

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105672

横波测厚电磁超声换能器的优化设计及试验研究

岑鑫 潘高 王雪梅 倪文波
(西南交通大学 机械工程学院 成都 610031)

摘要: 电磁超声换能器能进行非接触检测,使用方便,但缺点是换能效率低,为了提高横波电磁超声换能器的换能效率,分析电磁超声换能器工作原理,利用 COMSOL Multiphysics 软件对电磁超声换能器进行三维建模仿真,分析了永磁体不同放置方式和几何尺寸对换能器激励洛伦兹力大小的影响。进一步应用正交试验法对蝶形线圈的几何尺寸参数进行优化设计,得到最佳的横波换能效率。最后,利用超声波检测系统进行铝板测厚试验。结果表明,永磁体垂直放置激发横波的效率更高,采用蝶形线圈激励超声横波信号的幅值比螺旋线圈高出 50%,蝶形线圈比螺旋线圈具有更理想的横波换能效率。

关键词: 电磁超声换能器;蝶形线圈;换能效率;正交试验法

中图分类号: TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Optimal design and experimental study of shear wave thickness measuring electromagnetic ultrasonic transducer

Cen Xin Pan Gao Wang Xuemei Ni Wenbo
(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Electromagnetic ultrasonic transducer can be used for non-contact detection, which is convenient to use, but its disadvantage is low efficiency of energy exchange. To increase the energy conversion efficiency of electromagnetic ultrasonic transducer, The paper analyzed the working principle of electromagnetic ultrasonic transducer, it also modeled and simulated the electromagnetic ultrasonic transducer by using COMSOL Multiphysics. And the influence of different placement modes and geometric size of the permanent magnet on the excitation Lorentz force of the transducer was analyzed. By orthogonal experiment, the geometric parameters of the butterfly coil are optimized to obtain the best efficiency of shear wave energy transfer, Finally, The thickness test of aluminum plate was carried out by using ultrasonic detection system. The results show that the shear wave excitation efficiency is higher when the permanent magnet is placed vertically, and the amplitude of the ultrasonic shear wave excited by the butterfly coil is 50% higher than that by the spiral coil. The butterfly coil has better shear wave energy transfer efficiency than the spiral coil.

Keywords: electromagnetic ultrasonic transducer; butterfly-coil; energy exchange efficiency; orthogonal test method

0 引言

超声波检测技术是工业上应用十分广泛的无损检测技术,可进行材料的厚度测量^[1]、温度测量^[2]、缺陷探伤^[3]和应力测试^[4]等。传统的压电式超声探头由于需要耦合剂,应用时受到很大限制。电磁超声检测技术是一种非接触式检测技术,具有不需要耦合剂,能够在高温等极端条件下使用的特点。并且通过改变电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)的结构和参数,能够方便激发不同类型的超声波信号,满足不同的检测需求。因此受到越来越多的关注。然而,EMAT 换能效率低,回波信号信

噪比低^[5],给实际应用带来了很大挑战。

近些年国内外专家学者针对如何提高电磁超声换能器的换能效率展开了一系列研究工作,也取得了一定的成果。这些研究主要表现为通过改变 EMAT 的结构和参数来实现换能效率的提高,例如,结合涡流脉冲进行检测^[6],改变永磁体和线圈的排列组合方式^[7-9],采用新型线圈抑制电磁冲击盲区^[10],改变激励脉冲频率和提高距离等^[11-12],二维建模仿真相关工作比较多^[13]。在 EMAT 的结构中,线圈和磁铁是影响其换能效率的主要因素。相较于压电超声换能器,EMAT 更容易产生横波,并且蝶形线圈能获得更大的换能效率^[14]。本文主要针对蝶形线圈 EMAT 的参数优

收稿日期:2020-07-07

• 176 •

化问题进行分析研究,使用 COMSOL Multiphysics 软件进行建模仿真,通过计算不同放置方式和尺寸参数的永磁体以及不同种类和尺寸参数的蝶形线圈在被测试件中激发的洛伦兹力大小,分析这些因素对蝶形线圈 EMAT 换能效率的影响,实现对蝶形线圈 EMAT 的优化设计。最后,通过对样机进行实际测试来验证论文的研究工作。

