DOI: 10.3901/JME.2020.02.009

跑道形线圈 EMAT 有限元建模与声场特性研究*

周进节¹ 贾浩东^{1,2} 郑 阳² 张宗健²

(1. 中北大学机械工程学院 太原 030051;

2. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘要: 跑道形线圈是 EMAT 的一种重要线圈类型, 由其构成的 EMAT 在超声测厚及探伤中具有重要应用, 同时它也是 EMAT 阵列换能器的主要阵元类型。辐射声场特性是电磁超声换能器重要特性之一, 研究跑道形线圈形状尺寸对其构成的 EMAT 辐射声场的影响规律, 是对换能器进行设计和开发检测工艺的基础。利用有限元仿真软件建立跑道形线圈 EMAT 的电-磁-声多场耦合模型, 对其辐射声场进行了仿真建模计算, 分析了跑道形线圈 EMAT 辐射声场特性及线圈宽度对其辐射声场的影响规律, 并搭建了 EMAT 辐射声场试验测量系统, 测量了跑道形线圈 EMAT 的辐射声场。研究结果表明跑道形线圈 EMAT 辐射声场整体呈现蝶形分布, 且随着线圈的整体宽度变大, 由其构成的 EMAT 的辐射声场幅度值随之增高, 而声场宽度随之变窄。

关键词: 电磁超声; 跑道形线圈; 有限元建模; 辐射声场; 声场测量

中图分类号: O426

Research on Racetrack Coil EMAT FE Model and Sound Field Characteristics

ZHOU Jinjie¹ JIA Haodong^{1,2} ZHENG Yang² ZHANG Zongjian²

(1. School of Mechanical, North University of China, Taiyuan 030051;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029)

Abstract: The racetrack coil is an important coil type of EMAT. This kind of EMAT has has a wide range of applications in ultrasonic thickness measurement and flaw detection. And it is also the basic element of EMAT linear array transducer. The radiated sound field is the most significant characteristic of the ultrasonic transducer. To find out the influence of the shape and the size of the racetrack coil on the EMAT radiated sound field is the basis for the transducer design and detection process development. The electro-magnetic-acoustic multi-field coupling model of the racetrack coil EMAT is established, and calculating the radiated sound field by finite element model. Analyzing the sound field characteristics of the racetrack coil EMAT and the influence of the EMAT radiated sound field by coil width. Then setting up the EMAT radiation sound field experimental measurement system, and measuring the radiated sound field of the racetrack coil EMAT. This research reveals that the EMAT radiated sound field of the racetrack coil exhibits a butterfly distribution in the far field, and as the coil width increases, the amplitude of the radiated sound field increases and the width becomes narrower.

Key words: EMAT; racetrack coil; finite element model; radiated sound field; sound field measurement

0 前言

电磁超声换能器 (Electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 因其具有非接触、无需打磨、无需耦合剂等特点, 在极端高低温检测、自动化检测和在线监测中有巨大的应用潜力^[1-2]。针对不同的检

测需求, 电磁超声换能器可通过改变激励线圈结构或外置偏置磁场形式在被检导体材料中激发出不同类型的超声波^[3-4]。对于跑道形线圈 EMAT 而言, 设置垂直于线圈平面的偏置磁场, 可在被检材料中产生超声横波, 基于这种形式设计的 EMAT 在测厚、A 型脉冲检测及电磁超声阵列换能器成像检测等方面均有重要应用^[5-7]。然而, 在实际检测中为了获得良好的检测效果, 往往需要根据检测需求设计 EMAT, 其中换能器辐射声场是设计换能器的核心, 并且也是检测工艺开发的主要依据。因此, 研究跑

* 国家重点研发计划(2016YFF0203003)、国家自然科学基金(51605494)和国家市场监督管理总局科技计划(2017QK185)资助项目。20190506 收到初稿, 20191030 收到修改稿

道形线圈 EMAT 的辐射声场特性,对于 EMAT 的设计以及现场检测工艺的制定具有十分重要的意义。

目前,针对跑道形线圈 EMAT 的辐射声场特性,国内外已有学者开展了相关的研究: DHAYALAN 等^[6]建立了跑道形线圈混合有限元模型,用于预测各向同性均质材料中的体(纵向和剪切)波的超声 A 扫描信号,并证明了跑道形线圈 EMAT 可产生更有效的剪切波和较弱的纵波; ISLA 等^[8]利用 8 通道电磁超声阵列辐射声场对表面裂纹进行检测,建立单元阵列仿真模型及利用编码激励的方式对阵列辐射声场进行优化,通过优化后,该电磁超声阵列在试验中可检测到宽度 0.2 mm 深度 0.8 mm 的缺陷。杨理践等^[9]建立跑道形线圈 EMAT 仿真模型,激励纵波声场进行测厚,并探究了永磁体宽度、电流频率等对纵波声场影响。

