

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614926

碳钢薄板对接激光焊缝的 Laser-EMAT 在线检测技术研究*

陈泽鸿^{1,2}, 石文泽^{1,2}, 卢 超^{1,2}, 肖佳辰^{1,2}, 易伟超^{1,2}

(1. 江西智能无损检测创新中心 南昌 330096; 2. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063)

摘 要:针对碳钢薄板激光焊接过程中,焊缝缺陷在线检测易受振动干扰且在有限检测空间下,传统无损检测方法难以实现高可靠性实时监测的问题,提出了一种基于激光激励超声波与双电磁超声传感器(EMAT)接收超声波的焊缝在线检测方法。通过建立激光电磁超声“一发双收”焊缝检测过程有限元模型,以含直径 2 mm 圆孔缺陷的 4 mm 厚碳钢对接焊缝为检测对象,分析了激光光斑形状与尺寸、EMAT 线圈匝数与间距、激励点与接收点距离等参数对超声波透射系数的影响,并进行了实验验证。单因素分析表明,片状光斑的激发效率优于圆形光斑,且线圈匝数为 4、匝间距为 2.0 mm、激励点距两接收 EMAT 分别为 11 和 36.4 mm 时,缺陷识别灵敏度较高。在此基础上,采用正交试验设计获得最佳参数组合,搭建了可移动式激光电磁超声检测系统,并开展了对含不同直径圆孔的对接焊缝检测实验。实验结果表明,优化后激光电磁超声换能器(Laser-EMAT)系统对 $\Phi 3$ mm、 $\Phi 2$ mm 圆孔的透射系数下降幅度为优化前的 1.53 和 3.96 倍,缺陷检测敏感性更高,如缺陷引起的偏离系数为优化前的 1.91 和 4.98 倍,检测更为可靠,如无缺陷区信号变异系数由 6.77% 降至 5.41%;优化后的 Laser-EMAT 系统对直径 $\Phi 1$ mm 圆孔的透射系数表现为偏离度 0.62 和透射系数降幅 3.36%,虽未达到可靠检出要求,但消除了最差参数组合对应的反向波动,显著提升了检测灵敏度与可靠性。

关键词: 激光对接焊缝; Laser-EMAT; 参数优化; 正交试验; 缺陷检测

中图分类号: TH878 TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on Laser-EMAT online detection technology for laser butt welds of carbon steel thin plates

Chen Zehong^{1,2}, Shi Wenzhe^{1,2}, Lu Chao^{1,2}, Xiao Jiachen^{1,2}, Yi Weichao^{1,2}

(1. Jiangxi Intelligent Non-Destructive Testing Innovation Center, Nanchang 330096, China; 2. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Aiming at the problem that online detection of weld defects during laser welding of carbon steel thin plates is susceptible to vibration interference, and traditional non-destructive testing methods fail to achieve highly reliable real-time monitoring in confined detection spaces, a novel online weld detection method is proposed based on laser-excited ultrasonic waves and ultrasonic reception by dual electromagnetic acoustic transducer (EMAT). A finite element model for the ‘one-transmit and two-receive’ weld detection process of laser electromagnetic ultrasound is established. Taking 4 mm-thick carbon steel butt welds with 2 mm-diameter circular hole defects as the detection objects, the effects of parameters such as laser spot shape and size, number of turns and spacing of EMAT coils, and distance between the excitation point and receiving points on the ultrasonic transmission coefficient are analyzed, followed by experimental verification. Univariate analysis indicates that the excitation efficiency of a sheet-shaped spot is superior to that of a circular spot, and higher defect identification sensitivity is achieved when the coil has 4 turns with a turn spacing of 2.0 mm, and the excitation point is positioned at distances of 11 and 36.4 mm from the two receiving EMATs, respectively. On this basis, the optimal parameter combination is obtained through orthogonal experimental design, and a mobile laser-electromagnetic ultrasonic testing system is established, and experiments are conducted on butt welds containing circular holes of different diameters. Experimental results show that

收稿日期: 2026-02-02 Received Date: 2026-02-02

* 基金项目: 江西省重点研发计划(20223BBE51034)、江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20225BCJ23023)、江西省杰出青年基金(20212ACB214010)项目资助

for the optimized laser electromagnetic acoustic transducer (Laser-EMAT) system, the attenuation amplitudes of the transmission coefficient for $\Phi 3$ mm and $\Phi 2$ mm circular holes are 1.53 times and 3.96 times those before optimization, respectively, indicating higher defect detection sensitivity. For example, the deviation coefficient caused by defects is 1.91 times and 4.98 times that before optimization, realizing more reliable detection. For instance, the signal variation coefficient in the defect-free area decreases from 6.77% to 5.41%. The optimized Laser-EMAT system yields a deviation degree of 0.62 and a 3.36% reduction in the transmission coefficient for a $\Phi 1$ mm-diameter circular hole. Although these results do not meet the requirements for reliable detection, the system eliminates the negative fluctuations corresponding to the worst parameter combination and significantly improves the detection sensitivity and reliability.

Keywords: laser buff weld; Laser-EMAT; parameter optimization; orthogonal experiment; defect detection

0 引言

激光焊接作为一种高效焊接技术,因其具有灵活性好、效能突出、焊接速度快及能量密度高等优点^[1-2],目前已广泛应用于汽车^[3]、船舶^[4]等领域。在焊接过程中材料内部缺陷及复杂的制造环境等因素极易对焊接质量产生影响^[5]。传统的离线质量检测方法通常成本较高,且耗时耗材,不利于提高生产效能,因此需要研发实时焊接质量在线无损检测技术,为对焊接质量有效控制提供数据支持^[6-7]。常见的焊缝缺陷检测方法包括超声检测、涡流检测、射线检测等。压电超声接触式检测依赖耦合剂,现场待测工件振动或快速移动会造成探头接触不良^[8]。涡流检测仅对表面/近表面缺陷有效,而且振动环境使其信号不稳定^[9];射线检测难以满足工件在线原位实时检测的需求。

激光超声检测(laser ultrasonic testing, LUT)是利用激光激发超声波和干涉仪接收超声波^[10-11],能够在数米外将激光聚焦于焊缝附近,精确控制超声波的产生位置,实现非接触式、远距离、大面积快速扫描检测^[12],具有较高的检测带宽和较高的空间分辨力^[13]。但是,待测工件处于振动条件下会影响激光干涉仪正常接收到超声回波信号,导致信噪比下降甚至难以正常实施检测。Lévesque等^[14]针对电弧焊对接焊缝缺陷检测的需求,提出将激光超声技术与合成孔径聚焦技术相结合的检测方案,实验表明该技术可检测出高度2 mm的人工刻槽缺陷,并且在1 kHz激光重复频率下可实现1 cm/s的沿焊缝检测速度。Yamamoto等^[15]为解决激光超声检测技术对厚度超100 mm、高温环境下厚焊缝检测灵敏度不足的问题,开发了改进型合成孔径聚焦信号处理技术,成功检测到106 mm深处 $\Phi 1.5$ mm的气孔缺陷。王建超等^[16]利用激光超声检测技术,可有效检出液体火箭发动机推力室再生冷却铣槽结构中长2 mm、宽0.6 mm的钎焊缺陷。

与激光干涉仪相比,双电磁超声传感器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)设备简单、非接触^[17]、无需耦合剂且对于检测表面粗糙形貌要求不高^[18-19],具有更高的环境适应性和稳定性,适合激光焊接场景。Berniga等^[20]构建了一套用于检测拼焊板激光焊缝的超声系统,该系统利用SH模态成功识别了未熔合、

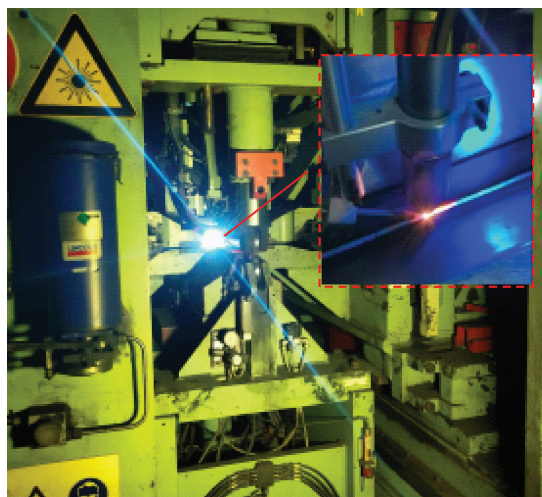
未焊透、错边及裂纹等多种典型缺陷,并深入研究了这些不连续性对反射信号的影响机制。刘明远等^[21]基于磁致伸缩电磁超声对钢板焊缝中缺陷进行检测,优化了曲折线圈结构参数,证明了电磁超声导波具备检测焊缝中毫米级缺陷的能力。申鑫等^[22]设计了一种新型双弧V型点聚焦电磁超声换能器结构,有效提升了超声声束的方向性与聚焦能力,缺陷检出能力达到了毫米级。激光电磁超声利用激光激发超声波、电磁超声换能器接收超声波,能够实现高精度、高效率的在线快速检测^[23],将激光电磁超声应用于激光在线焊接以及工件振动等复杂环境下的无损检测,具有重要的技术优势。张鹏辉等^[24]通过有限元模型分析了脉冲激光与电磁超声换能器之间的匹配关系对检测灵敏度的影响,为研究激光电磁超声检测系统的优化设计提供了设计依据。Sgarbi等^[25]针对优化后激光电磁超声换能器(laser electromagnetic acoustic transducer, Laser-EMAT)检测系统采集的冷热态钢坯检测数据存在噪声干扰和数据量大问题,设计并实现了包括数据缩减和去噪的预处理流程,为后续缺陷定位和分类提供了可靠的数据基础。

目前,单个检测传感器自发自收或一发一收为常规检测模式。但当待测试样处于振动状态或换能区域物理特性参数存在差异时,接收传感器易受现场环境电磁噪声干扰、振动引起的信号漂移与换能效率降低等,足够的信噪比难以保证。相关研究表明,采用双接收传感器采集两路信号可实现差分抑制共模干扰的效果,降低由于传感器脱离和换能区域物理特性不一致等因素造成的困扰。例如,Huang^[26]提出了基于双通道干涉仪接收的激光超声检测方法,通过对两测点超声波位移信号进行差分处理,有效抑制了试样振动及表面反射率不均带来的共模噪声,较传统单通道干涉仪信噪比提升10~20 dB。吴德会等^[27]针对检测器振动、磁隙变化等共模噪声源,设计了双传感器差分峰值侦测结构,噪声水平降至传统单个传感器的5%~26%,检测灵敏度提升2倍,表明双传感器差配置有利于提高信噪比。Zeng等^[28]为了有效检测焊缝内部缺陷,分别采集焊缝上下两侧的超声波信号进行B扫成像,结果表明图像差异可以有效反映焊缝内部缺陷情况。由此可见,“一发双收”检测模式在提高缺陷检测灵敏度和适用于振动、环境噪声干扰等场景

