

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514196

用于焊缝缺陷检测的双弧 V型 EMAT 设计与优化^{*}

申 鑫^{1,2},涂 君^{1,2},宋旖旎³,张付春^{1,2},宋小春^{1,2}

(1. 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068; 2. 湖北工业大学现代制造质量工程湖北省重点实验室 武汉 430068;
3. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘要:尽管无损检测技术在工业领域有较广泛的应用,在满足焊缝缺陷的高精度、高分辨率检测需求时仍面临巨大挑战。以核电、船舶等领域的板焊缝为例,其结构通常尺寸紧凑、分布位置复杂,常位于边角、加强筋交汇处或其他难以接近的区域,对检测探头的体积和布置方式提出了严格要求,往往只能在焊缝附近进行检测。现有超声检测多依赖接触式耦合或体积较大的换能器,难以兼顾狭小空间下的激励效率和缺陷识别灵敏度,且在面对小尺寸缺陷时信噪比较低。为此,设计了一种新型双弧V型点聚焦电磁超声换能器,采用双弧曲折线圈与V型对称布局,在限定激励超声能量区域的同时显著提升了激励波束的方向性与聚焦性能。通过建立有限元模型,系统分析了V型夹角、圆心角及近场区对换能器聚焦性能和缺陷响应幅值的影响,并优化了双弧线圈弧度和V型夹角等关键参数,从而增强了对表面及近表面微小缺陷的响应能力。随后搭建实验平台,对焊缝中的裂纹和气孔缺陷进行了检测。研究表明,传统换能器对微裂纹和孔状缺陷的检测效果有限,而所提出的新型换能器不仅能够获取清晰的反射信号,在检测尺寸为10 mm×0.5 mm×0.2 mm的裂纹及直径1 mm的气孔时,最低信噪比达到23.41 dB,显著提升了检测灵敏度,为复杂结构焊缝缺陷检测提供了一种高灵敏度、非接触式检测新方案。

关键词:无损检测;电磁超声换能器;超声聚焦;焊缝缺陷检测

中图分类号: TH165+.4 TB553 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Design and optimization of double arc V-shaped EMAT for weld defect detection

Shen Xin^{1,2}, Tu Jun^{1,2}, Song Yini³, Zhang Fuchun^{1,2}, Song Xiaochun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. Hubei Key Laboratory of Modern Manufacture Quality Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
3. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Although nondestructive testing technology is widely used in industrial field, it still faces great challenges in meeting the requirements of high-precision and high-resolution detection of weld defects. In particular, plate welds in critical sectors such as nuclear power and shipbuilding are often characterized by compact structural dimensions and complex spatial distributions, frequently located at corners, intersections of stiffeners, or other regions that are difficult to access. These features impose strict requirements on the size and placement of detection probes, which can typically only be deployed in close proximity to the weld. Existing ultrasonic inspection techniques generally rely on contact-based coupling or bulky transducers, making it difficult to simultaneously ensure excitation efficiency and defect detection sensitivity in confined spaces. Furthermore, these approaches often suffer from a low signal-to-noise ratio when detecting small-scale defects. To address these limitations, this study proposes a novel dual-arc V-shaped point-focusing electromagnetic acoustic transducer. The design employs a dual-arc meander-line coil combined with a symmetric V-shaped configuration, which not only confines the excited ultrasonic energy within a specific region but also significantly enhances the beam directivity and focusing performance. A finite element model was established to systematically investigate the influence of V-angle, central angle, and near-field characteristics on the transducer's focusing capability and defect echo amplitude. The arc curvature of the dual-arc coil and the V-angle were optimized to improve the response to surface and near-surface micro-defects. Then, an experimental platform was built to detect the

cracks and porosity defects in the weld. The research shows that the traditional transducer has limited detection effect on micro-cracks and hole-like defects, while the proposed new transducer can not only obtain clear reflected signals, but also achieve a minimum signal-to-noise ratio of 23.41 dB when detecting cracks with a size of 10 mm×0.5 mm×0.2 mm and blowholes with a diameter of 1 mm. This significantly improves the detection sensitivity and provides a high-sensitivity and non-contact detection scheme for weld defects detection of complex structures.

Keywords: non-destructive testing; electromagnetic acoustic transducer; ultrasonic focusing; weld defect detection

0 引言

无损检测技术 (non-destructive testing, NDT) 作为工业生产中的重要质量控制手段, 广泛应用于材料、结构的完整性评估与缺陷检测中^[1-3]。特别是在焊接工艺中, 焊缝质量的检测一直是确保结构安全性的关键, 直接影响焊接件的承载能力和使用寿命, 因此对焊缝的精准检测至关重要^[4-5]。传统的缺陷检测方法, 如超声波检测^[6-7]、射线检测^[8]和磁粉检测^[9]等, 虽然在某些方面取得了一定的应用成果, 但在检测精度、分辨率以及复杂工况下的适应性方面仍存在一定的局限性^[10-11]。相比较而言, 电磁超声技术作为近年来发展迅速的一种无损检测技术, 以其具有非接触、无需耦合剂、适应粗糙表面等显著优势而受到广泛关注^[12-14]。

杨理践等^[15]利用电磁超声导波技术对铝板中的斜向裂纹进行检测, 验证了该方法在识别不同方向裂纹方面的可行性, 翟国富等^[16]通过建立螺旋线圈型电磁超声换能器的解析模型, 系统研究了静磁场分布特性及其引发的洛伦兹力分布情况, 为裂纹的检测提供了理论和实验基础。在电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 设计优化方面, 通常从激励线圈参数与磁场优化两个方面入手^[17-19]。已有学者针对这两部分分别展开了深入研究。在磁场优化方面, Sun 等^[20]提出了一种由周期性永磁铁 (periodic permanent magnet, PPM) 和曲折线圈组成的增强型电磁超声换能器, 通过改变磁铁的排布增加磁场强度, 在信号接收强度上提高了 57.9%; 涂君等^[21-22]提出了一种磁力可控的电磁超声换能器, 通过控制电磁铁线圈中电流大小来增强或者减弱偏置磁场的强度, 从而达到增强检测信号的目的, 这种换能器的设计为高温检测领域提供了一种思路, 同时, 提出了一种新型的 Halbach 磁铁结构, 有效提升了对小径管道缺陷的检测能力。Kang 等^[23]提出了一种改进型窄磁体换能器, 通过分析传统永磁体的磁场分布特性, 并优化线圈导线的布局, 使得新型电磁超声换能器在铝板检测中接收到的信号幅值显著增强, 较传统结构提升了 90%。此外在线圈优化方面, 张金等^[24]通过正交试验设计对 EMAT 进行了优化, 系统探讨了曲折线圈导线长度与缺陷长度关系对缺陷定量识别的影响。结果显示, 将

