

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2306303

激光-仅线圈式 EMAT 的金属检测系统优化设计 *

郭 伟 石文泽 卢 超 何 盼 陈 果 刘 远
(南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063)

摘 要:在铝合金铸造和高温轧制过程中,采用非接触式无损检测技术实现在线监测与检测,对减小生产成本、保证生产线连续、提高产品成品率具有重要意义。首先,建立了以脉冲激光束激励和仅线圈式电磁超声换能器(EMAT)接收的铝合金 Laser-EMAT 检测过程有限元模型,分析了水膜表面约束机制以及硅钢聚磁结构对所激励的多模式超声波幅值的影响规律,研究了仅线圈式 EMAT 的励磁线圈和接收线圈的外径、内径、线径、层数等对超声波接收效率的影响;其次,开展了铝合金 Laser-EMAT 检测实验,验证了水膜表面约束机制、仅线圈式 EMAT 设计参数和硅钢聚磁结构对检测回波幅值的影响规律。研究结果表明,水膜表面约束下,采用硅钢材料作为励磁线圈的聚磁背板后,超声回波信号幅值增强了 37.76%,信噪比增加了 17.3 dB。在激光能量一定、光斑大小不变、励磁线圈外径为 12.3 mm、内径为 1.6 mm、线径为 0.4 mm、层数为 2 层时,线圈阻抗与电路内阻一致,线圈获得的能量最多,其提供的径向偏置磁场最强。当接收线圈外径为 14.1 mm、内径为 1.7 mm、线径为 0.26 mm 时,超声波接收效率最佳。

关键词: 铝合金; Laser-EMAT; 水膜表面约束; 仅线圈式 EMAT; 优化设计

中图分类号: TB552; TN249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460. 40

Optimal design of metal detection system based on laser-coil only EMAT

Guo Wei Shi Wenze Lu Chao He Pan Chen Guo Liu Yuan
(Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: In the process of aluminum alloy casting and high temperature rolling, non-contact nondestructive testing technology is used to realize online monitoring and detection, which is of great significance to reduce production costs, ensure the continuity of production lines, and improve product yield. Firstly, the finite element model of the laser EMAT testing process of aluminum alloy, which is excited by pulsed laser beam and received only by the coil electromagnetic ultrasonic transducer (EMAT), is established. The influence of water film surface restraint mechanism and silicon steel magnetic structure on the amplitude of excited multi-mode ultrasonic wave is analyzed. The influence of the outer diameter, inner diameter, wire diameter, number of layers of the excitation coil and the receiving coil of the coil electromagnetic ultrasonic transducer (EMAT) only on the ultrasonic receiving efficiency is studied. Secondly, the Laser EMAT test of aluminum alloy was carried out to verify the influence of water film surface constraint mechanism, coil only EMAT design parameters and silicon steel magnetic focusing structure on the detection echo amplitude. The results show that the ultrasonic echo signal amplitude increases by 37.76% and the signal-to-noise ratio increases by 17.3 dB when silicon steel is used as the magnetic back plate of the excitation coil under the constraint of the water film surface. When the laser energy is constant, the spot size is constant, the outer diameter of the excitation coil is 12.3 mm, the inner diameter is 1.6 mm, the wire diameter is 0.4 mm, and the number of layers is 2, the coil impedance is consistent with the internal resistance of the circuit. The coil obtains the most energy and provides the strongest radial bias magnetic field. When the outer diameter of the receiving coil is 14.1 mm, the inner diameter is 1.7 mm, and the wire

diameter is 0.26 mm, the ultrasonic receiving efficiency is the best.

Keywords: aluminium alloy; Laser-EMAT; water film surface constraint; coil EMAT only; optimal design

0 引言

铝合金作为铝基材料,具有比强度高、密度小、耐腐蚀等特点,在航空航天领域中应用广泛^[1-4]。近年来,航空航天技术的高速发展使得对高性能铝合金材料的需求迅速增加,同时也对铝合金材料的质量等级也提出了新的要求^[5]。在铝合金铸造及高温轧制过程中,由于人员环境等偶然因素和加工工艺的不稳定导致了铝合金锻件极易产生缩松、气孔、夹杂、裂纹等缺陷,若不及时进行处理,不仅导致产品合格率下降,生产效率降低,而且还会增加温室气体的排放,严重阻碍了工业制造产业由传统模式向现代化绿色制造模式转型的进程^[6]。因此,开展非接触、高效化、可实时监测的无损检测技术研究对减少生产成本、保证生产线连续、提高产品合格率具有重要意义^[7]。

电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic testing, EMAT) 作为新兴的无损检测技术备受金属材料检测领域的青睐,其设备简单,制造成本低廉,与传统的压电超声不同,EMAT 无需耦合剂且对于检测表面粗糙形貌要求不高。目前,电磁超声检测技术已应用于对金属构件早期塑性损伤^[8]、航空铝合金薄板^[9]、风机叶片^[10],以及铁磁材料应力^[11]等方面的检测。此外,采用相控阵^[12]以及一些特殊设计^[13-14]的 EMAT 技术可以有效减小噪声,提高检测灵敏度。然而传统的 EMAT 由于使用永磁体提供偏置磁场会存在体积大、换能效率易受温度的影响等问题,这限制了 EMAT 检测技术对于探头小型化设计以及在高温甚至超高温环境下的检测应用。因此,研究人员开始了仅线圈式 EMAT 检测技术^[15-16]的探索。

目前,仅线圈式 EMAT 的研究已成为了电磁超声检测领域新的发展方向。例如, Rieger 等^[17]对仅线圈式 EMAT 进行设计,延长了检测时间窗口,得到了更强的偏置磁场,并且不会产生干扰巴克豪森噪声。翟国富等^[18]和 Zhai 等^[19]设计了一种双线圈式 EMAT,并且通过实验验证了该 EMAT 在 450 °C 高温下具备在线检测能力。何健鹏等^[20]设计了线圈自激励 EMAT,并对 EMAT 提高特性和指向性进行了研究,并发现随着提离距离的增加, A_0 兰姆波比 S_0 兰姆波呈现更快的衰减速率。

但是,航空铝合金构件形状复杂,即使采用小型化的仅线圈式 EMAT 对其进行检测,依然存在换能效率低、无法完全与试件贴合等诸多限制,而且在试件的高温成形阶段,仅线圈式 EMAT 不能进行连续监测,所以采用脉冲激光束激励超声波来解决这些问题。激光超声激发的多

种模式的超声波适用于试件表面及内部缺陷的检测,也可以对材料特性参数等进行测量,并且可应用于超高温、放射性室遥感、大型试样(如涡轮叶片)、航空和汽车工业无损检测、冶金、脆弱物质检测等^[21]。例如,利用激光超声对金属材料的弹性常数^[22]、超声波声场的指向性规律^[23]进行测量,对金属材料表面微缺陷进行定位分析与深度检测^[24-25],采用多模时域合成孔径聚焦算法得到更清晰的缺陷上部图像^[26],可以实现在高温金属材料的在线厚度测量^[27]。

近年来,激光超声与电磁超声结合的 Laser-EMAT 检测技术应用越来越广泛。Laser-EMAT 与 EMAT 相比,脉冲激光器的使用使检测技术具备激光超声的优点^[28-33]。但是在 Laser-EMAT 中,传统的接收 EMAT 通常采用永磁体或脉冲电磁铁提供偏置磁场。这会因永磁体磁力吸附铁磁性颗粒损坏 EMAT 线圈^[34],并且永磁体会与铁磁性金属材料吸附而难于快速分离与移动^[35],还存在探头体积过大不利于检测狭窄区域^[36]等问题。

激光-仅线圈式 EMAT 检测技术不仅结合了激光超声的优势,而且利用仅线圈式接收 EMAT 不易吸附铁磁性颗粒、可实现快速分离或移动和体积小等优点。本研究开展基于激光超声表面水膜约束机制的仅线圈式 EMAT 换能效率提升方法研究。以航空铝合金为研究对象,建立基于激光超声和洛伦兹力的仅线圈式 EMAT 检测过程有限元模型,设计双线圈式 EMAT,并通过进行铝合金检测实验,分析了仅线圈式 EMAT 的外径、内径、线径、层数和硅钢聚磁背板等因素对换能效率的影响规律。