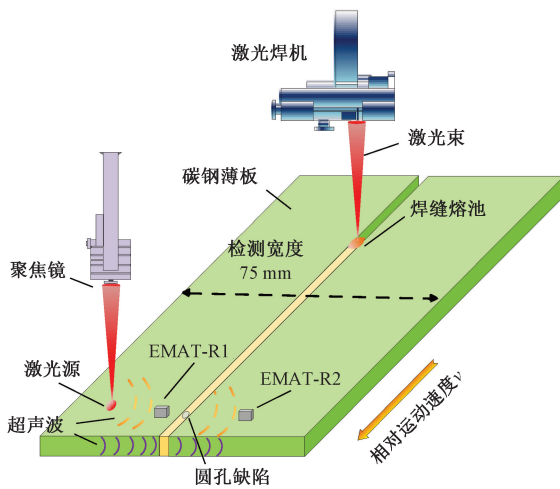
具有显著优势。

对于碳钢薄板对接激光焊缝在线检测需求,即在 75 mm 有限空间及存在薄板振动等复杂工况下,电磁超声传感器存在布置空间不足而导致严重的始波盲区效应,难以区分有效超声波信号;激光超声检测因薄板振动会导致激光光路偏移,干涉仪接收信号时干涉条纹剧烈跳动,信噪比降低,无法稳定接收超声波。综上所述,激光电磁超声检测技术用于激光焊接在线检测场景具有研究价值。基于此,为提升焊缝检测效果,本研究设计了激

光激励、双 EMAT 接收的配置形式,如图 1 所示,由于激光光源与 EMAT 的参数匹配直接影响缺陷检测灵敏度,本研究进一步开展碳钢薄板对接激光焊缝激光电磁超声检测工艺参数优化研究,通过建立“一发双收”激光电磁超声检测有限元模型,分析激光光斑形状与尺寸、EMAT 设计参数、激励-接收点距离等参数对超声波透射衰减系数的影响,并基于正交试验设计实现最优化参数的选取。通过实验分析优化后激光电磁超声系统的缺陷检测能力,验证对焊缝缺陷检测灵敏度与可靠性的提升作用。



(a) 现场图
(a) On-site diagram



(b) 模型图
(b) Model diagram

图 1 激光焊接现场及检测示意图

Fig. 1 Diagram of laser welding site and detection

1 基于激光电磁超声的对接焊缝检测过程有限元建模

1.1 激光热烧蚀激发超声波机理

当脉冲激光功率密度超过材料损伤阈值时,表层材料吸收大量热能,发生熔化、气化乃至等离子体化,伴随部分粒子的喷射,同时产生反冲力作用于材料表面,从而激发出超声波。当入射功率密度达到 MW/cm^2 量级时,金属材料将进入烧蚀机制,如图 2^[29] 所示。

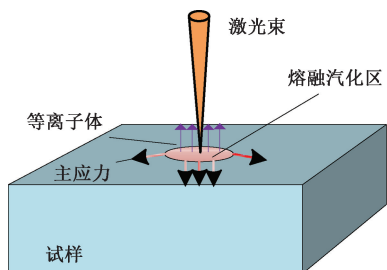


图 2 激光超声热烧蚀机制

Fig. 2 Thermal ablation mechanism of laser ultrasound

在烧蚀机制中,激发超声波依赖于高强度脉冲激光对材料表面实施的快速局部烧蚀作用。脉冲激光照射材料表面时,其光束波长与材料特性共同决定了能量的吸收情况:一部分激光被表面反射或散射,另一部分可能透射穿过材料。被吸收的激光能量转化为热能,引起材料温度上升;一旦温度超过材料的汽化阈值,烧蚀现象随即发生。对于常见金属而言,烧蚀过程的阈值强度 I_c 通常高于 $10^7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。在忽略热传导的情况下,脉冲激光辐照区域内金属材料达到汽化状态所需要的功率密度的近似表达式^[30]为:

$$I_c \geq 2L\rho\kappa^{0.5}\tau^{0.5} \quad (1)$$

式中: L 、 ρ 、 κ 是蒸发物质所需的潜热,材料密度和物质的热扩散系数; τ 为激光束的脉冲持续时间。

虽然烧蚀机制可能造成表层损伤,但能激发更强超声场;在复杂环境中,该机制可显著抑制背景噪声,输出高信噪比的检测信号,更适用于缺陷识别^[31],并可应用于原材料生产、零部件初加工等特殊过程监测场景^[32]。对于绝大多数激光焊接产品,如汽车板、结构件,后续通常伴有涂装、镀层等工艺,可有效覆盖烧蚀机制产生的微观痕迹;此外,烧蚀点通常被严格控制在焊缝区域或检测路径范围内,该区域本身即为材料性能的过渡区,微米级

损伤不影响工件的整体结构完整性与服役性能。

1.2 EMAT 接收超声波原理

图 3 为 EMAT 的配置形式及其接收机理,EMAT 由永磁体、线圈和试样组成。当激光激励的超声波传播至线圈正下方时,试样表面微粒振动并切割磁力线,在永磁体提供的静态偏置磁场 B_0 的作用下,根据法拉第电磁感应定律,试样表面的集肤层中产生源电流密度 J_s ,并在试样周围形成动态磁场 B_d 。最后,在曲折线圈中形成开路感应电压 V_{in} ,作为超声信号被接收^[23]。

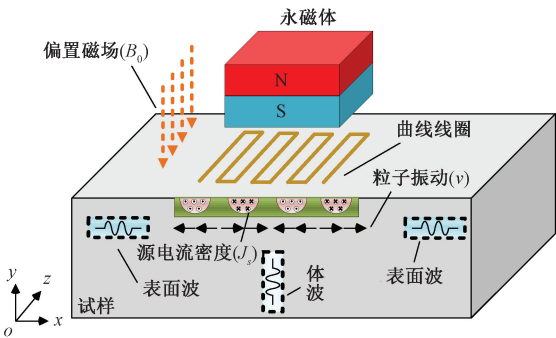


图 3 EMAT 的配置形式及其接收机理

Fig. 3 Configuration forms and receiving mechanisms of EMAT

1.3 激光电磁超声对接焊缝检测有限元模型

本研究在烧蚀机制下,设置“一发双收”形式,利用脉冲激光激发超声波信号,两个 EMAT 接收并处理信号,获取超声导波经过焊缝及缺陷后的透射系数,从而判断工件缺陷信息。

根据激光源形式的不同选择激励分布函数,若选用线状光斑作为激励源,且脉冲激光的时间和空间函数是高斯函数,热源等效的边界载荷可表示^[33]为:

$$F_A(x,t) = \frac{[I_0(1-R)p(x)q(t)]^2}{\rho[L + C(T_v - T_0)]^2}$$
 (2)

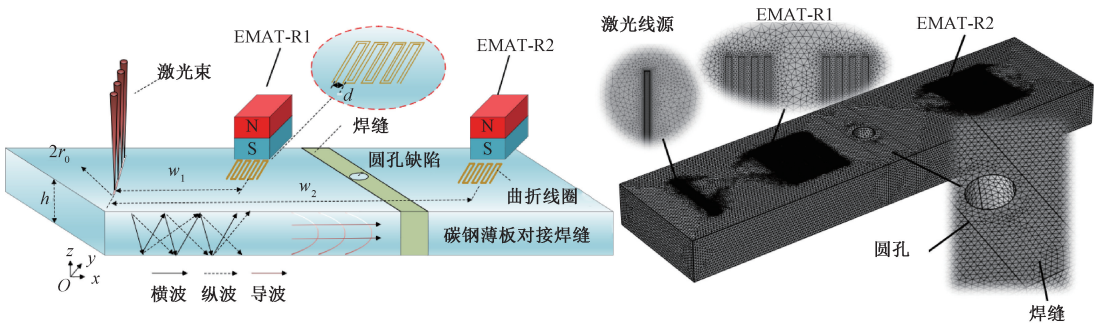
式中: C 为材料的比热容; T_v 表示材料的汽化点; T_0 表示初始温度; I_0 是入射激光强度; R 是反射率。

$$p(x) = \exp\left[-2\left(\frac{x}{r_0}\right)^2\right], \quad y_1 \leq y \leq y_2$$
 (3)

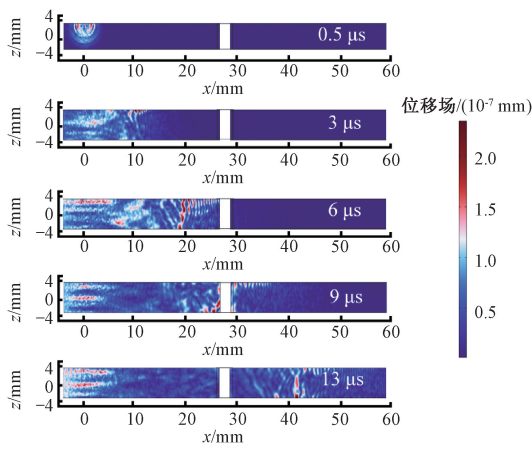
式中: $p(x)$ 是激光的空间分布; r_0 是激光线源的半宽; t 是时间; $y_1 \leq y \leq y_2$ 定义了线源的长度。

$$q(t) = \exp\left[-2.7726 \frac{(t - \tau)^2}{\tau^2}\right]$$
 (4)

式中: $q(t)$ 是激光的时间分布。分布图像如图 4 所示。



(a) Laser-EMAT 焊缝检测示意图及网格划分
(a) Laser-EMAT weld inspection schematic and meshing diagram



(b) 超声波瞬态传播云图
(b) Ultrasonic transient propagation contour plot

图 4 Laser-EMAT 碳钢薄板对接焊缝检测过程有限元模型

Fig. 4 Finite element model of Laser-EMAT detection process for carbon steel thin plate butt weld

