

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210339

激光超声信号变分模态分解与裂纹定量检测*

颜江涛¹, 赵纪元², 訾艳阳¹, 王琛玮¹

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049; 2. 北京信息科技大学自动化学院 北京 100192)

摘要:针对激光超声检测技术应用于金属增材件中所获取的信号具有复杂、多模态、信噪比低的特性的问题,获取激光超声信号进行时频分析,探究其频域可分性,采用变分模态分解算法根据频域特征进行分离并提取最佳表面波模态。在此基础上,提出一种基于激光超声信号B扫图结合变分模态分解提取表面回波特征值技术,对金属增材件表面裂纹长度进行定量检测。针对直接观察B扫图获取裂纹长度信息存在误差较大的问题,通过对变分模态分解提取的表面波模态在有裂纹时反射回波峰峰值的变化分析,绘制扫查位置-峰峰值图并据此精确获取裂纹起始和结束位置,检测结果的相对误差不超过8%。与直接获取原始信号B扫图的裂纹长度信息相比,提高了检测精度。该方法在金属增材件的激光超声信号的特征提取与定量检测方面具有可行性。

关键词:激光超声;变分模态分解;表面波;裂纹定量检测

中图分类号: TH878 TG115.285 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

Variational mode decomposition of laser ultrasonic signal and crack quantitative detection

Yan Jiangtao¹, Zhao Jiyuan², Zi Yanyang¹, Wang Chenwei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In terms of the problem that the signals obtained by laser ultrasonic testing technology applied to metal additive parts are complex, multimodal and with low signal-to-noise ratio, the laser ultrasonic signals are obtained for time-frequency analysis to explore their frequency domain separability. The variational mode decomposition algorithm is used to separate and extract the best surface wave mode according to the frequency domain characteristics. On this basis, a technique based on B-scan of laser ultrasonic signal combined with variational mode decomposition to extract surface echo eigenvalue is proposed for the quantitative detection of the surface crack length of metal additive parts. In view of the problem that there is a large error in obtaining crack length information by directly observing the B-scan image, the change of the peak to peak value of the reflected echo of the surface wave mode extracted by the variational mode decomposition is analyzed to detect crack. The scanning position-peak to peak value diagram is drawn, and the start and end positions of the crack can be accurately obtained according to the diagram. The relative error of the test results does not exceed 8%. Compared with directly obtaining the crack length information of the original B-scan image, the detection accuracy is improved. This method is feasible in feature extraction and quantitative detection of laser ultrasonic signals of metal additive parts.

Keywords: laser ultrasonic; variational mode decomposition; surface wave; crack quantitative detection

0 引言

增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术是一种

利用逐层累加材料的方式把数字化设计转为三维实体零件的先进制造技术^[1-2],其中金属增材制造以金属粉末或丝材为原料,通过逐层堆积的方式制造成型制件。采用金属增材制造技术获得的材料通常不具备较优的塑性和

韧性,这一特点使得零件较易出现裂纹缺陷^[3],裂纹扩展到一定程度甚至会造成零件整体开裂,对零件的性能和可靠性造成严重影响。因此,需探寻金属增材件表面裂纹的检测方案。无损检测技术作为检验检测领域的重要手段^[4-5],在各行各业有着广泛的应用场景。激光超声检测技术是一种先进的无损检测技术^[6],长期以来国内外学者对其激发机理、波形特征和检测精度开展着研究^[7-9]。不同于传统超声利用压电传感器激发,激光超声具有非接触、适应恶劣环境、宽带高精度检测的优良特性^[10],适合对金属增材件进行高精度的无损检测。激光超声检测技术应用于金属增材件中所获取的原始超声信号具有复杂、多模态、低信噪比的特征,对后续处理有一定影响。

目前众多学者开展了超声信号处理方法的研究工作,Zhao等^[11]利用激光超声技术对热障涂层的粘结层无损表征中发现原始超声信号包含严重噪声,使用了小波软阈值降噪来提高信噪比。Feng等^[12]提出了一种用于超声信号经验模式分解方法,实现了6061铝合金回波信号的增强。杨孟^[13]提出了基于互补集合经验模式分解和小波包的降噪算法,提升了对超声波信号降噪的效果。贺琛等^[14]提出基于盲解卷积的超声重叠回波分离方法解决镍基合金的界面反射波与缺陷回波重叠问题。综上所述,目前研究主要针对传统铸锻件的超声波信号进行处理以获取高信噪比信号或者所需特征信息,对于金属增材件的复杂多模态的激光超声信号处理方法研究尚欠缺,由于增材件的各向异性组织性能以及孔隙率影响^[15],导致激光超声信号具有散射噪声,有用的缺陷信号淹没在噪声中,缺陷特征难以提取,加上激光超声信号本身多模态的特性,因此需探寻合适的信号处理方法。

