

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407755

面向亚毫米级焊缝缺陷检测的压电超声换能器线阵设计*

胡子健 孙长河 黑 创 罗明璋 杜国锋

(长江大学电子信息与电气工程学院 荆州 434023)

摘要:在“双碳”目标下,钢结构广泛应用于各种大型工业领域,但是钢结构在连接焊接时受制作工艺、环境等因素易出现各种焊缝缺陷,这些缺陷会降低钢结构的稳定和使用寿命,及时发现缺陷对损伤评估和维修具有重要意义。针对现有钢结构内部焊缝缺陷检测存在难以兼顾检测分辨率和检测范围的局限,设计了一种十六通道高分辨率压电超声换能器线阵。首先,通过理论模型优化确定压电超声换能器线阵结构并完成器件制作。其次,为了测试研制的线阵探头的性能,对其展开电阻抗、超声性能的测试。测试结果表明理论设计的谐振频率与实验测试结果偏差小于5%,各阵元的-6 dB相对带宽平均值为79.33%,说明通过声阻抗匹配层和楔块设计成功设计研制出宽频带线阵探头。最后,采用该线阵探头对25 mm厚度标准焊接试块内部直径分别为2 000、1 000和500 μm 的3种孔缺陷进行检测分析,结果表明均能有效识别且检测分辨率优于500 μm ,为厚钢板焊缝早期微小缺陷准确检测及预警提供技术支持。

关键词:压电超声换能器;线阵;缺陷检测;亚毫米级

中图分类号: TP212; TN65 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Linear array design of piezoelectric ultrasonic transducer for sub-millimeter weld defect detection

Hu Zijian Sun Changhe Hei Chuang Luo Mingzhang Du Guofeng

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: Under the “double carbon” goal, steel structures are widely used in a variety of large-scale industrial fields. However, steel structures are susceptible to various weld defects due to production process, environment and other factors during connection welding. These defects reduce the stability and service life of the steel structure. Timely detection of defects is important for damage assessment and repair. Aiming at the existing limitations of detecting weld defects in steel structures, it is difficult to balance the detection resolution and detection range. A sixteen-channel high-resolution piezoelectric ultrasonic transducer linear array is designed. Firstly, the structure of the piezoelectric ultrasonic transducer linear array is determined through the optimization of the theoretical model and the device is fabricated. Secondly, in order to test the performance of the developed line array probe, the electrical impedance and ultrasonic performance are tested. The test results show that the deviation between the theoretical design resonant frequency and the experimental test results is less than 5%, and the average -6 dB relative bandwidth of each array element is 79.33%. A broadband linear array probe is successfully designed and developed through the design of acoustic impedance matching layers and wedges. Finally, the linear array probe was used to detect and analyze three types of hole defects with internal diameters of 2 000, 1 000 and 500 μm respectively in a 25 mm thick standard welded test block. The results show that all can be effectively identified and the detection resolution is better than 500 μm , providing technical support for the accurate detection and early warning of tiny defects in thick steel plate welds.

Keywords: piezoelectric ultrasonic transducer; linear array; defect detection; sub-millimeter

收稿日期: 2024-08-09 Received Date: 2024-08-09

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52205587)、湖北省自然科学基金青年项目(2022CFB734)、重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室开放基金(SKLMT-MSKFKT-202326)项目资助

0 引言

“双碳”目标下随着国家能源安全战略的稳步实施,目前在海洋石油平台、桥梁隧道工程、大型船舶机场等领域中广泛应用的钢结构增速明显且呈大型化趋势。钢结构在连接焊接时受制作工艺、在役工作环境等多源因素影响较易出现各种焊缝缺陷,如气孔、夹渣、裂纹、穿孔等^[1-2],这些缺陷会逐渐降低焊缝区域的韧性直至结构失效,因此早期检测识别焊缝内的微小缺陷至关重要。国内外常用的焊缝无损检测方法有:漏磁检测^[3]、渗透检测^[4]、X射线检测^[5]、涡流检测^[6]、超声波检测^[7]等。漏磁检测、渗透检测和涡流检测通常适用于薄钢板焊缝检测或者厚钢板表面区域检测^[8],X射线检测技术难以检测微小缺陷^[9],常规的超声波检测方式存在检测范围有限、检测分辨率低、难以适用于复杂形状工件结构等局限^[10]。与上述无损检测方法相比,相控阵超声检测技术具有声束偏转和自动聚焦的特点,能够提供更高的钢板焊缝检测分辨率和更大的检测范围^[11-13]。针对中厚(≥ 20 mm)以上钢板焊缝内部的缺陷检测方面,万家瑞等^[14]采用相控阵检测技术能有效检测壁厚为 26 mm 管道内部特征尺寸为 1 000 μm 的环焊缝缺陷。孙长河等^[15]研制一种中心频率为 2.7 MHz 的压电超声换能器阵列,能有效检测厚度为 20 mm 钢板内部特征尺寸为 1 000 μm 的焊缝缺陷。针对薄(≤ 10 mm)钢板焊缝内部的缺陷检测方面,Li 等^[16]设计了一种中心频率为 5 MHz 的多通道压电超声换能器阵列,能有效检测厚度为 10 mm 的管道内部特征尺寸为 500 μm 的焊缝缺陷。Jiang 等^[17]研制了一种中心频率为 10 MHz 的微型相控阵超声换能器,能有效检测特制模具上间距为 400 μm 的金属叉指。综上所述,高频超声相控阵能够获得 500 μm 级别的焊缝缺陷检测分辨率,但是检测范围比较有限,目前主要适用于薄钢板焊缝检测。而低频超声相控阵尽管具有更大的焊缝检测范围,但是焊缝缺陷检测分辨率都在毫米级以上。卜阳光等^[18]提出一种超声相控阵全聚焦方法,能有效检测壁厚为 8 mm 管道焊缝内部特征尺寸为 530 μm 的缺陷。基于全矩阵采样的全聚焦相控阵技术在一定程度上改善了检测灵敏度,提高了成像质量和分辨率,但存在采集数据大,数据处理时间长,成像速度慢等难题且难以有效检测厚钢板内部特征尺寸小于毫米级的缺陷^[19-20]。因此,针对现有超声相控阵难以兼顾钢结构焊缝检测分辨率和检测范围的瓶颈,研发一种能准确检测厚钢板内部亚毫米级别缺陷的新型超声相控阵技术十分必要,能够为厚钢板焊缝早期缺陷准确检测及预警提供技术支撑。

