

交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究*

吴德会, 游德海, 柳振凉, 张忠远

(厦门大学机电工程测试控制技术研究所 厦门 361005)

摘要: 随着管道、储罐的推广使用,管道、储罐腐蚀泄漏事故频发。漏磁检测方法是当前最频繁使用的管道无损检测技术。探讨了交流漏磁检测中趋肤深效应的机理。首先,对交流漏磁检测的涡流效应进行实验和分析;然后,根据麦克斯韦方程组推导出模型的三维交流漏磁场分布,分析了不同频率下钢板的磁力线分布情况,从而得出交流漏磁检测中趋肤深度的规律。最后,制造一系列人工缺陷并开展实际漏磁检测实验,以验证三维仿真结果的有效性,对进一步研究该方法的机理提供了理论和实验依据。

关键词: 交流漏磁检测;趋肤深度;无损检测;缺陷

中图分类号: TM154.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Mechanism and experimental research on skin depth in AC magnetic flux leakage testing

Wu Dehui, You Dehai, Liu Zhenliang, Zhang Zhongyuan

(Department of Electronic Mechanical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: With the wide use of pipelines and tanks, corrosion leakage accidents happen frequently. The magnetic flux leakage (MFL) testing method is currently the most commonly used nondestructive pipeline inspection technique. In this paper, the mechanism of the skin effect in AC MFL inspection is discussed. Firstly, the eddy current effects in AC MFL detection were tested and analyzed. Then, according to the Maxwell equations, the 3-D MFL field distributions were deduced, and the distributions of the magnetic induction lines under different frequencies in steel plate were analyzed, thus the law of the skin depth in AC MFL inspection was acquired. Finally, a set of artificial defects were made and the actual MFL test experiments were performed to verify the effectiveness of the 3-D simulation results, which provides a theoretical and experiment basis for further studying the mechanism of the method.

Keywords: AC magnetic flux leakage testing; skin depth; non-destructive test; defect

1 引言

在石化工业中,因油气输送管道、储罐使用周期过长、腐蚀损坏严重而造成的泄漏事故,严重威胁着油气输送和人员的安全,也对环境造成严重破坏^[1]。因此,油气输送管道、储罐的定期无损检测尤为必要,是避免泄漏污染以及经济损失的有效手段。相对其他的无损检测方法而言,漏磁检测法具有较高的检测速度和准确性,且不需

要耦合剂,因此是近年来国内外使用最广泛的管道、储罐缺陷检测技术^[2]。

漏磁检测中磁化方式是很重要的问题,根据所用励磁源的不同,其磁化方式有永磁、直流、交流和脉冲等形式^[3]。传统的漏磁检测一般采用直流磁化或永磁磁化,对内、外部(表层)缺陷均可检测。但该磁化方式需要将整个截面积均磁化致饱和才能形成漏磁场,因此所需磁化器体积较大,直流磁化时的电量消耗也较突出。而交流磁化中存在趋肤效应,能在被检试件中产生较强的涡

收稿日期: 2013-07 Received Date: 2013-07

* 基金项目: 国家自然科学基金(51177141)、福建省自然科学基金(2010J01310)、中央高校基本科研业务项目(0620ZK1007)资助

流,迫使磁力线相对集中在被测表层,很容易将表层较浅区域饱和磁化,对内表层缺陷敏感。目前的研究热点——脉冲漏磁检测技术本质上也是交流磁化的一种形式^[4]。

实际的工业探伤中,交流磁化方式多用于磁粉检测领域,其可促使磁粉产生交流力而增加灵敏度。Fujiwara等人尝试使用交流电磁场激励铁磁性材料的方法,实现了裂纹缺陷的在线漏磁检测^[5]; Yuji Gotoh和Norio Takahashi讨论了励磁频率为1 kHz情况下,对内表层缺陷进行精确检测的可行性,并成功实现2个以上裂纹所产生漏磁信号的区分^[6];在随后的研究中,Yuji Gotoh又进一步讨论了一种利用直流和交流混合磁化的方法来检测厚壁管外部缺陷的方法,该方法可充分利用磁化曲线的高灵敏部分,提高检测的灵敏度^[7]。在工程上,Foerster公司近年来已成功推出了利用U形磁轭探头的交流漏磁检测探伤仪,对铁磁性材料表层探伤效果明显优于直流和永磁磁化。国内学者近些年也已开展了卓有成效的研究,清华大学李路明、黄松岭教授从概率论角度讨论了交流漏磁检测中载波频率与调制波频率的关系,并得出有效的磁化频率的选取原则^[8];华中科技大学康宜华教授团队开展了针对石油领域中钻具螺纹、抽油杆等关键部件的交流漏磁检测,取得了较好的效果^[9]。

目前,国内外学者的工作主要针对表层探伤实现及提高检测灵敏度,而针对交流漏磁检测机理的探讨尚比较鲜见。文献[10]中,对其涡流场作用机制开展了首次探索,有比较明显的学术贡献。但在现有研究中,对交流漏磁检测中趋肤效应现象尚没有开展机理分析和实验研究,均是比较简单地将其等同于涡流检测的趋肤效应。

本文从实验和机理分析方面出发,对现有交流漏磁检测中趋肤效应的理解提出了质疑。研究了交流漏磁检测中背景磁感应强度受励磁强度的影响规律,分析了交变磁力线分布与励磁频率之间的关系。通过三维有限元仿真,分析了磁轭探头形成涡流场的特性,并研究其对交变磁力线分布的影响,从而得出交流漏磁检测中趋肤深度的规律。该工作中探讨的交流漏磁检测中涡流场特性、交变磁力线分布、趋肤深度规律等内容,对进一步研究该方法的机理提供了理论和试验依据。

2 交流漏磁检测中涡流效应的机理分析

交流漏磁检测的原理与直流或永磁漏磁检测一样。不同的是交流漏磁检测的磁化采用了交变的磁场^[11],因而,其磁化器和检测信号的处理方式不同。现有研究中多采用U形磁轭结构,并绕制励磁线圈建立磁化器^[12]。利用正弦电流激励磁化器的励磁线圈时,磁轭中将产生对应频率和强度的交变磁化场,并与被检试件形成磁回路。

