

基于偏置磁场 EMAT 表面波换能器效率的分析

张义涛¹,程树云²,陆铭慧²,朱 颖²,胡 克²,戴昱辉³

(1. 南京航空航天大学 机电学院,南京 210016;

2. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室,南昌 330063;

3. 凌云科技集团有限责任公司,武汉 430040)

摘 要: 为提高常规 EMAT(电磁超声)换能器效率,设计一种新型偏置磁场 EMAT 换能器。利用有限元软件建立 EMAT 激励表面波的二维仿真模型,对比分析常规和偏置 EMAT 对激励表面波的影响。最后设计正交试验研究磁铁高度、磁铁宽度、线圈高度、线圈宽度和线圈提离对偏置 EMAT 激励表面波的影响规律,并通过试验验证了其准确性,此外还研究了偏置磁铁对接收 EMAT 的影响。结果表明,偏置 EMAT 换能器激励的表面波幅值比常规 EMAT 的提高了 51%,并且该方法不会在频域信息上发生主频分叉畸变问题,采用偏置 EMAT 接收的信号幅值比常规 EMAT 的提高了 38%,偏置 EMAT 能有效提高检测灵敏度。

关键词: 表面波电磁超声换能器;正交试验;换能效率;优化设计

中图分类号: TG115. 28 文献标志码: A 文章编号:1000-6656(2023)11-0059-08

Analysis of efficiency of EMAT surface wave transducer based on bias magnetic field

ZHANG Yitao¹, CHENG Shuyun², LU Minghui², ZHU Ying², HU Ke², DAI Yuhui³

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China; 2. Key Laboratory of Nondestructive Testing Technology,

Ministry of Education, Nanchang University of Aeronautics, Nanchang 330063, China;

3. Lingyun Technology Group Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: In order to improve the conversion efficiency of the conventional Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT) surface wave transducer, this paper proposes a new type of biased magnetic field EMAT transducer. A two-dimensional simulation model of EMAT excited surface wave is established using finite element software to compare and analyze the influence of conventional and biased EMAT on the excited surface wave. Finally, an orthogonal experiment is designed to study the influence of magnet height, magnet width, line height, line width, and coil lift on the excited surface wave of the biased EMAT. The accuracy of the orthogonal experiment was verified by experiment. In addition, the influence of biased magnet on the receiving EMAT was also studied. The research results showed that the amplitude of the excited surface wave of the biased EMAT was 51% higher than that of the conventional EMAT, and this method does not cause main frequency bifurcation distortion in the frequency domain information. The amplitude of the receiving signal using the biased EMAT was 38% higher than that of the conventional EMAT, and the biased EMAT can effectively improve the detection sensitivity.

Key words: surface wave EMAT; orthogonal experiment; transduction efficiency; optimization design

收稿日期:2023-03-02

作者简介:张义涛(1982—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向为机械工程

通信作者:程树云,2278534418@qq.com

电磁超声表面波换能器通过电磁耦合在工件表面产生表面波,相较于压电超声,电磁超声具有非接触,对工件表面工况要求较低等优点,但是电磁超声

换能器存在换能效率较低的问题,导致电磁超声接收信号的信噪比低。

提高 EMAT 换能效率最简单的方法是利用高能脉冲作为激励信号,或者提高磁铁的磁场强度,因此研究人员通过最大化发射功率来补偿低转换效率,使用窄带和超低噪声接收器,并引入了各种信号处理方法^[1],但是这不可避免地增加了 EMAT 检测系统的复杂性和成本。周正干等^[2]通过设计硬件系统模块来提高 EMAT 接收信号的信噪比。KANG 等^[3-6]通过优化 EMAT 的参数有效提高了表面波的激发效率。时亚等^[7]研究发现优化 EMAT 接收曲折线圈参数后,接收信号可提高 50.8%。WANG 等^[8]研究发现激励电流超过 528.9 A 时,线圈产生的动态磁场能更有效地产生表面波。THRING 等^[9-10]研究发现聚焦电磁超声表面波换能器能提高检出缺陷的能力。陈巍巍等^[11]和 REN 等^[12]通过背板增强试件中的表面涡流强度来提高换能器转换效率。陈建伟等^[13]和康磊等^[14]通过优化线圈参数和磁铁尺寸,采用一发一收进行检测,能将接收信号提高 39%。徐煦源等^[15]研究发现螺旋线圈对于厚板测厚效果最佳,信噪比平均值可达 14 dB 以上。设计了一款新型的窄式电磁超声换能器,该换能器较常规电磁超声换能器提高了表面波的激发效率,但是该换能器会引起波形畸变从而影响检测结果准确性。

文章首先通过仿真分析了静态磁场的分布情况,针对常规 EMAT 没有充分利用永磁铁的边缘效应问题,提出一种偏置磁铁的方式激励表面波,基于偏置磁铁的激励方式设计了正交试验来优化偏置 EMAT 参数,并进行试验验证。

