

激光与光电子学进展

激光熔覆涂层弹性模量的激光超声表征方法

柴延伟^{1,2}, 邹云^{1,2}, 刘书豪^{1,2}, 王栋^{1,2}, 李阳^{1,2*}

¹郑州大学机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001;

²抗疲劳制造技术河南省工程研究室, 河南 郑州 450001

摘要 为了表征激光熔覆涂层的弹性模量, 提出了一种基于激光超声表面波技术的无损表征方法。首先, 建立了表面波在涂层-基体两层结构中传播的理论模型, 通过理论求解表面波的波动方程, 得到了带涂层结构的表面波理论频散曲线。其次, 通过激光超声设备在激光熔覆涂层不同区域采集表面波信号, 并利用二维傅里叶变换得到了表面波的实验频散曲线。为了求解表面波传播的逆问题, 得到涂层的弹性模量, 采用非线性回归方法, 通过最小化实验频散曲线与理论频散曲线之间的差异, 确定了涂层不同区域的弹性模量。根据涂层上不同区域弹性模量的差异, 可反映出激光熔覆涂层组织的不均匀性。利用激光超声表面波技术评价激光熔覆涂层的弹性模量, 具有一定的工程应用价值, 可为改善激光熔覆工艺提供技术保障。

关键词 激光光学; 激光超声; 激光熔覆涂层; 表面波; 弹性模量; 均匀性

中图分类号 TB551; TG115.5

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0114014

Characterization of Elastic Modulus of Laser Cladding Coatings Using Laser Ultrasonic Method

Chai Yanwei^{1,2}, Zou Yun^{1,2}, Liu Shuhao^{1,2}, Wang Dong^{1,2}, Li Yang^{1,2*}

¹School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

²Henan Provincial Engineering Laboratory for Anti-Fatigue Manufacturing Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract To characterize the elastic modulus of laser cladding coating, a nondestructive evaluation method based on laser ultrasonic surface wave is proposed. First, we establish a theoretical model of surface wave propagation in two-layer structures, namely, the coating and substrate. Then, we obtain the theoretical dispersion curves by solving the wave equation. Afterward, we excite and receive the surface wave signals on different areas of the laser cladding coating using laser ultrasonic equipment and obtain the experimental dispersion curves of the surface wave using two-dimensional Fourier transform. To solve the inverse problem of the surface wave, the elastic modulus of different coating regions is determined by minimizing the difference between theoretical and experimental dispersion curves. According to the elastic modulus on different areas of coating, we conclude that the coating material prepared using laser cladding technology is nonuniform. The laser ultrasonic surface wave method is useful for testing the elastic modulus of laser cladding coating and improving the laser cladding technology.

Key words laser optic; laser ultrasonic; laser cladding coatings; surface wave; elastic modulus; uniformity

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-04-05; 录用日期: 2021-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(51705470, 51801185)、河南省科技厅-河南省重点研发与推广专项(182102210009)、河南省教育厅-河南省高等学校重点科研项目(19A460007, 18A460032)

通信作者: *yangli@zzu.edu.cn

1 引言

激光熔覆是一种重要的材料表面改性及增材制造技术,它利用高能激光束($10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$)在金属表面辐照,通过迅速熔化粉状材料,并扩展和快速冷却凝固,在基材表面熔覆一层具有特殊物理、化学和力学性能的材料^[1],从而构成一种新的复合材料,具有基体不具备的耐腐蚀^[2]、耐磨损^[3-4]、高硬度^[5]等性能。这种方法具有加工区域狭小,热输入量低,变形量小,热影响区小等优点^[6]。因此,激光熔覆技术广泛应用于航空航天、石油化工、汽车制造关键零部件的表面处理及局部再制造与修复,不仅可降低生产成本、避免资源浪费,还可大幅提高零件的使用寿命。

目前,研究人员主要将精力集中于优化工艺参数、添加辅助场和化学元素以提高激光熔覆涂层的性能:徐瀚宗等^[7]研究了工艺参数对激光熔覆涂层中 Cr 元素的影响,发现适当提高激光功率和降低扫描速度可以使涂层中的 Cr 元素分布更均匀。Hu 等^[8]将直流电场、交变磁场和超声波场耦合起来辅助激光熔覆过程,实验结果表明在辅助场作用下制备的熔覆层组织细小,元素扩散均匀,力学性能较好。孙宁等^[9]发现在 Inconel 625 基复合涂层中添加适量的 WC-12Co 可以显著提高涂层的耐磨性能。对于当前工业领域中的表面处理技术来说,激光熔覆技术是一种十分良好的技术,但是在实际应用中,激光熔覆制备的复合材料仍存在裂纹^[10]、气孔^[11]、夹杂^[12]等方面的缺陷。另外,由于激光熔覆技术的特点,涂层是以线性扫描的方式先后熔覆在基体表面,在多道次激光搭接过程中,受热累积与热冲击等因素影响,不同道次激光熔池的传热与传质都可能会发生改变。因此,导致熔覆层形成形态、大小和方向各异的不均匀组织^[13],这对涂层材料力学性能的均匀性有较大影响。而弹性模量是表征材料力学性能的重要参数之一,与材料的显微组织有关,因此可以通过测量激光熔覆涂层不同区域的弹性模量来评估涂层材料的均匀性。

表面波是超声波在半无限大固体介质表面传播的一种形式,它只在厚度远大于其波长的物体表层传播,对物体表面性质十分敏感^[14]。表面波的传播深度约为其一个波长,在两层结构中,表面波的速度不仅和频率有关,而且受涂层和基体的性质的共同影响。低频时,表面波的波长较长,其传播主