本研究将微型压电晶片以垂直并排方式排列设计压电超声换能器线阵,通过理论建模分析优化线阵结构,研

制一种能准确有效检测识别 25 mm 厚度钢板内部亚毫米级焊缝缺陷的十六通道高分辨率压电超声换能器线阵探头。

1 压电超声换能器线阵理论设计

1.1 压电超声换能器线阵结构设计

压电超声换能器线阵探头是由保护膜、微型压电晶片线阵、阻尼块、金属外壳、楔块、传输线等组成,线阵探头整体结构设计如图 1 所示。压电晶片选用高压电性能和高机电耦合效应的 PZT-5H。为了提高横向分辨率,将压电晶片设计成矩形条状,每片压电晶片夹在银薄膜之间作为电极,由传输线引出。压电晶片线阵由 16 个垂直并列的压电元件组成。阻尼块粘附在压电薄膜的背面和侧面,其主要材料是具有很高的热稳定性和良好机械性能的钨粉-树脂-玻璃球复合材料,主要用于吸收超声阵元侧壁的反射声波和抑制超声阵元背部的振动。

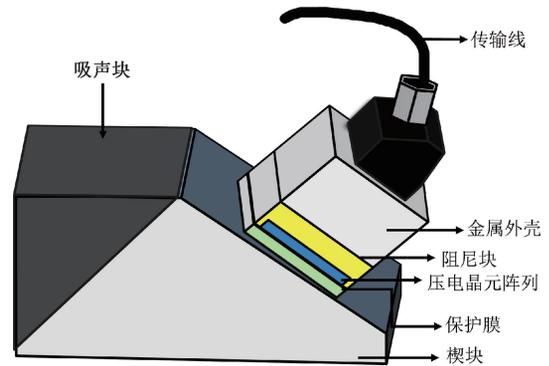


图 1 压电超声换能器线阵探头结构

Fig. 1 Structure of linear array probe of piezoelectric ultrasonic transducer

为了消除楔块中多次反射和散射带来的影响,在楔块侧边设计了一个吸声块,吸声块的材料是钨粉末-环氧树脂复合材料,用于吸收楔块中的回声。声阻抗匹配层是压电晶片线阵与楔块之间的一层保护层和超声波耦合层。声阻抗匹配层可提高超声波能量传输时的效率,减小声波在不同界面处的反射损耗,对提升超声换能器探头的分辨率、接收发射信号能力起着决定性作用。因此,通过理论计算选择出最佳匹配层,设计出高性能的超声换能器,声阻抗匹配层的最佳声阻抗为:

$$Z_m = \sqrt{Z_p Z_w} \quad (1)$$

式中: Z_m 、 Z_p 、 Z_w 分别为声阻抗匹配层、压电晶片和楔块的声阻抗。楔块选择用聚苯乙烯(Rexolite)材料制成的,因为聚苯乙烯有着非常低的声衰减(0.3 dB/mm)和声阻抗(2.5 MRayl)。所选用 PZT-5H 材料的声阻抗 Z_p 为 30 MRayl,根据式(1)可以计算出匹配层的理想声阻抗为

8.66 MRayl,因此采用定制的碳化钨/环氧树脂复合材料来制作声阻抗匹配层,其声阻抗约为 8.3 MRayl,介于 PZT-5H 和树脂石层之间,接近理想声阻抗匹配值。

1.2 压电超声换能器线阵工作频率优化

超声换能器的工作频率对超声换能器的分辨率十分重要,频率越高、波长越短,半扩散角就越小,声束指向性就越好,能量越集中,更有利于发现缺陷^[21]。另一方面,由近场区长度 $N = D^2/4\lambda$ 可知,频率越高,近场区长度越大,不利于检测缺陷。故为了能有效检测特征尺寸 δ 为 500 μm 的焊缝缺陷,超声纵波在钢板中的传播速度 v 约为 5 900 m/s,相邻反射波峰之间可以达到最小的时间间隔约为 $\Delta t_{\min} = 2\delta/v \approx 0.17 \mu\text{s}$,该时间间隔应不低于压电超声换能器线阵中心频率倒数的 0.6 倍,可计算出压电超声换能器线阵的中心频率不低于 3.52 MHz。国标《焊缝无损检测—超声检测—技术、检测等级和评定》中提到在钢板焊缝检测中,探头检测频率应在 2~5 MHz,当长声程检测或者被检测材料具有高衰减系数时,选择较低检测频率。综上所述,为了能实现对 25 mm 厚度钢板内部特征尺寸为 500 μm 的焊缝缺陷准确检测,选用 4 MHz 作为本文设计的线阵探头的工作频率。

