

# 经验小波变换的激光超声定量识别表面裂纹

海良豪<sup>1</sup>, 赵纪元<sup>1</sup>, 王琛玮<sup>2</sup>, 颜江涛<sup>3</sup>, 郭森<sup>1</sup>

(1. 北京信息科技大学 自动学院, 北京 100192; 2. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;

3. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600)

**摘要:** 针对增材制造检测领域中激光超声检测技术定量识别金属增材制件表面裂纹时, 激光超声信号具有多模态混叠严重、波形复杂和信噪比低等问题, 提出了一种经验小波变换分解激光超声信号, 并使用表面波的缺陷回波波峰与波谷差值技术进行金属增材制件表面裂纹定量识别。分析激光超声信号的时频特性, 利用经验小波变换自适应分解并提取激光超声信号中的表面波模式。对原始信号和经验小波变换提取的表面波信号在有无裂纹反射回波的时间范围内波峰与波谷差值变化进行分析, 绘制原始信号和表面波信号的扫描位置——波峰与波谷差值图。经对比发现, 后者能更好地确定裂纹长度的起始和结束位置, 其裂纹检测结果的绝对误差不超过 0.4 mm, 相对误差不超过 6.00%。此方法在激光超声信号的缺陷特征提取与定量识别方面有效可行, 为复杂增材制造环境中对金属增材制件表面裂纹进行非接触检测提供了有力工具。

**关键词:** 激光超声; 经验小波变换; 表面波; 定量识别; 波峰与波谷差值

**中图分类号:** TG115.28; TN249 **文献标识码:** A

## Quantitative Identification of Surface Cracks by Laser Ultrasound Using Empirical Wavelet Transform

HAI Lianghao<sup>1</sup>, ZHAO Jiyan<sup>1</sup>, WANG Chenwei<sup>2</sup>, YAN Jiangtao<sup>3</sup>, GUO Miao<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China)

**Abstract:** Laser ultrasonic detection technology is used in the field of additive manufacturing to quantitatively identify surface cracks in metal additive parts. However, the laser ultrasonic signal has serious multi-mode mixing, a complex waveform, and a low signal-to-noise ratio. An empirical wavelet transform technique is proposed to decompose the laser ultrasonic signal and use the difference between the peaks and troughs of the defect echoes of surface waves to quantitatively identify surface cracks in metal additive parts. The time-frequency characteristics of a laser ultrasonic signal were analyzed, and its surface wave modes were decomposed and adaptively extracted using an empirical wavelet transform. The differences between the peaks and troughs of the original signal and a surface wave signal extracted using the empirical wavelet transform were analyzed in the time range with or without a crack reflected echo. Then, the scanning position-differences between the peaks and troughs of the original signal and the surface wave signal were determined. The comparison showed that the latter could better determine the starting and ending positions of a crack. The absolute error of the crack detection results was less than 0.4 mm, and the relative error was less than 6.00%. This method was effective and feasible for feature extraction and the quantitative identification of laser ultrasonic signals, and it provides a powerful tool for the non-contact detection of surface crack defects in metal additive parts produced in a complex additive manufacturing environment.

**Key words:** laser ultrasound; empirical wavelet transform; surface wave; quantitative identification; difference between wave crest and trough

收稿日期: 2024-04-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975452)

作者简介: 海良豪(1998-), 男, 安徽省芜湖市人, 硕士生。通信作者: 赵纪元(1969-), 男, 教授, 博士生导师。

## 0 引言

增材制造作为一种新兴制造工艺<sup>[1-2]</sup>在先进制造领域迅速发展,通过逐层连续打印方式将三维模型制造成实体零件。金属增材制造制件以粉末或者丝材为原材料,通过增材制造技术加工成型。与传统的“减材制造”技术相比,金属增材制造可以减少制造时间和成本,并精确地制造出复杂结构的零件<sup>[3]</sup>。但此工艺在制造零件过程中,成型件会出现表面裂纹和内部缺陷,进而降低零件的性能和可靠性<sup>[4-5]</sup>,所以对金属增材制件缺陷进行早期诊断和评估十分必要。

目前对零件缺陷的检测手段主要以超声、电磁、计算机断层扫描等为主<sup>[6]</sup>。激光超声检测技术是利用脉冲激光作用于零件表面并通过热弹机理激发出超声波以检测零件缺陷,该技术具有非接触、宽频带、高灵敏度和高空间分辨率等优点<sup>[7-9]</sup>,可作为检测金属增材制件表面裂纹的手段。

激光超声检测技术在金属增材制件表面激发的超声波信号具有多模态、波形复杂和信噪比低等问题,故需对激光超声信号的处理进行研究,以实现激光超声信号多模态的分离和提高信噪比。Feng等<sup>[10]</sup>提出了一种基于经验模态分解的缺陷回波增强方法,从不同深度的两个裂纹中获得实验信号,缺陷回波信号显著增强。张彦杰等<sup>[11]</sup>利用激光超声技术检测弧形表面缺陷,采用经验模态分解对带有缺陷信息的反射回波和透射波信号进行分解,实现了对相应特征频率信号的提取和叠加。杨孟<sup>[12]</sup>提出将互补集合经验模态算法与小波包结合的降噪方法,实现了对原始超声回波信号的降噪效果。张兴舜<sup>[13]</sup>采用小波阈值和经验模态分解对信号进行降噪处理,使模态混叠的问题得到改善。韩峰等<sup>[14]</sup>提出了将脉冲压缩方式与激光超声结合的检测方法,采用合适的滤波算法对激光超声表面波信号进行脉冲压缩,提高了信号的信噪比和分辨率。Hong等<sup>[15]</sup>提出了一种基于交替学习压缩感知和领域差分系数的铜管道激光超声检测损伤方法,此法将波场数据压缩至原始数据的13%,实现了对裂纹损伤的检测。颜江涛等<sup>[16]</sup>提出一种基于变分模态分解的算法,提取超声波信号中表面波回波并记录缺陷回波特征信息,实现了对金属增材制件表面缺陷的定量检测。罗朝莉等<sup>[17]</sup>提出将信号进行

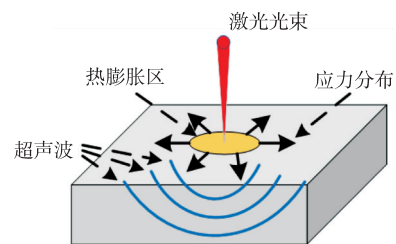
多次平均并与相邻三点信号差分相结合的处理方法,提高了信号的信噪比并增强了损伤回波的振幅。Mao等<sup>[18]</sup>提出将鲸鱼优化算法优化的参数用于激光超声信号的变分模态分解方法中,能准确选择相关模态并提高信噪比。综上所述,目前对于金属增材制件中的超声波信号处理方法研究较少,所以选择合适的信号处理方法对金属增材制件中超声波信号进行处理并提取缺陷特征,为表面裂纹识别提供依据具有重要意义。