要受到基体材料性质的影响,高频时,表面波的波长较短,其传播主要受到涂层材料性质的影响,这种对应关系可由频散曲线表示。利用不同频率的表面波可检测不同深度范围内的材料特性^[15],因此表面波可用于激光熔覆涂层性质的检测。Liu 等^[16]在激光熔覆涂层表面加工出不同深度的裂纹,通过超声实验建立了表面波信号幅值与裂纹深度的关系。Schneider 等^[17]利用超声表面波测量了硅基体上金刚石涂层和类金刚石的弹性模量、密度等特征参数。Kielczyński 等^[18]利用表面波测量了金属表面因渗氮、渗碳等工艺形成的硬化层厚度。相对于传统的利用压电换能器产生超声波的方法,激光超声技术结合了光学与超声学的知识,是超声波检测领域较为新颖的技术手段,具有非接触、检测频带宽、多模态等优点。因此选用更为先进的激光超声技术激励和接收表面波,不仅不受材料表面条件的限制,而且可以获得高质量的表面波信号。

本文通过二维傅里叶变换处理在涂层表面不同位置采集的表面波信号,得出了表面波的频散曲线,并利用频散曲线反演计算出激光熔覆涂层不同区域的弹性模量。根据同一厚度的涂层不同区域的弹性模量的差异,可以判断出熔覆层材质的均匀性。通过以上的研究,提供一种无损检测与评价激光熔覆涂层弹性模量的方法。

2 涂层结构上表面波理论频散曲线

首先建立表面波在涂层-基体两层结构中传播的理论模型^[18-19],假设涂层是各向同性且均匀的固体材料,其厚度为 h 。基体为均匀的各向同性,半无限大固体材料。以镍合金为涂层,45 钢基体为例,理论模型示意图如图 1 所示。

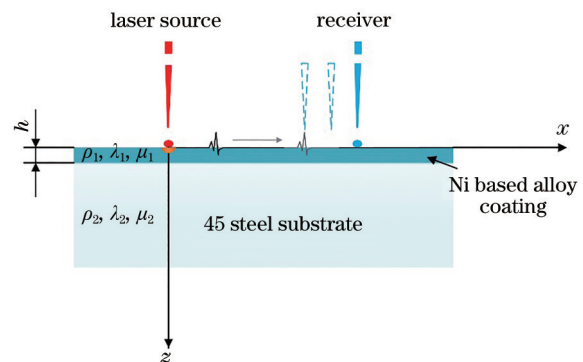


图 1 表面波在镍合金涂层 45 钢基体两层结构中传播的模型
Fig. 1 Model of surface wave propagating in a two-layer structure of 45 steel substrate coated with nickel alloy

表面波在涂层-基体两层结构中的传播满足弹性波的波动方程,将该方程表达为矢量方程,可表示为

$$\rho_a \frac{\partial^2 U_a}{\partial t^2} = \mu_a \nabla^2 U_a + (\lambda_a + \mu_a) \nabla (\nabla \cdot U_a), \quad (1)$$

式中, $a=1$ 表示涂层, $a=2$ 表示基体。 ρ 为材料的密度, λ 和 μ 为拉梅常数, ∇ 为对矢量做偏导, 是微积分中的一个微分算子。 U 为位移矢量的势函数。

与单一介质不同的是, 表面波在两层结构中传播除了满足上表面自由边界条件(上表面各方向应力为 0)外, 还需满足界面位移和应力连续边界条件(涂层与基体界面两侧各方向应力和位移相等), 可表示为

$$\sigma_{zz1} = 0, \sigma_{zx1} = 0 (z = 0), \quad (2)$$

$$\sigma_{zz1} = \sigma_{zz2}, \sigma_{zx1} = \sigma_{zx2}, u_1 = u_2, w_1 = w_2 (z = h), \quad (3)$$

式中: σ_{zz1} 和 σ_{zx1} 分别表示涂层沿 z 轴方向应力和 x 轴方向的应力; σ_{zz2} 和 σ_{zx2} 表示基体沿 z 轴方向应力和 x 轴方向的应力; u_1 和 w_1 分别表示涂层中质点在 x 轴方向应力和 z 轴方向的应力; 同理, u_2 和 w_2 分别表示基体中质点在 x 轴方向应力和 z 轴方向的应力。

求解满足边界条件的波动方程, 可以得到表面波在涂层试样中传播的频散方程, 可表示为

$$\mathbf{A}\mathbf{B} = 0, \quad (4)$$

式中, \mathbf{A} 表示系数矩阵, \mathbf{B} 表示未知参数矩阵。 为了使(4)式具有非零解, 系数矩阵的行列式值应为零, 可表示为

$$|\mathbf{A}| = 0. \quad (5)$$

将已知的涂层和基体参数(包括弹性模量、泊松比、密度和涂层厚度)带入(5)式, 对于每个给定的频率 f , 可以计算出相应的波数 k , 从而得到涂层试样中表面波的频散曲线, 如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 对于不同弹性模量的涂层, 在镍合金涂层 45 钢基体试样中, 表面波的波数随频率的增加而增加, 曲线上各点的斜率代表相速度的 $1/(2\pi)$ 倍。 此外, 低频条件下各频散曲线具有较好的重合性, 而高频时不同弹性模量的涂层对应的曲线区别度较大。 这是因为频率较低时, 表面波的传播深度较大, 主要受到 45 钢性质的影响, 而模型中变化的参数是涂层的弹性模量, 45 钢的参数并未变化, 故具有较好的重合性。 高频时, 表面波的传播深度减小, 表面波主要受到涂层参数的影响, 涂层的弹性模量不断变化, 频散曲线的离散性也就更大。

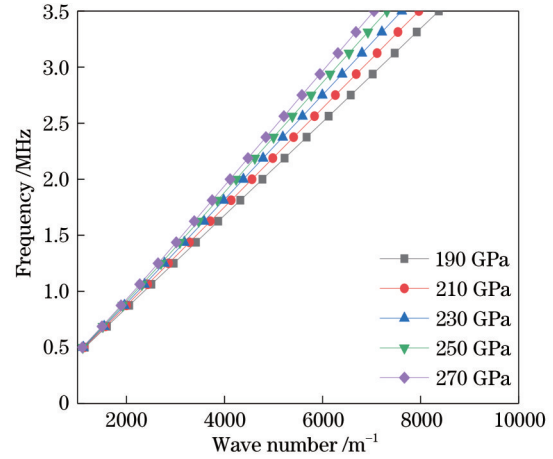


图 2 不同弹性模量的镍合金涂层上表面波的频散曲线
Fig. 2 Dispersion curves of surface wave on nickel alloy coating with different elastic modulus