当压电超声换能器线阵探头工作在厚度伸缩振动模式时,其谐振频率 f_r 与压电晶元的厚度 t 的关系为:

$$f_r = \frac{1}{2t} \sqrt{\frac{c_{33}^E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \sigma^E)}{(1 + \sigma^E)(1 - 2\sigma^E)}} \quad (2)$$

式中: c_{33}^E 、 σ^E 、 ρ 、 k_t 分别为压电薄膜的弹性刚度常数、泊松比、密度、机电耦合系数。由式(2)可计算压电晶元的厚度为 0.73 mm,为了避免径向伸缩振动模块干扰厚度伸缩振动模块,一般将压电晶元的长度设计成其厚度的十倍以上,故将压电晶元的长度定为 10 mm。

1.3 压电超声换能器线阵性能参数优化

压电超声换能器线阵中阵元数量是一个重要的参数,它不会决定主瓣的方向性和宽度,也会影响旁瓣的分布和幅度。优化超声换能器线阵探头的目的是减小主瓣的宽度,消除旁瓣的分布,降低振幅。主瓣宽度由偏转角 θ 附近的零点决定,当线阵宽度 ω 与超声波在钢板中传输的波长 λ 满足 $\omega/\lambda \leq 1$,则线阵的指向性函数 $H(\theta)$ 可表示为:

$$H(\theta) = \frac{\sin(\pi N d \sin\theta/\lambda)}{N \sin(\pi d \sin\theta/\lambda)} \quad (3)$$

式中: θ 、 N 、 λ 、 d 分别为偏转角、阵元数目、波长和阵元间距。

当 $H(\theta) = 0$ 时则有:

$$\frac{\pi N d \sin\theta}{\lambda} = m\pi (m \neq 0, m \in Z) \quad (4)$$

由式(4)可推导出 $\theta = \sin^{-1}(m\lambda/Nd)$ 。令 $m = 1$ 和

$m = -1$ 所对应的角度为主瓣的左右零点,则主瓣宽度可以表示为:

$$\theta_c = \frac{1}{\pi} \left\{ \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{Nd}\right) - \sin^{-1}\left(-\frac{\lambda}{Nd}\right) \right\} \quad (5)$$

由式(3)可得到不同阵元数目下波束指向性图,如图2所示。由图2可知当 $N=4, 8$ 时,线阵波束效果不理想,波束较宽。随着阵元数目增加,指向性函数大幅度提升,主瓣宽度变窄,波束指向性越好。由式(5)可得,阵元数目越多、阵元间距越大主瓣越窄。要想达到线阵探头能够有优良得性能,一般阵列数量在 8~32 之间^[22],但是过低的阵元数量会对灵敏度和精度有较大影响,过高的阵元数目又会增加制造成本,因此综合分析后折中选择压电超声换能器线阵阵元数目为 16。

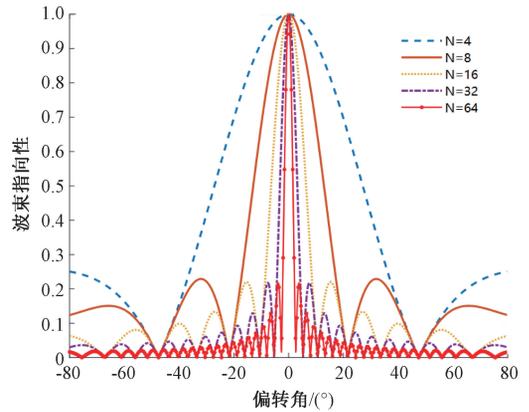


图2 不同阵元数目时的波束指向性图

Fig. 2 Beam directivity patterns for different array element numbers

除了阵元数目以外,阵元间距也是一个很重要的参数,会严重影响旁瓣的分布和幅度,选择合适的阵元间距也是提升探头性能的一个重要方向。对于均匀线阵排列,为了消除旁瓣带来的能量损失,阵元间距与声波波长需要满足式(6)的关系。

$$d_{\max} = \frac{\lambda}{1 + \sin\theta_{\max}} \cdot \frac{N - 1}{N} \quad (6)$$

由式(6)可得 $\lambda/2 < d_{\max} < \lambda$ 。即当阵元间距小于 $\lambda/2$ 时,不产生栅瓣。阵元间距是影响主瓣宽度的重要因素,当阵元间距增加时,主瓣的宽度会变窄,为了消除旁瓣的产生,同时也为了提高线阵的横向分辨率,设计的阵元间距应适当小于 d_{\max} ,故将压电超声换能器线阵间距定为 0.5 mm。

综上所述,通过理论数值分析,最终确定压电超声换能器线阵的结构设计为压电晶片厚度为 0.73 mm,阵元间距为 0.5 mm,阵元长度为 10 mm,阵元数目为 16。