有限元仿真采用三维模型进行计算,本研究选取碳钢薄板作为实验对象,将钢板总长和总宽分别设置为 61 和 11 mm,厚度 h 为 4 mm,焊缝区域宽度为 3 mm,在焊缝区设置直径 2 mm 的圆孔缺陷。激光源 Laser-T 与电磁超声换能器 EMAT-R1 间距 w_1 ,与 EMAT-R2 间距 w_2 ,线圈匝间距 d ,线圈匝数 N ,模型侧面边界均设置为低反射边界,以避免导波在模型边界发生反射影响接收到的信号,如图 4(a) 所示,其他材料参数如表 1 所示。为了简化计算,在激励源区通过施加边界载荷等效热源;EMAT 接收超声信号时则在工件上分别布置两个接收区域;将曲折线圈建模为多根平行线状区域,由于相邻导线电流方向相反,接收时总感应电压为各匝感应电压的代数和。通过计算奇数根与偶数根区域的位移差值,模拟曲折线圈的输出信号,因此有限元仿真主要通过固体力学进行瞬态研究。

表 1 碳钢薄板的材料参数

Table 1 Material parameters of carbon steel thin plate

材料属性	参数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 850
比热容 $C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K})$	475
热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}$)	44.5
汽化潜热 $L/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	6 259
气化点 T_v/K	3 100
杨氏模量/GPa(母材区)	200
杨氏模量/GPa(热影响区)	180
反射率 R	0.64
泊松比	0.3
初始温度 T_0/K	293

在网格划分中,按照最大网格单元大小与波长的关系进行划分,网格大小为波长的 $1/5\sim 1/10^{[34]}$ 。试样为自由四面体网格,激光激励区域以及 EMAT 换能区域为自由三角形网格。试样母材区及焊缝区的最大网格尺寸均为 0.27 mm,激励和接收信号区的最大网格尺寸为 0.03 mm。考虑到热源的求解精度,在激光激发区域采用边界层进行细化。对于时间步长 Δt ,由于激光作用的脉冲上升时间是纳秒级,因此 Δt 选取 1 ns 以提供足够的分辨率。

如图 4(b) 为不同时刻激光激励后,导波在试样 $z-x$ 截面传播时的位移云场图。0.5 μs 时刻为激光脉冲辐照在试样表面激发出表面源,初始位移主要集中在表面并开始向试样内部传播。随着表面源激发的纵波与横波在试样上下表面反射叠加,形成导波,形成不同模态的超声波;6 μs 时导波传播至缺陷处;9 μs 时导波经过缺陷相互

作用,即发生散射或模态转换;13 μs 导波传播至远场,进入稳定阶段,模式的速度和位移分布不再明显变化。

当焊缝结构对称且材料均匀时,激光激励出超声波传播到焊缝区域后,对焊缝上下两侧的影响是近似的。在无缺陷工况下,两个 EMAT 接收到的信号幅值差异主要来自工件材料衰减;当焊缝中存在缺陷时,会破坏结构的对称性;缺陷对超声波产生反射、散射、模态转换或衰减,并且对两个传播路径的影响是不同的。这将导致一个传感器接收到的信号显著减弱,而另一个传感器接收到的信号变化较小,此时,两个信号的幅值差会明显增大。因此,分别将 EMAT-R1 与 EMAT-R2 接收到的信号峰-峰值进行比值,可以得到导波经过焊缝时透射部分的能量,如图 5 为利用激光片状光源激发超声波、两个 EMAT 分别接收到的信号。

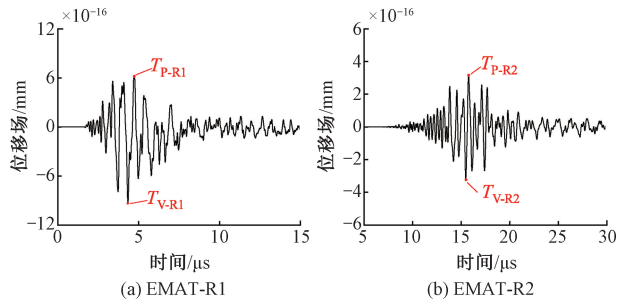


图 5 EMAT-R1 和 EMAT-R2 接收到的仿真导波信号
Fig. 5 Simulated guided wave signals received by EMAT-R1 and EMAT-R2

故可以利用透射系数进行计算,如式(5)所示。

$$K = \frac{T_{P-R2} - T_{V-R2}}{T_{P-R1} - T_{V-R1}} = \frac{A_{R2}}{A_{R1}}$$

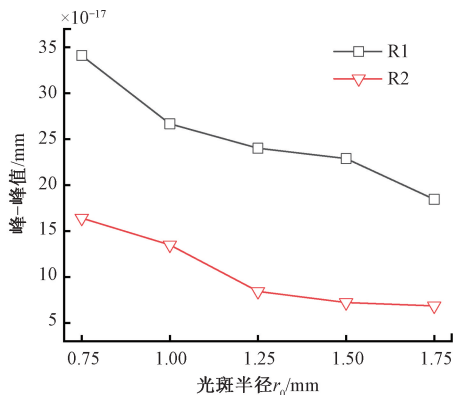
(5)

其中, T_{P-R1} 和 T_{V-R1} 分别为 EMAT-R1 接收信号的波峰和波谷幅值, T_{P-R2} 和 T_{V-R2} 分别表示 EMAT-R2 接收信号的波峰和波谷幅值, A_{R1} 定义为 EMAT-R1 接收信号的峰-峰值, A_{R2} 定义为 EMAT-R2 接收信号的峰-峰值。

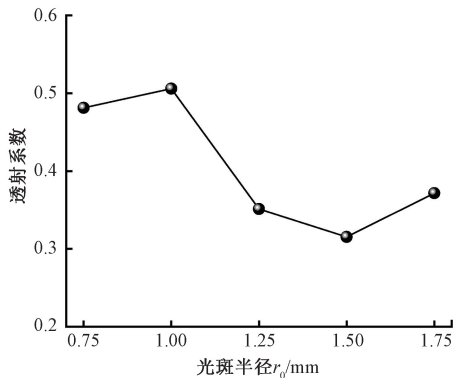
2 激光电磁超声焊缝检测工艺参数优化设计

2.1 光斑形状及尺寸对透射率的影响

激光光斑形状和尺寸是激光超声激励中的重要参数,直接影响所激发超声导波的模式、能量和指向性,对透射系数产生决定性影响,故采用单因素法逐个分析其影响规律。将激励源光斑形状设置为圆形,保持曲折线圈匝数 $N=4$,线圈匝间距 1.5 mm,激励源 Laser-T 与接收传感器 EMAT-R1 间距 $w_1=8$ mm, Laser-T 与 EMAT-R2 间距 $w_2=36.4$ mm 不变,依次得到不同圆形光斑半径 r_0 为 0.75、1、1.25、1.5 和 1.75 mm 时导波信号峰-峰值及透射系数,如图 6 所示。



(a) 峰-峰值随光斑半径 r_0 的变化趋势
(a) Peak-to-peak amplitude variation with laser spot radius r_0



(b) 透射系数随光斑半径 r_0 的变化趋势
(b) Variation trend of transmission coefficient with spot radius r_0

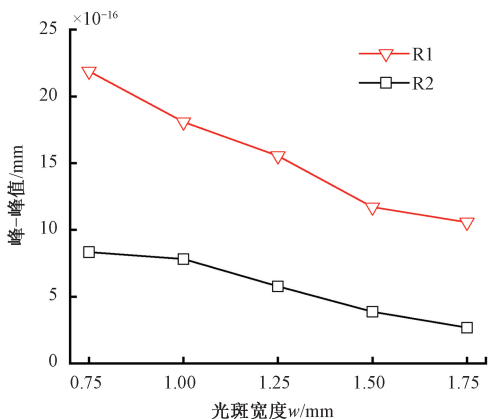
图 6 光斑半径 r_0 对仿真导波信号峰-峰值及透射系数的影响

Fig. 6 Effect of laser spot radius r_0 on the peak-to-peak amplitude and transmission coefficient of simulated guided wave signals

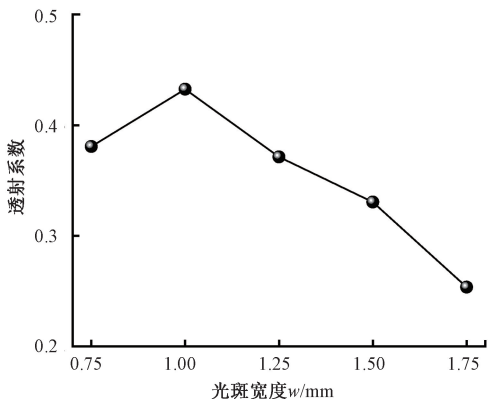
如图 6(a) 所示,随着 r_0 增加,EMAT 接收到的导波信号峰-峰值依次减小。因为当 r_0 较小时,激光能量集中,能量密度高,热烧蚀效应产生较强的瞬态应力场,激发出幅值较大的超声导波;总能量不变时,随着半径增大,激光能量密度降低,热烧蚀应力场峰值减小,导致激发效率下降,接收信号幅值降低。

设置激励源为片状光斑,保持其他参数不变,依次接收不同片状光斑宽度 w 为 0.75、1、1.25、1.5 和 1.75 mm 时导波信号,获得相应的峰-峰幅值,并计算透射系数,如图 7 所示。

如图 7(a) 所示,脉冲总能量保持恒定,随着光斑宽度 w 增大,能量密度随之线性下降,导波信号峰-峰值递减。对比图 6 和 7 发现,片状光源激励出导波信号的峰-峰值比圆形光斑高,且采用片状光源计算得到的透射系数均比圆形光斑低,故后续选择片状光源作为激励源形状。由图 7(b) 可知,当光斑宽度为 1.75 mm 时透射系数最低,但是 $w = 1.75$ mm 时,导波信号峰-峰值



(a) 峰-峰值随光斑宽度 w 的变化趋势
(a) Peak-to-peak amplitude variation with laser spot width w



(b) 透射系数随光斑宽度 w 的变化趋势
(b) Variation of trend transmission coefficient with laser spot width w

图 7 光斑宽度 w 对仿真导波信号峰-峰值及透射系数的影响

Fig. 7 Effect of laser spot width w on the peak-to-peak amplitude and transmission coefficient of simulated guided wave signals

