

基于磁致伸缩机制电磁超声的焊缝缺陷检测研究

徐 创, 陶为戈*, 梁 宝

江苏理工学院电气信息工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月14日

摘 要

电磁超声换能器(EMAT)凭借其非接触式检测等优势, 在工业无损检测中得到了广泛应用。然而, 对于焊缝缺陷检测, 由于焊缝区域中材料组织的粗大化, 超声波检测过程中漫反射回波信号增多, 导致检测信号强度大幅衰减, 信噪比下降。本文针对常规洛伦兹力机制EMAT在焊缝缺陷检测中存在的信号微弱、换能效率低等问题, 提出通过在试件表面涂覆磁致伸缩涂层, 以主动构建磁致伸缩换能区域, 从而实现焊缝缺陷检测的方法。通过搭建电磁超声检测实验平台, 研究了磁致伸缩机制EMAT接收信号的幅值与偏置磁场强度的关系, 优选了最佳磁场配置; 采用磁致伸缩机制EMAT对根部未焊透、坡口未融合和夹渣三种焊缝缺陷进行实验检测, 实验结果表明, 与常规洛伦兹力机制EMAT相比, 磁致伸缩机制EMAT对三种缺陷的检测信号幅值分别提升了4.5倍、2.4倍和6.3倍。

关键词

无损检测, 电磁超声换能器, 磁致伸缩机制, 焊缝缺陷

Research on Weld Defect Detection Using Electromagnetic Ultrasonic Based on Magnetostrictive Mechanism

Chuang Xu, Weige Tao*, Bao Liang

School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 14th, 2025

Abstract

Electromagnetic acoustic transducers (EMATs) have been widely used in industrial non-destructive

*通讯作者。

文章引用: 徐创, 陶为戈, 梁宝. 基于磁致伸缩机制电磁超声的焊缝缺陷检测研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 313-326. DOI: 10.12677/jsta.2025.133031

testing due to their advantages such as non-contact detection. However, for weld defect detection, the coarsening of the material microstructure in the weld zone leads to increased diffuse reflection echoes during ultrasonic testing, resulting in significant attenuation of the detection signal strength and a decrease in the signal-to-noise ratio. To address the issues of weak signals and low transduction efficiency in conventional Lorentz force-based EMATs for weld defect detection, this paper proposes a method that involves coating the specimen surface with a magnetostrictive layer to actively construct a magnetostrictive transduction zone, thereby enabling effective weld defect detection. By establishing an electromagnetic ultrasonic testing experimental platform, the relationship between the amplitude of the received signals from the magnetostrictive EMAT and the bias magnetic field strength was investigated, and the optimal magnetic field configuration was determined. Experiments were conducted using the magnetostrictive EMAT to detect three types of weld defects: incomplete root penetration, lack of sidewall fusion, and slag inclusion. The results demonstrate that, compared to the conventional Lorentz force-based EMAT, the magnetostrictive EMAT improved the signal amplitudes for detecting these defects by 4.5 times, 2.4 times, and 6.3 times, respectively.

Keywords

Non-Destructive Testing, Electromagnetic Acoustic Transducer, Magnetostrictive Mechanism, Weld Defects

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

焊接过程中, 由于材料成分、高温作用、冷却速率不均匀、焊接工艺参数及操作技能等多种因素的影响, 可能导致焊接质量出现如气孔、未焊透、未熔合等缺陷[1]-[3]。焊缝缺陷会严重影响焊接产品质量和运营安全。焊接质量控制关键在于对焊缝进行无损检测。焊缝缺陷的无损检测(Non-Destructive Testing, NDT)方法主要包括超声检测、射线检测和渗透检测等。其中, 超声检测具有较高的灵敏度和较快的检测速度, 且超声波具有良好的穿透能力, 能够同时适用于表面和内部缺陷检测。此外, 超声检测过程环保、安全, 因此在焊缝缺陷检测领域具有显著优势[4]-[6]。

电磁超声无损检测技术自 20 世纪 60 年代提出以来, 作为一种非接触式检测方法, 克服了需要耦合剂的不足, 具有显著的应用潜力[7]。电磁超声换能器的工作原理是通过高频大功率脉冲电流在试件表面感生涡流, 并在外加磁场的作用下, 使金属表层的粒子发生振动, 从而直接激发超声波[8] [9]。电磁超声技术具有以下优势: 1) 电磁超声检测技术无需使用耦合剂, 受环境因素的干扰较小, 因此能够在高温等复杂工况下稳定工作[10] [11]; 2) 电磁超声技术可直接在试件内部产生超声波, 对表面状态的要求较低, 省去了繁琐的表面预处理环节, 从而大幅提高了检测效率[12] [13]; 3) 电磁超声换能器能够通过调整结构参数灵活生成多种类型的超声波, 无需借助模式转换机制, 显著降低了声束能量的损失[14] [15]。

虽然电磁超声无损检测技术应用于焊缝缺陷检测有诸多优势, 但电磁超声换能器存在效率较低, 检测信号微弱, 且易受到环境噪声的影响的不足。尤其是由于焊缝区域中材料组织的粗大化, 超声波检测过程中漫反射回波信号增多, 导致检测信号强度大幅衰减, 信噪比下降。检测信号强度大幅低于普通的材料缺陷检测, 限制了 EMAT 对焊缝缺陷的检测能力[16]。

针对以上不足, 有学者研究发现: 被测试件是 EMAT 关键组成部分, 直接参与其换能过程。因此试

件的电磁特性参数会显著影响 EMAT 的换能效率,不同电磁参数的试件可能导致超声波激发效果的显著差异,从而影响检测信号的强度和质量[17][18]。相比于传统洛伦兹力机制 EMAT,磁致伸缩机制 EMAT 利用磁致伸缩效应产生超声波,换能效率上通常优于非铁磁材料中的普通 EMAT [19] [20]。为此,有学者提出通过磁致伸缩效应提升超声换能器的换能效率,有效提高了 EMAT 换能效率 2 个数量级,以扩展其在无损检测领域的适用范围[21]。

综上所述,面向焊缝缺陷检测,基于磁致伸缩机制的电磁超声技术能够有效克服常规洛伦兹力机制 EMAT 的局限性,展现出广阔的应用前景。然而,目前国内外学者针对磁致伸缩机制 EMAT 在焊缝缺陷检测中的研究较少。因此,本文以焊缝缺陷检测为研究背景,通过搭建电磁超声检测实验平台,研究了磁致伸缩机制 EMAT 接收信号的幅值与偏置磁场强度的关系,优选了最佳磁场配置;采用磁致伸缩机制 EMAT 对根部未焊透、坡口未融合和夹渣三种焊缝缺陷进行实验检测,实验结果表明,与常规洛伦兹力机制 EMAT 相比,磁致伸缩机制 EMAT 对三种缺陷的检测信号幅值分别提升了 4.5 倍、2.4 倍和 6.3 倍,具有一定的理论意义与实用价值。