1 铝合金金属材料激光-仅线圈式 EMAT 的检测过程有限元建模

1.1 铝合金金属材料 Laser-EMAT 检测原理

铝合金金属材料 Laser-EMAT 检测原理如图 1 所示。激光激励超声波的机制中热弹性机制下激发的纵波信号幅值远小于横波信号幅值^[37]。为了使激光超声激励出符合实验需要的纵波信号,本研究采用表面自约束机制激励超声波,通过在铝合金材料照射区的表面喷洒水膜来实现。当高功率密度的脉冲激光照射至铝合金表面时,金属吸收激光能量后使材料在超高应变速率下发生爆炸性汽化蒸发,在金属表面和约束层之间产生高压冲击波,从而在平行于冲击表面的平面里产生压应力场。由于纵波主要在纵向振动,压应力场使纵向振动增强,因此纵波的能量显著提高。而激光产生的超声体波传播至

试样上表面时,金属粒子高频振动切割由励磁线圈所提供的静态偏置磁场磁感线,励磁线圈电路如图 2 所示,在铝合金集肤层内产生高频源电流密度,交变源电流密度产生动态磁场,进而在接收 EMAT 线圈中产生开路感生电压^[38]。

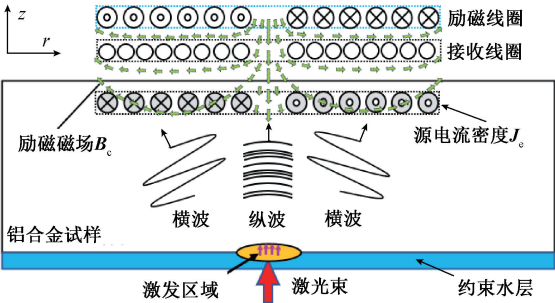


图1 激光电磁超声激光激励及线圈式 EMAT 接收机理
Fig. 1 Laser electromagnetic ultrasonic laser excitation and coil EMAT receiving mechanism

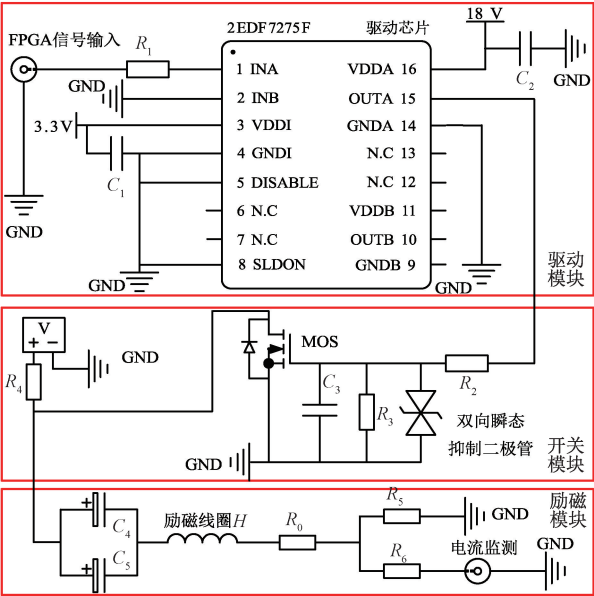


图2 仅线圈式 EMAT 励磁电路

Fig. 2 Drive module of coil type EMAT excitation circuit

基于洛伦兹力的仅线圈式 EMAT 超声波的接收机理过程如下式^[39]：

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B}_e \tag{1}$$

$$\frac{1}{\mu_e} \nabla^2 \mathbf{A}_\varphi - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial t} = -\mathbf{J}_e \tag{2}$$

$$\frac{1}{\mu_e} \nabla^2 \mathbf{A}_\varphi - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial t} + \frac{\sigma}{S_k} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{R_k} \mathbf{A}_\varphi ds = 0 \tag{3}$$

$$V_{in} = \frac{\int_{R_k} \left(\int_{l_c} - \frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial t} dl \right) d\Omega}{\int_{R_k} d\Omega} \tag{4}$$

式中： $\mathbf{B}_e$ 为励磁线圈中励磁电流产生的磁场强度， v 为铝合金粒子振动速度， $\mathbf{J}_e$ 为源电流密度， σ 为励磁线圈导线电导率， μ_e 为铝合金试样绝对磁导率， S_k 为接收线圈导线等效横截面积， R_k 为接收线圈的横截面区域， l_c 为接收线圈长度， V_{in} 为接收 EMAT 线圈中的开路感生电压。

1.2 激光-仅线圈式的 EMAT 的检测过程有限元模型

激光-仅线圈式 EMAT 的检测系统设计参数示意图如图 3 所示,其参数取值如表 1 所示。模型中的铝合金试样为 7075 锻造铝合金。铝合金材料的电导率、磁导率、杨氏模量、泊松比、密度等参数^[40-41] 如表 2 所示。

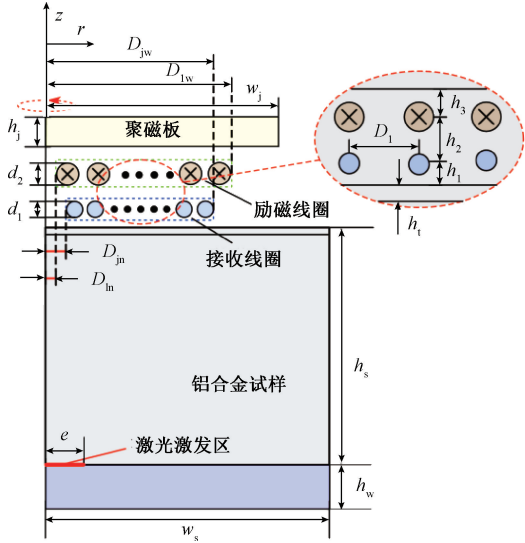


图3 激光-仅线圈式 EMAT 系统的设计参数示意图
Fig. 3 Optimal design of metal detection system based on laser-coil only EMAT

表 1 激光-仅线圈式 EMAT 的检测过程有限元模型参数
Table 1 Parameters of finite element model for the detection process of laser-coil only EMAT

参数	数值/mm	参数	数值/mm
励磁线圈内径 D_{in}	1.6	接收线圈线径 d_1	0.3
励磁线圈外径 D_{lw}	10.5	聚磁板半径 w_j	17.5
励磁线圈线径 d_2	0.4	聚磁板厚度 h_j	3
接收线圈提离 h_1	0.45	换能区域深度 h_1	0.05
励磁线圈与接收线圈间距 h_2	0.65	试样宽度 w_s	40
励磁线圈与聚磁板间距 h_3	0.7	试样高度 h_s	50
接收线圈内径 D_{jn}	1.7	激光光斑半径 e	4
接收线圈外径 D_{jw}	10	约束层深度 h_w	3

表 2 7075 铝合金材料特性参数

Table 2 7075 aluminum alloy material characteristic parameters

材料	电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	磁导率/1	杨氏模量/GPa	泊松比/1	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
7075 铝合金	2.49×10^7	1	71.1	0.33	2 810

采用有限元商业软件建立的激光超声激励仪线圈式 EMAT 接收系统的检测过程有限元模型如图 4 所示。为了减小计算量,采用二维轴对称有限元模型。在铝合金试样下表面设置边界热通量用以模拟激光能量的输入。铝合金试样、约束水层、硅钢聚磁背板^[42]及换能区域为映射网格划分,网格大小为 0.1 mm。空气域外再引入无限元域保证电磁场计算的准确度,空气域、无限元域、励磁线圈和接收线圈域采用自由三角形网格划分。其中空气域和无限元域的最大网格单元为 2 mm,励磁线圈和接收线圈域的最大网格单元为 0.02 mm。考虑到涡流、集肤、邻近效应及热膨胀的求解精度,在铝合金试样上端面、励磁线圈和接收线圈的导线边界及激光激发区均采用边界层进行网络细化。当最大瞬态计算时间步长为 0.01 时,有限元计算结果满足收敛要求。