多层曲折线圈并联连接可使换能效率相比串联方式提升超过 50%; 时亚等^[25]针对裂纹检测需求, 研究构建了多根分裂曲折线圈 EMAT 的有限元模型, 并通过正交试验优化关键参数, 实验验证其接收信号幅值较传统结构提升 50.8%, 显著提高了表面波 EMAT 对裂纹的检测灵敏度与效果; 王淑娟等^[26]基于有限元方法对单匝曲折线圈结构的一发一收 EMAT 接收性能进行了研究, 并对其几何结构参数进行了改进设计, 优化结果表明接收电压的峰峰值较原设计提升了 14%, 接着姜颖等^[27]针对接收信号信噪比较低的问题, 开展了线圈宽度与间距等参数对换能效率影响的研究, 均为 EMAT 换能器的设计与优化提供了思路与依据。

尽管电磁超声探头设计与优化已有不少研究成果, 但在面对一些特殊结构的焊缝时仍有不足。例如, 核电、船舶等领域焊缝具有结构尺寸紧凑、分布位置复杂、截面尺寸小等特点, 从而限定了探头仅可在焊缝附近实施检测, 且探头结构不能太大。因此, 本文提出了一种新型电磁超声换能器结构, 通过将 EMAT 中的激励线圈与接收线圈设计成双弧 V 型结构, 来控制 EMAT 激励超声能量区域, 并进一步结合单向点聚焦技术, 以增强对焊缝内微小缺陷的检测精度和灵敏度。

1 双弧 V 型点聚焦 EMAT 换能机制与设计

1.1 EMAT 换能机制

双弧 V 型聚焦 EMAT 由弧形线圈和永磁铁组成。当通入高频脉冲的弧形线圈处于外加磁场中时会产生磁致伸缩力和洛伦兹力, 激发原理如图 1 所示。

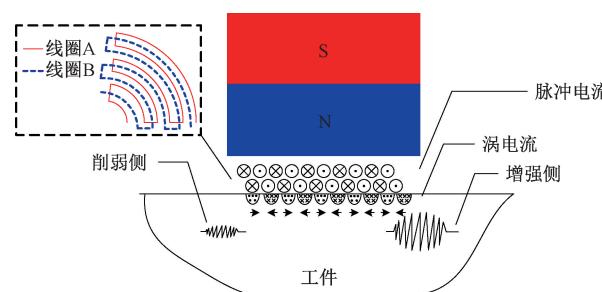


图 1 EMAT 换能原理

Fig. 1 Schematic diagram of the EMAT transduction principle

当弧形线圈通入高频交变电流 J_c 时,根据安培定律和趋肤效应,可以在工件趋肤层感应出交变涡电流 J_e 。涡电流在线圈产生的交变磁场 B_d 和永磁铁提供的偏置磁场 B_s 的组合作用下,工件中的质点将受到洛伦兹力 f_L 、磁化力和磁致伸缩力的作用,在工件表面和内部分别产生表面波和 SV 波。

当外加垂直静磁场强度超过 0.1 T 时,磁化力和磁致伸缩力引起的影响可以忽略不计,因此后续研究主要考虑洛伦兹力。

$$f_L = J_c \times (B_s + B_d) \quad (1)$$

洛伦兹力 f_L 作为电磁场与固体力学场之间的关键耦合变量,其作用机制可通过弹性动力学模型加以描述,该模型的基本原理由以下波动方程表述:

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot u) + f_L = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2)$$

其中, u 为位移, t 表示时间, ρ 为质量密度, λ 和 μ 为试样材料的拉梅常数。导波在遇到缺陷或边界时发生反射和透射,回波信号携带试样的结构信息。接收过程中,导波引起线圈磁通量变化,并在接收线圈中感应出电动势,将声场信号转换为电信号,实现缺陷检测。

1.2 点聚焦 EMAT 换能器设计

尽管电磁超声检测技术(EMAT)因其非接触、无需耦合剂的特性在无损检测领域展现出显著优势,然而传统的线圈设计仍面临诸多挑战,例如能量转换效率低、杂波干扰显著以及超声波方向性控制不足等问题。尤其在实际检测过程中,板材通常和支撑结构连接在一起,支撑结构对信号的干扰尤为突出,主要表现为引入多余的反射波以及对超声能量的显著吸收,从而影响信号的信噪比与检测精度。

为了克服这些问题,提出了一种新的线圈拓扑方案如图 2 所示。该方案通过优化线圈的几何形状和布局配置来提高信号的激发效率与接收能力。通过合理的几何设计,新的线圈提高了超声波的方向性和能量集中度,能够有效地聚焦超声波,改善波的传播方向性,减少了支撑物对检测的影响。