3 实验与分析

3.1 试样制作

本文采用激光熔覆同步送粉法^[20-21]在 45 钢表面制备了镍基合金涂层, 其加工原理如图 3 所示。美标 625 镍基合金粉末(主要含有铬、钼、锰、铁、硅、镍等元素, 其中镍占 60% 左右)通过送粉器直接送到工件表面的激光照射区, 激光功率为 3 kW, 激光光斑直径为 3.5 mm。粉末到达熔区之前先经过激光束, 被加热后落入熔区后随即熔化, 随着激光头的移动和粉末的持续送入, 形成激光熔覆带, 经过多道次的搭接在尺寸为 55 mm × 28 mm × 10 mm 的 45 钢表面形成涂层。使用恒定流量的氩气作为保护气, 可以使熔覆粉末自身性能不受空气内氧、氮

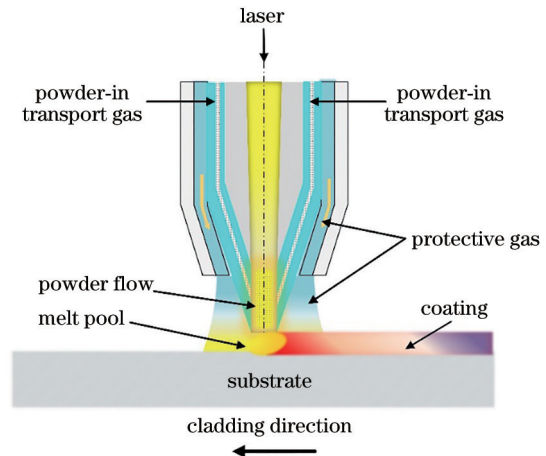


图 3 激光熔覆同步送粉技术加工原理图
Fig. 3 Diagram of laser cladding synchronous powder feeding technology

等元素的影响,实现熔覆层的良好性能。

激光熔覆加工的原始涂层的厚度大于 3 mm,表面非常粗糙。使用平面磨床对试样表面进行研磨以获得较为平整的表面和理想的涂层厚度,如图 4 所

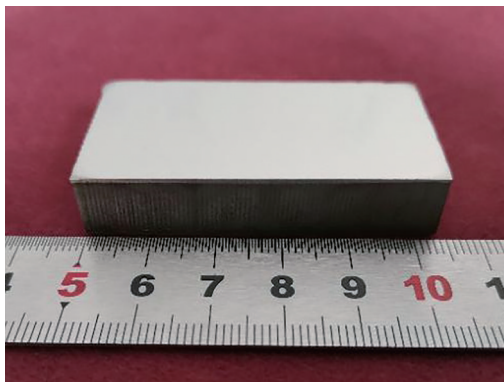


图 4 镍合金涂层 45 钢基体两层结构试样

Fig. 4 Two-layer structure specimen of 45 steel substrate with nickel alloy coating

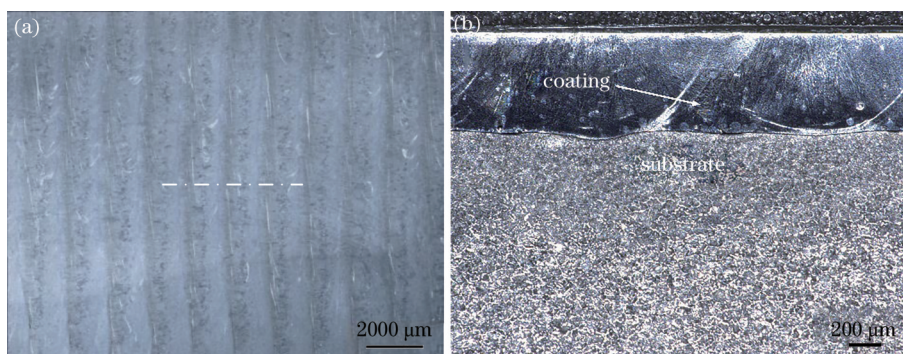


图 5 镍合金涂层金相图。(a)正面金相图;(b)侧面金相图

Fig. 5 Optical microscopy images of nickel alloy coating. (a) Front metallography diagram of the coating; (b) side metallographic diagram of the coating

从图 5(a)中可以看出,镍合金涂层表面呈现颜色深浅不一的纹路,这是因为在激光扫描过程中,受热累积与热冲击等因素影响,不同道次熔覆层的受热可能会发生改变,导致熔覆层形成形态、大小和方向各异的不均匀组织。从图 5(b)中可以看出,熔覆层的厚度比较均匀,虽然涂层与基体边界有一些凸起与凹陷,但是这些凸起与凹陷的尺寸与涂层的平均厚度相比是比较小的。通过金相法在涂层的不同位置测量 5 个点的厚度值分别为 632.3, 608.25, 640.4, 608.25, 612.37 μm , 取平均厚度 620 μm , 作为反演计算时输入的厚度,以降低厚度对反演结果的影响。

3.3 拉伸试验分析

为了保证拉伸试样有足够的厚度,利用电火花

示。这里保留有涂层厚度约为 3 mm 的原始试样,以便制作涂层的拉伸试样。

3.2 金相实验

由于激光熔覆技术的特点,涂层是以线性扫描的方式先后熔覆在基体表面,每扫描一次加工一条线性涂层。每条线性涂层与涂层之间的接缝受热并不均匀,从而导致整个涂层材料组织并不均匀。为了清晰地观测试样的表面组织状态,对镍合金涂层进行金相表征。使用 280#、400#、800#、1000#、2000#、3000#粒度的砂纸进行研磨,抛光后再用由浓硝酸和浓盐酸按比例 1:3 混匀的王水进行表面腐蚀,腐蚀时间约为 10 s。将腐蚀好的试样置于 VHX-2000 型超景深显微镜下观察镍合金涂层的金相组织,200 倍镜头下的涂层金相组织如图 5(a)所示。同样,在图 5(a)上所示的涂层表面点划线使用电火花线切割取试样的横截面,打磨、抛光、腐蚀后可获得试样截面的金相组织,如图 5(b)所示。

