

基于有限元法的激光声磁检测系统优化研究

张鹏辉¹, 赵 扬^{2*}, 李 鹏¹, 周志权², 白 雪¹, 马 健¹

(1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250104;
2. 哈尔滨工业大学(威海)信息科学与工程学院, 山东 威海 264209)

摘 要: 针对激光超声和电磁超声两种非接触式检测方式在实验中操作复杂和灵敏度低, 以及难以观察不同参数对相关物理场造成的影响等问题, 文中将有限元法应用到激光声磁混合式检测当中, 采用数值分析方法分析了脉冲激光与电磁超声换能器之间的匹配关系对检测灵敏度的影响, 研究了激光声磁检测系统的优化设计依据。利用有限元软件建立了激光声磁检测系统的仿真模型, 通过正交数值仿真分析了高斯激光脉冲激励超声的温度场和位移场特性, 进而观测了电磁超声换能器参数变化对检测灵敏度的影响。结果表明: 螺旋型线圈接收的电压信号能正确反应由入射激光在固体中发生热膨胀效应产生的超声位移场, 当磁体的高宽比为 1.5 倍时, 驱肤层处磁场强度分布最优, 提高距离对换能效率的影响呈现负指数变化规律, 评价了不同接收间距处电磁超声换能器的接收性能。

关键词: 激光超声; 电磁超声; 无损检测; 有限元分析

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210533

Optimization of the laser-EMAT detection system based on FEM

Zhang Penghui¹, Zhao Yang^{2*}, Li Peng¹, Zhou Zhiquan², Bai Xue¹, Ma Jian¹

(1. Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250104, China;
2. School of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

Abstract: To solve the complicated operation problems of the laser ultrasonic method and the low sensitivity of electromagnetic acoustic transducers, that both have noncontact characteristics in their respective detection processes. It is difficult to observe the effects of different parameters on the relevant physical fields. In this paper, the finite element simulation method was used to analyse the influence of the matching relationship between the pulsed laser and the electromagnetic ultrasonic transducer on the detection sensitivity, and the optimal design basis of the laser sound-magnetic detection system was studied. The simulation model of the laser acoustic-magnetic detection system was established by using finite element software. The characteristics of the temperature field and displacement field of ultrasonic excitation by a Gaussian laser pulse were analysed through orthogonal numerical simulation, and the influence of the parameter change of the electromagnetic ultrasonic transducer on the detection sensitivity was observed. The results indicate that the voltage signal received by the spiral coil can

收稿日期: 2021-08-04; 修订日期: 2021-08-20

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目 (2020CXGC010705, 2019JZZY010418); 哈尔滨工业大学科研创新基金 (202006); 齐鲁工业大学(山东省科学院)科教产融合创新试点工程项目(国际合作)(2020KJC-GH12); 济南市“高校 20 条”创新团队项目 (2020GXRC004)

作者简介: 张鹏辉, 男, 硕士生, 主要从事激光超声无损表征与评价方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 赵扬, 男, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光声检测技术方面的研究。

correctly respond to the ultrasonic displacement field generated by the thermal expansion effect of the incident laser in the solid. When the height to width ratio of the magnet was 1.5 times, the magnetic field intensity distribution at the driving layer was optimal, and the effect of the lifting distance on the energy conversion efficiency presented the law of negative exponential. The receiving performance of the electromagnetic ultrasonic transducer at different receiving spacings was evaluated.

Key words: laser ultrasonic; EMAT; nondestructive testing; finite element analysis

0 引言

激光超声检测技术是将脉冲激光辐照于被测物体表面,在块状试件内部可同时产生压缩波、剪切波和表面波,短脉冲产生的高频超声波具有空间分辨率高的特点有利于高精度的无损评价工作^[1-4]。若利用光学检测法接收超声信号,即可完全实现从激励端到接收端的非接触式检测,利用快速扫描技术可较好地完成产品的在线检测过程,在工业零部件的无损探伤领域有广阔的应用空间^[5-6]。但用于接收超声振动的激光干涉仪造价昂贵,检测系统构造复杂,且光学检测法的灵敏度受限于材料表面粗糙度情况,粗糙表面致使接收到的信号信噪比差,不利于数据分析处理^[7]。

电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer,简称 EMAT) 是另一种典型的非接触式超声检测手段,常用于铁路钢轨等导电介质或铁磁性材料的无损探伤工作中。EMAT 产生和接收超声波的原理复杂,但其换能器结构相对光学检测系统更加简易,经济适用性相对更好,操作更加灵活^[8-10]。

显然,上述两种单一的非接触式超声检测技术都存在着自身的优势和不足,相较于 EMAT 方式激励超声波,激光激励超声波的信号能量更强,带宽更宽;而在超声信号接收方面,EMAT 方式受材料表面粗糙度影响相对较小,因此当对导电金属和非铁磁性材料进行探伤检测时,可将两种技术混合使用,其形式和作用机理如图 1 所示。