1 电磁超声原理

电磁超声表面波已广泛用于试件表面检测,为了激发具有高方向性的大振幅表面波,表面波 EMAT 通常由一个曲折线圈和一个垂直静态磁场组成,该静态磁场来自永磁体或电磁体^[16]。文章中的研究试件为镍基粉末高温合金,在该试件中,只有洛伦兹力是 EMAT 需要考虑的换能机理。

典型的 EMAT 表面波换能机制示意图如图 1 所示,EMAT 由磁铁、曲折线圈和试件组成,线圈中通常通以大功率窄带脉冲串或宽带脉冲电流用于激励。当电流为交变电流时,会产生交变磁场,线圈靠近试件后,试件表面会产生频率相同方向相反的涡

流,在涡流上的试件质点受到动态洛伦兹力和静态洛伦兹力的共同作用,产生周期性的高频振动,从而产生超声波。超声波的模式类型取决于线圈几何形状、工作频率和施加的磁场,当工件厚度大于表面波 4 倍波长,则认为质点振动以表面波的形式传播。曲折线圈匝间距 L 与表面波的波长 λ 相关,其中匝间距为波长的一半。每根导线激发的表面波发生干涉叠加,产生幅值更大,方向性更强的表面波。

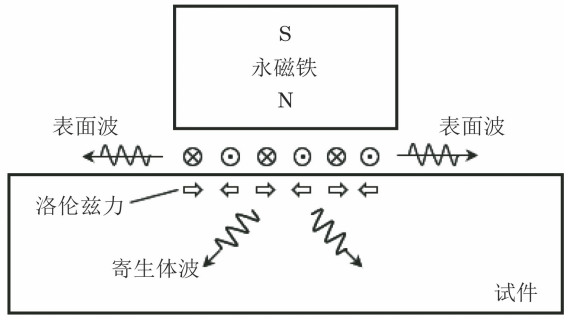


图 1 EMAT 表面波换能机制示意

1.1 洛伦兹力控制方程

EMAT 换能器线圈中的激励电流在工件近表面产生的涡流 J_e 可表示为

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (1)$$

式中: σ 、 A_z 分别为电导率和磁矢量。

EMAT 中产生的洛伦兹力密度 f_l 为

$$f_d = J_e \times B_d \quad (2)$$

$$f_s = J_e \times B_s \quad (3)$$

$$B_d = \mu H_d \quad (4)$$

式中: H_d 为动态磁场强度; μ 为磁导率; B_s 、 B_d 分别为静态磁感应强度和动态磁感应强度; f_s 、 f_d 分别为静态磁场和动态磁场引起的洛伦兹力密度。

常规电磁超声换能器中施加的激励电流较小,因此涡流产生的动态磁场可忽略不计,计算中可等效为静态磁场强度。在试件中产生的洛伦兹力则可表示为

$$f_l = f_s = J_e \times B_d \quad (5)$$

$$F_l = \iiint_V f_l dv \quad (6)$$

式中: F_l 为给定体积 V 上的洛伦兹力。

1.2 声波在弹性介质中的传播方程

超声波在试件中的传播方程为

$$\mu \nabla \times \nabla \times \vec{u} - (\lambda + 2\mu) \nabla \nabla \cdot \vec{u} + \rho \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} = f_l \quad (7)$$

式中: ρ 为质量体积密度; \vec{u} 为材料位移矢量; μ 和 λ 分别为试件的弹性常数。

2 EMAT 激励表面波有限元模型

2.1 静态磁场分析

建立静态磁场分析模型如图 2 所示,模型由永磁铁,曲折线圈和试件组成。在模型中设置二维截线,二维截线长为 70 mm,二维截线整体都在空气域内部,以避免空气域边缘的影响。

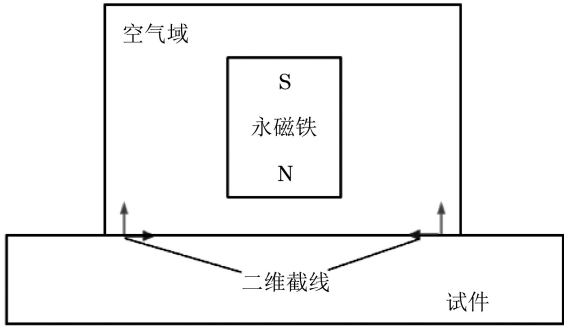


图 2 静态磁场分析模型

磁铁的磁通密度模在试件表面的分布规律如图 3 所示,可以发现试件表面在磁铁边缘处的磁通密度模大于磁铁内部的,且越靠近磁铁正下方,磁通密度模越小,其中磁铁边缘的磁通密度模比内部最小值大 0.21 T。根据公式(5)可知,在磁铁边缘下方的试件质点会受到更大的洛伦兹力,从而激励产生幅值更大的表面波。