2. 磁致伸缩机制 EMAT 原理

铁磁材料的磁化特性和磁致伸缩特性密切相关。磁化特性指材料在外部磁场作用下,磁畴发生定向排列,导致磁感应强度 B 与外部磁场强度 H 之间呈现非线性关系:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu_r H \quad (1)$$

式中, μ_r 为相对磁导率, χ 为磁化率, M 为磁化率。图 1 展示了铁磁材料的 $B-H$ 曲线,铁磁材料在不同的外加磁场强度下,其相对磁导率发生了相应的变化。

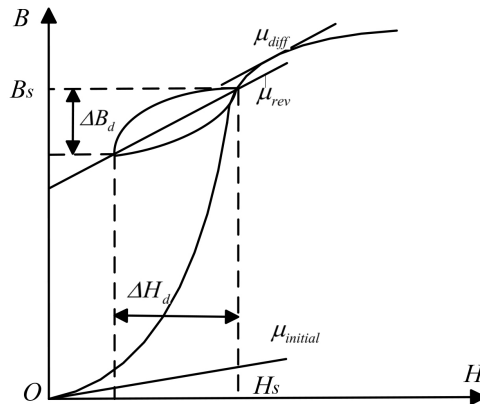


Figure 1. $B-H$ curve and permeability

图 1. $B-H$ 曲线和磁导率

当外加磁场较弱时,铁磁材料的磁化过程可逆,此时磁导率称为初始磁导率,定义为:

$$\mu_{initial} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right) \Big|_{B=0, H=0} \quad (2)$$

磁化曲线中任意点的斜率被称为微分磁导率,其定义如下:

$$\mu_{diff} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right) = \frac{dB}{dH} \quad (3)$$

一些特定情况中,不仅会有静磁场分量,还有交变磁场 H_d ,交变磁场通常远小于静磁场,二者的叠

加会在偏置磁场附近产生一个磁滞区，其斜率称为可逆磁导率，定义为：

$$\mu_{rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta B_d}{\Delta H_d} \right) \Big|_{B=B_s, H=H_s} \quad (4)$$

磁致伸缩涂层(Fe_3O_4)的磁化曲线(B - H)如图 2 所示。由图 2 右侧曲线局部放大图可知 Fe_3O_4 饱和磁化强度 $M_s = 85 \text{ emu/g}$ ，矫顽力 $H_c = \pm 25 \text{ Oe}$ ，具有较高饱和磁化强度和较小矫顽力。

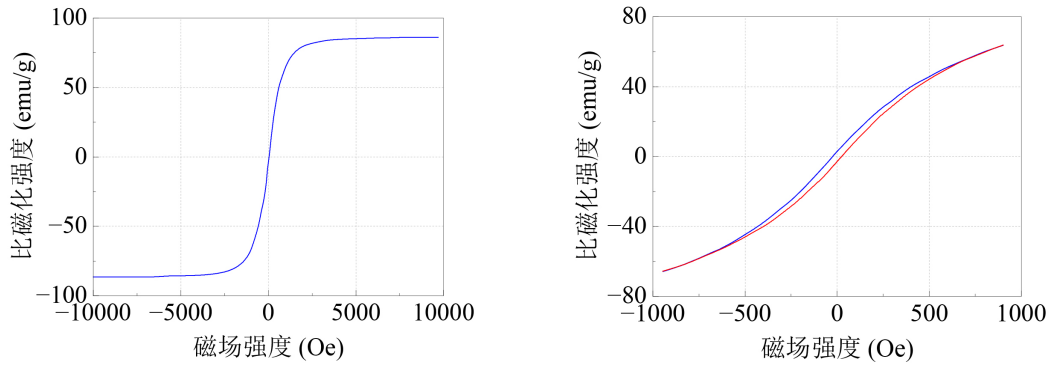


Figure 2. Magnetization curve of magnetostriuctive coating
图 2. 磁致伸缩涂层磁化曲线

对于 EMAT，需要利用可逆磁导率对偏置磁场和动态磁场进行计算。对于多晶铁磁材料，其磁化方向为各向异性。磁导率可以表示为：

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{bmatrix} \quad (5)$$

当 EMAT 偏置磁场与试件表面垂直时， B 与 H 的关系如下：

$$B = \mu_0 \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\mu}_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\mu}_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{H}_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

磁致伸缩效应是指在材料磁化过程中，由于磁偶极矩产生净转矩以降低静磁能，导致磁畴壁移动和磁畴旋转，最终使所有磁畴的取向与外磁场方向一致。在此过程中，晶格参数沿不同晶体学方向发生变化，产生应变，进而引起材料尺寸的宏观改变，最终表现为铁磁体的伸长或缩短，从而在试件上产生超声波。磁致伸缩的产生与材料的各向异性特性密切相关，材料在不同方向上表现出不同的磁响应。随着外加磁场强度的增加，线磁致伸缩逐步趋于稳定，并达到饱和状态，称为磁致伸缩饱和系数。

磁致伸缩饱和系数越高，材料在饱和磁场下能够产生更大的应变，从而在能量转换过程中能够输出更大的机械能。在磁致伸缩机制 EMAT 中，高饱和系数的材料能够在相同磁场强度下产生更大的位移或力，从而提高能量转换效率。当外部磁场继续增强时，磁畴的也会发生体积磁致伸缩，具有各向同性。 Fe_3O_4 磁致伸缩涂层的磁致伸缩曲线(ε - H)如图 3 所示。

Fe_3O_4 材料的磁致伸缩应变系数与其颗粒的微观尺度大小有关。 Fe_3O_4 的平均粒径为 9 nm 时，饱和磁致伸缩应变系数达到 167 ppm ，高于常见的磁致伸缩材料，如铁钴合金(87 ppm)等。因此，本文兼顾考虑成本与性能，采用 Fe_3O_4 作为磁致伸缩涂层的材料，能够对提高 EMAT 换能效率起到一定的作用。