此外,也有学者针对其他类型线圈 EMAT 的辐射声场进行了研究: XIE 等^[10]将有限元和时域有限差分法混合使用以模拟超声波的产生和传播,并对波束特征进行分析,得出曲折形线圈 EMAT 辐射声场最大幅值沿转向角发生; KANG 等^[11]建立曲折形线圈 EMAT 激励出表面波的有限元模型,通过减小永磁体宽度以及利用不均匀间距分布的线圈,使得表面波辐射声场的幅值相对于传统设计提高了 90%; 吴迪等^[12-13]和陈秋颖^[14]针对螺旋形线圈辐射声场进行了解析建模,将体力转换为表面力源近似求解出该声场的理论解,并通过试验证明了其模型的有效性。

综上所述,目前对于跑道形线圈 EMAT 主要研究了磁铁尺寸、电流频率等对其信号幅值或换能效率的影响,尚未见对其辐射声场特性研究的相关报道,而现有与 EMAT 辐射声场特性直接相关的研究主要集中于螺旋形和曲折形线圈 EMAT。为此,本文针对跑道形线圈 EMAT,建立其二维电-磁-声多场耦合有限元模型,研究跑道形线圈 EMAT 辐射声场分布特性,并通过改变线圈宽度,来探究线圈宽度对其辐射声场特性的影响。另外,组建 EMAT 辐射声场测量试验系统,对跑道形线圈 EMAT 的辐射声场分布进行试验测量。进一步将仿真结果与试验测量结果进行对比,分析线圈宽度对 EMAT 辐射声场分布特性的影响规律。

1 仿真模型

1.1 跑道形线圈 EMAT 作用原理

EMAT 换能过程主要涉及磁铁、线圈和被测试件三部分,根据被测试件是否为铁磁性材料可分为

洛伦兹力、磁化力与磁致伸缩力三种作用机制^[15]。当被测试件为非铁磁性材料时,试件的作用机制为洛伦兹力机制;当被测试件为铁磁性材料时,作用机制包括上述三种。本文主要讨论洛伦兹力机制,选取非铁磁性材料铝为被测对象。

EMAT 常见线圈类型有螺旋形、回折形、跑道形、曲折形等,不同形状的线圈可以激励出不同类型的超声波,本文研究对象是跑道形线圈,具体形状如图 1 所示。

图1 跑道形线圈示意图

跑道形线圈 EMAT 具体作用原理如图 2 所示。在二维情况下,永磁体产生的静态磁感应强度为 B_s ,方向沿 z 轴竖直向下。当线圈中通入电流密度为 J_c 的激励信号时,会在下方的铝块中产生动态磁感应强度 B_d ,并在下方铝块表面的集肤深度层中感生出同频反向的涡流 J_e 。总磁感应强度 B 的大小为静态磁感应强度 B_s 与动态磁感应强度 B_d 之和。铝块表面感生出的涡流 J_e ,在总磁感应强度 B 的作用下会受到洛伦兹力,形成的洛伦兹力 F_L 会使铝块表面集肤层内的质子高速振动,形成超声波在铝块内部进行传播。笛卡儿坐标系如图 2 中所示,原点 o 位于铝块表面。

图2 EMAT 作用原理图

由麦克斯韦定律以及波动力学方程可得整个有限元计算的控制方程为

$$\nabla \times H_d = J_c \quad (1)$$

$$B_d = \mu H_d \quad (2)$$

$$J_e = \gamma E_E \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_s + \mathbf{B}_d \quad (4)$$

$$\mathbf{f}_d = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B}_d \quad (5)$$

$$\mathbf{f}_s = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B}_s \quad (6)$$

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_d \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_L = \iiint_V \mathbf{f}_L dV \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{F}_L \quad (9)$$

式中, $\mathbf{H}_d$ 是动态磁场强度; μ 和 γ 分别是铝的相对磁导率和电导率; $\mathbf{E}_e$ 是涡流的电场强度; $\mathbf{f}_d$ 和 $\mathbf{f}_s$ 分别是由于动态磁场和静磁场引起的洛伦兹力密度; $\mathbf{f}_L$ 是 $\mathbf{f}_s$ 和 $\mathbf{f}_d$ 的复合洛伦兹力密度; $\mathbf{F}_L$ 是给定体积 V 上的洛伦兹力。 ρ 为铝块的密度, σ 为铝块所受到的应力。