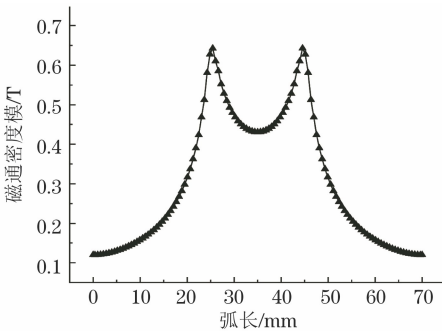


图 3 试件表面磁通密度模分布规律

2.2 基于偏置磁铁 EMAT 激励表面波仿真分析

常规 EMAT 表面波换能器中的线圈往往置于磁体正下方,导致 EMAT 换能器没有充分利用到磁场的边缘磁场。考查常规 EMAT 和偏置 EMAT 换能器的激发效率,建立常规 EMAT 和偏置 EMAT 激励表面波二维模型如图 4 所示(模型参数如表 1 所示),两模型中只有磁体位置不同,其他参数均相同。首先采用单根线圈作一匝激励线圈,共 10 匝线圈,线圈中心距为波长一半,线圈总宽度为 23.7 mm。偏置 EMAT 中的磁铁一侧位于线圈中心,而常规 EMAT 磁铁在线圈正上方。为了仿真

结果更加准确,将涡流趋肤层的网格细化,同时将试件两侧和底面设置为反射边界以避免边界反射回波的影响。

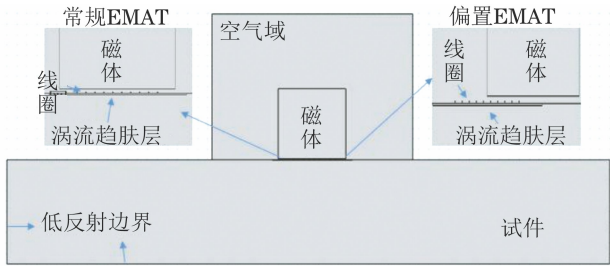


图 4 EMAT 激励表面波二维模型

表 1 EMAT 激励表面波二维模型参数

参数	数值	参数	数值
试件(长×宽)/mm	300×50	试件电导率/(S·m ⁻¹)	1.43×10 ⁷
永磁铁(长×宽)/mm	33.7×33.7	试件相对磁导率	1
空气域(长×宽)/mm	90×100	线圈电导率/(S·m ⁻¹)	6×10 ⁷
趋肤层/mm	30×0.15	线圈相对磁导率	1
线圈/mm	0.3×0.05	激励频率/MHz	0.5
磁剩余磁密/T	1.2	激励电流幅值/A	10
线圈提高/mm	0.1	电流脉冲数	6
线圈间距/mm	2.6	表面波声速/(m·s ⁻¹)	2 940

偏置 EMAT 换能器激励的表面波传播过程如图 5 所示,偏置 EMAT 换能器激励出表面波沿试件表面传播,表面波能量主要集中在 1—2λ,符合理论,同时会在试件内部产生寄生横波,寄生横波衰减比表面波快。计算出仿真模型中的表面波声速为 2 990 m·s⁻¹,与理论值偏差 1.7%,表明偏置 EMAT 换能器模型的准确性。

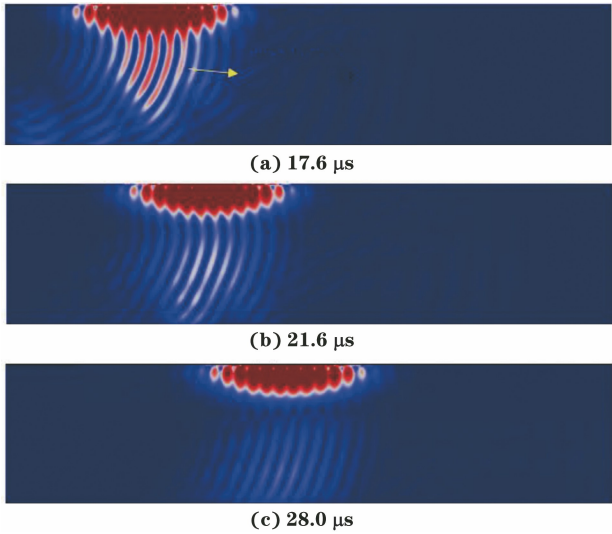


图 5 表面波在试件中的传播过程

偏置 EMAT 和常规 EMAT 激励的表面波在磁铁外部二维截点(80 mm,29.9 mm)处的位移 y 方向时域分量如图 6 所示,可见,偏置 EMAT 激励

的表面波幅值是常规 EMAT 的 5.3 倍左右,这极大提高了 EMAT 表面波换能器的换能效率,常规 EMAT 激励的表面波相位大约超前 1/4 周期。将接收到的时域信号进行傅里叶变换得到频域信号如图 7 所示,其中偏置 EMAT 激励的表面波频域幅值是常规 EMAT 的 4.3 倍左右,且常规 EMAT 激励的表面波频域信号会在主频上产生分叉畸变,SHI 等发现采用窄式磁铁激励的表面波信号畸变会更严重,但采用偏置磁体产生的表面波不会发生畸变,能避免常规 EMAT 激励表面波对检测结果的影响。