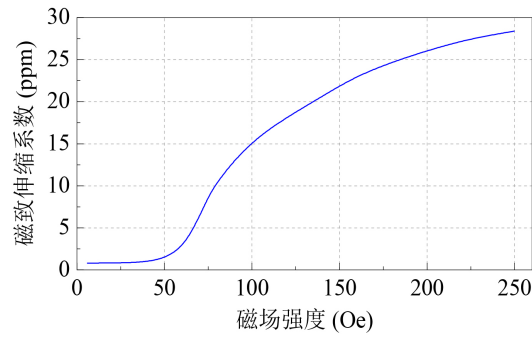


Figure 3. Magnetostriction curve of magnetostrictive coating
图 3. 磁致伸缩涂层磁致伸缩曲线

磁致伸缩机制 EMAT 的结构如图 4 所示, 通过在试件表面构建磁致伸缩涂层的方法, 以提高 EMAT 换能效率。由于涂层材料替代了原本试件表层的换能区域, 故而能够克服 EMAT 对被测试件电、磁属性的依赖, 扩展 EMAT 应用至非铁磁性乃至非金属材料检测。

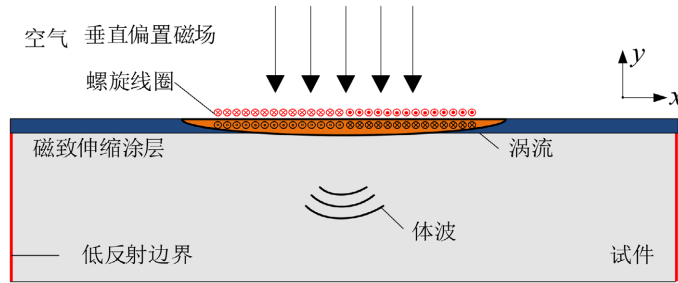


Figure 4. Schematic diagram of the magnetostrictive mechanism EMAT
图 4. 磁致伸缩机制 EMAT 示意图

在铁磁材料的应力 - 应变本构关系中, 应变不仅取决于应力状态, 还受到外部磁场的作用, 其关系可通过以下本构方程描述[22]:

$$\begin{cases} \varepsilon = S\sigma_I^{(MS)} + d_{ij}^{(MS)} H_j \\ B = d_{ji}^{(MS)T} \sigma_I^{(MS)} + \mu H_j \end{cases} \quad (7)$$

式中, μ 为相对磁导率; $\sigma_I^{(MS)}$ 和 ε 分别为应力和应变; H_j 和 B 分别为磁场和磁感应强度; S 是在恒定磁场下测量的柔度矩阵; 矩阵 $d_{ij}^{(MS)}$ 称为压磁耦合矩阵。其中, 第一个表达式为直接磁致伸缩效应(Joule Magnetostriction), 主要用于表达外部磁场引起的应变过程, 属于电磁超声中力源的产生, 并对应电磁超声换能器的发射过程[23]。第二个表达式则是逆磁致伸缩效应(Villari Magnetostriction), 用于表达应变如何产生交变磁场的过程, 并与超声换能器的接收过程相关联[24]。

由磁致伸缩应力所引起的体力为:

$$\begin{cases} f_x^{(MS)} = \frac{\partial \sigma_1^{(MS)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_6^{(MS)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_5^{(MS)}}{\partial z} \\ f_y^{(MS)} = \frac{\partial \sigma_6^{(MS)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_2^{(MS)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_4^{(MS)}}{\partial z} \\ f_z^{(MS)} = \frac{\partial \sigma_5^{(MS)}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_4^{(MS)}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_3^{(MS)}}{\partial z} \end{cases} \quad (8)$$

当磁致伸缩系数和逆磁致伸缩系数已知的情况下，即可由上式以及边界条件计算由磁致伸缩力产生的声场。磁致伸缩系数高度依赖于所施加磁场的强度和方向，但可通过图 3 所示的磁致伸缩曲线对它们进行估算。对于垂直方向的偏置磁场，EMAT 可以更效率地激励出沿 x 向偏振的剪切波，远比以磁致伸缩力激励的纵波的激励效率高。也就是在垂直偏置磁场下，换能器主要产生垂直偏振横波。

3. 实验

3.1. 实验平台搭建

磁致伸缩机制 EMAT 焊缝缺陷检测平台的结构框图如图 5 所示。该实验平台包括：EMAT、硬件电路部分、示波器、稳压源以及被测试件。

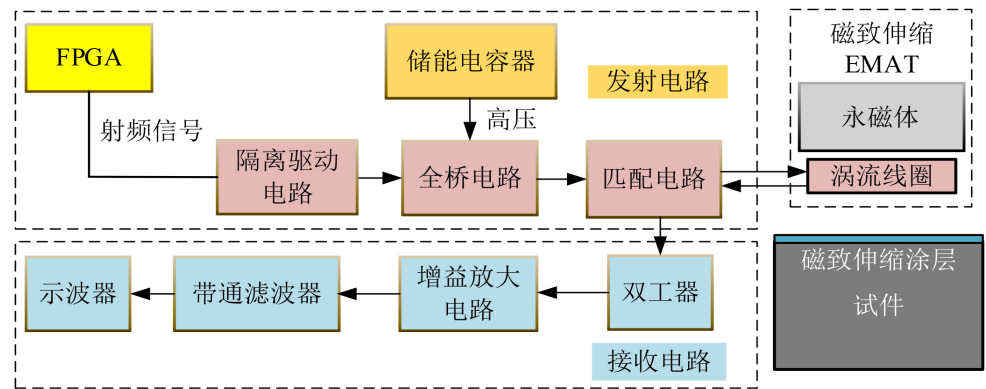


Figure 5. Structural block diagram of the experimental platform
图 5. 实验平台结构框图

本文设计的 EMAT 采用自发自收的检测方式，其硬件电路部分由 FPGA 控制的涡流线圈激励电路和接收电路组成。涡流线圈的激励过程如下：信号发生器产生中心频率为 4 MHz 的 2 周期方波信号。经过功率放大器和阻抗匹配电路，输出电压峰峰值约为 1200 V 的方波脉冲信号，最后，将高压脉冲信号输出至 EMAT 线圈。涡流线圈的接收过程如下：首先接收到的超声波信号通过阻抗匹配电路进行增益处理，然后信号经过放大和带通滤波，最终传输到示波器进行显示。所使用的放大器最大增益为 100 dB，带通滤波器的带宽设置为 1~5 MHz。搭建的磁致伸缩机制 EMAT 焊缝缺陷检测平台实物如图 6 所示。