线切割从厚度为 3 mm 的涂层试样上将镍合金涂层整体切割下来。根据国家标准^[22],将切下的涂层加工成三个拉伸试样,具体尺寸如图 6 所示。

用砂纸对拉伸试样进行研磨以降低表面粗糙度对拉伸试验结果的影响。实验使用 250 kN 的

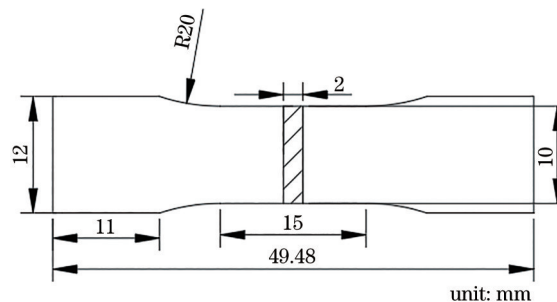


图 6 拉伸试样尺寸图

Fig. 6 Dimensional drawing of tensile samples

MTS轴向拉压疲劳机。控制方式采用位移控制,位移速率为0.9 mm/min。将三个拉伸试样编号为1, 2, 3,通过疲劳机测出拉伸试样所受的力与应变,并绘制三个试样的应力应变曲线如图7所示。随后根据曲线弹性阶段的斜率计算弹性模量,结果如表1所示。

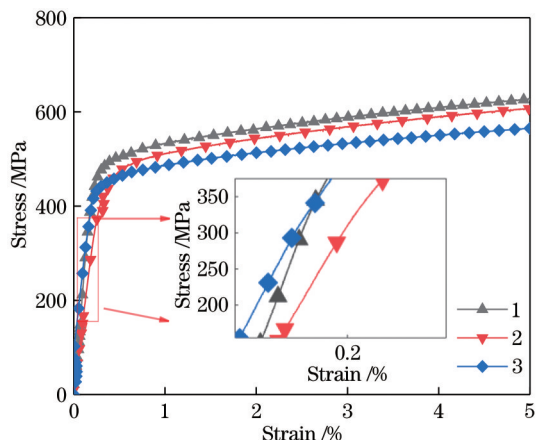


图7 拉伸试验的应力-应变关系

Fig. 7 Relationship between stress and strain of tensile test

从拉伸试验结果可以看出,镍合金涂层的力学性能尤其是弹性模量存在较大的差异,这主要是由于激光熔覆涂层在加工过程中受到多种因素的影

表1 拉伸试样的弹性模量

Table 1 Elastic modulus of tensile samples

Sample	Elastic modulus /GPa
1	220.09
2	143.20
3	159.40

响,以至于涂层的均匀性并不一致,从而导致力学性能产生较大的差异。另外,在制作拉伸试样时,由于取样位置的差别,将会造成拉伸试样有不同的力学性能。这种激光熔覆技术加工的涂层材质的不均匀性,会影响涂层的使用性能。由于破坏性的方法不再适用于已成型的涂层,所以为了能够无损地表征涂层的均匀性,提出了激光超声表面波测弹性模量的方法。

4 激光超声实验分析

4.1 激光超声检测系统

激光超声检测原理图和实验装置如图8所示,该设备主要由激光控制器、激光发射器、激光干涉仪、自动位移台、带通滤波器、PC等组成。采用WedgeHB系列的调Q的Nd:YAG脉冲激光发射器,其最大脉冲能量为2 mJ,脉冲激光的波长为1064 nm,脉冲时间宽度为2 ns,光斑直径为200 μm。

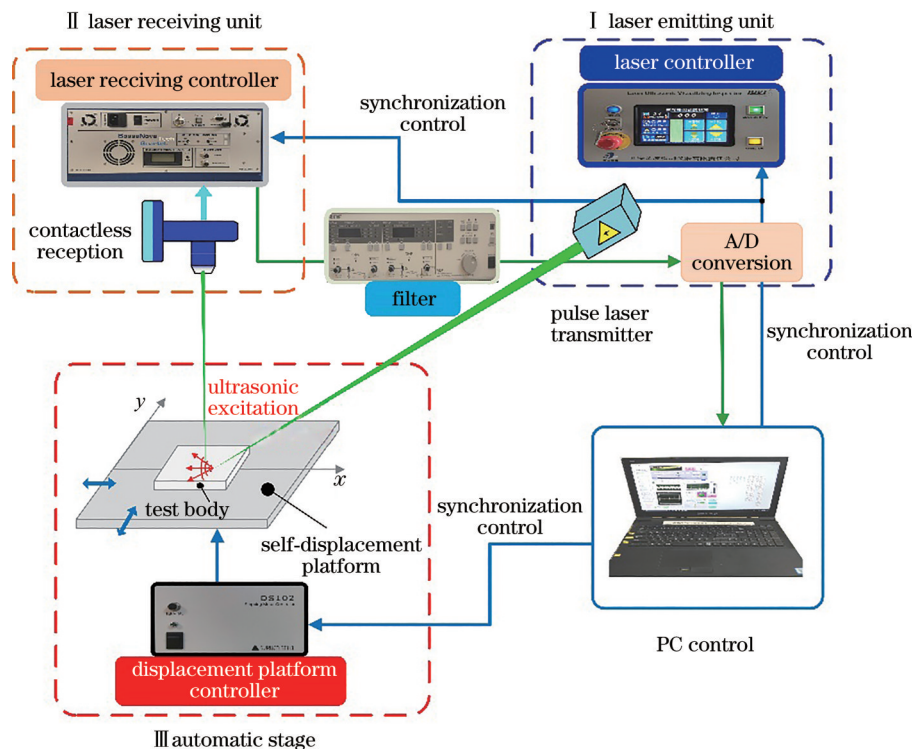


图8 激光超声检测系统

Fig. 8 Laser ultrasonic testing system

采用 Quarter-FH 系列的脉冲干涉仪接收超声波信号,干涉仪使用波长为 532 nm 的连续激光,接收的带宽为 1~20 MHz,光斑直径 100~500 μm 。自动位移台行程为 400 mm \times 400 mm,其定位精度小于 4 μm ,可在 x 和 y 方向移动。实验时,通过激光控制器控制脉冲激光发射器激发激光照射在试样表面,同步触发的干涉仪会接收超声信号并呈现在 PC 中,随后控制位移台变换不同位置以采集不同位置的超声信号。