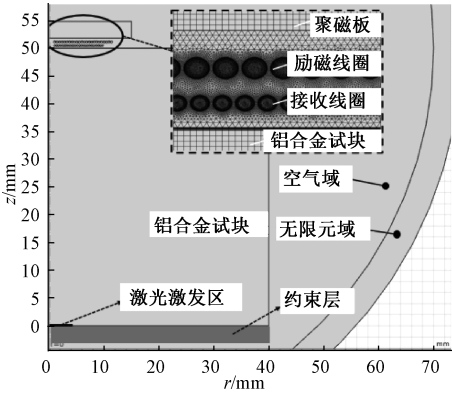


图 4 激光-仪线圈式 EMAT 的有限元模型

Fig. 4 Finite element model based on laser-coil only EMAT

1.3 有限元计算结果

图 5 为不同时刻在铝合金试样中的超声波传播瞬态云图。由图 5 可知,激光热源会激发多模式超声波,这也是激光超声的特点之一。其中,纵波垂直于试样表面向试样内传播,横波与纵波呈 30°~60°角向试样内传播,表面波沿着试样表面进行传播。

绘制励磁线圈产生的静态偏置磁场分布如图 6 所示。图 6(a)为二维轴对称磁感线分布图,图 6(b)为试件表面的磁通密度分布。其中 B_r 为 r 轴方向磁通密度; B_z 为 z 轴方向磁通密度; B_{norm} 为磁通密度模。由图 6(b)可知,越靠近励磁线圈的中心,水平方向的磁场与垂直方向的磁场比值越小,且接收线圈下方水平方向的磁通密度超过 1 T,可以提高纵波信号的接收效率。在距

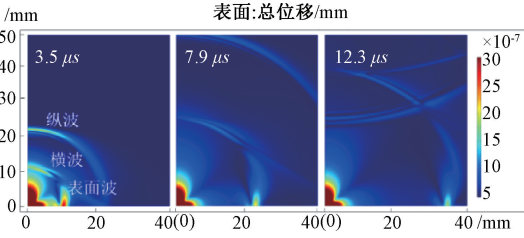
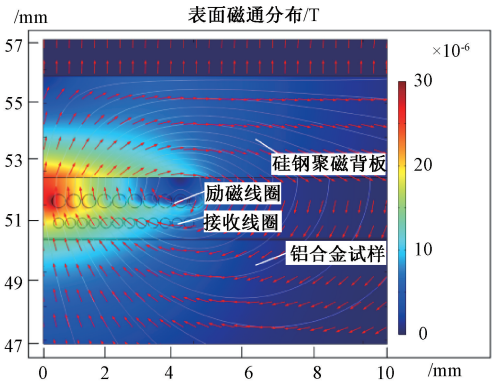


图 5 3.5, 7.9, 12.3 μs 超声波位移传播瞬态云图

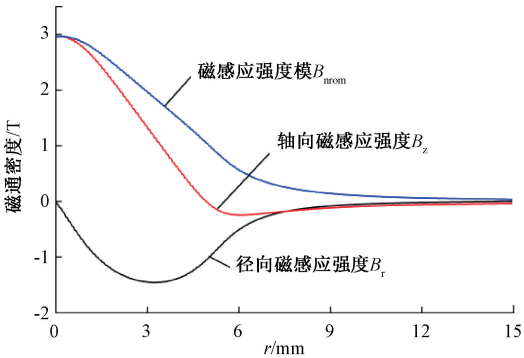
Fig. 5 3.5, 7.9, 12.3 μs Transient nephogram of ultrasonic displacement propagation

离励磁线圈中心 5 mm 以内,随着 r 向距离的增加,轴向磁感应强度依次减小,而径向磁感应强度则呈现为先增加后减小的趋势。径向和轴向磁感应强度可以同时为纵波和横波的接收提供静态偏置磁场。



(a) 铝合金试样磁感应强度分布

(a) Distribution of magnetic induction intensity of aluminum alloy sample



(b) 铝合金试样表面磁感应强度

(b) Surface magnetic induction strength of aluminum alloy sample

图 6 励磁线圈在铝合金试样中的磁感应强度分布

Fig. 6 Distribution of magnetic induction intensity of excitation coil in aluminum alloy sample

当激光热源产生的超声波在铝合金试样中传播到 EMAT 端的表面时,材料内部的质点振动位移,带正电的晶格在励磁线圈提供的偏置磁场作用下在铝合金试样表面产生源电流密度,如图 7 所示。交变的源电流密度可以在空气中形成动态磁场,并在接收 EMAT 线圈中感生出电动势,有无水膜约束的超声信号对比如图 8 所示。由图 8 可知,在水膜约束层的作用下,纵波信号幅值提高了 3 646.27%,而横波信号降低了 60.26%。可见水膜约束对于提高纵波的增益较大。且水膜表面约束下的纵/横波幅值比为 20.57,而激光热弹机制下的纵/横波幅值比仅为 0.22。因此,后续的仿真与实验都会在添加水膜约束的情况下进行。水膜参数^[37]中水膜厚度为 2 mm、动态粘度为 $1.4 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时达到最大约束作用,实验中采用针孔喷洒水膜,保证水膜参数时刻达到最大的约束作用以消除水膜参数对实验结果的影响。

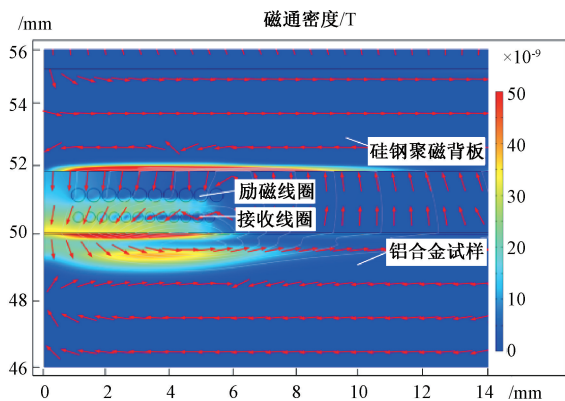


图 7 超声波振动在励磁线圈偏置磁场作用下在铝合金试样表面形成的源电流密度

Fig. 7 Source current density of ultrasonic vibration on aluminum alloy sample surface under the action of bias magnetic field of excitation coil

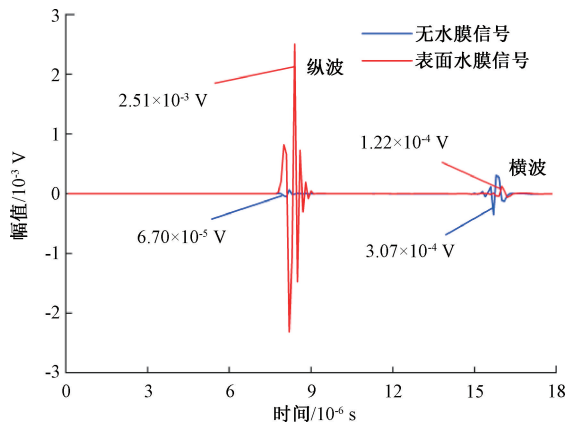


图 8 有无水膜约束对应的接收线圈中的开路感生电压

Fig. 8 Open circuit induced voltage in receiving coil corresponding to water free film constraint

2 仅线圈式 EMAT 设计参数对换能效率影响规律的有限元分析

2.1 励磁线圈的参数设计对换能效率的影响

在 1.3 节中,激光激励的超声波在有水膜约束时的纵波幅值明显,所以在后续实验中均以纵波幅值的大小作为衡量换能效率的指标。

当励磁线圈的外径、内径、励磁导线的直径以及励磁线圈的层数取不同的参数时,励磁线圈的内阻将发生变化,在恒压模型下,引起了线圈中励磁电流的改变,而励磁电流的大小将直接影响励磁线圈所产生的磁场强度。当接收线圈参数不变时,设置不同的励磁线圈设计参数,可得到励磁线圈不同参数下的感生电压信号如图 9 所示。