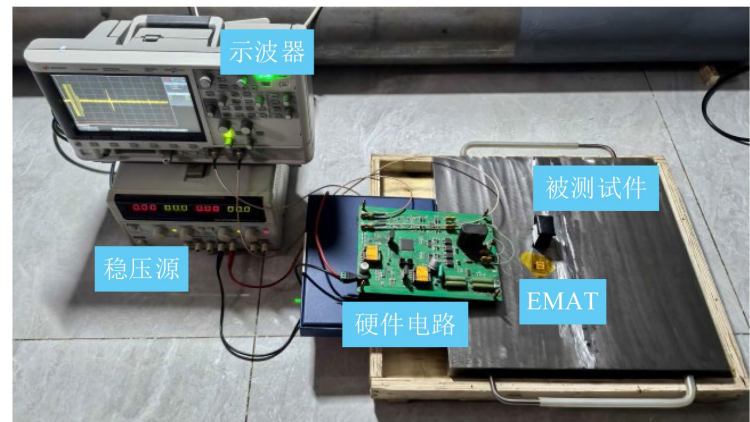


Figure 6. Photograph of the experimental platform
图 6. 实验平台实物图

其中, EMAT 部分主要由永磁体、螺旋线圈和带有 Fe_3O_4 涂层的试件组成。螺旋线圈直径为 10 mm, 匝数为 30。永磁体的长、宽、高分别为 35 mm、25 mm、40 mm, 剩余磁通密度为 1.2 T。

具体的检测步骤如图 7 所示: 首先将 EMAT 线圈精确放置于待检测区域的正上方中心位置; 随后, 将永磁体置于 EMAT 线圈上方, 尽量确保线圈位于永磁体中心位置, 以获得均匀的偏置磁场分布; 最后, 开启稳压电源, 通过示波器即可实时观测并记录 EMAT 接收到的信号波形。

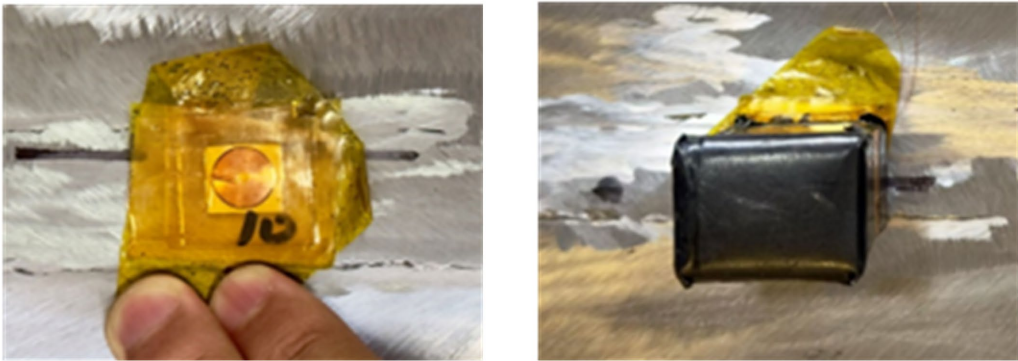


Figure 7. Specific detection method of EMAT
图 7. EMAT 具体检测方法

本文实验所使用的被测试件为带有人工焊缝缺陷的 TOFD 模拟试块, 试块为长 400 mm, 宽 400 mm, 高 30 mm 的带有拼接焊缝的钢板, 实物如图 8 所示。

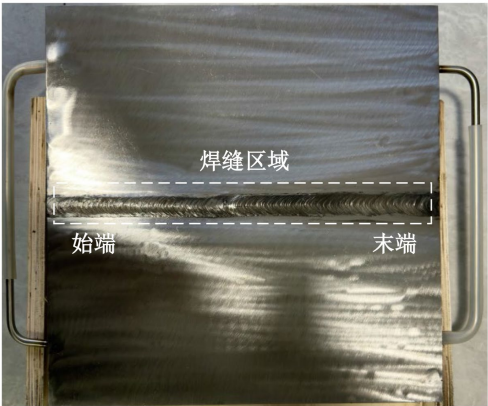


Figure 8. Photograph of the test specimen with weld defects
图 8. 带有焊缝缺陷的被测试件实物图

焊缝中具体包含的焊缝类型及其尺寸与类型如表 1 所示。

Table 1. Specific parameters of weld defects
表 1. 焊缝缺陷具体参数

缺陷编号	缺陷类型	缺陷始 - 末端(mm)	缺陷长度(mm)	缺陷深度(mm)	自身高度(mm)
1	根部未焊透	83~107	24	15	5
2	坡口未融合	243~267	21	20	4
3	夹渣	343~363	20	26	5

3.2. 洛伦兹力机制电磁超声焊缝缺陷检测实验

1) 焊缝区域与基底材料检测对比

为了探讨 EMAT 在焊缝区域检测与基底材料中检测信号的差异特征, 本节首先对焊缝区域与基底材料区域分别进行检测。测得的信号对比如图 9 所示, 在基底材料的检测信号中可以观察到, 主冲击信号与第一次底面横波回波之间存在一个微弱的回波信号。该信号是由横波在传播过程中发生模式转换后形成的纵波所产生。由于纵波的传播速度明显快于横波(约 6400 m/s), 所以该回波信号首先被线圈感应并检测到。相比于基底材料中的检测信号, 焊缝无缺陷区域测得的 EMAT 信号波形整体信噪比显著降低, 导致纵波底面回波无法被清晰识别, 同时信号回波的幅值也出现大幅下降。这种现象主要源于焊缝区域材料中柱状晶组织的粗大化, 导致超声波检测中草状回波信号显著增多, 进而引起能量衰减加剧, 检测信号强度大幅降低, 信噪比下降。因此, 与常规材料缺陷检测相比, 焊缝缺陷检测面临更为严峻的技术挑战。

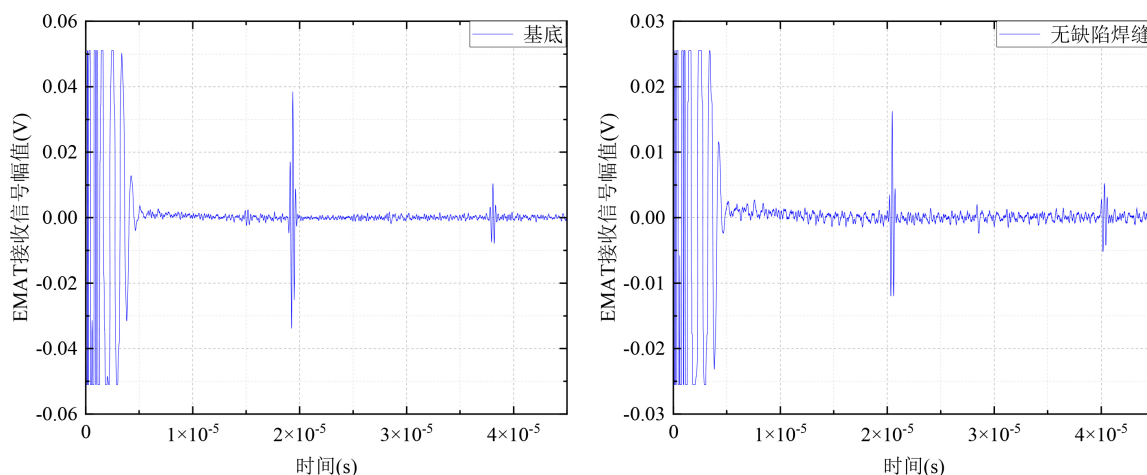


Figure 9. Comparison of signal waveforms measured by EMAT in the base material and defect-free weld