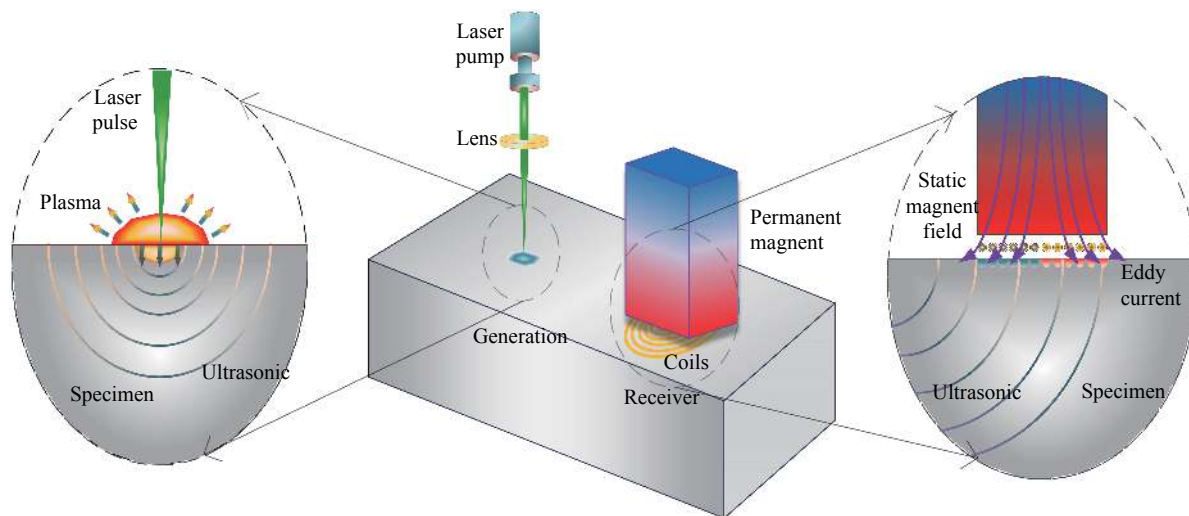


图 1 激光-电磁超声示意图

Fig.1 Diagram of laser-electromagnetic ultrasonic

Dixon^[11] 利用激光激励、EMAT 接收超声的实验完成了不锈钢和铝板在不同深度的缺陷的简单信号分析,证实了该项新检测技术的可行性。Zhao^[12-13] 自主设计并搭建了激光-声-磁检测系统,通过 EMAT 探头接收由 Nd: YAG 激光在固体中产生的剪切波,针

对接收到的电压信号噪声过大的问题,利用小波阈值法对信号进行数字滤波处理,成功提取出信噪比较高的波形数据,实现了对表面粗糙钢轨的各种缺陷检测、层状结构厚度的测量等实验。为研究该检测技术中声场与板材表面断裂槽相互作用情况,Boonsang^[14]

通过对接收电压信号进行 B 扫描成像, 同时发现调整 EMAT 传感器与狭缝的间距, 信号幅值增强系数可至 2.8 ± 0.3 。Pei^[15] 研究了激光-EMAT 对金属内部缺陷的超声检测和评估, 阐明了该检测方法用来定位预先未知缺陷的可行性。

研究学者对该新型混合式检测技术的研究工作大多通过实验进行探究性测试, 对 EMAT 换能器的工艺参数及换能机理研究缺乏一定连续性。数值模拟的优势在于经济性和重复性, 为数不多的仿真分析只研究了激光在固体中的激励的超声信号的传播过程, 但激光-电磁超声在接收端最终通过换能器接收到的电信号进行数据分析和处理却鲜有文献报导, 原因在于该过程涉及复杂的热、力、声、磁及电场的多物理场耦合。文中分析了激光激励的声场在固体内部的传播过程和 EMAT 换能器在接收侧的作用原理, 建立了激光-电磁超声的有限元模型, 得到了仿真模型在不同参数下的数值结果, 研究分析了混合式检测下温度、位移场分布情况以及几大关键参数对压降波形的影响。文中对激光-电磁超声的实验探究、研究换能器的工艺参数对检测灵敏度影响有一定参考意义。

1 激光致声与 EMAT 换能原理

1.1 固体中的激光致声

激光在固体介质中激励超声波的过程本质属于介质受热膨胀产生热应力, 进而材料发生形变的热力学过程。脉冲激光作用在金属物质时, 沉积能量在金属表面转化为热量形式, 并分布于辐照区域, 假定材料的热学性质不随温度变化, 忽略对流和热辐射的前提下, 根据傅里叶定律, 笛卡尔坐标系下热传导的控制方程可表示为^[16]:

$$\rho C \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\kappa_x \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\kappa_y \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa_z \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right] \quad (1)$$

式中: $T(x, y, z, t)$ 表示样品内部 t 时刻的温度分布; ρ 是密度; C 是材料的比热容; κ 是热扩散系数。当激光在空间中垂直 (z 轴) 辐照在金属表面上时, 温升情况可用 x 和 y 分量来表示。一般地, 激光作用面的边界条件为:

$$\begin{cases} -K \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=h} = Q(x, t) \\ \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: K 为热传导率; $Q(x, t)$ 表示作用在上表面的脉冲激光的能量分布函数, 除上表面外, 其他边界按热绝缘处理。激光脉冲的能量分布可表示为:

$$Q(x, t) = A(T) \frac{4E}{\pi t_0 \omega_0^2} f(x) g(t) \quad (3)$$

式中: $A(T)$ 为金属材料对激光能量的吸收率; E 为单脉冲能量; t_0 为脉冲宽度; ω_0 为激光光斑的半径; $f(x)$ 及 $g(t)$ 分别为激光的空间分布和时间分布, 可以表示为:

$$f(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{\omega_0^2}\right) \quad (4)$$

$$g(t) = \frac{t}{t_0} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \quad (5)$$