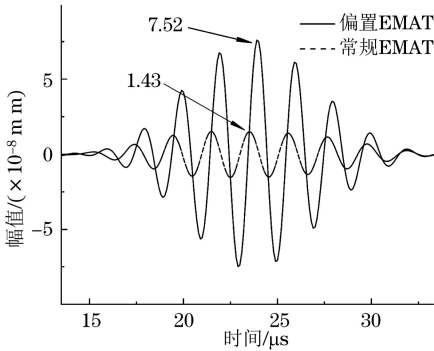


图 6 偏置和常规 EMAT 激励表面波 y 分量

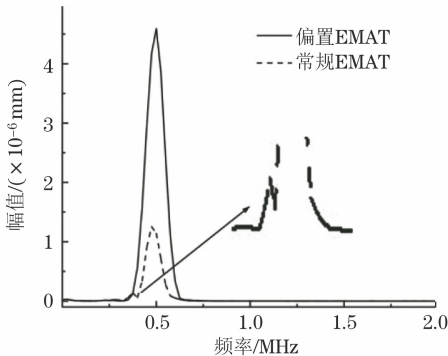


图 7 偏置和常规 EMAT 激励的表面波频域信号

考查永磁铁偏置位置对偏置 EMAT 换能器激励表面波效率的影响。首先建立常规 EMAT 激励表面波模型,磁体位于线圈正上方,然后以 2 mm 为步进将永磁铁向一侧移动,来仿真模拟永磁铁偏移量对换能器激发效率的影响,其他参数均与上部分设置的模型相同,共设置 15 组模型。

仿真模型中接收信号归一化幅值与偏移量关系如图 8 所示,可见,偏置 EMAT 激励表面波幅值随磁铁偏置量先增大后减小,当磁铁一侧位于线圈中间部分时,偏置 EMAT 换能器激励的表面波幅值最大。

2.3 基于偏置磁铁 EMAT 激励换能器的优化设计

研究发现偏置永磁铁方式能有效提高 EMAT 表面波换能器的激发效率。张金等^[17]研究发现四

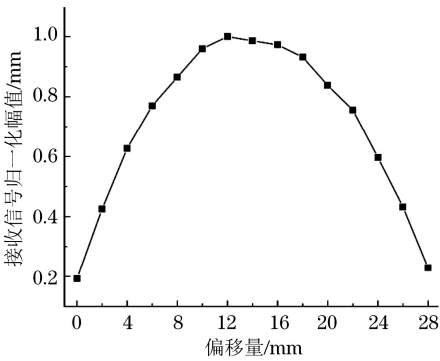


图 8 磁体偏移量与激励表面波位移幅值关系

分裂式线圈能有效提高换能效率,因此仿真试验模型中采用四分裂式线圈,研究线圈参数,永磁铁尺寸和线圈提离对换能器激励表面波幅值的影响。由于偏置 EMAT 换能器中多参数会对激励信号幅值产生影响,因此很难进行全面的试验分析,文章基于正交试验来减少试验次数,正交试验设计如表 2 所示。

表 2 正交试验设计

						mm
序号	磁铁高度	磁铁宽度/线圈宽度	线圈高度	线圈宽度	线圈提离	位移幅值/ ×10 ⁻⁸
1	20	1.0	0.015	0.15	0.1	5.8
2	20	1.2	0.035	0.20	0.2	12.7
3	20	1.4	0.055	0.25	0.3	4.2
4	20	1.6	0.075	0.30	0.4	3.7
5	30	1.0	0.035	0.25	0.4	3.74
6	30	1.2	0.015	0.30	0.3	4.6
7	30	1.4	0.075	0.15	0.2	14.1
8	30	1.6	0.055	0.20	0.1	16.7
9	40	1.0	0.055	0.30	0.2	5.7
10	40	1.2	0.075	0.25	0.1	16.2
11	40	1.4	0.015	0.20	0.4	11.9
12	40	1.6	0.035	0.15	0.3	14.0
13	50	1.0	0.075	0.20	0.3	5.1
14	50	1.2	0.055	0.15	0.4	11.6
15	50	1.4	0.035	0.30	0.1	18.5
16	50	1.6	0.015	0.25	0.2	16.3

正交试验结果如表 3 所示,通过正交试验数据分析可得出磁铁高度、磁铁宽度/线圈宽度、线圈高度、线圈宽度和线圈提离对接收信号位移幅值的影响。5 因素 4 水平的接收信号位移幅值极差越大,说明该因素对接收信号位移幅值的影响最大,因此 5 个因对接收信号的位移幅值影响从大到小分别为磁铁宽度/线圈宽度、线圈提离、磁铁高度、线圈宽度和线圈高度。

表 3 正交试验结果

水平	磁铁高度	磁铁宽度/线圈宽度	线圈高度	线圈宽度	线圈提离
1	6.6	5.085	9.65	11.3	14.3
2	9.785	11.275	12.23	11	12.2
3	12.625	12.3	9.55	10.11	9.775
4	13.0	12.675	9.775	8.125	7.775
极差	6.4	6.837	2.685	3.175	6.525
主次顺序	3	1	5	4	2