4.2 激光超声信号采集

设置激光超声检测设备的采样频率为 625 MHz,波形长度为 4000 点。选择涂层厚度为 620 μm 的镍合金涂层试样,在涂层表面的 8 个不同区域采集信号,如图 9 所示。采集信号前需要对涂层表面进行研磨以降低粗糙度对表面波速度的影响。经过 3000# 粒度的砂纸研磨后,三维形貌仪的测量结果显示涂层粗糙度 r_{Ra} 小于 36 nm。根据参考文献[23]提出的表面粗糙度对表面波相速度的影响来看,涂层的粗糙度对表面波速度的影响非常小,基本可以忽略。调节自动位移平台使激光光斑与干涉仪焦点的初始间距为 3 mm,然后激光激励点以 0.2 mm 的间距向干涉仪远离,同时采集每个点上的数据,共采集 41 个点,采集区域的长度为 40 \times 0.2 mm=8 mm。

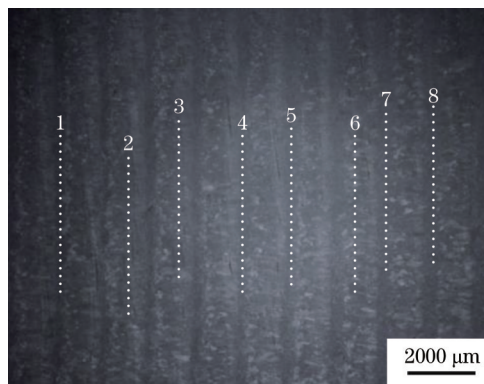


图 9 激光超声信号采集区域示意图

Fig. 9 Schematic of laser ultrasonic signal acquisition region

图 10(a)所示为 3 号信号采集区激励点与接收点的距离等于 3 mm 时的时域信号图,图 10(b)为图 10(a)中幅值较大的表面波经过 FFT 变换后的归一化频谱图。如果选取峰值的 0.5 倍及 -6 dB 的幅值作为信号的带宽,那么激光激励出的表面波的中心频率在 2.2 MHz 左右,信号的频带宽度为 1.3~3.5 MHz。在涂层试样表面不同位置接收表面波信号,利用传播距离除以传播时间可以求出表面波的传播速度约为 2797 m/s。由公式 $\lambda = c/f$ 可知表面波的传播深度超过 798 μm ,即表面波在涂层厚度 620 μm 的试样中存在频散,可以用频散曲线计算涂层的弹性模量。

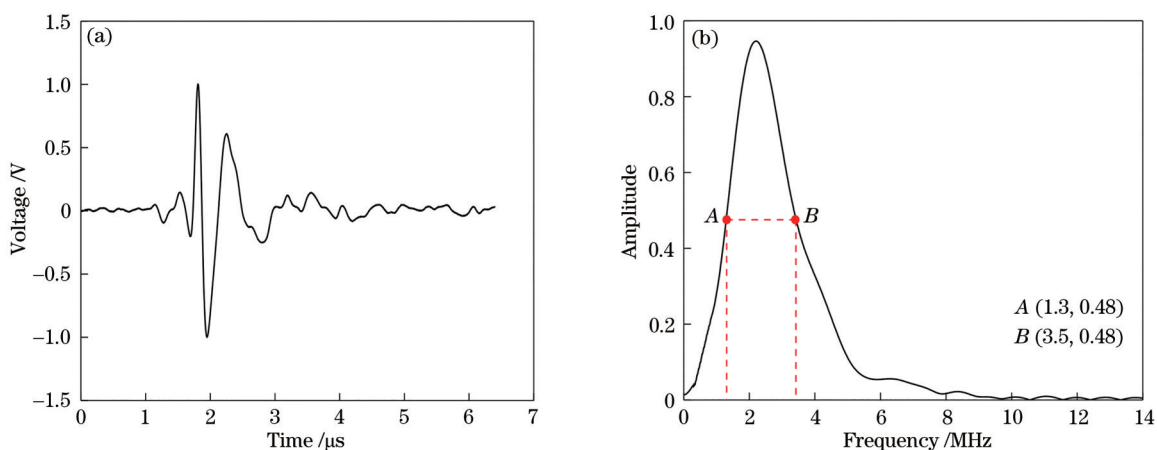


图 10 激励点与接收点间隔 3 mm 时的时域信号图和频谱图。(a)时域信号图;(b)频谱图

Fig. 10 Time domain signal diagram and spectrum of the surface at 3 mm distance between the excitation point and the receiving point. (a) Time domain signal diagram; (b) spectrum of the surface

4.3 二维傅里叶变换提取频散曲线

二维傅里叶变换(2D-FT)是指在不同位置接收到的时域信号的时间和空间傅里叶变换。转换后,空间和时间信号可以转换为波数和频域,可表示为

$$U(k, \omega) = F_{2D}[u(x, t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, t) \exp(-i\omega t) \exp(-ikx) dt dx, \quad (6)$$

式中, k 为波数, ω 为频率, t 为时间, x 为空间位置,

$u(x, t)$ 为采集的信号, $U(k, \omega)$ 是经过变换后的频率-波数谱。对试验中采集的 A 扫描信号进行二维傅里叶变换^[24], 可以得到表面波在激光熔覆涂层中传播的频散曲线。区域 3 采集的 41 组 A 扫描信号经二维傅里叶变换后, 表面波波数和频率之间关系如图 11 所示, 其中横坐标表示波数 k , 纵坐标表示频率 f 。