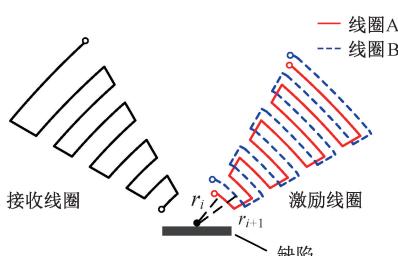


图 2 双弧 V 型换能器拓扑

Fig. 2 Topological diagram of the transducer

图 2 右侧为激励线圈,线圈 A 和 B 之间的间距为 $\lambda/4$,通入的激励电流的相位相差 90°,大幅度削减聚焦点另一侧的超声波能量,使焦点侧的能量加强;左侧为接收线圈,当检测到裂纹缺陷时,根据超声波的反射原理,声波会沿镜面反射的路径反射回去,恰好会被对称位置的接收线圈接受。若没有缺陷,超声波会沿原来的路径继续传播,不会被接收线圈所接收。因此该换能器可以通过判断接收线圈是否接收到信号,来判断缺陷有无。

$$r_i - r_{i+1} = \frac{c}{4f} = \lambda/4 \quad (3)$$

式中: r 为圆弧半径; λ 为超声波波长。

2 基于仿真模型的探头优化

2.1 仿真模型的建立

基于 COMSOL Multiphysics 平台构建了 EMAT 的三维多物理场耦合仿真模型如图 3 所示。

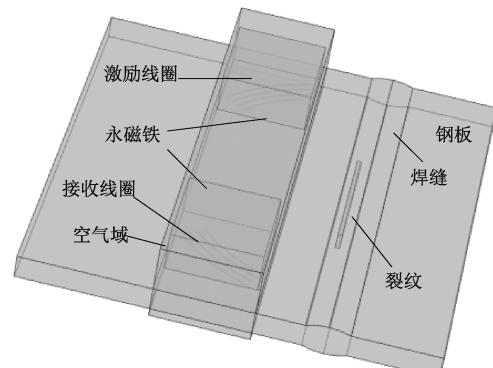


图 3 有限元模型三维图

Fig. 3 3D view of the finite element model

该模型由永磁铁、弧形线圈、空气域及被测试件组成,通过对各物理场的耦合模拟,全面分析电磁场与机械波的相互作用。在模型中,根据安培定律和弹性动力学原理,通入交变电流的线圈会产生交变磁场,该磁场作用于工件表面,使工件中的趋肤层产生涡流。涡流在外加磁场的作用下,进一步转化为超声波信号,从而实现对工件缺陷的检测。为实现对焊缝表面及近表面微小缺陷的有效检测,采用表面波作为激励波型。相较于体波或兰姆波,表面波在均匀各向同性材料中传播时具备非频散特性,即不同频率分量传播速度一致,有利于时域波形保持清晰完整,增强缺陷回波信号的可识别性。具体的仿真参数,包括线圈的几何尺寸、磁场强度等如表 1 所示。

此外,根据表面波的传播特性,其能量高度集中于材料表层,穿透深度一般为波长的 1~2 倍,适合探测毫米

表 1 EMAT 模型设计参数

Table 1 Design parameters of the EMAT model

设计参数	值	设计参数	值
永磁铁/mm	20×20×5	工件/mm	60×60×10
磁通密度/T	1.25	激励线圈间距/mm	0.5
线圈匝数	4	接收线圈间距/mm	1
弧形角度/(°)	30	工件密度/(kg·m ⁻³)	2 700
激励周期	5	杨氏模量/Pa	7.79×10 ¹⁰
提离/mm	0.5	泊松比	0.33

级的浅表缺陷,为确保检测区域处于表面波能量覆盖范围内,待测工件厚度一般应为波长的 4 倍以上。结合本文检测对象——厚度约为 10 mm 的钢制焊缝构件,为实现良好的波形保持与穿透能力,对表面波的传播速度与激励频率进行了匹配设计。表面波的传播速度可通过式(4)进行估算,即:

$$C_R \approx \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \sigma)}} \quad (4)$$

式中: σ 为泊松比; E 为杨氏模量; ρ 为密度。计算得出在该工件中波的传播速度为 3 000 m/s 左右,考虑表面波波长需<2.5 mm 以满足能量浅表集中的要求,结合超声波频率越高则衰减越显著的特性,最终选定激励频率为 1.5 MHz,使波长约 2 mm,以实现对焊缝表面及近表面微小缺陷的高效激励与检测。弧形线圈中通入频率为 1.5 MHz 的高频脉冲电流,并采用调制周期为 5 的汉宁窗对余弦信号进行调制如图 4 所示,激励函数的具体形式如式(5)所示。

$$y = \begin{cases} 0.5A \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi ft}{n}\right)\right) \cos(2\pi ft), & 0 < t < nT \\ 0, & t > nT \end{cases} \quad (5)$$

其中, A 为激励电流的幅值, T 为激励周期, n 为激励电流的脉冲数。

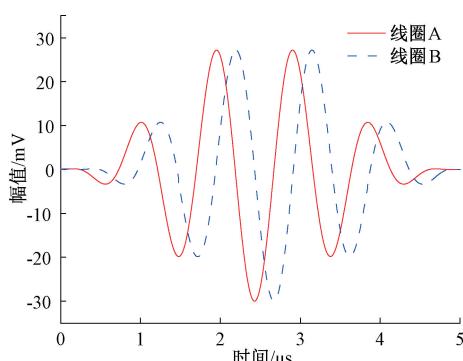


图 4 激励脉冲信号

Fig. 4 Excitation pulse signal waveform

需说明的是,所设计换能器并非仅适用 10 mm 厚度工件。对于厚度更大的工件,由于表面波始终集中传播于表层 2 mm 内,因此原结构参数可继续使用,无需调整即可保持良好的检测能力;波长不再满足小于板厚 1/4 的条件时,则需根据实际板厚重新匹配波长与频率,并据此优化线圈结构,以确保缺陷处于能量主覆盖区域内。

