

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107377

漏磁结合涡流的非铁磁性金属材料探伤研究*

张智超¹, 沈常宇¹, 朱周洪¹, 刘洋¹, 李光海²

(1. 中国计量大学光学与电子科技学院 杭州 310018; 2. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘要:针对非铁磁性金属的内外壁损伤检测问题,设计了一种中低频的交流电磁场检测模型,对漏磁及涡流效应在交流电磁场检测中的耦合机制进行了分析,并制作电磁检测装置进行实验验证。基于COMSOL有限元仿真建立二维仿真模型,针对不同深度、不同大小的表面缺陷及埋深缺陷进行仿真检测,得到相应的检测线圈电压幅值、相位与缺陷深度的关系;以仿真结果为基础制作了电磁检测装置,并对非铁磁性金属待测试件进行检测,结果表明,制作的电磁检测装置可以穿透18 mm不锈钢板检测到高5 mm、长12 mm的矩形埋深缺陷及上表面深3 mm、 $\Phi 5$ mm的微型圆孔缺陷。结果表明,低频激励信号对于待测试件的上下表面缺陷均有良好的检测效果,而中频激励信号仅适用于上表面缺陷检测。

关键词:漏磁;涡流检测;非铁磁性金属;缺陷

中图分类号:TH878 文献标识码:A 国家标准学科分类代码:460.40

Magnetic flux leakage combined with eddy current for non-ferromagnetic metal materials damage detection

Zhang Zhichao¹, Shen Changyu¹, Zhu Zhouhong¹, Liu Yang¹, Li Guanghai²

(1. College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;
2. China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to detect the damage of the inner and outer walls of non-ferromagnetic metals, a medium and low frequency AC electromagnetic field detection model is designed. The coupling mechanism of magnetic flux leakage and eddy current effect in the detection of AC electromagnetic field is analyzed, and the electromagnetic detection device is made for experimental verification. Based on COMSOL finite element simulation, the two-dimensional simulation model is established. The simulation tests are carried out for surface defects and buried depth defects of different depth and sizes, and the relationship between voltage amplitude, phase of the coil and defect depth is obtained. Based on the simulation results, the electromagnetic detection device is made and the non-ferromagnetic metal test piece is tested. The results show that the manufactured electromagnetic detection device can penetrate the 18 mm stainless steel plate to detect a rectangular buried depth defect with a height of 5 mm and a length of 12 mm and a micro circular hole defect with a upper surface of 3 mm and $\Phi 5$ mm. It is concluded that the low frequency excitation signal has a good detection effect on the upper and lower surface defects of the test piece, while the intermediate frequency excitation signal is only suitable for the detection of upper surface defects.

Keywords: magnetic flux leakage; eddy current testing; non-ferromagnetic metal; defects

0 引言

金属材料应用非常广泛,其中非铁磁型金属主要用于日常生活以及各类航空航天器材的连接处,易受腐蚀液体的侵蚀,久而久之容易产生各种裂纹及磨损等损伤,

存在较大的安全隐患^[1-3]。交流电磁场检测作为一种新型无损检测技术,具有不损伤待测金属,不需要各类耦合剂,操作方便,磁信号表征丰富等诸多优点,其理论依据在于应用了漏磁效应与涡流效应。

漏磁效应^[4]指励磁线圈在激励电流激励下发出能穿透待测试件的电磁场,当待测试件达到磁饱和状态时,磁

收稿日期:2021-01-13 Received Date: 2021-01-13

* 基金项目:国家重点研发计划(2017YFF0209703)项目资助

力线在待测试件中分布均匀且深度大,当待测试件中存在缺陷,会增大缺陷周围磁路的磁阻,从而改变磁力线的分布导致磁力线溢出待测试件,通过检测缺陷周围磁场的大小即可实现对缺陷的检测,并进一步实现定量分析。

因为铁磁性金属磁导率 μ 远大于空气的磁导率 μ_0 ,含缺陷试件的漏磁场强,使得漏磁检测常用于铁磁性金属的探伤工作中。常予等通过仿真及实验探究了铁磁性构件内外表面的探测方法及相位、幅值关系,并通过遗传算法优化漏磁传感器尺寸、线圈匝数、绕线方式等因素得到了更灵敏检测效果更好的漏磁传感器^[5-6];Lou 等^[7]通过建立磁偶极子模型探究了 20# 铁板中不同类型、不同深度的缺陷与磁通密度 B_x 的关系,并设计低频漏磁传感器可实现对铁磁性钢板的矩形缺陷及圆孔型缺陷的检测;Wang 等^[8]构建了基于磁抗的传感系统并结合直流磁化的方法来检测非铁磁型金属不锈钢的矩形裂纹,发现漏磁信号强度随着激励电流强度的增大而增大,随着垂直距离的增大而减小。

涡流效应^[9]的原理是将通电线圈放在导电材料上方,根据楞次定律,由线圈产生的原生磁场在导电材料中感生出电涡流场,电涡流场产生与原生磁场方向相反的次级磁场以减弱原生磁场,表面存在缺陷时,涡流流动受到扰动,使得原生磁场与次级磁场的叠加场受到扰动,通过拾取叠加场来进行缺陷的定量表征。涡流检测由于存在趋肤效应,即当激励线圈被较高频率的激励信号激励时,涡流主要集中在待测试件的表面,因此涡流检测仅适用于导电材料的表面及亚表面检测,很难对深层缺陷进行表征。赵亚飞^[10]及王培屹^[11]以线圈为励磁装置探究了涡流效应对金属表面缺陷的探伤效果,在 10 kHz 高频信号激励频率下实现了宽度 2 mm,高度 4 mm 之内的不锈钢材料表面裂纹缺陷探伤。

