

◇ 研究报告 ◇

电磁超声横波换能器中线圈的优化设计

阳能军 封礼发[†] 唐旭明 张宪宇 姚春江

(火箭军工程大学 304 教研室 西安 710025)

摘要 为改善电磁超声换能器在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢材料中激发横波的特性, 提出一种基于正交试验的优化方法, 并利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 建立了电磁超声横波换能器的有限元模型, 应用正交试验和极差分析法, 分析了线圈各参数对电磁超声横波的近场长度和半扩散角的影响, 比较了线圈各参数影响程度的大小。结果表明, 激励电流的频率和线圈的尺寸对横波的传播特性有着明显影响, 提高频率会使得横波的近场长度增大及半扩散角减小; 其次, 减小导线的宽度及间距, 以缩小线圈尺寸能有效改善横波的传播特性。

关键词 电磁超声横波换能器, 线圈, 有限元模型

中图法分类号: TB552

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2019)03-0428-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.03.020

Optimum design of coil in electromagnetic acoustic shear wave transducers

YANG Nengjun FENG Lifa TANG Xuming ZHANG Xianyu YAO Chunjiang

(Section 304 of Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract In order to improve the characteristics of transverse wave stimulated by electromagnetic acoustic transducer in stainless steel made by 1Cr18Ni9Ti, an optimization method using orthogonal test was introduced. Finite element mode of transverse wave electromagnetic acoustic transducer (EMAT) was established. The orthogonal test and extreme difference analysis were applied to consider the parameters of the coil, which impact on the near field length and half diffusion angle of electromagnetic acoustic transverse wave. The result shows that the frequency of exciting current and the size of coil have obvious influence on the propagation characteristics of the shear wave. Increasing the frequency will increase the near field length and decrease the half diffusion angle of the shear wave. Reducing the width and spacing of the wire to reduce the size of the coil can effectively improve the propagation characteristics of the shear wave.

Key words Electromagnetic acoustic shear wave transducer, Coil, Finite element mode

2018-09-18 收稿; 2018-12-28 定稿

作者简介: 封礼发 (1995-), 男, 云南保山人, 硕士研究生, 研究方向: 兵器科学与技术。

[†] 通讯作者 E-mail: 834463289@qq.com

0 引言

电磁超声无损检测技术在金属板材的厚度测量中有着广泛应用^[1-3]。目前,用于测厚的超声波主要有纵波和横波两种。当电磁铁产生的磁场平行于工件表面时,工件表面质点的振动方向和波的传播方向一致,此时产生的是纵波;当电磁铁产生的磁场垂直于工件表面时,工件表面质点的振动方向平行于工件表面,垂直于波的传播方向,此时产生的是横波^[4]。在同种材料的传播中,横波的波速约为纵波的一半,所以相同频率下横波波长为纵波的一半,这使得横波的检测精度相对较高;此外,由于在传播过程中横波的衰减速率相对较慢,穿透力更强,因此更适用于测厚。在以往的研究中,针对电磁超声横波换能器的优化问题,已有的结论包括:减少电磁超声换能器(Electromagnetic acoustic transducer, EMAT)提离距离,增大激励电流大小或设计合适的永磁体和线圈的宽度比,以提高激发横波的强度^[5-6]。然而上述优化主要以提升换能器的换能效率为目的,未考虑到横波具体的传播特性。在运用超声波进行测厚时,为提高测量精度,要求超声波的半扩散角及近场长度尽可能小^[7],而超声波的传播特性主要受线圈的结构参数影响。因此,本文以改善横波在1Cr18Ni9Ti不锈钢材料中的传播特性为优化目标,对横波EMAT中的线圈进行优化设计。

1 横波 EMAT 中声场的仿真分析

1.1 横波 EMAT 三维模型的建立

采用多物理场仿真软件COMSOL Multiphysics对横波EMAT中声场进行仿真分析,横波EMAT的模型主要由永磁体、线圈、不锈钢板和空气场组成,如图1所示(略去了空气场)。

模型中的永磁体为方形钕铁硼磁铁,磁化方向为Z轴负方向。剩余磁场强度为1.21 T,矫顽力为915 kA/m,最大磁能积为279 kJ/m³,尺寸为20 mm × 20 mm × 15 mm ($w_1 \times l_1 \times h_1$),提离距离 t_1 (永磁体下表面距不锈钢板上表面的距离)为2 mm。被测试件材料为1Cr18Ni9Ti不锈钢板,是我国液体火箭和导弹推进剂卧式储罐的常用材料,具有各向同性,电导率为 4.032×10^6 S/m,相对磁导率为1,密度为7850 kg/m³,杨氏模量为 2×10^{11} Pa,泊松比为0.33。为充分分析电磁超声波在钢板中的