1.2 跑道形线圈 EMAT 辐射声场特性

由上述分析可知, 试块中涡流覆盖区域内的质子会受到在上述体力 $\mathbf{F}_L$ 作用形成超声波, 由于涡流集肤深度较浅, 且远小于声波波长, 因此试块受到的体积力可以转化为等效表面力^[16-17]。在进行上述转化后, 可近似认为跑道型 EMAT 辐射超声波的波源, 与矩形波源相似^[18]。根据矩形波源声场辐射理论可得出如图 3 中 Q 点处的声压

$$P(r, \theta, \varphi) = \frac{p_0 A_s}{\lambda r} \cdot \frac{\sin(Ka \sin \theta \cos \varphi)}{Ka \sin \theta \cos \varphi} \cdot \frac{\sin(Kb \sin \varphi)}{Kb \sin \varphi} \quad (10)$$

式中, p_0 为波源的初始声压, A_s 为波源的面积, K 为波数, θ 、 φ 为某点的方位角, a 、 b 为矩形波源的半长和半宽, r 为某点距波源中心点的距离。

图 3 矩形波源声场辐射图

当 φ, θ 为 0 时, 得轴线内某点的声压为

$$P(r, 0, 0) = \frac{P_0 A_s}{\lambda r} \quad (11)$$

当 φ 或 θ 为 0 时, 矩形波源在二维平面内的辐射声场, 对应于跑道形线圈 EMAT 在二维情况中的辐射声场。以 $\varphi=0$ 为例, 可得出 XOY 平面内某点的声压为

$$P(r, 0, \varphi) = \frac{P_0 A_s}{\lambda r} \cdot \frac{\sin(Kb \sin \varphi)}{Kb \sin \varphi} \quad (12)$$

这时在 XOY 平面内的指向性 D_r 为

$$D_r = \frac{P(r, 0, \varphi)}{P(r, 0, 0)} = \frac{\sin(Kb \sin \varphi)}{Kb \sin \varphi} = \frac{\sin y}{y} \quad (13)$$

通过 D_r 可以进一步求解波源的声场扩散信息。

1.3 电磁超声换能器仿真模型

为了研究跑道形线圈 EMAT 辐射声场特性与线圈宽度对其辐射声场特性的影响, 利用有限元软件 COMSOL, 分别建立匝数 N 为 4~12, 对应线圈宽度 $coil_w$ 为 2.9~8.2 mm 的 EMAT 辐射声场二维仿真模型, 线圈匝数与线圈宽度的对应关系如表 1 所示, 图 4 为仿真模型示意图, 仿真中的模型参数及材料属性如表 2 所示。

表 1 线圈匝数与线圈宽度对应表

线圈匝数	4	5	6	7	8	9	10	11	12
线圈宽度/mm	2.94	3.60	4.26	4.92	5.58	6.24	6.90	7.56	8.22

图 4 仿真模型示意图

表 2 模型参数

参数	数值
铝块尺寸 $\frac{\text{宽}}{\text{mm}} \times \frac{\text{高}}{\text{mm}}$	92×42
线圈直径/mm	0.2
永磁体尺寸 $\frac{\text{宽}}{\text{mm}} \times \frac{\text{高}}{\text{mm}}$	35×30
两线圈中心间距 d/mm	0.33
永磁体磁感应强度 B/T	1.4
频率 f/MHz	2
弹性模量 E/GPa	70
泊松比 μ	0.33

EMAT 多场耦合模型由描述永磁体的静磁场模型, 激励电流引起的动态涡流的电磁学模型, 以及模拟试块中横波生成和传播的弹性动力学模型组成。如图 4 所示, 静磁学模型由磁铁、空气、试块组成, 求解空气域、试块域中的静态偏置磁场分布;

电磁学模型由空气域、永磁体、线圈和试块组成,求解试块表面感生的涡流场,以及由静态和动态偏置磁场引起的试块表面质点上的洛伦兹力;弹性动力学模型只包含几何模型中的试块,利用电磁学模型计算得到洛伦兹力,并将其加载到弹性动力学模型中作为超声波的源项,然后求解由洛伦兹力在试块中产生的弹性应力波及其传播。

换能器模型的轴线与 z 轴重合,整个模型关于换能器轴线左右对称,定义磁铁材料为钕铁硼,剩磁 B_s 为 1.4 T,方向竖直向下。跑道形线圈形状长且窄,辐射声场主要为直线部分所形成,沿导体长度方向(即 Y 轴方向)上的辐射声场可忽略,故可将跑道形线圈 EMAT 简化为长直导线横截面上的二维模型进行分析^[8,19-20],将线圈近似等效为一根根长直导线,采用双层结构,上下层距离 d_g 为 0.3 mm。考虑实际线圈中的电流流向,设置轴线两侧导线中的电流大小相等方向相反。线圈距试块的提离距离 d_l 为 0.2 mm,轴线左右相邻线圈间距 md 为 0.76 mm。试块材料为铝,长度 92 mm、厚度 42 mm,用于模拟超声波的形成与传播。向线圈通入由汉宁窗调制的正弦函数 $i(t)$ 作为激励信号

$$i(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi_0) \times (1 - \cos(2\pi ft / M)) \quad (14)$$