然而,以上研究主要是针对于铁磁性材料实现了埋深缺陷检测,对于非铁磁性金属大多数仅能停留在表面缺陷检测而不能进行埋深检测^[12]。本文通过建立 COMSOL 仿真模型及进行实验,进行了非铁磁性金属探伤中漏磁效应与涡流效应的耦合作用机理研究,提出一种非铁磁性金属探伤方法,结合了漏磁探伤及涡流探伤,可以实现非铁磁性不锈钢板 18 mm 深度埋深缺陷检测及表面缺陷检测,并进一步分析了电压幅值、相位等与缺陷的关系,提出了缺陷深度定量化的方法。

1 有限元仿真模型

1.1 三维有限元仿真模型

基于 COMSOL 仿真软件,利用 AC\DC 电磁场模块,建立了交流电磁场检测模型,如图 1 所示,由待测试件、磁芯、励磁线圈、磁屏蔽层、缺陷、检测线圈构成。待测试

件设置为非铁磁性不锈钢板,励磁线圈缠绕在磁芯上用来产生原生磁场,磁屏蔽层将检测线圈附近由磁芯产生的背景磁场屏蔽,检测线圈用来拾取信号。

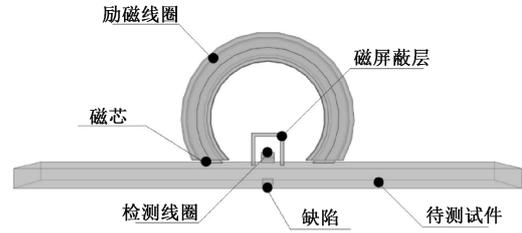


图 1 三维电磁检测模型

Fig. 1 3D electromagnetic testing model

本仿真模型中,待测试件下表面存在一个高度 h 为 0.5 cm,长度 l 为 1 cm 的缺陷,励磁线圈 500 匝,线圈中通入幅值为 1 A 的交变电流,模型其他部分参数设置如表 1 所示。

表 1 三维模型参数

Table 1 3D model parameters

仿真模块	AC\DC
励磁线圈	线圈匝数 500 匝 线圈电导率 6×10^7 S/m 线圈横截面积 1×10^{-6} m ²
磁芯	电导率 10 S/m 相对磁导率 8 000
待测试件	电导率 2.5×10^7 S/m 相对磁导率 1 长度 45 cm 宽度 35 cm 高度 1.85 cm
缺陷	长 1 cm 深 0.5 cm

进一步,为了得到更为精确的仿真结果,需要对模型进行精确的网格划分,通常网格的好坏决定了求解精度与时间,需要对待求解区域进行精确的划分,如图 2 所示,采用对缺陷处的空气域及磁屏蔽下的空气域进行超细化,其余部分较细化划分。

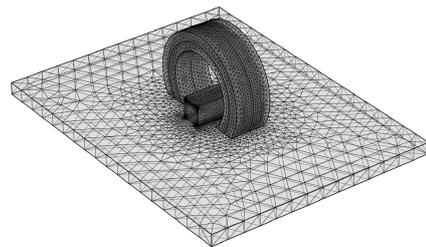


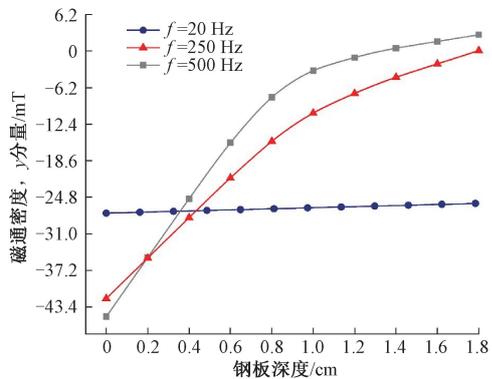
图 2 三维模型网格划分图

Fig. 2 3D model meshing diagram

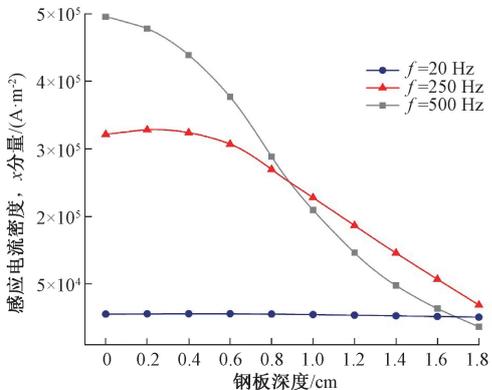
1.2 三维模型分析

向励磁线圈中通入幅值为 1 A, 频率分别为 20 Hz, 250 Hz, 500 Hz 的交变电流, 以钢板 Z 轴中心为参考线, 记录无磁屏蔽无缺陷情况下的钢板中心位置不同深度下的 y 轴方向磁通密度大小 B_y 及 x 轴方向感应涡流密度 J_x 大小。

如图 3(a) 所示, 当激励信号频率为 20 Hz 时, 整个钢板中心的 y 轴方向磁通密度大小分布较为均匀且整体的磁通密度大小适中; 当激励信号频率较大, 为 250 Hz 及 500 Hz 时, 受趋肤效应影响, 整个钢板 Z 轴中心磁通密度分布不均, 且激励频率越大, 待测试件越靠近表面的地方磁通密度越强, 磁通密度衰减的越快。



(a) 钢板 y 轴方向磁通密度大小
(a) Magnetic flux density of steel plate in y-axis direction



(b) 钢板 x 轴方向感应电流密度大小
(b) Induced current density of steel plate in x-axis direction

图 3 无磁屏蔽无缺陷时各分量

Fig. 3 Components without magnetic shield and defect

当激励信号频率为低频信号时, 整个钢板 Z 轴中心的感应涡流密度 J_x 大小较小且整体分布均匀, 而激励频率越高时, 表面感应电流密度越大, 随钢板深度的增加衰减也越快, 如图 3(b) 所示, 受限于趋肤深度 σ , 符合趋肤效应中高频激励下的涡流集中在试件表面这一特点。趋肤深度^[13]通常指导电材料内部涡流密度衰减至导体表面涡流密度的 $1/e$, 具体计算公式如下:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi \times f \times \mu \times \rho}} \quad (1)$$