图 9. EMAT 在基底材料与无缺陷焊缝中测得信号波形对比

2) 焊缝缺陷检测实验

基于所搭建的 EMAT 焊缝缺陷检测平台, 分别对焊缝中根部未焊透、坡口未融合和夹渣三种不同类型焊缝缺陷进行检测。EMAT 测得的信号波形如图 10~12 所示。与无缺陷焊缝区域相比, 缺陷焊缝区域的信号波形表现出更高的纯净度和信噪比。通过对信号波形的分析可以发现, 在三次缺陷检测的波形中, 主冲击信号与第一次底面回波信号之间均出现了一次相对明显的回波信号, 其特征与纵波底面回波存在显著差异。这三次回波信号出现在超声波传播一段时间后, 表明缺陷位于焊缝内部, 并非表面缺陷, 具体时刻分别为 9.4 μs 、16.3 μs 和 9.8 μs 。根据横波在试件中的传播速度(约 3200 m/s), 可以计算出这些回波信号对应的焊缝深度位置, 计算结果与缺陷的实际深度位置吻合, 因此可以判定这些回波信号为焊缝缺陷回波。

进一步分析信号特征可以发现, 缺陷回波信号的频谱分布与无缺陷区域的信号存在一定差异。从图中的波形图可以看出, 缺陷回波信号在时域中表现出更明显的局部峰值, 且其波形形态较为尖锐, 上升沿和下降沿较为陡峭。相比之下, 无缺陷焊缝区域的信号波形则相对平缓, 且幅值较低, 信噪比较差。在频域分析中, 缺陷回波信号的能量分布更为集中, 主要能量集中在某一特定频率范围内, 而无缺陷区域的信号频谱则相对分散。

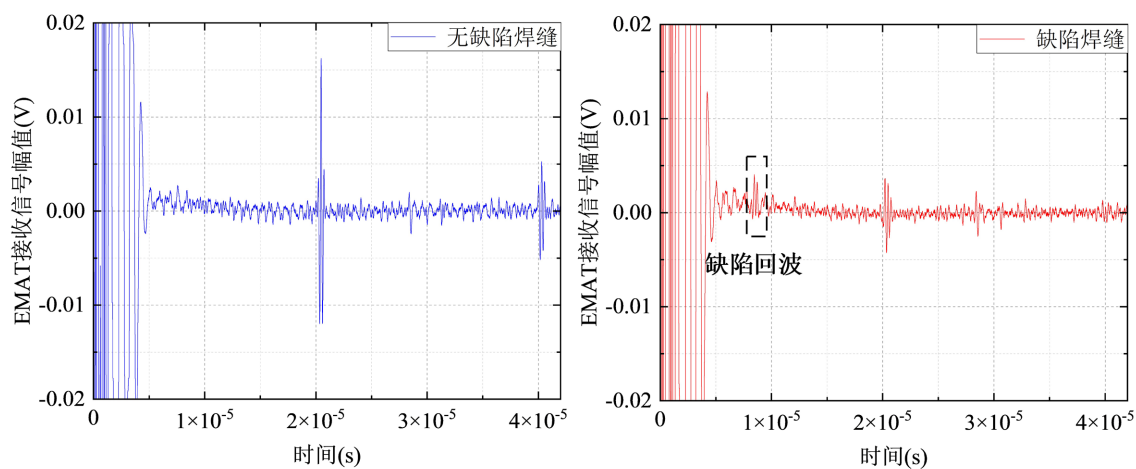


Figure 10. Signal waveform measured by EMAT in the root lack of penetration defect