变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)是由Dragomiretskiy等^[16]于2014年提出的一种自适应、完全非递归的信号处理模型。该算法具有坚实的理论基础、对噪声鲁棒性强、可以有效避免模态混叠现象等特点,因此被一些学者关注并尝试运用于超声信号处理中。周文博等^[17]采用变分模态分解结合小波分析的方法对信号降噪,提高超声检测缺陷回波的区别度。Jiang等^[18]对选区激光熔化工工艺制造的316L不锈钢的激光超声信号采用VMD算法获取滤除噪声的表面波成分并探究透射波与裂纹长度的关系。现有研究主要利用变分模态分解对具有单一回波模态的超声信号进行降噪效果研究,而不同于传统超声信号的单一回波模态,激光超声信号具有多模态特性,因此有效分离出携带缺陷特征信息的表面波、纵波模态具有重要意义。

变分模态分解算法在激光超声信号处理中尚未有较多研究,但能为激光超声信号处理提供新的思路。本文针对多模态、低信噪比的金属增材件的激光超声信号,

探寻信号中携带特征信息的表面波和纵波的分离可行性,将变分模态分解算法应用于激光超声信号模态分离研究,获取最佳表面波模态。在此基础上,提出一种基于激光超声信号B扫图结合变分模态分解提取表面回波特征值技术,实现裂纹长度定量检测。相比于从原始B扫图获取裂纹长度信息的传统方法,有效提高了检测精度。

1 变分模态分解

VMD核心思想是将信号分解过程转移到变分框架中,通过构造约束变分模型,不断迭代求解约束变分问题的最优解,并对需要分解出的一组模态分量各自的中心频率与带宽进行更新,实现对原始信号的自适应分解。变分模态分解算法适用于激光超声信号的可行性依据是激光超声信号中各模态波的频率分布具有差异性,而变分模态分解算法能够利用信号的频域特征自适应分离。本文信号处理的目标是对激光超声原始信号分解获取最佳表面波模态,模态分离的关键是满足既不欠分解也不过分解原则,合理选择分解个数 K 。

2 定量检测方法理论与流程

本文提出一种基于激光超声信号B扫图结合变分模态分解提取表面回波特征值技术,对金属增材件表面裂纹长度进行定量检测。

该定量检测方法理论思路是:利用激光超声检测系统对试件进行区域扫查并形成B扫图,依据B扫图判定裂纹的存在性,依据实验参数信息实现裂纹准确定位。对B扫图的多组信号进行批量的变分模态分解,提取最佳表面波模态。依据有无裂纹时的表面波模态在裂纹反射回波区域的幅值存在明显区别的特性,记录回波峰峰值。依据每组信号的最佳表面波模态的回波峰峰值,绘制扫查位置-峰峰值图并据此精确获得裂纹的起始和结束位置,确定裂纹长度。

3 实验方法和研究结果

3.1 激光超声检测系统及实验试块

激光超声无损检测系统如图1所示,其主要由激励源、接收源、移动扫查机构、信号数据采集卡组成。其中,激励源核心器件是激励脉冲激光器和激光控制器。激励脉冲激光器采用波长1064 nm、脉宽8 ns的Quantel的固体Nd:YAG脉冲激光器,用于产生激光并作用于试件,从而通过热弹或烧蚀机制激发超声波^[19]。接收源包括接收光纤激光器、分光器和双波混合干涉仪。接收光纤激光器发出的激光通过分光器被分为探测光束和参考光

束,参考光束直接进入干涉仪,而信号光束将抵达试件,在试件表面发生散射后成为携带表面振动信息的光束并返回干涉仪中。干涉仪将信号光束和参考光束经光折变晶体干涉处理后,就能获得具有试件表面振动信息的光电流信号。采用带宽 125 MHz 的 PXI-5114 数据采集卡拾取信号。移动扫查机构包括机械臂和探头组机构,探头组机构固定有激励探头和接收探头,将激光能量集聚对中。