其中, σ 为趋肤深度; f 为激励电流频率 (Hz); ρ 为导电材料的电导率 (S/m); μ 为导体磁导率 (H/m)。

分析磁通密度 B_y 与感应电流密度 J_x , 待测试件内的磁场与涡流密度大小近似成正比, 试件内的磁感应强度越强, 说明由原生磁场感生的电涡流场越强。

试件中不同位置的缺陷, 主要包括埋深缺陷及表面缺陷两种, 针对埋深缺陷, 中高频激励下被磁化的试件由于磁通密度和电流密度衰减迅速, 试件深层部分的磁场及涡流场相比较表层及亚表层, 占比都极小, 因此对于埋深缺陷来说, 应采用低频激励信号, 使表层、亚表层、深层的磁场强度及涡流场强度尽可能保持在同一量级; 针对表层缺陷则可以同时采用低频、中高频信号两种激励方式。

1.3 二维有限元仿真模型

由于三维有限元仿真模型复杂, 用来做缺陷检测仿真求解时间非常长, 因此以三维模型为基础建立二维仿真模型, 可以极大的缩短求解时间。二维仿真模型如图 4, 由励磁磁芯、激励线圈、磁屏蔽层、检测线圈、待测试件组成, 磁屏蔽层厚度为 2 mm, 相对磁导率 μ 为 8 000, 电导率 ρ 为 4.032×10^6 S/m, 其他部分参数与三维模型保持一致。二维仿真模型求解简便, 网格部分采用更精细的极细化以保证求解的精准度。

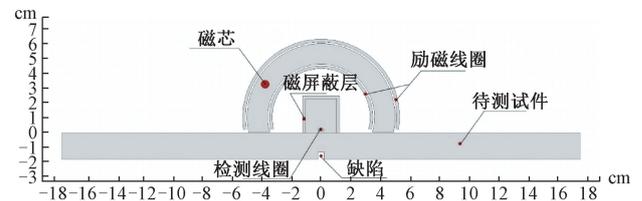


图 4 二维仿真模型

Fig. 4 Two-dimensional simulation model

2 低频电磁检测模型

2.1 模型搭建及求解

将二维检测模型中的激励线圈中通入幅值为 2 A、频率 20 Hz 的交变电流, 产生强磁场以磁化待测试件, 磁屏蔽用来屏蔽背景磁场, 待测试件下方存在埋深缺陷。通过改变埋深缺陷在待测试件中的横坐标及深度, 来模拟实际检测中, 电磁检测装置逐渐靠近不同深度缺陷的情况, 以此来获取不同深度的缺陷在检测下得到的信号值。

埋伏缺陷深度 H 为 0.1~1.7 cm, 步长为 0.2 cm, 缺陷中心 x 坐标移动范围为 -12~12 cm, 步长为 0.1 cm。

如图 5(a) 所示,为检测线圈电压幅值 U_m 随缺陷位置引起的变化,缺陷从待测试件左方逐渐移动至右方,缺陷靠近检测线圈时电压幅值逐渐上升,缺陷远离检测线圈时电压幅值逐渐下降。当缺陷位于待测试件 0 cm 左右,即处于检测线圈正下方时,检测线圈检测到的电压值最大,当缺陷深度逐渐增加时,检测线圈电压幅值也逐渐增加。

如图 5(b) 所示,为检测线圈相位 ϕ 随缺陷位置引起的变化,相位变化与幅值变化相似,与缺陷、检测线圈之间的距离成反比,与缺陷深度成正比。

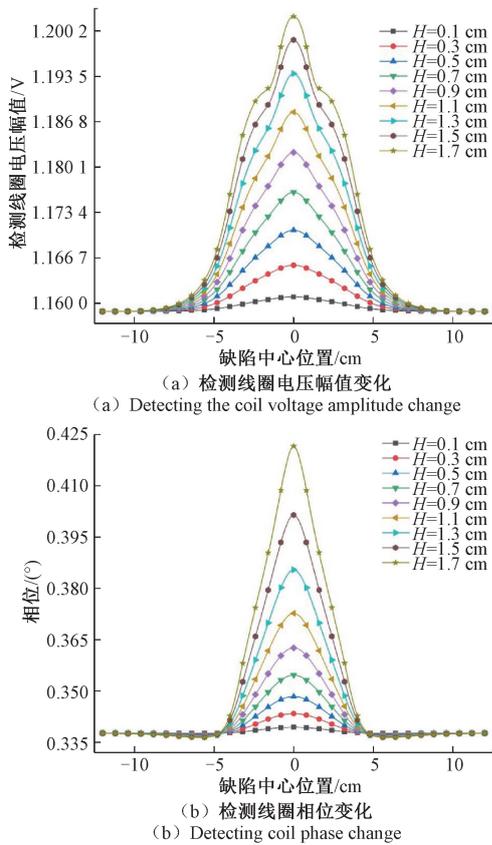


图 5 低频检测下埋深缺陷各分量
Fig. 5 Various components of buried depth defect under low frequency detection

进一步进行表面缺陷检测研究,表面缺陷深度从 0.1~1.7 cm,如图 6(a) 所示,幅值存在两个波谷,即当缺陷中心位置在-8~-3 cm 时,电压幅值增加,-3~-2 cm 左右时,电压幅值减小,-2~0 cm 电压幅值整体呈增加趋势,0~2 cm 处,电压下降,2~3 cm 处电压上升趋势,随后再减小。