2.2 仿真分析

在模型建立完成后,对仿真结果进行了系统的分析。首先,分别提取了超声波传播路径上 (-2, -15)、(4, -9) 两个点的位移场如图 5 所示。

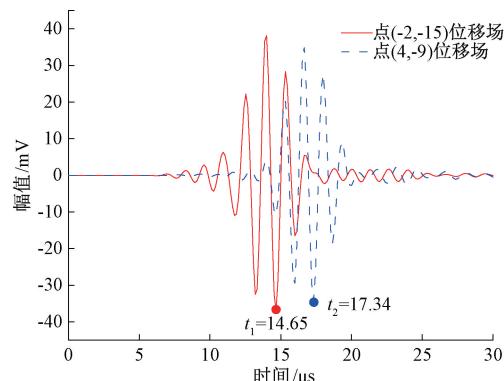


图 5 传播路径上两个不同点的位移场

Fig. 5 Displacement fields at two different points along the propagation path

提取出幅值最大两个点之间的时间差,并计算了表面波的传播速度 $v = 3 154$ m/s。这一结果与通过材料的杨氏模量和泊松比计算得到的声速 3 070 m/s 相比,误差为 1.3%,验证了仿真模型的准确性和可靠性。接着为了观察声波在工件中以及传播至焊缝缺陷处的反射情况,提取 8~18 μs 的质点仿真位移场云图,分析在不同时间点上超声波传播情况,来揭示缺陷对超声波传播的具体影响。如图 6 所示,从超声波传播云图中可以观察到:

超声波激发后,声波向四周传播,接收线圈不仅接收来自缺陷的反射信号,还可能采集到沿工件表面传播的干扰波,如图 6(a)所示。这些非目标信号可能掩盖缺陷回波,影响检测结果,因此在参数优化中需重点考虑;超声波在检测到焊缝中的缺陷后,会产生明显反射信号图 6(b)所示;最后由于线圈结构具有一定方向性,该信号沿入射路径的镜像方向传播,最终被接收探头接收如图 6(c)所示。

为进一步提升双弧 V 型聚焦电磁超声换能器的激励效率与定向性能,需对其结构中 V 型夹角参数进行优化分析。V 型结构作为引导电流路径和聚焦超声能量的重要几何特征,其夹角大小直接影响线圈电流的空间分布与感应磁场的方向性,进而影响超声波束的传播方向、聚

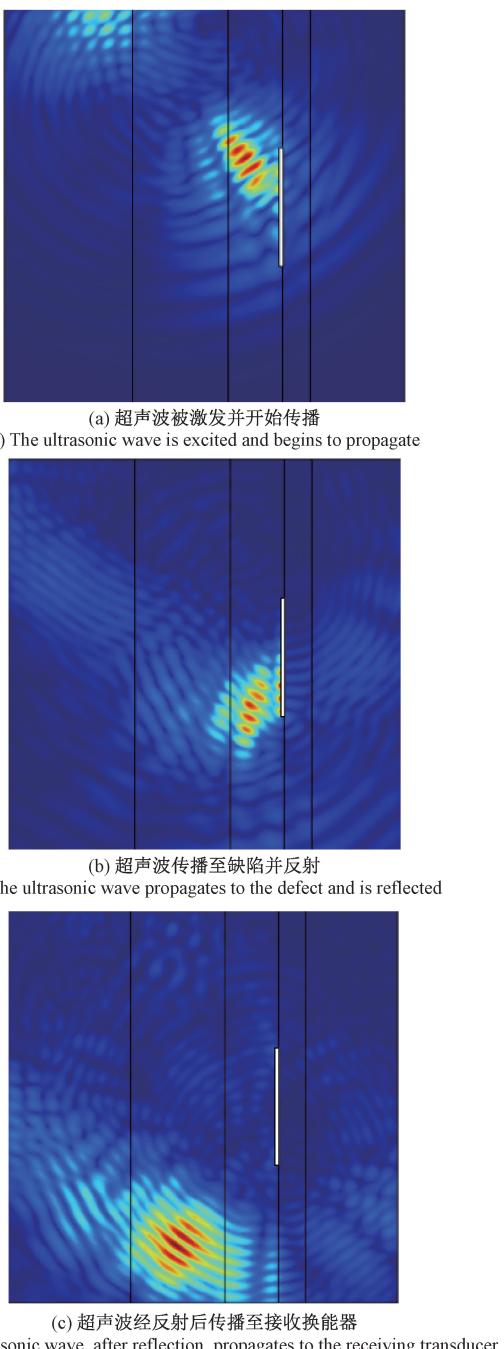


图6 超声波传播云图

Fig. 6 Ultrasonic wave propagation contour map

焦区域以及缺陷响应的幅值特征。夹角过小易产生互感干扰与回波信号重叠,干扰回波的稳定识别;夹角过大则可能削弱激励方向性,降低缺陷响应强度。因此,合理设计V型夹角是确保换能器具备优良聚焦性能和适应性的重要环节。基于上述考虑,选取 70° 、 90° 和 110° 这3种V型夹角作为分析对象,构建相应仿真模型,并在相同传播距离处提取位移场信号进行对比如图7、8所示。

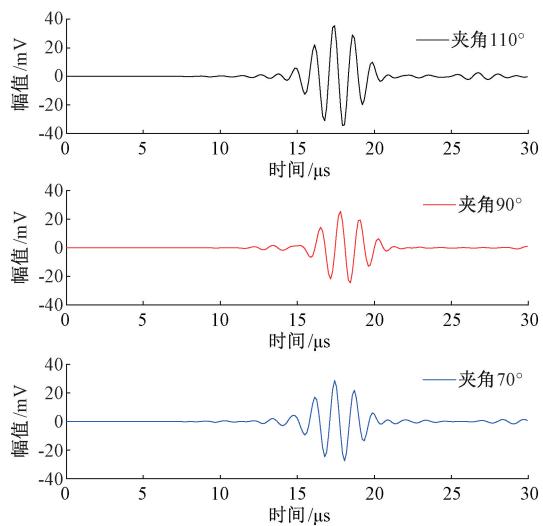


图7 不同V型夹角的缺陷回波信号

Fig. 7 Echo signals of defects with different V-shaped angles

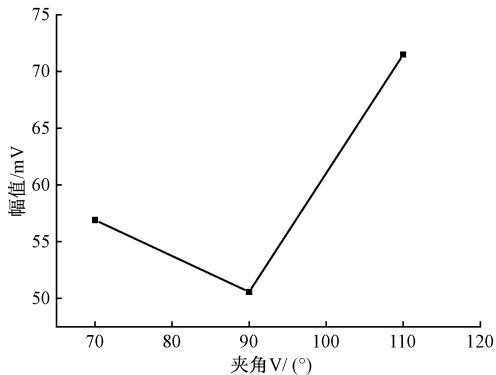


图8 不同V型夹角的缺陷回波幅值

Fig. 8 Echo amplitudes of defects with different V-shaped angles

通过分析各夹角对应的回波信号波形及峰峰值可以发现,不同夹角下超声波的聚焦性能和缺陷响应幅值存在明显差异,其中 110° 结构在本次仿真工况下获得了更强的回波响应,表现出更优的检测效果。该结果为后续换能器结构参数的优化提供了可靠依据。