在涡流检测技术中,对于深度无限的平面导体,其涡流密度的分布随着距导体表面的距离(垂直深度)呈指数规律衰减。涡流渗入导体内的距离称为渗透深度,定义涡流密度衰减到其表层值 $1/e$ 时的透入深度为标准渗透深度,也称为趋肤深度。趋肤深度与激励频率、导体的电导率和磁导率都有关系,其值为:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中 δ 为趋肤深度, ω 为信号角频率, μ 为金属导体的磁导率, σ 为金属导体的电导率。

但是,由于U形磁轭探头结构的特殊性,交流漏磁检测中所激励的感生涡流场分布与常规涡流检测还是有比较明显的差别。U形磁轭探头激励的感生涡流主要由2部分构成:一部分围绕2个极靴,主要分布于试件表层,本文称之为极靴涡流场,其分布如图1所示。

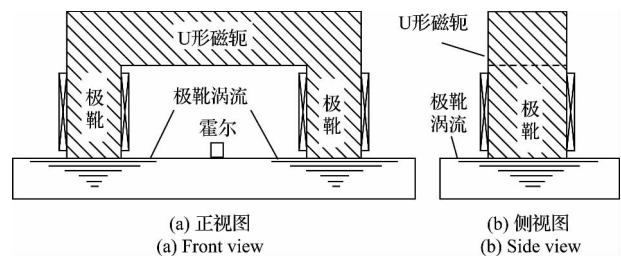


图1 极靴涡流场分析示意图

Fig. 1 Analysis diagram of pole shoe vortex flow field

极靴涡流场的作用是对进入被测试件的磁化场形成阻尼,其对磁化场的影响与涡流检测中的趋肤效应比较接近。而且由于铁磁性材料磁导率较高,根据式(1)和麦克斯韦方程,试件中的极靴涡流渗透深度很浅,磁感应强度较大。如果将霍尔元件置于极靴附近,则可有效检测缺陷对极靴涡流场的扰动,此时即为标准的涡流检测方法。但是,在交流漏磁检测中,霍尔元件被置于U形磁轭的两极靴中间,其受极靴涡流场波动的影响较小。

另一部分感生涡流场围绕被测试件内部磁路分布,这里称之为磁路涡流场,其分布如图2所示。

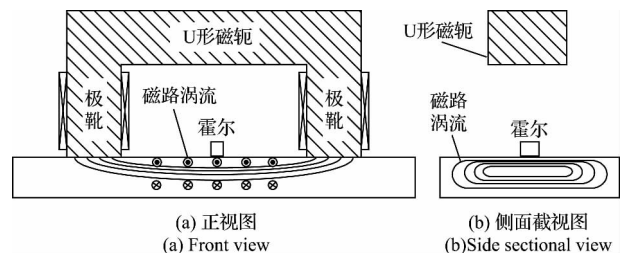


图2 磁路涡流场分析示意图

Fig. 2 Analysis diagram of magnetic circuit vortex flow

由图2可以看出,交流漏磁检测中的检测点(霍尔元

件正下方) 主要受磁路涡流场的影响。而磁路涡流场的法方向平行于被测试件表层, 其对交流磁化场在垂直深度上渗透的阻尼作用非常有限。

当然, 式(1)中描述的趋肤效应现象是在一定条件下得到的, 属于框架性模型; 因此对于本文所讨论的交流漏磁检测的具体问题和对象, 存在一定的局限性。而通过本文中机理角度的定性分析来看: 交流磁化场受到极靴涡流场和磁路涡流场的共同作用, 其在被测试件内的分布明显比平面涡流漏检测的框架模型更为复杂。为进一步开展有效的定量分析, 建立交流漏磁检测的三维有限元仿真模型, 以分析交流励磁作用下实际磁化场的分布及其在被测钢板表层的渗透规律。

3 交流磁化场分布的仿真分析

3.1 交流漏磁检测三维仿真模型建模

漏磁检测中的电磁现象仍遵守电磁学理论, 因此可以用麦克斯韦方程组进行描述, 参考相似的交流电磁场分析过程^[13], 可建立如下微分方程式:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

式中: \mathbf{H} 是磁场强度, \mathbf{J} 为电流密度, \mathbf{D} 为电位移, t 为作用时间, \mathbf{E} 为电场强度, \mathbf{B} 是磁通密度。

同时为了得到确定的解, 需要加上本构关系矢量方程:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4)$$

式中: μ 为介质磁导率, ϵ 为电常数, σ 为介质电导率。

由于磁场的无源性, 引入矢量磁势 \mathbf{A} , 则有:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

由于电场的无旋性, 可以表示为一个标量函数的梯度, 同时考虑到时间导数和旋度的运算可以交换, 把电场用如下函数表示:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \varphi \quad (6)$$

式中: φ 为标量电位。

在变频激励所激发的交变磁场中, 把涡流场的场域分成涡流区和非涡流区 2 部分, 将式(4)和式(5)代入式(1)和式(2), 在似稳场情况下, 忽略式(1)中的电位移可得式(7)、(8):

$$\text{涡流区: } \nabla \times \nabla \mathbf{A} = -\mu \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mu \sigma \nabla \varphi \quad (7)$$

$$\text{非涡流区: } \nabla \times \nabla \mathbf{A} = \mu \mathbf{J}_s \quad (8)$$

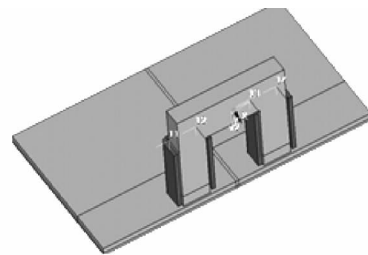
式中: \mathbf{J}_s 源电流密度。

在给定的区域和边界条件下, 对式(7)和式(8)分

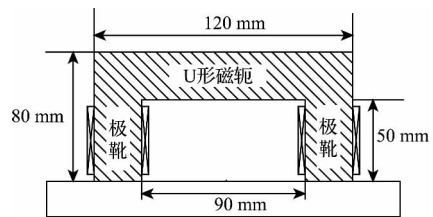
别进行求解, 可得到交变磁场下的矢量磁势 \mathbf{A} , 然后根据式(5)进行运算即可得到瞬态的磁感应强度 \mathbf{B} , 即所求瞬态漏磁场分布。由于用解析法对式(7)和式(8)求解难度很大, 可用有限元法进行求解^[14]。