图 10. EMAT 在根部未焊透缺陷中测得信号波形

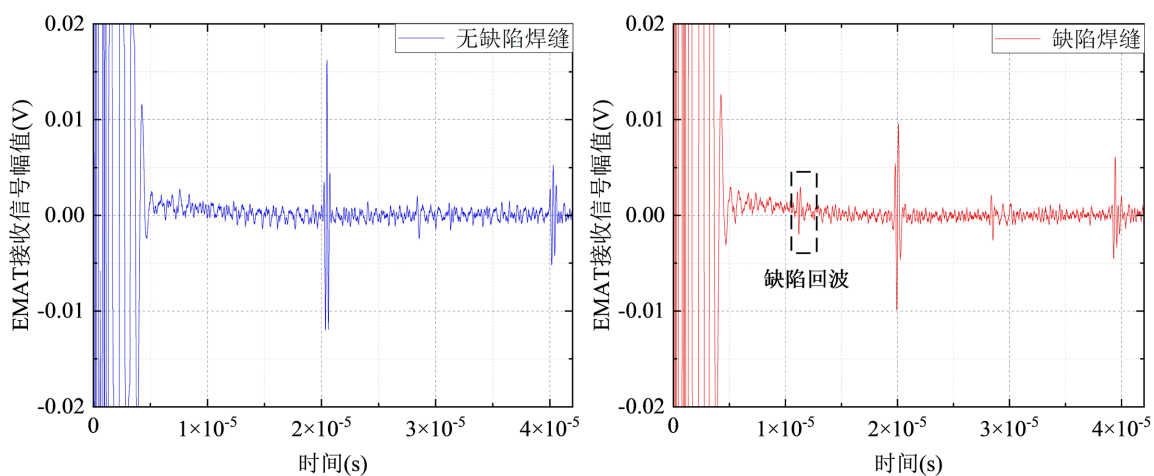


Figure 11. Signal waveform measured by EMAT in the groove lack of fusion defect

图 11. EMAT 在坡口未融合缺陷中测得信号波形

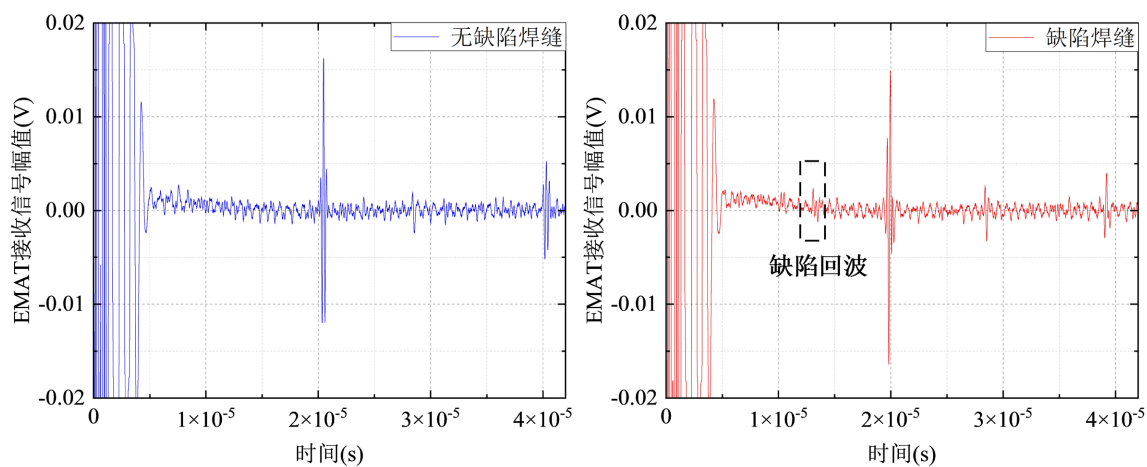


Figure 12. Signal waveform measured by EMAT in the slag inclusion defect

图 12. EMAT 在夹渣缺陷中测得信号波形

尽管基于洛伦兹力机制 EMAT 能够成功检测出焊缝缺陷,但回波信号的整体强度较低,三次缺陷回波信号的峰峰值分别为 0.004 V、0.005 V 和 0.003 V,信噪比较低。这种低信噪比的特征使得信号容易受到外界噪声的干扰,从而对缺陷检测的准确性和可靠性造成不利影响。

3.3. 磁致伸缩机制电磁超声焊缝缺陷检测实验

1) 磁致伸缩涂层制备

磁致伸缩涂层主要由 Fe_3O_4 粉末与环氧树脂胶水混合制成。 Fe_3O_4 具有良好的磁性和非导电性,因此,在 EMAT 换能过程中,主要涉及磁致伸缩机制和磁化力机制[25]。环氧树脂胶水具有优异的附着性能,可增强涂层与试件表面机械耦合效果,从而降低超声波在涂层与试件界面传播时的能量损耗,提高换能效率。磁致伸缩涂层的制备流程如图 13 所示,具体步骤如下: 1) 按照 2:3 的质量比,将 Fe_3O_4 粉末加入环氧树脂胶水中; 2) 充分搅拌,使粉末与胶水混合均匀; 3) 将涂层均匀涂覆至试件表面。如图 14 所示,将配制好的磁致伸缩涂层均匀涂覆于焊缝表面。

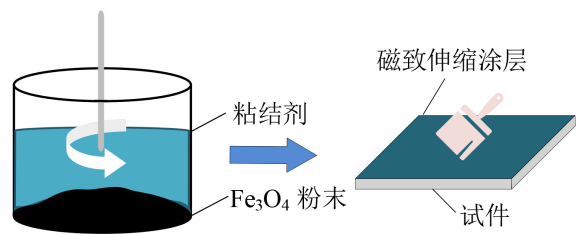


Figure 13. Schematic diagram of the preparation process for the magnetostrictive coating
图 13. 磁致伸缩涂层的制备示意图



Figure 14. Photograph of the weld coated with the magnetostrictive layer
图 14. 涂有磁致伸缩涂层的焊缝实物图

2) 偏置磁场强度对检测信号强度影响研究

磁致伸缩机制 EMAT 接收信号的幅值与偏置磁场强度之间存在显著的非线性关系。这种非线性特性直接影响检测信号的强度和灵敏度。因此,本节将首先研究偏置磁场强度对检测信号强度的影响。

本文采用磁场强度为 1.2 T 的永磁体以提供偏置磁场,通过改变永磁体与 EMAT 线圈之间的提离距离来调节磁场强度:提离距离越大,磁场强度越低。具体方法如图 15 所示,在永磁体与线圈之间放置每片厚度为 1 mm 的无磁性陶瓷垫片,并在 5 mm、10 mm、15 mm、20 mm、25 mm 和 30 mm 的提离距离下,分别测量同一区域内无缺陷焊缝区域,研究偏置磁场强度对检测信号幅值的影响。



Figure 15. Photograph of the weld coated with the magnetostrictive layer

图 15. 涂改变永磁体磁场强度方法

不同磁体提离距离下所测得的信号波形如图 16 所示, 其中第一次底面横波回波信号峰峰值分别为 0.01 V、0.056 V、0.067 V、0.174 V、0.136 V 和 0.119 V, 呈现先增加后减小的变化趋势, 变化规律与理论分析吻合, 进一步验证了实验平台的可靠性。此外, 实验结果表明, 当永磁体提离距离为 20 mm 时, 在当前配置下 EMAT 接收信号幅值达到最大值。与常规洛伦兹力机制 EMAT 检测结果相比, 本文采用的磁致伸缩机制 EMAT 回波信号幅值提升了 6 倍以上, 具有更高的检测灵敏度和信噪比。

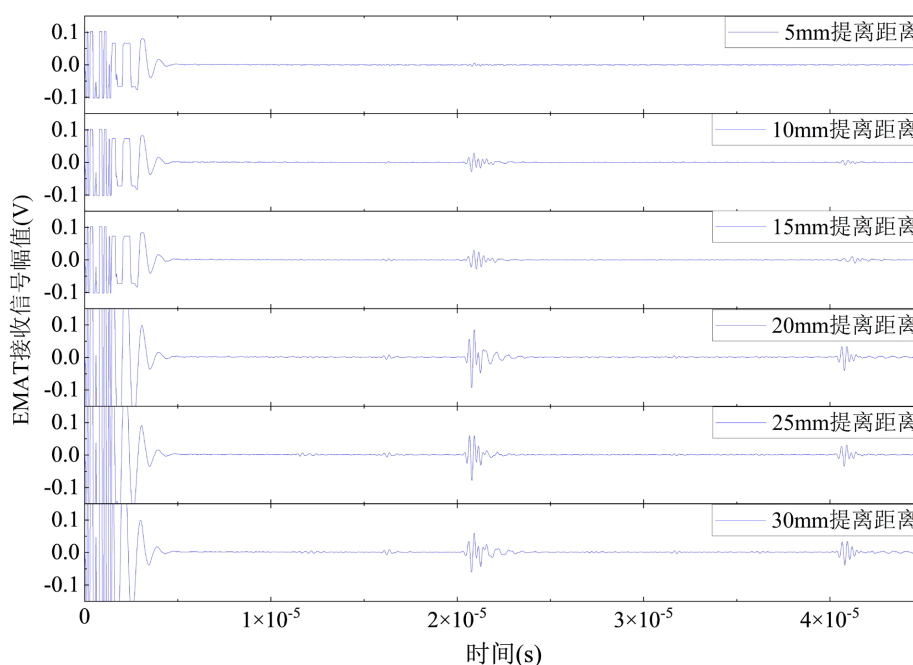


Figure 16. Signal waveforms measured by EMAT at different lift-off distances of the magnet.