若入射脉冲的激光功率密度未达到材料的烧蚀阈值时, 样品表层在辐照域吸收脉冲能量后, 会发生热膨胀, 产生瞬态位移场。根据纳维-斯托克斯方程, 在各向同性的弹性固体材料中, 超声场的波动方程为^[17]:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot U) - \mu \nabla \times \nabla \times U - \\ (3\lambda + 2\mu) \alpha_l \nabla T(x, y, t) = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $U(x, y, t)$ 为瞬态位移; λ 和 μ 为 Lamé 常数; α_l 为材料的热膨胀系数。

1.2 非铁磁性材料中 EMAT 接收原理

以电导率为 σ 的非铁磁性金属试块为例, 如图 2 所示, 当试样内部的超声场传播至 EMAT 的线圈

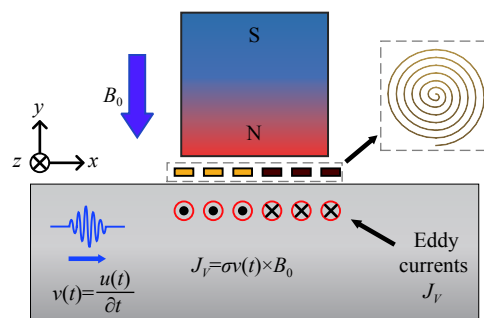


图 2 EMAT 接收换能器工作原理

Fig.2 Working principle of EMAT receiving transducer

下方时,被测物体内部及表面发生位移的正电荷晶格在外加偏置磁场 B_0 的作用下产生涡流^[18]:

$$J_v = \sigma v \times B_0 \quad (7)$$

被测导体中的动态涡流将在其周围产生一个交变磁场,其磁通密度为 B_t ,在 EMAT 的换能过程中,求解域的磁场由试件中的涡流密度和线圈的源电流密度共同提供,处于此动态磁场中的接收线圈进一步地生成感应电动势,进而被线圈接收,换能区域所满足的控制方程为^[18]:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \sigma v \times (B_0 + \nabla \times A) \quad (8)$$

式中: A 为求解区域的磁矢势。进而线圈中点导体的感应电动势可通过对电场强度作线积分得到,于是:

$$V_{out} = \int l E \cdot dl = \int l - \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dl \quad (9)$$

2 激光-EMAT 有限元建模

2.1 材料几何参数

在各向同性材料中,垂直于介质表面入射的脉冲激光在试样内部产生的超声场沿径向表现为对称传播,永磁体周围的磁场呈现规律性分布,于是可将空间中激光-EMAT 的立体几何模型简化为二维平面有限元模型,几何模型如图 3 所示,试块长度 $a=80$ mm,宽度 $b=30$ mm,非铁磁性固体材料的基本参数如表 1 所示;永磁体选取由 NdFeB 制成的柱形 N50 磁铁,其宽度 $w_1=6$ mm,高度 $h_1=8$ mm;线圈为螺旋型线圈,根据 PCB 工艺,材质为铜,在垂直于平面的导线横切面方向加载电流,线圈截面尺寸为 0.2 mm \times 0.05 mm,线圈间距 $d_1=0.8$ mm,线圈提高距离 $t_1=0.1$ mm;永磁体与试件表面距离 $t_2=0.5$ mm,激光辐

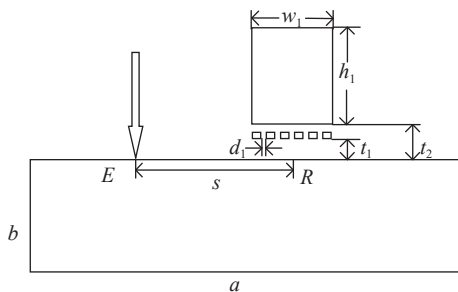


图 3 计算几何模型

Fig.3 Diagram of the simulation geometric model

表 1 材料的基本物理参数

Tab.1 Basic physical parameters of materials

Parameter	Value
Thermal conductivity $\kappa/W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	238
Heat capacity $C/J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	900
Thermal expansion α/K^{-1}	2.31×10^{-5}
Density $\rho/kg \cdot m^{-3}$	2700
Modulus of elasticity E/Pa	7.02×10^{10}
Poisson ratio	0.33
Electrical conductivity $\sigma/S \cdot m^{-1}$	3.774×10^7

照点位于左侧,电磁接收换能器位于距其长为 s 的另一侧。

2.2 激励和接收方式

脉冲激光垂直于试件表面辐照在图 3 左侧 E 点处,脉冲能量为 22 mJ,脉冲宽度为 10 ns,光斑半径为 0.1 mm,单脉冲频率 1 Hz,如图 4 所示为高斯脉冲激光功率密度的时空维度分布图。能量以热源的形式加载于材料的上边界,热扩散深度为 $L = 2 \sqrt{\kappa t / (\rho C)}$,激光辐照区域存在较大温度梯度变化,故热扩散深度内的网格需做精细化剖分处理。

