

瑞利波-体波复合 EMAT 及缺陷检测研究

陈果 王雪梅 倪文波 武森林

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

摘要: 针对传统的超声无损检测技术存在检测盲区,单一的超声探头无法同时检测试件表面和内部缺陷的问题,基于电磁超声原理,设计了一种新型电磁超声换能器,能够同时激发瑞利波和横波,实现对试件表面和内部缺陷的同时检测。基于 COMSOL 建立了瑞利波-体波复合 EMAT 仿真模型,分析了复合电磁超声波产生及其与缺陷相互作用的机理。设计制作了复合 EMAT 并建立了电磁超声信号检测系统,对定制的铝合金试件进行了表面及内部缺陷检测与定位检测试验,结果表明,利用所设计的瑞利波-体波复合 EMAT,既能有效探测到表面缺陷回波,又能检测到内部缺陷回波,且对表面缺陷的检测定位误差为 0.48%,对内部缺陷的检测定位误差为 0.7%。

关键词: 电磁超声换能器;瑞利波;体波;缺陷检测

中图分类号: TB553; TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Research on Rayleigh-bulk wave composite EMAT and defect detection

Chen Guo Wang Xuemei Ni Wenbo Wu Senlin

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To address the limitations of traditional ultrasonic nondestructive testing techniques, which often have detection blind spots and cannot simultaneously detect both surface and internal defects in test specimens, a novel Electromagnetic Acoustic Transducer was designed based on the principles of electromagnetic ultrasonics. This EMAT can simultaneously generate Rayleigh and shear waves, enabling concurrent detection of surface and internal defects in specimens. A rayleigh-bulk wave composite EMAT simulation model was developed in COMSOL to analyze the generation mechanisms of the composite ultrasonic waves and their interactions with defects. The composite EMAT was designed and fabricated, and an electromagnetic ultrasonic signal detection system was established. Detection and localization experiments were conducted on custom aluminum alloy specimens containing surface and internal defects. The results indicate that the designed rayleigh-bulk wave composite EMAT effectively detects both surface and internal defect echoes, achieving a localization error of 0.48% for surface defects and 0.7% for internal defects.

Keywords: EMAT; Rayleigh wave; bulk wave; defect detection

0 引言

无损检测技术广泛应用于航空航天、汽车、能源、医学、核能电力和交通等多个领域,为各行业的可持续发展提供了重要的技术支持^[1-4]。工业中常用的无损检测技术主要有:涡流检测、漏磁检测、磁粉检测、射线检测和超声检测等。

超声检测技术依据超声波在介质中传播的反射、衰减和散射等特性对材料中的缺陷进行检测,因其具有穿透力和适应性强,检测灵敏度高,对环境和人体无害等优点而在工业中得到非常广泛的应用。超声技术既可以检测材料表面缺陷又可以检测内部缺陷,但目前单一的压电超声探头很难实现表面缺陷和内部缺陷的同时检测,例如,瑞利波探

头可以检测近表面一个波长深度范围内的缺陷,却无法检测到更深层缺陷;体波探头中的纵波和横波探头可以激发在试件内部传播的纵波和横波,实现内部缺陷的检测,但由于检测盲区的存在,这些体波探头很难检测分辨材料近表面的缺陷。对于同时存在表面和内部缺陷的构件,为了实现全面的缺陷检测就不得不分成几道工序分别检测,或采用不同类型探头的组合系统,不仅效率低,而且会导致检测系统复杂化,增加设备成本和操作难度。因此,开发能够同时检测表面缺陷与内部缺陷的复合探头,对提高检测效率和精度具有重要意义。

为了提高超声检测的效率和检测精度,人们不断探索新的检测方法,设计了各种新型的超声换能器。电磁超声

换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)因其能够方便地激发各种模式的超声波和非接触检测等特点,逐渐受到广泛关注^[5-7]。郭中会等^[8]通过优化换能器结构,设计了一种“拱形”永磁铁结构,有效增强了兰姆波的 S0 模态,同时削弱了 A0 模态的强度。董明等^[9]提出了一种新型蝶形线圈,通过精确控制不同位置的导线宽度和间距,实现了横波的增强以及纵波的抑制。张京军等^[10]采用正交试验法,系统分析了多个换能器结构参数对性能的影响,显著提升了线聚焦电磁超声换能器的聚焦效果。邢燕好^[11]等人设计了一种新型电磁超声全向导波换能器,实现了对导波辐射强度和方向的精确控制。Liu 等^[12]设计了一种可以同时激发横波和纵波的 EMAT,并用于单轴应力测量。肖菲等人分析了温度对横、纵超声波传播的影响,提出了一种双模态电磁超声测量方法,用于高温环境下管道壁厚的检测。唐志峰等^[13]设计了一种集测厚与导波检测功能于一体的电磁超声换能器,能够同时激发横波和周向 Lamb 波,实现管道壁厚与周向缺陷的快速扫描检测,但 Lamb 波作为一种板波,更适合用于薄板(例如管道)的检测,不适用于较厚的试件。涂君等^[14]通过在同一线圈中依次加载不同频率的脉冲信号,分别激发了横波和表面波,完成了表面和内部缺陷的多维检测。然而,该方法未实现横波与表面波的同时激励,且激发出的斜入射横波在传播过程中容易发生波形转换,影响检测精度。

可以看到,有关 EMAT 的研究目前主要针对单一模式的优化与改进,例如提高信噪比、增强方向性和实现特定波模态的选择性等。在同时激发多种波模态的研究中,横波与纵波的组合应用较为广泛,这类双模态换能器主要用于轴力检测和测厚领域。然而,针对同时覆盖内部与表面检测的多模态换能器研究相对较少,且仍存在一些问题。因此,研发能够同时高效检测表面缺陷和内部缺陷的电磁超声换能器,不仅可以显著提升超声检测的效率,还能有效简化检测系统的复杂性,具有重要的理论意义和实际应用价值。