本文中采用有限元仿真分析软件 ANSYS, 对 U 形磁轭探头模型的磁化场分布进行三维建模分析。由于交流磁化场励磁信号的时域特点, 需对所建模型进行三维瞬态磁场分析。具体可采用 ANSYS 软件中的 EMAGE 模块进行三维模拟, 并使用参数设计语言 (APDL) 进行建模和分析。

利用 ANSYS 进行磁场分析一般包括前处理(设立单元类型、模型建立和网格划分)、加载求解以及后处理(分析结果) 3 个步骤。而三维有限元瞬态磁场的求解需要多个载荷步才能完成, 因此所占计算机资源大、计算所需时间长。为减少计算时间, 这里对钢板局部实体进行对称建模, 其三维建模结果如图 3 所示。



(a) 包含线圈的 U 形磁轭探头三维模型
(a) The 3-D model of the U-shape magnetic yoke probe with coil



(b) 二维尺寸图
(b) 2-D dimension

图 3 交流漏磁检测的三维有限元分析建模

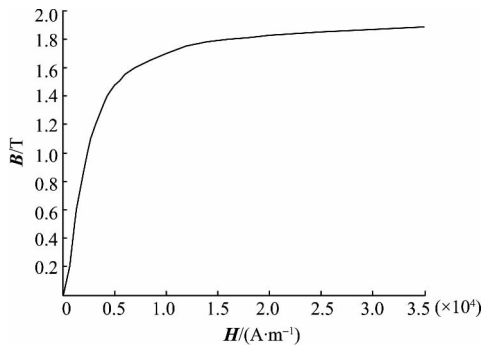
Fig. 3 Three dimension FEA model of AC-MFL testing

模型中, 磁轭为 U 形铁氧体磁轭, 其相对磁导率为 10 000, 线圈为 1 mm 线径漆包线在两极靴线框上各绕制 100 匝, 交流激励电流设置为 0.5 A。仿真模型中 U 形磁轭外型尺寸如图 3(b) 所示。

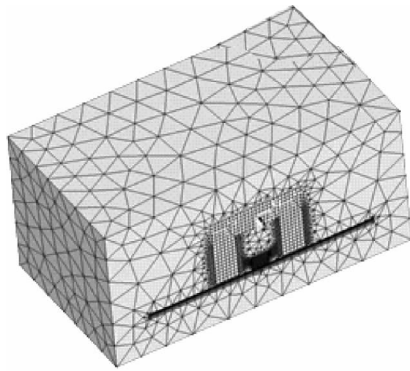
由于该模型有空气、磁轭、被测钢板等 2 种以上的不同磁导率的单元, 因此选择 soild236 单元进行有限元求解, 以满足交界处的边界条件和计算精度要求。实际所建三维有限元仿真模型中, 还涉及的其他结构参数包括: 空气的相对磁导率为 1; 钢板长度为 400 mm, 宽度 350 mm, 厚度为 5 mm, 电导率为 1.71×10^{-7} , 设置的 $\mathbf{B}-\mathbf{H}$ 曲线如图 4(a) 所示。建模时由于 soild236 没有对应

的远场单元,因此实验中经反复测试,对包含模型的空气边界取其求解区域的5倍,即可获得较好的求解精度。

由于交变磁场存在趋肤效应,为得到较高的计算精度需要在导体表层划分足够细的有限元网格。通常在趋肤深度内至少要划分一层单元,因此本文在设置剖分单元时,对钢板进行渐变剖分,即在靠近线圈的表层(首层单眼)划分的单元尺寸为钢板厚度的1/30,越往下尺寸越大,直至最后一层单元尺寸为首层的5倍。同时为了得到更精确的计算结果,缺陷上方空气单元的剖分尺寸为钢板厚度的1/10。图4(b)给出了模型有限元单元剖分情况。



(a) 钢板B-H曲线
(a) B-H curve of the steel plate



(b) 模型有限元剖分图
(b) The FEM subdivision model

图4 被测钢板 B-H 曲线及其有限元剖分模型

Fig. 4 B-H curve and finite element subdivision model of the tested steel plate

3.2 交流磁化场分布特性

为研究交流磁化场的实际分布及其在被测钢板表层的渗透规律,实验中保持励磁电流大小不变,并改变励磁电流的频率分别为:100 Hz、200 Hz、500 Hz、1 kHz、2 kHz、3 kHz、4 kHz、5 kHz,进行多次实验。求取不同励磁频率下,对称面背景磁场达到最大时的磁力线分布。图5中(a)~(d)4个子图分别给出了励磁频率分别为100 Hz、500 Hz、1 kHz和5 kHz时,背景漏磁场在对称面上的磁力线分布。

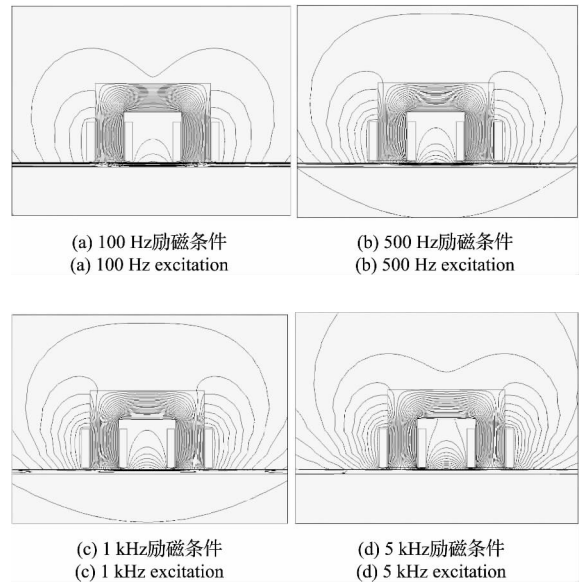


图5 不同励磁频率下模型对称面的磁力线分布

Fig. 5 Magnetic force line distribution on the model symmetry plane under different frequencies