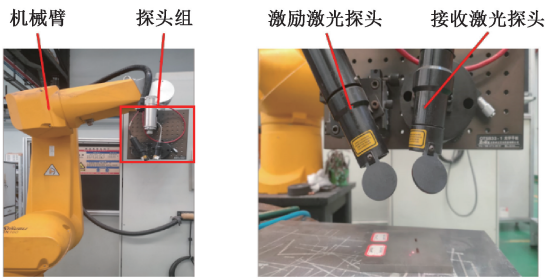
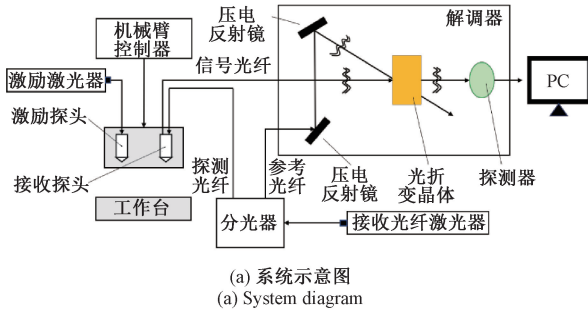


图 1 激光超声检测系统

Fig. 1 Laser ultrasonic testing system

实验试块采用 Fronius VR 1550 送丝机搭配 CMT Advanced 4000R 焊接电源加工的铝合金 2319 试块,所用原材料是直径为 1.2 mm 的 ER2319 焊丝,在焊接过程中,向焊接部位持续输送纯度 $\geq 99.99\%$ 的氩保护气使熔池在整个凝固过程中隔绝空气。在实验试块上人工预置不同尺寸的凹槽来模拟裂纹。本次实验试块如图 2 所示,A、B、C、D 裂纹的尺寸(长 \times 宽 \times 深)分别为 5 mm \times 0.1 mm \times 0.2 mm、10 mm \times 0.1 mm \times 0.2 mm、15 mm \times 0.1 mm \times 0.2 mm、20 mm \times 0.1 mm \times 0.2 mm。

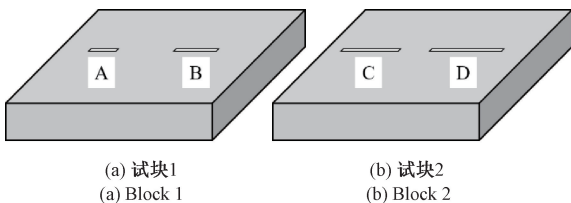


图 2 实验试块

Fig. 2 Test blocks

3.2 激光超声信号模式分离

不同于传统的超声检测方法,激光超声检测由于采用的接收系统是高精度、高灵敏度光学仪器,故其在一次激励中采集到的信号不仅有表面波,还有纵波、横波^[20]。另外实际检测通常处在强噪声等复杂环境中,以及激光超声检测系统本身的细微振动、增材制件的组织性能及高孔隙率等影响因素,导致采集信号信噪比不理想。综上,激光超声信号具有多模态、低信噪比的表征。针对多模态的激光超声信号中表面波和纵波的特点,拟探究二者的可分性依据,采用信号处理方法进行模式分离,为后续从分离信号中获取携带裂纹特征的信息提供保障。

通过实验获取激光超声信号,实验方案如图 3 所示,对裂纹尺寸为 5 mm \times 0.1 mm \times 0.2 mm 的增材铝制件(对应图 2(a)的 A 裂纹)的激光超声信号特性进行研究,采用收发同侧的方式获取信号,当表面波在传播过程中遇到裂纹后会发生反射现象,接收源检测到反射回波信号,实验参数(采样参数、激光参数、扫查参数)在表 1 显示。

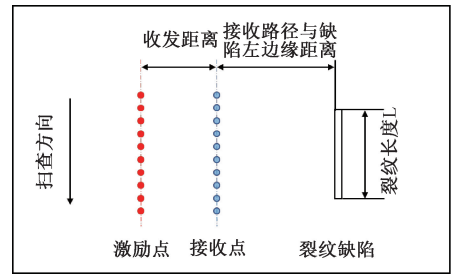


图 3 实验方案

Fig. 3 Schemes of experiments

表 1 实验主要参数

Table 1 Main parameters of experiments

参数类别	名称	参数值
采样参数	采样点数/个	1 500
	采样频率/MH	125
激光参数	激励激光能量值/mJ	42.3
	激励激光波长/nm	1 064
	接收激光功率值/W	0.5
	激励与接收距离/mm	12.5
扫查参数	扫查步长/mm	0.1
	扫查长度/mm	150
	接收路径与裂纹左边缘距离/mm	8