针对以上问题,基于电磁超声技术具有能够方便、灵活地激发各种模式超声波的特性^[15-16],本文设计了一种可以同时激发两种模式超声波的复合 EMAT,实现了表面缺陷和内部缺陷的同时检测。该研究对于提高超声无损检测的效率和检测精度、降低检测设备复杂性以及实现复杂结构材料的全面缺陷监测具有积极的作用与意义。

1 瑞利波和横波换能机理

EMAT 通常由永磁体、线圈以及被测试件三部分组成,其激励超声波主要依赖于试件中产生的洛伦兹力、铁磁力和磁致伸缩效应。当试件为非铁磁性材料时,超声波的激励源以洛伦兹力为主导;当试件为铁磁性材料时,超声波在洛伦兹力、铁磁力以及磁致伸缩效应共同作用下产生。本文主要针对非铁磁性材料铝进行分析和测试,当线圈中通入高频脉冲电流时,线圈周围产生动态磁场,忽略位移电

流影响,动态磁场可以表示为:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -J_s \quad (1)$$

式中: A 为磁矢量位, J_s 为激励电流密度, μ 为磁导率, σ 为电导率。

由于磁场发生变化,铝材表面产生涡流,涡流密度可以表示为:

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (2)$$

由洛伦兹力机制可知,铝材表面带电粒子受到洛伦兹力的作用,洛伦兹力可以表示为:

$$F_L = B \times J_e \quad (3)$$

式中: B 为磁感应强度。

涡流方向随线圈电流方向改变,因此洛伦兹力也是交变的,质点发生高频振动,产生超声波。质点运动方程可以表示为:

$$\nabla^2 u + (\chi + \kappa) \nabla \nabla \cdot u + F_L = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4)$$

式中: u 为位移矢量, ρ 为材料密度, χ 和 κ 为拉梅常数。

如图 1 所示,根据线圈结构的不同,换能器可以激发出不同模态的超声波。对于曲折线圈来说,当线圈间距固定为 d 时,在每个波源产生的超声波相互干涉作用下,可以确定主辐射角度 θ 为:

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda/2}{d} = \frac{c}{2fd} \quad (5)$$

式中: λ 为超声波波长, c 为超声波波速, f 为激励电流频率。

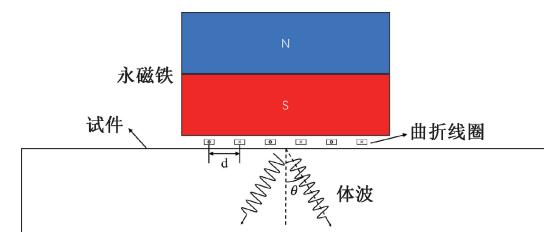


图 1 EMAT 二维模型

Fig. 1 2D model of EMAT

特别的,当 $d = \lambda/2$ 时,换能器会激发沿试件表面传播的瑞利波。当 $d < \lambda/2$ 时,换能器激发出以不同辐射角度传播的体波。曲折线圈产生的体波为斜入射体波,这种传播方式在传播过程中容易发生波形转换,并且其传播路径较长,超声波会受到更多衰减和散射。因此,为了提高体波在内部缺陷检测中的检测精度,本文的体波线圈设计为螺旋类结构。螺旋类线圈能够产生垂直入射的体波,显著提升了对内部缺陷的检测效果。

2 复合 EMAT 设计及仿真分析

2.1 复合 EMAT 结构设计及仿真

如图 2 为本文设计的复合 EMAT 结构图,复合

EMAT 采用双磁铁及双层线圈结构,上层为体波线圈,负责激励在试件内部传播的体波,下层为瑞利波线圈,负责激励在试件表面传播的瑞利波。

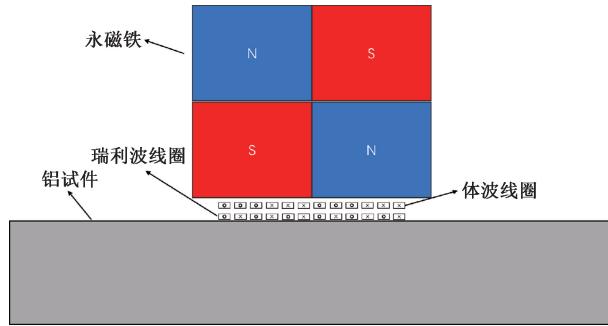


图 2 复合 EMAT 结构

Fig. 2 Structure of the composite EMAT

复合 EMAT 的二维仿真模型如图 3 所示,模型包括空气域、永磁铁、线圈及被测试件。永磁铁结构由两块尺寸为 $20 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的永磁铁以相反极性放置构成,以便在中间区域形成强磁场。线圈由上下两层组成,分别用以激发体波和瑞利波,线宽为 0.254 mm ,铜厚为 $35 \mu\text{m}$ 。被测试件设为尺寸为 $100 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的铝试件,表面设置有 0.5 mm 宽、 1 mm 深的表面缺陷,并在内部设置了 $0.5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的内部缺陷,用于评估检测性能。多物理场仿真主要由电磁场和固体力学场两大部分构成。电磁场包括静磁场和动磁场两部分,其中静磁场仿真区域由永磁体、空气域以及待测试件构成;动磁场仿真区域则由激励线圈、空气域和待测试件组成,采用中心频率 2.5 MHz ,汉宁窗调制的 5 周期正弦信号作为激励信号,用于描述电磁激励过程。固体力学场模型则仅涵盖待测试件的一部分,用于模拟超声波在材料内部的产生、传播以及与缺陷的相互作用。

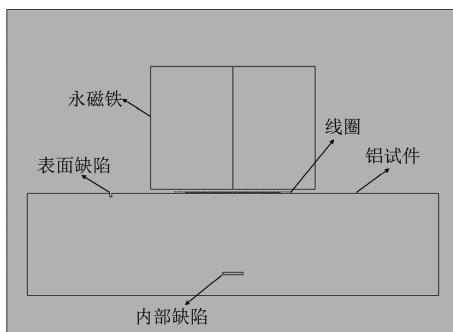


图 3 复合 EMAT 二维仿真模型

Fig. 3 2D simulation model of the composite EMAT

对于超声波传播过程的精确求解,网格划分的质量至关重要,尤其是在处理复杂的电磁-声学耦合问题时。根据趋肤效应,铝板中的涡流主要集中在材料表面的一层薄区域内,该区域的厚度被称为趋肤深度。为了确保涡流密度计算的准确性,在趋肤层内的网格划分至少应达到趋肤深