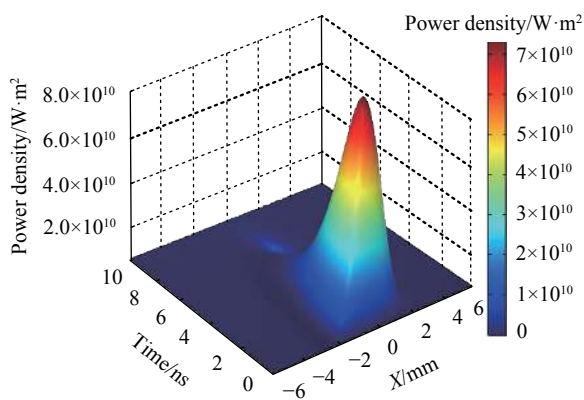


图 4 高斯脉冲光束的能量时空分布

Fig.4 Energy distribution of Gaussian pulse beam for temporal and spatial

电磁超声接收换能器模型由永磁体、螺旋型线圈、被测试件、空气域构成,图 3 模型中已略去空气域。为避免长方形永磁体的棱角可能带来的局部奇异电磁场对感应电流密度产生的影响,永磁体模型改用圆角矩形代替棱角矩形,磁场分布及磁感线方向如图 5 所示,永磁体宽度对应试件表面下方 $10 \mu m$ 处轴向和径向分量的磁通密度绝对值如图 6 所示,可看

出,水平分量在中心和边沿处的磁场分布差距较大,而垂直分量分布较为均匀。为保证磁场均匀分布,建立的空气区域部分需要覆盖换能器。试件左右两侧添加吸声边界条件来模拟无限元域,防止壁反射回波对信号分析造成的干扰。EMAT 的换能过程主要集中在在线圈正下方的材料表面的驱肤层,驱肤层深度可由 $1/\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}$ 计算得出^[18], f 为线圈激励电流频率, μ 为试件的相对磁导率,换能区域所在的驱肤层应自上而下做梯次细化分布处理,以便得出更加精准的计算结果。

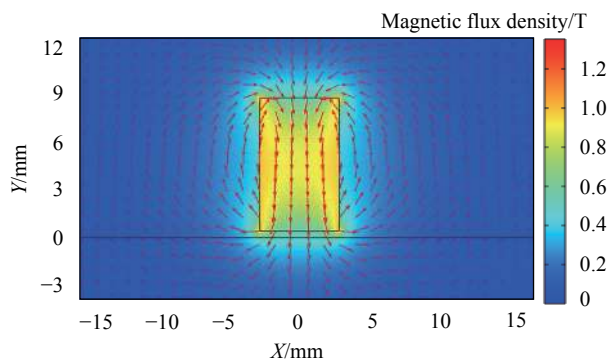


图 5 永磁体磁通密度分布

Fig.5 Magnetic flux density distribution of permanent magnet

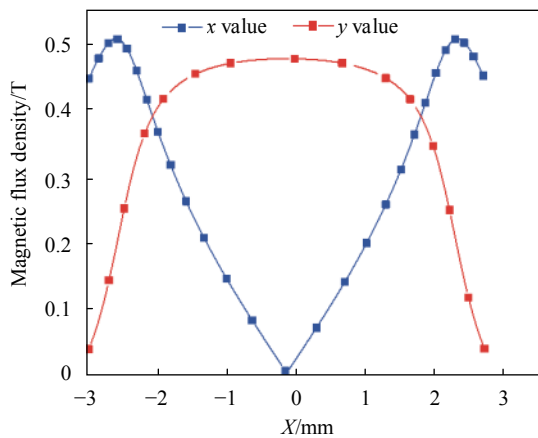


图 6 线圈下方磁通密度值

Fig.6 Magnetic flux density below the coils

2.3 时间步长及网格剖分

该模型是结合热、力、声、磁、电的物理变化所建立而成,研究关于稳态和瞬态过程的计算分析,利用有限元法解决该多物理场耦合的问题时,激发源部分选择传热和结构力学模块进行单向直接耦合,即不考虑应力场产生的几何变形对晶粒温度带来的反作

用,接收侧 EMAT 选择无电流磁场、磁场、结构力学模块进行顺序耦合。有限元法求解的两大关键在于有限单元的网格划分和计算时间步长的选定,在该模型中,被测试件中的网格要求小于 $\lambda/4$, λ 为波长,光源半径作用范围及换能域中的趋肤深度做前述细化处理,其余部分网格进行自适应划分即可。时间步长的选择既要根据超声波频率考虑到计算的精准度,还涉及到计算资源和计算机性能的问题,根据经验,时间步长可拟选为 $\Delta t = 1/(180 f_{\max})$, f_{\max} 为计算超声频率的最大值,总计算时长根据声场在激励和接收点的渡越时间所决定。

3 结果与分析

3.1 温升变化与指向性

图 7 给出了脉冲激光辐照试件表层下方不同节点的温升变化曲线,高斯脉冲作用下,辐照区域的温度场表现出:不同纵深位置的温度在激光辐照结束时达到峰值,随后在短时间内下降快速,所能达到的温度峰值随着深度的增加呈现明显的下降趋势,表面中心温度最高可达 535 K,表层下方 $5 \mu\text{m}$ 最高温度只有 366 K,说明传热温升区域主要集中在材料表面。激光辐照试件所产生的能量沉积热在脉宽作用时间结束时上升到最大,通过这一温度变化过程可以直观分析判断脉冲能量是否达到材料的损伤阈值。