传播特性,对钢板厚度设置了较大值,钢板尺寸为50 mm × 50 mm × 40 mm ($w_2 \times l_2 \times h_2$)。

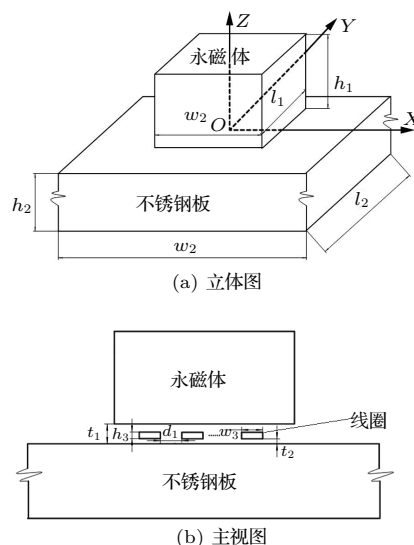


图1 EMAT模型示意图

Fig. 1 Schematic of the EMAT model

线圈采用了蝶形线圈,为简化计算,只对线圈的有效检测区域进行建模,可简化成20根直导线,导线平行Y轴,关于Y轴对称且等间距分布。目前,EMAT线圈主要采用印刷电路板(Printing circuit board, PCB)工艺制成,参考《PCB印刷电路设计标准手册》和GB 4721—84对印刷电路用铜箔层尺寸参数的规定,将导线尺寸设定为0.25 mm × 15 mm × 0.035 mm ($w_3 \times l_3 \times h_3$),相邻导线间距为0.2 mm,线圈提离距离为0.5 mm。线圈中的高频电流为2 MHz的正弦交流电,电流幅值为20 A,电流激励时间为一个周期。

由于集肤效应的存在,不锈钢板中的感应电流主要存在于集肤深度内,这也是电磁耦合的集中区域。因此,为了兼顾模型的准确性和计算量的要求,在线圈正下方不锈钢板三倍集肤深度内进行网格细化,其他区域采用自由四面体网格进行划分。图2为细化区域网格划分截面图。

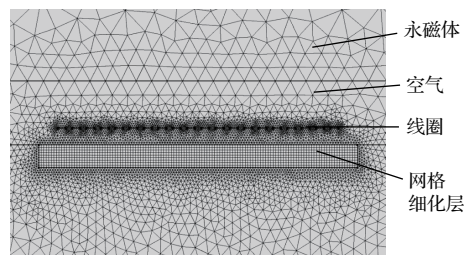


图2 细化区域网格划分截面

Fig. 2 The section of mesh refinement region

1.2 仿真结果分析

通过仿真计算可得到不锈钢板中各质点的运动情况。由电磁超声横波的激发原理可知,不锈钢板中质点 X 方向的振动是产生沿钢板厚度方向传播的横波的直接原因。因此,通过分析不锈钢中质点 X 方向的运动即可反映出电磁超声横波的传播规律。

图3为不锈钢板 XOZ 截面内质点振幅的分布图。从图3可看出,横波声场的声束轴线与 Z 轴近似重合,整个声场关于 Z 轴对称分布,且 Z 轴上的声场强度最强,向 Z 轴两侧远离,声场强度逐渐减弱。

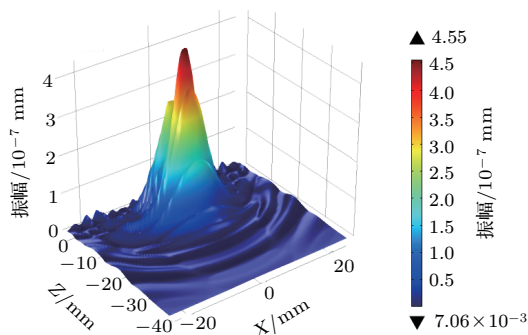


图3 不锈钢板 XOZ 截面内质点振幅的分布

Fig. 3 Distribution of particle's amplitude in XOZ section of stainless steel

图4显示了横波传播过程中不锈钢板质点的振幅沿声束轴线的变化规律。可以看出,在距离声源较近的区域,横波振幅的波动较大,无明显规律性的变化趋势。当距离声源足够远时,横波的振幅单调减小。横波的最后一个极大值出现在距离波源11.2 mm处。在声学中将此点称为近场点,近场点与波源的距离称为近场长度。在近场区内,质点振动较为杂乱,利用横波进行测厚时,一般要求试件的厚度大于横波的近场长度。

