

小型磁化器条件下的变励磁 MFL 检测新方法^{*}

王晓红, 吴德会, 李雪松, 黄一民, 杨秀森

(厦门大学机电工程系 厦门 361005)

摘要: 为解决常规储罐和管道的漏磁检测(MFL)方法中磁化器体积大、耗能多的缺点,提出了一种小型磁化器条件下的变励磁 MFL 检测新方法。首先,分析了小磁化器条件下被测钢板磁化状态随外部励磁强度的变化特性,推导了偏置磁化条件下励磁通变化量与漏磁场变化率的关系模型;其次,根据所建立的关系模型,设计了一种新型变励磁 MFL 检测探头,并给出变励磁 MFL 法的系统实现方案;再次,结合实现方案,搭建了变励磁 MFL 相应的实验平台;最后,在该平台上,开展了一系列的物理实验并对实验结果进行了深入讨论。实验结果表明,所提变励磁 MFL 法无需对被测钢板进行局部饱和磁化,适合小型磁化器条件并具有较高的灵敏度。变励磁 MFL 法为漏磁检测领域提供了一种新的检测思路。

关键词: 小磁化器; 直流偏置磁化; 交变励磁; 漏磁场变化率; 交变漏磁场

中图分类号: TH878+.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

New method of variable excitation MFL testing under the condition of small magnetizing apparatus

Wang Xiaohong, Wu Dehui, Li Xuesong, Huang Yimin, Yang Xiumiao

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

Abstract: In the conventional method of magnetic flux leakage (MFL) testing, the magnetizer is in big volume and with more energy consumption. To solve the problem, a new method of variable excitation MFL testing under the condition of small magnetizer is proposed. First of all, the state of magnetized steel along with the change of the external excitation's intensity under the condition of small magnetizer is analyzed. Secondly, according to the established model, a new type of testing probe for the variable excitation of MFL is designed and a new implementation scheme is proposed. Furthermore, combining with the implementation scheme, an appropriate testing platform of the variable excitation MFL is set. Finally, a series of physical experiments on the platform are carried out and the results of the experiment were discussed. The experimental results show that the proposed method don't need to make local saturation magnetization of tested steel plate, which is suitable for the condition of small magnetizer with higher sensitivity. The new method provides a new testing idea for MFL testing field.

Keywords: small magnetizer; DC bias magnetization; alternating excitation; gradient of leakage magnetic field; alternating leakage magnetic field

1 引言

在石化工业中,储罐、管道是储存和运送石油、天然气等各种石化产品的主要工具,对国民生活、工农业生产

和国防建设都有着举足轻重的作用^[1]。然而,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频发,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^[2]。因此,油气输送管道、储罐的定期安全

收稿日期: 2014-08 Received Date: 2014-08

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51177141)、中央高校基本科研业务项目(2010121041)、航空基金(2012ZD68003)资助项目

检测尤为必要,是避免泄漏污染以及经济损失的重要保证^[3]。

对于石化领域储罐、管道中的安全检测,最常用的方法是无损检测法,目前主要有:超声波法、磁粉法、声发射法、涡流法、漏磁法等。漏磁检测(magnetic flux leakage, MFL)法具有探头简单、检测速度性和准确性高、易于实现自动化、检测过程无需清理表面及使用耦合剂等优点,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^[4]。

MFL 方法中的磁化方式,根据所用励磁源的不同,有永磁、直流、交流和脉冲等形式^[5-6]。传统的漏磁检测一般采用直流或永磁磁化,对于内、外壁缺陷均可检测^[7]。该磁化方式需要将整个检测截面磁化至局部饱和或近饱和状态下才能形成漏磁场^[8]。但是,石化领域中,无论是管道还是储罐,体积普遍较大,要实现局部饱和磁化,必然造成 MFL 的磁化器体积较大,直流磁化时的耗能也较多,操作不方便。交流励磁的 MFL 方法是一个新发展,可减小磁化器的体积,也能节省耗能,但是交流检测存在趋肤效应,只能检测钢板表面缺陷^[9-11],并不能满足石化领域的检测要求。

本文提出一种小型磁化器条件下的变励磁 MFL 新思路并给出具体实现方案。该思路定义一种新的评估参数——漏磁场“变化率”;通过检测变励磁条件下漏磁场变化率,代替传统饱和磁化条件下的漏磁场强度,实现对钢板缺陷的检测。该方法首先对被测铁磁性材料(本文中为钢板)进行浅直流(永磁)磁化,再叠加小幅度交流电磁激励对被测钢板进行变强度励磁,并通过测量漏磁场的交变分量来等效直流漏磁场随励磁强度的“变化率”,进而实现对缺陷的探测。