极小,因此结合实际考虑,后续仿真实验选择片状宽度 $w = 1.5$ mm。

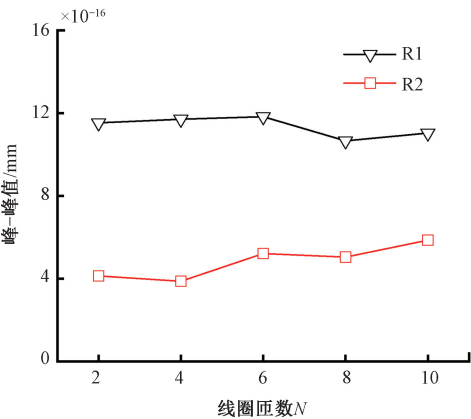
2.2 EMAT 线圈匝数对透射率的影响

图 8(a) 为 EMAT 线圈匝数对导波信号峰-峰值的影响。设置激励源光斑形状为片状, $w = 1.5$ mm,线圈匝间距 1.5 mm,激励源 Laser-T 与 EMAT-R1 间距 $w_1 = 7.9$ mm, Laser-T 与 EMAT-R2 间距 $w_2 = 36.3$ mm 不变,改变线圈匝数 N 为 2、4、6、8、10,得到不同匝数对应的超声导波信号透射系数,如图 8(b) 所示。

由图 8 可知,线圈匝数对导波信号峰-峰值的影响不大,其值变化平稳;随着线圈匝数增加,透射系数先减后增,当匝数 N 为 4 时,透射系数最低,EMAT-R1 和 EMAT-R2 峰-峰值差异最大,缺陷检测效果最明显。

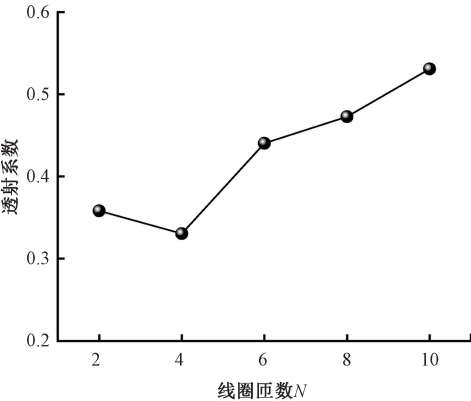
2.3 EMAT 线圈匝间距对透射率的影响

EMAT 线圈匝间距显著影响接收信号的幅值、频率



(a) 峰-峰值随线圈匝数 N 的变化趋势

(a) Peak-to-peak amplitude variation with the number of coil turns N



(b) 透射系数随线圈匝数 N 的变化趋势

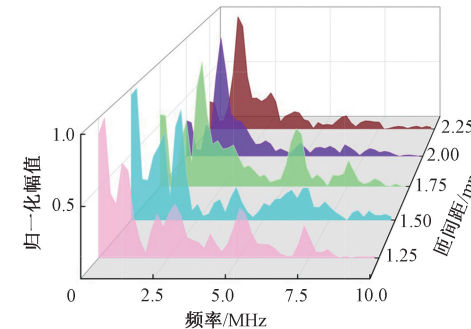
(b) Variation trend of transmission coefficient with number of coil turns N

图 8 线圈匝数 N 对仿真导波信号峰-峰值及透射系数的影响

Fig. 8 Effect of number of coil turns N on the peak-to-peak amplitude and transmission coefficient of simulated guided wave signals

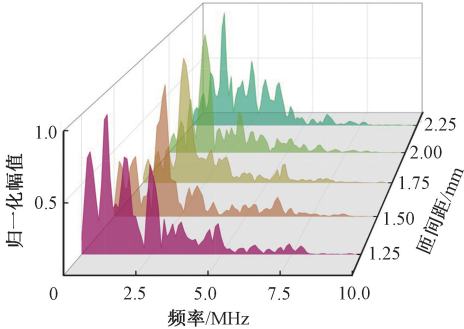
响应。为研究曲折线圈匝间距对 EMAT 接收超声导波的影响,固定其他参数不变,设置匝间距 d 为 1.25 ~ 2.25 mm,间隔设置为 0.25 mm。

如图 9 所示,导波信号频谱主瓣的中心频率随匝间距的变化而不同,即 EMAT 接收到的导波波长不同。



(a) EMAT-R1接收导波信号的频谱图

(a) Spectrum of guided wave signals received by EMAT-R1



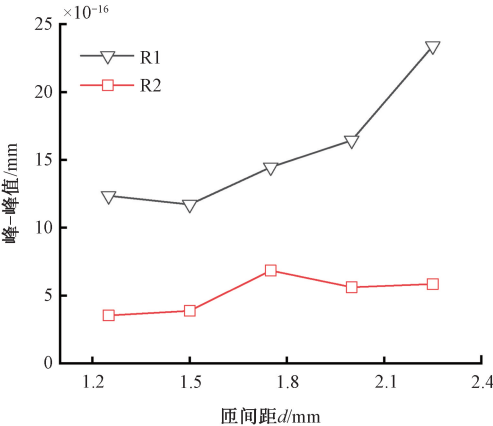
(b) EMAT-R2接收导波信号的频谱图

(b) Spectrum of guided wave signals received by EMAT-R2

图 9 匝间距 d 对仿真导波信号频谱的影响

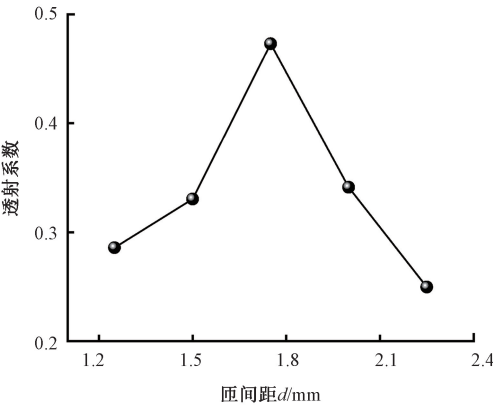
Fig. 9 Effect of coil turn spacing d on the spectrum of simulated guided wave signals

如图 10 所示,随着匝间距增加,透射系数先增后减,当 $d = 2.25$ mm 最小,此时缺陷检测效果最佳。



(a) 峰-峰值随匝间距 d 的变化趋势

(a) Peak-to-peak amplitude variation with coil turn spacing d



(b) 透射系数随匝间距 d 的变化趋势

(b) Variation trend of transmission coefficient with turn spacing d

图 10 线圈匝间距 d 对仿真导波信号峰-峰值及透射系数的影响

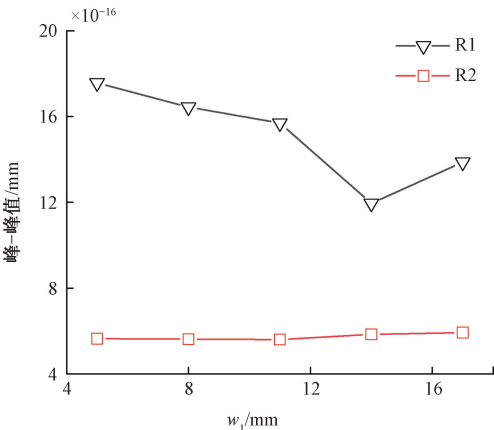
Fig. 10 Effect of coil turn spacing d on the peak-to-peak amplitude and transmission coefficient of simulated guided wave signals

综合图 9 和 10,当匝间距为 2.0 mm 时,EMAT 接收到的导波频率信号主瓣成分最为明显,基本无杂乱副瓣,此时曲折线圈 EMAT 对于导波波长的接收能力最好,且透射系数较匝间距为 2.25 mm 接近,因此选择 2.0 mm 为曲折线圈 EMAT 匝间距。

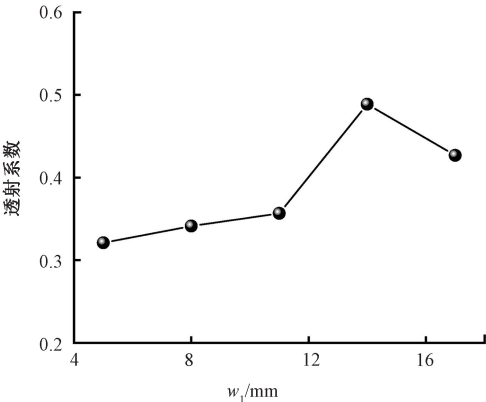
2.4 激励源 Laser-T 与 EMAT 间距对透射率的影响

激励源和接收传感器之间的距离是试验设计中一个至关重要的参数,对检测效果的可行性具有重要影响。为研究激励源与接收传感器间距对透射率的影响,现固定其他参数不变,改变激励源 Laser-T 与 EMAT-R1 的间距 w_1 为 5~17 mm,间隔设置为 3 mm。

如图 11 所示,当 w_1 为 5~11 mm 时,透射系数在 0.32~0.35 范围,且波动幅度小。在现场实验中,激励脉冲在被测工件中激发超声波的同时,会在工件表面产生强烈而局部的振动,该振动在接收信号中形成一个很宽



(a) 峰-峰值随 w_1 的变化趋势
(a) Peak-to-peak amplitude variation with w_1



(b) 透射系数随 w_1 的变化趋势
(b) Variation trend of transmission coefficient with w_1

图 11 Laser-T 与 EMAT-R1 间距 w_1 对仿真导波信号峰-峰值及透射系数的影响

Fig. 11 Effect of separation distance w_1 between Laser-T and EMAT-R1 on the peak-to-peak amplitude and transmission coefficient of simulated guided wave signals

且呈衰减振荡的脉冲。如果激励区和接收传感器太近,始波脉冲强烈,形成检测盲区。基于此,为避免有效信号区与盲区重合,本研究选择 $w_1 = 11$ mm。

为了确定 Laser-T 与 EMAT-R2 间距 w_2 对透射系数的影响,固定 w_1 及其他参数不变, $w_2 = 32.4 \sim 48.4$ mm,间隔 4 mm 进行仿真。因为超声波在工件中传播时,幅值会随距离增加而衰减。这会导致透射系数随传感器位置变化的原因不仅来自焊缝区及缺陷,也可能来自信号的衰减。为了消除衰减的影响,透射系数基于每个传感器位置的无缺陷仿真进行归一化,即保持与有缺陷模型相同的几何、材料和激励条件,但移除圆孔缺陷,得到存在缺陷的透射系数 K' 以及不含缺陷的透射系数 K ,计算出归一化透射曲线 $T = K'/K$,根据图 12,选择 Laser-T 最小位置作为最优传感器布置位置,即 $w_2 = 36.4$ mm。

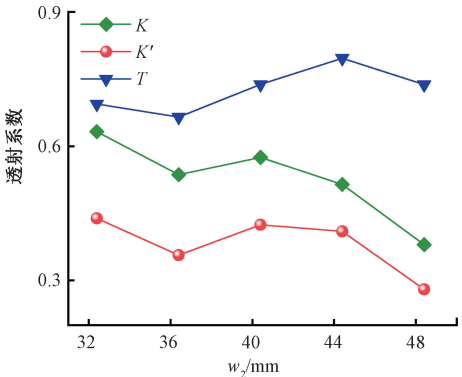


图 12 Laser-T 与 EMAT-R2 间距 w_2 对透射系数的影响
Fig. 12 Effect of separation distance w_2 between Laser-T and EMAT-R2 on the transmission coefficient