2013年,Gilles<sup>[19]</sup>提出了经验小波变换(EWT)算法。该算法是一种处理非平稳信号的方法,兼具经验模态分解算法自适应性和小波变换紧支撑框架的优点。EWT方法能够自适应选择频带,解决了激光超声信号多模态混叠问题并分离表面波模态。学者们将EWT应用于超声信号处理方面。蔡笑风等<sup>[20]</sup>提出利用EWT对玻璃纤维复合板的干耦合Lamb波进行分解,得到不同的固有模态。李力等<sup>[21]</sup>提出利用EWT提取煤岩界面超声回波信号并对回波进行拟合,使用拟合后的回波计算出煤层厚度。

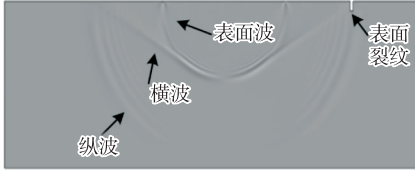
EWT在激光超声信号处理中的应用研究较少,但能为激光超声信号处理研究提供一种新的方法。针对金属增材制件中的激光超声波信号具有多模态、波形复杂和信噪比低等特点,EWT具有自适应分离模态的优点,可将EWT应用于激光超声信号中多模态的分离,研究其对多模态信号分离的可行性,提取信号中携带裂纹特征信息的表面波回波。提出一种经验小波变换自适应分解超声波信号并提取表面回波的缺陷特征值方法,对表面裂纹的长度进行定量识别。

## 1 纳秒脉冲激光激发超声波

脉冲激光在物体表面产生超声波的机理为热弹激发机理<sup>[22]</sup>。图1为激光激发超声波示意图。



(a) 热弹激发机理示意图



(b) 激光激发超声波声场分布云图

图1 激光激发超声机理和有限元仿真示意图

当激光束功率密度低于被检测材料的损伤阈值时,材料表面在吸收激光能量后,其局部区域温度升高并发生短时热膨胀现象。热膨胀作用使材料表面产生切向压力,并在材料表面产生超声波信号,该激发机理被称为热弹激发机理。

激光激发超声波的数值模型:在材料表面施加热源,材料吸收脉冲激光热源的热传导控制方程为

$$\nabla^2 T + \frac{Q}{K} = \frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $T$ 为温度; $Q$ 为热源; $K$ 为热传导率; $k$ 为热扩散系数。

热源的高斯方程为

$$Q = AI_0 g(t) f(r) \quad (2)$$

式中: $A$ 为吸收率; $I_0$ 为功率密度; $g(t)$ 和 $f(r)$ 分别为脉冲激光的时间和空间分布函数。其中:

$$g(t) = \frac{t}{t_0} e^{-t/t_0} \quad (3)$$

$$f(r) = e^{-r^2/r_0^2} \quad (4)$$

式中: $t_0$ 为激光脉冲宽度; $r_0$ 为光斑半径。

铝合金材料参数和有限元数值模拟各项参数分别如表1、2所示。由图1(b)可知,脉冲激光激发的超声波具有多模态、波形复杂和信噪比低的特点,可采用纳秒脉冲激光器激发的超声波对表面裂纹进行识别。

表1 铝合金材料参数

密度 $\rho/$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	杨氏弹性 模量 $E/\text{Pa}$	泊松比 $\sigma$	剪切弹性 模量 $G/\text{Pa}$
2 840	$7 \times 10^{10}$	0.33	$2.64 \times 10^{10}$

表2 有限元数值模拟参数

脉冲 宽度 $t_0/\text{ns}$	光斑 半径 $r_0/\text{mm}$	能量密 度 $I_0/$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )	脉冲 能量 $e/\text{mJ}$	时间 步长 $t_s/\text{ns}$	总时间 $t_a/\mu\text{s}$
10	0.3	$4.42 \times 10^{12}$	50	10	10

## 2 经验小波变换方法

对表面裂纹进行识别需要使用信号分解算法

对多模态激光超声信号进行分解并获取其中表面波模态。EWT算法能够将激光超声信号的傅里叶频谱自适应分割成多个频带区域,在每个分割的频带区域内构造出合适的小波滤波器组。将激光超声信号分解成 $N$ 个具有紧支撑傅里叶谱的互不重叠且完备的经验小波分量 $f_k(t)$ ,即

$$f(t) = \sum_{k=1}^N f_k(t) \quad (5)$$

式中: $N$ 为分解信号数目; $f_k(t)$ 为第 $k$ 个经验小波分量。

首先将激光超声信号变换到归一化傅里叶 $[0, \pi]$ 上,再对激光超声信号的傅里叶频谱进行自适应分割,构造出合适的经验小波滤波器组。将待处理信号进行滤波,可得到一系列经验小波滤波分量。

用傅里叶紧支撑将 $[0, \pi]$ 分割成 $N$ 个连续区间 $\Lambda_n$ ,有:

$$\begin{cases} \Lambda_n = [\omega_{n-1}, \omega_n], n=1, 2, \dots, N \\ (\omega_0=0, \omega_n=\pi) \\ \bigcup_{n=1}^N \Lambda_n = [0, \pi] \end{cases} \quad (6)$$

以 $\omega_n$ 为边界,则每段的傅里叶频谱区间范围为 $\Lambda_n = [\omega_{n-1}, \omega_n], n=1, 2, \dots, N$ ,第一个边界 $\omega_0$ 为0,最后一个边界 $\omega_n$ 为 $\pi$ ,具体分割示意图如图2所示。

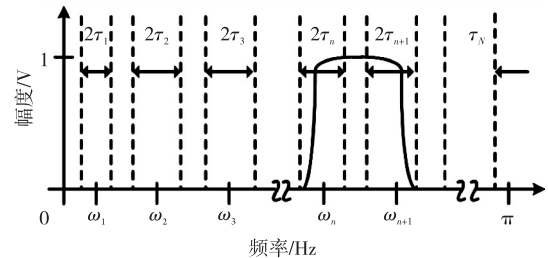


图2 傅里叶频谱分割示意图

图2中,过渡段 $T_n = 2\tau_n$ , $\omega_n$ 为过渡段的中心, $\tau_n = \gamma\omega_n$ 。根据小波构造思想,确定相应的尺度函数 $\hat{\phi}_n(\omega)$ 和小波函数 $\hat{\psi}_n(\omega)$ ,并构造经验小波滤波器,有:

$$\hat{\phi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq \omega_n - \tau_n \\ \cos \left\{ \frac{\pi}{2} \beta \left[ \frac{1}{2\tau_n} (|\omega| - \omega_n + \tau_n) \right] \right\}, & \omega_n - \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_n + \tau_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, \omega_n + \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_{n+1} - \tau_{n+1} \\ \cos\left\{\frac{\pi}{2}\beta\left[\frac{1}{2\tau_{n+1}}(|\omega| - \omega_{n+1} + \tau_{n+1})\right]\right\}, \\ \omega_{n+1} - \tau_{n+1} \leq |\omega| \leq \omega_{n+1} + \tau_{n+1} \\ \sin\left\{\frac{\pi}{2}\beta\left[\frac{1}{2\tau_n}(|\omega| - \omega_n + \tau_n)\right]\right\}, \\ \omega_n - \tau_n \leq |\omega| \leq \omega_n + \tau_n \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\beta(x)$  是在  $[0, 1]$  区间满足  $k$  阶导任意函数;  $\tau_n$  为过渡区间参数。