图3所示为委托汕头超声仪器分公司定制的压电超声换能器线阵,其中 16 个阵元分别采用 16 个独立的通

道连接,实现各个通道超声信号的发射和接收。



图 3 压电超声换能器线阵实物

Fig. 3 Actual picture of piezoelectric ultrasonic transducer line array

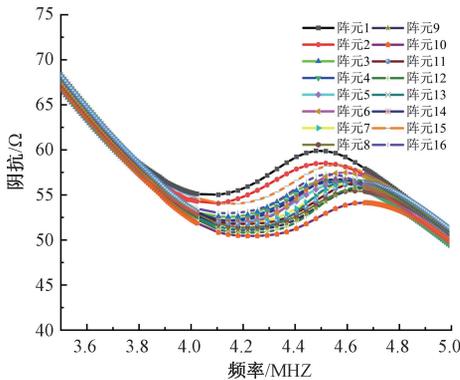
2 压电超声换能器线阵性能测试

2.1 压电超声换能器线阵阻抗测试

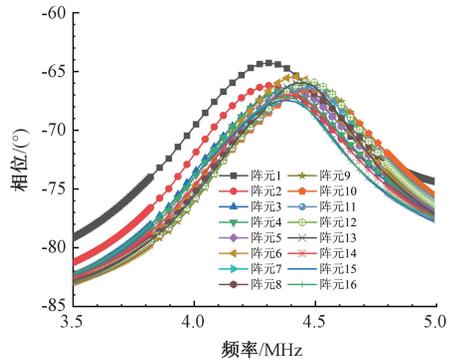
采用阻抗分析仪 LCR-8110G (固纬电子有限公司) 测试压电超声换能器线阵阻抗、相位频谱特性。图 4 所示为无楔块下的阻抗、相位频谱,从图中可知压电超声换能器线阵中 16 个阵元具有一致的阻抗谐振特性,16 个阵元的平均谐振频率 f_s 为 4.163 1 MHz,与理论设计频率 (4 MHz) 对比,压电超声换能器线阵探头的工作频率偏差小于 5%,谐振频率标准偏差只有 0.046 4 MHz,平均反谐振频率 f_a 为 4.585 9 MHz,有效机电耦合系数 k_{eff} 为:

$$k_{eff} = \sqrt{\frac{f_a^2 - f_s^2}{f_a^2}} \quad (7)$$

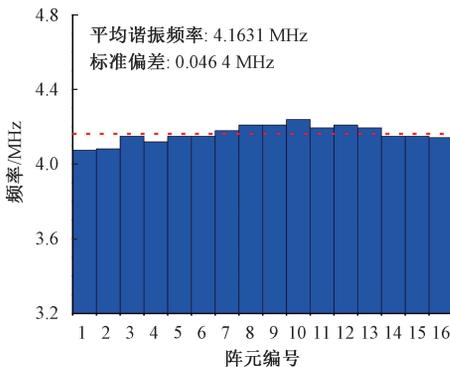
由式(7)计算可得 k_{eff} 为 0.419 4。图 5 所示为压电超声换能器线阵带楔块下的阻抗、相位频谱,从图 5 可知压电超声换能器线阵中 16 个阵元仍具有一致的阻抗谐振特性,16 个阵元的平均谐振频率 f_s 为 4.221 2 MHz,谐



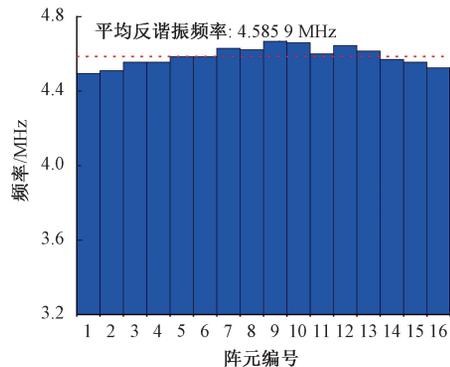
(a) 频率阻抗曲线
(a) Frequency impedance curve



(b) 频率相位曲线
(b) Frequency phase curve



(c) 各阵元谐振频率分布
(c) The distribution of resonant frequencies of each array element



(d) 各阵元反谐振频率分布
(d) The distribution of anti-resonant frequencies of each array element

图 4 压电超声换能器线阵无楔块下的阻抗、相位频谱

Fig. 4 Impedance and phase spectra of piezoelectric ultrasonic transducer line array without wedge