式中,电流幅值 A 为 20 A,频率 f 为 2 MHz,初相位 φ_0 为 0,周期数 M 为 3。

为减小模型的计算量且同时保证运算精度,在建模时,将试块除上表面外其余三个表面设置为低反射边界,以阻止声波在边界上的反射。在试块内部以波长的 1/10 进行网格划分,通过求解集肤深度 δ ^[21],还应在铝块上表面以 δ 的 1/3 进行网格划分,以精确解析涡流密度。

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \xi}} \quad (15)$$

式中, f 是激励频率, μ 是铝块磁导率, ξ 是铝块的电导率。

1.4 声场信号采集

为了分析换能器辐射声场的分布,且便于进行试验验证,以垂直于传感器轴线的平面或直线截取试块中的辐射声场,并提取其上的超声信号来表征声场分布。现需对试样进行不同厚度的划分,如图 4 所示,以试样上表面为基准,沿换能器轴线方向向下 H ($H=5,10,\dots,40$ mm)进行厚度划分,可将试样划分出 8 个不同厚度的平面。在划分出的平面上,以传感器轴线为对称中心设置信号采集范围 $K=90$ mm,并在该范围内以一定间隔 $e=1$ mm 设置采样点,共 91 个采样点。因为本文建立的跑道形线圈 EMAT 主要激励横波,所以提取各采样点横波幅值

作为该点声场的幅度值,按上述方法,分别对 8 个厚度平面内的采样点进行信号采集。

2 试验研究

2.1 试验系统搭建

在有限元仿真的基础上,建立 EMAT 辐射声场测量系统,通过试验测量跑道型 EMAT 的辐射声场,并进一步研究线圈宽度对辐射声场的影响。试验系统原理如图 5 所示。

图 5 换能器辐射声场测量系统原理图

如图 5 所示,换能器声场测量采用“一激一收”超声检测原理,测量系统主要由激励和接收两部分组成,其中激励部分主要包括信号发生器、功率放大器、发射阻抗匹配网络和激励换能器,接收部分主要包括接收换能器、接收阻抗匹配网络、信号放大器和信号采集器。

测量换能器辐射声场时,计算机控制信号发生器发射激励信号,经功率放大器放大后,传送到激励换能器,在试块中激励出超声波。接收换能器作为信号接收器,接收试块表面的超声信号,通过信号采集器完成信号的 256 次平均采集,最终反馈回计算机。此外,为研究线圈宽度对跑道型 EMAT 辐射声场的影响规律,在测量不同宽度线圈 EMAT 的辐射声场时,保持激励信号幅值能量和激励换能器距被检工件表面的提离距离不变。

试验系统实物图如图 6 所示。试验系统分为激励与接收两部分,激励系统由计算机、信号发生器(Agilent-33500B)、功率放大器(Amplifier Research 75A250A)、阻抗匹配网络、激励换能器(固定在光学平台上)、40 mm 厚铝块(表面尺寸 200 mm×200 mm)组成。接收系统由接收换能器、阻抗匹配网络、

自制微弱信号放大器、信号采集器(HandyscopeHS5)及三坐标滑移试验平台组成。并利用示波器(Aglient DSO-X4034A)监测原始激励信号与放大激励信号。其中,为了更好地探究线圈宽度对辐射声场的影响,制作了线圈直径为 3 mm 的针式 EMAT 作为接收换能器,如图 7 所示。

图 6 试验系统实物图

图 7 针式 EMAT

2.2 试验测量过程

试验选取了线圈宽度为 4 匝、8 匝和 12 匝的跑道形线圈 EMAT 作为激励换能器,试样为 40 mm 厚的铝块,具体测量方法如下。

(1) 换能器对中。首先,将激励换能器固定在光学平台上,接收换能器固定在三坐标滑台上,通过控制三坐标滑台,将接收与激励换能器的中心进行对准,并将激励换能器中心点设置为接收换能器扫描路径零点,被扫描试块放置于激励换能器正上方,接收换能器置于试块之上。

(2) 确定扫描范围。以扫描路径零点为起点,保持 X 轴位置不变,通过控制光学平台 Y 轴,沿图 5 中 Y 轴进行预扫描。经过预扫描后,可确定扫描范围为 ± 15 mm 范围内。