由图 9(a)和(b)可知励磁线圈的外径的增加对纵波信号的接收效率呈现消极作用,纵波信号的幅值持续减小。然而,随着励磁线圈的内径增加,纵波幅值则呈先增大后减小的趋势,在励磁线圈内径为 7 mm 时励磁线圈提供的磁场最强,宏观表现为接收到的纵波幅值最大。由图 9(c)和(d)可知,在励磁线圈线径为 0.55 mm,励磁线圈层数只有一层时换能效率最高。

由图 2 可知,模型中应考虑了励磁线圈电路自身的导线内阻 R_0 ,因此,励磁线圈所获得的功率随着励磁线圈等效电阻的变化而改变。这将导致仿真结果与实验结果不一致。因此需要对图 9 中的有限元计算结果进行电路等效。等效后的纵波信号如图 10 所示。

由图 10 可知,励磁线圈在外径,内径,线径,层数取不同参数时对应的纵波幅值规律不同。而励磁线圈外径、内径、线径、层数对应的纵波幅值的最大值相比于最小值分别提高了 13.52%、124.62%、21.58%、27.6%。由此可知,励磁线圈内径的改变对于纵波幅值的影响最大,造成这种结果的可能是内径增大,外径不变,线圈匝数减小导致的。

2.2 接收线圈参数设计对接收效率的影响

在恒压模型下,当励磁线圈参数不变时,设置不同的接收线圈设计参数,可得到接收线圈不同参数下的感生电压信号如图 11 所示。

由图 11 可知,接收线圈中外径、内径、线径对应的超声纵波信号最大值比最小值分别增加了 66.81%、94.57%、158.97%,由此可知,接收线圈的线径对于超声纵波信号接收影响较大。接收线圈的外径变化对纵波信号幅值的影响为先减小后增大,在接收线圈的外径为 15.6 mm 时接收到的信号幅值最大。在外径不变的情况

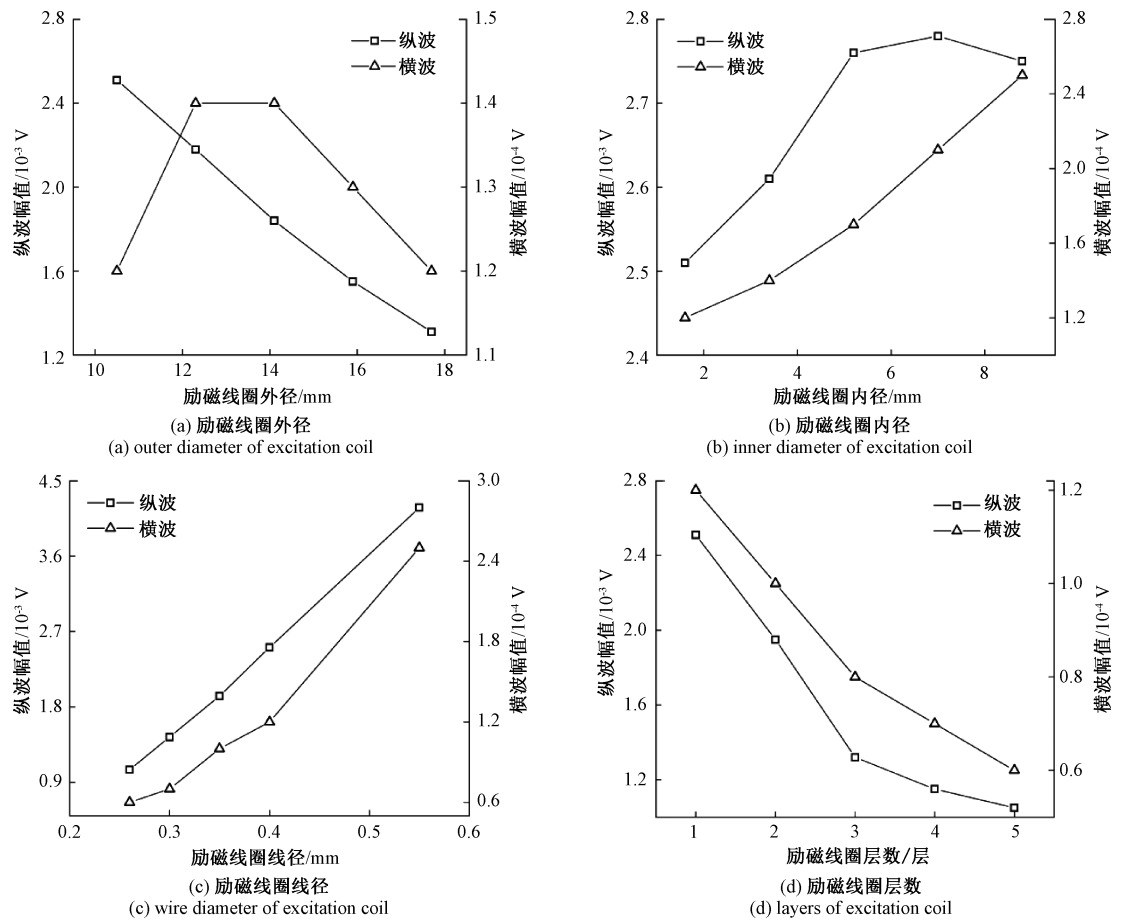


图 9 励磁线圈参数对接收 EMAT 的横波和纵波幅值的影响

Fig. 9 Influence of excitation coil parameters on amplitude of transverse and longitudinal waves receiving EMAT

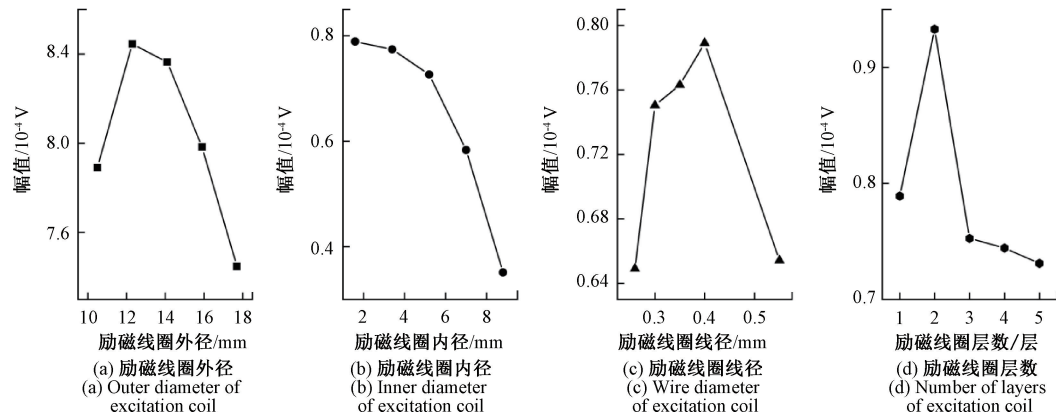


图 10 励磁线圈在不同参数下的纵波幅值曲线

Fig. 10 Amplitude curve of longitudinal wave of excitation coil under different parameters

下随着内径的增大,接收线圈的匝数减小,接收到的感生电压信号也逐渐减小。而随着接收线圈线径的增大,线圈中的感生电压幅值逐渐降低,在线径为 0.26 mm 时的纵波幅值最佳。

图 9、10、11 中的数据为理想条件下的仿真数据,在

不改变参数数值的情况下多次计算的结果一致。

2.3 硅钢聚磁结构对换能效率的影响

聚磁结构对永磁体式 EMAT 换能效率的增强作用已在文献中报道^[41],但硅钢聚磁背板对于线圈式 EMAT 的聚磁效果的研究鲜有报道。如图 12 所示为激光-仅线圈