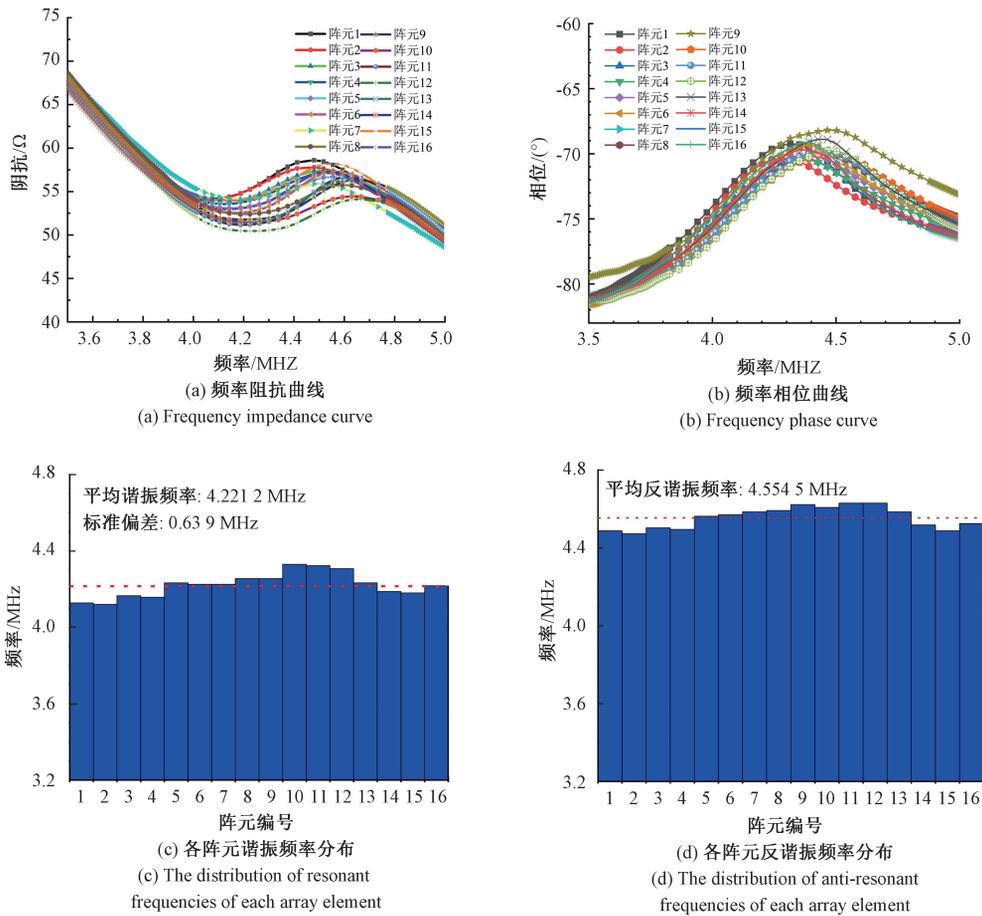


图 5 压电超声换能器线阵带楔块下的阻抗、相位频谱

Fig. 5 Impedance and phase spectrum of piezoelectric ultrasonic transducer line array with wedge

振频率标准偏差只有 0.063 9 MHz, 平均反谐振频率 f_a 为 4.554 5 MHz, 有效机电耦合系数 k_{eff} 为 0.375 5。与无楔块下的阻抗、相位频谱测试数据对比可知, 加入楔块后, 阻抗谐振曲线变得平坦, 说明该探头在楔块的作用下品质因数和有效机电耦合系数均会降低。

2.2 压电超声换能器线阵超声性能测试

为了进一步研究定制的压电超声换能器线阵的超声性能, 采用 5072PR 脉冲发生接收仪进行超声回波测试。在测试中, 选用厚度为 20 mm 的 Rexolite 试块进行超声回波测试。测试结果以阵元 8 为例, 可以得到加入楔块后压电超声换能器线阵探头接收超声脉冲回波信号如图 6(a) 所示, 回波脉冲持续时间约为 0.8 μ s, 回波电压峰值约为 350 mV。对时域回波脉冲信号的回波频谱进行快速傅里叶变换如图 6(b) 所示。由图 6(c) 可知, 平均中心频率为 3.89 MHz。由图 6(d) 可知, -6 dB 相对带宽平均值为 79.33%, 说明通过声阻抗匹配层和楔块设计成功设计出了宽频带线阵探头。

3 钢板焊接检测试验结果与讨论

为了进一步测试压电超声换能器线阵的性能, 搭建了检测标准试块的实验测试系统平台如图 7 所示, 其中包括了超声探伤仪、计算机(PC)、信号采集系统界面、压电超声换能器线阵探头和厚度为 25 mm 的标准试块。为了能更好对比体现压电超声换能器线阵的亚毫米级分辨率, 定制 3 种不同尺寸的孔缺陷标准试块, 缺陷尺寸分别为 500、1 000 以及 2 000 μ m, 如图 8 所示。

图 9 所示为该探头分别检测 3 种不同特征尺寸以及无缺陷的超声回波信号, 加入了对无缺陷标准试块的对比实验。由图可知, 当探头扫描无缺陷位置时, 只能接收由于楔块的作用下折射到标准试块底面然后反射回来的超声回波信号。而当探头扫描到孔缺陷位置时, 不仅接收到底面反射回波信号, 还有明显的 3 个孔缺陷回波信号。测试能表明该探头能很好地检测特征尺寸为 2 000、1 000、500 μ m 的缺陷, 证明该探头能有效检测亚毫米级别缺陷且检测分辨率优于 500 μ m。