如图 11 所示, 表面波具有一定的频散特性。中

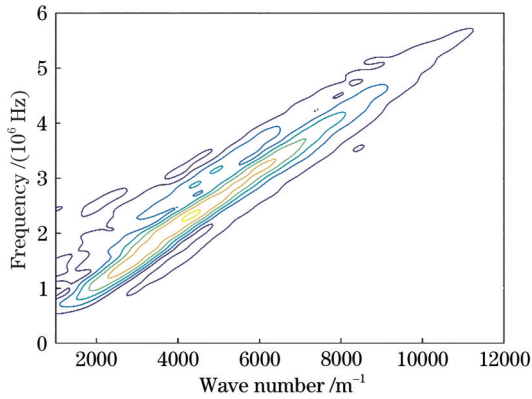


图 11 镍合金涂层 45 钢基体试样上区域 3 采集的信号经过二维傅里叶变换得到的频散关系

Fig. 11 Dispersion relation of signals collected from region 3 on nickel alloy-coated 45 steel substrate by 2D-FT

心是一条具有一定曲率的曲线, 曲线上每一点的曲率是该频率表面波相速度的 $1/(2\pi)$ 倍。等高线图表达的是表面波小范围内的频散关系。为了得到单一的表面波频散曲线, 采用了峰值搜索法。对于每一行, 频散曲线上的每一个点根据两个条件定义: 1) 峰值必须至少是该行平均值的五倍; 2) 假设在该频率区域内没有出现模式交叉, 则规定两个峰值之间的最小距离为 200 m^{-1} ^[25]。用该方法可以得到每个频率对应的单个波数 k , 得到表面波频散曲线。

由图 12 可以看出, 尽管在同一激光熔覆涂层试样上采集超声信号, 经过二维傅里叶变换提取的频散曲线呈现出较大的离散性, 而采用同样的方法在 45 钢表面不同区域重复实验, 得到的频散曲线就有较好的一致性。频散曲线不仅表示超声波波数和频率的关系, 而且与材料的弹性模量、密度、泊松比等参数有关, 镍合金涂层 45 钢基体两层结构的频散曲线呈现出的差异性表明了该结构表面材料的不均匀性。并且从 8 条频散曲线中可以看出, 区域 1, 4, 5, 7, 8 得到的频散曲线较为接近, 区域 2, 3, 6 得到的频散曲线较为接近。这是由于区域 1, 4, 5, 7, 8 都在两道次的交接处, 而区域 2, 3, 6 都在每道次的中心区域, 采样区域的位置影响了频散曲线的分布。

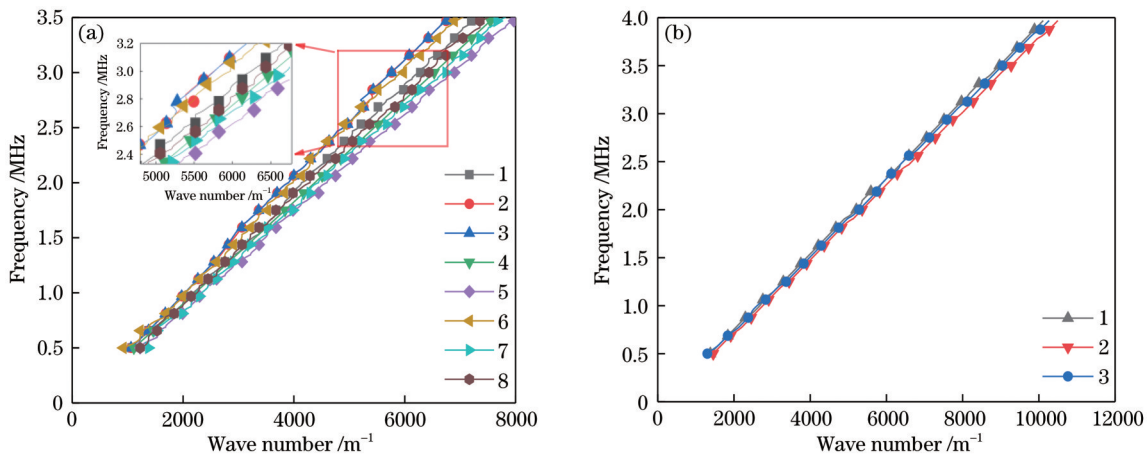


图 12 经二维傅里叶变换的不同区域信号的频散曲线。(a) 镍合金涂层上 1~8 号区域的表面波频散曲线; (b) 45 钢上 3 个区域的表面波频散曲线

Fig. 12 Dispersion curves of different regions by 2D-FT. (a) Dispersion curves of surface wave on regions 1-8 of nickel alloy coating; (b) dispersion curves of surface wave on three regions of 45 steel

4.4 非线性回归

求解出表面波频散的逆问题, 就可以得到涂层的弹性模量。采用非线性回归方法, 从测量的表面波波数数据中, 推导出涂层的弹性模量。非线性回归主要是求出不同弹性模量下, 测量得到的频散曲线与理论频散曲线差值的平方和的最小值, 可表

示为

$$\sum_i [k(f_i) - k(f_i, h, E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, \rho_1, \rho_2)]^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

式中, 第一项为实验测得的表面波波数的数据集, 第二项为直接求解表面波频散方程得到的数据集^[26]。

采用穷举法将不同弹性模量值代入频散方程,求解不同频率下表面波的波数,并与二维傅里叶变换测得的波数值进行比较。当不同频率下计算值与实测值之差的平方和最小时,停止程序,认为此时的弹性模量就是涂层的弹性模量。计算流程如图 13 所示。