超声波的指向性是指超声波定向辐射和传播的性质,通常用半扩散角来表示。在本模型中,在不锈钢板 XOZ 截面内作距离表面30 mm的截线,以截线上各点的振幅数据为基础,可作出截线上各点的振幅与扩散角度的关系图,如图5所示。可看出,扩散角为 0° 处——截线与 Z 轴的交点处振幅最大,比最大振幅低6 dB处的扩散角即为半扩散角,本模型中横波的半扩散角为 11.4° 。

通过上述对电磁超声横波的分析可知,其近场长度限制了检测对象的尺寸;半扩散角反映了超声波的指向性,影响着超声回波的接收。因此,本文将

以电磁超声横波的近场长度和半扩散角为优化目标,要求近场长度尽可能短、半扩散角尽可能小,对EMAT中的线圈进行优化设计。

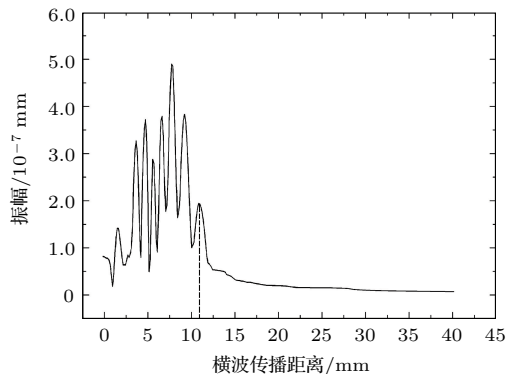


图4 横波振幅沿声束轴线的变化规律

Fig. 4 The amplitude of shear wave varies along the axis of sound beam

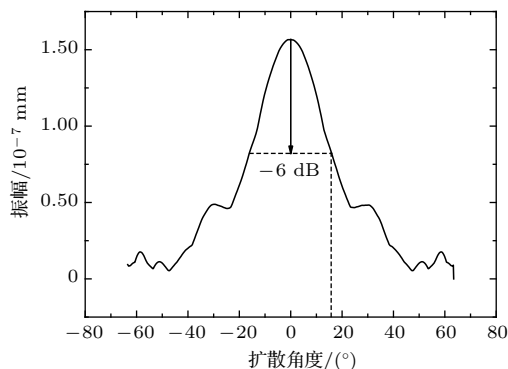


图5 不锈钢板 XOZ 截面内 $Z = -30$ 截线上各点振幅与扩散角度的关系

Fig. 5 The relation between amplitude and diffusion angle at $Z = -30$ in XOZ section of stainless steel

2 EMAT中线圈的优化设计

2.1 优化试验设计

因EMAT中线圈的参数较多,其参数的取值范围较广。因此,为提高优化设计效率,在已建立模型的基础上,采用正交试验的方法进行EMAT线圈的优化设计。同时,考虑到计算量的要求,本文选取线圈制作的PCB工艺中涉及到的导线宽度 w_3 、导线厚度 h_3 、导线间距 d_1 以及激励电流的频率 f_0 、周期数 n 五个参数作为优化对象。表1为根据常用标准确定的线圈不同参数水平值,其余参数均取模型的初始值。

根据正交试验表 $L_{18}(3^7)$ 可设计出五因素三水平的正交试验, 共需进行18组试验, 各组试验参数如表2所示。

表1 线圈参数水平
Table 1 Parameters level of coil

	h_3/mm	w_3/mm	d_1/mm	f_0/MHz	$n/\text{个}$
1	0.035	0.25	0.2	1	1
2	0.07	0.5	0.4	2	2
3	0.105	0.75	0.6	3	3

表2 线圈参数正交试验
Table 2 Orthogonal test of coil parameters

	h_3/mm	w_3/mm	d_1/mm	f_0/MHz	$n/\text{个}$
1	0.035	0.25	0.2	1	1
2	0.035	0.5	0.4	2	2
3	0.035	0.75	0.6	3	3
4	0.07	0.25	0.2	2	2
5	0.07	0.5	0.4	3	3
6	0.07	0.75	0.6	1	1
7	0.105	0.25	0.4	1	3
8	0.105	0.5	0.6	2	1
9	0.105	0.75	0.2	3	2
10	0.035	0.25	0.6	3	2
11	0.035	0.5	0.2	1	3
12	0.035	0.75	0.4	2	1
13	0.07	0.25	0.4	3	1
14	0.07	0.5	0.6	1	2
15	0.07	0.75	0.2	2	3
16	0.105	0.25	0.6	2	3
17	0.105	0.5	0.2	3	1
18	0.105	0.75	0.4	1	2