磁铁高度、磁铁宽度/线圈宽度、曲折线圈高宽和曲折线圈提离对偏置 EMAT 激励表面波接收信

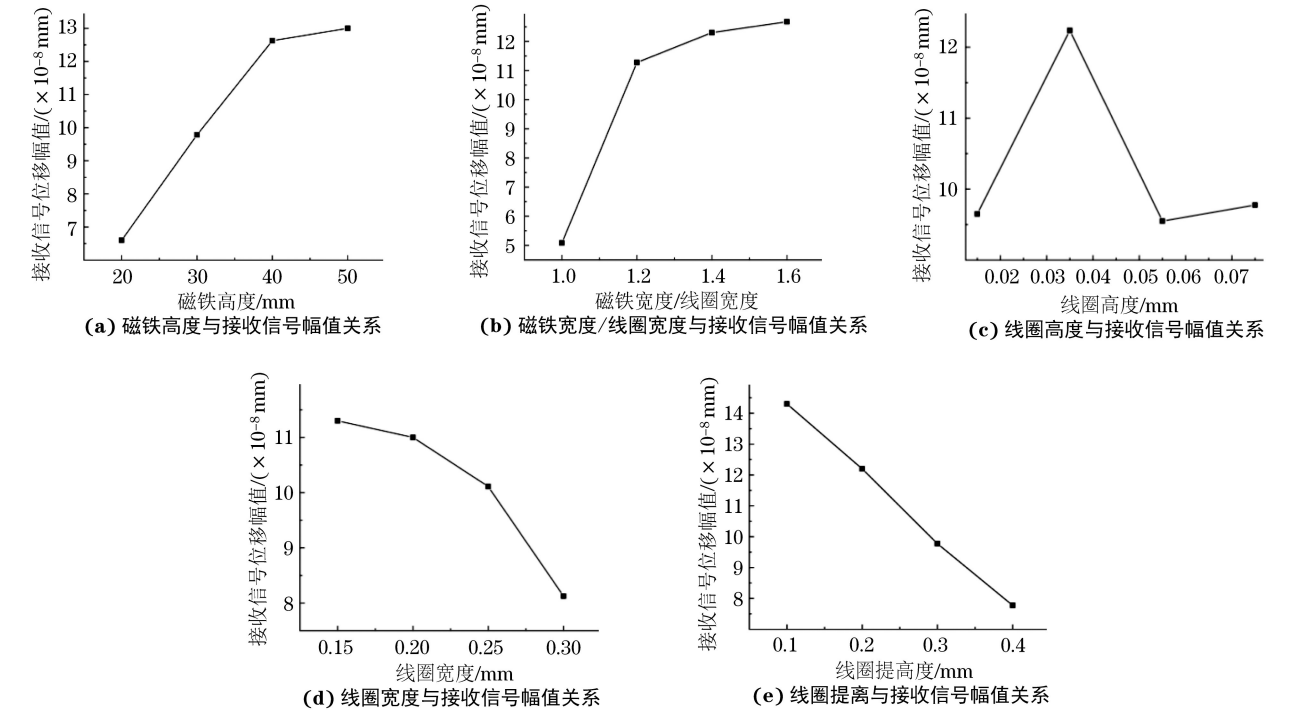


图 9 磁铁高度、磁铁宽度/线圈宽度、曲折线圈高宽和曲折线圈提离对偏置 EMAT 激励表面波接收信号位移幅值的影响正交试验

通过对正交试验结果分析可知,5 个因素的最佳参数组合分别为磁铁高度为 50 mm,磁铁宽度/线圈宽度为 1.6 mm、线圈高度为 0.035 mm,线圈宽度为 0.15 mm,线圈提离为 0.1 mm。上述 16 组正交试验中没有最佳参数组合试验,因此设计最佳组合参数试验并与预测结果比较,并随机另外挑选两组上文中没有的组合试验,将预测结果与仿真试验结果相比较,结果如表 4 所示,可见最佳组合参数仿真试验值与预测值误差仅为 1.19%,其余两组随机试验的仿真值与预测值误差分别为 4.18%和 2.0%,可知正交试验的合理性。

2.4 接收 EMAT 仿真分析

基于文章研究结果,建立仿真模型研究常规接收 EMAT 和偏置接收 EMAT 对接收信号幅值的

号位移幅值的影响如图 9 所示。由图 9(a)可知,接收信号幅值与磁铁高度成正比,当磁铁高度大于 40 mm 后,接收信号幅值增大变缓。由图 9(b)可知,接收信号幅值与磁铁宽度/线圈宽度成正比,当磁铁宽度大于 1.4 倍的线圈宽度后,接收信号幅值的增加也变缓。由图 9(c)可知接收信号幅值与线圈高度呈非线性关系。由图 9(d)可知接收信号幅值与线圈宽度呈反比关系。由图 9(e)可知接收信号幅值与线圈提离呈反比关系,线圈提离越小,偏置 EMAT 激励表面波幅值越大。

影响。共建立 2 组模型分别为偏置激励常规接收和偏置激励偏置接收,激励接收 EMAT 中的曲折线圈均为四分裂式,线圈高度为 0.035 mm,宽度为 0.15 mm,单根线圈间距为 0.3 mm,匝间距为 2.6 mm,线圈总宽度为 24.55 mm。