多数函数能满足经验小波尺度函数  $\hat{\phi}_n(\omega)$  和小波函数  $\hat{\psi}_n(\omega)$  的构造要求, 文献[19]推荐  $\beta(x)$  函数为

$$\begin{cases} \tau_n = \gamma\omega_n \\ 0 < \gamma < 1, \gamma < \min\left(\frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n}\right) \\ \beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3) \end{cases} \quad (9)$$

构造经验小波变换细节系数和近似系数分别为

$$\omega_f(n, t) = \langle f, \psi_n \rangle = \int f(\tau) \overline{\psi_n(\tau - t)} d\tau = (f(\omega) \overline{\hat{\psi}_n(\omega)})^V \quad (10)$$

$$\omega_f(0, t) = \langle f, \phi_1 \rangle = \int f(\tau) \overline{\phi_1(\tau - t)} d\tau = (f(\omega) \overline{\hat{\phi}_1(\omega)})^V \quad (11)$$

式中:  $(\cdot)$  为傅里叶变换;  $(\cdot)^V$  为反傅里叶变换;  $\overline{(\cdot)}$  为复共轭算子。

由式(7)-(11)得到经验小波滤波分量函数  $f_k(t)$  为

$$f_0(t) = \omega_f(0, t) * \phi_1(t) \quad (12)$$

$$f_k(t) = \omega_f(k, t) * \psi_k(t) \quad (13)$$

式中  $*$  为卷积计算。

由式(12)-(13)可知, 激光超声信号可被分离为不同序列的经验小波分量, 将表征裂纹的经验小波分量提取出来可实现裂纹的定量化识别。

### 3 表面裂纹长度定量识别方法

利用 EWT 从激光激发的具有多模态混叠的超声波信号中提取带有缺陷特征信息的表面波回波, 确定表面回波的波峰和波谷数值到达时间和幅值大小, 为分析有无裂纹缺陷的变化提供依据。

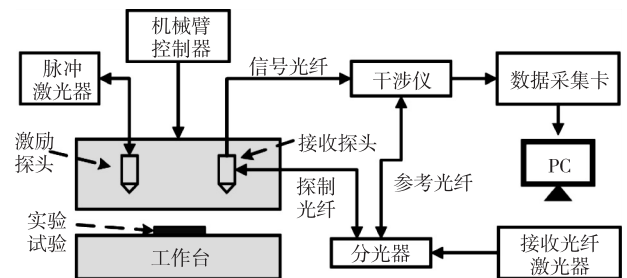
定量识别金属增材制件表面裂纹长度的方法: 利用激光超声检测系统中的激光激励探头对实验试块表面进行直线扫查, 将扫查形成的 B 扫

图用于判断表面裂纹的存在和位置信息。应用 EWT 算法对实验 B 扫中获取的多组原始信号进行分解, 然后分离并提取出表面波模态。在同组原始信号中选取两个不同扫查位置 A 扫信号, 一个无裂纹信息, 另一个携带裂纹信息。提取这两个信号的表面模态, 观察裂纹反射回波区域的幅值, 发现幅值存在明显不同, 再记录裂纹反射回波在时域上的波峰与波谷差值, 进而绘制原始信号和经过 EWT 提取得到的表面波信号的扫查位置—波峰与波谷差值图。经对比, EWT 处理后的原始信号信噪比有所提高, 能更好地确定裂纹的起始和结束位置, 从而推算出金属增材制件表面裂纹的长度。

## 4 实验验证

### 4.1 激光超声检测系统

图 3 为激光超声检测系统。其主要硬件组成部分包括脉冲激光器、接收光纤激光器、分光器、机械臂以及机械臂控制器、激光探头组、干涉仪、数据采集卡、PC 上位机。



(a) 系统示意图

激光探头组 机械臂 激励激光探头 接收激光探头



(b) 机械臂和探头组

图 3 激光超声检测系统

脉冲激光器为 Quantel 固体 Nd:YAG 脉冲激光器, 可激励 1 064 nm 波长和 8 ns 脉冲宽度的脉冲激光并通过热弹机理在实验试块表面激发出超声波<sup>[22]</sup>。接收光纤激光器产生的激光先通过分光器分成探测激光束和参考激光束。探测激光束再经光纤进入接收探头并在试块表面探测振动信息, 携带信息光束通过光纤返回干涉仪中, 而参考激光



束直接送入干涉仪。干涉仪为双波混合干涉仪,对接收的信号光束和参考激光束进行解调处理,获取试块表面带有振动信息的光电流信号。采样信号使用带宽 125 MHz 数据采集卡拾取并保存。

#### 4.2 实验试块与实验方案

实验试块为铝合金增材制件试块,以直径 $\varnothing 1.2$  mm 的 ER2319 焊丝为原材料,通过增材制造加工得到。使用实验试块表面人工预置凹槽来模拟裂纹。图 4 为实验试块裂纹示意图。图中,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。

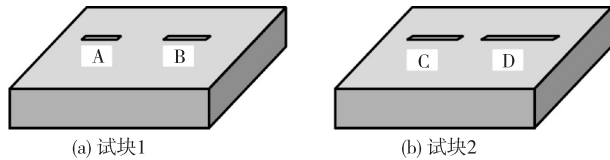


图 4 实验试块裂纹示意图

图 5 为实验方案。研究铝合金增材制件表面裂纹的激光超声信号特性,以裂纹尺寸为 5 mm $\times$ 0.1 mm $\times$ 0.2 mm(对应图 4 的表面裂纹 A)为例,采用脉冲回波法(即激励点和接收点在裂纹缺陷的同一侧)获取超声波信号。激光超声中的表面波在传播过程中碰到裂纹会反射,系统中接收探头会探测到反射回波信号。通常认为可检缺陷大小  $d$  为超声波波长  $\lambda$  的 1/2,即  $d \geq \lambda/2$ 。激光脉宽和激励的超声波频率存在反比关系<sup>[23]</sup>,即

$$f_{\max} = \frac{0.1874}{n} \quad (14)$$

式中: $f_{\max}$  为激励的超声波最高频率; $n$  为激光脉宽。根据波速  $v$ 、波长  $\lambda$ 、频率  $f$  的关系式  $v = \lambda f$ ,可得  $f \geq v/(2d)$ 。为了实现金属增材铝的 0.2 mm 裂纹深度的激光超声表面波检出,计算得到  $f_{\max} \geq 7.1$  MHz,对应的激光脉宽需  $\leq 26$  ns。采用的激光超声检测系统,其脉宽为 8 ns,能为检出更小缺陷提供硬件保障。实验方案中的参数如表 3 所示。