度的 $1/3$,以捕捉到电磁场在该薄层内的变化。除趋肤层外的铝板区域是超声波传播的主要场域,网格划分的质量直接影响横波传播仿真的准确性。通常,网格划分标准在波长的 $1/3$ 到 $1/10$ 之间,但由于该区域较大,过于精细的网格划分会导致仿真时间显著增加。因此,平衡仿真准确性与效率,本文采用波长的 $1/6$ 进行网格划分;对于线圈部分,线圈作为动磁场的源头,其网格划分的精度要求较高,因此网格大小不应小于线圈长度的 $1/3$,以保证线圈周围电磁场的准确模拟。而其余部分,如空气场和永磁铁,由于不直接涉及波的传播和磁场的精确计算,可以采用较为粗略的网格划分,减少计算资源的消耗。这种分区化的网格划分策略,既保证了仿真结果的准确性,也有效控制了仿真时间。网格划分结果如图 4 所示。

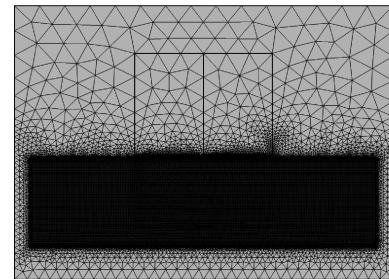


图 4 复合 EMAT 二维仿真模型网格划分

Fig. 4 Mesh division of the 2D simulation model of the composite EMAT

瑞利波与体波在试件中的产生及传播过程如图 5 所示。图 5(a)是复合 EMAT 在试件表面激励出超声波的初始瞬间。图 5(b)是瑞利波和体波在试件内部的传播过程,其中瑞利波沿试件表面传播,而体波在试件内部以不同传播速度传播,横波相对纵波速度较慢。此仿真过程体现了复合 EMAT 具有同时激发瑞利波和体波的能力。

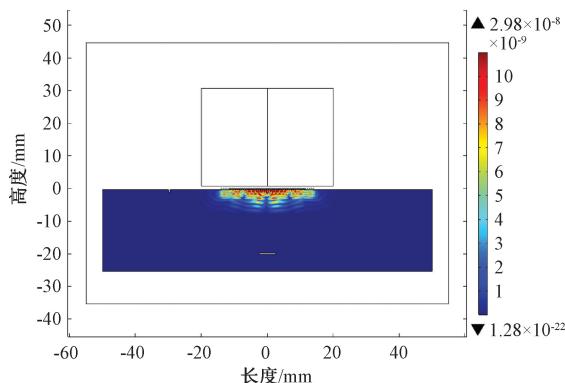
图 5(c)则展示了超声波在试件内部传播过程中与缺陷的相互作用,图中清晰显示出了由内部缺陷引起的回波信号和由表面缺陷引起的回波信号。这两个回波信号在时间和空间上呈现出不同的特征,有助于在实际检测中区分试件表面和内部的缺陷。

2.2 单-双磁铁结构仿真分析

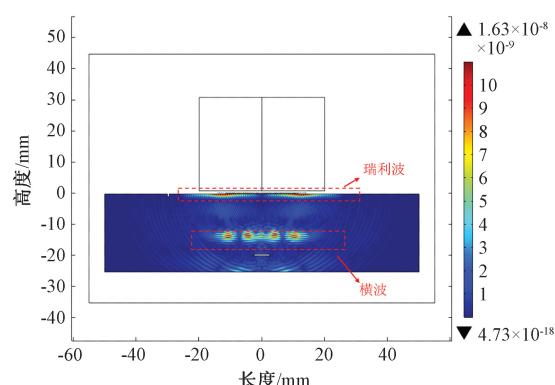
区别于传统的瑞利波及体波 EMAT,本文设计的复合 EMAT 采用了双磁铁结构,下文将对该结构进行分析。根据式(3),在仅考虑洛伦兹力作用的情况下,电磁超声波的激励强度与静态磁场的强度呈正相关关系。这表明,施加于线圈上的静态磁场对超声波的激励效果至关重要。因此,有效设计和分布静态磁场可以显著提高超声波的激励效率^[17-18]。

如图 6 为静态磁场三维仿真模型,分别对单磁铁结构和双磁铁结构在铝板表面的磁场分布进行仿真。

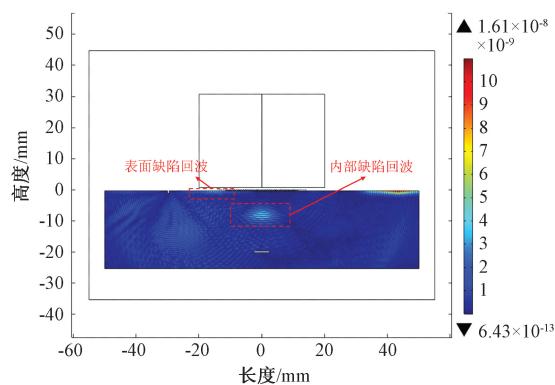
图 7(a)、(b)展示了单个永磁铁作用下铝板表面的磁场分布。可以看出,单个永磁铁作用下的磁场分布呈现出



(a) 瑞利波和体波激励初始时刻铝板内部位移分布云图
(a) Displacement distribution cloud diagram of rayleigh and bulk wave excitation at the initial moment inside the aluminum plate



(b) 瑞利波和体波传播过程铝板内部位移分布云图
(b) Displacement distribution cloud diagram of rayleigh and bulk wave propagation inside the aluminum plate



(c) 瑞利波和体波缺陷回波铝板内部位移分布云图
(c) Displacement distribution cloud diagram of rayleigh and bulk wave defect echoes inside the aluminum plate

图5 复合EMAT缺陷检测过程铝板内部位移分布云图
Fig. 5 Displacement distribution cloud diagram of the aluminum plate during defect detection by the composite EMAT