选取包含表面裂纹反射回波的 A 扫信号(如图 4(a)),对其连续小波变换得到时频图(如图 4(b)),分析发现,激光超声 A 扫信号组成复杂,利用热弹机制能一次激励产生表面波、纵波、横波以及各种模式转换波模

态。在时频图中表面波呈现 1.5~3 MHz 的宽频带分布,横波呈现 3~5 MHz 的宽频带分布,纵波及各种模式转换波呈现 5 MHz 以上的更宽频带分布。

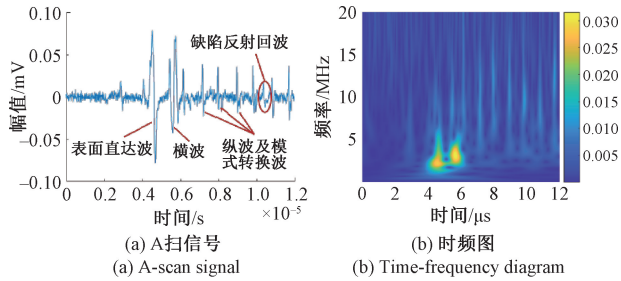


图4 实验信号

Fig. 4 Experimental signal

激光超声信号中各模态波的频率分布存在差异性,将其作为可分性依据,而变分模态分解算法能够利用信号的频域特征自适应分离,将原信号分解成一组中心频率不同的模态分量,故将变分模态分解应用于激光超声的多模态信号,以期能够有效地消除噪声干扰并提取携带裂纹信息的模态分量。VMD 分解信号的关键是确定分解得到的模态分量数量 K ,其对分解性能的优劣起决定作用。结合激光超声信号本身包含不同频率分布的波形的特点,设置合理的分解数量 K 以获取表征表面波和纵波的最佳模态分量。在 K 设置为 4 时,对图 4 包含表面裂纹反射回波的激光超声信号分解的时域和频域分量如图 5 所示。分解得到不同的固有模式分量 (intrinsic mode function, IMF), IMF2 主要表征纵波特性, IMF3 主要表征横波特性, IMF4 则主要体现了表面波特性, IMF4 中心频率为 2.25 MHz,且能量主要集中在 0~3 MHz,与

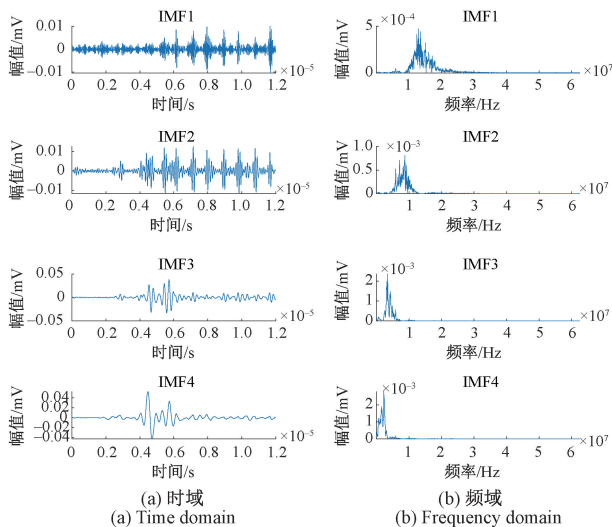


图5 实验信号的 VMD 分解时域与频域图

Fig. 5 VMD time domain and frequency domain diagram of experimental signal

激光超声表面波的频率一致。IMF1 作为存在高频噪声的分量被分离出,提高了 IMF2、IMF3 和 IMF4 的信噪比,因此分解数量 K 的最优选择是 4 个,满足不欠分解也不分解原则,在获取了不同波模态的最佳表征的同时有效提高了信噪比。

综上所述,变分模态分解能够实现激光超声信号表面波和纵波的分离,在频域实现超声表面波和纵波提取的同时保留了信号的时域特征,在实现多模态波分离后也有效滤去了信号中的噪声,有用信号特征得到增强,信噪比提升明显。

