准确性,利用所搭建的焊缝检测系统对铝合金 FSW 焊缝表面进行扫查。进行检测时,需确保试样周围半径 3 m 空间范围内无强磁干扰。检测过程中将高精度测磁传感器探头紧贴铝合金 FSW 焊缝表面,从左到右沿焊缝焊接方向无脱离地匀速扫查。试验所使用的铝合金 FSW 试样检测路径见图 3。

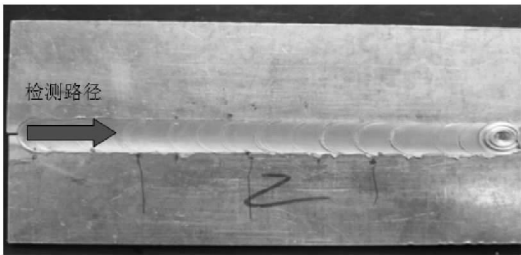


图 3 铝合金 FSW 试件及检测路径

Fig.3 Aluminum alloy FSW specimen and detection path

微磁检测结果见图 4。可以看出,通过微磁检测技术获取到的焊缝表面磁感应强度数据整体波动较平缓,呈现出不规则的变化趋势。在检测位移分别为 40、102、138 和 178 mm 等多处存在信号波动较大的异常点,其中在检测位移 138 mm 处的磁感应强度数据波动

最为强烈,出现局部极大值,磁感应强度异常差值达到 6 nT,相比于整体磁感应强度值 20 nT 的数据变化范围,可以判定该处是由焊缝缺陷产生的磁异常信号。检测路径其余各处的磁感应强度信号虽仍有一定程度的波动起伏,但信号异常变化趋势微弱,无法直观的从原始磁感应强度值中对缺陷进行判定。

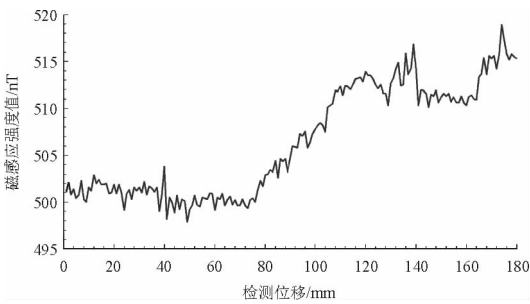


图 4 铝合金 FSW 焊缝微磁检测原始信号

Fig.4 Original data of micro-magnetic detection for aluminum alloy FSW weld

在原始磁感应强度值中含有的缺陷信号特征变化不明显时,一般采用原始数据与磁梯度处理数据相结合的方式减轻信号的不规律波动,同时利用磁感应强度梯度值间接反映出缺陷的信号特征来对焊缝缺陷进行判定。根据统计学中的拉依达准则,呈近似正态分布的样本数据正常值分布($\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma$)中的概率为 0.954 5。 μ 为样本数据均值, σ 为对应样本数据的标准差。因此当磁感应强度梯度值满足 $dB/dx \leq \mu_B - 2\sigma$ 或 $dB/dx \geq \mu_B + 2\sigma$ 时,可以判定该处为焊缝缺陷引起的磁异常信号变化。

FSW 焊缝磁梯度处理数据见图 5。可以看出,铝合金 FSW 焊缝除在 40 mm 和 138 mm 位置处的磁感应强度值出现特别明显的异常波动外,其余各处的磁感应强度值与检测过程整体背景磁梯度信号的总变化量相比仍较微弱,无法将其从邻近区域的磁梯度信号中准确区分出来。

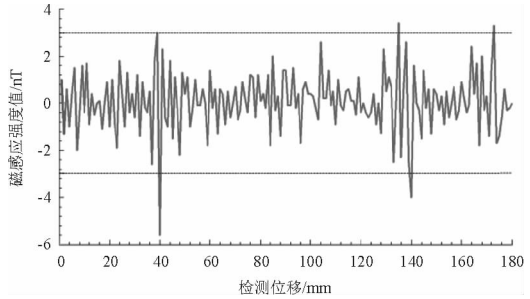


图 5 铝合金 FSW 焊缝磁梯度处理信号

Fig.5 Magnetic gradient processing signal of aluminum alloy FSW weld

鉴于铝合金材料的特殊性,单纯利用磁感应强度信号的极值和梯度值等相关统计学特征无法对铝合金

FSW 焊缝中存在的缺陷进行有效、准确的识别。因此如何准确地从微弱而复杂的磁性中提取出铝合金 FSW 焊缝中存在的缺陷磁异常信号,是一个亟待解决的难题。

3.2 焊缝缺陷信号提取

在铝合金 FSW 焊接过程中,材料组织结构的不连续性、焊接工艺以及焊件形状均会导致形成的焊缝宽度发生改变,由此引发测得的焊缝磁感应强度值会发生不确定性的变化。传统的梯度处理方法是以前数据采集的平稳性为前提进行分析,对于非线性、非高斯的磁感应强度数据难以进行有效处理。