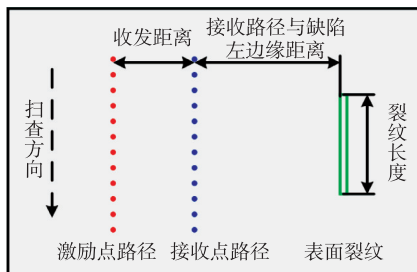


图 5 实验方案

表 3 实验主要参数

参数类别	名称	参数值
激光参数	激励激光能量值/mJ	42.3
	激励激光波长/nm	1 064
	激励激光的频率/Hz	20
	接收激光功率值/W	0.5
采样参数	激励与接收距离/mm	12.5
	采样点数/个	1 500
	采样频率/MHz	125
扫查参数	扫查步长/mm	0.1
	扫查距离/mm	15
	扫查点数/个	150
	接收点路径与缺陷左边缘距离/mm	8

获取激光超声信号中携带裂纹信息的表面波回波 A 扫实验信号(见图 6(a)),对其处理得到时频谱图,如图 6(b)所示。由图 6(a)可知,激光超声信号具有多模态和波形复杂的特性,可以产生表面波、横波、纵波及各种转换波的模式。由图 6(b)可知,表面波模式主要频带分布在 1.5~2.5 MHz 区域,横波模式主要频带分布在 2.5~5.0 MHz 区域,而频带分布在 5 MHz 以上的主要是纵波以及各种模式转换波。因此,激光激发出的超声波信号中的各个模式呈现不同的频带分布,具有较明显的区分特点,可以作为激光超声信号分解和提取表面波模式的依据。

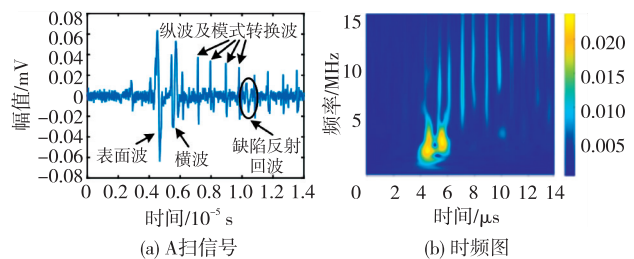


图 6 实验信号

#### 4.3 EWT 对激光超声信号的分解

结合激光超声信号中各模式波形具有的不同频率分布特点,EWT 利用激光超声信号的频域特点将原始信号分解成一组中心频率不同的经验小波模式分量,其中包含表征表面波和横波的经验小波分量。采用多分辨率分析(MRA)表示不同模式分量。在未设置分解信号层数  $K$  时,EWT 对激光超声信号进行分解,得到实验信号的时域和频域分

量图如图 7 所示。由图可见,EWT 自适应分解信号有 3 个模态分量。其中 MRA3 主要表征表面波特性,其中心频率为 1.75 MHz,且能量主要集中在 0~2.5 MHz,与激光超声中表面波的频率一致。MRA2 主要表征横波特性,MRA1 则包含了纵波和 高频噪声信息。

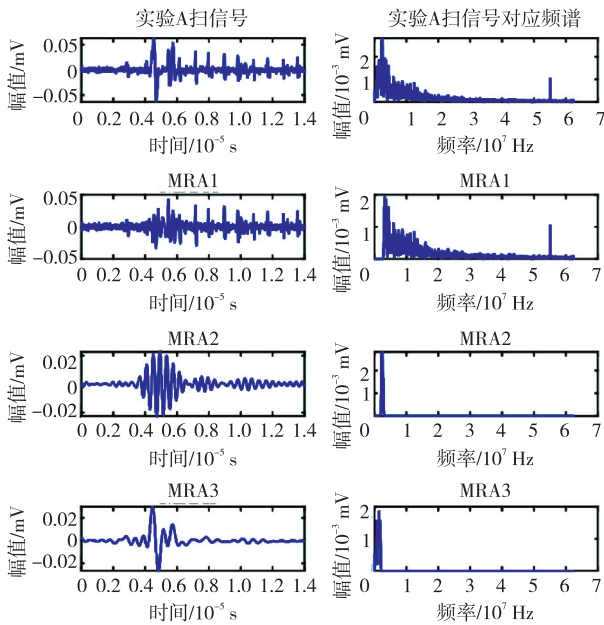


图 7 实验 A 扫信号的 EWT 自适应分解时域与频域图

设置  $K = 4$ , 观察得到时域和频域图如图 8 所示。

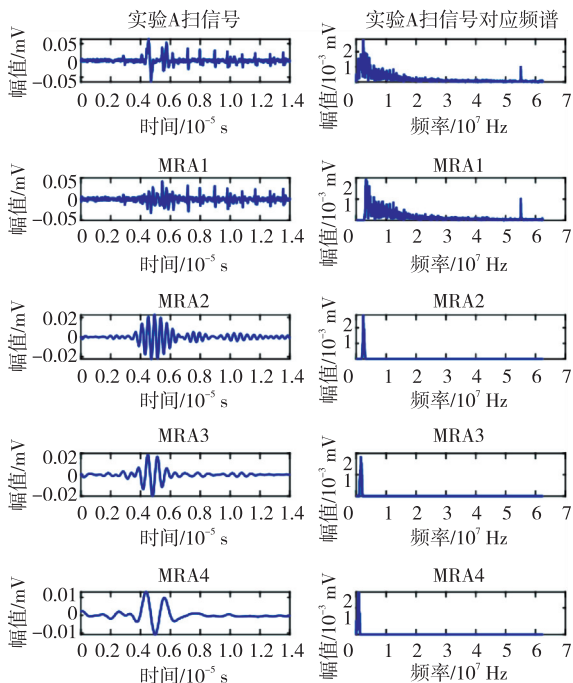


图 8 实验 A 扫信号的 EWT 分解层数  $K=4$  的时域与频域图

由图 8 可见,当  $K=4$  时,激光超声中表面波被过分分解,无法对表面波特性进行表征。因此,在满足不欠分解也过度分解的原则下,EWT 分解信号为 3 层时的情况为最优选择,可同时获取表面波和横波模态的表征特性并有效提高信噪比。