表 4 正交试验预测与仿真结果分析 mm

组合	磁铁高度	磁铁宽度/线圈宽度	线圈高度	线圈宽度	线圈提离	位移预测值/ ($\times 10^{-8}$)	位移仿真值/ ($\times 10^{-8}$)
1	50	1.6	0.035	0.15	0.1	18.875	19.1
2	30	1.0	0.035	0.25	0.3	5.74	5.5
3	20	1.4	0.055	0.25	0.1	8.725	8.9

仿真结果如图 10 所示,可见,采用偏置磁铁方式也能有效提高接收信号幅值,偏置 EMAT 接收信号幅值较常规 EMAT 接收信号幅值提高了 49.7%。

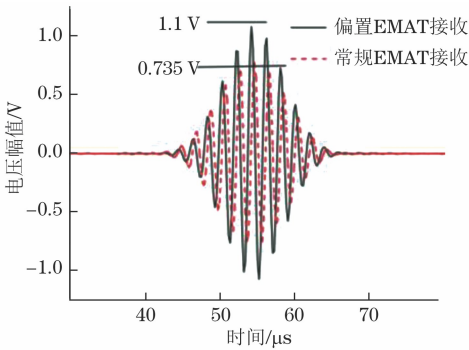


图 10 仿真得到的接收信号电压幅值

3 试验验证

3.1 偏置磁铁对 EMAT 激励和接收表面波的影响

搭建的 EMAT 表面波试验系统的结构框图如图 11 所示,该系统采用 Ritec-SNAP-5000 激励中心频率为 1MHz 的正弦脉冲信号,激励电流传输到阻抗匹配电路,再经过低通滤波器,将激励电流信号传输至激励 EMAT 的曲折线圈,从而激励表面波,表面波经测试工件被 PZT(压电陶瓷)换能器接收,换能器将接收信号传输至高通滤波器和前置放大器,再由前置放大器将信号传输至 Ritec-SNAP-5000 的接收端,从而在示波器中显示接收信号。试验中线圈采用双层四分裂式线圈柔性电路板,共 10 匝线圈,其中单根线圈间距为 0.3 mm,匝线圈间距为 2.6 mm,线圈宽度为 0.15 mm,线圈高度为 0.035 mm,线圈总宽度为 24.55 mm。EMAT 激发换能器中磁铁宽度为 25 mm,高度为 30 mm,激励信号中心频率为 0.5 MHz。

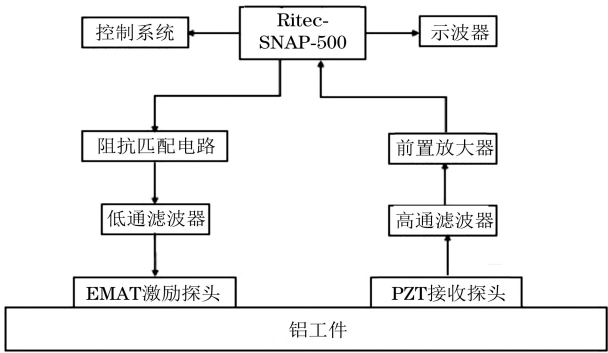


图 11 试验系统结构框图

(1) 偏置磁铁对 EMAT 激励表面波的影响

常规 EMAT 和偏置 EMAT 激励表面波的接收时域信号如图 12 所示,可见偏置 EMAT 激励的表面波幅值比常规 EMAT 激励的表面波幅值提高了 51%,即采用偏置磁铁方法能有效提高 EMAT 换能效率。对接收的时域信号进行傅里叶变换得到

其频域信号如图 13 所示,采用常规激励的表面波频域信号会在主频上发生分叉畸变,与仿真结果一致,采用的磁铁越窄,激励表面波的畸变越严重,而采用偏置磁铁的仿真不会产生信号畸变现象,这会提高 EMAT 检测结果的可靠性。

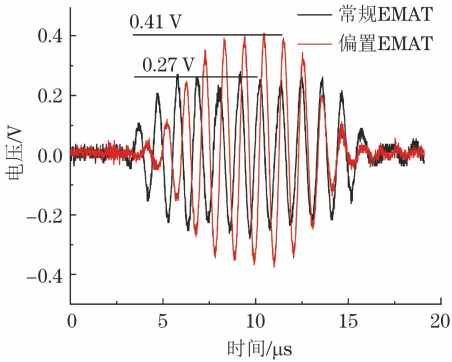


图 12 常规 EMAT 与偏置 EMAT 激励表面波的时域信号

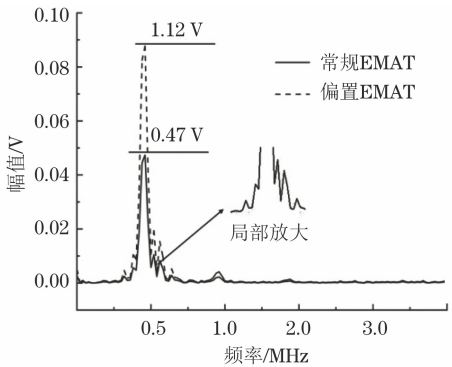


图 13 常规 EMAT 与偏置 EMAT 激励表面波的频域信号

基于文章搭建的试验测试平台,研究磁铁偏置量对 EAMT 换能器激励表面波幅值的影响规律。从磁铁位于线圈正上方开始,以 2 mm 为步进进行移动,试验结果如图 14 所示,可见,偏置 EMAT 激励表面波幅值随磁铁偏置量先增大,后减小,当磁铁一侧位于线圈中间部分时,偏置 EMAT 的换能效率最高。