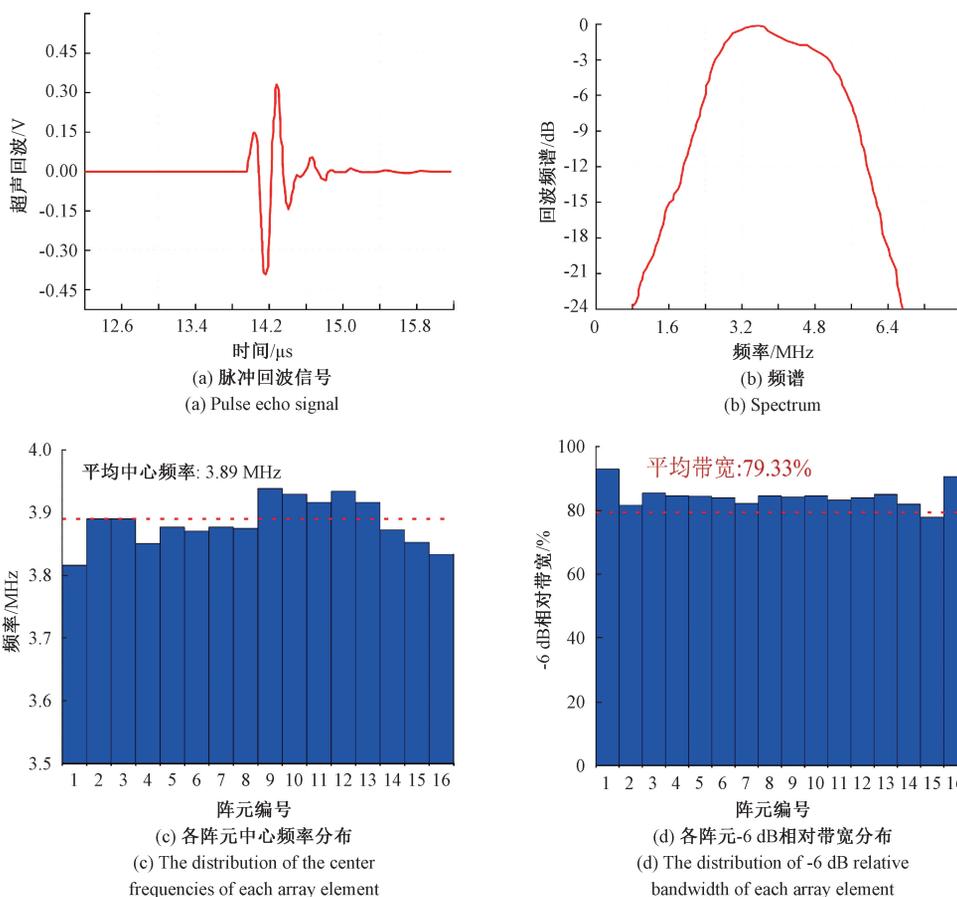


图 6 超声脉冲回波信号及频谱、各阵元中心频率分布及-6 dB 相对带宽分布

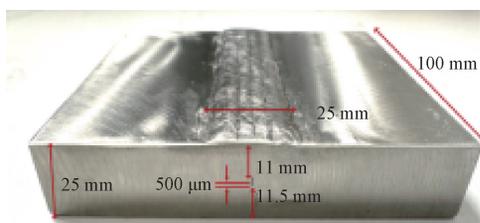
Fig. 6 Ultrasonic pulse echo signal and spectrum, center frequency distribution of each array and -6 dB relative bandwidth distribution

十分明显,说明设计的探头的 16 个通道均能够有效检测 500 μm 特征尺寸缺陷。

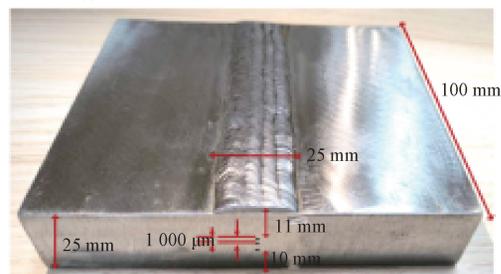


图 7 检测标准试块的实验测试系统平台

Fig. 7 Experimental test system platform for testing standard test blocks

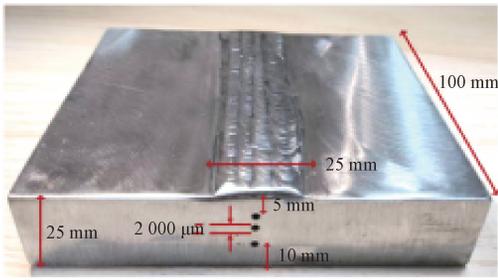


(a) 500 μm L 缺陷标准实物图
(a) Standard physical picture of 500 μm hole defect



(b) 1 000 μm L 缺陷标准实物图
(b) Standard physical picture of 1 000 μm hole defect

图 10 所示为分别采用压电超声换能器线阵探头中的 16 个阵元检测标准试块内部特征尺寸为 500 μm 的孔缺陷的回波信号。16 个阵元到孔缺陷的响应距离和信号强度略有不同,但是 3 个孔缺陷所对应的回波信号均