“强-弱-强”的双峰趋势,中间磁场强度较低,导致换能器在工作过程中难以充分利用这一静态磁场。这种中心弱、边缘强的磁场分布限制了电磁超声波的激励效率,进而影响检测灵敏度和信噪比。

为了解决这一问题,本文采用了极性相反排列的双磁

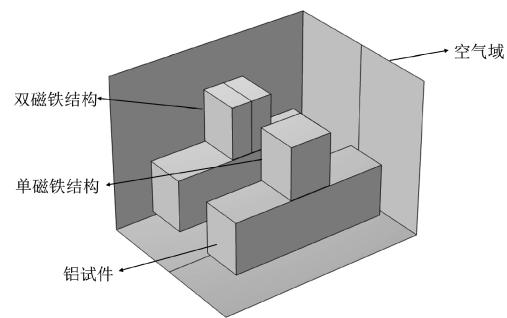
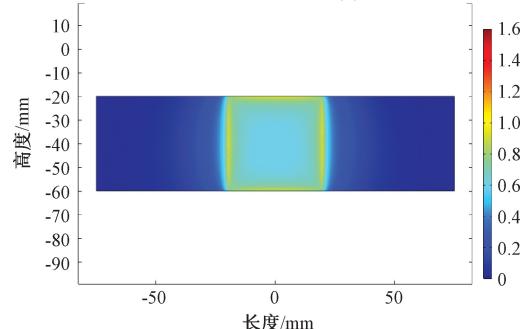


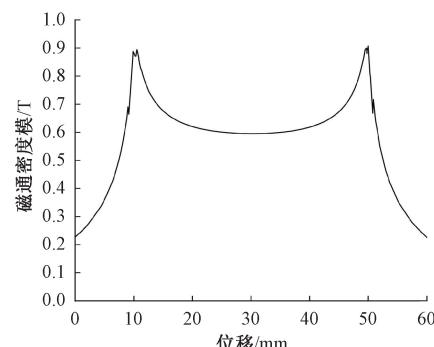
图6 静态磁场三维仿真模型

Fig. 6 Three-dimensional simulation model of the static magnetic field

表面:磁通密度模(T)



(a) 单磁铁作用下铝板表面磁场分布云图
(a) Magnetic field distribution contour on the aluminum plate surface under a single magnet



(b) 单磁铁作用下铝板表面磁场分布曲线
(b) Magnetic field distribution curve on the aluminum plate surface under a single magnet

图7 单磁铁作用下铝板表面磁场分布

Fig. 7 Magnetic field distribution on the aluminum plate surface under a single magnet

铁结构设计。如图8(a)、(b)所示,双磁铁的磁场分布集中于两者的中心区域。通过这种对称结构,磁场强度在中心位置得到显著增强,确保换能器能够充分利用强磁场区域进行超声波激励。这一改进设计不仅提升了电磁超声波的激励强度,同时也改善了超声检测的灵敏度,为后续的信号处理和缺陷识别奠定了基础。

除了磁场强度外,磁场方向同样对电磁超声波的激励效果起着关键作用。图9(a)~(f)分别是单磁铁和双磁铁

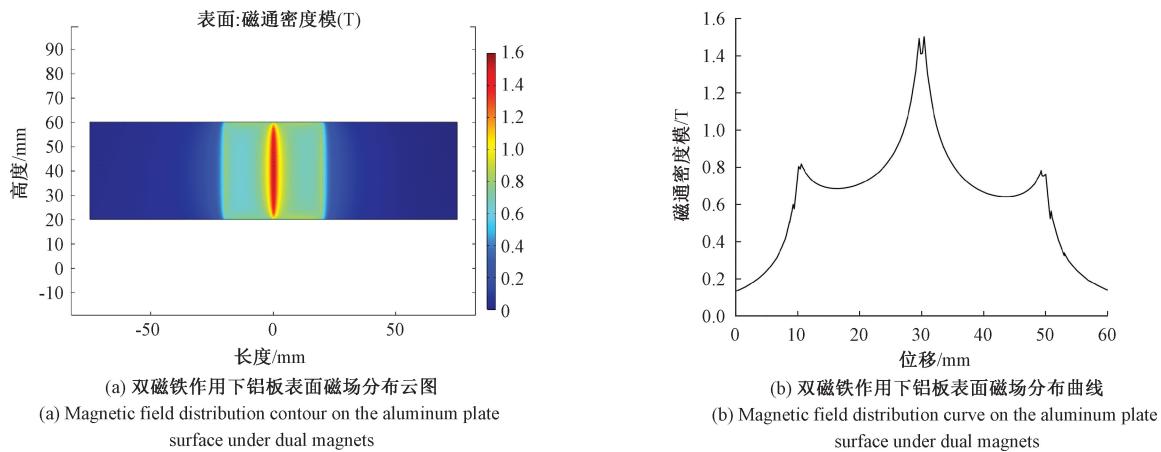


图 8 双磁铁作用下铝板表面磁场分布

Fig. 8 Magnetic field distribution on the aluminum plate surface under dual magnets