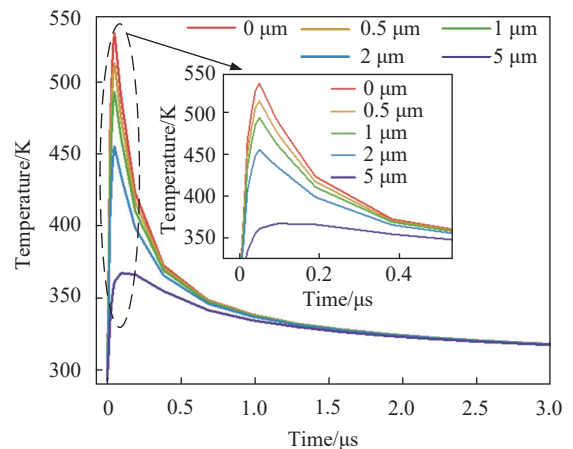


图 7 辐照表面中心温升曲线

Fig.7 Temperature rise curves of irradiated surface center

将温度场分布作为载荷源施加到平面应变计算中,材料受热发生膨胀产生不均匀形变,表现出纳米

或微米级的微弱位移场,同时激发出纵波、横波、表面波,特定模式的波形在材料中的传播速度和发散方向一般作为无损检测中试件测厚和缺陷检测的依据^[19]。以纵波为例,图 8 所示为理论解析得出的纵波的指向性与仿真模型提取节点位移数据后得出的纵波指向性对比图,在烧蚀机制下,有限元模拟中的纵波以光斑垂直入射方向为对称轴,两侧呈纺锤形向外传播,与法线夹角 60°处纵波的能量最为集中,仿真结果和理论指向角度的吻合性较好。

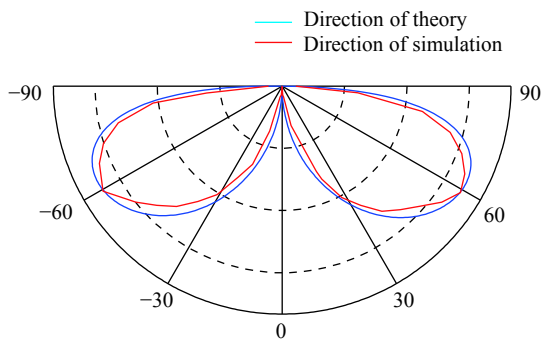


图 8 纵波指向性

Fig.8 Directivity of longitudinal wave

3.2 位移场与线圈电压

经过有限元计算,分别提取最左侧线圈下方节点(4.375,0),线圈中心下方节点(7,0),最右侧线圈下方节点(9.625,0)三处的垂直位移,如图 9 所示,随着激励点与接收点距离的增加,脉冲激光激发的三种模态的超声波波形的历程曲线依次后移,同时波形符合激光诱导超声波的特点,再根据前述描绘的温升变化及纵波的指向性情况可知,有限元模型中激光激励的声场与实际相符,故可将动态位移场加载至 EMAT 换能器作为接收信号源。

根据公式(7)~(9),线圈电压的感应电动势是由于磁体下方金属晶格的定向移动产生的,故位移波形变化规律应与电压信号保持一致,如图 10 所示为不同接收点 R 处螺旋型线圈电压的波形图,激励与接收点间距不同时,电压信号明显改变,将图 9 和图 10 进行对比分析,可以看出,忽略相位偏差后,电压幅值波动情况与表面的垂直位移完全相同,并且从电压信号中同样可探测到不同模态的超声信号,同时线圈产生了理想的压降,这说明仿真模型中由激光辐照试件而诱导的超声场与接收侧 EMAT 的磁场和电场成功耦合。