(c) 2 000 μm 孔缺陷标准实物图
 (c) Standard physical picture of 2 000 μm hole defect

图 8 标准试块实物

Fig. 8 Physical picture of standard test block

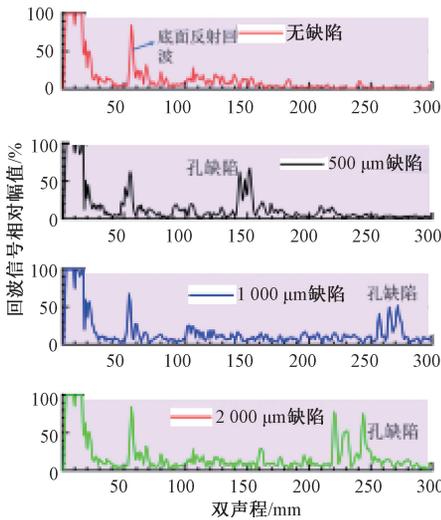


图 9 3 种不同特征尺寸缺陷回波信号

Fig. 9 Defect echo signals of three different feature sizes

4 结论

针对现有钢结构内部焊缝缺陷检测存在难以兼顾检测分辨率和检测范围的局限,本研究理论设计并研制了一种可用于 25 mm 以上厚度钢板焊缝缺陷检测的十六通道压电超声换能器线阵。通过理论优化并研制出压电超声换能器线阵探头,对其展开电阻抗、超声性能的测试。测试结果表明理论设计的谐振频率与实验测试结果偏差小于 5%,各阵元的 -6 dB 相对带宽平均值为 79.33%,说明通过声阻抗匹配层和楔块设计成功设计研制出宽频带线阵探头。采用研制的压电超声换能器线阵实现了对 25 mm 厚度的标准试块亚毫米级别缺陷的准确检测,检测分辨率优于 500 μm,为厚钢板焊缝早期缺陷准确检测及预警提供技术支撑。线阵探头 16 个阵元可独立或联合工作,独立工作时可作为单晶元超声换能器,可以检测