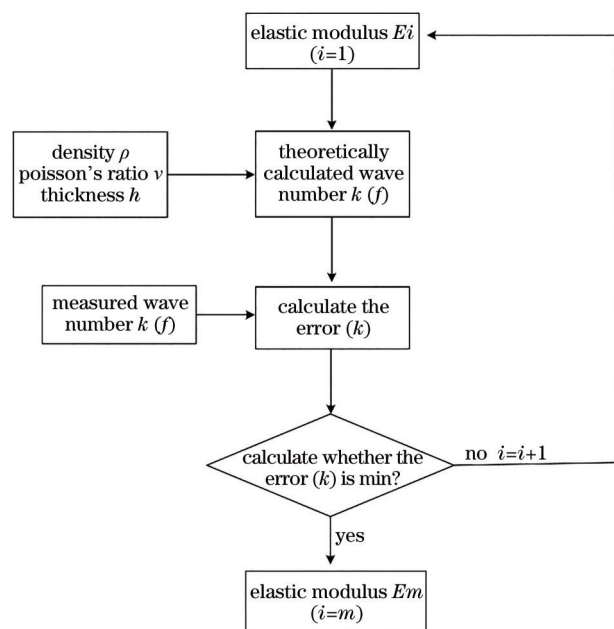


图 13 涂层弹性模量的逆问题求解流程图

Fig. 13 Flowchart for solving the inverse problem of elastic modulus of coating

图 14 为从区域 3 采集的 A 扫描信号经二维傅里叶变换后的表面波波数、频率和振幅之间关系的频散曲线图,其中横坐标表示波数 k ,纵坐标表示频率 f 。图例中带*号的数字表示区域 3 根据频散方程推导出的理论频散曲线,不带*号的数字表示区域 3 测量得到的实验频散曲线。可以看出理论频散曲线与实验频散曲线有较高的重合度,据此可反演出激光熔覆涂层不同区域的弹性模量。

表 2 给出的是不同区域上的弹性模量值。从激光超声表征结果可以看出,激光熔覆涂层不同区域的弹性模量差异很大,而且弹性模量的差异再次证明了激光熔覆涂层的不均匀性。从结果还可以看出,信号采集位置在纹路中间(区域 2, 3, 6)的弹性模量要高于两道纹路接缝处(区域 1, 4, 5, 7, 8)的弹性模量。

激光超声表面波法测量激光熔覆涂层得出的弹性模量是涂层局部的弹性模量,而拉伸试验求得的是拉伸试样整体的弹性模量。不论是局部弹性模量还是整体弹性模量,都表现出较大的差异性。

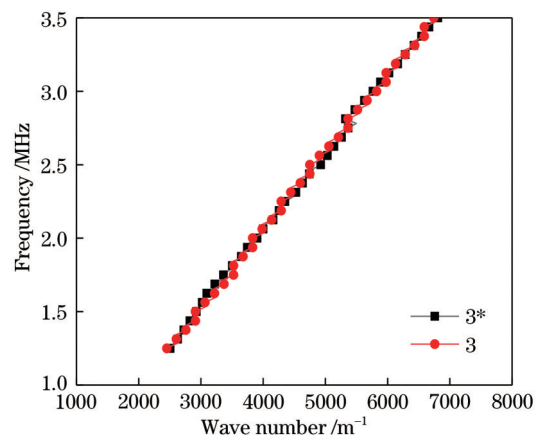


图 14 激光熔覆涂层 3 号区域的频散曲线拟合图

Fig. 14 Dispersion curve fitting diagram of region 3 of laser cladding coating

表 2 激光熔覆涂层不同测量区域的弹性模量

Table 2 Elastic modulus of laser cladding coating on different measuring areas

Detection position	Elastic modulus /GPa
1	255
2	330
3	335
4	237
5	211
6	290
7	226
8	240

弹性模量是工程材料重要的性能参数,从宏观角度来说,弹性模量是衡量物体抵抗弹性变形能力大小的尺度,从微观角度来说,则是原子、离子或分子之间键合强度的反映^[27]。激光熔覆涂层弹性模量的较大差异,也说明了涂层材料的不均匀性。