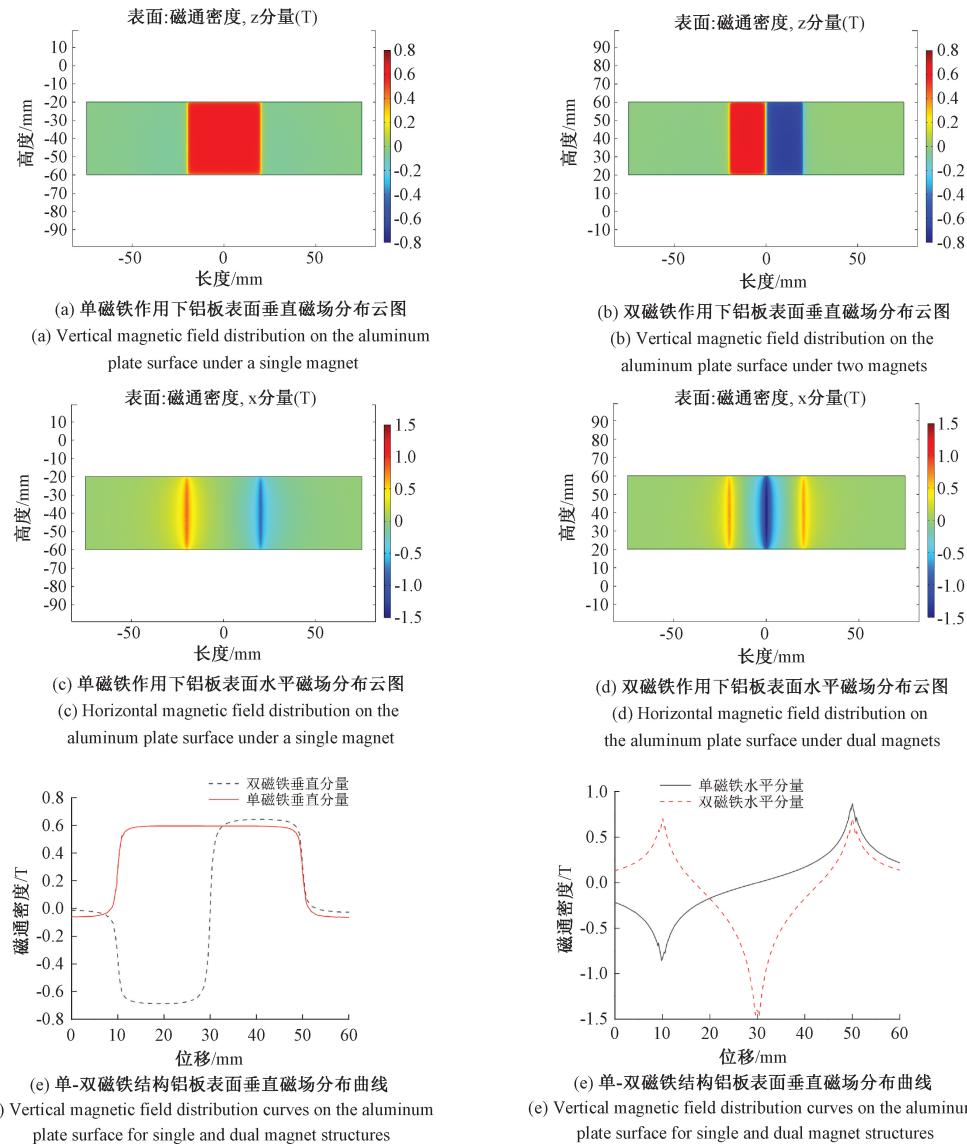


图 9 单-双磁铁结构铝板表面水平和垂直磁场分布情况

Fig. 9 Distribution of horizontal and vertical magnetic fields on the aluminum plate surface for single and dual magnet structures

作用下,铝板表面在水平和垂直方向的磁场分布情况。单磁铁情况下,垂直磁场在整个磁铁下方呈现均匀分布,水平磁场则主要分布在边缘;双磁铁结构的垂直磁场强度分布均匀,两个半区极性相反,强度略强于单磁铁,其水平磁场主要分布在中心和边缘处。

瑞利波是在水平磁场和垂直磁场共同作用下产生的,据研究在相同磁场强度作用下,水平磁场产生的瑞利波要强于垂直磁场产生的瑞利波^[19]。因此,双磁铁结构在中心区域分布的强水平磁场有利于瑞利波的产生,增强了表面缺陷检测的能力。然而,对于体波的激发,磁场方向的不同会产生不同偏振方向的体波。水平方向的磁场倾向于激发传播速度较快的纵波,而垂直方向的磁场则主要激发波速较慢的横波。在无损检测中,横波由于其较慢的传播速度和更短的波长,能够提供更高的检测分辨率,特别是在检测内部缺陷时更具优势。双磁铁结构在材料表面同时分布着水平和垂直磁场,因此理论上可以同时激发横波和纵波,而两者的能量比则取决于水平磁场和垂直磁场的相对分布范围。仿真分析表明,这种磁场的分布范围受两个永磁铁之间的间距影响。随着永磁铁间距减小,垂直磁场的作用逐渐增强,直到永磁铁间距为零时,达到最强的横波激发和最弱的纵波激发状态。

2.3 激励线圈设计及缺陷回波信号仿真

在复合 EMAT 中,瑞利波和体波的激发通过不同的线圈结构实现。如图 10 所示的瑞利波线圈采用了标准的回折线圈设计,适用于高效激发瑞利波。

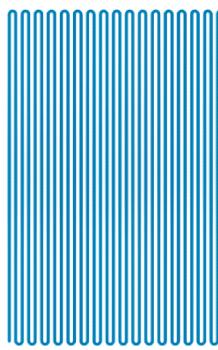


图 10 回折型瑞利波线圈

Fig. 10 Meander-line rayleigh wave coil

如图 11 所示的体波线圈则采用了类蝶形线圈结构,类蝶形线圈产生的涡流密度集中在双磁铁结构垂直磁场的高密度区域,因此该线圈结构可以产生更强的洛伦兹力,进而提高横波激发强度。

如图 12(a)、(b)所示,分别是单磁铁和双磁铁结构下的缺陷回波仿真信号。可以明显看出,双磁铁结构激励的瑞利波信号幅度显著高于单磁铁结构,表现出较高的信号强度。这主要是由于双磁铁结构在中心位置集中了更多的水平磁场和垂直磁场,增强了对瑞利波的激励效果。此外,双磁铁结构产生的体波信号也高于单磁铁结构,约为