2.2 优化结果分析

将表2中线圈参数的18种组合分别代入1.1节建立的EMAT模型之中, 计算得到18种情况下模型中不锈钢板内质点的位移数据, 再将质点的位移数据按照1.2节中所述的方法进行处理, 计算出18个不同EMAT模型中横波的近场长度及半扩散角, 结果如表3所示。

由正交试验的方法可知, 通过计算每种因素在相同水平下近场长度和半扩散角的算术平均值

k_i (其中 $i = 1, 2, 3$ 分别表示各因素取三种不同的水平值), 可得到各因素水平对电磁超声横波相应特性指标的影响。而后可计算出各指标的极差 R , 根据极差的大小可判断出各因素对电磁超声横波相应特性指标影响的大小。表4为正交试验的近场长度结果分析表。

表3 正交试验结果
Table 3 Orthogonal test result

试验号	近场长度/mm	半扩散角/(°)
1	8.2	19.1
2	11.2	19.4
3	48.6	17.0
4	5.6	10.2
5	39.0	10.1
6	24.5	35.5
7	9.3	22.8
8	39.6	22.9
9	17.9	11.0
10	15.6	8.6
11	10.2	24.6
12	41.9	24.4
13	35.0	6.1
14	6.8	29.0
15	27.8	20.6
16	24.3	17.5
17	38.3	7.3
18	7.2	30.9

表4 正交试验的近场长度结果
Table 4 Orthogonal test results of near field length

	h_3/mm	w_3/mm	d_1/mm	f_0/MHz	$n/\text{个}$
k_1	22.6	16.3	18.0	11.0	31.3
k_2	23.1	24.2	23.9	25.1	10.7
k_3	22.8	28.0	26.6	32.4	26.5
R	0.50	11.7	8.6	21.4	20.6
影响程度	$f_0 > n > w_3 > d_1 > h_3$				

为了更直观地表示出各因素对横波近场长度的影响, 根据表4中的数据, 分别以每种因素的水平为横坐标, 以对应的近场长度平均值为纵坐标, 绘制出各因素对横波近场长度影响的趋势图, 如图6所示。

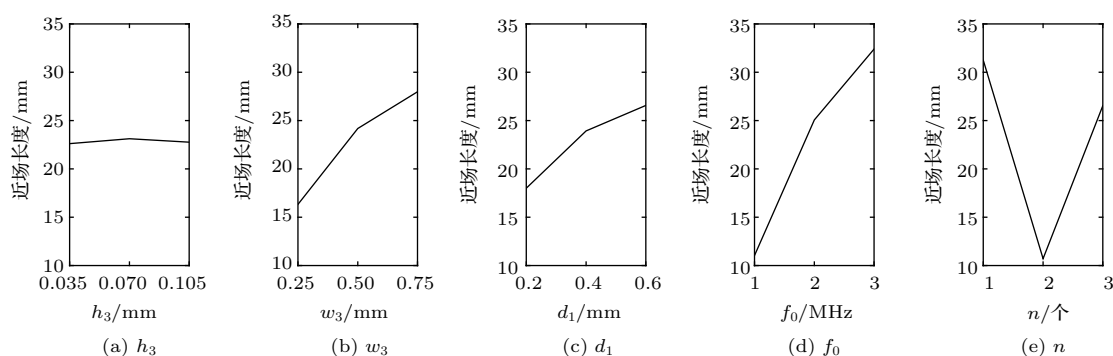


图6 各因素对横波近场长度的影响

Fig. 6 The influence of various factors on the length of shear wave near field

表4及图6表明,在所取参数范围内,导线厚度对近场长度影响较小。激励电流频率、导线宽度及导线间距与近场长度具有明显的正相关关系,提高激励电流频率、增加导线宽度或增加导线间距均会使得近场长度增大,其中激励电流频率对近场长度的影响最显著,导线宽度次之,导线间距的影响相对较小。激励电流周期数对近场长度具有较大的影响,但并没有明显固定的影响趋势,在激励电流周期数为2时,近场长度最短。

同理可得到正交试验的半扩散角结果分析表,如表5所示。

根据表5中的数据可绘制出各因素对横波半扩散角影响的趋势图,如图7所示。

表5及图7表明,在所选参数范围内,导线的厚度及激励电流的周期数对半扩散角的影响较小。导线的宽度和导线的间距对半扩散角有明显影响,增大导线宽度或增大导线间距均可使得半扩散角增大,导线宽度的影响略大于导线间距的影响。此外,激励电流的频率对横波的半扩散角具有显著影响,