在确定了V型夹角参数后,为进一步提升换能器激励区域内的波束强度与定向性能,本研究对双弧形线圈单侧的圆心角进行了优化分析。圆心角作为决定弧形线圈展开范围与电流排布密度的关键参数,其大小将直接影响线圈所产生感应磁场的叠加效果与超声波能量的空间分布特性。

结合工程实际加工可行性及有限空间布线需求,选取 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 这5组圆心角构建仿真模型,并提取固定位置处缺陷反射回波信号的幅值,进行对比。仿真结果如图9、10所示。

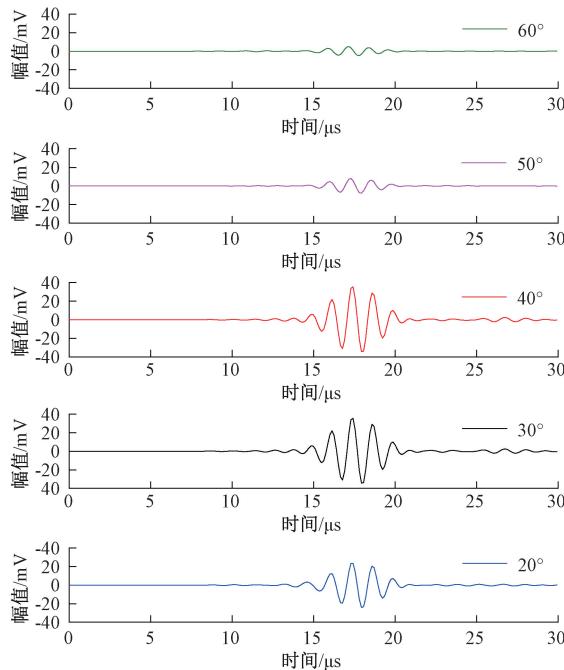


图 9 不同圆心角的缺陷回波信号

Fig. 9 Echo signals of defects with different central angles

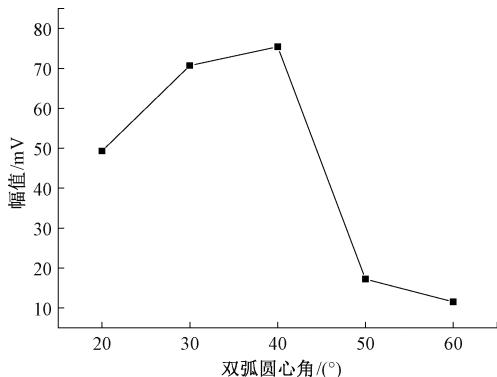


图 10 不同圆心角的缺陷回波幅值

Fig. 10 Echo amplitudes of defects with different central angles

如图 10 所示,随着圆心角的增大,激励波幅值先增后减,表现出明显的最优区间。当圆心角为 40° 时,换能器的激发效果最优,对应的回波信号幅值最大且信噪比最高。基于该仿真结果,最终确定 V 型夹角为 110°、圆心角为 40° 的双弧形曲折线圈结构作为最优设计方案。在此设计基础上,为进一步分析电磁超声聚焦换能器在近场区的能量分布特性及其对缺陷检测性能的影响,沿超声波主传播路径每隔 2 mm 设置若干离散提取点,其位置示意如图 11 所示。

获取不同位置的位移场幅值,来观察近场区的干扰,不同位置仿真幅值如图 12 所示。点位 1~3 之间的幅值呈现一定波动性,表明该区域处于近场干涉区,声能分布

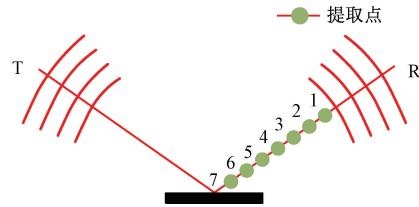


图 11 声波传播路径上的提取点示意图

Fig. 11 Schematic diagram of sampling points along the acoustic wave propagation path

不稳定,局部出现能量增强与削弱现象。点位 3~7 区域的幅值由于超声波的传播距离的增加,逐渐衰减。因此考虑到近场区的影响,点聚焦换能器的焦距至少要设置在 6 mm 以上,来避免近场区带来的干扰。

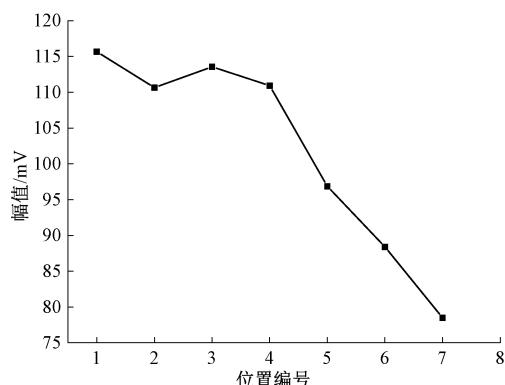


图 12 不同位置位移场幅值

Fig. 12 Displacement amplitude curves at different positions

3 实验与结果分析

为验证前章所设计的双弧 V 型电磁超声聚焦换能器在焊缝缺陷检测中的适用性与有效性,本章基于仿真模型与参数优化结果,开展了一系列实验研究。实验部分主要围绕焊缝表面与内部缺陷样本,搭建电磁超声检测系统,实测分析该换能器在不同缺陷类型、尺寸下的响应特性。