检测线圈相位变化如图 6(b) 所示,与埋深缺陷的相位变化类似,为类正弦曲线。

表面缺陷与埋深缺陷的电压幅值变化趋势不同,埋

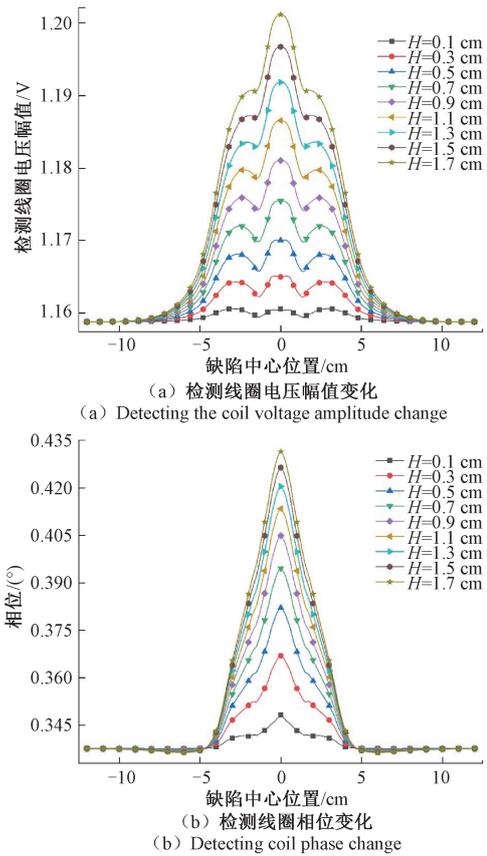


图 6 低频检测下表面缺陷各分量
Fig. 6 Various components of surface defect under low frequency detection

深缺陷幅值为类二次函数曲线,而表面缺陷的电压幅值存在两个波谷。如图 7 为磁屏蔽层内部检测线圈附近水平线 α_1 与待测试件亚表面水平线 α_2 ,以 α_1 、 α_2 为辅助线来研究不同情况下的检测机理。

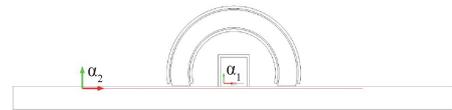
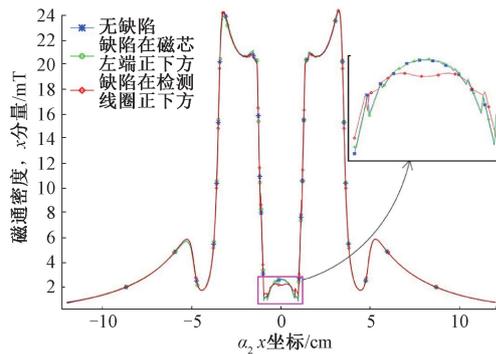


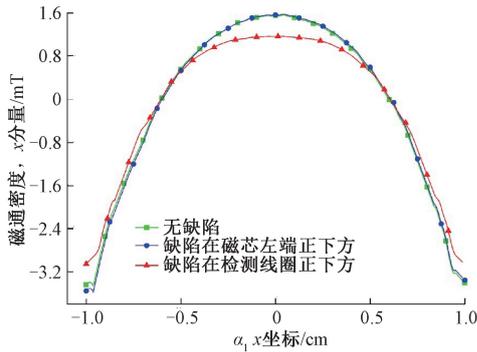
图 7 α_1 、 α_2 辅助线位置
Fig. 7 Auxiliary line position of α_1 、 α_2

如图 8(a) 为缺陷深度 $h = 1.3$ cm,激励信号频率 $f = 20$ Hz 的情况下,缺陷在磁芯左端正下方 ($L = -4$ cm)、缺陷在检测线圈正下方 ($L = 0$ cm) 以及没有缺陷 3 种情况下, α_2 辅助线上的磁通密度 B_x (x 轴方向),图 8(b) 为 3 种情况下,磁屏蔽场内部检测线圈位置 α_1 辅助线上的磁通密度 B_x 。

相比无缺陷、缺陷在磁芯左端正下方,当缺陷位于检测线圈正下方时,辅助线 α_1 的部分位置 (-1~1 cm) 和 α_2 的磁通密度 B_x 均有大幅度的减弱。



(a) α_2 轴线 B_x 分布图
(a) B_x distribution along α_2 axis



(b) α_1 轴线 B_x 分布图
(b) B_x distribution along α_1 axis

图8 不同情况下 α_1 、 α_2 轴线上磁通密度 B_x

Fig. 8 Flux density B_x along α_1 and α_2 lines in different cases

原因在于励磁磁芯两端产生的原生磁场强, $-1 \sim 1$ cm 位置的磁屏蔽层将磁芯产生的原生磁场大幅减弱屏蔽,磁屏蔽层内部下方的待测试件磁通量 B_x 骤减。当表面缺陷位于励磁磁芯两端下方时,磁芯两端原本感生的涡流场大大减弱,次级磁场减弱,从而引起总磁场的扰动,影响了检测线圈两端的电压值,当缺陷位于检测线圈下方时,一方面缺陷引起待测试件内部的磁场泄露形成的漏磁场,另一方面磁场原本在待测试件内感生出的涡流场因为缺陷大幅减少,导致次级磁场减弱,因此产生的 B_x 方向磁场扰动更强烈。

2.2 结果处理

表层缺陷及埋深缺陷得到的不同类型检测线圈信号,可以分为两类,两种缺陷的相位信号及埋深缺陷的电压幅值信号可以看作类正弦信号,而表层缺陷的电压幅值较为特殊,需要另外考虑。首先提取不同类型、不同深度缺陷的相位幅值,如表2所示,并绘制趋势图,如图9所示。

表层 0.1 cm 的缺陷初始相位约为 0.348° ,而埋深 0.1 cm 的缺陷初始相位约为 0.339° ,相位差 $\Delta\varphi$ 为 0.009° ,相差较小。表层缺陷随着缺陷深度的增加对相位的影响呈减弱的趋势,整体以递增的方式上升,而埋

表2 不同类型、不同深度缺陷的相位幅值
Table 2 Phase amplitudes of different types and depths of defects