(2) 偏置磁铁对 EMAT 接收表面波的影响

将图 11 系统中的 PZT 接收换能器更换为 EMAT 接收换能器,接收 EMAT 接收到的信号通过阻抗匹配电路传输至前置放大器,前置放大器将接收信号放大后传输至 Ritec-SNAP-5000 的接收端。接收 EMAT 线圈与前文的四分裂式激励线圈相同,其中永磁铁长为 40 mm,高为 20 mm,宽为 25 mm。

试验结果如图 15 所示,可见,采用偏置 EMAT

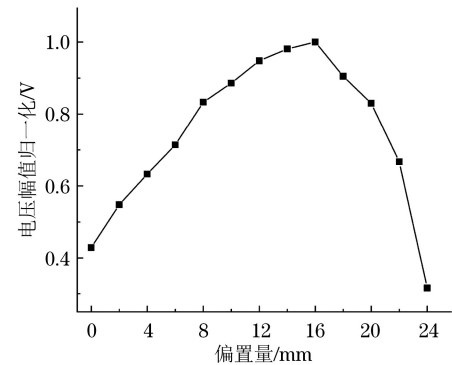


图 14 磁铁偏置量与激励声波幅值关系

接收信号较常规 EMAT 的提高了 38%，采用偏置永磁铁方式能有效提高接收信号幅值，提高了接收 EMAT 换能效率，与仿真结果一致。

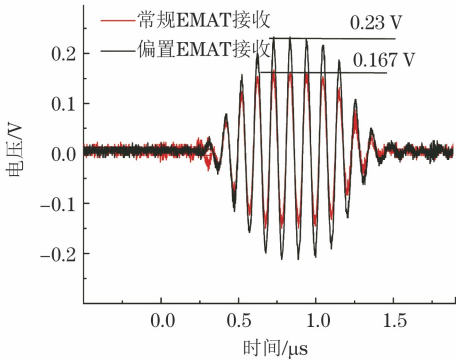


图 15 常规 EMAT 与偏置 EMAT 的接收信号电压幅值

3.2 永磁铁尺寸对超声信号的影响

通过试验验证正交试验中永磁铁尺寸对偏置 EMAT 换能器换能效率的影响。永磁铁长度为 40 mm，宽度为 25 mm，改变磁铁高度进行试验，不同高度磁铁激励的表面波接收信号如图 16 所示，可见，采用越高的磁铁激励超声波，接收信号的电压幅值越大，永磁铁高度增加 1.5 倍，接收信号电压幅值提高 1.37 倍与仿真结果提高 1.3 倍基本一致。

当永磁铁长为 40 mm，高为 20 mm，改变永磁铁宽度，研究磁铁宽度对偏置 EMAT 激励表面波幅值的影响。采用宽度为 25, 35 mm 的两种磁铁进行试验，得到的不同宽度磁铁激励表面波的接收信号如图 17 所示，对于偏置 EMAT 来说越宽的磁铁接收信号电压幅值越高。35 mm 宽的磁铁激励声波幅值是 25 mm 宽的磁铁激励声波幅值的 1.47 倍。

4 结语

设计了一种偏置磁铁 EMAT 激励表面波换能器，通过正交试验研究发现磁铁高度、磁铁宽度，线

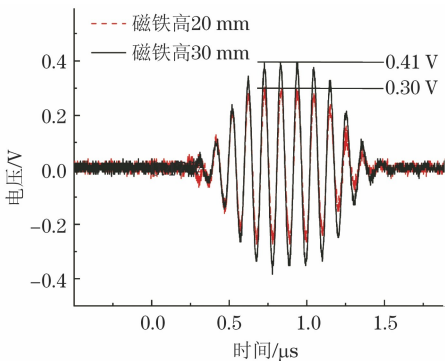


图 16 不同高度磁铁激励的表面波信号

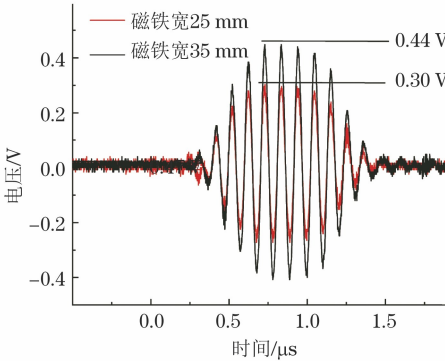


图 17 不同宽度磁铁激励的表面波信号

圈高度、线圈宽度和线圈提高均对偏置 EMAT 激励的表面波幅值有影响，其中磁铁宽度对接收信号幅值影响最大，磁铁宽度越宽，激发效率越高，当磁铁宽度大于线圈总宽 1.4 倍后，磁铁宽度对激发效率的影响趋于稳定。磁铁宽度大于线圈宽度 1.4 倍，磁铁较高，提高越小且单根线圈宽度较小时偏置 EMAT 激发效率最佳。