3.3 VMD 应用于裂纹长度定量检测

当激励与接收在同侧时,在裂纹处获取的激光超声信号存在表面反射回波,经 VMD 分解提取的表面波模态在时域上体现为相对大振幅,与无裂纹信号区分度高,因此可以根据在不同位置接收到的回波信号,判断是否存在裂纹以及获取裂纹的起始和结束位置,故采用图 3 的实验方案进行裂纹长度定量检测。检测裂纹长度的传统方法是观察原始信号 B 扫图中有无明显的不同色差的裂纹区域,并根据该区域色差持续长度作为裂纹长度,但该做法由于是肉眼观看,误差较大,故依据 2 节提出的定量检测方法理论与流程,精确获得裂纹的起始和结束位置,记为裂纹长度。对 3.1 节中裂纹尺寸为 5 mm×0.1 mm×0.2 mm (对应裂纹序号 A) 的增材铝制件进行实验,实验参数与表 1 相同。

首先判断裂纹的存在性。实验获取 150 组 A 扫信号后得到 B 扫图,如图 6 所示。从 B 扫图可以看出在 10.3 μs 处存在一段条纹,判定其为裂纹回波位置。根据飞行时间法对裂纹定位。由于实验收发距离 12.5 mm,表面波波速 $v_R = 2837$ m/s,设激励源与裂纹的距离为 x ,则有:

$$t = \frac{2x - 12.5}{v_R} \quad (1)$$

求得 $x = 20.86$ mm。故裂纹存在于距激励路径 20.86 mm 处,与实际情况 20.5 mm 相符,相对误差 1.76%,证明裂纹的存在性和定位的准确性。

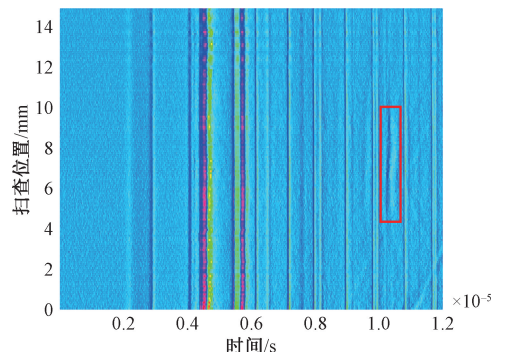


图6 裂纹长度 5 mm 的 B 扫图

Fig. 6 B-scan of crack length of 5 mm

之后对该处裂纹长度进行定量检测。选取在裂纹长度区域内的一组原始 A 扫信号,进行变分模态分解获取表面波模态 IMF4,记录 10.15~10.5 μs 范围内的表面裂纹回波峰峰值。为了形成比较,选取不在裂纹区域内的一组原始 A 扫信号并获取它的变分模态分解后的 IMF4,图 7 是有无裂纹时的表面波模态对比图,可以看出两者在裂纹回波区域(图中两条竖线覆盖的范围)有明显的区别,故可以利用裂纹回波峰峰值来进行裂纹长度定量检测。

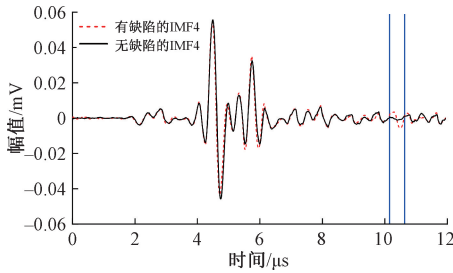


图 7 有无裂纹时的表面波模态对比图

Fig. 7 Comparison diagram of surface wave modes with and without cracks

传统方法是从原始 B 扫图中获取裂纹长度信息,故从图 6 中读取的裂纹长度为 5.6 mm,与裂纹实际长度 5 mm 的绝对误差为 0.6 mm,相对误差为 12%。

对 B 扫的 150 组实验信号进行批量 VMD 处理,均取 IMF4 分量为表面波模态。对 IMF4 分量在 10.15~10.5 μs 范围的波形峰峰值数据进行记录,在此期间如若发生了值的较大比例的突变,则说明此处与裂纹发生反射并且反射波被接收源探测到,即此处存在表面裂纹回波,记录回波存在的长度范围即是裂纹长度。根据各扫查位置的峰峰值绘制图 8。从图 8 中看出,从扫查位置 5 mm 后峰峰值陡然提高,从扫查位置 9.6 mm 后峰峰值陡然下降。分析可知,当表面波传播至裂纹起始位置导致表面波模式发生转换并反射回去,接收源接收到反射回波,扫查位置 5 mm 处的峰峰值比前一个扫查位置有 62.2% 的提高,故认为扫查位置 5 mm 处是裂纹起始位置。当越过起始位置后,反射点在裂纹边缘直线段内,回波峰峰值均处在较高的数值范围内。扫查位置 9.6 mm 之后峰峰值有 36.6% 的降幅,且之后峰峰值处在和扫查位置 5 mm 之前相近的数值水平,故认为扫查位置 9.6 mm 是裂纹结束位置。推算出裂纹长度为 9.6-5=4.6 mm,与裂纹实际长度 5 mm 的绝对误差为 0.4 mm,相对误差为 8%,相比于传统方法,检测精度得到了提高。