图 16. 不同磁体提离距离下 EMAT 测得的信号波形

3) 焊缝缺陷检测实验

对涂有磁致伸缩涂层的焊缝中根部未焊透、坡口未融合和夹渣三种不同类型焊缝缺陷再次进行检测, 并与洛伦兹力机制 EMAT 焊缝缺陷检测结果进行对比, 以研究磁致伸缩机制 EMAT 对焊缝缺陷检测性能的增强效果。测得的信号波形如图 17~19 所示: 其整体特征规律与前者类似, 但磁致伸缩机制 EMAT 的频谱特征分布更集中, 峰值更明显, 背景噪声更低。同时三类缺陷的回波信号峰峰值分别达到 0.018 V (根部未焊透)、0.012 V (坡口未融合) 和 0.019 V (夹渣), 相较于未涂覆磁致伸缩涂层时的检测结果, 信号幅值分别提升了 4.5 倍、2.4 倍和 6.3 倍。实验结果表明, 磁致伸缩机制 EMAT 不仅显著提升了检测信号的信噪比, 且在频谱和波形特征上均表现出一定优势。

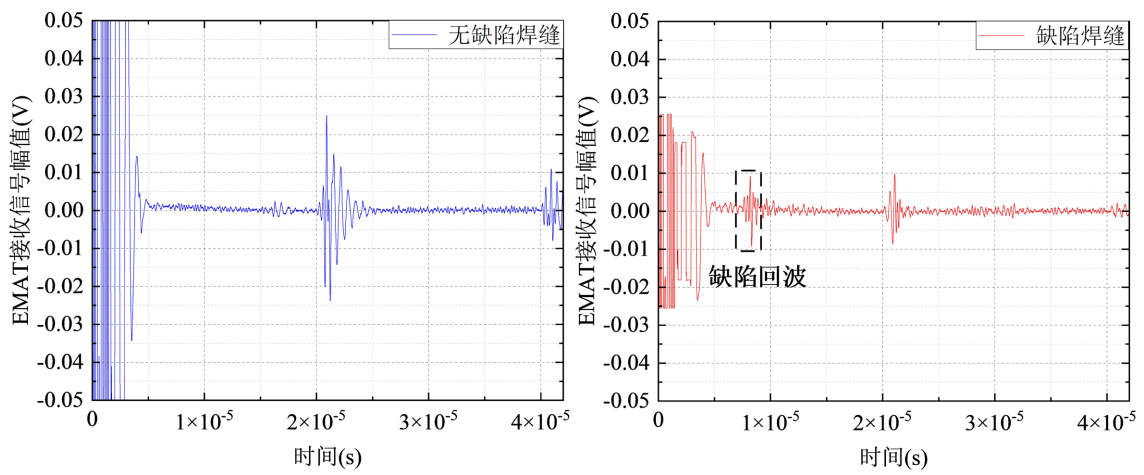


Figure 17. Signal waveform measured by EMAT in the root lack of penetration defect

图 17. EMAT 在根部未焊透缺陷中测得信号波形

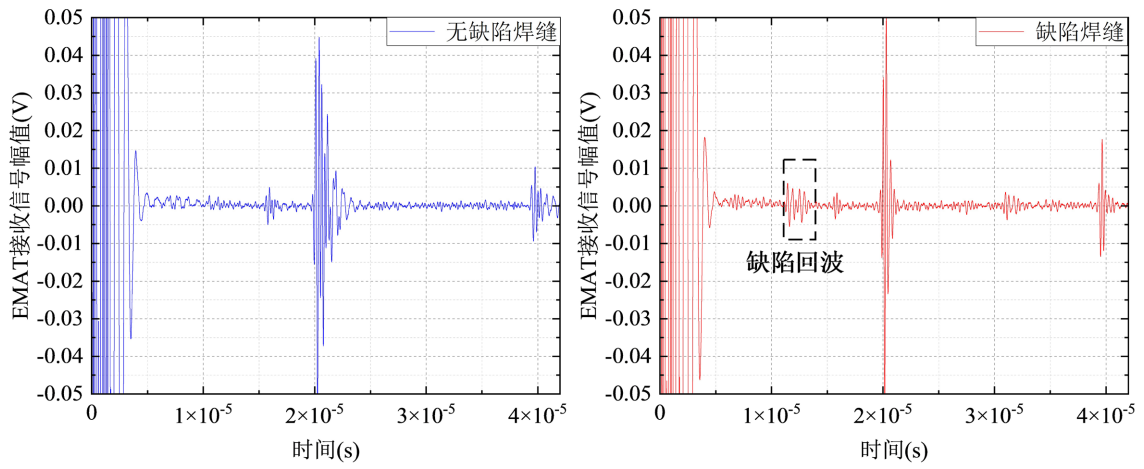


Figure 18. Signal waveform measured by EMAT in the groove lack of fusion defect

图 18. EMAT 在坡口未融合缺陷中测得信号波形

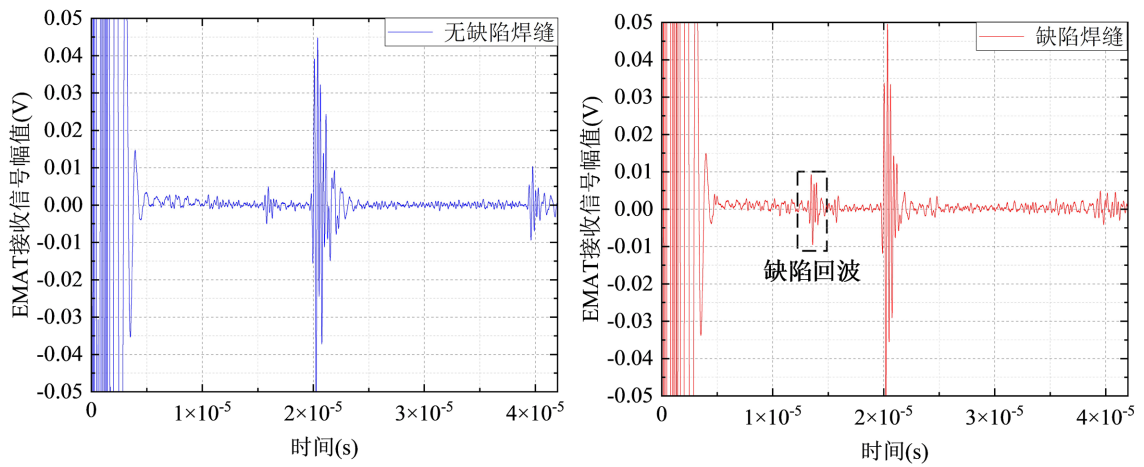


Figure 19. Signal waveform measured by EMAT in the slag inclusion defect

图 19. EMAT 在夹渣缺陷中测得信号波形

其中,磁致伸缩机制 EMAT 对根部未焊透和夹渣焊缝缺陷的检测效果提升尤为显著,能够清晰地捕捉到缺陷回波信号。然而,对于坡口未融合缺陷,尽管检测信号幅值也有显著提升,但其缺陷回波信号与背景噪声较为接近,识别难度相对较大。因此,本文所采用的磁致伸缩机制 EMAT 对根部未焊透缺陷的尺寸识别上限为 4 mm 左右,而对根部未焊透和夹渣缺陷的检测仍有一定的检测空间。