通过对磁感应强度数据进行梯度处理可以看出,微磁检测获取的磁信号中存在着小范围、低幅度的高频信号干扰。同时在高精度测磁传感器探头紧贴焊缝表面进行扫查时,探头行进过程中受焊缝表面粗糙度的影响,会出现振动干扰。因此在对铝合金 FSW 焊缝进行微磁检测时,采集到的磁信号实际是由多重信号叠加形成的复杂信号,其中不仅包括焊件自身的磁场分布信号、缺陷异常信号,还包括检测过程中的振动信号以及背景噪声干扰信号。

为了有效地提取出铝合金 FSW 焊缝中缺陷的信号特征,需要对磁感应强度信号的非平稳性进行深入分析。目前针对非平稳信号的处理方法包括短时傅里叶变换、分数阶傅里叶变换、Gabor 变化和小波变换等。其中小波变换具备优异的多分辨率分析能力,无论在时域或频域都能够有效地对信号局部特征进行表征,对于处理非平稳信号具有独特的优势^[18,19]。

假设函数 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅里叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足以下条件时:

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称为 $\psi(t)$ 为一个母小波或基本小波,同时式(1)作为小波函数的可容许条件。母函数通过平移、伸缩等变化可以得到相应的小波序列,称为小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$, 可表示为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R; a \neq 0) \quad (2)$$

式中, a 为伸缩因子,控制小波 $\psi_{a,b}(t)$ 曲线的持续时间与幅度变化; b 为平移因子,用来调整子函数的中心位置。

研究表明,复合信号利用小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$ 分解为多个不同尺度的子信号^[20]。铝合金 FSW 焊缝缺陷信号可以视为存在于固有地磁场信号中的突变信号,这种突变信号可以进一步抽象为信号的奇异性,而小波变

换对于检测函数的局部奇异性具有优异的适用性。因此可以根据检测到的焊缝信号特征来选择合适的波,用以将缺陷信号从原始的复杂磁信号中分离出来。Daubechies 小波作为应用最成熟的紧支集正交实小波函数族,在无损检测中得到了广泛应用。针对地磁场环境下铝合金 FSW 焊缝磁信号的复杂性,选用 N 值较高的 db6 小波对获取的磁感应强度信号进行 3 尺度分解。

通过小波变换把获取的铝合金 FSW 焊缝原始磁感应强度信号分解到多个不同的频带上进行分析。首先对原始磁感应强度信号的近似系数进行单支重构,得到原始磁感应强度信号中对应的低频成分,见图 6。对比图 4 与图 6 可以看出,分离出的低频信号与原始信号两者之间波形虽略有差异,但整体表现出明显的相似性。低频信号波动幅度较小,约为 10 nT,代表检测过程中平缓变化的地磁场信号,能够反映出焊缝磁感应强度信号的总体变化趋势。

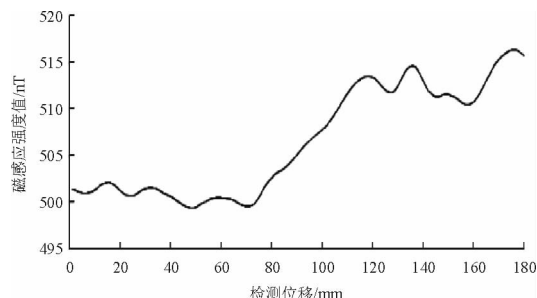


图 6 微磁检测原始信号中分离出的低频信号
Fig.6 Low frequency signal separated from the original signal of micro-magnetic detection