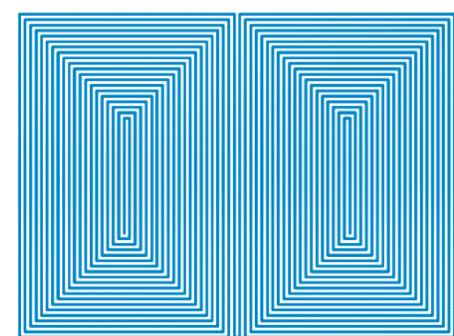
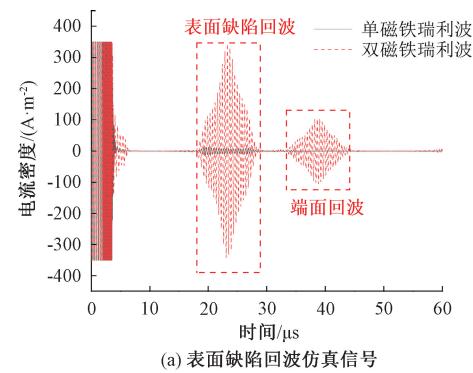


图 11 类蝶形体波线圈

Fig. 11 Butterfly-shaped body wave coil

其两倍,说明其对横波的激励效率更高。然而,双磁铁结构的一个不足之处在于会伴随一定的纵波成分的产生,但其幅度较低,对检测信号干扰有限。

另外,如图 12(a)、(b)所示,内部缺陷一次回波和二次回波时间差为 13.64 μ s,超声横波在铝中的理论波速为 3 122 m/s,可得内部缺陷位于表面下 21.2 mm 处。瑞利波在铝中的波速约为 2 910 m/s,瑞利波表面缺陷回波到达时间为 23.28 μ s,右端面回波到达时间为 39.04 μ s,可得表面缺陷位于距探头中心 29.8 mm 处。



(a) 表面缺陷回波仿真信号
(a) Surface defect echo simulation signal

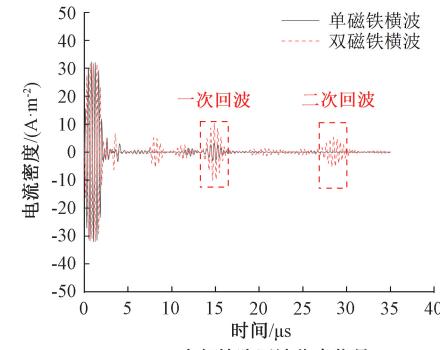
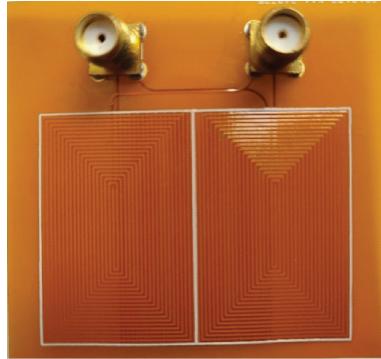


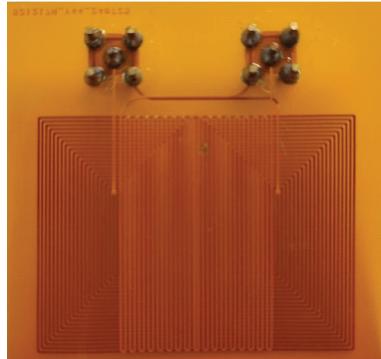
图 12 单-双磁铁结构下缺陷回波仿真信号比较
Fig. 12 Comparison of defect echo simulation signals under single and dual magnet structures

3 试验研究

基于上述的仿真分析,本文设计制作的复合线圈结构如图 13(a)、(b)所示,包含下层瑞利波线圈和上层类蝶形线圈,分别用于激发瑞利波和横波。该线圈采用柔性印刷电路板(printed circuit board, PCB)技术制作,线宽 0.254 mm,铜层厚度为 35 μm ,两层线圈之间以 25 μm 的聚酰亚胺作为绝缘填充材料,最终成品厚度为 0.2 mm。单个永磁铁的尺寸为 50 mm \times 20 mm \times 30 mm,通过铝箔包裹以防止在永磁铁内部激发出超声波。被测试件是一个尺寸为 200 mm \times 80 mm \times 50 mm 的铝合金试件,在其表面加工了宽度为 2 mm、深度为 5 mm 的缺陷。此外,在试件内部不同深度处加工了 5~20 mm \times 5 mm 的方形槽孔,以模拟试件内部缺陷。



(a) 上层体波线圈
(a) Upper bulk wave coil



(b) 下层瑞利波线圈
(b) Lower rayleigh wave coil

图 13 复合 EMAT 柔性 PCB 线圈

Fig. 13 Composite EMAT flexible PCB coil

此外还设计搭建了基于嵌入式 Soc ZYNQ7000 的电磁超声信号检测系统,系统原理框图如图 14 所示,硬件实物如图 15 所示。检测系统包含激励电路、阻抗匹配电路、放大电路、复合 EMAT 以及信号采集电路。该系统能够提供峰峰值达 200 V 的方波激励脉冲,以确保超声波的高效激发。同时,系统具备灵活的阻抗匹配功能,以适应不同负载条件并优化信号传输。此外,放大电路提供了