深度/cm	表面/ $(^\circ)$	埋深/ $(^\circ)$
0.1	0.348 26	0.339 39
0.3	0.366 98	0.343 36
0.5	0.382 10	0.348 35
0.7	0.394 57	0.354 65
0.9	0.404 86	0.362 61
1.1	0.413 37	0.372 70
1.3	0.420 43	0.385 44
1.5	0.426 35	0.401 48
1.7	0.431 40	0.421 60

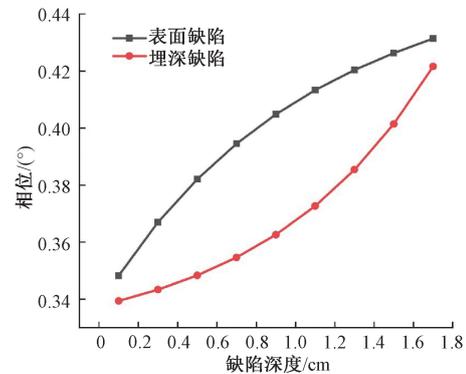


图9 表面缺陷与埋深缺陷相位变化图

Fig. 9 Phase diagram of surface defect and buried depth defect curves

深缺陷对相位的影响随着缺陷深度的增加呈加强趋势,整体以递增的方式上升。当缺陷深度 $h = 1.7$ cm 接近整个待测试件的厚度时,表层缺陷与埋深缺陷的相位又趋向一致,这说明对于非铁磁性金属,表层缺陷对相位的影响较埋深缺陷对相位的影响更大。

对于埋深缺陷的电压幅值,整体曲线也为类正弦曲线,提取 COMSOL 计算的不同深度电压峰值并绘制趋势如图10所示。在 $0.1 \sim 1.5$ cm 之间,电压峰值随缺陷深度近似呈一次函数上升,在 1.5 cm 后,整体上升速度大幅度减缓,因此对于 1.5 cm 以下的缺陷可以根据信号峰值来求解缺陷深度。

表层缺陷的电压幅值曲线存在两个波谷及3个峰值,因此需要提取两侧峰值及中间的峰值,绘制如图11所示,两侧峰值的变化曲线相比波谷间峰值更符合一次函数的特征,因此对于表面缺陷检测,可以采用磁芯两端检测得到的电压峰值信号来进行缺陷深度量化会更加精确。

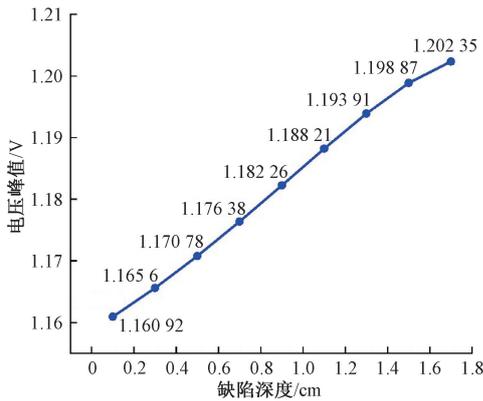


图 10 埋深缺陷电压幅值曲线

Fig. 10 Voltage amplitude curve of buried defect

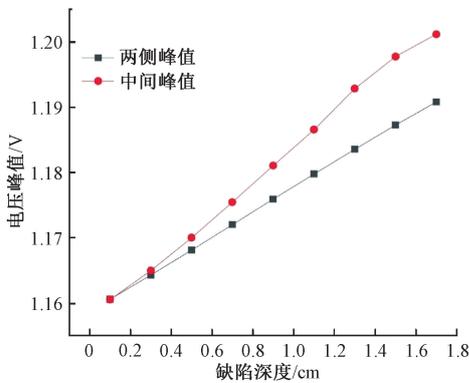


图 11 表面缺陷两种幅值曲线图

Fig. 11 Two kinds of amplitude curves of surface defects

3 中频电磁检测模型

中高频电磁检测模型与低频电磁检测模型基本一致,但由于激励线圈为多匝线圈可以视为电感,正弦信号接入激励线圈的本质问题是电感电路的求解^[14]。在低频检测模型中,正弦信号为幅值为 2 A 的电流激励信号,通过 COMSOL 计算激励线圈的电感约为 $L=0.2115\text{ H}$,根据公式:

$$I = \frac{U}{|\vec{R} + \vec{X}_L|} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad (2)$$

及

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L \quad (3)$$

在不考虑激励线圈电阻 R 的情况下,低频检测模型的输入电压大约在 40 V,而在中高频电磁检测模型下,因为输入信号频率 f 大幅增加,会导致激励电压 U 大幅上升,考虑到实际工程应用,中高频电磁模型应采用电压输入激励方式更为妥善。

考虑到实际待测试件中的缺陷深度为 0.5 cm,因此将信号激励频率主要设置为能使磁场趋肤深度到达 0.5 cm 左右深度的频率。经过计算,将低频检测模型中信号频率 f 设置为 400 Hz,激励线圈输入电压幅值设置为 25 V,待测试件表面缺陷深度 0.2 ~ 0.8 cm,步长为 0.15 cm,缺陷中心 x 坐标范围为 -6 ~ 6 cm,步长为 0.1 cm。缺陷位于待测线圈正下方时待测试件内部磁通密度如图 12 所示,待测试件内部磁场集中在磁芯两端下方的部分,对于检测线圈正下方的待测试件部分,上表面存在较大的磁场而下表面几乎为 0,应证了中高频检测模型对于埋深缺陷的检测能力较弱。