(3) 沿 Y 轴进行 A 扫描。预扫试验后发现,声

场在 $(-15, -10)$, $(10, 15)$ 变化幅度较小,因此在这一范围内以 1 mm 的步进值进行 A 扫试验,在 $(-10, 10)$ 范围内采用 0.1 mm 的步进值,共扫描 211 个采样点。每点进行三次采样,取三次平均后的值作为该点采样结果。

(4) 影响因素测量。在上述声场测量试验过程中,由于激励与接收换能器均为 EMAT,两者的偏置磁场存在相互作用,可能会对激励换能器的辐射声场产生影响。为此,本文分别在有无接收换能器的情况下,对激励换能器进行了“自激自收”试验,来分析接收换能器对激励换能器辐射声场的影响。分别对声场测量试验所用的三种激励换能器在 40 mm 厚的铝块上进行超声检测试验,接收换能器依然沿步骤(3)中扫描路径在铝块表面进行移动,当接收换能器移动到各扫描点时,激励换能器采集自身发出的脉冲回波信号,并提取一次回波信号幅值,记为 $Y_{ei} (i=1, 2, \dots, 211)$ 。测量完毕后,将接收换能器从光学平台中卸下,采集一组无接收换能器影响时的回波信号并提取一次回波信号幅值记为 Y ,根据式(16)可得出各点处的影响系数 E_i ,并绘制出影响曲线,如图 8 所示

$$E_i = \frac{Y_{ei}}{Y} (i=1, 2, \dots, 211) \quad (16)$$

三组换能器的影响系数均为 1 左右,表明本试验中接收换能器对激励换能器辐射声场的影响极小,几乎可以忽略,保证了试验结果的可靠性。

图 8 影响曲线图

(5) 试验数据处理。记录每点接收换能器所测得的超声波信号,取一次波的峰值表征该点的声压值,并进行绘图。

3 结果与讨论

3.1 辐射声场云图分析

图 9 为有限元仿真得到的不同线圈宽度 EMAT 在 5 μ s 时刻振动位移云图。从图中可知:跑道形线圈 EMAT 辐射出三种超声波,分别为表面波、纵波

以及横波, 三种声波中横波能量最大。出现这种现象的原因是, 由于永磁体在导线下方产生的静态磁场主要沿 Z 轴竖直向下, 铝块中感生出的涡流沿 Y 向, 分析可得静态洛伦兹力的方向主要沿 X 轴为水平方向, 动态磁场产生的洛伦兹力相比于静态磁场产生的洛伦兹力较小可忽略不计。因此受到的总洛伦兹力主要沿 X 轴为水平方向, 受该洛伦兹力的作

用会在试块中产生横波, 与此同时也会形成纵波与表面波, 但横波的能量明显高于纵波与表面波。

此外, 根据云图还可看出: 超声纵波声速明显快于超声横波, 约为横波声速的两倍, 随着传播距离或时间的增加, 在试块中能清晰地将两者区分开来。本文只研究跑道形线圈 EMAT 激励的超声横波辐射声场特性。

图 9 $5\mu\text{s}$ 时刻振动位移图(a~i 分别对应为 4~12 匝线圈宽度的 EMAT)

3.2 声场幅值与线圈宽度的关系

按第 1.3 节所述方法对仿真结果进行提取, 以每点横波幅值表示该点的声压值, 将各点所得数据进行插值处理并绘图。图 10 中分别以厚度 10 mm、20 mm、30 mm、40 mm 为例, 展示了同一厚度, 不同线圈宽度下换能器辐射声场分布; 图 11 中分别以 4 匝、8 匝、12 匝线圈宽度跑道型 EMAT 辐射声场为例, 展示同一线圈宽度在不同厚度下辐射声场分布。

从图 11 可得, 随着激励线圈宽度递增, 声场幅值增大, 并从图 10 中可得在不同厚度试块下均呈现

相同规律。这是由于当线圈宽度增加时, 线圈覆盖面积增加, 波源面积增加, 使得辐射声场强度增加。

由图 10 可看出, 不同厚度下, 辐射声场形状类似, 关于轴线左右对称, 整体呈现“蝶”形, 换能器轴线处声压值为 0。分析可知, 这是由于跑道形线圈 EMAT 关于轴线左右对称, 两侧线圈感生出的涡流大小相等方向相反, 所受到的偏置磁场方向相同大小相等。因此涡流区域内的质子受到的洛伦兹力大小相等方向相反, 产生的超声波振幅相等初相反, 所以当两侧的声波传播到轴线位置时, 会发生相消干涉, 使得轴线上声压值在任意时刻均为 0。