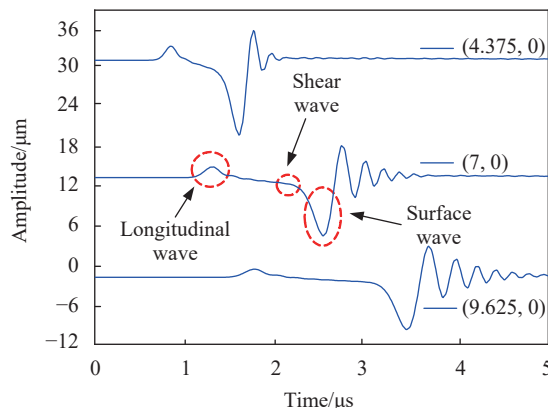


图 9 不同节点处的垂直位移

Fig.9 Vertical displacements of different nodes

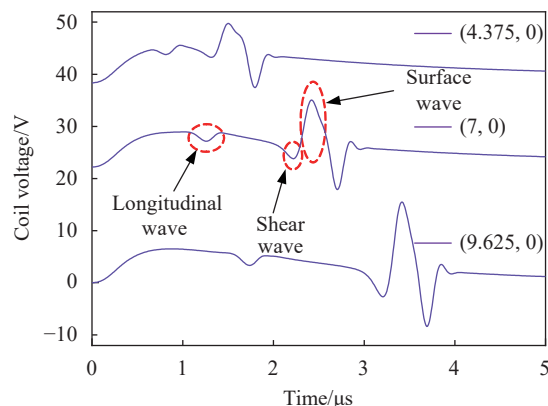


图 10 对应节点的线圈电压

Fig.10 Coil voltages of different nodes

3.3 不同参数对换能效率的影响

EMAT 换能器存在的主要问题为:接收侧线圈电压幅值较小,换能器灵敏度不足,一般需要通过在系统中连接前置放大器来增强信号幅值,以供观察分析^[12]。根据公式(7),影响 EMAT 换能器中感应电流强弱的主要因素之一是永磁体为试件表面提供的偏置磁场强度。图 11 所示为永磁体规格对驱肤层中磁通密度的影响曲线,依次考察了接收线圈正下方中心及边沿两处的磁通密度大小,截线探针选取为试样表面下方 10 μm 处。当宽度和高度分别取 4、6、8、10、12、15、20 mm 时开展正交试验,图 11(a) 和图 11(c) 分别为永磁体高度和宽度对边沿处磁通密度的影响,可以看出,边沿处的磁通密度随着磁体高度和宽度的增加而逐渐上升,这种非线性的变化在增大规格的过程中逐渐表现为趋缓,并且相比宽度而言,高度的变化对边沿处磁通密度的影响更为明显。图 11(b) 和

图 11(d) 分别表示永磁体高度和宽度对中心处磁通密度的影响, 不同于边沿处, 当高度一定时, 中心的磁通密度大小随着宽度的增加而减弱, 衰减梯度几乎呈现线性变化, 同样地, 高度增加带来的磁通密度增长在后阶段表现出趋缓。

当通过改变磁体规格来改善感应电流密度时, 若选择的线圈集中在永磁体下方中心, 为了增加驱肤层

处的偏置磁场强度, 所用永磁体的尺寸规格要满足窄且高, 从图 11(b) 可以看出, 4 mm 和 6 mm 宽度的磁体在高度达到 12 mm 及继续增加高度后所提供的磁场强度保持在 0.5 T 左右。若选择接收线圈的面积与永磁体的底面积相差不多时, 则考虑边沿范围内的磁场强度, 在满足检测环境的前提下, 选择高宽比为 1.5 倍的永磁体提供静偏置磁场。

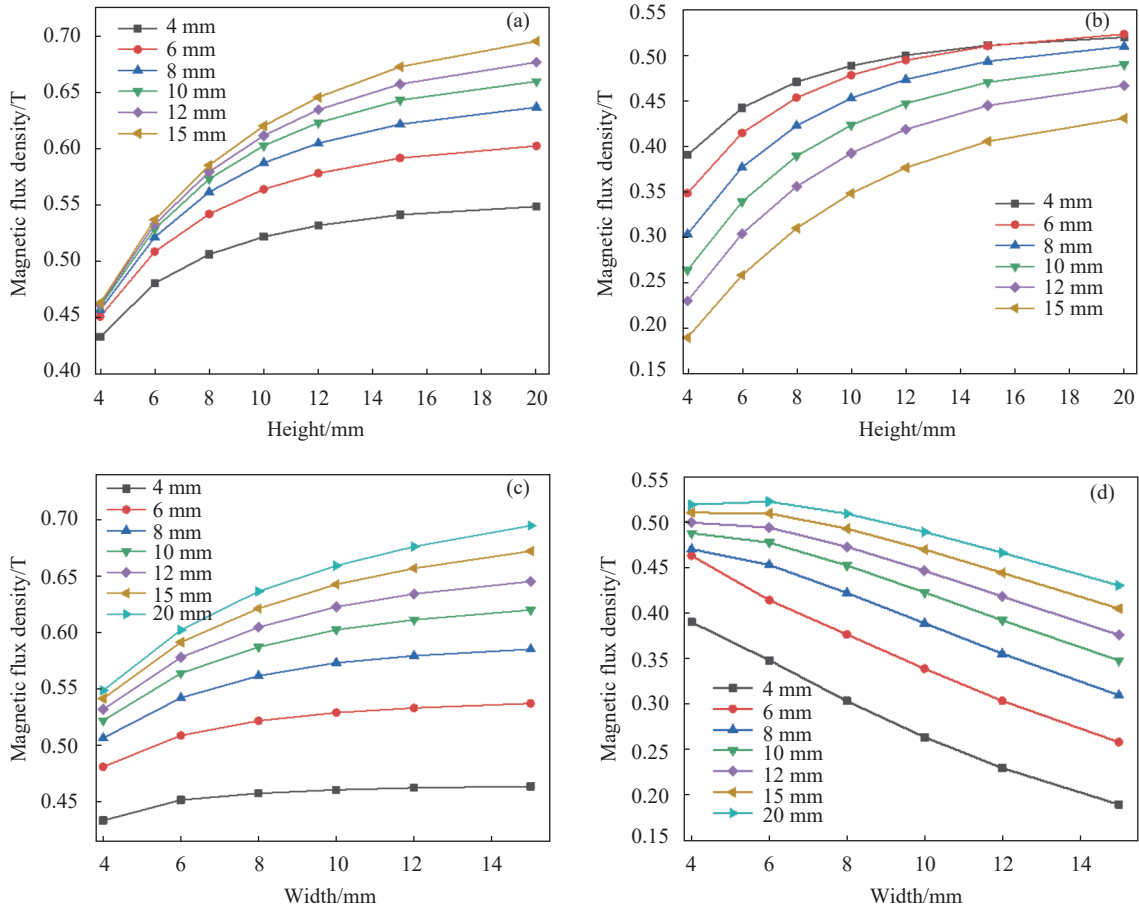


图 11 永磁体规格对偏置磁场的影响。(a) 磁体高度对边沿磁场的影响; (b) 磁体高度对中心磁场的影响; (c) 磁体宽度对边沿磁场的影响; (d) 磁体宽度对中心磁场的影响