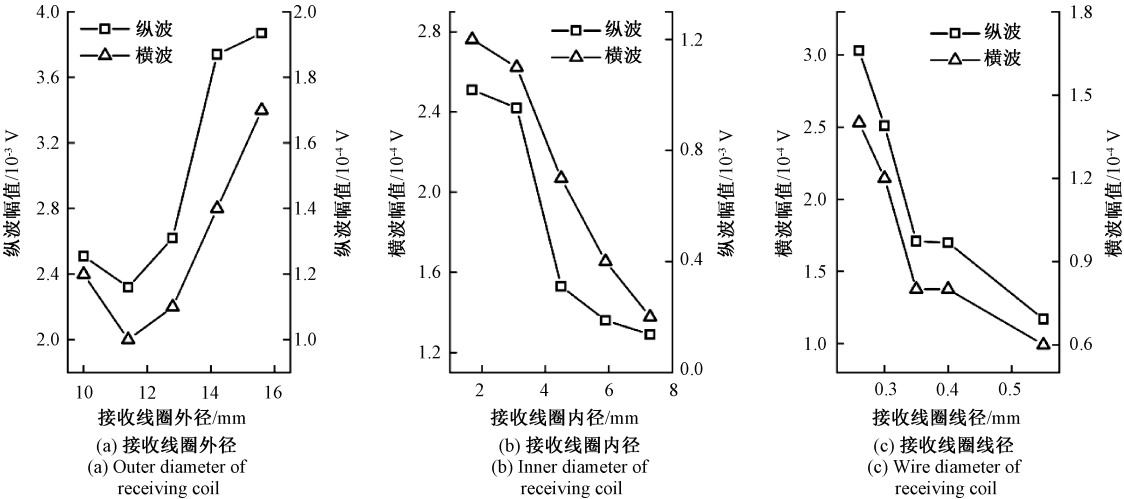


图 11 接收线圈参数对接收 EMAT 的横波和纵波幅值的影响

Fig. 11 Effect of receiving coil parameters on amplitude of transverse and longitudinal waves of receiving EMAT

式 EMAT 检测系统检测过程有限元模型在有无聚磁背板条件下的感生电压信号。由图 12 可知,在激光-仅线圈式 EMAT 的检测过程有限元模型的励磁线圈上方放置一块硅钢材质的聚磁背板可以有效增强工件表面及集肤层内的磁感应强度从而大幅提升接收线圈接收到的感生电压信号幅值。在励磁线圈上方添加了硅钢聚磁背板后,仿真条件下接收线圈所接收到的纵波信号增强了 50.30%。

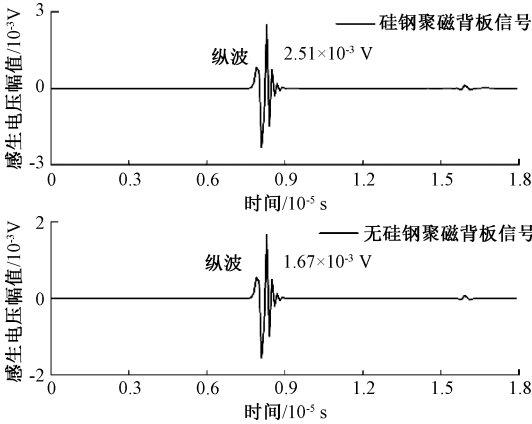


图 12 硅钢聚磁背板对超声回波信号的影响

Fig. 12 Influence of silicon steel magnetic backplate on ultrasonic echo signal

3 铝合金激光-仅线圈 EMAT 的验证实验

3.1 铝合金激光-仅线圈 EMAT 的验证实验系统

1) FPGA 的控制时序

激光-仅线圈式 EMAT 的验证实验系统中激光器、励

磁电路、数据采集卡需要同步触发,FPGA 作为可编程的逻辑阵列,可以解决实验系统中多路触发的需要,本实验中 FPGA 的控制时序图如图 13 所示。

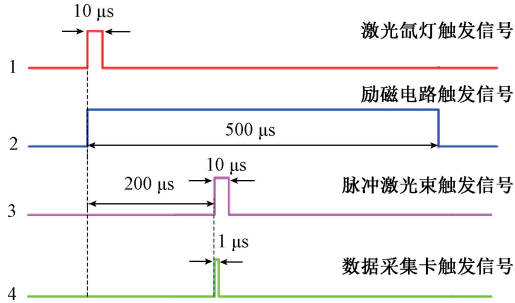


图 13 FPGA 引脚时序图

Fig. 13 FPGA pin timing diagram

在编程时设置 FPGA 中 31、32、33、34 引脚的脉冲触发信号的频率为 2 Hz,幅值为 3.3 V。其中 31 引脚为激光氙灯触发信号,32 引脚为励磁电路所需的脉冲信号,33 引脚为脉冲激光束触发信号,34 引脚为数据采集卡触发信号。31 与 33 引脚作为激光外控的触发信号,根据激光器外控需要满足的脉冲宽度要求,选取最小的脉冲宽度 10 μ s,并且激光器设备外控时,激光触发 Q 信号需要在激光氙灯触发信号 200 μ s 后触发才能保证激光器在外控情况下的正常工作。励磁电路脉冲信号的宽度选为 500 μ s,并且与激光氙灯信号同时触发,这样做不仅满足放电电容放电时间的要求,而且在放电电容放电趋于稳定时采集信号可以避免励磁电路电容充电时的冲击信号造成的盲区过大的问题。

2) 激光-仅线圈式 EMAT 的检测系统

激光-仅线圈式 EMAT 的检测系统如图 14 所示。

FPGA 控制激光器激发脉冲激光束,当激光辐射至铝合金试样表面产生的超声波传播至 EMAT 接收端时,接收线圈接收到感生电压信号,随后感生电压信号经过阻抗匹配和带通滤波器后进入放大器,放大器增益为 59 dB,经过放大的信号由数据采集卡接收传入 PC。

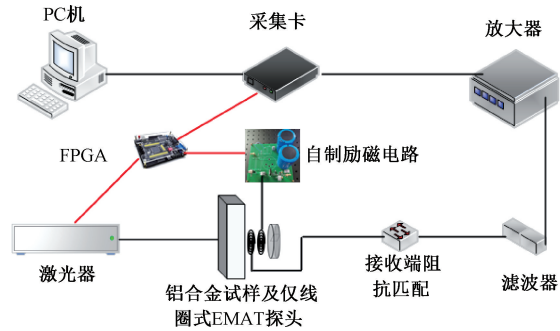


图 14 激光-仅线圈式 EMAT 的实验系统

Fig. 14 Experimental system based on laser-coil only EMAT

激光-仅线圈式 EMAT 的检测系统实验平台、铝合金试样、线圈式 EMAT 探头实物图如图 15 所示。激光激发区覆盖有一层水膜用以激励出更强的超声纵波,线圈式 EMAT 探头在励磁线圈背部放置硅钢聚磁背板用来加强偏置磁场,提高换能效率。



图 15 激光-仅线圈式 EMAT 的检测系统实验平台、铝合金试样及仅线圈式 EMAT 探头实物图

Fig. 15 Physical image of the test platform of the detection system based on laser-coil only EMAT, aluminum alloy sample and coil only EMAT probe

3.2 表面约束机制对超声回波信号的增强作用

如图 16 所示为激光-仅线圈 EMAT 的检测系统在有无水膜约束条件下接收到的超声信号。水膜约束下的一次纵波信号比无水膜约束下信号增强了 1 187.29%。纵波信号的信噪比由无水膜下的 6.3 dB 变为水膜下的 23.6 dB 增加了 17.3 dB。

硅钢的磁导率较高,所以用硅钢材料制作的聚磁背板将使励磁线圈背面原本在空气中分布的磁感线集中在硅钢聚磁背板中从而起到增强铝合金试样表面及近表面磁感应强度的作用。如图 17 所示为实验条件下激光-仅