1 EMAT 工作原理及数学模型

如图 1(a)所示,EMAT 主要由永磁体、线圈和被测试件 3 部分组成。线圈受到脉冲或时谐电流激励后会在被测试件中产生感应涡流 J ,感应涡流在永磁体或电磁铁提供的偏置磁场 B 下受到洛伦兹力的作用,引发结构表面质点高频振动,进而产生超声波。如图 1(b)所示,偏置磁场主要方向是垂直向下,根据右手螺旋定则,被测试件主要产生横向洛伦兹力,形成超声横波。同时,也会产生一部分水平方向的磁场,产生纵向洛伦兹力,形成超声纵波。接收过程是激励超声的逆过程。

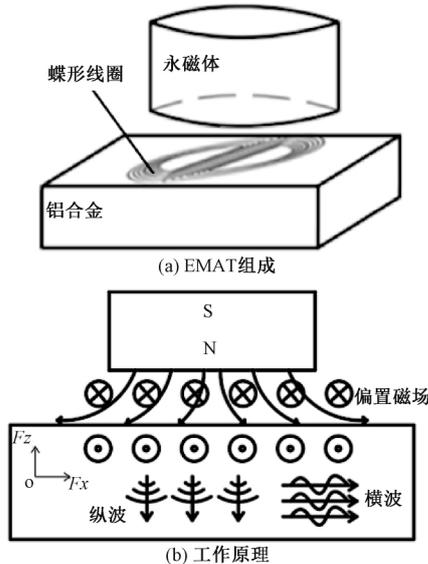


图 1 换能器组成和工作原理

其换能过程涉及到静态磁场、脉冲涡流场和固体力学场等多物理场耦合。永磁体激发的偏置磁场属于静态磁场,没有自有电流产生,电流密度 $J = 0$, 有:

$$\nabla \times H = 0 \quad (1)$$

其中, \times 表示叉乘; H 表示磁场强度,可用标量函数的梯度来进行表示,即:

$$H = -\nabla \varphi_m$$

式中: φ_m 为标量磁位。

永磁体产生在被测试件内的磁感应强度 B 如下:

$$B = \mu H + B_r \quad (2)$$

式中: μ 为被测试件磁导率; B_r 为永磁体剩余磁感应强度。

忽略位移电流的影响,EMAT 中脉冲涡流动态磁场的大小为:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -J_s \quad (3)$$

式中: A 为矢量磁位; σ 代表材料的电导率; J_s 为源电流密度。

电流密度 J_s 可根据 EMAT 的激励电流和电压的大小计算确定,在忽略线圈的集肤效应和邻近效应的情况下,可近似求得线圈的平均电流密度分布:

$$J_c = \frac{i}{S} \quad (4)$$

式中: i 为激励电流; S 为线圈的截面积。

根据被测物体中洛伦兹力的计算公式,其大小与被测试件内的磁感应强度以及被测试件中感应涡流的大小有关,即:

$$f = B \times J_c \quad (5)$$

在电磁超声的研究中,Maclauchlan 等提出电磁超声信号信噪比的大小与偏置磁场的大小成正比,与线圈宽度的平方和单位面积的电阻值成反比。因此,通过探究偏置磁场强度随永磁体放置方位、尺寸变化的规律,以及线圈的类型及几何尺寸的影响,有助于研究提高换能效率。

2 线圈类型比较

不同结构形式的激励线圈,能激发不同模式的超声波。螺旋线圈和蝶形线圈常用来激发体波,曲折线圈常用来激发表面波。表面波主要用于测量试件的表面缺陷,而体波常用于测厚或探伤。本文主要研究用于测厚的体波。螺旋线圈由于线圈的电流方向一直是变化的,所激励的超声波会向各个方向传播,能量分散,反射回波不易被接收^[15],换能效率低。通过比较,本文采用蝶形线圈。如图 2 所示,线圈中间部分电流同向,主要利用这一部分激发超声波,换能效率更高。