Fig.11 Influence of permanent magnet size on magnetic field. (a) Influence of magnet height on edge magnetic field; (b) Influence of magnet height on central magnetic field; (c) Influence magnet width on edge magnetic field; (d) Influence of magnet width on central magnetic field

除永磁体尺寸外, 永磁体与工件上表面的提高距离 t_2 在很大程度上也会改变磁场强度分布, 进而影响换能器灵敏度, 如图 12 所示为选取尺寸为 6 mm×8 mm 永磁体, 提高距离 t_2 分别取 0.2~4.0 mm 之间若干值时, 纵波、横波和表面波的线圈电压峰值变化情况。结果表明, 接收电压幅值随提高距离的增加呈负指数

形式降低, 表面波的幅值陡降程度最大, 且提高距离对纵波的影响稍大于横波, 当间距为 4.0 mm 时, 电压幅值已较微弱, 故可选取提高距离为 0.5 mm 左右, 既满足非接触式检测的要求, 又尽可能增加了换能器灵敏度。

作为接收元件的电磁线圈与被测试样的间距同

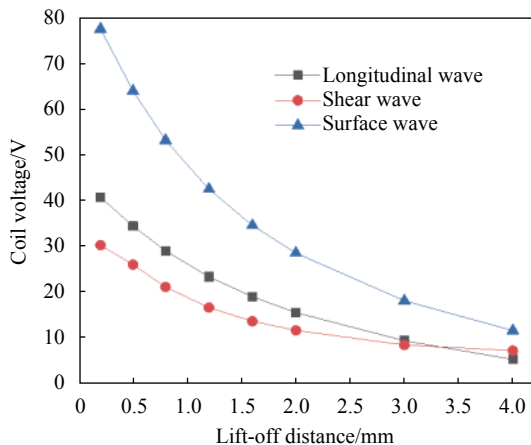


图 12 提高距离对线圈电压幅值的影响

Fig.12 Influence of lift-off distance on voltage amplitude of coil

样对换能效率有很大影响,从表 2 中可以看出,螺旋型线圈电压的峰值随线圈提高距离的增大表现为逐步下降的趋势,当提高距离 t_1 从 0.05 mm 增加到 0.1 mm 时,线圈电压幅值变为原来的 1/3,继续增大线圈与试样的间距,下降增量的变化程度趋缓,故在永磁体提高距离固定的情况下,可适当增加线圈与待测工件的间隙。

表 2 线圈提高距离对换能器灵敏度的影响

Tab.2 Influence of coil lift-off distance on transducer sensitivity

Coil lift-off distance t_1 /mm	Voltage/V
0.05	188.63
0.10	60.04
0.15	50.50
0.20	41.78
0.25	35.55
0.30	31.77

如图 13 所示为探测距离 s 分别为 4、10、20 mm 时的 A、B、C 三点的压降波形图,提取其电压幅值,同时加入 50 mm 和 100 mm 的数值模拟结果,绘制图 14 所示的探测距离对接收换能器灵敏度的影响曲线,从图 14 可以看出,当探测距离达到 50 mm 时,螺旋型线圈接收到的表面波和纵波的电压幅值分别下降到 4.32 V 和 3.25 V,距离达到 100 mm 及更远时,换能器灵敏度为 mV 量级,实验所用示波器的检测精度大多满足该检测分辨率。