2.5 正交实验设计及分析

激光电磁超声导波的焊缝缺陷检测性能取决于激发端、接收端及几何布局多参数的协同匹配。在单因素实验基础上已明确各参数独立影响规律,为了反映参数间的协同作用,采用正交试验结合单一变量法进行参数显著性分析与最优组合筛选,从而减少仿真次数,缩短计算总时长。线圈匝数主要影响 EMAT 的激励磁场强度与阻抗匹配,当匝数达到一定值后,磁场强度趋于饱和,再增加匝数对接收灵敏度的提升有限,甚至因阻抗不匹配导致信号衰减。此外,匝间距的优化需基于固定匝数,若同时改变两者,则因素交互作用不可分离。

保持激光光斑为片状以及线圈匝数 4 匝不变,对激光光斑宽度 w 、EMAT 线圈匝间距 d 、激励源与 EMAT-R1 间距 w_1 、激励源与 EMAT-R2 间距 w_2 这 4 个设计参数采用正交表 $L_9(3^4)$ 进行正交试验,仿真结果如表 2 所示。

表 2 正交实验设计表

Table 2 Orthogonal experimental design table					
序号	w/mm	d/mm	w_1/mm	w_2/mm	透射系数
1	1.25	1.75	8	32.4	0.368
2	1.25	2.00	14	36.4	0.460
3	1.25	2.25	11	40.4	0.397
4	1.50	1.75	14	40.4	0.429
5	1.50	2.00	11	32.4	0.462
6	1.50	2.25	8	36.4	0.250
7	1.75	1.75	11	36.4	0.450
8	1.75	2.00	8	40.4	0.420
9	1.75	2.25	14	32.4	0.454

对激光电磁超声导波焊缝模型 4 个设计参数在不同水平上透射系数的极差值大小进行排序,得到 4 个设计参数对透射系数的影响次序为 $w_1>d>w>w_2$ 。根据表 2 分别选出透射系数最大及最小的两组参数,即最佳和最差参数组合如表 3 所示。

表 3 正交试验透射系数结果

Table 3 Transmission coefficient results of orthogonal experiment					
参数组合	w/mm	d/mm	w_1/mm	w_2/mm	透射系数
最佳	1.5	2.25	8	36.4	0.250
最差	1.5	2.00	11	32.4	0.462

将这两组参数组合分别代入有限元模型中进行计算,计算结果如图 13 和 14 所示。

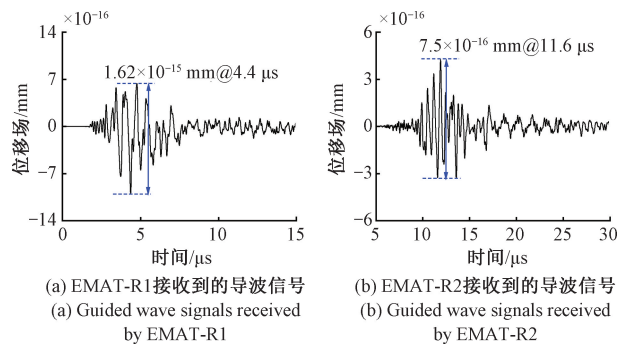


图 13 最差参数组合对应的仿真导波信号

Fig. 13 Simulated guided wave signals corresponding to the worst-case parameter combination

因此,激光光斑宽度 w 、EMAT 线圈匝间距 d 、Laser-T 与 EMAT-R1 间距 w_1 、Laser-T 与 EMAT-R2 间距 w_2 分别为 1.5、2.25、8 和 36.4 mm 时,透射系数最小,即模型的 4 个设计参数最佳组合。

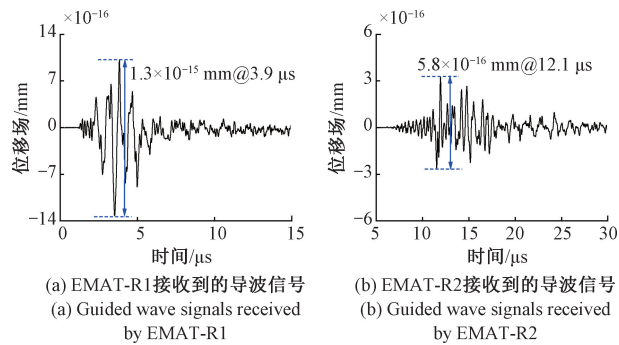


图 14 最佳参数组合对应的仿真导波信号

Fig. 14 Simulated guided wave signals under the optimal parameter combination

3 单因素影响规律实验验证

3.1 实验系统

图 15 为激光电磁超声焊缝检测系统框图,实验系统由 Nd:YAG 脉冲激光器、聚焦透镜、差分放大增益模块、电磁超声传感器、多通道数据采集卡以及 PC 端系统所组成。采用波长为 1 064 nm 的 Nd:YAG 调 Q 脉冲激光器,以 10 Hz 的重复频率和 8 ns 脉冲持续时间输出不同能量下激光激励产生超声波。激光束通过焦距为 400 mm 的柱面透镜聚焦成激光线源,激光线源激发出超声导波沿焊缝试样传播,被双 EMAT 接收。

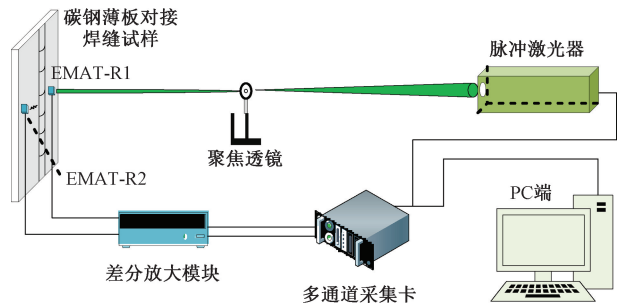


图 15 激光电磁超声碳钢薄板对接焊缝检测系统

Fig. 15 Laser-EMAT detection system block diagram for carbon steel thin plate butt weld

如图 16 为长 400 mm、宽 140 mm、厚 4 mm 的碳钢薄板对接焊缝试样实物图,EMAT 由曲折线圈和永磁体组成,配置形式如图 17 所示。EMAT 接收超声开路电压信号经自制差分增益电路模块放大传输到采集系统进行分析 and 处理,随后经多通道数据采集卡送至 PC 端,在 PC 端中利用 LABVIEW 软件进行数据的显示、存储和后处理。

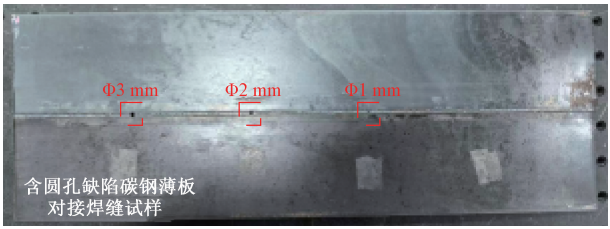
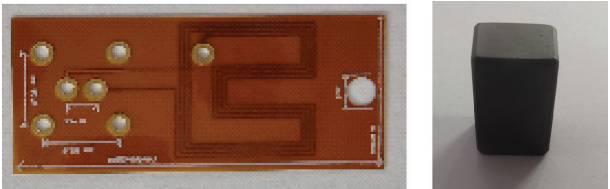


图 16 碳钢薄板对接焊缝试样

Fig. 16 Carbon steel thin plate butt weld specimen



(a) 曲折线圈
(a) Meander coil

(b) 柱形永磁体
(b) Cylindrical permanent magnet

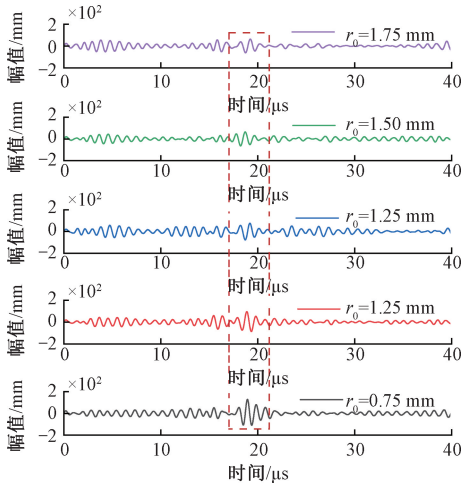
图 17 EMAT 配置形式

Fig. 17 Configuration form of the EMAT

3.2 光斑形状及尺寸影响规律实验验证

选用圆形光斑聚焦透镜,改变透镜与焊缝试样的距离,EMAT 参数设置曲折线圈匝数为 4,线圈匝间距 1.5 mm,Laser-T 与 EMAT-R1 间距 $w_1 = 8$ mm,Laser-T 与 EMAT-R2 间距 $w_2 = 36.4$ mm,得到不同圆形激光源半径对应的实验超声回波信号,如图 18 所示。

提取仿真与实验获取的导波信号峰-峰值并计算,得到不同光斑半径 r_0 对应的透射系数,如图 19 所示,实验获取的透射系数变化趋势与仿真基本一致,且当 r_0 为 1.5 mm 时,导波透射系数最低。值得关注的是,仿真与实验的透射系数曲线在 $r_0 = 1.0 \sim 1.25$ mm 时变化趋势存在一定偏离,这是因为仿真中假设激光光斑能量为理



(b) EMAT-R2接收到的导波信号
(b) Guided wave signals received by EMAT-R2

图 18 不同圆形光斑半径 r_0 对应的实验超声导波信号

Fig. 18 Experimental ultrasonic guided wave signals corresponding to different radii r_0 of circular laser spots

想高斯分布,但实验中圆形光斑通过透镜聚焦时,其能量分布并非完美高斯型,尤其在光斑边缘存在能量衰减,导致实验结果与仿真存在差异;当 r_0 为 1.0~1.25 mm,光斑能量分布更趋均匀,使得导波模式激发效率的变化更为平缓,因此实验获取的透射系数略高于仿真。