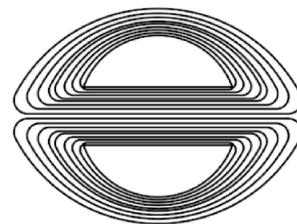


图 2 蝶形线圈

3 EMAT 三维建模及仿真分析

使用仿真软件 COMSOL Multiphysics 对 EMAT 进行建模仿真分析,主要包括永磁体、蝶形线圈、被测试件和空气远场 4 个部分。为了方便建模与计算,将蝶形线圈简化成 12 根单匝直导线并排,与 Y 轴相平行,关于 Y 轴对称且等间距分布。通入方向、大小,频率都相同的交流电。空气远场是为了模拟实物实验中能量的远场耗散问题,能更准确地计算出磁场和涡流等参数的值。永磁体和被测试件铝板尺寸参数如表 1 和 2 所示。模型计算采用自由四面体网

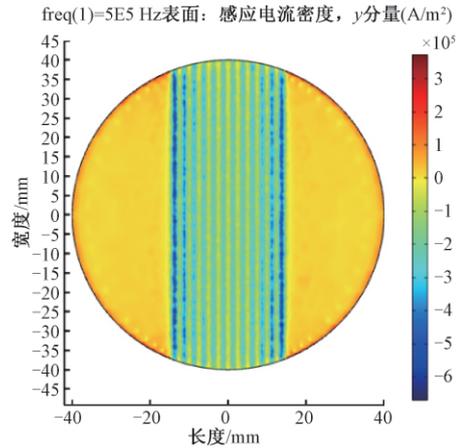
格。EMAT 三维建模如图 3(a)所示。

表 1 永磁铁尺寸参数

圆柱形钕铁硼永磁铁	
直径/mm	30
高度/mm	30
剩余磁通密度/T	1.4
矫顽力/(kA·m ⁻¹)	880
线圈长/mm	100
线圈间距/mm	2
提高距离/mm	0.2

表 2 被测铝板尺寸参数

被测铝板	
直径/mm	80
高度/mm	10
电阻率/(Ω·m ⁻¹)	2.65×10 ⁻⁸
相对磁导率为	1
杨氏模量/Pa	7×10 ¹⁰
泊松比	0.33
激励电流频率/kHz	500
激励电流大小/A	10



(c) 铝板表面感应涡流密度分布云图

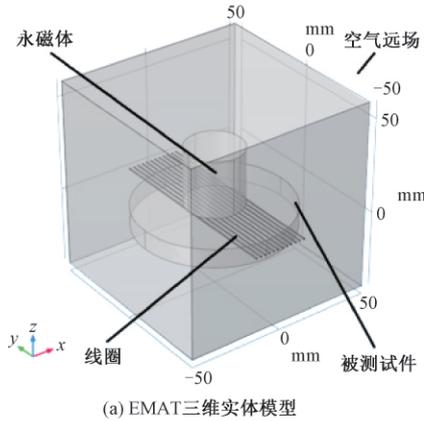
图 3 三维建模与仿真结果

求解后所得铝板表面偏置磁场大小和感应涡流密度分布如图 3(b)和(c)所示,由图可见,永磁体下方部分偏置磁场强度最大,为了激发较强的超声波,线圈应放置于永磁体下方。而铝板中产生的感应涡流主要集中在两侧线圈,靠近中间的线圈涡流密度更小一些。所以,线圈两侧位置激发的洛伦兹力会更大。