### 5 EWT 在表面裂纹长度定量识别中的应用

在激光超声表面裂纹定量识别中,采用脉冲回波法获取裂纹处发生反射现象的激光超声信号中的表面波回波。使用 EWT 对获取的超声波信号进行分解并提取表面波模态,携带裂纹信息特征的表面波回波在时域上的信号幅值有明显的相对变化,与无裂纹信息特征的信号有着较高的区分度。通过信号幅值变化判断裂纹的存在和表面裂纹的起始、结束位置,推算表面裂纹长度,达到定量识别的目的。从原始信号 B 扫图中获取裂纹长度,通过观察裂纹区域幅值颜色深浅判断裂纹大小,由于通过肉眼观察会产生较大误差,所以提出了经验小波变换分解激光超声信号,并提取表面波的缺陷回波特征值方法,精确地获取了裂纹的起始和结束位置。利用裂纹尺寸为  $5 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$  (对应图 4 中裂纹 A 尺寸) 的试块进行实验,对裂纹长度进行定量识别。

对实验试块的裂纹是否存在进行计算判断。将获取的 150 组实验原始信号绘制成 B 扫图,如图 9 所示。

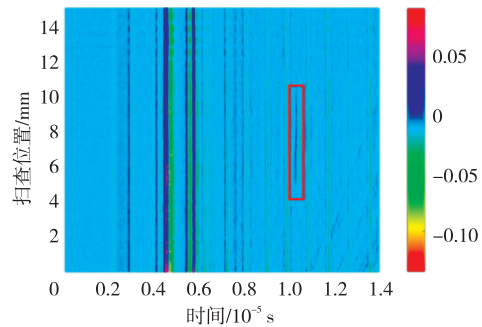


图 9 裂纹长度 5 mm 的 B 扫图

由图 9 可见,在约  $10.3 \mu\text{s}$  处存在一段裂纹,使用飞行时间法可对裂纹进行定位判断。实验方案中,激光激励点与接收点之间距离为  $12.5 \text{ mm}$ ,表面波波速  $v_R$  约为  $2840 \text{ m/s}$ ,假设激励点路径与裂纹之间的距离为  $L$ ,则根据

$$t = \frac{2L - 12.5}{v_R} \tag{15}$$

求得  $L = 20.88 \text{ mm}$ 。判断裂纹距离激励点路径

20.88 mm 处的位置,与实验方案中两者间相距 20.5 mm 进行对比,计算结果的相对误差为 1.85%,由此可证实表面裂纹存在性和对其定位准确性。

获取并记录裂纹的起始、结束位置,计算出裂纹长度。在 150 组实验信号中选取两组原始 A 扫信号,一组是裂纹区域,另一组是无裂纹区域,两组的对比结果如图 10(a) 所示。将这两组信号进行 EWT 分解并提取表面波模态,有无裂纹的表面波模态对比图如图 10(b) 所示。由图可观察到 10.1~10.5  $\mu\text{s}$  (即图中两条竖虚线范围内) 处原始信号和表面波模态的裂纹回波幅值变化。经 EWT 处理后的原始信号信噪比得到提高,且 EWT 分离出的表面波模态 MRA3 在有无裂纹回波的时域范围内信号幅值有显著区别。因此,以裂纹回波的幅值变化作为依据,可对裂纹长度进行量化表征。

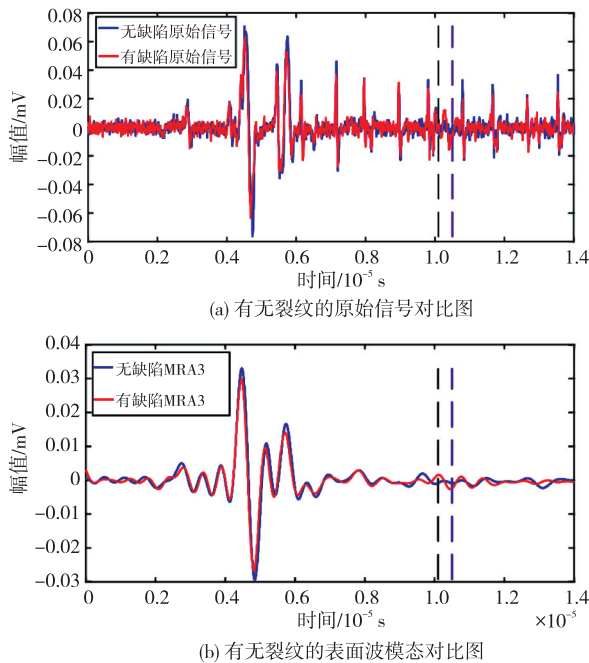


图 10 有无裂纹的信号对比图

假设 EWT 处理后的有裂纹回波信号的表面波模态在 10.1~10.5  $\mu\text{s}$  内的波峰和波谷数值分别记为  $A_1$  和  $-A_2$ ,若在这段时间内信号存在噪声  $N(t)$  并服从于高斯分布,其信号峰值可表示为  $A_n$ 。回波峰值  $V_p$  为

$$V_p = A_1 + A_n \quad (16)$$

回波的波峰与波谷差值即为回波的峰-峰值  $V_{pp}$ :

$$\begin{aligned} V_{pp} &= A_1 - (-A_2) + A_n \\ &= A_1 + A_2 + A_n \end{aligned} \quad (17)$$

由式(16)、(17)可知, $V_{pp}$  对噪声具有鲁棒性,

不易受到局部峰值的影响,因此,采用  $V_{pp}$  能更好地反映信号的裂纹回波特征,进而更精确地获取裂纹的起始、结束位置。

对实验方案中 150 组实验信号进行批量 EWT 分解处理,并获取信号中的表面波模态。记录表面波模态分量的缺陷回波在 10.1~10.5  $\mu\text{s}$  的  $V_{pp}$  数值。在记录的时间范围内,若从一个扫查位置到下一个扫查位置的回波  $V_{pp}$  突然有较大幅度上升,说明表面波在下一个扫查位置与表面裂纹发生反射,且反射回波信号能被系统中的接收探头检测,故裂纹长度可映射为扫查位置间的距离。根据每个扫查位置(SP)绘制未使用 EWT 处理的原始信号和经过 EWT 提取得到的表面波信号各自的波峰与波谷差值( $V_{pp}$ )图,EWT 对信号处理前后效果对比如图 11 所示。图中,扫查位置由扫查点数与扫查步长 (0.1 mm) 的乘积得到。

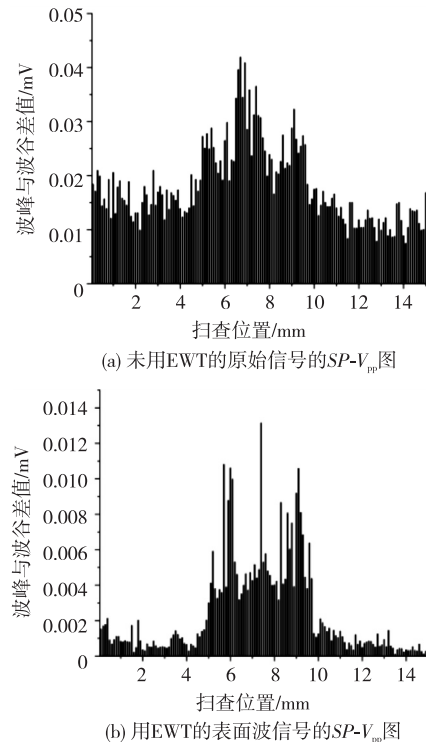


图 11 有无使用 EWT 处理的裂纹长度 5 mm 的  $SP-V_{pp}$  图

由图 11 可见,未使用 EWT 处理的原始信号无法准确获取裂纹位置信息,而使用 EWT 处理后得到的表面波回波  $V_{pp}$  能更好地观察到数据变化的比例。同时将其余裂纹长度分别为 10 mm、15 mm 和 20 mm (对应图 4 的裂纹尺寸编号 B、C、D) 的试块应用 EWT 处理并提取表面波模态,同样绘制每组实验信号中原始信号和表面波信号的  $SP-V_{pp}$  图,