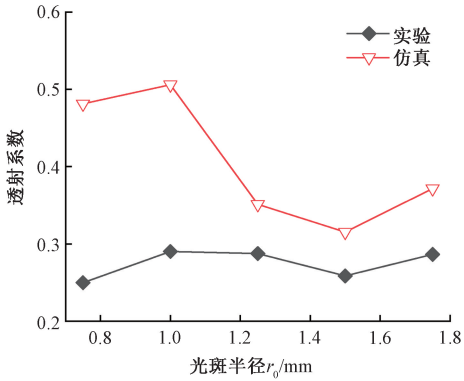
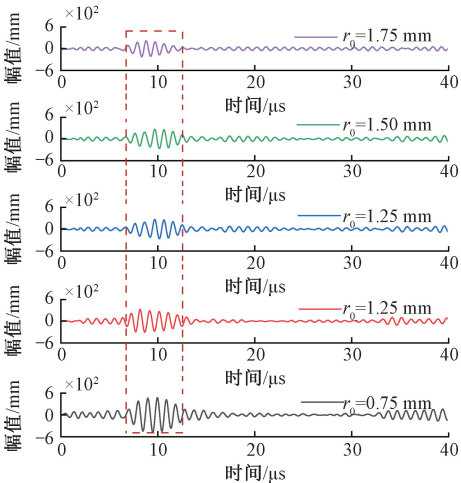


图 19 光斑半径 r_0 对应的仿真和实验导波信号透射系数

Fig. 19 Transmission coefficients of simulated and experimental guided wave signals corresponding to laser spot radius r_0

将激光源聚焦为片状光斑,其他参数不变,调节透镜与试样距离,获得在不同光斑宽度下 w 导波信号的透射系数。如图 20 所示,当 w 为 1.75 mm 时,透射系数最低;仿真的透射系数呈现先升后降的波动趋势,与实验的透射系数变化趋势一致,但实验的透射系数稳定在 0.2 左右,变化幅度远小于仿真结果。这是因为片状光斑对应的声场具有明显方向性,这种各向异性的热源分布会同时激发多种导波模态,由于仿真中边界条件理想化,不同



(a) EMAT-R1接收到的导波信号
(a) Guided wave signals received by EMAT-R1

模态之间的干涉效应被完整保留,因此透射系数随 w 变化出现明显波动。实验中钢板存在微观组织不均匀性,导波传播过程中会发生模态弥散与能量再分布,导致干涉效应被部分平均化,透射系数变化趋于平缓。

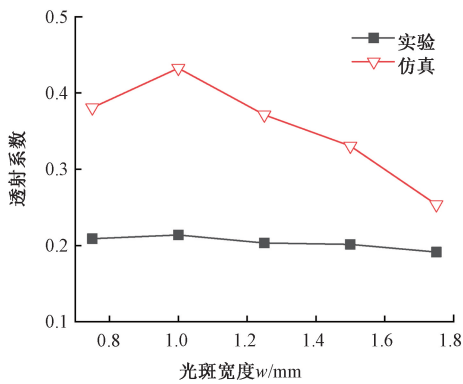


图 20 光斑宽度 w 对应的仿真和实验导波信号透射系数
Fig. 20 Transmission coefficients of simulated and experimental guided wave signals corresponding to laser spot width w

3.3 EMAT 线圈匝数影响规律实验验证

设计不同曲折线圈匝数的 EMAT,得到线圈匝数 N 对双 EMAT 接收实验超声信号的影响。如图 21 所示,在不同线圈匝数 N 下接收到的仿真和实验信号的透射系数变化趋势是一致的,当 N 为 4 时,透射系数最低。当 $N=2\sim 4$ 时,EMAT-R1 的灵敏度提升幅度大于 EMAT-R2,因此透射系数小幅下降;当 $N=4\sim 10$ 时,EMAT-R2 的灵敏度增益超过焊缝衰减的限制,透射系数增加。

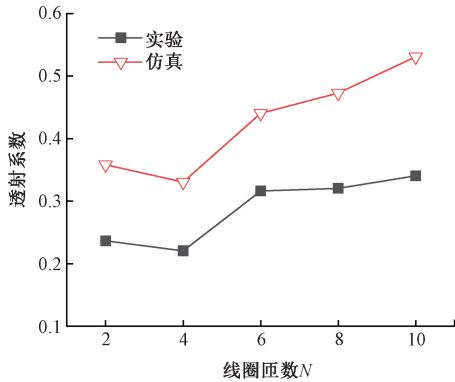


图 21 不同线圈匝数 N 对应的仿真和实验导波信号透射系数
Fig. 21 Transmission coefficients of simulated and experimental guided wave signals corresponding to different numbers of coil turns N

3.4 激励源与接收传感器间距影响规律实验验证

为了探究激励源 Laser-T 与 EMAT-R1 的间距 w_1 对导波信号幅值与透射系数的影响规律,现保持检测系统

内其他参数不变,只改变 w_1 大小,图 22 为透射系数随 w_1 变化下的实验与仿真结果对比。

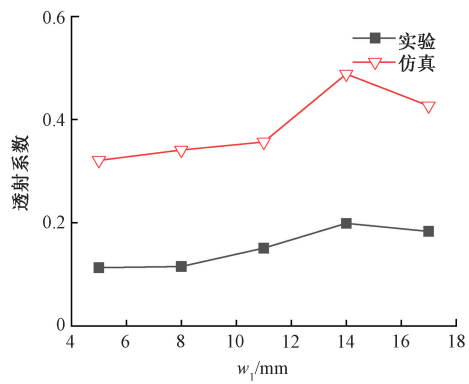


图 22 不同 Laser-T 与 EMAT-R1 间距 w_1 对应的仿真和实验导波信号透射系数
Fig. 22 Transmission coefficients of simulated and experimental guided wave signals corresponding to different spacing w_1 between Laser-T and EMAT-R1

为了消除传播衰减的干扰,单独表征缺陷对导波透射的影响,分别在有无缺陷的情况下,分析 w_2 对透射系数的影响。图 23 为不同 w_2 下接收到仿真和实验导波信号的透射系数图,其中 K' 表示存在缺陷的透射系数, K 表示不含缺陷的透射系数,而 T 定义为归一化透射系数,即 $T=K'/K$, T_1 、 T_2 分别表示实验和仿真下的透射系数。 K_1 与 K_2 、 K'_1 与 K'_2 变化趋势基本一致,说明仿真与实验在有无缺陷时的导波透射规律是一致的;而 T_1 、 T_2 在 44.4 mm 处的差异,是因为实验中该位置的 K_1 、 K'_1 受传感器耦合偏差以及材料局部不均的影响,出现了趋势一致但幅度微小的随机波动,这些小波动经比值运算后被放大,使得 T_1 未呈现仿真中 T_2 的峰值。从实际检测角

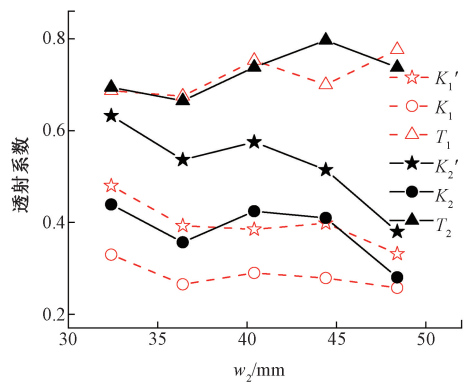


图 23 不同 Laser-T 与 EMAT-R2 间距 w_2 对应仿真和实验导波信号透射系数
Fig. 23 Transmission coefficients of simulated and experimental guided wave signals corresponding to different spacing w_2 between Laser-T and EMAT-R2

度,该局部差异不影响最优 w_2 区间的判断,即仿真与实验都表明 36.4 mm 为缺陷检出的敏感值。

4 参数组合优化与效果验证

4.1 可移动式激光电磁超声焊缝实验检测系统

图 24 为激光双电磁超声传感器配置形式的设计示意图。传感器总体尺寸设计为长 85 mm、宽 55 mm、高 31 mm,外壳采用铝合金材质封装,不仅能够避免 EMAT-R1、EMAT-R2 检测耦合不一致的情况,还能有效屏蔽噪声信号,进一步提高检测回波信噪比对于铁磁性的待检试样工件。为了避免检测时永磁体吸附工件导致无法移动,在传感器底部装配滑轮,便于移动检测。

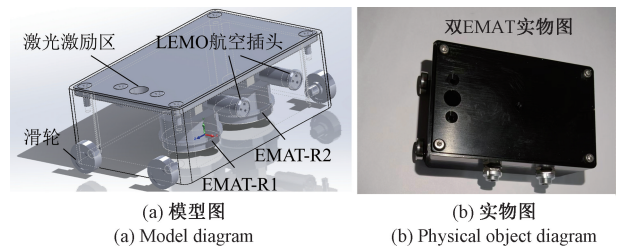


图 24 Laser-双 EMAT 设计图

Fig. 24 Diagram of laser-dual EMAT sensors

图 25 为可移动式激光电磁超声焊缝实验检测现场图。激光器激发出光源透过柱透镜后转换为片状光斑,辐照在工作表面并产生超声波,然后被 EMAT 接收,保持激光源与 EMAT 相对位置不变,通过电动位移台移动焊缝试样检测不同位置处的工况。