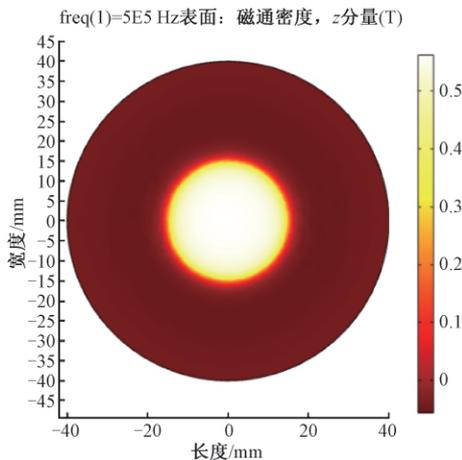
4 EMAT 永磁体的优化

4.1 永磁体放置方式对 EMAT 换能效率影响

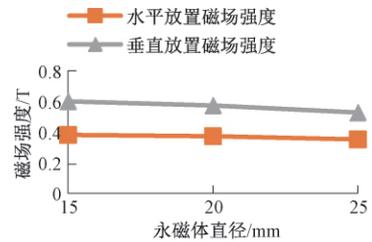
永磁体垂直放置时,主要产生纵向偏置磁场,主要激发横波,但沿垂直方向也会有磁感应分量,会激发部分纵波。同理,水平放置时也会产生横波和纵波。采用蝶形线圈,永磁体直径分别为 15,20 和 25 mm 时,比较水平和垂直放置永磁体时磁场强度和洛伦兹力的大小,结果如图 4 所示。



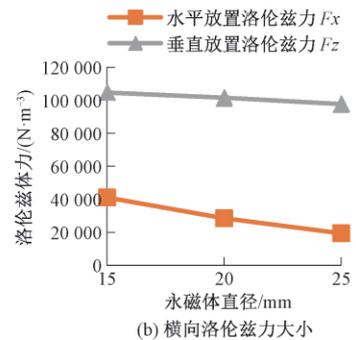
(a) EMAT 三维实体模型



(b) 铝板表面偏置磁场大小分布云图



(a) 不同放置方式永磁体的磁场强度大小



(b) 横向洛伦兹力大小

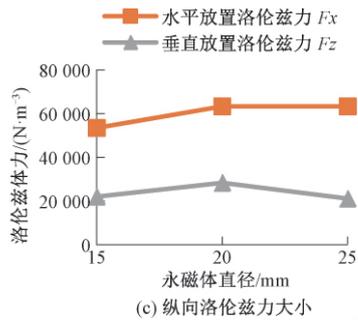


图 4 永磁体不同放置方式时 EMAT 的换能效率比较

从图 4 可以看出,永磁体垂直放置时磁场强度比水平放置时高出 30%。永磁体水平放置主要产生纵向洛伦兹力,磁场强度平均大小是垂直放置时的 2.55 倍;垂直放置主要产生横向洛伦兹力,磁场强度平均大小是水平放置时的 3.73 倍。因此,永磁体垂直放置能激发更大的磁场和横向洛伦兹力,横波换能效率更高。

4.2 永磁体参数对 EMAT 换能效率的影响

垂直偏置磁场下蝶形线圈主要激发横波,改变永磁体的直径和高度,以探究横波效率最高时的永磁铁参数。为了减小误差,从铝板表面中心沿 x 轴方向选取 5 个等距点,求其洛伦兹力的平均值,作为分析数据。

由图 5(a)可以看出,随着永磁体直径增大,横向洛伦兹力和纵向洛伦兹力都呈先增大后减小的趋势。其中,横向洛伦兹力在永磁体直径为 30 mm 时达到最大值。

由图 5(b)可以看出,随着永磁体高度的增加,横向洛伦兹力和纵向洛伦兹力都逐渐增大,在高度为 27 mm 之前,横向力增加较纵向力更快,在高度 27 mm 之后,增长变缓慢,考虑到换能器体积的大小问题,将永磁体高度定为 27 mm 比较合适。

5 EMAT 线圈参数对换能效率的影响

线圈是 EMAT 的重要组成部分,其尺寸参数和激励电流的变化都会对 EMAT 的换能效率造成影响。为了提高蝶形线圈的换能效率,本文采用正交试验的设计方法进行线圈参数优化。正交设计是用一套规格化的正交表格,采用均衡分散性、整齐可比性的设计原则,能高效地分析出线