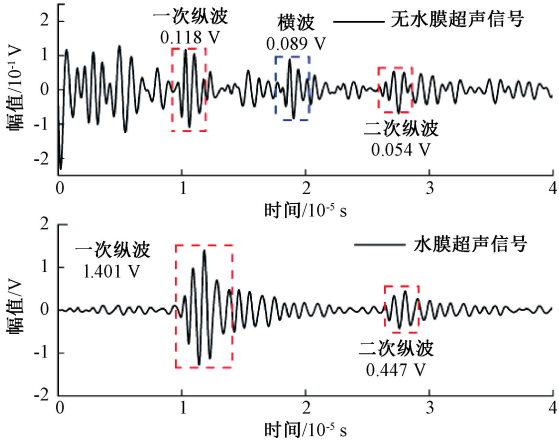


图 16 有无水膜的超声信号对比

Fig. 16 Comparison of ultrasonic signals with anhydrous film

线圈 EMAT 的检测系统在有无硅钢聚磁背板条件下接收到的超声信号。在励磁线圈背部添加硅钢聚磁背板可以显著提高接收线圈的接收效率。实验中添加硅钢聚磁背板后,超声纵波信号幅值增强了 37.76%。

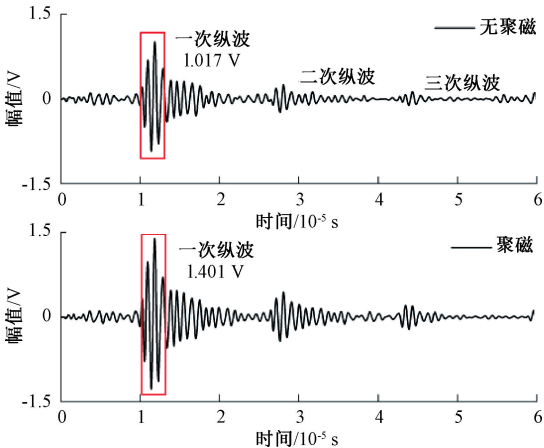


图 17 无聚磁与聚磁时的感生电压幅值

Fig. 17 Amplitude of induced voltage without and without magnetization

3.3 线圈式 EMAT 参数对接收效率的影响

为确保实验结果的准确性,对不同参数条件进行至少 3 次的重复实验,画出了数据误差棒的散点图。为了验证 2.1 节中励磁线圈参数对 EMAT 换能效率的影响规律,励磁线圈参数按照 2.1 节中的数值变化,通过激光-仅线圈 EMAT 的检测系统可得到励磁线圈参数变化对换能效率的影响规律如图 18 所示。

由图 18 可知,励磁线圈在不同参数下接收线圈中接收到的感生电压的信号幅值规律与仿真结果一致,但数据当量与仿真结果有差异,在实验中励磁线圈的外径、内径、线径、层数对应的一次纵波最大值相较于最小值增加

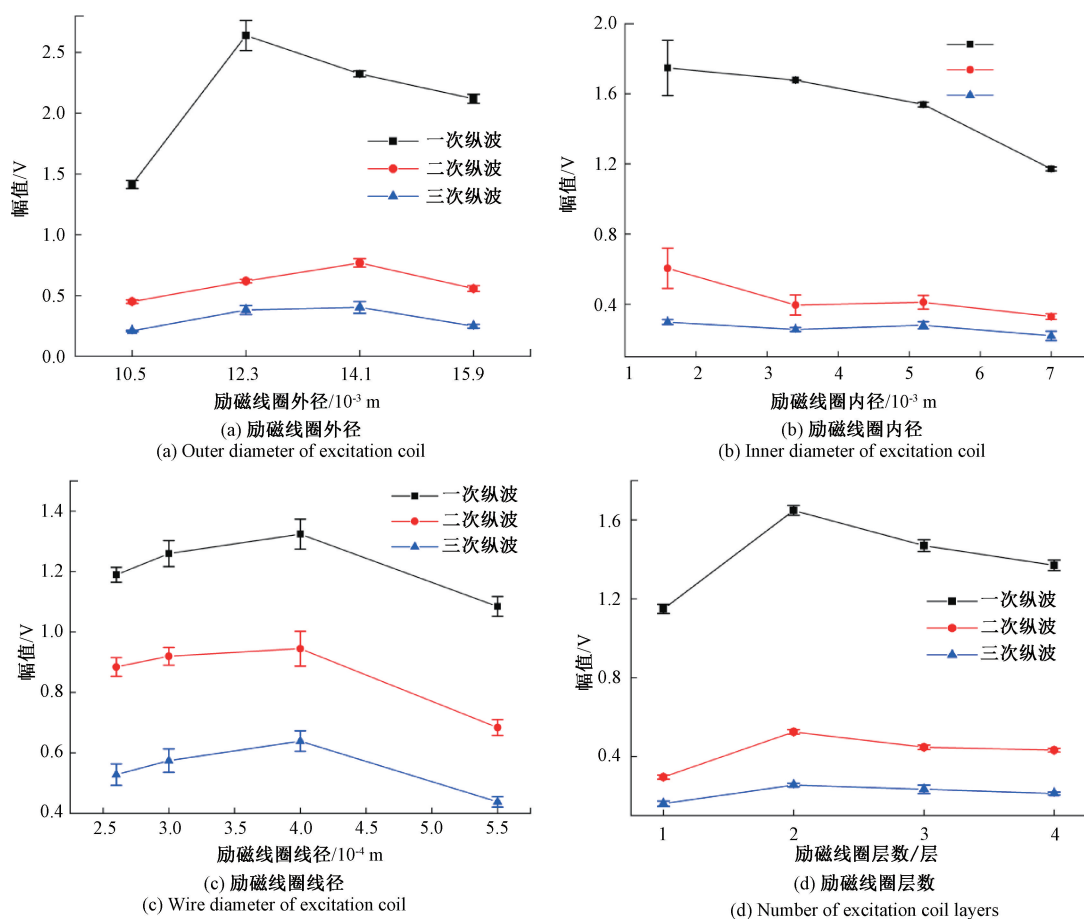


图 18 励磁线圈参数变化对换能效率的影响规律

Fig. 18 The influence of excitation coil parameter changes on the energy conversion efficiency

了 70.29%、46.41%、28.31%、43.65%，由此可知，励磁线圈的外径对于换能效率的影响较大。由图 18(c)可知，在励磁线圈的线径由 0.26 mm 增加到 0.4 mm 的过程中，感生电压信号幅值为先增大后减小，这可能是因为在线圈内外径不变的情况下，随着线径的增加，励磁线圈的匝数会有相应的减小。最主要的原因是励磁线圈内阻与电源电路内阻之间的比值变化。在图 18(d)中可以看出随着励磁线圈层数的增加，接收线圈中的感生电压幅值先增大后减小其主要原因与上述相同。

为了验证 2.2 节中接收线圈参数对 EMAT 换能效率的影响规律，接收线圈参数按照 2.2 节中的数值变化，通过激光-仅线圈式 EMAT 检测系统可得到接收线圈参数变化对换能效率的影响规律如图 19 所示。

由图 19 可知，在其他变量不变的条件，接收线圈在外径、内径、线径不同时接收到的纵波信号最大值比最小值增加了 25.11%、41.81%、136.96%，由此可以看出，接收线圈线径对于换能效率的影响较大。接收线圈的外径在 14.1 mm 时接收到的纵波信号最好，在内径为 1.7 mm 时效果最佳。

4 结 论

本研究提出了激光-仅线圈式 EMAT 技术，并研制了仅线圈式 EMAT 及其励磁与接收电路，与传统 Laser-EMAT 技术相比，可以解决永磁体吸附铁磁性颗粒导致线圈损坏、永磁体难以与铁磁性金属材料实现快速分离与移动、探头体积大难以检测狭窄区域等难题。本研究引入表面约束机制，将激光激励超声波的效率至少提高了 11 倍，通过对仅线圈式 EMAT 设计参数优化，将超声波的接收效率提高了 38%。下一步将研制由高温陶瓷层银线圈绕制而成的仅线圈式 EMAT，充分利用激光在高温条件下激励效率高且稳定、仅线圈式 EMAT 不会在高温环境下产生退磁或消磁等优点，将激光-仅线圈式 EMAT 技术应用于高温铸锻件持续在线无损检测与监测。