对比图5中不同励磁频率下的磁力线分布不难看出,在励磁频率较低时,交流漏磁检测的磁力线趋肤深度与涡流检测的情况类似,即趋肤深度随励磁频率上升而变浅。但是对比图5(c)和5(d)又可以发现,交流漏磁检测中磁力线的趋肤深度并不是随励磁频率上升而持续变浅。当频率到达1 kHz之后,其趋肤深度变化趋缓,逐渐稳定在1 mm左右。为解释这现象,对1 kHz励磁条件下的磁力线分布进行局部放大,其结果如图6所示。

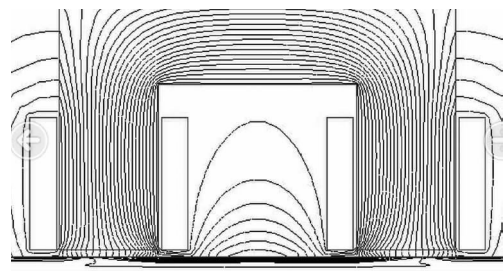


图6 1 kHz 励磁条件下的磁力线局部分布

Fig. 6 Partial magnetic force line distribution under 1 kHz condition

从图6中仿真得到的交流磁力线分布结果来看,与机理定量分析的结论基本一致。在极靴处,极靴涡流场方向与交流磁力线穿透方向垂直,因此极靴附近的交流磁力线空间分布确较为疏松。而在两个极靴之间,仿真分析得到的磁力线会由钢板表层向其内部逐渐渗透,形成相对稳定的渗透层,这也有效验证了机理分析中,磁路涡流场对钢板垂直深度上的渗透无阻尼作用的结论。

由于在漏磁检测中,霍尔传感器置于两极靴之间,则主要受磁路涡流场的影响。从定量角度来看:当交流漏

磁检测的励磁频率达到 1 kHz 时,其在漏磁检测点的趋肤深度不再减小并逐渐稳定在 1 mm 左右。因此在交流漏磁检测中进一步提高励磁频率,对提高表面/亚表面缺陷的检测能力贡献不大。

4 交流磁化实验平台的构件

为验证仿真分析中得到交流磁力线空间分布的有效性,以实际钢板为检测对象,构建交流漏磁检测的试验系统。整个实验系统主要由信号源、功率放大模块、激励线圈、霍尔探头、信号调理模块、数据采集模块等几个部分组成,系统构成框图如图 7(a) 所示。

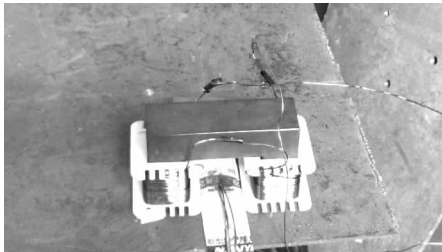
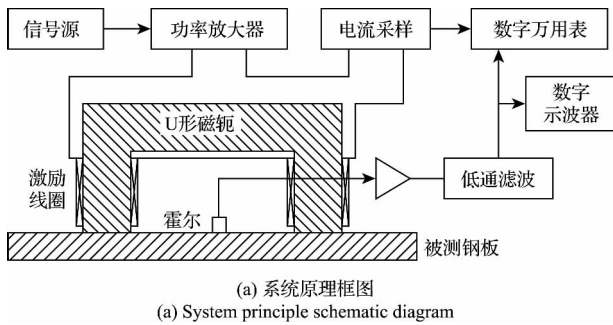


图 7 交流漏磁检测实验系统

Fig. 7 Experiment system of AC-MFL testing

在本实验中,信号源选用 DG2041A 函数/任意波形发生器,主要产生 2 Hz ~ 5 kHz 频率范围、幅值任意可调的连续正弦激励信号。功率放大器采用 TDA7293 设计的大功率并联 BTL 型 350W 功放板,主要作用是将激励信号进行功率放大,再加载到激励线圈两端。激励线圈采用双线圈对称性结构,2 组线圈之间串联构成,线圈采用线径为 1 mm 的漆包线各绕制 100 匝。线圈对称安装于具有高导磁性能的高频 U 形铁氧体磁轭的 2 个极靴上。由于加载于 2 组线圈的激励电流相反,故其产生的外部磁化场在漏磁检测点(一般为磁轭中心线位置)方向相反,相互抵消达到自差分的效果,可有效减小线圈励磁空气泄漏(尤其在法向方向)对检测结果的影响。

霍尔探头选用模拟型 UGN3503,垂直放置漏磁拾取点并保持 0.5 mm 的脱离值,以检测漏磁场的水平分量,同时将检测信号经过信号调理模块进行去噪滤波。信号

调理模块主要包含信号的前置放大电路和滤波电路 2 部分。前置放大电路选用高精度仪表放大器 AD620,并与滤波电路配合在测量范围(10 Hz ~ 5 kHz)内实现稳定的 5 倍增益。滤波电路采用了 6 阶巴特沃兹低通滤波器,以有效抑制干扰信号。

漏磁检测中激励对象为感性负载,则在交流磁化条件下,恒定激励电压产生的励磁效果受频率影响明显。频率越高,激励对象的感抗越大,实际励磁强度对应衰减,因此本文中通过对线圈实际电流的采样来控制励磁强度。使用 6 位半高精度台式万用表 TH1961 监测线圈励磁电流 I 有效值,并测量漏磁场拾取信号强度。同时,可用数字示波器 GDS-4102AU 观测交流漏磁场检测实际输出波形。

为测试交流励磁方式下被测试件内、外部实际磁化场的分布,研究背景漏磁场与励磁强度之间的关系开展了如下实验。实验中被测试件选用普通低碳钢板 Q235 材质,无缺陷;钢板厚为 5 mm,宽度为 350 mm,长度 400 mm。实验时,将 U 形磁轭置于被测钢板正中央,设置信号源正弦交流励磁频率 f 为 100 Hz。调整功率放大器的增益使实际作用于励磁线圈电流 I 有效值为 0.5 A,实际采样电流波形如图 8(a) 中曲线所示。