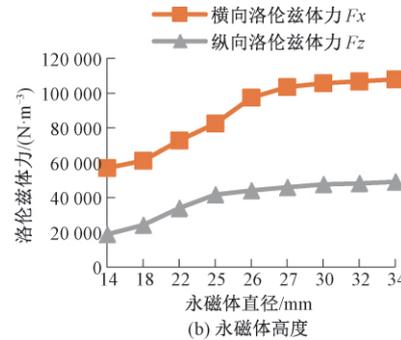
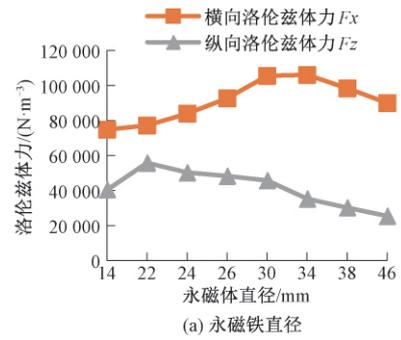


图 5 永磁铁参数对洛伦兹力的影响

圈的优化参数^[16]。

选取线圈直径 d_2 、线圈间距 w_1 、激励电流频率 f_1 以及线圈提高距离 l_1 4 个因素,每个因素选择 3 个水平,试验指标有横向洛伦兹力和纵向洛伦兹力,为了提高横波效率,应尽量增大横向洛伦兹力,减小纵向洛伦兹力,选择正交表 $L_9(3^4)$ 进行正交试验。依据 EMAT 线圈的常用参数确定各试验因素的取值范围,得到因素水平表和试验方案及其试验结果如表 3 和 4 所示。

表 3 EMAT 线圈因素水平表

试验组	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
编号	线圈直径/mm	线圈间距/mm	激励电流频率/MHz	线圈提高距离/mm
水平 1	0.5	1.5	0.5	0.2
水平 2	0.8	2.0	1.0	0.4
水平 3	1.2	2.5	1.5	0.6

表 4 EMAT 线圈的正交试验安排 $L_9(3^4)$ 及其试验结果

试验号	线圈直径/mm	线圈间距/mm	激励频率/MHz	线圈提高距离/mm	横向洛伦兹力/ $(N \cdot m^{-3})$	纵向洛伦兹力/ $(N \cdot m^{-3})$
1	1	1.5	1	0.2	121 033	33 129
2	1	2.0	2	0.4	133 603	64 084
3	1	2.5	3	0.6	69 766	36 340
4	2	1.5	2	0.6	143 527	45 704
5	2	2.0	3	0.2	120 325	65 720
6	2	2.5	1	0.4	66 223	44 617
7	3	1.5	3	0.4	96 027	59 736
8	3	2.0	1	0.6	55 772	29 102
9	3	2.5	2	0.2	62 224	33 397

对同一水平各因素的试验指标横向洛伦兹力和纵向洛伦兹力分别求和,并用 K 表示,下标表示相应的水平, m 表示相应试验结果平均值, $m = K/3$ 。进行极差分析,按单指标的分

析方法,分别确定单个指标的影响大小,选出对两个指标影响都大的因素,确定水平,从而决定最佳组合^[16],计算结果如表 5 所示,因素、水平和指标的关系如图 6 所示。

表 5 EMAT 线圈的极差分析表

试验指标	横向洛伦兹力/($N \cdot m^{-3}$)				纵向洛伦兹力/($N \cdot m^{-3}$)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
K1	324 402	360 588	243 029	303 582	133 552	138 569	106 847	132 246
K2	330 076	309 700	339 354	295 854	156 041	158 906	143 185	168 436
K3	214 023	198 213	286 118	269 064	122 235	114 353	161 796	111 146
m1	108 134	120 196	81 010	101 194	44 517	46 190	35 616	44 082
m2	110 025	103 233	113 118	98 618	52 014	52 969	47 728	56 145
m3	71 341	66 071	95 373	89 688	40 745	38 118	53 932	37 049
极差	38 684	54 125	32 108	11 506	7 496	14 851	18 316	19 097
较优值	A2	B1	C2	D1	A2	B2	C3	D2