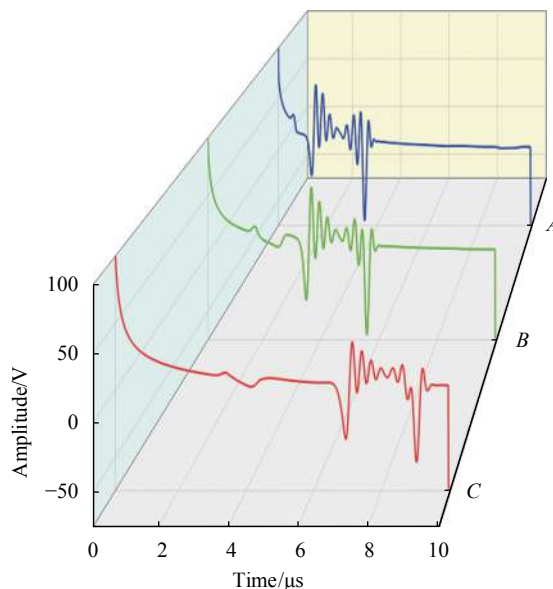


图 13 不同距离节点的电压波形

Fig.13 Voltage waveform of different nodes

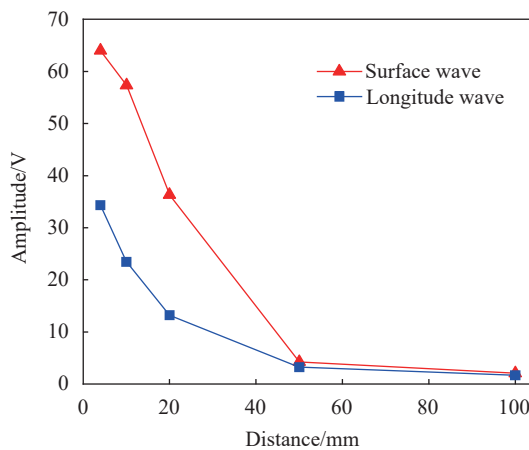


图 14 探测距离对灵敏度的影响

Fig.14 Effect of detection distance on sensitivity

4 结 论

将激光激励超声和 EMAT 接收超声两种检测方法相结合,根据脉冲激光在固体中的致声机理以及电磁探头的换能原理,建立了非铁磁性材料下的激光-电磁超声换能过程的有限元模型,实现了由热力学方式激发的声场和电磁场的多物理场耦合过程。通过数值仿真,模拟了高斯脉冲光束辐照试件后的演化过程,获得了试件表面温升情况及包括纵波、横波、表面波的位移场,EMAT 下方固体表面的垂直位移与螺旋型线圈的压降变化呈现很好的一致性。在此基础

上,探究了永磁体规格、提离距离等关键因素对激光-电磁超声接收到信号灵敏度的影响,当磁体的高宽比为 1.5 倍时,试件表层的磁通密度分布较好;当提离距离 t_1 从 0.05 mm 增加到 0.1 mm 时,线圈电压幅值变为原来的 1/3;最后研究了探测距离对换能效率的影响程度,当激励和接收点距离在 100 mm 及以上时,电压精度为 mV 量级。文中的仿真过程和分析结果将为研究人员在激光-电磁超声的换能机理、工艺参数的设计选择方面提供一定参考。

参考文献:

- [1] Abetew A D, Truong T C, Hong S C, et al. Parametric optimization of pulse-echo laser ultrasonic system for inspection of thick polymer matrix composites [J]. *Structural Health Monitoring*, 2020, 19(2): 443-453.
- [2] Zhu Z, Peng H, Xu Y, et al. Characterization of precipitation in 7055 aluminum alloy by laser ultrasonics [J]. *Metals*, 2021, 11(2): 275-286.
- [3] Song Y X, Wang J, Feng Q B, et al. Influence of laser parameters and laser ultrasonic detection method on ultrasonic signals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1433-1437. (in Chinese)
- [4] Xia J B, Sun G K, Song Chao, et al. Non-contact laser ultrasonic testing of steel-plumbum bonding structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0117006. (in Chinese)
- [5] Li W T, Zhou Z G. Research on ultrasonic array testing methods of laser additive-manufacturing titanium alloy [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(8): 141-147. (in Chinese)
- [6] Zhang J P, Yuan X P, Yuan J X. Defect location and size detection based on laser ultrasonic diffraction bulk wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1214002. (in Chinese)
- [7] Montinaro N, Epasto G, Cerniglia D, et al. Laser ultrasonics inspection for defect evaluation on train wheel [J]. *NDT & E International*, 2019, 107: 102145.
- [8] Li Y, Liu Z, Miao Y, et al. Study of a spiral-coil EMAT for rail subsurface inspection [J]. *Ultrasonics*, 2020, 108: 106169.
- [9] Tang Q, Shi W Z, Lu C, et al. Analysis on the radiated sound field characteristics of angled SV wave EMATs operated on a curved surface component [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(5): 221-233. (in Chinese)
- [10] Zhou J M, Cai L, Yang J, et al. Infrared nondestructive testing electromagnetic excitation model based on partial least-squares regression [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3633-3637. (in Chinese)
- [11] Dixon S, Burrows SE, Dutton B, et al. Detection of cracks in metal sheets using pulsed laser generated ultrasound and EMAT detection [J]. *Ultrasonics*, 2011, 51(1): 7-16.
- [12] Zhao Y, Liu S, Guo R, et al. Hybrid laser-EMAT system for non-destructive testing continuous casting billet [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(S2): S21103.
- [13] Zhao Y, Sun J H, Ma J, et al. Application of the hybrid laser ultrasonic method in rail inspection [J]. *Insight-Non-destructive Testing and Condition Monitoring*, 2014, 56(7): 360-366.
- [14] Boonsang S, Dewhurst R J. Signal enhancement in rayleigh wave interactions using a laser-ultrasound/EMAT imaging system [J]. *Ultrasonics*, 2005, 43(7): 512-523.
- [15] Pei C, Fukuchi T, Zhu H, et al. A study of internal defect testing with the laser-EMAT ultrasonic method [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2012, 59(12): 2702.
- [16] Yang T, He W, He J, et al. Laser ultrasonic testing for inspection of curved surface samples based on synthetic aperture focusing [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1654(1): 012094.
- [17] Zeng W, Yao Y. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic waves for identification of branched-breaking defects [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2020, 208: 164435.
- [18] Huang S L. Theory and Application of Electromagnetic Ultrasonic Guided Wave[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 36-40. (in Chinese)
- [19] Zhan Y, Liu C S, Xue J C. Simulation of laser ultrasonic detection micro crack by equivalent load method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1006004. (in Chinese)