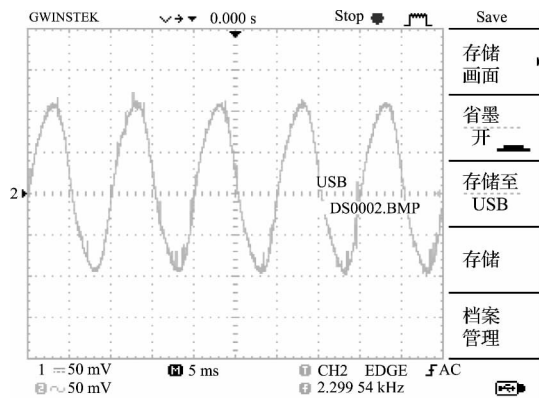
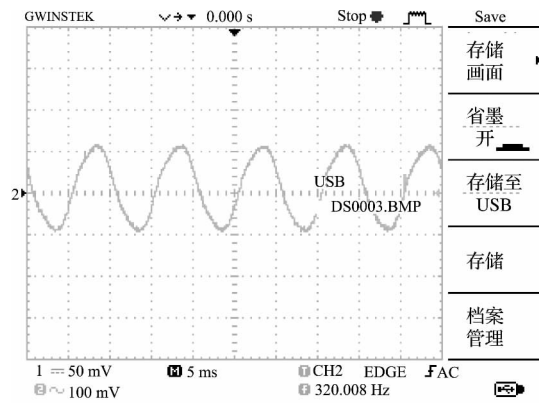


图 8 交流漏磁检测中励磁与漏磁信号

Fig. 8 Excitation and MFL signal in AC-MFL testing

从图 8(a) 可以看出,理想的正弦电压作用于检测探头的实际励磁电流(特别是在励磁峰值)呈现较明显的畸变,这主要是由于 U 形磁轭和钢板的磁滞特性(非线性)造成。从该曲线的畸变程度也表明,在交流励磁的峰值附近,钢板的磁化已接近饱和状态。

再使用霍尔探头 UGN3503 拾取被测钢板表层空气的交流漏磁场,经放大及低通滤波器去噪,实测电压波形如图 8(b) 中曲线所示。从图中可以看出,在交流励磁条件下,霍尔探头拾取的漏磁场磁感应强度亦为交变信号,其形态与励磁电流波形一致。由此看来,所建实验平台可对被测钢板实施有效的交流励磁,实测的交变漏磁场信噪比较高;因此,可利用该系统开展交流漏磁检测中励磁强度、频率对被测钢板内部涡流分布影响规律的实验验证。

5 物理实验与分析

5.1 交流励磁条件下的漏磁场分布

首先针对无缺陷的 Q235 低碳钢板,设置信号源正弦交流励磁的频率 f 分别为 5 Hz、10 Hz、20 Hz、100 Hz。对于同一励磁频率,再通过调整功放增益以改变实际励磁电流 I 强度进行实验。实验时,励磁电流 I 从 0.1 A ~ 1.0 A 变化,每间隔 0.1 A 进行一次实验。记录不同励磁频率下的漏磁场磁感应强度信号峰值 U_{MFL} (背景漏磁信号)并与励磁电流 I 进行对比,绘制两者关系曲线如图 9 所示。

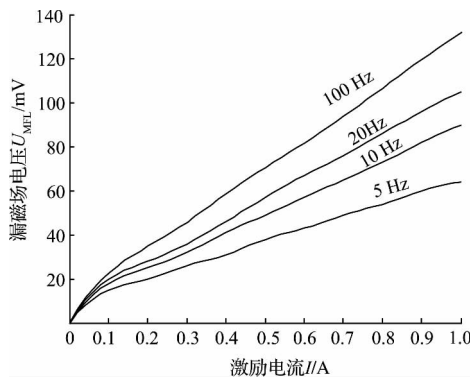


图 9 交流磁化下背景漏磁信号与励磁电流关系曲线

Fig. 9 Relation curve between MFL signal and excitation current in AC-MFL testing

从图 9 可以看出,对于任意确定频率的交流磁化过程,磁感应强度 U_{MFL} (背景漏磁)随励磁电流增加近似线性增加。但对比 5 Hz、10 Hz、20 Hz、100 Hz 3 条不同频率的关系曲线,可以看出,对于相同的励磁电流,励磁频率越高,背景漏磁感应强度越大。该实验结果说明:在交流漏磁检测中趋肤效应确实存在。若在上述范围内保持励

磁强度不变而提高励磁频率,磁化场的渗透深度逐渐变浅,从而造成被测钢板表层局部磁化强度增大。该结论与交流漏磁场的仿真分析结果(如图 5(a) 所示)相一致。

为进一步研究交流励磁条件下漏磁场的分布特性,分析其趋肤效应对表层空气中漏磁场感应强度的影响程度,通过调整励磁频率以测试漏磁检测信号的变化规律。实验对象为 5 mm 和 8 mm 的 Q235 低碳钢板。保持实际励磁电流 I 为 0.5 A 不变,设置信号源正弦交流励磁的频率 f 从 10 Hz ~ 5 kHz 变化,其中 100 Hz 以下每 10 Hz 试验一次,100 Hz ~ 1 kHz 每隔 100 Hz 试验一次,1 kHz 以上每 1 kHz 试验一次。

用示波器分别读取不同励磁频率下背景漏磁场感应强度 U_{MFL} ,绘制两者关系曲线如图 10 所示。

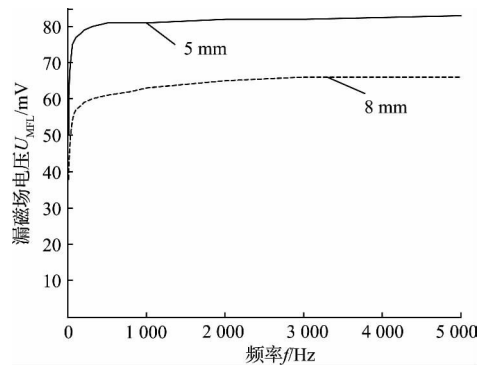


图 10 交流磁化下背景漏磁信号与励磁频率的关系曲线

Fig. 10 Relation curve between MFL signal and excitation frequency in AC-MFL testing