3.1 实验平台的构建

实验平台示意图和实物图如图 13、14 所示,该系统主要由主控计算机、Ritec RAM-5000 SNAP 高能超声检测系统、阻抗匹配器、示波器、换能器、测试试块等部分组成。实验采用一发一收模式,激励部分由 RAM-5000 提供两路频率相同、相位相差 90° 的高压脉冲信号至激励线圈,在与永磁体的耦合作用下激发出超声波。超声波在传播过程中遇到缺陷时发生反射,反射波被接收线圈接收并转换为电信号,最终显示于示波器上。

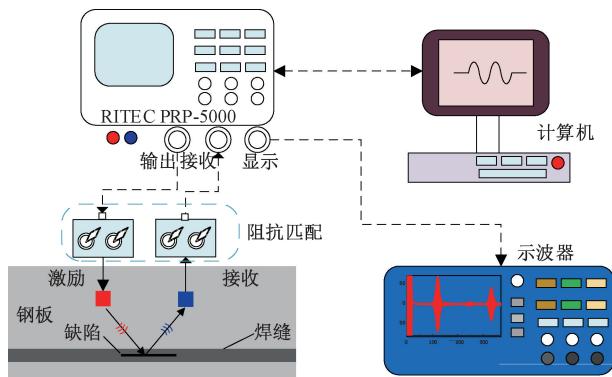


图 13 实验平台示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the experimental setup



图 14 实验平台实物图

Fig. 14 Photograph of the experimental setup

3.2 实验结果分析

为验证所设计的双弧V型聚能电磁超声换能器在焊缝缺陷检测中的实用性能,本文针对不同裂纹、圆孔类缺陷开展了实验研究,缺陷参数如表2所示。

表 2 缺陷类型与尺寸参数

Table 2 Defect types and dimensional parameters

缺陷类型	缺陷编号	缺陷尺寸/mm
裂纹	1#	10×0.5×1
	2#	10×0.5×0.5
	3#	10×0.5×0.2
气孔	4#	3
	5#	2
	6#	1

实验中保持换能器结构与激励参数一致,通过改变缺陷尺寸构造出不同工况,采集相应的超声回波信号。图15、16展示了在相同实验条件下,不同尺寸和不同种类缺陷的检测情况。

通过对不同类型与不同尺寸缺陷在相同检测条件下获得的回波信号进行对比分析,各编号缺陷的主回波波

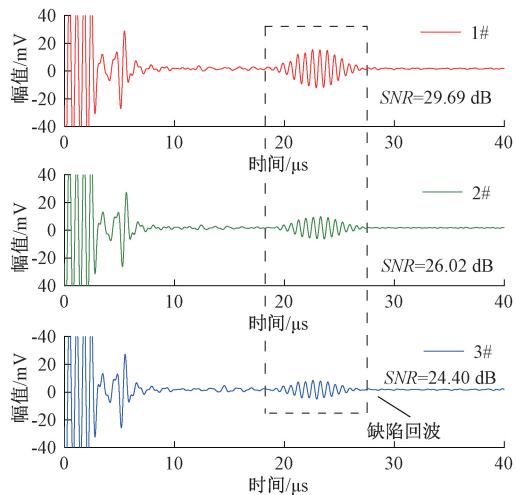


图 15 不同尺寸裂纹缺陷的回波信号

Fig. 15 Echo signals of crack defects with different sizes

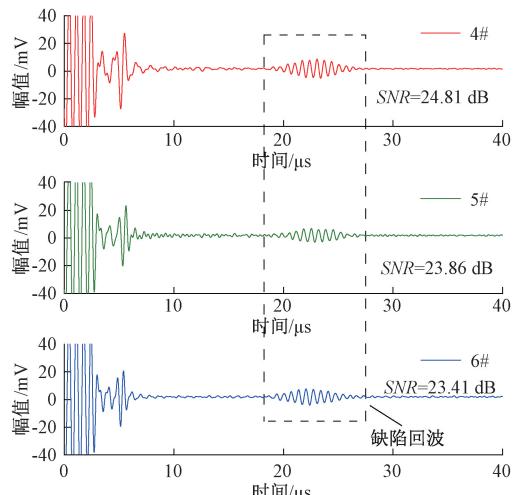


图 16 不同尺寸气孔缺陷的回波信号

Fig. 16 Echo signals of pore defects with different sizes

包在时间轴上的出现位置高度一致,波形形态整体稳定,信号包络形状相近。这种现象表明所设计的双弧V型聚能电磁超声换能器在激励与接收过程中具有良好的方向性控制能力,能够保持声束传播路径的一致性和空间聚能区域的稳定性。另外,各类缺陷所激发的主回波的波包均表现出明显的能量集中特征,且整体波形中未出现多重反射干扰、边界杂散波或显著背景噪声叠加。信号整体干净、主瓣突出,有较强的超声聚能能力与抗干扰能力。

为进一步验证所提出的双弧V型聚能电磁超声换能器在微小缺陷检测中的性能提升效果,选取裂纹尺寸为10 mm×0.5 mm×0.2 mm的最小裂纹缺陷与直径1 mm的最小气孔缺陷作为对比对象,分别对优化前与优化后

的检测结果进行分析,如图 17、18 所示。

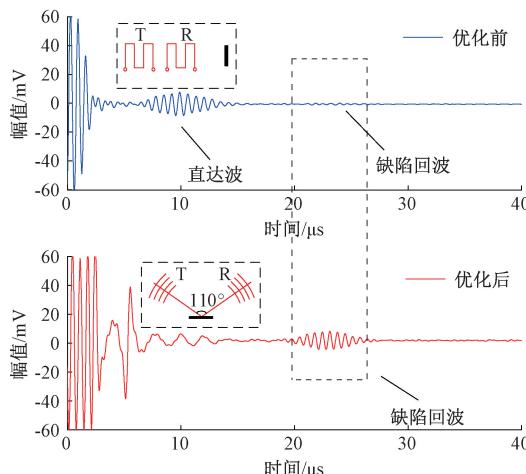


图 17 最小裂纹缺陷优化前与优化后检测结果对比

Fig. 17 Comparison of detection results before and after optimization for the smallest crack defect