通过分别对细节系数进行重构,图 7 为采用 db6 小波对原始磁感应强度信号进行 3 尺度分解得到的高频

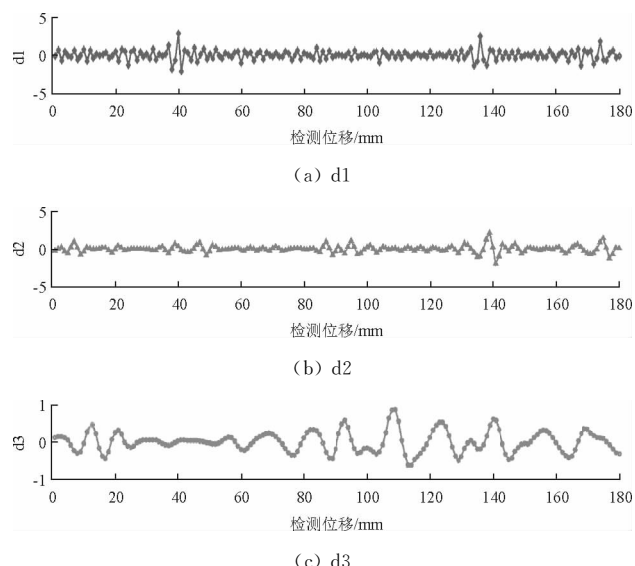


图 7 微磁检测多尺度小波分解信号
Fig.7 Multiscale wavelet decomposition signals for micro-magnetic detection

分量。其中 d2 表现出阶段性的高频变化特征,这是由于在铝合金搅拌 FSW 焊缝区表面存在连续分布、凹凸交替的半圆弧形纹线,当手持检测探头紧贴焊缝表面进行扫查时,探头行进过程中途径弧形纹产生的轻微抖动所导致的高频噪声干扰。同时由于所处背景环境的噪声干扰,d3 呈现出微弱的、近似规律性的正弦性周期变化。

图 8 为微磁检测多尺度小波分解 d1 信号。可以看出,焊缝缺陷信号主要存在于 d1 上,其中分别在检测位移的 40 mm 处、138 mm 处和 175 mm 处均出现明显的异常信号波动,信号特征表现为位移轴上的局部凸起,与邻近区域的信号相比变化非常尖锐,据此可判定焊缝在上述 3 个位置存在缺陷。

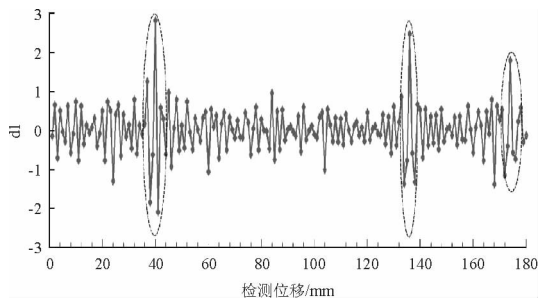


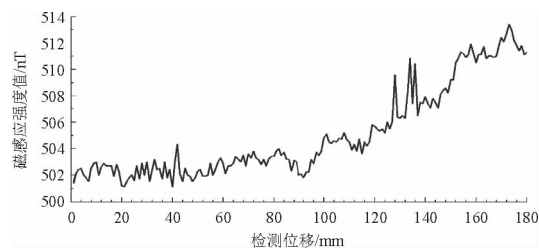
图 8 微磁检测多尺度小波分解 d1 信号

Fig.8 d1 signal of multiscale wavelet decomposition for micro-magnetic detection

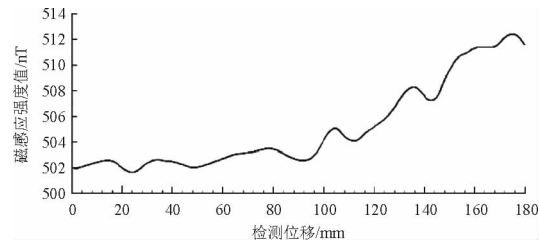
为进一步验证所提出基于多尺度小波变换的微磁检测方法的有效性,对铝合金 FSW 焊缝进行重复检测,并对获取的原始磁感应强度信号进行多尺度小波变换处理,结果见图 9。由图 9a 可知,低频的磁场信号变化平缓,整体信号波动稳定。同样由于扫查过程中探头行进速度不均,造成图 9d 中 d2 信号表现出小幅、高频的紧密变化趋势,与图 7 中的 d2 信号变化状态相符。图 9e 中 d3 信号和图 7 中 d3 信号具有相似的变化规律,均呈现出近似正弦性的周期变化。

图 9c 为对焊缝重复检测获取的磁感应强度信号分离出的 d1 信号,发现在检测位移 40、136 以及 176 mm 处存在明显的上凸变化,与其余各区域处的稳定变化相比,形成尖锐的异常波动,且波形变化趋势与图 8 中 d1 信号相一致,进一步证实焊缝在检测位移 40、136 和 176 mm 处存在缺陷。