(a) 10 mm 厚度下不同线圈宽度 EMAT 辐射声场分布图

(b) 20 mm 厚度下不同线圈宽度 EMAT 辐射声场分布图

(c) 30 mm 厚度下不同线圈宽度 EMAT 辐射声场分布图

(d) 40 mm 厚度下不同线圈宽度 EMAT 辐射声场分布图

图 10 不同厚度下声场分布仿真结果图

(a) 4 匝线圈宽度辐射声场分布图

(b) 8 匝线圈宽度辐射声场分布图

(c) 12 匝线圈宽度辐射声场分布图

图 11 不同线圈宽度辐射声场分布仿真结果图

3.3 声场宽度与线圈宽度的关系

由第 3.2 节可知跑道形线圈 EMAT 辐射声场中心轴线处声压值在任意时刻均为 0，存在两个大小相同的主能量声束，对称分布在换能器轴线两侧。因此，为计算主能量声束的半扩散角，可选取其中一个进行计算。因此，本文以声场分布曲线中最大值衰减 6 dB 即主能量声束的声压值衰减至一半时，最外侧声束到主声束的距离作为主能量的半宽度

S_w 如图 12 所示，不同线圈宽度 EMAT 在不同厚度 h 下，对应的半宽度 S_w 不同，根据式(17)可求得某一线圈宽度 EMAT 在某一厚度下的半扩散角

$$\phi = \arctan \frac{S_w}{h} \quad (17)$$

根据式(17)，可得出同一线圈宽度 EMAT 在不同厚度下的半扩散角并取平均值，可得到不同线圈宽度 EMAT 对应的半扩散角 ϕ_n ($n=4\sim 12$)。

此外,将跑道形线圈 EMAT 看作矩形波源时,由第 1.2 节 Dr 的定义,可知当主能量声束声压值衰减至一半时 $Dr=1/2$, 此时 $y = Kb \sin \varphi = \sqrt{3}$, 对应 XOY 平面内主能量的半扩散角

$$\varphi = \arcsin \frac{\sqrt{3}}{kb} \approx 29 \frac{\lambda}{2b} \quad (^{\circ}) \quad (18)$$

由式(18)也可以计算出各线圈宽度下 EMAT 辐射声场主能量的半扩散角 $\varphi_n (n=4 \sim 12)$ 。本文以轴线一侧线圈宽度的一半 $l_{coil_w}/2 = N \times d/2$ 作为矩形波源的半宽度 b , 横波波长作为 λ 。

图 12 声场宽度示意图

ϕ_n 与 φ_n 进行对比,如图 13 所示,可以看出 ϕ_n 与 φ_n 吻合程度较高,表明矩形波源可作为跑道形线圈 EMAT 的近似波源。并从两者变化趋势中可得出:声场主能量的半扩散角随线圈宽度的增加而减小。

图 13 ϕ_n 与 φ_n 对比图

因此,为对这种跑道形线圈 EMAT 辐射声场宽度进行衡量,采用最大声压值下降 6 dB 时,两列波束边缘之间的距离为声场宽度,由此定义的声场宽度中间存在一个不连续的空白区域如图 12 所示。

按上述定义,求出不同线圈宽度 EMAT 在各厚度下辐射声场宽度与空白区域宽度并进行绘图,如图 14、15 所示。

可以看出,跑道形 EMAT 辐射声场呈现一定的扩散性,随着传播距离的增加,辐射声场宽度逐渐变宽。在相同传播距离下,声场宽度随着线圈宽度的增加而减小,其扩散性减小,声束越来越集中。随着线圈宽度的增加,声场空白区域宽度减小,并且随着传播距离的增加,同一线圈宽度 EMAT 辐射声场空白区域宽度增加。

图 14 不同线圈宽度 EMAT 对应声场宽度图

图 15 不同线圈宽度 EMAT 对应声场空白区域宽度图

3.4 仿真与试验结果对比分析

采用第 2.2 节所述的测量方法,对跑道形线圈 EMAT 辐射声场进行试验测量,取各点接收到的一次直达波幅值作为该点的声压,绘制出三种换能器辐射声场分布曲线,如图 16 所示。三种换能器的辐射声场整体具有相似分布规律,均关于零点左右对称。三个换能器的声场分布均存在三个峰值点,其中两个较大的峰值点关于 0 点对称,另一较小的峰值点位于 0 点处。在同一厚度试块中,随着被测 EMAT 线圈宽度的增加,辐射声场能量增强,与仿真结果具有相同的趋势。

图 16 声场测量试验结果图

但对比图 10 和图 16 中可直观看出, 仿真与试验所得出的辐射声场分布曲线有所差异, 仿真结果在零点处声压值为零, 而试验结果在零点处存在较小波峰。对此差异进行分析可知, 尽管试验测量采用的接收换能器线圈足够小(直径 3 mm), 但仍具有一定面积, 不能将其看作理想的点式接收器。采用该接收换能器测量声场时, 在采集点处采集到的测试信号是接收换能器覆盖面积下所有质点振动的总和, 而仿真则是理想地以该采样点处的振动位移来表征该点的声压值, 由此导致了试验结果与仿真结果之间的差异。