从图 10 中可以看出,在恒定励磁电流的交流磁化过程中,被测钢板表层的背景漏磁场磁感应强度 U_{MFL} 随励磁频率变化非常明显。当励磁频率较低($f < 50$ Hz)时,交流漏磁检测的效果与直流/永磁漏磁检测的情况比较接近。而当励磁频率增高时,背景漏磁信号也呈现近似线性的增加,这主要是由于交流漏磁的趋肤效应使磁化场变浅,促使钢板近表层局部磁化饱和而造成。但是,从图 10 中所示的实测 U_{MFL} 与励磁频率关系曲线来看,当励磁频率超过一定范围之后(大约 1 kHz 左右), U_{MFL} 逐渐趋于稳定,基本不再随励磁频率的提高再明显增大。该物理现象与仿真分析得到励磁频率达到 1 kHz 后,漏磁检测点的趋肤深度不再减小的结论相吻合。

5.2 交流漏磁检测的探测能力

如何验证仿真分析得到的钢板内部交流磁力线分布的真实性和一般性,是一个棘手问题。本文在霍尔传感器正下方,通过人工加工不同深度的试探性凹槽,试验交流漏磁检测的探测能力,从而对其实际趋肤深度进行物理定量评价。

为不失一般性,分别取 3 mm、5 mm 和 8 mm 厚的

Q235 低碳钢板, 并加工深度为 3 mm、长度为 100 mm 的长方体试探性凹槽作为人工预制裂纹。根据仿真分析的结论, 高频条件下(1 kHz 以上) 交流漏磁检测的趋肤深度最终稳定在 1 mm 左右。因此, 对于 3 mm 的 Q235 钢板, 试探性凹槽深度分别为 1 mm 和 2 mm; 对于 5 mm 钢板, 凹槽深度定为 3 mm 和 4 mm, 而对于 8 mm 钢板, 凹槽深度定为 5 mm 和 7 mm。而且, 在实际物理测试过程中, 分别将裂纹面朝上(正面)和裂纹面朝下(背面)进行 2 组实验, 以有效扩大实验范围, 验证实验结论的一般性。

下面以 5 mm 被测钢板为例。虽然人工预制试探性凹槽深度定为 3 mm 和 4 mm, 但通过正面和背面 2 组实验, 实际可对被测钢板内部 1 mm、2 mm、3 mm 和 4 mm 深度的磁化场分布进行定量探测。试探性凹槽的位置与交流磁力线分布(趋肤效应影响)的关系示意如图 11 所示。

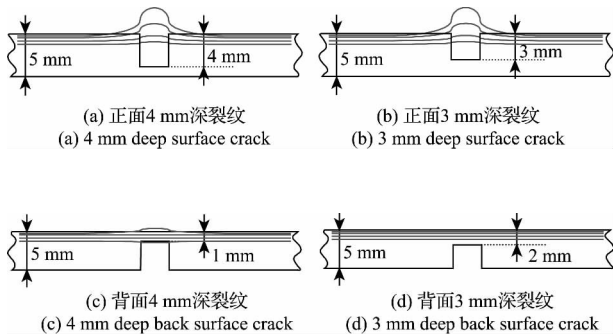


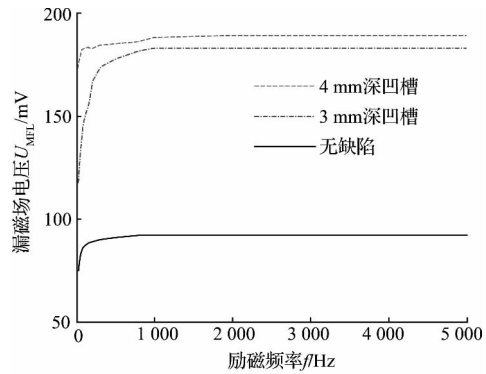
图 11 正、背面试探性凹槽与交流磁化场分布示意(5 mm 厚被测钢板)

Fig. 11 Magnetic field distribution of surface and back surface defects

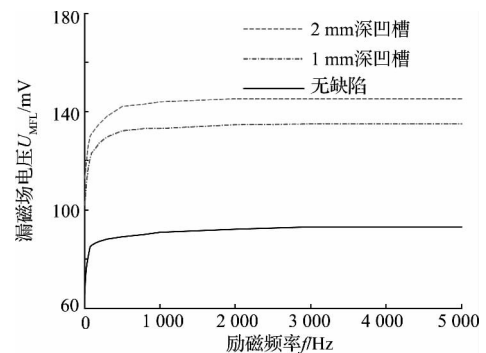
5.3 正面裂纹的漏磁探测结果与分析

用课题组构建的交流磁化实验平台分别对包含人工预制裂纹的 3 mm、5 mm 和 8 mm 厚 Q235 低碳钢板进行探测。首先, 保持人工预制裂纹的钢板面向上, 即正面探测。探测时, 对不同深度(1~7 mm)的试探性凹槽始终保持励磁强度不变, 即励磁电流 I 有效值恒为 0.6 A, 励磁频率 f 从 10 Hz~5 kHz 变化, 其中 100 Hz 以下每 10 Hz 试验一次, 100 Hz~1 kHz 每隔 100 Hz 试验一次, 1 kHz 以上每 1 kHz 试验一次。

针对每个正面的试探性凹槽实际测试 25 次, 用数学示波器记录不同励磁频率 f 下对应的交流漏磁信号强度 U_{MFL} 。绘制不同深度的试探性凹槽, 其检测得到的交流漏磁信号强度 U_{MFL} 与励磁频率 f 之间的对应关系曲线。图 12 中反给出了 3 mm 和 5 mm 厚钢板的实际结果。