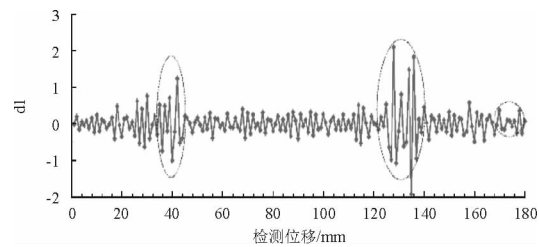
通过多尺度小波变换处理的方法能够准确、有效地将焊缝缺陷信号从获取的复杂磁信号中提取出来。相比于将原始磁感应强度信号和磁梯度处理信号作为焊缝中存在缺陷的判定标准,利用分离出 d1 信号的变化趋势来对焊缝缺陷进行判定,大幅降低了对焊缝缺陷的识别难度。



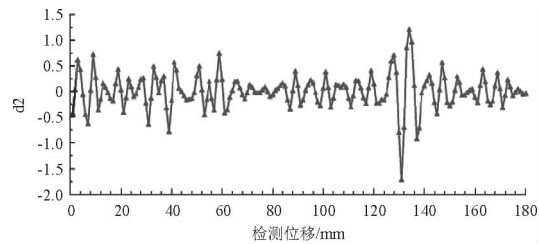
(a) 微磁检测原始信号



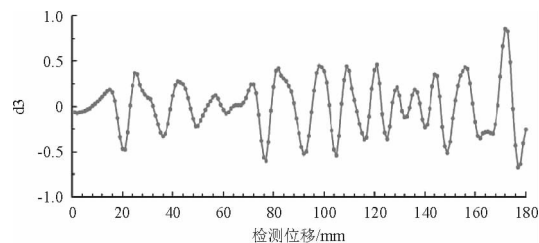
(b) 原始信号分离出的低频信号



(c) 多尺度小波分解 d1 信号



(d) 多尺度小波分解 d2 信号



(e) 多尺度小波分解 d3 信号

图 9 重复检测微磁信号多尺度小波分解

Fig.9 Multiscale wavelet decomposition of micro-magnetic signals for repeated detection

3.3 焊缝缺陷微观特征分析

通过对铝合金 FSW 焊缝表面进行目视检查,发现位于检测位移 175 mm 处的缺陷异常信号是由焊缝匙孔处的空缺所导致,但 40 mm 处和 136 mm 处焊缝表面无明显宏观缺陷存在。为实际验证微磁检测结果的真实性和可靠性,分别对铝合金 FSW 焊缝检测位移 40 mm 处和 136 mm 处进行金相组织剖析,使用 Axio

Scope. A1 金相显微镜对铝合金 FSW 焊缝试样的形貌进行观察,得到的结果见图 10。从图 10a 中可以观察到在焊缝检测位移 40 mm 处存在两个疏松型孔洞缺陷,与 d1 信号在此处表现出的异常波动相对应。通过对图 10b 的金相图观察,可以发现在焊缝检测位移 136 mm 处存在多个孔洞缺陷,且分布密集,孔洞缺陷最短约为 0.2 mm,最长达到 1 mm。

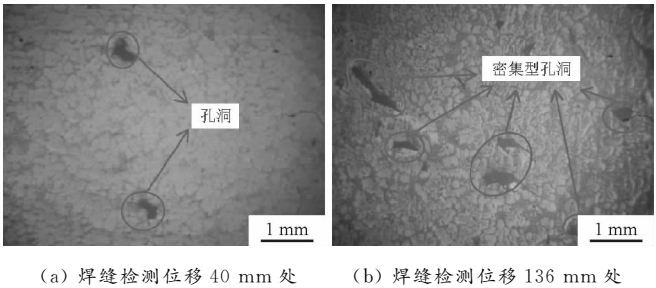


图 10 铝合金 FSW 焊缝缺陷处金相形貌
Fig.10 Metallographic morphology of defects in aluminum alloy FSW weld

表 2 为铝合金 FSW 焊缝缺陷的有关参数。其中密集型孔洞缺陷整体分布范围超过 4 mm,导致两次微磁检测分离出的 d1 信号缺陷位置产生轻微的偏移,由图 8 与图 9c 对比可知,偏移量约为 3 mm,对焊缝缺陷位置的检测误差为 1.67%。

表 2 铝合金 FSW 焊缝缺陷参数

Tab.2 Welding defect parameters of aluminum alloy FSW					
缺陷类型	缺陷位置/mm	缺陷范围/mm	缺陷长度最小值/mm	缺陷长度最大值/mm	缺陷数量/个
疏松型孔洞	40	39~40	0.3	0.5	2
密集型孔洞	136	132~137	0.2	0.9	6