100 dB 的信号增益,显著提高了微弱电磁信号的可测性。信号采样率为 65 MSPS,能够精确捕捉到高速动态信号,确保表面和内部缺陷的高精度检测。

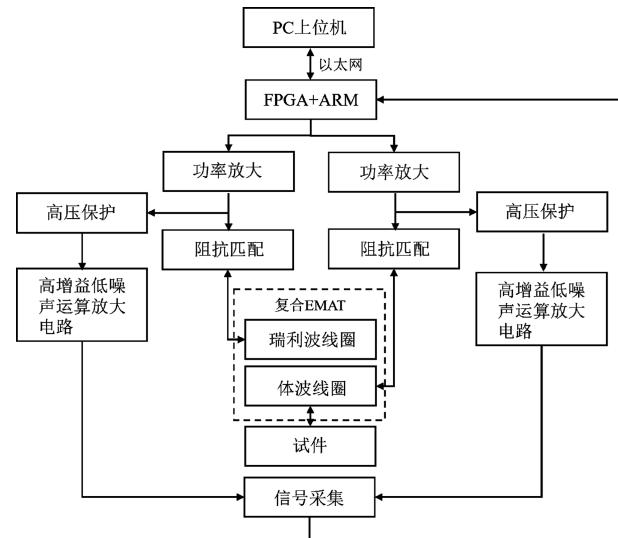


图 14 电磁超声信号检测系统原理框图

Fig. 14 Schematic diagram of electromagnetic acoustic signal detection system

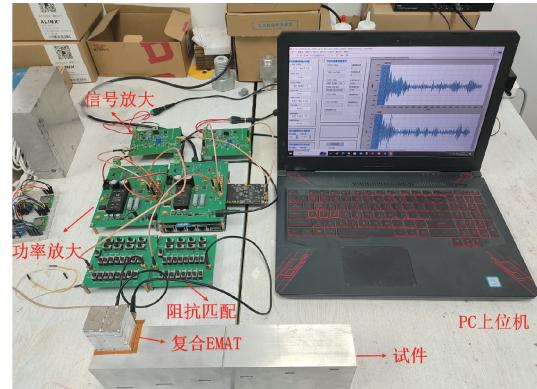


图 15 试验硬件系统照片

Fig. 15 Photograph of the experimental hardware system

在本实验中,采用频率为 2.5 MHz、13 个脉冲的激励信号对瑞利波和体波线圈进行了同步激励与同步检测。如图 16 所示,探头放置在距表面缺陷 124.5 mm、距内部缺陷 57.5 mm 处。

检测结果如图 17(a)、(b)所示,经过波速标定,横波在该铝合金中的传播速度约为 3 007 m/s,瑞利波的传播速度约为 2 701 m/s。如图 17(a)所示,瑞利波检测表面缺陷回波到达时间约为 91.78 μs ,基于该时间以及已知的瑞利波波速,可以推算出表面缺陷的位置距探头中心约为 123.9 mm,与实际距离相差 0.6 mm,相对误差为 0.48%。在图 17(b)中,横波检测内部缺陷的回波信号呈现出三次明显回波。其中,一次回波到达时间约为 41.98 μs ,二次回

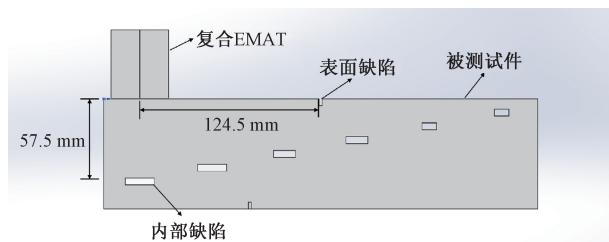


图 16 探头摆放位置示意图

Fig. 16 Schematic diagram of probe placement position

波到达时间约为 $80.52 \mu\text{s}$, 根据横波的传播速度进行推算, 内部缺陷位于距铝合金表面下方约 57.9 mm 处, 与实际距离相差 0.4 mm , 相对误差为 0.7% 。

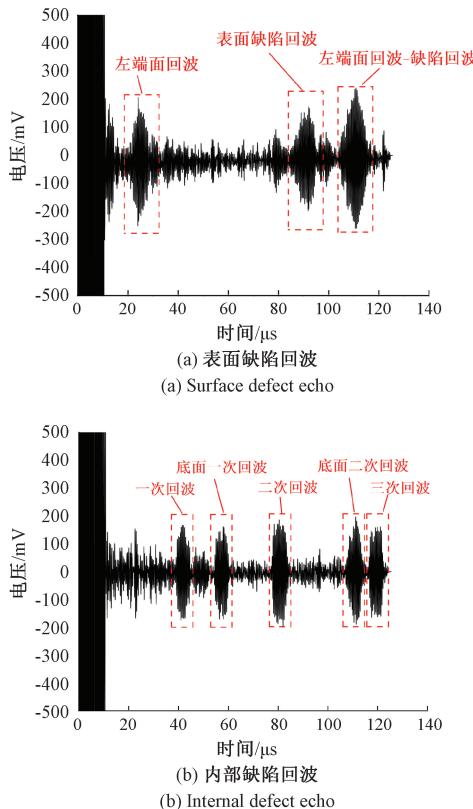


图 17 表面缺陷及内部缺陷检测结果

Fig. 17 Surface and internal defect detection results

为了进一步检验本文设计的复合 EMAT 的性能, 分别使用压电纵波探头(中心频率 2.5 MHz , 直径 8 mm)、压电瑞利波探头(中心频率 2.5 MHz , $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$)、单模式横波 EMAT(中心频率 2.5 MHz , 双磁铁, 类蝶形 PCB 线圈)、单模式瑞利波 EMAT(中心频率 2.5 MHz , 双磁铁, 回折 PCB 线圈), 在相同激励条件下, 分别在相同位置进行缺陷检测实验, 实验结果如表 1 所示。

实验结果表明, 压电瑞利波探头、单模式横波 EMAT 和单模式瑞利波 EMAT 的定位误差与本文设计的复合 EMAT 基本处于同一水平。然而, 压电纵波探头由于纵波

表 1 复合 EMAT 与单模式探头缺陷检测对比

Table 1 Comparison of defect detection between composite EMAT and single-mode probes

探头	缺陷类型	定位误差/%
压电纵波	内部	2.17
压电瑞利波	表面	0.82
单模式横波 EMAT	内部	0.61
单模式瑞利波 EMAT	表面	0.98
复合 EMAT	内部	0.70
	表面	0.48

波速接近横波的两倍, 频率相同时, 纵波波长也近似为横波的两倍, 会导致更大的定位误差, 这在缺陷精确定位中对检测效果产生一定影响。综上, 本文设计的复合 EMAT 及电磁超声检测系统能实现瑞利波和体波的同时激励, 并同步检测出铝合金试件表面和内部缺陷, 避免了传统探头需要多次换探头或组合检测的复杂操作, 显著提高了检测效率, 且对缺陷的定位误差控制在 1% 以内, 能够满足工业无损检测对精度的要求。

4 结 论

本文针对传统超声无损检测技术存在检测盲区, 单一探头难以同时检测试件表面和内部缺陷的问题, 基于电磁超声技术能够方便、灵活地激发各种模式超声波, 且在相同的激励模式下, 体波与瑞利波在试件内具有不同的传播路径等特征, 提出了一种新型的复合 EMAT 设计方案, 并通过理论分析、仿真计算和实验测试验证了其有效性和可行性。