参考文献

- [1] 马力, 赵赫, 咎宇宁, 等. 耐热铝合金及其复合材料的制备、应用和强化机制[J]. 材料导报, 2021,

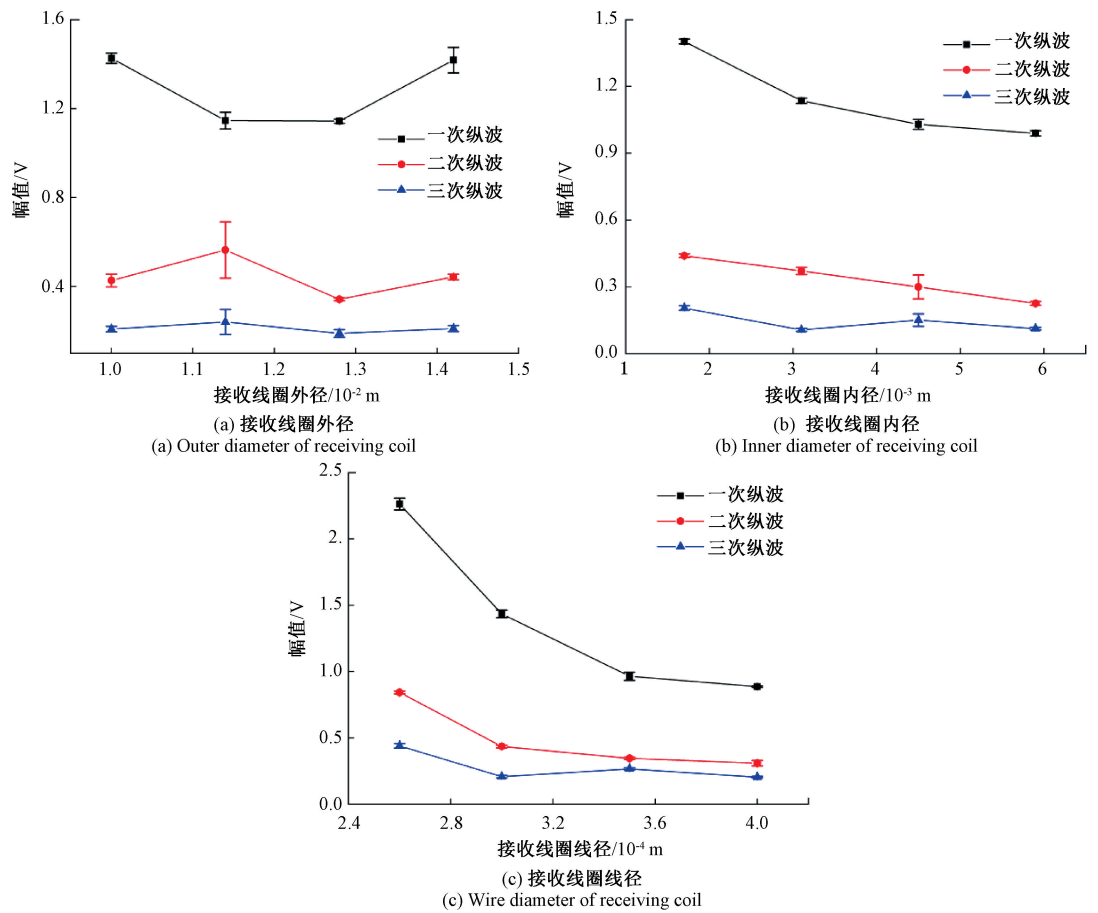


图 19 接收线圈参数变化对换能效率的影响规律

Fig. 19 The influence of the change of receiving coil parameters on the energy conversion efficiency

35(S1): 414-420.

MA L, ZHAO H, MIN Y N, et al. Preparation, application and strengthening mechanism of heat resistant aluminum alloy and its composites [J]. Materials Guide, 2021, 35 (S1): 414-420.

[2] 王付胜, 孔繁淇, 王文平, 等. 航空铝合金原位腐蚀疲劳性能及断裂机理[J]. 材料工程, 2022, 50(6): 149-156.

WANG F SH, KONG F Q, WANG W P, et al. In situ corrosion fatigue properties and fracture mechanism of aviation aluminum alloys [J]. Materials Engineering, 2022, 50 (6): 149-156.

[3] 孟莹, 付秀丽, 潘永智, 等. 考虑成形方向的航空铝合金修正本构模型的构建[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 78-85.

MENG Y, FU X L, PAN Y ZH, et al. Construction of modified constitutive model of aviation aluminum alloy considering forming direction [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54 (22): 78-85.

[4] 臧金鑫, 陈军洲, 韩凯, 等. 航空铝合金研究进展与发展趋势[J]. 中国材料进展, 2022, 41(10): 769-777, 807.

ZANG J X, CHEN J ZH, HAN K, et al. Research progress and development trend of aviation aluminum alloy [J]. China Materials Progress, 2022, 41 (10): 769-777, 807.

[5] SHAH Q M Z, CHOWDHURY M A, KOWSER M A J R I E. The aspect of the corrosion pitting with fretting fatigue on aluminum alloy: An aerospace structural failure or a nuclear safety phenomenon [J]. Results in Engineering, 2022: 100483.

[6] 石文泽, 陈巍巍, 卢超, 等. 高温铝合金电磁超声检测回波特性及因素分析[J]. 航空学报, 2020, 41(12): 396-409.

SHI W Z, CHEN W W, LU CH, et al. Echo characteristics and factor analysis of electromagnetic ultrasonic testing of high temperature aluminum alloy [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2020, 41 (12): 396-409.

[7] YU Y. Analysis on influencing factors and control measures of metal materials heat treatment deformation[C]. Journal