基于上述分析, 本文提出一种数据处理方法对仿真结果进行处理, 当接收换能器进行 A 扫试验时, 实质上为接收换能器对其所覆盖换能面积内各质点接收到的信号进行滑动平均, 具体计算方法如式(19)所示

$$z(n) = \text{conv}(x) * h(n) \quad (19)$$

式中, $z(n)$ 为仿真数据处理后各点声压值, $y(x)$ 为接收机制函数, $h(n)$ 为仿真得到的每点声压值, $*$ 为卷积符号。

在试验接收过程中, 当超声波传播到接收换能器下方时, 试块中运动的带电粒子在接收换能器偏置磁场的作用下, 产生动态电流, 进而产生动态磁场并在接收线圈中产生感应电动势, 作为线圈的接收信号。

试验中接收换能器偏置磁场由圆柱形永磁体提供, 接收线圈为螺旋形, 因此可将接收区域近似为圆形。考虑到接收区域不同位置处接收到的电压不同, 因此将不同半径所对应的接收面积作为接收机制函数 $\text{conv}(x)$ 在各半径处对应的值, 构建出的接收机制函数表达式为

$$\text{conv}(x) = \pi x^2 \quad (x \in (-R, R)) \quad (20)$$

式中, R 为接收面积的半径。综合考虑偏置磁场与线圈等因素, 在对仿真结果进行卷积处理的过程中, 取接收换能面积的半径 R 为 4 mm。

利用接收机制函数 $\text{conv}(x)$ 与二维仿真数据进行相应卷积运算, 并对结果进行归一化处理, 结果如图 17 所示。可以看出, 经处理后的仿真结果与试验结果相比, 在中心 o 点声场集中范围内仿真结果与试验结果吻合较好, 在其他范围仍存在一定偏差。但可看出两者在变化趋势及分布规律方面具有相似性, 特别是在中心 o 点位置处通过数据处理的仿真结果和试验结果能够很好的吻合, 这一结果验证了仿真模型的正确性, 以及这种处理方法的有效性。

图 17 经卷积处理的仿真结果与试验结果对比图

4 结论

本文建立跑道形线圈 EMAT 辐射声场有限元模型, 对不同线圈宽度的 EMAT 进行二维仿真计算, 分析了跑道形线圈 EMAT 的辐射声场特性和线圈宽

度对其辐射声场分布的影响。同时建立了换能器辐射声场测量试验系统, 对跑道形线圈 EMAT 辐射声场进行了试验测量。进一步将仿真结果和试验结果进行对比, 分析线圈宽度对跑道形线圈 EMAT 辐射声场特性的影响规律。得出如下结论。

(1) 跑道形线圈 EMAT 的辐射声场关于 EMAT

中心轴线左右对称, 呈“蝶”型分布, 且在任意时刻中心轴线上的声压值处处为 0。随着线圈宽度增加, 跑道形线圈 EMAT 辐射声场的幅值增加, 宽度减小, 声束变窄。

(2) 跑道形线圈 EMAT 可近似为矩形波源, 通过矩形波源计算的辐射声场主能量半扩散角与仿真提取得到的结果吻合性良好, 表明可以利用矩形波源近似分析跑道形线圈 EMAT 的辐射声场特性。

(3) 对比采用针式 EMAT 测量的跑道形线圈 EMAT 辐射声场与仿真得到辐射声场, 两者整体具有相同的变化规律, 但仿真与试验所得出的辐射声场分布曲线存在差异。针对此差异, 基于接收换能器结构, 提出了一种换能器接收机制函数, 对仿真结果进行相应处理。对比处理后的仿真结果与试验结果可以看出, 该方法解决了仿真与试验在跑道形线圈 EMAT 中心位置处辐射声场分布的差异问题, 使两者变化趋势及分布特性在一定范围内具有较好的一致性, 证明了这种数据处理方法的有效性和可行性。