综上所述,本文所采用的磁致伸缩机制 EMAT,显著提升了对根部未焊透、坡口未融合和夹渣三种焊缝缺陷检测效果。此外,由于本文在试件表面涂覆磁致伸缩涂层以主动构建磁致伸缩换能区域,将实际换能区域由被测试件表面转移至磁致伸缩涂层内部,一定程度上克服了被测试件本身电、磁属性限制,能够使磁致伸缩机制 EMAT 应用至非铁磁性乃至非金属材料检测,扩展了其应用范围。且本文采用的磁致伸缩涂层能够较好的附着于焊缝等表面不平整的被测试件,降低了检测时对被测试件表面的要求;同时本文采用手工涂覆磁致伸缩涂层,其成本低廉,配置过程简单,避免了复杂的机器喷涂设备的使用,更容易推广至工业检测现场。

4. 结论

本文面向焊缝缺陷检测,提出一种在被测试件上主动构建磁致伸缩涂层以用于提高电磁超声换能效率的方法,得出以下结论:当磁场强度为 1.2 T 时,磁致伸缩机制电磁超声换能器接收信号的幅值随偏置磁场强度的减小呈现先增大后减小的趋势,并在永磁体提离距离为 20 mm 时达到最大值。与常规洛伦兹力机制 EMAT 相比,磁致伸缩机制 EMAT 在焊缝检测中的第一次回波信号幅值提升了 6 倍以上,显著提高了检测信号强度。实验进一步表明,磁致伸缩机制 EMAT 对根部未焊透、坡口未融合和夹渣三种典型焊缝缺陷的检测信号幅值分别提升了 4.5 倍、2.4 倍和 6.3 倍,验证了其在焊缝缺陷无损检测中的广泛应用潜力。

基金项目

江苏省常州市科技计划项目:超高温梯度薄膜结构磁致伸缩超声换能器构建及机理研究(CJ20240033)。

参考文献

- [1] 赵家炜, 蔺健宁. 特种设备检验中无损检测技术的应用分析[J]. 中国设备工程, 2024(21): 153-155.
- [2] 龚思璠, 潘伟, 王庆云, 等. 碳钢焊缝典型缺陷的非线性特征[J]. 无损检测, 2024, 46(9): 83-89.
- [3] 陈薇, 蒋科, 张振忠, 等. 无损检测方法在钢结构工程焊缝中的应用[J]. 中国金属通报, 2022(6): 84-86.
- [4] 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.
- [5] 张悦, 杜政熠, 程浩男, 等. 在役压力管道的超声检测技术综述[J]. 化工设备与管道, 2024, 61(2): 103-110.
- [6] 马早军. 电磁超声 SH 导波铝板缺陷检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [7] Gaerttner, M.R., Wallace, W.D. and Maxfield, B.W. (1969) Experiments Relating to the Theory of Magnetic Direct Generation of Ultrasound in Metals. *Physical Review*, **184**, 702-704. <https://doi.org/10.1103/physrev.184.702>
- [8] 石文泽, 胡力萍, 卢超, 等. 仅线圈式电磁超声检测方法 with 提离特性研究[J]. 传感技术学报, 2024, 37(10): 1681-1691.
- [9] 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.
- [10] 应家仪, 胡利晨, 张翰林, 等. 气体冷却器 T 型角焊缝高温电磁超声检测[J]. 化工机械, 2022, 49(1): 153-155.
- [11] 方志泓, 王理博, 朱煜, 等. 核电站蒸汽发生器传热管电磁超声导波自动化检测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 225-233.
- [12] 程偲, 姜春, 宋旖旎, 等. 直缝焊管焊缝质量电磁超声检测方法研究[J]. 焊管, 2023, 46(1): 19-23.

-
- [13] 杨斌, 易朋兴, 郝峥旭. 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.
- [14] 董明, 李航辉, 马宏伟, 等. 高纯度横波蝶形线圈电磁超声换能器优化设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(11): 3270-3279.
- [15] 张京军, 刘敏, 贾国平, 等. 正交试验理论线聚焦电磁超声换能器优化设计[J]. 中国测试, 2024, 50(2): 91-99.
- [16] 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.
- [17] 梁宝. 用于高温金属材料检测的电磁超声换能器研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- [18] Voltmer, F.W., White, R.M. and Turner, C.W. (1969) Magnetostrictive Generation of Surface Elastic Waves. *Applied Physics Letters*, **15**, 153-154. <https://doi.org/10.1063/1.1652946>
- [19] Thompson, R.B. (1973) A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, **20**, 340-346. <https://doi.org/10.1109/t-su.1973.29770>
- [20] 韩飞, 赵新航, 陈锴迪, 等. 基于磁致伸缩的电磁超声钢板机械性能检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 73-79+86.
- [21] Qi, Q., Shen, G., Zheng, Y., Gao, X., Huang, S., Li, J., *et al.* (2022) The Microstructural Evolution and Ultrasonic Guided Wave Transduction Performance of Annealed Magnetostrictive $(\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17})_{99.9}(\text{NbC})_{0.1}$ Thin Sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **548**, Article 168938. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168938>
- [22] Kim, Y.Y. and Kwon, Y.E. (2015) Review of Magnetostrictive Patch Transducers and Applications in Ultrasonic Non-destructive Testing of Waveguides. *Ultrasonics*, **62**, 3-19. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2015.05.015>
- [23] 姜涛, 薛昌盛, 皮钧, 等. 钴铁氧体磁致伸缩超声换能器设计及输出特性[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 67-73.
- [24] 洪利, 尚鲁龙, 邱忠超, 等. 基于逆磁致伸缩效应的铁磁构件应力检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020(6): 92-94+99.
- [25] Zhu, H., Yang, D. and Zhu, L. (2007) Hydrothermal Growth and Characterization of Magnetite (Fe_3O_4) Thin Films. *Surface and Coatings Technology*, **201**, 5870-5874. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.037>