- of Physics; Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2194(1): 012050.
- [8] 刘素贞, 田钰霖, 张闯, 等. 铝合金拉伸塑性变形的非线性电磁超声检测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3153-3160.
- LIU S ZH, TIAN Y L, ZHANG CH, et al. Nonlinear electromagnetic ultrasonic testing of tensile plastic deformation of aluminum alloy [J]. Journal of Electrical Technology, 2020, 35 (15): 3153-3160.
- [9] 石文泽, 程进杰, 胡硕臻, 等. 脉冲压缩在铝薄板电磁超声导波检测中的应用[J]. 航空学报, 2022, 43(3): 517-528.
- SHI W Z, CHENG J J, HU SH ZH, et al. Application of pulse compression in electromagnetic ultrasonic guided wave testing of aluminum sheet [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2022, 43 (3): 517-528.
- [10] 郑浩, 周丽婷, 王湘明, 等. 电磁超声检测风机叶片缺陷的有限元仿真研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 24-29.
- ZHENG H, ZHOU L T, WANG X M, et al. Finite element simulation study on electromagnetic ultrasonic testing of fan blade defects [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44 (23): 24-29.
- [11] LI Y R, YAO E T, WANG P, et al. Method of measuring the stress of ferromagnetic materials based on EMAT and magnetic Barkhausen noise characteristic parameters [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 562: 169848.
- [12] PARRA-RAAD J, CEGLA F. On the steerability of phased array EMATs: The dipole element[J]. NDT & E International, 2022, 125: 102563.
- [13] 吴德会, 黄超, 杨凡, 等. 一种可抑制电磁冲击盲区的新型电磁超声检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 64-70.
- WU D H, HUANG CH, YANG F, et al. Research on a new type of electromagnetic ultrasonic testing technology that can suppress electromagnetic impact blind area [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 64-70.
- [14] PEI N, ZHAO B, BOND L J, et al. Analysis of the directivity of longitudinal waves based on double-fold coil phased EMAT[J]. Ultrasonics, 2022: 106788.
- [15] RIEGER K, ERNI D, RUETER D, et al. Unidirectional emission and detection of Lamb waves based on a powerful and compact coils-only EMAT[J]. NDT & E International, 2021, 122: 102492.
- [16] LIU T H, PEI C X, CAI R, et al. A flexible and noncontact guided-wave transducer based on coils-only EMAT for pipe inspection[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2020: 112213.
- [17] RIEGER K, ERNI D, RUETER D, et al. Noncontact reception of ultrasound from soft magnetic mild steel with zero applied bias field EMATs [J]. NDT & E International, 2022, 125: 102569.
- [18] 翟国富, 梁宝, 邓超然, 等. 耐高温双线圈结构电磁超声换能器设计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3943-3951.
- ZHAI G F, LIANG B, DENG CH R, et al. Design of electromagnetic ultrasonic transducer with high temperature resistant double coil structure [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 41 (11): 3943-3951.
- [19] ZHAI G F, LIANG B, LI X, et al. High-temperature EMAT with double-coil configuration generates shear and longitudinal wave modes in paramagnetic steel[J]. NDT & E International, 2022, 125: 102572.
- [20] 何健鹏, 徐科, 任威平. 线圈自激励电磁超声换能器设计及特性研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 134-140.
- HE J P, XU K, REN W P. Design and characteristics of coil self excited electromagnetic ultrasonic transducer [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (16): 134-140.
- [21] 谷艳红, 张振振, 高先和, 等. 激光超声结合电磁超声在铝板无损检测中的应用研究[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 422-428.
- GU Y H, ZHANG ZH ZH, GAO X H, et al. Research on the application of laser ultrasonic combined with electromagnetic ultrasonic in nondestructive testing of aluminum plate [J]. China Laser, 2020, 47 (5): 422-428.
- [22] YUAN W, LIU Z, LI Y, et al. Study on the Laser-EMAT integrated system for simultaneously measuring the width and depth of metal plate [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(5): 6270-6279.
- [23] 南钢洋, 王启武, 张振振, 等. 基于激光超声方法的钢轨缺陷检测(英文)[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 140-145.
- NAN G Y, WANG Q W, ZHANG ZH ZH, et al. Rail defect detection based on laser ultrasonic method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46 (1): 140-145.
- [24] SPYTEK J, AMBROZINSKI L, PELIVANNOV I. Non-contact detection of ultrasound with light-Review of recent

- progress[J]. *Photoacoustics*, 2022; 100440.
- [25] 陈龙, 刘星, 詹超, 等. 金属箔材弹性常数的激光超声测量方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 127-135.
CHEN L, LIU X, ZHAN CH, et al. Laser ultrasonic measurement of elastic constants of metal foil [J]. *China Laser*, 2020, 47 (11): 127-135.
- [26] 柴华淇, 陈友兴, 王召巴, 等. 基于透射法的激光超声声场指向性研究[J]. *光子学报*, 2023, 52(1): 63-73.
CHAI H Q, CHEN Y X, WANG ZH B, et al. Study on directivity of laser ultrasonic sound field based on transmission method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52 (1): 63-73.
- [27] YING K N, NI C Y, DAI L N, et al. Multi-mode laser-ultrasound imaging using time-domain synthetic aperture focusing technique (T-SAFT) [J]. *Photoacoustics*, 2022; 100370.
- [28] 刘昊, 刘吉, 武锦辉, 等. 基于光子多普勒系统的激光超声瑞利波特性研究[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(9): 82-87.
LIU H, LIU J, WU J H, et al. Study on the characteristics of laser ultrasonic rayleigh wave based on photon doppler system [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41 (9): 82-87.
- [29] YONG L, KITAZAWA S, PATEL R. Simple method of measuring thicknesses of surface-hardened layers by laser ultrasonic technique [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 60(7): 072002.
- [30] LI S Y, WANG H T, GUO R P, et al. Non destructive testing thickness measurement by laser ultrasound under high temperature[J]. *Optik*, 2018; S0030402618311021.
- [31] YE C, UME I C, ZHOU Y L, et al. Inspection of the residual stress on welds using laser ultrasonic supported with finite element analysis[J]. *Manufacturing Review*, 2019, 6:3.
- [32] 张鹏辉, 赵扬, 李鹏, 等. 基于有限元法的激光声磁检测系统优化研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(7): 185-193.
ZHANG P H, ZHAO Y, LI P, et al. Optimization of laser acoustic and magnetic detection system based on finite element method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51 (7): 185-193.
- [33] LUNN N, DIXON S, POTTER M D G, et al. High temperature EMAT design for scanning or fixed point operation on magnetite coated steel [J]. *NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation*, 2017, 89: 74-80.
- [34] WU Y X, HAN L, GONG H, et al. A modified model for simulating the effect of temperature on ultrasonic attenuation in 7050 aluminum alloy[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(8): 085003.
- [35] LIU J M, WU D, HU X M, et al. Study of spectral intensity of the laser ablated tungsten plasma and ablation mass at various laser spot sizes and laser fluence in vacuum environment[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2023, 199: 106569.
- [36] 邱佳明, 丁汉绅, 王淑娟. 电磁超声钢板测厚装置中脉冲电磁铁的设计[J]. *中国测试*, 2018, 44(5): 77-82.
QIU J M, DING H SH, WANG SH J. Design of pulse electromagnet in electromagnetic ultrasonic steel plate thickness measuring device [J]. *China Test*, 2018, 44 (5): 77-82.
- [37] SHI W Z, TONG Y SH, LU CH, et al. Improving laser-EMAT ultrasonic energy conversion efficiency using surface constraint mechanism [J]. *Ultrasonics*, 2022, 124: 106729.
- [38] 涂君, 蔡卓越, 张旭, 等. 磁力可控电磁超声换能器设计及特性[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(2): 46-52.
TU J, CAI ZH Y, ZHANG X, et al. Design and characteristics of magnetic controllable electromagnetic ultrasonic transducer [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57 (2): 46-52.
- [39] WANG S J, LI ZH CH, LI P ZH, et al. Numerical and experimental evaluation of the receiving performance of meander-line coil EMATs [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2014, 29(4): 269-282.
- [40] 丁华锋, 朱才朝, 宋朝省. 含缺陷铝合金厚板预拉伸断裂研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(12): 30-36.
DING H F, ZHU C CH, SONG CH SH. Dynasty study on pre tensile fracture of aluminum alloy thick plate with defects [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52 (12): 30-36.
- [41] ZHANG K X, LV G L, GUO SH F, et al. Evaluation of subsurface defects in metallic structures using laser ultrasonic technique and genetic algorithm-back propagation neural network[J]. *NDT & E International*, 2020, 116: 102339.
- [42] REN W P, HE J P, DIXON S, et al. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018; S0924424717315303.

作者简介



now a M. Sc. candidate of Nanchang Aviation University. His main research interest includes laser electromagnetic ultrasonic testing.



Shi Wenze received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2009, received his M. Sc. degree

郭伟,2021 年于南昌航空大学获学士学位,现为南昌航空大学硕士研究生,主要研究方向为激光电磁超声检测。

E-mail: 1107289344@qq.com

Guo Wei received his B. Sc. degree from Nanchang Aviation University in 2021. He is

石文泽,2009 年于内蒙古工业大学获学士学位,2011 年于中南大学获硕士学位,2017 年于中南大学获得博士学位,现为南昌航空大学副教授,主要研究方向为超声检测新技术。

E-mail: 70658@nchu.edu.cn

from Central South University in 2011 and received his Ph. D. from Central South University in 2017. He is now an associate professor at Nanchang Hangkong University. His main research interest includes new ultrasonic testing technology.



卢超(通信作者),1995 年于江西师大获学士学位,1998 年于中国科技大学获硕士学位,2009 年于中国铁道科学研究院获博士学位,现为南昌航空大学教授,主要研究方向为超声检测及仪器。

E-mail: luchao1at@163.com

Lu Chao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangxi Normal University in 1995, received his M. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 1998, and received his Ph. D. degree from China Academy of Railway Sciences in 2009. He is now a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and instrument design.