该复合 EMAT 采用复合线圈结构, 成功实现了瑞利波与体波的同步激发。下层回折线圈用于产生瑞利波, 上层类蝶形线圈用于产生横波。采用柔性 PCB 制作了换能器样件, 设计中优化了线圈的几何尺寸和材料, 确保了激励信号的强度与检测灵敏度。双永磁铁结构在增强磁场强度的同时, 也优化了磁场方向的分布, 有效提高了瑞利波和横波的激励效率。

在实际测试实验中, 对试件表面和内部缺陷进行了同步检测。实验结果表明, 瑞利波与横波均能清晰检测到表面及内部缺陷的回波信号, 且瑞利波对表面缺陷的检测定位误差为 0.48% , 横波对内部缺陷的检测定位误差为 0.7% , 表明本文所设计的复合 EMAT 及检测系统具备较高的检测精度。

参考文献

- [1] 何龙龙, 张闯, 李泽欢, 等. 涂层厚度与粘接质量的电磁声谐振无损检测 [J]. 声学学报, 2021, 46 (2): 292-300.
HE L L, ZHANG CH, LI Z H, et al. Coating quality nondestructive detection of metal materials using

- electromagnetic ultrasound[J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(2): 292-300.
- [2] 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. Study on the hybrid detection method of pressure pipeline defects with EMAT/PECT[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2023, 36(6): 860-867.
- [3] 汪树民, 石文泽, 卢超, 等. 脉冲压缩技术在高温锻件电磁超声检测中的应用[J]. *压力容器*, 2023, 40(8): 28-36.
- WANG SH M, SHI W Z, LU CH, et al. Application of pulse compression technology in electromagnetic ultrasonic testing of high temperature forgings[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2023, 40(8): 28-36.
- [4] 石文泽, 黄祺凯, 卢超, 等. 脉冲压缩在钢板腐蚀电磁超声 SH 导波检测中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(2): 324-334.
- SHI W Z, HUANG Q K, LU CH, et al. Application of pulse compression in electromagnetic ultrasonic SH guided wave detection of steel plate corrosion[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(2): 324-334.
- [5] 孟凌霄, 石文泽, 卢超, 等. 基于编码压缩的纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声检测方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(8): 82-99.
- MENG L X, SHI W Z, LU CH, et al. Research on the attached electromagnetic acoustic detection method of fiber-wrapped gas cylinder based on coded compression [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(8): 82-99.
- [6] 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(4): 225-233.
- FANG ZH H, WANG L B, ZHU Y, et al. Design of electromagnetic ultrasonic guided wave automatic detection system for heat exchange tubes of steam generator in nuclear power plants[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024(4): 225-233.
- [7] 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, et al. A small sample aluminum plate surface defect detection method based on electromagnetic ultrasound [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(3): 109-115.
- [8] 郭中会, 李松松, 何慧敏, 等. 基于电磁超声换能器的兰姆波单一模态激励方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(5): 253-260.
- GUO ZH H, LI S S, HE H M, et al. Research on the single-mode excitation method of lamb waves based on electromagnetic acoustic transducers [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42 (5): 253-260.
- [9] 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.
- DONG M, LI H H, MA H W, et al. Optimization design of high-purity shear wave butterfly coil electromagnetic acoustic transducer[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39 (11): 3270-3279.
- [10] 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.
- ZHANG J J, LIU M, JIA G P, et al. Optimal design of line-focusing EMAT based on orthogonal test theory [J]. *China Measurement & Test*, 2024, 50(2): 91-99.
- [11] 邢燕好, 王振宇, 张佳, 等. 电磁超声全向导波换能器辐射控制方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(10): 74-85.
- XING Y H, WANG ZH Y, ZHANG J, et al. Research on the radiation control method of electromagnetic ultrasonic omnidirectional guided wave transducer [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(10): 74-85.
- [12] LIU H, LIU T, LI Y, et al. Uniaxial stress in-situ measurement using EMAT shear and longitudinal waves: Transducer design and experiments [J]. *Applied Acoustics*, 2021, 175: 107781.
- [13] 唐志峰, 孙兴涛, 张鹏飞, 等. 集测厚与导波检测于一体的复合式电磁超声换能器研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9): 98-109.
- TANG ZH F, SUN X T, ZHANG P F, et al. Research on composite electromagnetic acoustic transducer integrating thickness measurement and guided wave detection[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9): 98-109.
- [14] 涂君, 蔡卓越, 张旭, 等. 钢轨电磁超声 SV 波与表面波多维集成检测[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(18): 42-48.
- TU J, CAI ZH Y, ZHANG X, et al. Multi-dimensional integrated detection of electromagnetic acoustic SV wave

- and surface wave for steel rail[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 42-48.
- [15] ZHAI G, LIANG B, LI X, et al. High-temperature EMAT with double-coil configuration generates shear and longitudinal wave modes in paramagnetic steel[J]. NDT & E International, 2022, 125: 102572.
- [16] DING X, WU X, WANG Y. Bolt axial stress measurement based on a mode-converted ultrasound method using an electromagnetic acoustic transducer[J]. Ultrasonics, 2014, 54(3): 914-920.
- [17] SUN H, 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, 2020, 67(4): 832-839.
- [18] ZHANG J, LIU M, JIA X, et al. Numerical study and optimal design of the butterfly coil EMAT for signal amplitude enhancement [J]. Sensors, 2022, 22(13): 4985.
- [19] KANG L, ZHANG C, DIXON S, et al. Enhancement of ultrasonic signal using a new design of Rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer[J]. NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation, 2017, 86:36-43.

作者简介

陈果,硕士研究生,主要研究方向为现代测控技术及应用。

E-mail: 1620169812@qq.com

王雪梅(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为现代测控技术及应用。

E-mail: xmwang2012@home.swjtu.edu.cn

倪文波,博士,教授,主要研究方向机车车辆主动控制技术、列车制动技术。

E-mail: nwb@home.swjtu.edu.cn

武森林,硕士研究生,主要研究方向为现代测控技术及应用。

E-mail: 2226705711@qq.com