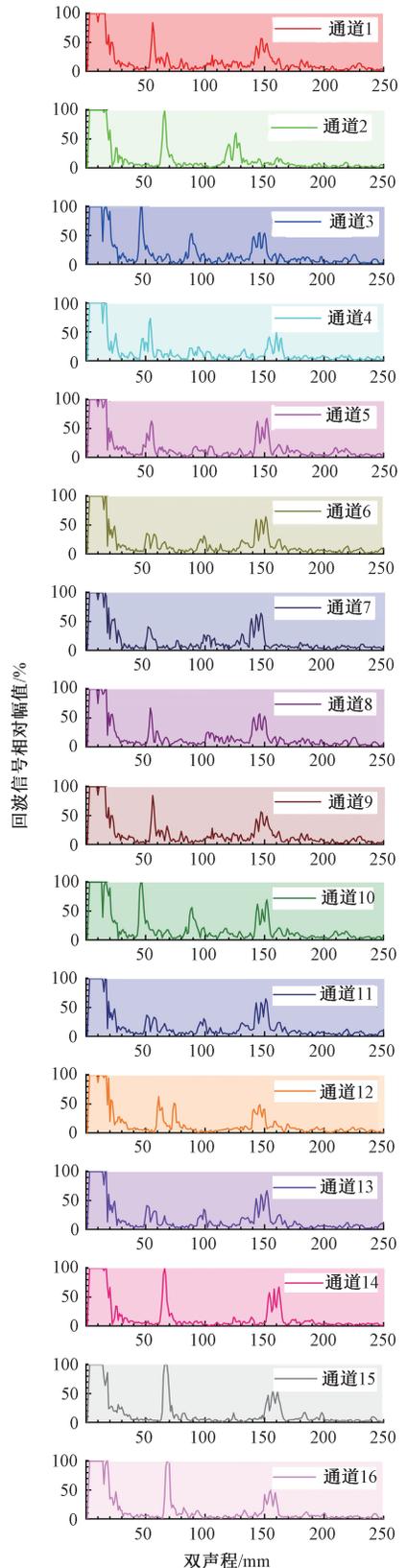


图 10 十六通道回波信号

Fig. 10 16-channel echo signal

简单结构物件内部缺陷,多个阵元联合工作时可作为相控阵超声换能器,可以结合多种聚焦扫描方式,有望进一步提高检测分辨率。

参考文献

- [1] 曾琛翔. 焊接质量的超声波探伤无损检测探析[J]. 世界有色金属, 2020(6): 294-295.
ZENG CH X Analysis on ultrasonic nondestructive testing of welding quality [J]. World Nonferrous Metals, 2020(6): 294-295.
- [2] 陆明. 超声检测在建筑钢结构焊缝无损检测中的应用[J]. 中国高新科技, 2024(7): 118-120.
LU M. Application of ultrasonic testing in non-destructive testing of welds of building steel structures [J]. China High-Tech, 2024(7): 118-120.
- [3] 李鸿鹏. 基于漏磁检测的某长输管线内检测数据分析[J]. 无损检测, 2024, 46(6): 89-94.
LI H P. Data analysis of internal inspection of a long-distance pipeline based on magnetic flux leakage detection [J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(6): 89-94.
- [4] LHO T J. A study on the development of diagnosing system of defects on surface of inner overlay welding of long pipes using liquid penetrant test[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 2018, 19(10): 121-127.
- [5] 刘涵, 郭润元. 基于 X 射线图像和卷积神经网络的石油钢管焊缝缺陷检测与识别[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 247-256.
LIU H, GUO R Y. Detection and recognition of weld defects in oil pipeline steel based on X-ray images and convolutional neural network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 247-256.
- [6] 徐昊, 包俊, 黄国勇, 等. 飞机多层金属铆接结构缺陷检测的新型电涡流探头仿真设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(5): 178-187.
XU H, BAO J, HUANG G Y, et al. Simulation design of a novel eddy current probe for defect detection in multi-layer metal riveted structures of aircraft [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 178-187.
- [7] 黄晓峰. 钢结构桥梁焊缝缺陷超声检测研究[J]. 江西建材, 2023(11): 69-70, 73.
HUANG X F. Research on ultrasonic testing of weld defects in steel structure bridges [J]. Jiangxi Building Materials, 2023(11): 69-70, 73.
- [8] 苏红哲. 无损检测方法在压力容器检验中的综合应用[J]. 科学技术创新, 2020(12): 47-48.
SU H ZH. Comprehensive application of non-destructive testing methods in pressure vessel inspection [J]. Science and Technology Innovation, 2020(12): 47-48.
- [9] 吴振成, 刘立安, 王飞, 等. 铝合金 FSW 接头未焊透及弱结合缺陷的检测分析[J]. 无损检测, 2024, 46(9): 12-16.
WU ZH CH, LIU L AN, WANG F, et al. Detection and analysis of incomplete penetration and weak bonding defects in aluminum alloy FSW joints [J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(9): 12-16.
- [10] 伍开全, 陈禧然, 李坚, 等. 奥氏体不锈钢管环焊缝超声相控阵检测分析讨论[J]. 西部特种设备, 2024, 7(5): 26-31.
WU K Q, CHEN X R, LI J, et al. Discussion on ultrasonic phased array testing and analysis of austenitic stainless steel pipe circumferential welds [J]. Western Special Equipment, 2024, 7(5): 26-31.
- [11] VITHANAGE R K W, MOHSENI E, QIU Z, et al. A phased array ultrasound roller probe for automated in-process inspection of welds[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(12): 12781-12790.
- [12] BAJGHOLI M E, ROUSSEAU G, VIENS M, et al. Advanced ultrasonic inspection methodologies for fitness-for-service (FFS) assessment of hydraulic turbines[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(5): 2621-2633.
- [13] KIM G, SEO M K, KIM Y I, et al. Development of phased array ultrasonic system for detecting rail cracks[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 311: 112086.
- [14] 万家瑞, 曾建锋, 李兆恒. 输水钢管加劲环半熔透 T 型焊缝相控阵检测[J]. 广东水利水电, 2022(11): 80-84.
WAN J R, ZENG J F, LI ZH H. Phased array testing of semi-penetrating T-joint welds in reinforcement rings of water conveyance steel pipes [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2022(11): 80-84.
- [15] 孙长河, 李博伦, 黑创, 等. 压电微型超声换能器阵列设计及焊缝检测应用[J]. 压电与声光, 2023, 45(4): 595-600.
SUN CH H, LI B L, HEI CH, et al. Design of piezoelectric micro-ultrasonic transducer array and its application in weld detection [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(4): 595-600.
- [16] LI B, SUN C, XIN S, et al. Development of a 16-channel broadband piezoelectric micro ultrasonic transducer array probe for pipeline butt-welded defect detection[J]. Sensors, 2022, 22(19): 7133.
- [17] JIANG X J, LIU M W, SHI F F, et al. A microscale linear phased-array ultrasonic transducer based on PZT

- ceramics[J]. *Sensors*, 2019, 19(5): 1244.
- [18] 卜阳光,程经纬,陈炜,等. 接管焊缝超声相控阵多模全聚焦检测技术[J]. *压力容器*, 2023, 40(3): 1-6.
BU Y G, CH J W, CH W, et al. Multi-mode full focusing detection technology of ultrasonic phased array for nozzle welds [J]. *Pressure Vessels*, 2023, 40(3): 1-6.
- [19] WANG Y, LI Y, BU Y, et al. Research on region noise reduction and feature analysis of total focus method ultrasound image based on branch pipe fillet weld[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(21): 9737.
- [20] 秦华军,杨凝佳. 超声相控阵全聚焦后处理成像技术的研究与发展[J]. *设备管理与维修*, 2024(22): 52-55.
QING H J, YANG N J. Research and development of post-processing full-focus imaging technology for ultrasonic phased arrays [J]. *Equipment Management and Maintenance*, 2024(22): 52-55.
- [21] 甘正红,邓勇,刘传乐,等. 焊管焊缝超声检测标准的比较与分析[J]. *焊管*, 2019, 42(12): 58-68.
GAN ZH H, DENG Y, LIU CH L, et al. Comparison and analysis of ultrasonic testing standards for welded pipe joints [J]. *Steel Pipe*, 2019, 42(12): 58-68.
- [22] 杨宸旭,李秋锋,沈佳卉,等. 换能器参数对 TC4 钛合金板相控阵超声检测的影响[J]. *实验室研究与探索*, 2022, 41(1): 106-112, 205.

YANG CH X, LI Q F, SHEN J H, et al. The influence of transducer parameters on phased array ultrasonic testing of TC4 titanium alloy plates [J]. *Laboratory Research and Exploration*, 2022, 41(1): 106-112, 205.

作者简介



胡子健, 2022 年于长江大学获得学士学位, 现为长江大学硕士研究生, 主要研究方向为基于压电超声换能器的钢板焊缝缺陷检测。

E-mail: 1512454263@qq.com

Hu Zijian received his B. Sc. degree from Yangtze University in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Yangtze University. His main research interests include the detection of weld defects in steel plates based on piezoelectric ultrasonic transducers.



孙长河, 2014 年于重庆大学获得学士学位, 2019 年于重庆大学获得博士学位, 现为长江大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为先进超声换能器器件设计与超声无损检测。

E-mail: chsun@yangtzeu.edu.cn

Sun Changhe (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2014 and the Ph. D. degree from Chongqing University in 2019. Now he is an associate professor in Yangtze University and the supervisor of Master students. His main research interests include advanced ultrasonic transducer device design and ultrasonic nondestructive testing.