对 3.1 节中裂纹长度为 10、15 和 20 mm(对应裂纹序号 B、C、D)试块应用上述的 B 扫图结合表面波模态的方法进行定量检测。各自的 B 扫图以及变分模态分解后的表面波分量中裂纹回波的峰峰值变化如图 9、10、11 所

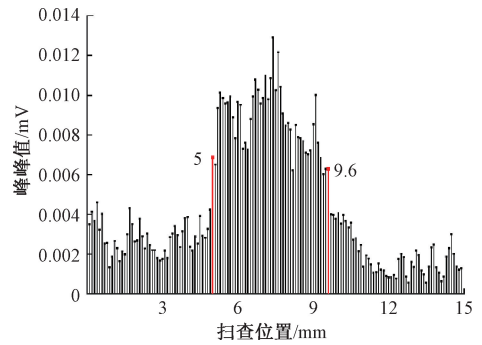


图 8 扫查位置-峰峰值图

Fig. 8 Scanning position-peak to peak value diagram

示。分析长度 10 mm 裂纹的原始 B 扫图可知,在 10.3 μs 处存在一段裂纹痕迹,从原始 B 扫图获取的裂纹长度为 9.4 mm。对 150 组实验信号进行批量 VMD 处理,均取 IMF4 分量为表面波模态。对 IMF4 分量在 10.15~10.5 μs 范围的波形峰峰值数据绘制相应的扫查位置-峰峰值图。在扫查位置 3.7 mm 处峰峰值提升幅度为 61.8%。在扫查位置 13.4 mm 之后峰峰值有 56.4% 的降低幅度,并且之后始终保持和扫查位置 3.7 mm 前相近的较低的值,则该两点是裂纹起始和结束位置,由此推算出裂纹长度为 13.4-3.7=9.7 mm,与裂纹实际长度 10 mm 的绝对误差为 0.3 mm,相对误差为 3%。分析长度 15 mm 裂纹的原始 B 扫图获取裂纹长度为 14.5 mm。从扫查位置-峰峰值图得知,扫查位置 4.3 mm 处峰峰值提升幅度为 106.9%,在扫查位置 19.2 mm 之后峰峰值的降低幅度为 54.4%,并且之后始终保持和扫查位置 4.3 mm 前相近的较低的值,则该两点是裂纹起始和结束位置,由此推算出裂纹长度为 19.2-4.3=14.9 mm,与裂纹实际长度 15 mm 的绝对误差为 0.1 mm,相对误差为 0.67%。分析长度 20 mm 裂纹的原始 B 扫图获取裂纹长度为 20.5 mm。从扫查位置-峰峰值图得知,扫查位置 4 mm 处峰峰值有大幅提高,在扫查位置 23.8 mm 之后峰峰值大幅降低,并且之后始终保持和扫查位置 4 mm 前相近的较低的值,则该

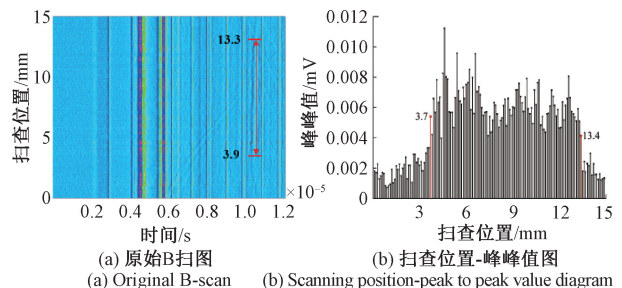


图 9 裂纹长度 10 mm 的 B 扫图和扫查位置-峰峰值图

Fig. 9 B-scan and scanning position-peak to peak value diagram of crack length of 10 mm