采用偏置磁铁 EMAT 换能器能有效提高换能效率，其中偏置 EMAT 激励的表面波幅值比常规 EMAT 激励的增加了 51%，并且避免了常规 EMAT 激励表面波在主频信号上的畸变问题，偏置 EMAT 较常规 EMAT 的接收信号幅值提高了 38%，采用偏置磁铁能有效提高 EMAT 换能效率。

参考文献：

[1] ZHAO X Y, ZHONG H, WAN M X, et al. Ultrasound contrast imaging based on a novel algorithm combined pulse inversion with wavelet transform[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 2011, 37(8):1292-1305.

[2] 周正干, 黄凤英, 倪先胜. 超外差接收相敏检波在电磁超声检测中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(3):253-258.

[3] KANG L, DIXON S, WANG K C, et al. Enhancement

of signal amplitude of surface wave EMATs based on 3-D simulation analysis and orthogonal test method [J]. NDT & E International,2013,59:11-17.

[4] THRING C B,HILL S J,DIXON S,et al. The effect of EMAT coil geometry on the Rayleigh wave frequency behaviour [J]. Ultrasonics, 2019, 99: 105945.

[5] TKOCZ J, DIXON S. Electromagnetic acoustic transducer optimisation for surface wave applications [J]. NDT & E International,2019,107:102142.

[6] KANG L,DIXON S,WANG K C,et al. Enhancement of signal amplitude of surface wave EMATs based on 3-D simulation analysis and orthogonal test method [J]. NDT & E International,2013,59:11-17.

[7] 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.

[8] WANG S J,KANG L,LI Z C,et al. 3-D modeling and analysis of meander-line-coil surface wave EMATs [J]. Mechatronics,2012,22(6):653-660.

[9] THRING C B, FAN Y, EDWARDS R S. Focused Rayleigh wave EMAT for characterisation of surface-breaking defects[J]. NDT & E International, 2016, 81:20-27.

[10] SHI W Z, WU Y X, GONG H, et al. Optimal design of spiral coil electromagnetic acoustic transducers considering lift-off sensitivity operating on non-ferromagnetic media[J]. Nondestructive Testing and Evaluation,2018,33(1):56-74.

[11] 陈巍巍,石文泽,陈尧,等. 点聚焦表面波 EMAT 声场特性及其试验[J]. 无损检测,2018,40(10):16-21.

[12] REN W P, HE J P, DIXON S, et al. Enhancement of EMAT's efficiency by using silicon steel laminations back-plate[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018,274:189-198.

[13] 陈建伟,刘帅,马健,等. 一种高性能电磁超声传感器线圈背板及其优化设计[J]. 山东科学,2022,35(2): 70-78.

[14] 康磊,金昱,潘峰,等. 曲折线圈型电磁超声表面波换能器的优化设计[J]. 仪表技术与传感器,2015(6):1-4,7.

[15] 徐煦源,涂君,张旭,等. 用于钢板厚度测量的常用电磁超声线圈特性研究[J]. 中国测试,2020,46(4): 143-147.

[16] MIRKHANI K,CHAGGARES C,MASTERSON C, et al. Optimal design of EMAT transmitters[J]. NDT & E International,2004,37(3):181-193.

[17] 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.



(上接第 34 页)

[8] 王龙,刘武刚,孔凡金,等. X 射线 CT 在 C/SiC 复合材料微观结构和损伤表征中的应用[J]. 复合材料科学与工程,2021(6):72-76,112.

[9] 黄树华. 岩石力学研究中 AE 和 CT 装置的应用——介绍日本京都大学岩石力学研究近况[J]. 岩土力学, 1989,10(1):83-86.

[10] 王龙,冯国林,李志强,等. X 射线断层扫描在材料力学行为研究中的应用[J]. 强度与环境,2017,44(6): 43-56.

[11] 丁卫华,仵彦卿,蒲毅彬,等. 低应变率下岩石内部裂纹演化的 X 射线 CT 方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003,22(11):1793-1797.

[12] CAI Y D, LIU D M, MATHEWS J P, et al. Permeability evolution in fractured coal—combining triaxial confinement with X-ray computed tomography, acoustic emission and ultrasonic techniques[J]. International Journal of Coal Geology, 2014,122:91-104.

[13] 陈世杰,赵淑萍,邢莉莉,等. CT 扫描参数对岩土图像的影响[J]. CT 理论与应用研究,2013,22(2):245-254.

[14] CHEN S J, ZHAO S P, XING L L. Affect of CT scanning parameters to the quality of rock and soil tomograms[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2013, 22(2): 245-254.