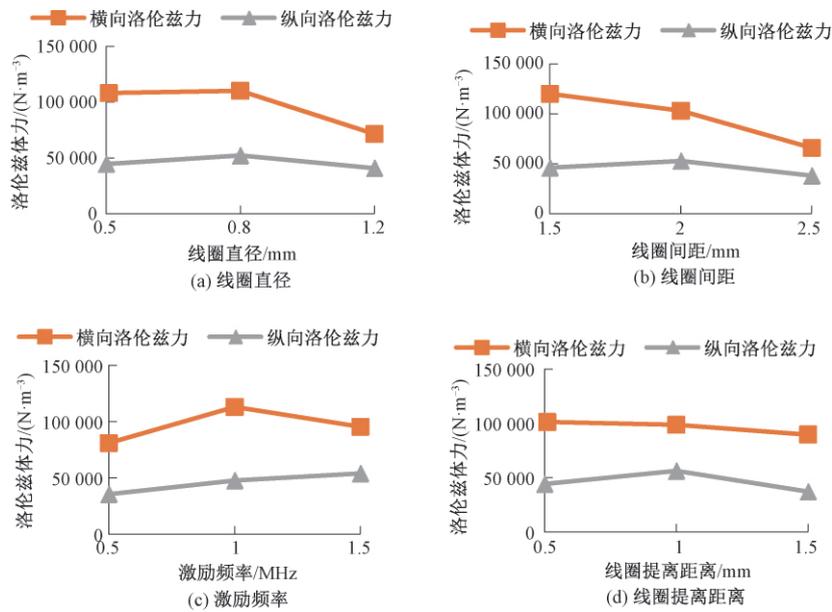


图 6 四因素与双指标的关系

从表 5 和图 6 的分析可以看出,对横向洛伦兹力,各因素影响次序为 BACD,即线圈间距 B 对横向洛伦兹力指标影响最大,其次是线圈直径 A 和激励频率 C,线圈提高距离 D 相对影响最小。对纵向洛伦兹力,影响次序为 DCBA,即线圈提高距离 D 对纵向洛伦兹力指标影响最大,其次是激励频率 C 和线圈间距 B,线圈直径 A 相对影响最小。

对于横波换能器,应使横向洛伦兹力大,纵向洛伦兹力小。对于线圈直径应选择 A1,但考虑实际施加脉冲激励时,电流大,需要直径更大的线圈,所以选择 A2;线圈间距选择 B1;激励频率选择 C2;线圈提高距离选择 D1。因此最佳组合为 A2 B1 C2 D1,即线圈直径 0.8 mm,线圈间距 1.5 mm,激励频率 1 MHz,线圈提高距离为 0.2 mm

时,EMAT 的换能效率最好。

6 试验验证

6.1 试验方案

根据分析计算结果设计加工出电磁超声换能器样机,如图 7 所示是采用 PCB 板制作的线圈,线圈宽 1 mm,铜箔厚度为 0.035 mm。永磁铁采用直径 30 mm,高 30 mm 的圆柱形钕铁硼永磁铁。选取铝合金试块作为被测试件,长 350 mm,宽 55 mm,厚度 10、20、30 mm 各一块。分别对螺旋线圈和蝶形线圈 EMAT 的发射和接收性能进行试验分析。采用 CTS-PA22X-2UT 型超声系统进行测试,利用计算机控制该超声系统产生一定宽度的脉冲信号激励超声探头,并采用一发一收的方式,试验装置如图 8 所示。



图 7 螺旋线圈和蝶形线圈

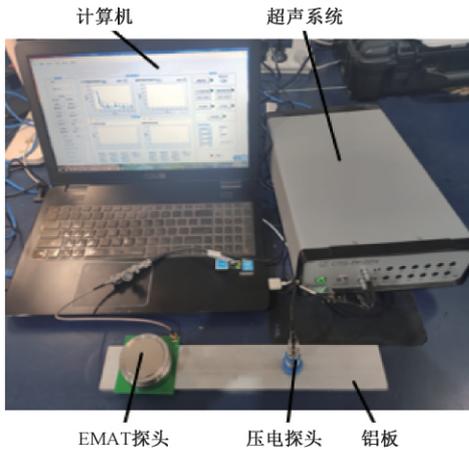


图 8 试验装置

由于 EMAT 的信噪比低,为了提高信号辨识度,在试验时,发射或接收的一端使用压电换能器,探头工作频率为 5 MHz,晶片直径为 14 mm,另一端使用所设计的电磁超声换能器。激励脉冲宽度 100 ns、电压 250 V,测量范围设为 100 mm,回波增益为 80 dB。