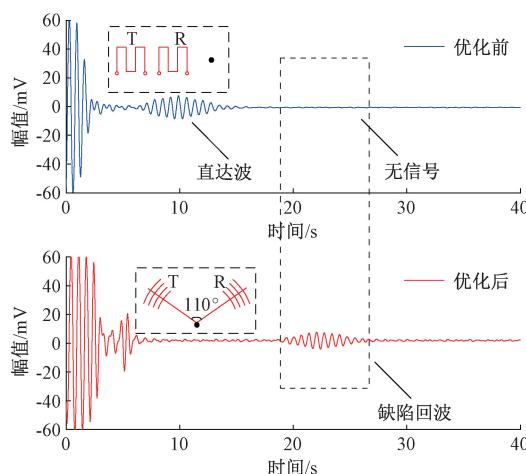


图 18 最小气孔缺陷优化前与优化后检测结果对比

Fig. 18 Comparison of detection results before and after optimization for the smallest pore defect

从图 18 中可以明显看出,优化前采用传统曲折线圈结构时,两个最小缺陷样本均未在预期的缺陷回波窗口内产生显著的回波信号,尤其是气孔缺陷几乎完全被背景噪声淹没,信噪比极低,导致检测结果不具备识别性。而优化后所采用的双弧 V 型聚焦结构在相同工况下,均能够检测出明显的缺陷回波信号,波包集中、幅值清晰,具有良好的时域辨识度。尤其在气孔缺陷中,优化后信号在 20~30 μs 内呈现出完整波形,表明该结构在微弱散射目标的响应提取方面具有显著优势。

4 结 论

本研究围绕焊缝缺陷的高灵敏度无损检测需求,设计了一种新型双弧 V 型点聚焦电磁超声换能器结构,并开展了参数优化及性能验证等工作,具体包括:

1) 提出采用双弧 V 型对称结构布置激励线圈,有效提升了声束的方向性与聚焦能力。通过系统分析 V 型夹角与圆心角参数对缺陷响应的影响,最终确定 110° 夹角与 40° 圆心角的组合为最优结构,实现了激励波束的高方向性控制和能量集中性提升。

2) 相较于传统直线式曲折线圈换能器,所提出的双弧 V 型聚焦结构在声束方向性控制、缺陷能量响应增强及信噪比提升方面表现出显著优势,特别是在检测微小裂纹与气孔等弱散射缺陷时,能够获得更清晰的回波信号与更高的可识别性。

3) 在所有缺陷检测实验中,针对尺寸最小的缺陷 10 mm×0.5 mm×0.2 mm 裂纹和 1 mm 气孔,所设计的双弧 V 型聚焦电磁超声换能器仍能激发出幅值明显的回波信号,信噪比最高达 29.69 dB,最低亦可保持在 23.41 dB 以上。该数值已显著高于通常可识别阈值(6~10 dB),表明其在微小缺陷条件下,所设计换能器仍具备较好的缺陷响应。

参考文献

- [1] SHIOTANI T, OGURA N, OKUDE N, et al. Non-destructive inspection technologies for repair assessment in materials and structures[J]. Developments in the Built Environment, 2024, 18: 100443.
- [2] 杨斌, 易朋兴, 郝峰旭. 基于电磁超声的小样本铝板表面缺陷检测方法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(3): 109-115.
YANG B, YI P X, HAO ZH X. Electromagnetic acoustic testing-based method for small-sample surface defect detection of aluminum plates[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(3): 109-115.
- [3] 黄松岭, 彭丽莎, 孙洪宇, 等. 航空发动机叶片缺陷无损检测与在线监测技术综述[J]. 测控技术, 2023, 42(5): 1-11.
HUANG S L, PENG L SH, SUN H Y, et al. Review of nondestructive testing and online monitoring technologies for aero-engine blade defects[J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(5): 1-11.
- [4] 袁炜, 胡梦伟, 王晓, 等. 钢轨焊接接头电感应加热数值模拟及工艺[J]. 焊接学报, 2024, 45(12): 79-89.
YUAN W, HU M W, WANG X, et al. Numerical simulation and process of induction heating for rail weld

- joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(12): 79-89.
- [5] 杨夏炜, 孟廷曦, 褚强, 等. 铝合金双面搅拌摩擦焊接的研究进展[J]. 机械工程学报, 2024, 60(14): 77-96.
- YANG X W, MEMG T X, CHU Q, et al. Research progress of double-sided friction stir welding for aluminum alloys [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(14): 77-96.
- [6] YANG Y J, ZHONG J K, QIN A S, et al. Feature extraction of ultrasonic guided wave weld detection based on group sparse wavelet transform with tunable Q-factor[J]. Measurement, 2023, 206: 112314.
- [7] 陈晓明, 王丽, 马良, 等. 钢筋工程焊缝质量检测技术研究进展[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(12): 1215-1224.
- CHEN X M, WANG L, MA L, et al. Research progress on weld quality inspection techniques in rebar engineering[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(12): 1215-1224.
- [8] 王睿, 高少泽, 刘卫朋, 等. 一种轻量级高效X射线焊缝图像缺陷检测方法[J]. 焊接学报, 2024, 45(7): 41-49.
- WANG R, GAO SH Z, LIU W P, et al. A lightweight and efficient X-ray weld image defect detection method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(7): 41-49.
- [9] ZHANG X, ZHANG M L, JIAO SH L, et al. Design and optimization of the wall climbing robot for magnetic particle detection of ship welds[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(4): 610.
- [10] WANG SH F, ZHANG E Q, YUAN B, et al. An artefact suppression framework in ultrasonic phased array tomography for metal welds[J]. NDT & E International, 2025, 155: 103423.
- [11] SHAO J X, DU D, CHANG B H, et al. Automatic weld defect detection based on potential defect tracking in real-time radiographic image sequence [J]. NDT & E International, 2011, 46: 14-21.
- [12] 陈涛, 何倩, 吕程, 等. 压力管道缺陷电磁超声/脉冲涡流复合检测方法研究[J]. 传感技术学报, 2023, 36(6): 860-867.
- CHEN T, HE Q, LYU CH, et al. Research on electromagnetic acoustic/pulsed eddy current composite detection method for defects in pressure pipelines [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(6): 860-867.
- [13] 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. SH-type weld guided wave excitation method based on electromagnetic acoustic transducers [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 275-283.
- [14] JIANG X, ZHOU W S, ZHANG X, et al. Guided wave-based crack detection in U-shaped flexural plate butt welds[J]. Engineering Structures, 2024, 303: 117558.
- [15] 杨理践, 邢燕好, 张佳, 等. 基于电磁超声导波的铝板裂纹缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 150-160.
- YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Crack defect detection method for aluminum plates based on electromagnetic acoustic guided waves [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39 (4): 150-160.
- [16] 翟国富, 汪开灿, 王亚坤, 等. 螺旋线圈电磁超声换能器解析建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 147-154.
- ZHAI G F, WANG K C, WANG Y K, et al. Analytical modeling and analysis of spiral coil electromagnetic acoustic transducers [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 147-154.
- [17] 邱锦川, 刘昭廷, 罗伟, 等. 基于正交试验法的电磁超声换能器梯形硅钢聚磁器优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(12): 98-106.
- QIU J CH, LIU ZH T, LUO W, et al. Optimization design of trapezoidal silicon steel magnetic concentrator for electromagnetic acoustic transducers based on orthogonal experimental method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(12): 98-106.
- [18] THON A, PAINCHAUD-APRIL G, LE DUFFA A, et al. On the use of a linear array EMAT for remote thickness gauging using the reflected modes on a steel pipe[J]. NDT & E International, 2023, 139: 102917.
- [19] 胡正, 屈海峰, 郭新峰, 等. 多面磁轭结构的单磁铁电磁超声换能器设计[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 174-182.
- HU ZH, QU H F, GUO X F, et al. Design of a single-magnet electromagnetic acoustic transducer with a multi-surface yoke structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 174-182.
- [20] SUN H J, UCHIMOTO T, TAKAGI T. New combination of magnet and coil of electromagnetic acoustic transducer for generating and detecting Rayleigh wave [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and

- Frequency Control, 2019, 67(4): 832-839.
- [21] 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 an electromagnetically controlled EMAT[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(2): 46-52.
- [22] TU J, ZHAN X X, SUN H Y, et al. Design and experimental study of electromagnetic ultrasonic single-mode guided wave transducer for small-diameter stainless steel tubes[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2025, 40(1): 332-348.
- [23] KANG L, ZHANG CH, DIXON S, et al. Enhancement of ultrasonic signal using a new design of Rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer [J]. NDT & E International, 2017, 86: 36-43.
- [24] 张金, 赵亮, 石文泽, 等. 曲折线圈电磁超声换能器激励性能优化设计[J]. 传感技术学报, 2019, 32(8): 1182-1188.
ZHANG J, ZHAO L, SHI W Z, et al. Optimization design of excitation performance for meander line coil electromagnetic acoustic transducer[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(8): 1182-1188.
- [25] 时亚, 石文泽, 陈果, 等. 钢轨踏面检测电磁超声表面波换能器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 239-249.
SHI Y, SHI W Z, CHEN G, et al. Optimization design of EMAT surface wave transducer for rail tread inspection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 239-249.
- [26] 王淑娟, 李智超, 李鹏展, 等. 非铁磁材料表面波电磁超声换能器接收性能分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2360-2365.
WANG SH J, LI ZH CH, LI P ZH, et al. Analysis and optimization design of surface wave EMAT receiving performance for non-ferromagnetic materials[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2360-2365.
- [27] 姜颖, 郭新峰, 项延训. SH 电磁超声换能器优化设计及粘接强度测量[J]. 声学技术, 2023, 42(5): 695-700.

JIANG Y, GUO X F, XIANG Y X. Optimization design of SH electromagnetic acoustic transducer and measurement of bonding strength [J]. Technical Acoustics, 2023, 42(5): 695-700.

作者简介



申鑫, 2023 年于许昌学院获得学士学位, 现为湖北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声换能器设计和超声缺陷检测。

E-mail: shenxin@hbut.edu.cn

Shen Xin received his B.Sc. degree from Xuchang University in 2023. He is currently a master student from Hubei University of Technology. His main research interests include electromagnetic ultrasonic transducer design and ultrasonic defect detection.



涂君(通信作者), 分别在 2006 年, 2009 年和 2014 年于华中科技大学获得学士, 硕士和博士学位, 现为湖北工业大学教授, 主要研究方向为超声无损检测新技术及应用。
E-mail: Juntu@hbust.edu.cn

Tu Jun (Corresponding author) received his B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees all from Huazhong University of Science and Technology in 2006, 2009 and 2014, respectively. He is currently a professor at Hubei University of Technology. His main research interest is new technology and application of ultrasonic nondestructive testing.



宋旖旎, 2020 年于武汉理工大学、英国伯明翰大学获得学士学位, 2022 年于英国华威大学获得硕士学位, 现为华中科技大学博士研究生。主要研究方向为电磁超声。
E-mail: songyini@hust.edu.cn

Song Yini received her B.Sc. degree from Wuhan University of Technology and the University of Birmingham in 2020, received her M.Sc. degree from the University of Warwick in 2022. She is currently a Ph.D. candidate at Huazhong University of Science and Technology. Her main research interest is electromagnetic acoustic transducers.