4 结 论

(1)根据 7A09 铝合金在地磁场环境中表现出的弱顺磁性,通过高精度测磁传感器获取铝合金材料自身的磁感应强度变化信号来对焊缝中存在的缺陷进行判定,实现对铝合金 FSW 焊缝全覆盖式、高效的无损检测。

(2)在微弱的地磁场环境下检测到的磁信号实际是由多重信号组成的非平稳复杂信号,针对磁梯度处理方法无法准确区分铝合金 FSW 焊缝缺陷位置的问题采用多尺度小波变换方法对磁感应强度信号进行处理,从而有效分离、提取到焊缝中存在的缺陷信号特征,准确判定出焊缝中的缺陷位置。

(3)通过对铝合金 FSW 焊缝进行实际剖析及金相验证试验,证实所提出微磁检测方法的可靠性和准确性。对于铝合金 FSW 焊缝中呈密集分布的孔洞缺陷,微磁检测方法对缺陷定位精准,检测精度最高可达到 0.2 mm;对于分布较为广泛的疏松孔洞缺陷位置检测

过程中存在一定程度的偏移,检测误差最大为 1.67%。

参 考 文 献

[1] 贾海龙,周文强,王思清,等.高性能挤压铸造铝合金研究进展[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1187-1194.

[2] 毛育青,柯黎明,刘奋成,等.铝合金厚板搅拌摩擦焊焊缝疏松缺陷形成机理[J].航空学报,2017,38(3):256-264.

[3] ADAMUSK K, ADAMUS J, LACKI J. Ultrasonic testing of thin walled components made of aluminum based laminates[J]. Composite Structures, 2018, 202: 95-101.

[4] 赵宏龙,苏向东,秦庆东.6063 铝合金搅拌摩擦焊焊缝组织特征与腐蚀行为研究[J].特种铸造及有色合金,2018,38(10):1140-1145.

[5] 高伟哈,国旭明,莫春立.铝合金无减薄搅拌摩擦焊工艺优化及特征分析[J].焊接学报,2019,40(4):141-147.

[6] 邱哲睿,邓永芳,刘赣华,等.铝/钢异种材料搅拌摩擦焊接研究现状及发展[J].特种铸造及有色合金,2020,40(5):512-518.

[7] LI B, SHEN Y, HU W Y. The study on defects in aluminum 2219-T6 thick butt friction stir welds with the application of multiple non-destructive testing methods[J]. Materials & Design, 2011, 32(4): 2073-2084.

[8] NANDAN R, DEBROY T, BHADOSHIA H K D H. Recent advances in friction-stir welding-process, weldment structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2008, 53(6): 980-1023.

[9] AMBROSIO D, WAGNER V, GARNIER C, et al. Influence of welding parameters on the microstructure, thermal fields and defect formation in AA7075-T6 friction stir welds[J]. Welding in the World, 2020, 64(5): 773-784.

[10] 陈涛,肖小齐,张赛,等.一种用于焊缝缺陷检测的旋转涡流探头设计[J].传感技术学报,2020,33(7):945-949.

[11] 胡博文,黄春平,夏春,等.搅拌摩擦焊焊缝缺陷形态对超声相控阵检测的影响[J].中国有色金属学报,2019,29(3):491-497.

[12] 李杨,李根,周云方.搅拌摩擦焊缺陷无损检测技术研究进展[J].焊接技术,2020,49(2):1-4.

[13] 程强强,夏桂锁,于润桥,等.基于微磁的连续油管在线检测技术[J].天然气工业,2014,34(7):109-114.

[14] 胡博,于润桥,徐伟津.人工槽模拟 GH4169 涡轮盘表面裂纹缺陷的微磁检测[J].航空学报,2015,36(10):3450-3456.

[15] 张斌,于润桥,刘怡,等.钛合金扩散焊微小缺陷弱磁检测试验研究[J].中国测试,2020,46(3):6-11.

[16] HU B, YU R Q, ZOU H C. Magnetic non-destructive testing method for thin-plate aluminum alloys[J]. Ndt & E International, 2012, 47(2): 66-69.

[17] 刘美全,孙钦蕾,姜忠宝.基于微磁学分析的缺陷微磁检测机理研究[J].中国机械工程,2013,24(9):1173-1176.

[18] 赵志宏.基于振动信号的机械故障特征提取与诊断研究[D].北京:北京交通大学,2012.

[19] 王海登,于润桥,张维景,等.弱磁检测在小径管焊缝检测中的应用研究[J].无损探伤,2016,40(1):18-20.

[20] 明安波,褚福磊,张伟.滚动轴承复合故障特征分离的小波-频谱自相关方法[J].机械工程学报,2013,49(3):80-87.

(编辑:栗万仲)