如图 12-14 所示。由图 12-14 可知,EWT 分解并提取得到的表面波模态  $SP-V_{pp}$  图的信噪比高,数值变化比例能更好地确定裂纹起始和结束位置,提高了检测精度。

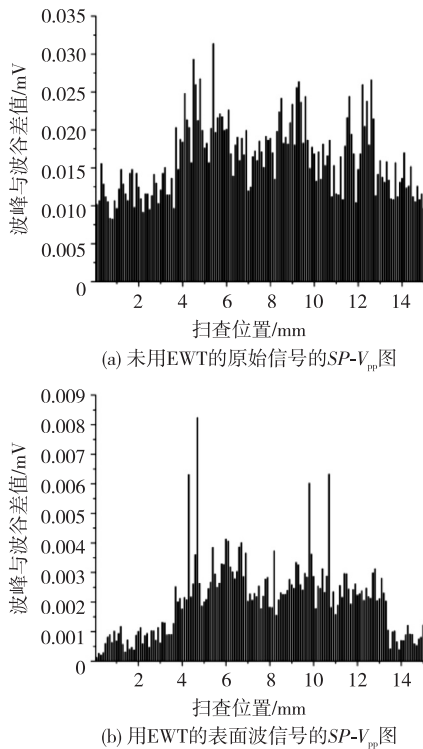


图 12 有无使用 EWT 处理的裂纹长度 10 mm 的  $SP-V_{pp}$  图

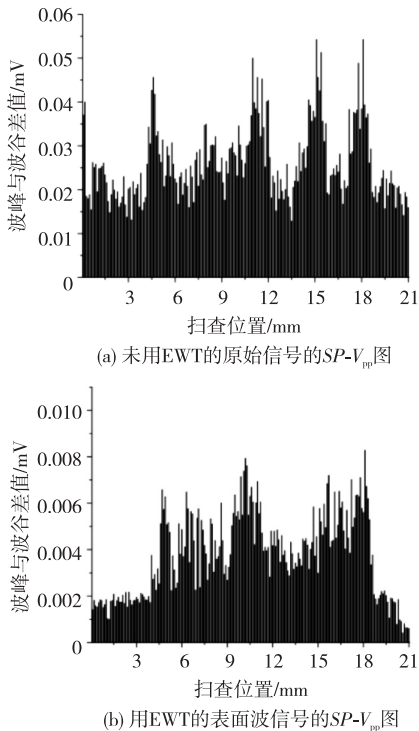


图 13 有无使用 EWT 处理的裂纹长度 15 mm 的  $SP-V_{pp}$  图

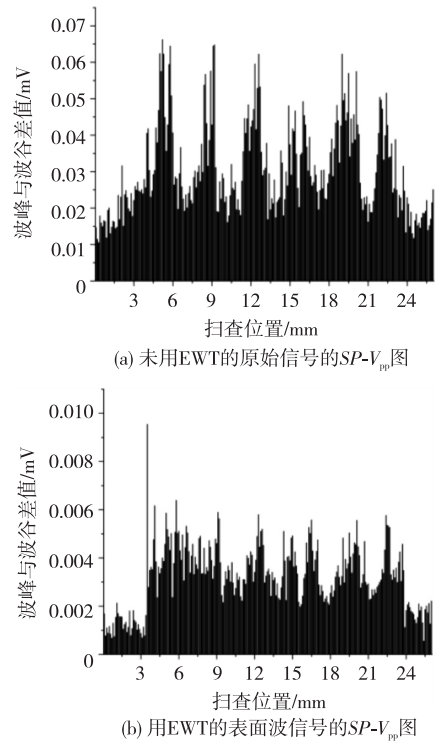


图 14 有无使用 EWT 处理的裂纹长度 20 mm 的  $SP-V_{pp}$  图

为了对比裂纹长度的识别效果,绘制裂纹长度 5 mm 的原始信号 B 扫图,并与采用 EWT 处理后得到的表面波信号  $SP-V_{pp}$  图进行对比,如图 15 所示。由图 15(a)可见,获取裂纹长度为 4.5 mm,而真实裂纹长度为 5 mm,绝对误差为 0.5 mm,相对误差为 10%。由图 15(b)可见,在 SP 为 5.0 mm 时, $V_{pp}$  的比例突然提高,这说明表面波在 SP 为 5 mm 处与表面裂纹作用并发生反射现象,系统中接收探头检测到反射回波信号,在 SP 为 5.0 mm 处的  $V_{pp}$  比前一个 SP 的  $V_{pp}$  提高了 48.18%,且后面邻近的多个位置的  $V_{pp}$  均比 SP 为 5.0 mm 之前的数值大,故认为 SP 为 5.0 mm 处是裂纹的起始位置。在 SP 为 9.7 mm 后, $V_{pp}$  数值比例陡然下降。这说明表面波在 SP 为 9.7 mm 之后时与表面裂纹无作用且未发生反射现象。在 SP 为 9.7 mm 处之后, $V_{pp}$  有 70.62% 的下降比例,后续  $V_{pp}$  数值与 SP 为 5.0 mm 之前的数值基本保持在一定水平范围,故认为 SP 为 9.7 mm 处是裂纹的结束位置。当裂纹回波反射点在裂纹区域内,回波的  $V_{pp}$  数值均处于较高范围。此时计算得到表面裂纹长度  $l_1 = 9.7 - 5.0 = 4.7$  mm,将计算值与裂纹的真实值 5 mm 进行对比,其绝对误差和相对误差分别为 0.3 mm 和 6%。对于其他裂纹长度(10 mm、15 mm 和 20 mm)的实验



试块获取的原始信号均采用上述方法处理,得到各个裂纹长度的原始信号 B 扫图和经 EWT 处理后得到的表面波信号的  $SP-V_{pp}$  图,如图 16-18 所示。