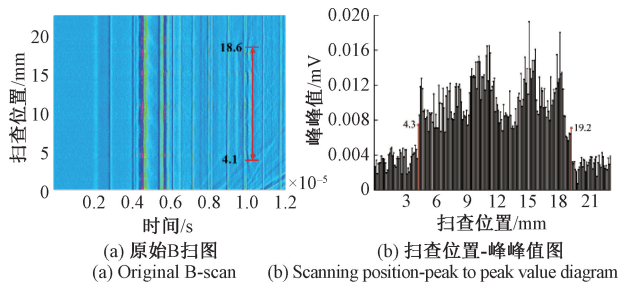


图 10 裂纹长度 15 mm 的 B 扫图和扫查位置-峰峰值图
Fig. 10 B-scan and scanning position-peak to peak value diagram of crack length of 15 mm

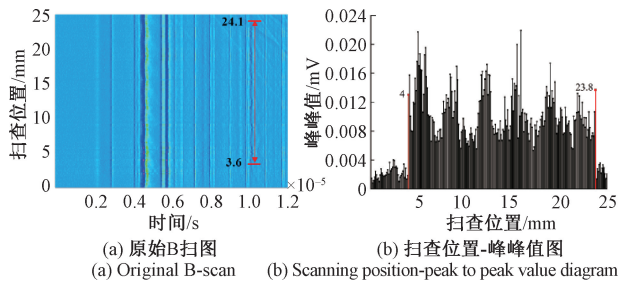


图 11 裂纹长度 20 mm 的 B 扫图和扫查位置-峰峰值图
Fig. 11 B-scan and scanning position-peak to peak value diagram of crack length of 20 mm

两点是裂纹起始和结束位置,由此推算出裂纹长度为 $23.8-4.0=19.8$ mm,绝对误差为 0.2 mm,相对误差为 1%。裂纹长度定量检测结果汇总在表 2。由表 2 看出,本文提出的基于激光超声信号 B 扫图结合变分模态分解提取表面回波特征值技术进行定量检测的方法,相比直接从原始 B 扫图中获取裂纹长度的传统方法,误差更小,检测精度有明显提高。

表 2 长度定量检测结果

Table 2 Length quantitative test results

实际长度 /mm	方法	检测长度 /mm	绝对误差 /mm	相对误差 /%
5	传统方法	5.6	0.6	12.00
	本文方法	4.6	0.4	8.00
10	传统方法	9.4	0.6	6.00
	本文方法	9.7	0.3	3.00
15	传统方法	14.5	0.5	3.33
	本文方法	14.9	0.1	0.67
20	传统方法	20.5	0.5	2.50
	本文方法	19.8	0.2	1.00

4 结 论

本文针对激光超声检测金属增材件采集到的原始信号具有波形复杂、多模态并存的特点,分析信号存在频率上的较大差异因而具有频域可分性,将变分模态分解应用于金属增材件的激光超声信号,解决了激光超声信号复杂多模态下单一表面波模态有效提取的问题。单一模态的幅值、频率、时间等信息对推算裂纹特征具有指示作用,为裂纹的高精度定量表征提供保障。

本文创新性地提出一种基于激光超声信号 B 扫图结合变分模态分解提取表面回波特征值技术,对裂纹长度进行定量检测。对 B 扫图的多组信号进行批量 VMD 分解并记录 IMF4 中裂纹回波峰峰值数据形成扫查位置-峰峰值图,确定裂纹起始和结束位置,与 B 扫图呈现的裂纹位置能够有效对应,且相比于直接从原始 B 扫图中获取裂纹长度的传统方法,明显提高了检测精度。

参考文献

- [1] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
LU B H, LI D CH. Development of the additive manufacturing (3D printing) Technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1-4.
- [2] CHEN L, HE Y, YANG Y X, et al. The research status and development trend of additive manufacturing technology[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9/12): 3651-3660.
- [3] 郭政亚, 熊振华. 金属增材制造缺陷检测技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(5): 49-57.
GUO ZH Y, XIONG ZH H. Defect detection technology in metal additive manufacturing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(5): 49-57.
- [4] 胡婷萍, 高丽敏, 杨海楠. 航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 70-75, 87.
HU T P, GAO L M, YANG H N. Application of nondestructive testing techniques on additive manufacturing in aerospace fields[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 70-75, 87.