参 考 文 献

- [1] LUNN N, DIXON S, POTTER G. High temperature EMAT design for scanning or fixed point operation on magnetite coated steel[J]. NDT & E International, 2017, 89: 74-80.
- [2] 周进节, 郑阳, 杨齐, 等. 管道超声导波分段时间反转检测方法研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(12): 78-86. ZHOU Jingjie, ZHENG Yang, ZHANG Zongjian, et al. Pipeline section time reversal inspection method with ultrasonic guided waves [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(12): 78-86.
- [3] 周进节, 郑阳, 张宗健, 等. 基于电磁超声换能器阵列的管道螺旋导波传播规律研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 38-46. ZHOU Jingjie, ZHENG Yang, ZHANG Zongjian, et al. Mode guided waves in pipe observed by electromagnetic acoustic transducer array [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 38-46.
- [4] REMO R. Modelling of electromagnetic acoustic transducers[D]. London: Imperial College London, 2011.
- [5] AURÉLIEN T, PIERRE B. EMAT design for minimum remnant thickness gauging using high order shear horizontal modes [J]. Ultrasonics, 2019, 95: 70-78.
- [6] DHAYALAN R, ANISH K, PURNA C, et al. A hybrid finite element model for spiral coil electromagnetic acoustic transducer (EMAT) [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 46: 491-500.
- [7] JOZEF T, DAVID G, STEVEN D. High power phased EMAT arrays for nondestructive testing of as-cast steel[J]. NDT & E International, 2019, 102: 47-55.
- [8] ISLA J, CEGLA F. EMAT phased array: A feasibility study of surface crack detection[J]. Ultrasonics, 2017, 78: 1-9.
- [9] 杨理践, 陈俊哲, 邢燕好, 等. 基于电磁超声纵波的铝板厚度检测[J]. 仪表技术与传感器, 2015(11): 67-70. YANG Lijian, CHEN Junzhe, XING Yanhao. Thickness detection of aluminum plate based on electromagnetic ultrasonic longitudinal waves[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(11): 67-70.
- [10] XIE Y, YIN W, LIU Z, et al. Simulation of ultrasonic and EMAT arrays using FEM and FDTD[J]. Ultrasonics, 2016, 66: 154-165.
- [11] 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, 2017, 86: 36-43.
- [12] 吴迪, 李明轩, 王小民, 等. 横波直探头的辐射声场[J]. 声学学报, 2007, 32(2): 103-109. WU Di, LI Mingxuan, WANG Xiaoming, et al. The ultrasonic field radiated by a normal shear wave probe[J]. Acta Acustica, 2007, 32(2): 103-109.
- [13] 吴迪, 李明轩, 王小民, 等. 横波直探头的暂态辐射声场[J]. 声学学报, 2007, 32(4): 304-309. WU Di, LI Mingxuan, WANG Xiaomin, et al. The ultrasonic transient field radiated by a normal shear wave probe[J]. Acta Acustica, 2007, 32(4): 304-309.
- [14] 陈秋颖. 电磁声换能器的辐射声场研究[J]. 声学学报, 2009, 34(4): 318-324. CHEN Qiuying. The radiated sound field of electromagnetic acoustic transducer[J]. Acta Acustica, 2009, 34(4): 318-324.
- [15] JIAN X, DIXON S, EDWARDS R S, et al. Coupling mechanism of an EMAT[J]. Ultrasonics, 2006, 44(8): 653-656.
- [16] THOMPSON R B. A model for the electromagnetic generation of ultrasonic guided waves in ferromagnetic metal polycrystals[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1978, 25(1): 7-15.
- [17] ZHAI G, WANG K, WANG Y, et al. Modeling of Lorentz forces and radiated wave fields for bulk wave electromagnetic acoustic transducers[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(5): 054901.
- [18] 郑晖, 林树青. 超声检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2008. ZHENG Hui, LIN Shuqing. Ultrasonic testing [M]. Beijing: China Labor and Social Security Publishing

Press, 2008.

- [19] THOMPSON R B. A Model for the electromagnetic generation and detection of Rayleigh and Lamb waves[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 2005, 20(4): 340-346.
- [20] 黄松岭, 王坤, 赵伟. 电磁超声导波理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- HUANG Songling, WANG Kun, ZHAO Wei. Theory and application of electromagnetic ultrasonic guided wave[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [21] WANG S, KANG L, LI Z, et al. 3-D modeling and analysis of meander-line-coil surface wave EMATs[J].

Mechatronics, 2012, 22(6): 653-660.

作者简介: 周进节, 男, 1981 年出生, 博士。主要研究方向为超声和超声导波检测方法、传感器与检测仪器、声场可视化技术等。

E-mail: zhoujinjiechina@126.com

贾浩东, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为电磁超声换能器检测方法、电磁超声换能器有限元仿真等。

E-mail: 18735780022@163.com

郑阳(通信作者), 男, 1984 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为电磁超声、相控阵超声、超声导波、微磁多参数等检测方法, 传感器与检测仪器开发等。

E-mail: zhengyangchina@126.com

张宗健, 男, 1990 年出生, 硕士, 工程师。主要研究方向为电磁超声传感器研制及性能评估、电磁超声高温检测方法等。

E-mail: zhangzongjiancn@126.com