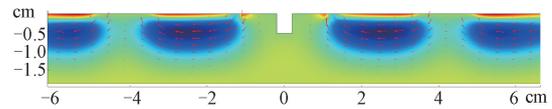


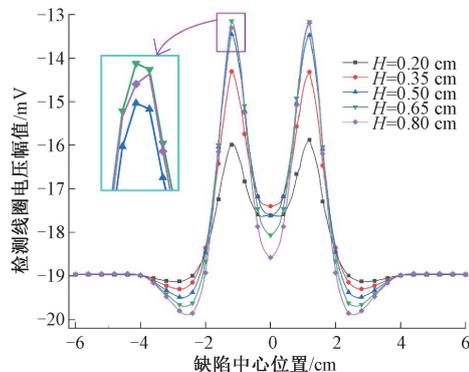
图 12 待测试件内部磁场图

Fig. 12 Magnetic field diagram inside the test piece

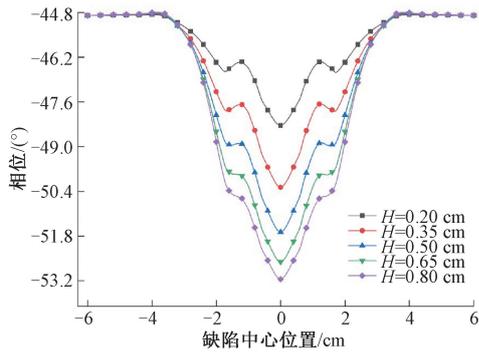
同时,与低频检测模型不同,由于涡流效应,原生磁场进入待测试件后仅在试件表面形成强磁场从而在试件内部形成回环磁场,因此缺陷引起的漏磁场方向与原生磁场即低频检测下的漏磁场方向相反,导致检测线圈两端电压变为负值。

图 13 为检测线圈电压幅值与相位随缺陷中心位置的关系图,无缺陷情况下检测线圈电压为 19 mV 左右,整体电压呈先降低后升高的趋势,其中 $h=0.2、0.35、0.5\text{ cm}$ 时,检测线圈电压幅值最小值分别为 15.895、14.306、13.454 mV,三者均有较大改变,而缺陷深度 $h=0.5、0.65、0.8\text{ cm}$ 时,检测线圈电压幅值 U_m 最小值为 13.454、13.136、13.228 mV,3 者区别较小。

在 400 Hz 的正弦信号激励下,交变磁场在待测试件中的深度根据趋肤深度式(1)可得约为 0.51 cm,因此对



(a) 检测线圈电压幅值随缺陷中心位置变化图
(a) Variation diagram of detection coil voltage amplitude vs. defect center position



(b) 检测线圈相位随缺陷中心位置变化图
(b) Variation diagram of detection coil phase vs. defect center position

图 13 表面缺陷检测线圈的幅值及相位图

Fig. 13 Amplitude and phase diagram of surface defect detection coil

于 0.2、0.35、0.5 cm 3 种深度的缺陷有不同程度的漏磁场逸出,可实现正常检测,而深度达 0.65、0.8 cm 的缺陷由于交变磁场趋肤深度为 0.58 cm,即使深度增加漏磁场也基本达到饱和,导致检测线圈的电压幅值变化较小。

将高频检测模型中的缺陷设置埋深缺陷,深度 0.7 cm,得到检测线圈电压幅值如图 14 所示,幅值差约为 0.2 mV,远低于同一模型下的表面缺陷检测幅值差 5.5 mV,因此高频检测模型对于埋深缺陷的检测灵敏度差,仅适用于检测表层缺陷,其最大检测深度 H 可由趋肤深度与输入频率 f 的关系式近似求出。

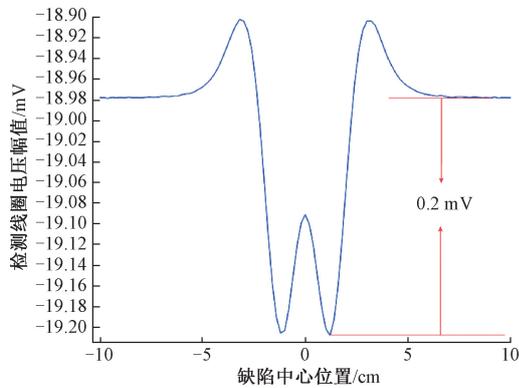


图 14 埋深缺陷电压幅值变化

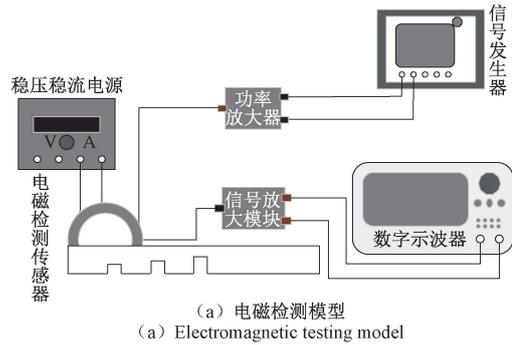
Fig. 14 Voltage amplitude variation of buried defect

4 实验验证

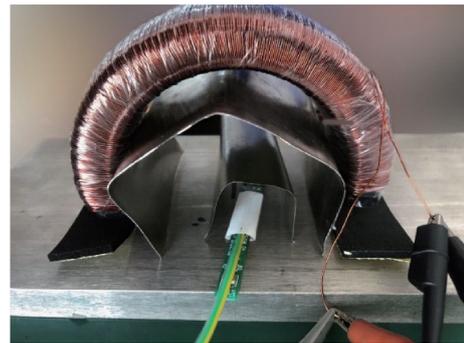
4.1 电磁检测模型搭建

搭建电磁检测模型如图 15(a) 所示,由信号发生器、功率放大器、稳压稳流电源、电磁检测传感器、信号放大模块、数字示波器构成,电磁检测传感器如图 15(b) 所示,由磁芯、激励线圈、磁屏蔽结构、待测试件构成,励磁