4.2 参数优化前后检测效果对比

为验证参数优化后实际焊缝检测效果,如图 26 所示。

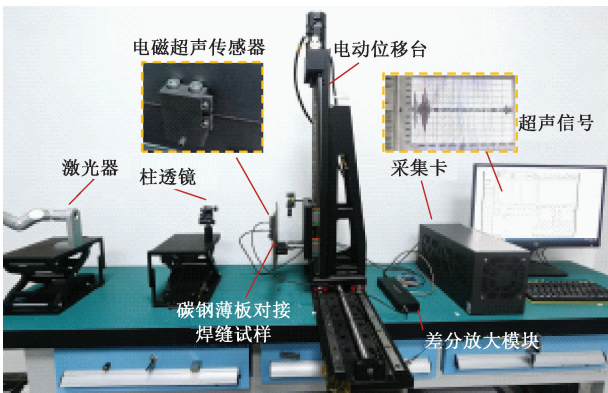


图 25 可移动式激光电磁超声焊缝实验检测现场图

Fig. 25 Field test diagram of movable laser-EMAT weld inspection

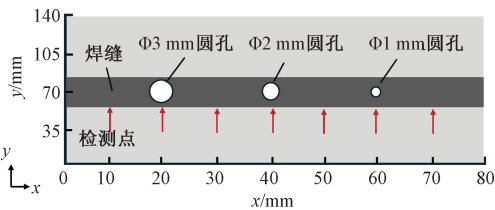
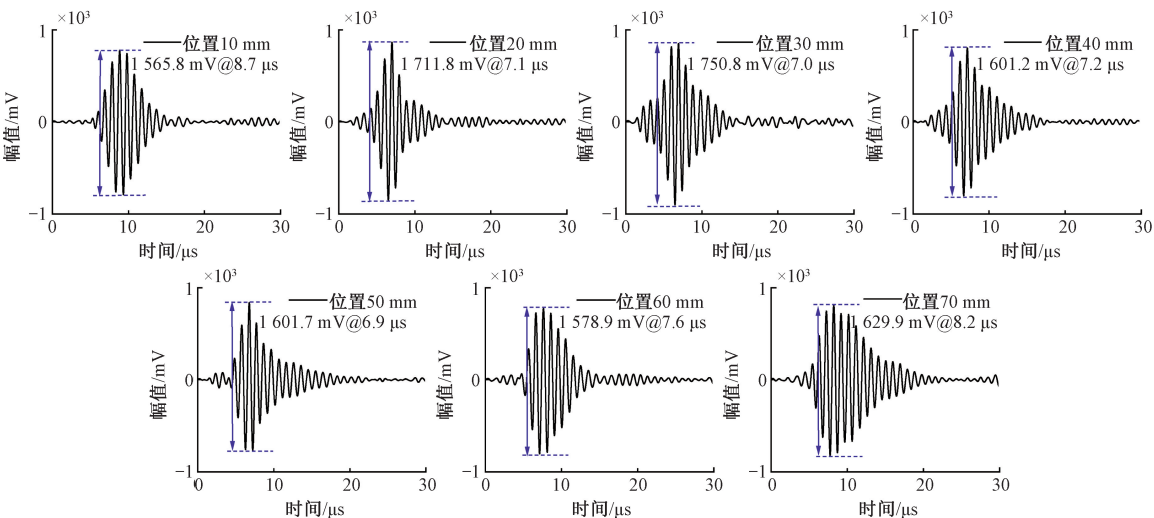


图 26 含缺陷碳钢薄板对接焊缝检测示意图

Fig. 26 Detection schematic of defective butt welds in carbon steel thin plates

对含 $\Phi 3$ mm、 $\Phi 2$ mm、 $\Phi 1$ mm 圆孔缺陷的碳钢薄板对接焊缝进行检测。采用图 25 实验检测系统,依次对缺陷以及缺陷左右两侧共 7 处位置检测,检测间距 10 mm。根据表 3 所示的正交试验透射系数结果分析,分别采用最佳和最差参数组合实验验证。图 27 为优化后不同检测位置对应的 EMAT 导波信号,图 27 中标注峰-峰幅值以及波包峰值飞行时间。



(a) EMAT-R1 超声导波信号

(a) EMAT-R1 ultrasonic guided wave signals

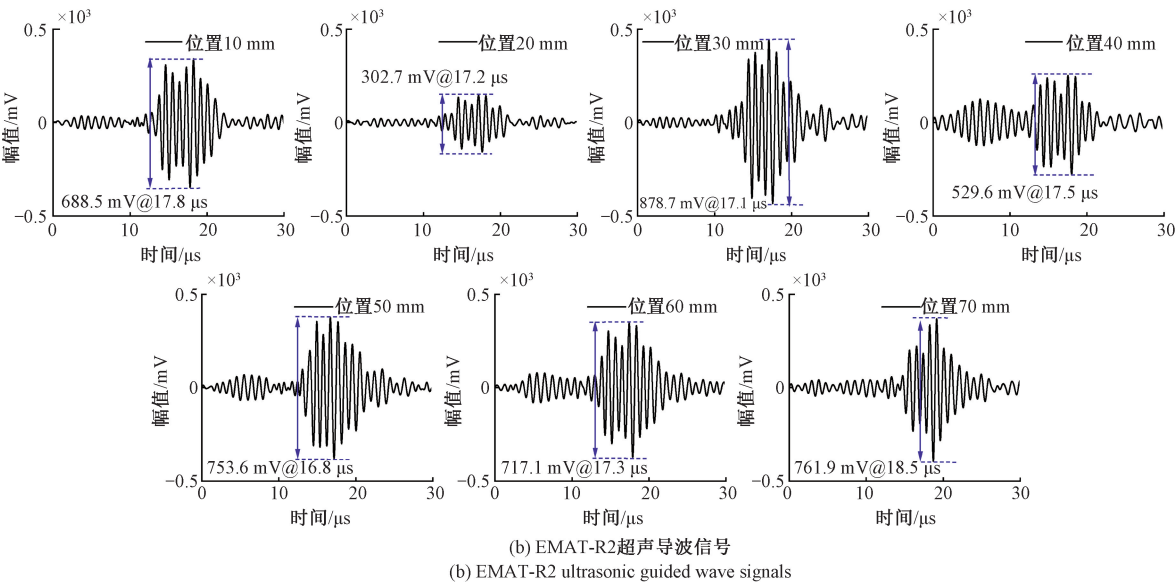


图 27 采用最优参数组合 EMAT 在不同检测点位置对应的超声导波信号

Fig. 27 Ultrasonic guided wave signals of EMAT with the optimal parameter combination at different detection points

检测位置 20、40 和 60 mm 处分别是直径 $\Phi 3$ mm、 $\Phi 2$ mm、 $\Phi 1$ mm 圆孔缺陷的位置,而其他检测位置均不含缺陷,如图 28 所示,从透射系数曲线的斜率可知,在 3 和 2 mm 缺陷位置处的最优及最差参数组合曲线发生斜率改变,分别存在极值点;而在 60 mm 位置处,最优参数组合下存在一个近似的波谷,但不能明显判断是否存在 1 mm 缺陷,最差参数组合则不能检测出 $\Phi 1$ mm 圆孔缺陷。

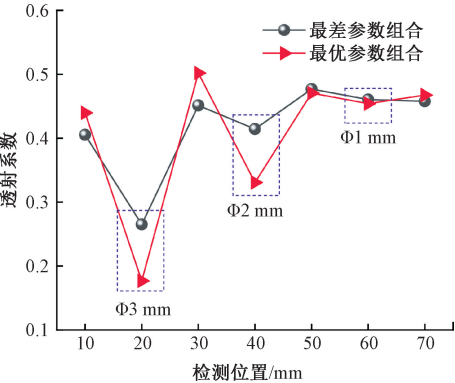


图 28 最优和最差参数组合对应实验透射系数

Fig. 28 Experimental transmission coefficients corresponding to the optimal and worst-case parameter combinations

为了对比最优和最差参数组合下的实际优化效果,引入 3 个量化指标:1)无缺陷基线特征;2)缺陷透射系数降幅 α ;3)缺陷透射系数相对于无缺陷基线的偏离程度 δ 。

图 29 为缺陷检测后判断流程,计算无缺陷位置的透射系数均值 $E_{\text{non-defect}}$ 、标准差 $\sigma_{\text{non-defect}}$ 与变异系数 β ,其中

β 定义为 $\sigma_{\text{non-defect}}/E_{\text{non-defect}} \times 100\%$,变异系数越小,信号稳定性越强。

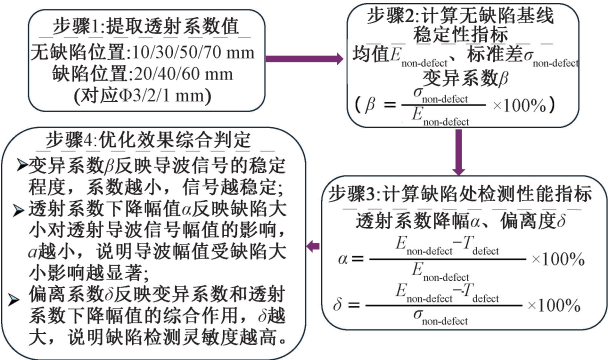


图 29 缺陷检测判定流程

Fig. 29 Defect detection and determination process

计算缺陷处的检测性能指标,如表 4 所示,即不同尺寸缺陷的透射系数降幅 α , α 定义为 $[(\text{无缺陷均值 } E_{\text{non-defect}} - \text{缺陷透射系数 } T_{\text{defect}})/\text{无缺陷均值 } E_{\text{non-defect}}] \times 100\%$,其反映缺陷衰减程度;以及缺陷透射系数相对于无缺陷基线的偏离度 δ , δ 定义为 $(E_{\text{non-defect}} - T_{\text{defect}})/\sigma_{\text{non-defect}}$, δ 值越大,说明缺陷导致的透射衰减越偏离正常波动,越可能是缺陷引起的特异性变化。

根据表 4,最优参数组合下无缺陷基线的变异系数 (5.41%) 低于最差组合 (6.77%),说明参数优化平衡了激励源与 EMAT 的耦合匹配性,削弱了钢板表面粗糙度、材料局部异质性等随机干扰,使无缺陷状态的透射系数基线更平稳。缺陷检测性能指标如表 5 所示。

表 4 无缺陷基线的稳定性指标
Table 4 Stability index of defect-free baseline

参数组合	无缺陷位置/mm	透射系数	$E_{\text{non-defect}}$	$\sigma_{\text{non-defect}}$	$\beta/\%$
最优组合	10	0.439 71	0.469 9	0.025 4	5.41
	30	0.501 88			
	50	0.470 50			
	70	0.467 45			
最差组合	10	0.405 31	0.447 8	0.030 3	6.77
	30	0.451 24			
	50	0.476 86			
	70	0.457 75			

表 5 缺陷检测性能指标
Table 5 Performance indicators of defect detection

序号	缺陷位置/mm	缺陷尺寸/mm	透射系数	$\alpha/\%$	δ
最优组合	20	Φ3	0.176 81	62.40	11.54
	40	Φ2	0.330 75	29.60	5.48
	60	Φ1	0.454 11	3.36	0.62
最差组合	20	Φ3	0.265 12	40.80	6.03
	40	Φ2	0.414 37	7.47	1.10
	60	Φ1	0.460 45	-2.82	-0.42

根据表 5,对于 Φ3 mm 缺陷,最优参数下透射系数降幅 α 以及偏离度 δ 分别是最差的 1.53 倍、1.91 倍;对 Φ2 mm 缺陷,最优参数下透射系数降幅及偏离度分别是最差的 3.96 倍和 4.98 倍;针对直径 Φ1 mm 圆孔,最差参数组合对应为-2.82% 的反向波动,易误判为无缺陷。最优参数组合对应为 3.36% 幅值减弱,偏离度提升至 $\delta=0.62>0$,虽不能达到缺陷可靠检出的评定依据,但可作为参考依据。

5 结 论

本研究围绕激光电磁超声技术在碳钢薄板激光焊缝检测中的应用开展研究,系统阐述了激光电磁超声检测的基本原理,建立了对接焊缝检测的有限元仿真模型,通过单因素分析与正交试验对关键工艺参数进行了优化设计,并搭建实验系统对部分仿真结果进行了验证。主要结论为:

1) 通过仿真与实验相结合的方法,系统分析了激光光斑形状与尺寸、EMAT 线圈匝数与匝间距、激励源与接收传感器间距等因素对超声导波透射系数的影响规律。

结果表明,片状光斑相较于圆形光斑具有更高的激发效率与更低的透射系数;从单一变量来看,线圈匝数为 4、匝间距为 2.0 mm、激励源与 EMAT-R1、R2 间距分别为 11 和 36.4 mm 时,缺陷识别灵敏度较高;

2) 基于正交试验设计的方法,确定了光斑宽度、线圈匝间距、EMAT 间距等因素的最优组合,在该组合下透射系数最低,缺陷处与非缺陷处的透射系数差异最大,检测稳定性和特异性明显优于非优化参数组合;

3) 搭建的可移动式激光电磁超声检测系统实验结果表明,参数优化后系统对焊缝缺陷的识别能力显著提升。在最优参数组合下,Φ3 mm 圆孔缺陷的透射系数降幅和偏离度为最差组合的 1.53 和 1.91 倍;Φ2 mm 缺陷的透射系数降幅和偏离度为最差组合的 3.96 倍和 4.98 倍;对 Φ1 mm 小缺陷,优化后实现 3.36% 的正向衰减,而最差组合呈反向波动,说明优化后的参数具备对直径 Φ1 mm 圆孔的初步检出能力,但灵敏度余量有待进一步提高。此外,优化后无缺陷区域透射系数变异系数由 6.77% 降至 5.41%,系统稳定性和检测可靠性显著提高。

后续将针对实际焊接工况中常见的裂纹、未熔合、未焊透等不规则缺陷展开研究,基于本研究优化的基础参数制备贴近实际工况的自然缺陷试样并开展针对性检测实验,以此提升检测系统对实际焊接缺陷的识别与分类能力。

参考文献

[1] 于一强, 张宝贵, 杨琨, 等. 超薄不锈钢激光焊接工艺对接头力学性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2025(3): 90-94.
YU Y Q, ZHANG B G, YANG K, et al. Influence of ultra-thin stainless steel laser welding process on mechanical properties of joints[J]. MW Metal Forming, 2025(3): 90-94.
[2] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [J]. Journal of Laser Applications, 2005, 17(1): 2-14.
[3] CHEN G Y, MEI L F, ZHANG M J, et al. Research on key influence factors of laser overlap welding of automobile body galvanized steel[J]. Optics and Laser Technology, 2013, 45: 726-733.
[4] HAUG K, PRITSCHOW G. Robust laser-stripe sensor for automated weld-seam tracking in the shipbuilding industry [C]. 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1998, 2: 1236-1241.
[5] LI K, LU F G, CUI H CH, et al. Investigation on the effects of shielding gas on porosity in fiber laser welding of T-joint steels [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77 (9): 1881-1888.

- [6] YOU D Y, GAO X D, KATAYAMA S. Review of laser welding monitoring[J]. Science and technology of welding and joining, 2014, 19(3): 181-201.
- [7] ZHANG ZH F, CHEN SH B. Real-time seam penetration identification in arc welding based on fusion of sound, voltage and spectrum signals[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(1): 207-218.
- [8] MENG J J, ZHEN Y, ZHANG K SH, et al. Quantitative detection and evaluation of Rayleigh ultrasonic wave for fatigue crack on turbine blade surface[J]. Applied Acoustics, 2023, 211: 109558.
- [9] LI Y, YAN B, LI W, et al. Thickness assessment of thermal barrier coatings of aeroengine blades via dual-frequency eddy current evaluation[J]. IEEE Magnetics Letters, 2016, 7: 1-5.
- [10] 刘永强, 杨世锡, 刘学坤. 基于激光超声的金属构件表面微裂纹定量检测技术研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(19): 14-19.
- LIU Y Q, YANG SH X, LIU X K. Micro-crack quantitative detection technique for metal component surface based on laser ultrasonic[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(19): 14-19.
- [11] 郭森, 赵纪元, 原可义, 等. 激光超声法零件缺陷在线自动检测系统研究[J]. 电子测量技术, 2025, 48(21): 67-76.
- GUO M, ZHAO J Y, YUAN K Y, et al. Research on on-line and automatic measurement system of part defects using laser ultrasonic technique[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(21): 67-76.
- [12] 李兵, 唐涛, 秦峰. 基于二维延时叠加的激光诱导声表面波成像研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 56-63.
- LI, B, TANG T, QIN F. Study on imaging of laser-induced surface acoustic wave based on 2D time-delay superimposition[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 56-63.
- [13] 夏振鑫, 陈丹, 袁培龙, 等. 基于激光超声的 TA1 工业纯钛塑性变形损伤检测[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 264-274.
- XIA ZH X, CHEN D, YUAN P L, et al. Plastic deformation damage detection of TA1 industrial pure titanium by laser ultrasonics[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 264-274.
- [14] LÉVESQUE D, ASAUMI Y, LORD M, et al. Inspection of thick welded joints using laser-ultrasonic SAFT[J]. Ultrasonics, 2016, 69: 236-242.
- [15] YAMAMOTO S, HOSHI T, MIURA T, et al. Defect detection in thick weld structure using welding in-process laser ultrasonic testing system[J]. Materials Transactions, 2014, 55(7): 998-1002.
- [16] 王建超, 赵灿, 陈宇航, 等. 铣槽窄筋钎焊缝激光超声检测方法研究[J]. 应用声学, 2026, 45(1): 10-19.
- WANG J CH, ZHAO C, CHEN Y H, et al. Research on laser ultrasonic testing method of milled groove narrow bar brazing seam[J]. Applied Acoustics, 2026, 45(1): 10-19.
- [17] 刘博涵, 陈宗泽, 于建新, 等. 基于电磁超声换能器的 SH 型焊缝导波激励方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 275-283.
- LIU B H, CHEN Z Z, YU J X, et al. Investigation of exciting SH-type welded guided waves based on electromagnetic acoustic transducers[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 275-283.
- [18] 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. Analysis of echo characteristics and factors in electromagnetic ultrasonic testing of high-temperature aluminum alloys[J]. Journal of Aeronautics, 2020, 41(12): 396-409.
- [19] 陈果, 王雪梅, 倪文波, 等. 瑞利波-体波复合 EMAT 及缺陷检测研究[J]. 电子测量技术, 2025, 48(4): 108-117.
- CHEN G, WANG X M, NI W B, et al. Research on Rayleigh-bulk wave composite EMAT and defect detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48(4): 108-117.
- [20] BERNIGA G, HOHL V J, SALZBURGER J H, et al. Non-destructive testing of laser welds in tailored blanks using electromagnetic transducers[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2007, 22(1): 1-18.
- [21] 刘明远, 姚恩涛, 王平, 等. 基于磁致伸缩电磁超声导波的钢板焊缝缺陷检测[J]. 测控技术, 2023, 42(6): 63-69.
- LIU M Y, YAO EN T, WANG P, et al. Weld defect detection of steel plate based on magnetostrictive electromagnetic ultrasonic guided wave[J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(6): 63-69.
- [22] 申鑫, 涂君, 宋旖旎, 等. 用于焊缝缺陷检测的双弧 V 型 EMAT 设计与优化[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(7): 297-306.
- SHEN X, TU J, SONG Y N, et al. Design and optimization of double arc V-shaped EMAT for weld defect detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(7): 297-306.

- [23] 何盼, 卢超, 石文泽, 等. 铝合金激光超声表面检测中 EMAT 接收性能对比[J]. 航空学报, 2023, 44(16): 294-313.
- HE P, LU CH, SHI W Z, et al Comparative analysis of EMAT receiving performance in laser ultrasonic surface testing of aluminum alloys[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(16): 294-313.
- [24] 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 magnetic testing system based on finite element method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(7): 185-193.
- [25] SGARBI M, COLLA V, CATENI S, et al. Pre-processing of data coming from a laser-EMAT system for non-destructive testing of steel slabs[J]. ISA Transactions, 2011, 51(1): 181-188.
- [26] HUANG J. Laser-based ultrasonics by dual-probe interferometer detection and narrow-band ultrasound generation[D]. Evanston: Northwestern University, 1993.
- [27] 吴德会, 刘志天, 苏令铎. 双传感器差分峰值侦测的漏磁检测新方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1218-1225.
- WU D H, LIU ZH T, SU L X. New magnetic flux leakage testing method based on differential peak detection of dual sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1218-1225.
- [28] ZENG W, CAI F M, WANG F, et al. Finite element simulation of laser-generated ultrasonic waves for quantitative detection of internal defects in welds[J]. Optik, 2020, 221: 165361.
- [29] 王璐瑶. 激光激励-单向电磁超声换能器接收的表面裂纹检测研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2025.
- WANG L Y. Research on surface crack detection using laser excitation and unidirectional electromagnetic acoustic transducer reception[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2025.
- [30] CHOI S, JHANG K Y. Internal defect detection using laser-generated longitudinal waves in ablation regime[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(9): 4191-4200.
- [31] DAVIES S J, EDWARDS C, TAYLOR G S, et al. Laser-generated ultrasound: its properties, mechanisms and multifarious applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics. 1993, 26(3): 329-348.
- [32] WANG J, GUO X, XUN Y Q, et al. Longitudinal wave

defect detection technology based on ablation mechanism[J]. Photonics, 2024, 11(9):805.

- [33] CHOI S, JHANG KY. Influence of repetitive pulsed laser irradiation on the surface characteristics of an aluminum alloy in the melting regime[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(1):335-340.
- [34] 朱力强, 许西宁, 余祖俊, 等. 基于超声导波的钢轨完整性检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(7): 1603-1609.
- ZHU L Q, XU X N, YU Z J, et al. Research on rail integrity detection method based on ultrasonic guided waves[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(7): 1603-1609.

作者简介



陈泽鸿, 2024 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为超声检测。

E-mail: 2601768062@qq.com

Chen Zehong received his B.Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2024.

He is currently a M.Sc. candidate at Nanchang Hangkong University. His main research interest includes ultrasonic acoustic testing.



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

E-mail: 70658@nchu.edu.cn

Shi Wenze received his B.Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2009, and his M.Sc. degree and Ph.D. degree both from Central South University in 2011 and 2017, respectively. He is currently an associate professor at Nanchang Hangkong University. His main research interest includes electromagnetic ultrasonic testing.



卢超(通信作者), 1995 年于江西师范大学获得学士学位, 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, 现为南昌航空大学校长、教授, 主要研究方向为超声检测及仪器。

E-mail: luchaoniat@163.com

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