- [5] 胡宸, 邬冠华, 罗文斌, 等. 噪声环境下空耦超声 Lamb 波铝板扫查成像定量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5): 120-127.
HU CH, WU G H, LUO W B, et al. Study on damage imaging of aluminum plate by air-coupled ultrasonic lamb wave [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5): 120-127.
- [6] 周正干, 孙广开. 先进超声检测技术的研究应用进展[J]. 机械工程学报, 2017, 53(22): 1-10.
ZHOU ZH G, SUN G K. New progress of the study and application of advanced ultrasonic testing technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (22): 1-10.
- [7] BESCOND C, KRUGER S, DANIEL L, et al. In-situ simultaneous measurement of thickness, elastic moduli and density of thermal sprayed WC-Co coatings by laser-ultrasonics[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(2): 238-244.
- [8] 倪辰荫, 石一飞, 沈中华, 等. 激光激发材料中近场声表面波的数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2007 (S1): 324-327.
NI CH Y, SHI Y F, SHEN ZH H, et al. Numerical simulation on near-field surface acoustic waves induced by laser line source[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007 (S1): 324-327.
- [9] 李海洋, 智斌亮, 潘强华, 等. 表面窄缺陷深度的光学检测方法[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 121-132.
LI H Y, ZHI B L, PAN Q H, et al. Photoacoustic detection method for depth of surface narrow defects[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 121-132.
- [10] 廖韦韬, 王海涛, 江奕, 等. 基于激光超声体波的轨头内部缺陷检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 221-229.
LIAO W T, WANG H T, JIANG Y, et al. Research on the internal defect detection method of rail head based on laser ultrasonic body wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 221-229.
- [11] ZHAO Y, CHEN J W, ZHANG Z Z. Nondestructive characterization of thermal barrier coating by noncontact laser ultrasonic technique[J]. Optical Engineering, 2015, 54(9): 094104.
- [12] FENG W, ZHOU X J, ZENG X, et al. Ultrasonic flaw echo enhancement based on empirical mode decomposition[J]. Sensors, 2019, 19(2): 236-236.
- [13] 杨孟. 超声无损检测算法研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2019.
YANG M. The research on ultrasonic non-destructive testing algorithm [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [14] 贺琛, 李兵, 高飞. 超声检测中利用盲解卷积的重叠回波分离方法[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(12): 129-137.
HE CH, LI B, GAO F. An overlapping echos separation method using blind deconvolution in ultrasonic testing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(12): 129-137.
- [15] 徐滨士, 董世运, 门平, 等. 激光增材制造成形合金钢件质量特征及其检测评价技术现状(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 8-16.
XU B SH, DONG SH Y, MEN P, et al. Quality characteristics and nondestructive test and evaluation technology for laser additive manufacturing alloy steel components (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4): 8-16.
- [16] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [17] 周文博, 赵娜, 张思奇, 等. GH3536 合金选择性激光熔化微小缺陷超声检测[J]. 数据采集与处理, 2020, 35(2): 298-306.
ZHOU W B, ZHAO N, ZHANG S Q, et al. Ultrasonic testing of tiny defects in GH3536 alloy by selective laser melting[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2020, 35(2): 298-306.
- [18] JIANG Y, WANG H T, CHEN S, et al. Quantitative imaging detection of additive manufactured parts using laser ultrasonic testing [J]. IEEE Access, 2020, 8: 186071-186079.
- [19] LEE S E, LIU P, KO Y W, et al. Study on effect of laser-induced ablation for Lamb waves in a thin plate[J]. Ultrasonics, 2019, 91 (1): 121-128.
- [20] 胡平, 艾琳, 邱梓妍, 等. 金属增材制造构件的激光

超声无损检测研究进展[J]. 中国激光, 2022, 49(14): 297-308.

HU P, AI L, QIU Z Y, et al. Laser ultrasonic nondestructive testing on metal additive manufacturing components [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 297-308.

作者简介



颜江涛, 2020 年于武汉理工大学获得学士学位, 现为西安交通大学硕士研究生, 主要研究方向为激光超声检测。

E-mail: iyanjiangtao@163.com

Yan Jiangtao received his B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2020. He is currently a postgraduate at Xi'an Jiaotong University. His main research interest is laser ultrasonic detection.



赵纪元(通信作者), 1991 年于西安交通大学获得学士学位, 1994 年于西安交通大学获得硕士学位, 1997 年于西安交通大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为高端制造装备及自动化、智能检测与控制。

E-mail: 20222607@bistu.edu.cn

Zhao Jiyuan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1991, received his M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 1994, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 1997. He is currently a professor at Beijing Information Science & Technology University. His main research interests include high-end manufacturing equipment and automation, intelligent detection and control.