6.2 试验结果与分析

1) 将蝶形线圈用于铝板测厚试验分析

当蝶形线圈作为激励线圈进行试验时,检测得到的超声波多次回波信号如图 9 所示。400 个数据点表示 100 mm 的测量范围,平均每两个点间距 0.25 mm,在激励信号发出后,观测图 9 每个峰值点位置,分别是第 95、137、178、220、261、303、346、388 这 8 个点。平均峰值间距为 41.86 个点,约为 10.46 mm,误差为 0.46 mm。同理通过试验测出 20 和 30 mm 铝块的厚度为 20.75 和 31 mm。误差是 3.75% 和 3.33%。

2) 蝶形线圈和螺旋线圈试验对比分析

在激励脉冲宽度和电压大小相同的条件下,分析比较不同厚度铝板下螺旋线圈和蝶形线圈分别作为激励端时压电探头检测得到的超声波信号幅值的大小。

将两种线圈的每次超声回波峰值绘制成曲线图,如图 10 所示,能看出蝶形线圈的超声回波信号幅值比螺旋线圈更大。对 10 mm 铝板,蝶形线圈的回波信号幅值是螺旋线圈的 2 倍,对 20 和 30 mm 铝板则分别是 1.7 和 1.6 倍。蝶形线圈的换能效率明显优于螺旋线圈,与理论仿真分析结论一致。

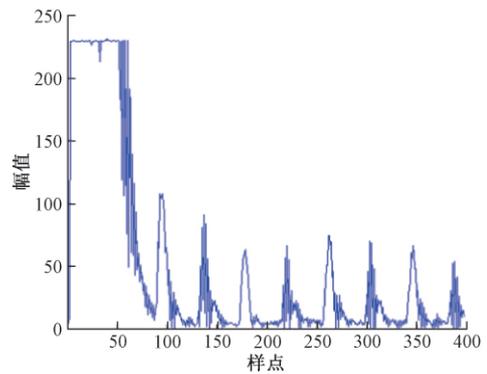
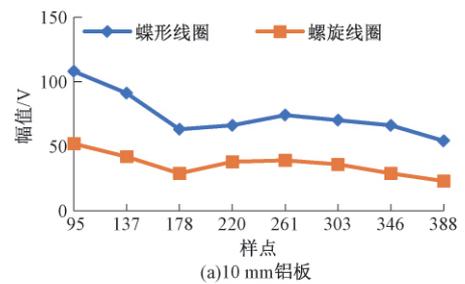
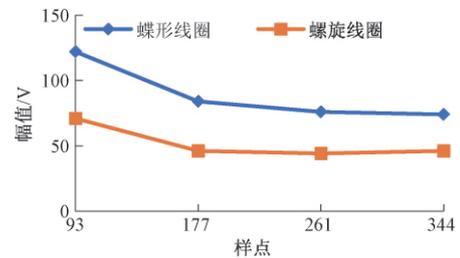


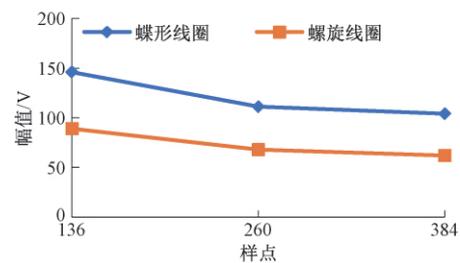
图 9 蝶形线圈在 10 mm 铝板中的超声信号



(a)10 mm 铝板



(b)20 mm 铝板



(c)30 mm 铝板

图 10 两种线圈作为激励端的超声波信号幅值比较

7 结 论

基于电磁超声换能器的基本工作原理,利用 COMSOL Multiphysics 软件建立其三维仿真模型。分析对比了永磁体放置方式和几何参数对 EMAT 换能效率的影响。采用正交试验法分析了蝶形线圈几何尺寸参数对 EMAT 的影响并就获得最大横向洛伦兹力对线圈几何参数进行优化设计,最后通过试验验证了不同线圈的换能效率大小,得到以下结论:

1) 铝板中产生的感应涡流主要集中在两侧线圈, 而靠近中间部分的涡流密度相对要小一点。所以用两侧线圈进行试验会产生更大的洛伦兹力, 试验效果更好。

2) 永磁体垂直放置比水平放置激发的洛伦兹力更大, 换能效率更高。永磁体直径取 30 mm, 高度定为 27 mm 时, 横向洛伦兹力较大, 而纵向洛伦兹力相对较小, 横波换能效果更好。

3) 线圈尺寸参数会影响换能效率。对横向洛伦兹力, 线圈间距影响最大, 提离距离影响最小。对纵向洛伦兹力, 提离距离影响最大, 线圈直径影响最小。从两个指标来看, 线圈直径 0.8 mm, 线圈间距 1.5 mm, 激励频率 1 MHz, 线圈提离距离为 0.4 mm 时, EMAT 的换能效率更好。

4) 采用蝶形线圈的 EMAT 在测厚时效率高、精度高。使用蝶形线圈激励超声信号, 相应的超声回波幅值是螺旋线圈的 1.5~2 倍。EMAT 使用蝶形线圈能有更高的效率。

参考文献

- [1] 杨理践, 诸海博, 邢燕好, 等. 基于电磁超声横波的铝板厚度检测技术[J]. 无损探伤, 2016, 40(4): 10-14.
- [2] 薛震宇, 靳孝峰, 侯文, 等. 物体表面温度的超声结构回波测量方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 78-83.
- [3] 刘素贞, 王淑娟, 张闯, 等. 钢板电磁超声表面波的仿真分析及缺陷定量检测[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 97-105.
- [4] 丁旭, 武新军. 在役螺栓轴力电磁超声测量系统的研制[J]. 无损检测, 2016, 38(6): 48-52.
- [5] WANG S, LI Z, KANG L, et al. Modeling and comparison of three bulk wave EMATs[C]. IECON 2011-37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2012.
- [6] XIE S, TIAN M, XIAO P, et al. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection[J]. NDT & E International, 2017, 86: 153-163.
- [7] 唐东林, 侯军. 基于 Halbach 原理的电磁超声换能器永磁铁设计[J]. 传感技术学报, 2018, 31(10): 1489-1493.
- [8] ISLA J, CEGLA F. Optimization of the bias magnetic field of shear wave EMATs[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2016, 63(8): 1148-1160.
- [9] 唐琴, 石文泽, 卢超, 等. 多层螺旋线圈电磁超声换能器优化设计及其实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(7): 1792-1803.
- [10] 吴德会, 黄超, 杨凡, 等. 一种可抑制电磁冲击盲区的新型电磁超声检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12): 64-70.
- [11] 江念, 王召巴, 陈友兴, 等. 电磁超声检测钢板厚度实验的参数优化[J]. 传感技术学报, 2015(4): 498-502.
- [12] 刘素贞, 王文杰, 张闯, 等. 高能脉冲激励下的电磁超声响应特性[J]. 电工技术学报, 2019: 1-8.
- [13] 钦峰, 谢国利. 电磁超声换能器金属缺陷探测有限元仿真研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 39-43.
- [14] 臧慧. 基于电磁超声横波的金属板厚度检测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [15] 张晓冰, 房琦, 苏日亮, 等. 用于检测厚铝板缺陷的体波 EMAT 优化方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(1): 108-114.
- [16] 庞超明, 黄弘. 试验方案优化设计与数据分析[M]. 南京: 东南大学出版社, 2018: 324.

作者简介

岑鑫, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声无损检测技术。

E-mail: 360734134@qq.com

潘高, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声无损检测技术。

E-mail: pangao1997@163.com

王雪梅(通信作者), 副教授, 博士, 主要研究方向为现代测控技术及其应用。

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

倪文波, 教授, 博士, 主要研究方向为机车车辆主动控制技术、列车制动技术。

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