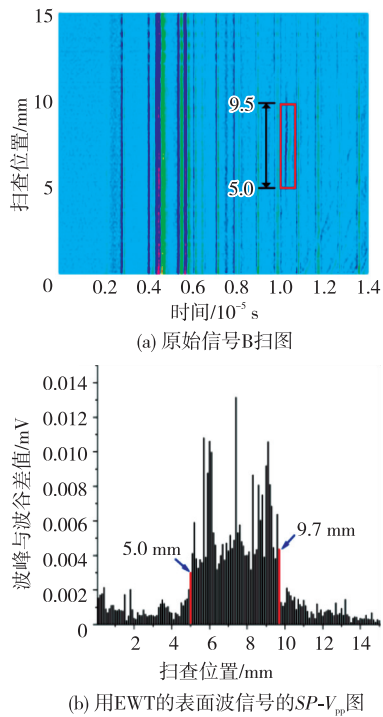


图 15 裂纹长度 5 mm 原始信号 B 扫图和 EWT 处理后  $SP-V_{pp}$  图

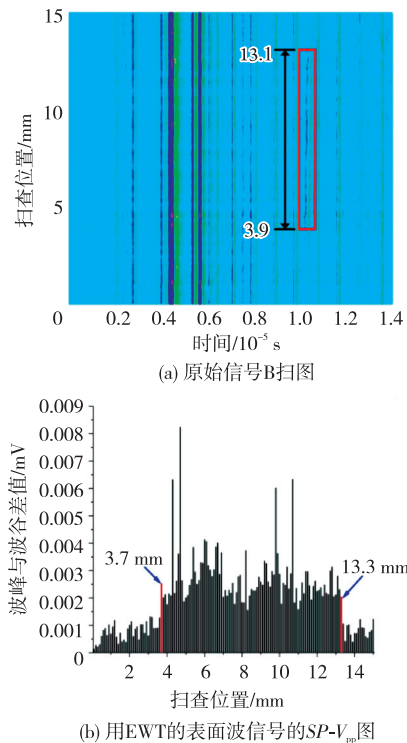


图 16 裂纹长度 10 mm 原始信号 B 扫图和 EWT 处理后  $SP-V_{pp}$  图

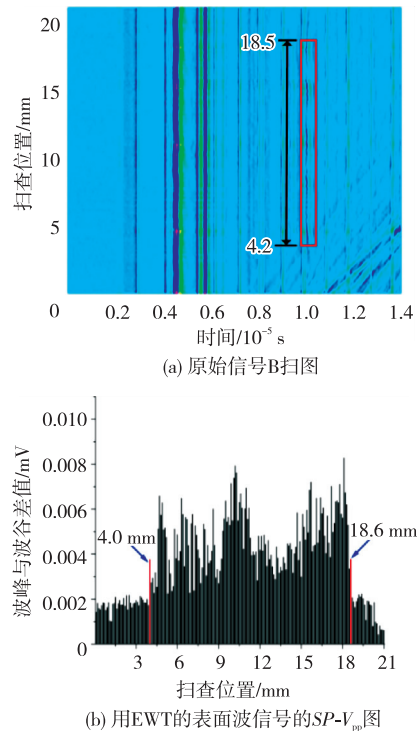


图 17 裂纹长度 15 mm 原始信号 B 扫图和 EWT 处理后  $SP-V_{pp}$  图

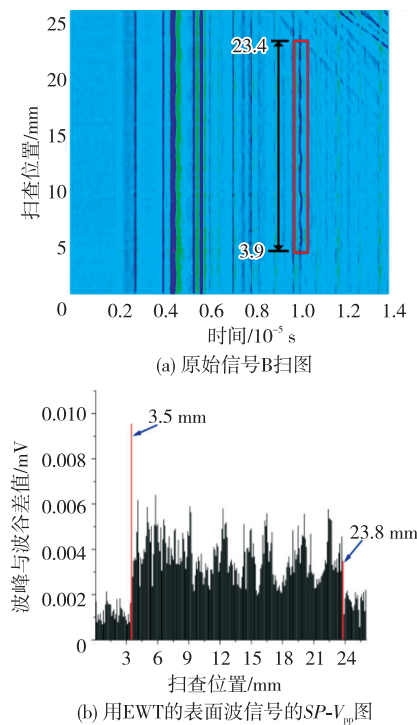


图 18 裂纹长度 20 mm 原始信号 B 扫图和 EWT 处理后  $SP-V_{pp}$  图

由图 16 (a) 可见,裂纹长度为 9.2 mm。由图 16 (b) 可知,在 SP 为 3.7 mm 处的  $V_{pp}$  提升比例为 97.72%,且后面邻近的多个位置的  $V_{pp}$  都比 SP

为 3.7 mm 之前的数值大,故认为 SP 为 3.7 mm 处是裂纹的起始位置。在 SP 为 13.3 mm 之后的  $V_{pp}$  下降比例为 48.36%,后续的数值与 SP 为 3.7 mm 之前的数值基本保持在一定水平范围,故认为 SP 为 13.3 mm 处是裂纹的结束位置。因此,计算得到表面裂纹长度  $l_2 = 13.3 - 3.7 = 9.6$  mm,将计算值与裂纹的真实值 10 mm 进行对比,其绝对误差和相对误差分别为 0.4 mm 和 4%。

由图 17(a)可见,裂纹长度为 14.3 mm。由图 17(b)可知,在 SP 为 4.0 mm 处的  $V_{pp}$  提升比例为 118.09%,且后面邻近的多个位置的  $V_{pp}$  都比 SP 为 4.0 mm 之前的数值大,故认为 SP 为 4.0 mm 处是裂纹的起始位置。在 SP 为 18.6 mm 之后的  $V_{pp}$  下降比例为 45.12%,且后续的数值与 SP 为 4.0 mm 之前的数值基本保持一定水平范围,故认为 SP 为 18.6 mm 处是裂纹的结束位置。因此,计算得到表面裂纹长度  $l_3 = 18.6 - 4.0 = 14.6$  mm,将计算值与裂纹的真实值 15 mm 进行对比,其绝对误差和相对误差分别为 0.4 mm 和 2.67%。

由图 18(a)可见,裂纹长度为 19.5 mm。由图 18(b)可知,在 SP 为 3.5 mm 处的  $V_{pp}$  提升比例为 487.81%,且后面邻近的多个位置的  $V_{pp}$  都比 SP 为 3.5 mm 之前的数值大,故认为 SP 为 3.5 mm 处是裂纹的起始位置。在 SP 为 23.8 mm 之后的  $V_{pp}$  下降比例为 67.71%,且后续的数值与 SP 为 3.5 mm 之前的数值基本保持在一定水平范围,故认为 SP 为 23.8 mm 处是裂纹的结束位置。因此,计算得到表面裂纹长度  $l_4 = 23.8 - 3.5 = 20.3$  mm,将计算值与裂纹的真实值 20 mm 进行对比,其绝对误差和相对误差分别为 0.3 mm 和 1.50%。