(a) 5 mm 厚钢板正面探测
(a) Surface detection of 5 mm thick steel plate



(b) 3 mm 厚钢板正面探测
(b) Surface detection of 3 mm thick steel plate

图 12 针对正面裂纹(凹槽)的交流漏磁强度与励磁频率关系

Fig. 12 Relation curves between MFL signal and excitation frequency for surface defects

在正面裂纹的测试条件下, 针对不同深度试探性凹槽, 检测得到的交流漏磁强度 U_{MFL} 与磁化场在钢板内的趋肤深度密切相关; 针对图 12 所示的变化曲线, 可进行如下分析:

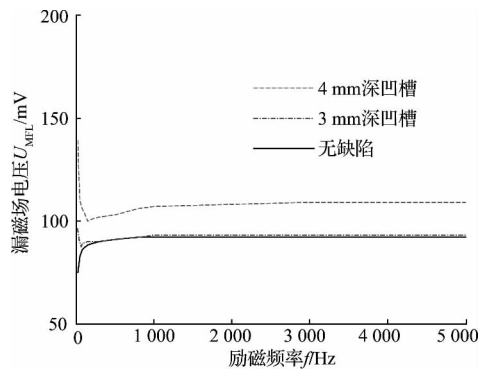
分析 1: 所有正面裂纹的交流漏磁信号强度 U_{MFL} 均随励磁频率 f 的提高而增加, 该实验说明交流漏磁检测的趋肤效应确实存在。

分析 2: 以 4 mm 深的试探性凹槽为例, 其漏磁信号 U_{MFL} 在 0~100 Hz 范围内变化较显著。但对于 100 Hz 以上的励磁条件, 其漏磁信号 U_{MFL} 变化反而趋缓, 近似通孔的检测效果。其他厚度钢板的检测结果, 也有类似的结果。该实验可定量说明, 100 Hz 磁化场在钢板表面内的渗透深度约为 4 mm。因此, 通过实际 Q235 低碳钢板上不同深度的试探性凹槽, 可得到 1~4 mm 渗透深度对应的励磁频率分别为: 1 000 Hz、500 Hz、300 Hz 和 100 Hz。

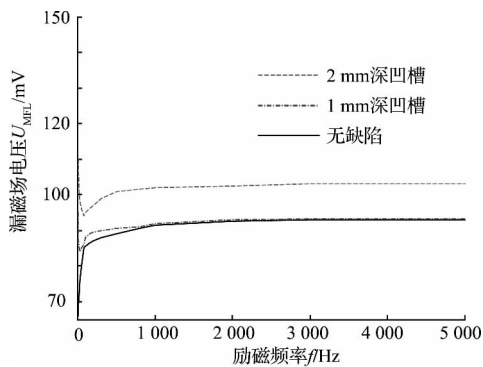
分析 3: 针对不同深度的试探性凹槽, 当励磁频率 f 超过 1 kHz 后, 实测交流漏磁信号强度 U_{MFL} 均不再随 f 变化。这与仿真分析中得到励磁频率达到 1 kHz 后, 漏磁检测点的趋肤深度不再减小的结论相吻合。

5.4 背面裂纹的漏磁探测结果与分析

再将上述实验对象(人工预制不同深度试探性凹槽的3 mm、5 mm和8 mm厚Q235低碳钢板)翻转,并凹槽面向下,即背面探测。保持上述所有的实验参数不变,再进行针对背面裂纹的交流漏磁检测试验。同样,每个背面的试探性凹槽实际测试25次,用数学示波器记录下不同励磁频率 f 所对应的交流漏磁信号强度 U_{MFL} 。考虑到篇幅有限,图13中仅给出了3 mm和5 mm深背面试探性凹槽的交流漏磁信号强度 U_{MFL} 与励磁频率 f 之间的对应关系曲线。



(a) 5 mm厚钢板背面探测
(a) Back surface detection of 5 mm thick steel plate



(b) 3 mm厚钢板背面探测
(b) Back surface detection of 3 mm thick steel plate

图13 针对背面裂纹(凹槽)的交流漏磁强度与励磁频率关系

Fig. 13 Relation curves between MFL signal and excitation frequency for back surface defects

直流/永磁漏磁检测技术可对正面、背面的缺陷进行同时探测,两者信号差别并不显著^[15];而由于趋肤效应的影响,交流漏磁检测技术针对正面、背面缺陷的漏磁信号却存在较明显的差异。而且,从图13中所示的背面凹槽的交流漏磁强度 U_{MFL} 与励磁频率 f 的关系曲线来看,其检测信号具有比较突出的新特性,具体可开展如下分析:

分析1:所有背面裂纹的漏磁检测信号 U_{MFL} 均呈现

随 f 先迅速衰减,再缓慢上升直至趋于稳定值的分布特点。分析其原因主要是当励磁频率 f 较低(0~200 Hz)时,交流漏磁检测对背面裂纹有一定的探测能力,因此其信号随 f 的增加而迅速减小。但若励磁频率 f 进一步增加,则受趋肤效应的影响,背景漏磁场信号又得到有效增强。

分析2:从图13中可以看出,对于3 mm(见图13(a))和1 mm(见图13(b))深的背面试探性凹槽,200 Hz以上励磁条件下的交流漏磁信号强度 U_{MFL} 与无缺陷时的漏磁信号几乎完全重合。该实验结果亦与文献[16]中的三维仿真分析结果基本一致。这也说明,交流漏磁检测技术受趋肤效应的影响,对钢板表面2 mm以下深度无探测能力(见图11(d))。

分析3:以4 mm(见图13(a))和2 mm(见图13(b))深的背面试探性凹槽为例,当励磁频率达到1 kHz以上时,其 U_{MFL} 值趋于稳定。此时,从量化结果来看,其探测深度勉强可达到钢板表面1 mm以下(见图11(c))。该实验结果与仿真分析中得到的漏磁检测点磁力线渗透深度逐渐稳定在1 mm左右的量化结果相一致。因此交流漏磁检测对背面浅层缺陷没有探测能力,仅适用于接近板厚的深层背面缺陷的探查。