5 结 论

通过激光超声表面波的特征弹性模量的方法,研究了激光熔覆涂层的均匀性问题,得到如下几点结论。

1) 由于激光熔覆涂层加工工艺的特性,激光熔覆涂层表面呈现出规则分布的线性纹路,这些纹路说明激光熔覆涂层的材料性质不均匀,并通过拉伸试验验证了涂层的不均匀性。

2) 由激光超声实验获得了表面波在涂层上的频散曲线,其频散曲线在不同位置上的差异反应了涂层的弹性模量的区别。

3) 通过对频散曲线的非线性拟合,可得到涂层

不同位置上的弹性模量值,弹性模量从 211 GPa 到 335 GPa。

通过以上的研究,提出了一种激光超声表面波的方法,为评价激光熔覆涂层的力学性能和改善激光熔覆工艺提供了技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Lin Y H, Lei Y P, Fu H G, et al. Effect of Ni addition on microstructure and mechanical properties of TiB₂/TiB titanium matrix composite coatings[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 50(12): 1520-1528.
林英华, 雷永平, 符寒光, 等. Ni 添加对 TiB₂/TiB 钛基复合涂层组织与力学性能的影响[J]. 金属学报, 2014, 50(12): 1520-1528.
- [2] Fan L, Chen H Y, Dong Y H, et al. Corrosion behavior of Fe-based laser cladding coating in hydrochloric acid solutions[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(7): 1019-1030.
范丽, 陈海龔, 董耀华, 等. 激光熔覆铁基合金涂层在 HCl 溶液中的腐蚀行为[J]. 金属学报, 2018, 54(7): 1019-1030.
- [3] Li Y N, Li Z G, Wang X X, et al. Fe-based wear-resistant coating on railroad switch prepared using laser cladding technology and its properties[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0402009.
李英男, 李铸国, 王晓翔, 等. 道岔尖轨表面的激光熔覆铁基耐磨涂层及其性能[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0402009.
- [4] Wu X Q, Yan H, Xin Y, et al. Microstructure and wear properties of Ni-based composite coatings on aluminum alloy prepared by laser cladding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(8): 2574-2582.
- [5] Hao Y B, Wang J, Yang P, et al. Microstructures and properties of tin-based babbitt metal prepared by laser cladding deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0802009.
郝云波, 王江, 杨萍, 等. 激光熔覆锡基巴氏合金的微观组织及性能[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0802009.
- [6] Tong W H, Zhang X Y, Li W X, et al. Effect of laser process parameters on the microstructure and properties of TiC reinforced Co-based alloy laser cladding layer[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9): 1265-1274.
童文辉, 张新元, 李为轩, 等. 激光工艺参数对 TiC 增强钴基合金激光熔覆层组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1265-1274.
- [7] Xu H Z, Ge H H, Wang J F, et al. Effects of process parameters upon chromium element distribution in laser-cladded 316L stainless steel[J]. Chinese Journal of Laser, 2020, 47(12): 1202004.
徐瀚宗, 葛鸿浩, 王杰峰, 等. 工艺参数对 316L 不锈钢激光熔覆层中 Cr 元素分布的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1202004.
- [8] Hu G F, Yang Y, Sun R, et al. Microstructure and properties of laser cladding NiCrBSi coating assisted by electromagnetic-ultrasonic compound field[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 404: 126469.
- [9] Sun N, Fang Y, Zhang J Q, et al. Effect of WC-¹²Co addition on microstructure and wear resistance of Inconel 625 matrix composites prepared by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(6): 0602106.
孙宁, 方艳, 张家奇, 等. WC-¹²Co 添加量对激光熔覆 Inconel 625 基复合材料微观组织和耐磨性能的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(6): 0602106.
- [10] Liu B, Gong K, Qiao Y X, et al. Evaluation of influence of preset crack burial depth on stress of laser cladding coating with metal magnetic memory [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(2): 241-248.
刘彬, 贡凯, 乔岩欣, 等. 基于金属磁记忆评价裂纹埋深对激光熔覆层应力的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(2): 241-248.
- [11] Hu M, Tang J C, Chen X G, et al. Microstructure and properties of WC-¹²Co composite coatings prepared by laser cladding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 1017-1030.
- [12] Wu Y, Yu G, He X L, et al. Research on processing of laser cladding Ta-W alloy coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(8): 0803008.
武扬, 虞钢, 何秀丽, 等. 激光熔覆 Ta-W 合金涂层工艺方法研究[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0803008.
- [13] Lin Y H, Yuan Y, Wang L, et al. Effect of electric-magnetic compound field on the microstructure and crack in solidified Ni60 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(10): 1442-1450.
林英华, 袁莹, 王梁, 等. 电磁复合场对 Ni60 合金凝固过程中显微组织和裂纹的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(10): 1442-1450.
- [14] Yang L J, Li Y, Sun J J, et al. Reflection and transmission of laser ultrasonic waves on surface defects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 041203.

- 杨连杰, 李阳, 孙俊杰, 等. 激光超声表面波在表面缺陷上的反射与透射[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 041203.
- [15] Li Y, Peng X Y, Li D L, et al. Experimental investigation on non-destructive measuring of the nitriding thickness of 40Cr steel by laser ultrasonic [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(6): 7-12.
李阳, 彭笑永, 李大磊, 等. 激光超声无损测量 40Cr 钢渗氮层深度的实验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(6): 7-12.
- [16] Liu B, Dong S Y. Influence of laser cladding coating thickness on surface crack depth evaluation with ultrasonic surface wave[J]. Nondestructive Testing Technology, 2015, 37(1): 7-10.
刘彬, 董世运. 激光熔覆层厚度对超声表面波评价表层缺陷深度的影响[J]. 无损检测, 2015, 37(1): 7-10.
- [17] Ollendorf H, Schneider D, Schwarz T, et al. Non-destructive evaluation of TiN films with interface defects by surface acoustic waves[J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 74/75: 246-252.
- [18] Kielczyński P, Pajewski W. Determination of the depth of a non-homogeneous surface layer in elastic materials using shear surface acoustic waves[J]. NDT International, 1985, 18(1): 25-32.
- [19] Duggal A R, Rogers J A, Nelson K A. Real-time optical characterization of surface acoustic modes of polyimide thin-film coatings[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 72(7): 2823-2839.
- [20] Manna I, Majumdar J D, Chandra B R, et al. Laser surface cladding of Fe-B-C, Fe-B-Si and Fe-BC-Si-Al-C on plain carbon steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(1/2): 434-440.
- [21] Zhai Y F, Wang X H, Huang J. Microstructure and properties of TiC-Mo₂C particles reinforced Fe-based composite coatings produced by laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3287-3292.
- 翟玉峰, 王新洪, 黄坚. 激光熔覆 TiC-Mo₂C 颗粒增强 Fe 基涂层的组织与性能[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 3287-3292.
- [22] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: metallic materials-tensile testing -part 1: method of test at room temperature. GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法 GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [23] Flannery C M, von Kiedrowski H. Effects of surface roughness on surface acoustic wave propagation in semiconductor materials[J]. Ultrasonics, 2002, 40(1/2/3/4/5/6/7/8): 83-87.
- [24] Alleyne D N, Cawley P. A 2-dimensional Fourier transform method for the quantitative measurement of lamb modes[C]//IEEE Symposium on Ultrasonics, December 4-7, 1990, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE Press, 1990: 1143-1146.
- [25] Ponschab M, Kiefer D A, Rupitsch S J. Simulation-based characterization of mechanical parameters and thickness of homogeneous plates using guided waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 66(12): 1898-1905.
- [26] Schneider D, Schwarz T, Schultrich B. Determination of elastic modulus and thickness of surface layers by ultrasonic surface waves[J]. Thin Solid Films, 1992, 219(1/2): 92-102.
- [27] Chitsaz S, Tarighat A. Molecular dynamics simulation of N-A-S-H geopolymer macro molecule model for prediction of its modulus of elasticity[J]. Construction and Building Materials, 2020, 243: 118176.