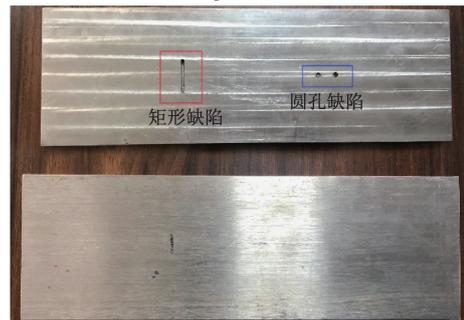
磁芯采用圆弧型铁基纳米晶磁芯,直径 12 cm,内角 270°,励磁线圈 1 200 匝缠绕在磁芯上以增强励磁磁场。磁屏蔽层采用双层结构、坡莫合金材料,每层厚度 0.3 cm,检测线圈位于内磁屏蔽下方中心。待测试件为不导磁的不锈钢材料,如图 15(c) 所示,长 36 cm,宽 12 cm,高 1.8 cm,一面光滑无缺陷,一面存在两个 4 mm 深,直径 5 mm 的圆柱形缺陷及一个长 3 cm,宽 3 mm,深 5 mm 的矩形缺陷。



(a) 电磁检测模型
(a) Electromagnetic testing model



(b) 电磁检测传感器
(b) Electromagnetic detection sensor



(c) 待测试件
(c) Test piece

图 15 硬件设施图

Fig. 15 Hardware facilities diagram

检测过程中,将励磁磁芯、磁屏蔽层、检测线圈固定为一体,整体在待测试件上方横向移动来模拟实际测试时检测装置逐步靠近及远离缺陷的情况,与二维模型检测方式一致。

4.2 实验结果

对激励线圈施加 15 Hz 的正弦信号,对不锈钢的表面缺陷进行步进检测,将检测线圈得到的信号数字化并进行平滑处理,结果如图 16 所示。与仿真结果相似,表面缺陷引起的幅值横向跨度大,无缺陷时电压幅值相对稳定,靠近表面矩形缺陷时存在 2 个波谷及 3 个峰值,中间峰值相对两侧峰值差幅更大,可用于缺陷定位,两侧峰值更适合进行缺陷深度定量。

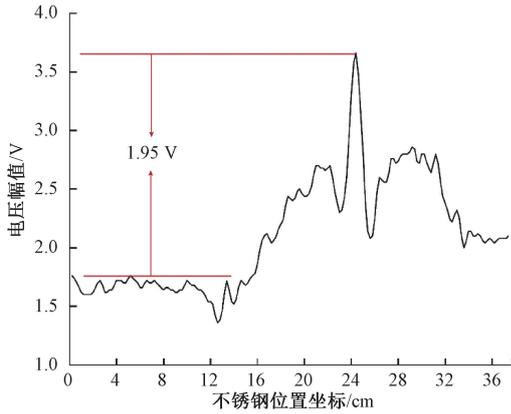


图 16 低频检测表面缺陷电压幅值

Fig. 16 Voltage amplitude of surface defect in low frequency detection

在低频激励下对不锈钢埋深缺陷进行步进检测,检测结果如图 17 所示,相比低频表面缺陷检测,埋深缺陷引起的幅值横向跨度更小,并且无缺陷时的电压幅值抖动也较表面缺陷更小,整体更稳定。靠近矩形缺陷时,埋深缺陷差幅最大达 0.9 V,而表面缺陷最大差幅约为 1.95 V,埋深缺陷电压变化较表面小。

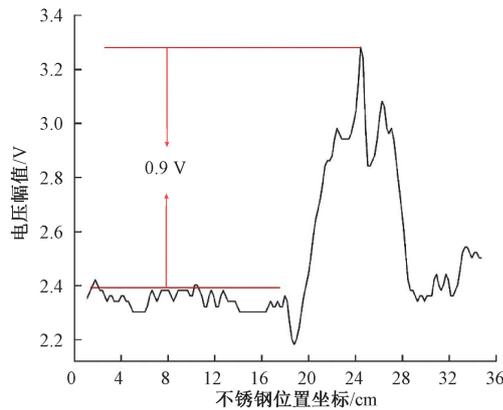


图 17 低频检测埋深缺陷电压幅值

Fig. 17 Voltage amplitude of buried defects in low frequency detection

在低频信号激励下,受限于整体磁场均匀,表面磁场

减弱,无论是表面损伤还是埋深缺陷都无法对两个直径为 5 mm 的圆柱形缺陷进行有效的检测。

采用中高频激励信号作为激励源,由仿真可知,探伤深度与激励信号频率 f 有关,通过多次实验得在 700 Hz 左右时表面缺陷检测效果最好,如图 18 所示。左右两边的低电压幅值是由于钢板两端的边缘效应^[15-16]引起的骤降,这一效应在低频检测中表现为图 16、17 最后检测完成时的电压相比较初始检测电压较高。

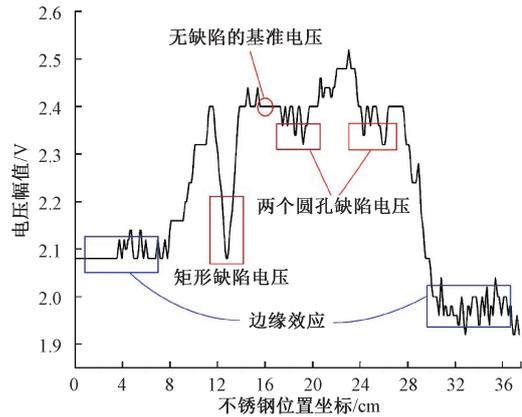


图 18 高频检测表面缺陷电压幅值

Fig. 18 Voltage amplitude of surface defects in high frequency detection

矩形缺陷引起大幅度的幅值降低,而两个小的圆孔缺陷引起的幅值变化较小,相比低频信号激励检测,高频激励信号可以更好的检测表面缺陷,即使是直径 5 mm 的圆孔缺陷也能得到有效的电压反馈。

经过实验测试,在中高频信号激励下对不锈钢板埋深缺陷进行检测,与仿真结果类似,结果显示高频激励对埋深缺陷检测效果很差,即使是较大的矩形缺陷也得不到有效的电压反馈。

5 结 论

结合 COMSOL 仿真分析了涡流效应及漏磁效应在交流电磁场检测中的作用效果,建立了交流电磁场检测模型,并提出了在不同频率信号的激励下的非铁磁性金属试件的检测方式:中高频激励下可以对表面缺陷灵敏检出,而对于埋深缺陷低频激励更具有优势。