此方法对裂纹长度定量识别的结果如表 4 所示。

表 4 金属增材制件表面裂纹定量识别结果

识别方法	真实长度/ 识别长度/		绝对误差/ 相对误差/	
	mm	mm	mm	%
原始信号 B 扫图	5	4.5	0.5	10.00
	10	9.2	0.8	8.00
	15	14.3	0.7	4.67
本文方法	20	19.5	0.5	2.50
	5	4.7	0.3	6.00
	10	9.6	0.4	4.00
	15	14.6	0.4	2.67
	20	20.3	0.3	1.50

由表 4 可见,本文方法具有更小的检测误差,且提高了检测精度。

## 6 结束语

针对激光超声检测技术检测金属增材制件表面裂纹时,激光激励的超声波信号具有多模态、波形较复杂和信噪比低等特点,提出了利用 EWT 将激光超声信号分离为不同序列的正交经验小波分量来表征不同的激光超声模态。激光超声信号中多个模态波形在频域上存在差异性,以此为依据解决了激光超声信号的多模态分解并有效提取表面波模态的问题。实验方案中获取的表面波模态的频率、裂纹反射回波时间范围和回波的波峰与波谷差值等信息为定量表征表面裂纹大小提供了可行依据。

实验中利用经验小波变换分解激光超声信号,并使用表面波缺陷回波的波峰与波谷差值技术进行金属增材制件表面裂纹定量识别。对于多组信号进行批量 EWT 分解并记录表面回波的波峰与波谷差值数据,绘制原始信号和经 EWT 提取得到的表面波信号的  $SP-V_{pp}$  图并进行对比。结果表明,后者能更好地确定裂纹的起始和结束位置。相比原始信号 B 扫图获取裂纹长度,该方法提高了识别精度且定量识别裂纹长度的绝对误差不超过 0.4 mm,相对误差不超过 6%,这为激光超声应用于增材制造过程中的缺陷检测提供了理论基础和分析工具。

## 参考文献:

- [1] 王磊,卢秉恒.我国增材制造技术与产业发展研究[J].中国工程科学,2022,24(4):202-211.  
WANG Lei, LU Bingheng. Research on additive manufacturing technology and industrial development in China[J]. Engineering Science, 2022, 24(4): 202-211.
- [2] CITARELLA R, GIANNELLA V. Additive manufacturing in industry[J]. Applied Sciences, 2021, 11(2): 840.
- [3] BHUSHAN B, CASPERS M. An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication[J]. Microsystem Technologies, 2017, 23: 1117-1124.
- [4] ZHAO C, PARAB N D, LI X, et al. Critical instability at moving keyhole tip generates porosity in laser melting[J]. Science, 2020, 370(6520): 1080-1086.
- [5] YIN Yan, ZHANG Yuan, DONG Kaiji, et al. The development of 3D printing technology and the current situation of controlling defects in SLM technology[J]. China Welding, 2020, 29(3): 9-19.
- [6] 帅三三,刘伟,王江,等.无损检测在增材制造技术中的

- 应用研究进展[J]. 科技导报, 2020, 38(2): 26-34.
- SHUAI Sansan, LIU Wei, WANG Jiang, et al. Application of non-destructive testing in additive manufacturing[J]. Science and Technology Review, 2020, 38(2): 26-34.
- [7] 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 Zhenggan, SUN Guangkai. Research and application progress of advanced ultrasonic detection technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(22): 1-10.
- [8] CERNIGLIA D, MONTINARO N. Defect detection in additively manufactured components: laser ultrasound and laser thermography comparison[J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 8: 154-162.
- [9] 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 Weitao, WANG Haitao, JIANG Yi, et al. Research on internal defect detection method of rail head based on laser ultrasonic body wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 221-229.
- [10] FENG W, ZHOU X, ZENG X, et al. Ultrasonic flaw echo enhancement based on empirical mode decomposition[J]. Sensors, 2019, 19(2): 236.
- [11] 张彦杰, 莫海峰, 于程豪, 等. 弧形表面缺陷的激光超声检测方法研究[J]. 应用激光, 2023, 43(2): 107-115.
- ZHANG Yanjie, MO Haifeng, YU Chenghao, et al. Research on laser ultrasonic detection of curved surface defects[J]. Applied Laser, 2023, 43(2): 107-115.
- [12] 杨孟. 超声无损检测算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- YANG Meng. Research on ultrasonic nondestructive testing algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [13] 张兴舜. 激光超声检测金属表面缺陷的信号处理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- ZHANG Xingshun. Study on signal processing of laser ultrasonic detection of metal surface defects[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [14] 韩峰, 王春梅, 寇兴, 等. 金属表面裂纹脉冲压缩增强型激光超声检测方法研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(5): 160-165.
- HAN Feng, WANG Chunmei, KOU Xing, et al. A pulsed compression enhanced laser ultrasonic detection method for metal surface cracks[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(5): 160-165.
- [15] HONG Xiaobin, HUANG Liuwei, LIUFU Yonghong, et al. Laser ultrasonic scanning for detection of damage in copper pipelines using blind compressive sensing and the adjacent area difference coefficient[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(6): 065202.
- [16] 颜江涛, 赵纪元, 訾艳阳, 等. 激光超声信号变分模态分解与裂纹定量检测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 223-230.
- YAN Jiangtao, ZHAO Jiyuan, ZI Yanyang, et al. Variational mode decomposition and quantitative crack detection of laser ultrasonic signal[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 223-230.
- [17] 罗朝莉, 朱冰, 王波, 等. 铝板表面裂纹的激光超声检测与信号处理研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10): 41-52.
- LUO Chaoli, ZHU Bing, WANG Bo, et al. Laser ultrasonic detection and signal processing of aluminum plate surface crack[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2023, 37(10): 41-52.
- [18] MAO X, YANG Q, WANG X, et al. Application of variational mode decomposition and whale optimization algorithm to laser ultrasonic signal denoising[J]. Sensors, 2022, 23(1): 354.
- [19] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.
- [20] 蔡笑风, 刘继方, 李永峰, 等. 基于经验小波变换的干耦合超声检测 Lamb 波信号分析[J]. 中国测试, 2019, 45(1): 139-144.
- CAI Xiaofeng, LIU Jifang, LI Yongfeng, et al. Analysis of Lamb wave signal by dry coupling ultrasonic detection based on empirical wavelet transform[J]. China Journal of Testing and Measurement, 2019, 45(1): 139-144.
- [21] 李力, 刘佳鹏, 魏伟. 基于经验小波变换的煤岩界面识别超声回波处理方法研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S1): 370-377.
- LI Li, LIU Jiapeng, WEI Wei. Research on ultrasonic echo processing method of coal-rock interface recognition based on empirical wavelet transform[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 370-377.
- [22] 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 Ping, AI Lin, QIU Ziyang, et al. Research progress of laser ultrasonic nondestructive testing for metal additive manufacturing components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(14): 297-308.
- [23] 沈中华, 袁玲, 张宏超, 等. 固体中的激光超声[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015: 2-3.