6 结 论

交流漏磁检测的背景信号强度 U_{MFL} 与励磁电流 I 、励磁频率 f 有关。当励磁频率 f 不变时, U_{MFL} 随励磁电流 I 的增加近似线性增加。而对于恒定励磁电流 I 的交流漏磁检测, U_{MFL} 增加随励磁频率 f 提高而减缓,并逐渐趋于稳定值。

交流漏磁检测中U形磁轭的感生涡流主要由极靴涡流场和磁路涡流场组成。极靴涡流场对进入被测试件的磁化场形成明显的阻尼,是产生交流漏磁检测趋肤效应的主要原因。而磁路涡流场的法方向平行于被测试件表层,对磁化场垂直深度上渗透的阻尼作用有限,其主要作用是形成稳定的渗透层。

交流漏磁检测存在趋肤效应。磁轭极靴附近的趋肤深度与涡流检测的情况类似,而在漏磁检测点的趋肤深度并不随励磁频率 f 的增加而无限减小。仿真和实验结果表明,交流漏磁检测的励磁频率 f 达到1 kHz时,其趋肤深度(即渗透层厚度)达到稳定,实测值为1 mm左右。

交流漏磁检测的趋肤效应能强化表层的检测效果和灵敏度,适合对内表层缺陷的检测,但其对缺陷深度的敏感性不强;而交流漏磁检测对外表面浅层缺陷几乎没有探测能力,只可用于接近板厚(差值小于1 mm)的深层外部缺陷的探查。

参考文献

- [1] 杨理践,赵洋,高松巍.输气管道内检测器压力-速度模型及速度调整策略[J].仪器仪表学报,2012,33(11):2407-2413.
YANG L J,ZHAO Y,GAO S W. Pressure-velocity model and speed adjustment strategy for in-pipe detector in gas pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2407-2413.
- [2] 吴德会,黄松岭,赵伟,等.油气长输管道裂纹漏磁检测的瞬态仿真分析[J].石油学报,2009,30(1):136-140.
WU D H,HUANG S L,ZHAO W, et al. Transient simulation analysis on MFL testing for crack in long-distance oil and gas pipeline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 136-140.
- [3] 宋凯,康宜华,孙燕华.漏磁与涡流复合探伤时信号产生机理研究[J].机械工程学报,2009,45(7):233-237.
SONG K,KANG Y H,SUN Y H. Study of signal mechanism based on combining magnetic flux leakage and eddy current testing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(7): 233-237.
- [4] 唐莺,潘孟春,罗飞路.脉冲漏磁检测技术中传感器性能影响因素研究[J].仪器仪表学报,2010,31(12):2875-2880.
TANG Y,PAN M CH,LUO F L. Study on effect factors of sensor performance in pulsed magnetic flux leaking testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(12): 2875-2880.
- [5] FUJIWARA H,SAKAMOTO T,NISHIMINE T, et al. Development of ac magnetic leakage flux testing system [C]. International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2001: 527-528.
- [6] GOTOH Y,TAKHASHI N. Study on problems in detecting plural by alternating flux leakage testing 3-D nonlinear eddy current analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1527-1530.
- [7] GOTOH Y,SAKURAI K,TAKAHASHI N, et al. Electromagnetic inspection method of outer side defect on small and thick steel tube using both AC and DC magnetic fields [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4467-4470.
- [8] 李路明,黄松岭,施克仁.漏磁检测的交直流磁化问题[J].清华大学学报:自然科学版,2002,42(2):154-156.
LI L M,HUANG S L,SHI K R, et al. AC and DC magnetizing for magnetic flux leakage testing [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2002, 42(2): 154-156.
- [9] 宋凯,康宜华,孙燕华,等.基于U形探头的ACFM和AC-MFL法的机理辨析[J].测试技术学报,2010,24(1):67-72.
SONG K,KANG Y H,SUN Y H, et al. Signal mechanism of ACFM and AC-MFL method based on U-shape inducer [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2010, 24(1): 67-72.
- [10] 宋凯,陈超,康宜华,等.基于U形磁轭探头的交流漏磁检测法机理研究[J].仪器仪表学报,2012,33(9):1980-1985.
SONG K,CHEN CH,KANG Y H, et al. Mechanism study of AC-MFL method using U-shape inducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 1980-1985.
- [11] GOTOH Y,TAKAHASHI N. Proposal of detecting method of plural cracks and their depth by alternating flux leakage testing 3-D nonlinear eddy current analysis and experiment [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 655-658.
- [12] SHARATCHANDRA SINGH W,RAO B P C,VAIDYANATHAN S, et al. Detection of leakage magnetic flux from near-side and far-side defects in carbon steel plates using a giant magneto-resistive sensor [J]. Measurement and Technology, 2008, 19(1): 1-8.
- [13] MIYATA K,OHASHI K,MURAOKA A, et al. 3-D magnetic field analysis of permanent-magnet type of MRI taking account of minor loop [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1451-1454.
- [14] GOTOH Y,TAKAHASHI N. Evaluation of detecting method with ac and dc excitations of opposite-side defect in steel using 3-d nonlinear FEM taking the minor loop into account [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1622-1625.
- [15] RAMREZ A R,MASON J S D,PEARSON N. Experimental study to differentiate between top and bottom defects for MFL tank floor inspections [J]. NDT&E International, 2009, 42(1): 16-21.
- [16] GOTOH Y,TAKAHASHI N. Proposal of detecting method of outer side crack by alternating flux leakage testing using 3-D nonlinear FEM [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1415-1418.

作者简介



吴德会, 2006 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为厦门大学副教授, 主要研究方向为无损检测、传感器技术、智能测控技术。

E-mail: wudehui@xmu.edu.cn

Wu Dehui received his Ph. D. degree in 2006 from Hefei University of Technology; now he is an associate professor in Xiamen University. His main research interests include NDT sen-

sor technology and intelligent measurement and control technology.



柳振凉(通讯作者), 2011 年于中南大学获得学士学位, 现为厦门大学硕士研究生, 主要研究方向为无损检测。

E-mail: luizhenliang@126.com

Liu Zhenliang (Corresponding author) received his bachelor degree in 2011 from Central South University; now he is a master student in Xiamen University. His main research direction is NDT.