实验结果表明:低频 15 Hz 激励下可以检测到钢板背面的 5 mm 深度缺陷及表面 5 mm 矩形缺陷,探测深度可达 1.8 cm;而在中高频 700 Hz 信号激励下,通过减小待测试件内部磁场趋肤深度,增强表面磁场强度,可以检测到不锈钢板表面直径 5 mm,深 3 mm 的圆孔形小缺陷。又进一步分析了缺陷深度与电压幅值、相位之间的关系,

有利于非铁磁性金属探伤仪器的制作及后续的缺陷定位、定深等。

参考文献

- [1] 韩世勋. 特种设备检验中无损检测技术的应用分析[J]. 甘肃科技, 2020, 36(24): 24-25+3.
HAN SH X. Application analysis of nondestructive testing technology in special equipment inspection [J]. Gansu Science and Technology, 2020, 36(24): 24-25+3.
- [2] 袁浩. 承压设备无损检测与评价技术发展现状[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(11): 46-47.
YUAN H. The development of nondestructive testing and evaluation technology for pressure equipment [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(11): 46-47.
- [3] 胡丹, 高向东, 张南峰, 等. 焊缝缺陷检测现状与展望综述[J]. 机电工程, 2020, 37(7): 736-742.
HU D, GAO X D, ZHANG N F, et al. Summary of current situation and prospect of weld defect inspection [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(7): 736-742.
- [4] 黄松岭, 彭丽莎, 赵伟, 等. 缺陷漏磁成像技术综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 55-63.
HUANG S L, PENG L SH, ZHAD W, et al. Overview of defect magnetic flux leakage imaging technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 55-63.
- [5] 常予, 焦敬品, 李光海, 等. 漏磁传感器励磁结构影响因素分析及优化设计[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 7-17.
CHANG Y, JIAO J P, LI G H, et al. Influences and optimization of excitation structure of magnetic flux leakage sensor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 7-17.
- [6] 焦敬品, 常予, 李光海, 等. 铁磁构件内外表面裂纹低频漏磁检测技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1808-1817.
JIAO J P, CHANG Y, LI G H, et al. Study on low frequency AC magnetic flux leakage detection for and external cracks of ferromagnetic structures [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1808-1817.
- [7] LOU W M, SHEN C Y, ZHU ZH H, et al. Internal defect detection in ferromagnetic material equipment based on low-frequency electromagnetic technique in 20# steel plate [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16): 6540-6546.
- [8] WANG T, HE Y, CHEN Y, et al. Detection of a rectangular crack in martensitic stainless steel using a magnetoreactance sensing system [J]. IEEE Magnetics Letters, 2018, 9: 1-4.
- [9] 武新军, 张卿, 沈功田. 脉冲涡流无损检测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1698-1712.
WU X J, ZHANG Q, SHEN G T, et al. Review on advances in pulsed eddy current nondestructive testing technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1698-1712.
- [10] 赵亚飞. 基于涡流技术的钢板表面缺陷检测系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
ZHAO Y F. Research on surface defect detection system of steel plate based on eddy current technologists [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [11] 王培屹. 基于涡流效应的金属表面裂纹检测技术研究与应用[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
WANG P Y. Research and application of metal surface creak detection based on eddy current effect [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020.
- [12] 焦超飞. 不锈钢无缝短管内壁缺陷涡流检测方法装置研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019.
JIAO CH F. Study on eddy current testing method and device of stainless steel seamless short pipe inner wall defects [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2019.
- [13] 王闯龙, 武美先, 张东利, 等. 涡流渗透深度影响因素分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 45-51+7.
WANG CH L, WU M X, ZHANG D L, et al. Analysis of influencing factors of eddy current penetration depth [J]. Journal of Henan University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 41(3): 45-51+7.
- [14] 沈瑶, 石琳, 张岩亮. 基于 ANSYS Maxwell 的耦合电感仿真研究[J]. 中国教育信息化, 2020(22): 93-96.
SHEN Y, SHI L, ZHANG Y L, et al. Simulation of coupled inductor based on ANSYS Maxwell [J]. China Education Info, 2020(22): 93-96.
- [15] 王健, 滕永平, 傅迎光, 等. 铁磁材料脉冲涡流厚度检测中的边缘效应[J]. 无损检测, 2013, 35(8): 54-60.
WANG J, TENG Y P, FU Y G, et al. Edge effect in pulsed

eddy current detecting for ferromagnetic materials[J].
Nondestructive Testing, 2013,35(8):54-60.

- [16] 武新军,黄琛,丁旭,等. 钢腐蚀脉冲涡流检测系统的研制与应用[J]. 无损检测,2010,32(2):127-130.

WU X J, HUANG CH, DING X, et al. Research and application of pulsed eddy current testing instrument for steel corrosions [J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(2):127-130.

作者简介



张智超,2019年于山东科技大学获得学士学位,现为中国计量大学硕士研究生,主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail:17816857499@163.com

Zhang Zhichao received his B. Sc. degree in 2019 from Shandong University of Science and Technology. He is currently a master student in China Jiliang University, his main research interests include Electromagnetic nondestructive

testing.



沈常宇(通信作者),分别在1999年和2002年于陕西师范大学获得学士和硕士学位,2009年于浙江大学获得博士学位,现为中国计量大学教授,主要从事电磁无损检测、光纤传感、LED固体照明、非线性光学等方面研究。

E-mail:shenchangyu@cjl. edu. cn

Shen Changyu (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 1999 and his M. Sc. degree in 2002 both from Shaanxi Normal University, received his Ph. D. degree in 2009 from Zhejiang University. He is currently a professor of China Jiliang University. His main research interests include optical fiber sensing, electromagnetic nondestructive testing, LED solid-state lighting, nonlinear optics and other aspects of research.