提高激励电流频率可使得半扩散角明显减小。

根据1.2节中横波近场长度尽可能短、半扩散角尽可能小的原则,在正交试验结果中试验号为4的近场长度为5.6 mm,半扩散角为10.2°最能符合要求,因此本文模型中线圈的最优参数为 $h_3 = 0.07$ mm, $w_3 = 0.25$ mm, $d_1 = 0.2$ mm, $f_0 = 2$ MHz, $n = 2$ 。

表5 正交试验的半扩散角结果

Table 5 Results of semi-diffusion Angle in orthogonal test

	h_3/mm	w_3/mm	d_1/mm	f_0/MHz	$n/\text{个}$
k_1	18.9	14.1	15.5	26.9	19.2
k_2	18.6	18.9	18.9	19.2	18.2
k_3	18.7	23.2	21.8	10.0	18.8
R	0.3	9.1	6.3	16.9	1.0
影响程度	$f_0 > w_3 > d_1 > n > h_3$				

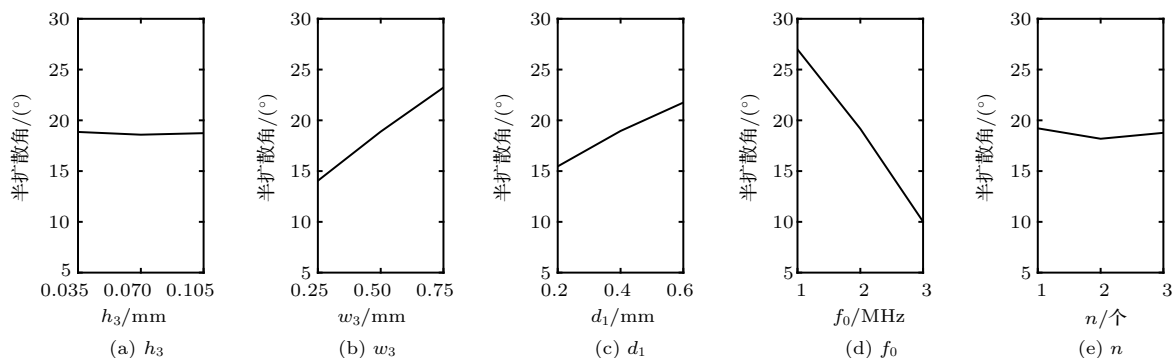


图7 各因素对半扩散角的影响

Fig. 7 The influence of various factors on the semi-diffusion angle

3 结论

本文通过有限元仿真方法,针对电磁超声换能器进行了模型的建立与分析,并以改善电磁超声横波的传播特性为目标,对EMAT中的线圈进行了优化分析。得到如下结论:

(1)激励电流的频率对电磁超声横波的近场长度和半扩散角有着明显影响,提高激励电流频率会使得近场长度增加和半扩散角减小,在实际检测过程中,需要考虑两方面的影响折中选取合适的频率。

(2)线圈导线的厚度对于电磁超声横波的传播特性无明显影响。而导线的宽度和间距对横波的传播特性有较大影响,增大导线宽度和间距,会使得横波的近场长度和半扩散角增大,不利于超声检测。因此,减小EMAT中线圈导线的宽度及间距,以缩小线圈的尺寸是改善电磁超声横波传播特性的一种有效方法。

参 考 文 献

- [1] Kikuchi T, Fujimaki K, Language O. Non-destructive evaluation of air-cooled heat exchanger tube corrosion by axial shear resonance using EMAT[J]. Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 2010, 59(7): 334-339.
- [2] 段伟亮, 康磊, 张晓辉, 等. 基于FPGA的电磁超声测厚仪[J]. 仪表技术与传感器, 2010(4): 14-16, 19.
Duan Weiliang, Kang Lei, Zhang Xiaohui, et al. Development of thickness gauge using EMAT based on FPGA[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(4): 14-16, 19.
- [3] 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.
- [4] 李倩, 林书玉, 王春玲. 电磁超声换能器(EMAT)的应用技术研究[J]. 电子元件应用, 2008(10): 71-73.
- [5] 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, 28(4): 498-502.
Jiang Nian, Wang Zhaoba, Chen Youxing, et al. The experiment parameters of the steel-sheet thickness measurement by electromagnetic ultrasonic[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(4): 498-502.
- [6] 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.
Zhang Xiaobing, Fang Qi, Su Riliang, et al. Optimal method of bulk wave EMATs used in thick aluminum plate with single flat-bottom hole[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(1): 108-114.
- [7] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 第2版. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008.