2 变励磁 MFL 法原理

2.1 机理分析

传统漏磁检测的磁化器主要由永磁体(或直流线圈)和磁轭构成,缺点是体积大、耗能多。若减小永磁体(或直流线圈)和磁轭的大小,则励磁强度也随之减弱,被测钢板又难以达到局部饱和磁化,影响漏磁检测效果。因此常规漏磁检测技术在小型磁化器上无法实施,需要寻找新的检测思路和方法。

小型磁化器的磁轭体积较小,其所能通过的励磁场有限,磁轭的饱和磁感应强度小于钢板被磁化至饱和状态所需的磁感应强度。因此,当励磁场加强到一定强度时,小型磁化器的磁轭率先进入饱和状态,而被测钢板始终能处于欠饱和状态。相反,在常规漏磁检测中,钢板率先被磁化至局部饱和状态,而磁轭始终能处于欠饱和状态。以 Q235 钢板作为被测对象,进行小型磁化器与常规

漏磁检测(大磁化器)条件下直流磁化的特性对比。使用 2 种磁化器对相同钢板进行励磁,其磁化曲线对比如图 1 所示。

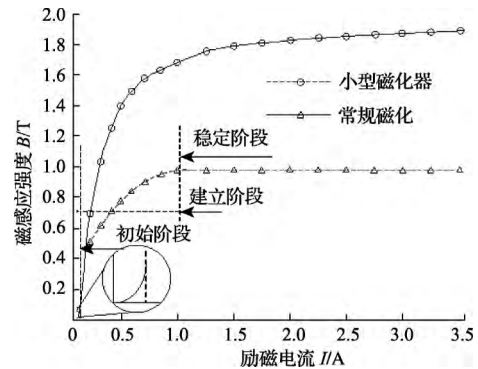


图 1 磁化曲线对比图

Fig. 1 Comparison of magnetization curve

从图 1 可知,小型磁化器条件下钢板的磁化曲线与常规漏磁检测的情况有较大的差别,主要表现在钢板的磁化曲线随励磁电流变化呈现清晰的 3 个阶段:初始阶段、建立阶段和稳定阶段。在初始阶段,由于励磁电流过小,被测钢板的磁化强度较小,其变化量也不大。而在建立阶段,随着励磁电流的增加,钢板的磁化场也迅速增加,特别是在建立初期,钢板磁化强度的增加率近似线性。常规磁化条件下,被测钢板需要被磁化至局部饱和状态,因此钢板内的磁化强度增大速度随励磁逐渐趋缓。但是,在小型磁化器条件下,磁轭率先进入饱和状态;此时,整个励磁回路的磁化场基本稳定,钢板虽未饱和,但其磁化场也不再增加。将该阶段称为稳定状态。小磁化器在稳定状态下,即使激励电流继续提高,也不能进一步增大钢板的磁化强度使其达到局部饱和状态。此时,若钢板存在缺陷,也难以在缺陷处产生明显差异的漏磁场,常规漏磁检测方法不再适用于小磁化器条件。

针对小磁化器的特殊性,开展如下分析和讨论。当磁化器通过磁轭对被测钢板进行励磁时,除钢板外,其周边的空气同样亦会被磁化;总体上说,整个励磁回路由钢板磁化场和空气磁化场(相当于漏磁场)共同构成,即有:

$$\phi_Y = \phi_S + \phi_F \quad (1)$$

式中: ϕ_Y 表示磁化器磁轭的总磁通, ϕ_S 为被测钢板的内部磁通量, ϕ_F 为泄露在空气中的磁通。

当对被测钢板实施变励磁时,磁轭中励磁场磁通的变化量仍由钢板和空气磁通变化量构成,即满足:

$$\Delta\phi_Y = \Delta\phi_S + \Delta\phi_F \quad (2)$$

式中: $\Delta\phi_Y$, $\Delta\phi_S$, $\Delta\phi_F$ 分别表示磁轭、被测钢板和空气中磁通的变化量。

根据漏磁检测原理,若被测钢板存在缺陷,则缺陷处钢板内部的磁化场明显增强,但亦会造成该处磁导率下

降、磁阻增加。在相同的变励磁 $\Delta\phi_y$ 条件下,钢板内缺陷处磁通变化量 $\Delta\phi_s$ 亦明显小于无缺陷时。因此,不妨定义评价函数 $F(\cdot)$ 通过对钢板内部磁通变化量 $\Delta\phi_s$ 的评价实现对缺陷的检测:

$$F(\cdot) = \frac{\Delta\phi_s}{\Delta\phi_y} = 1 - \frac{\Delta\phi_F}{\Delta\phi_y} \quad (3)$$

由式(3)可知,虽然钢板内部缺陷处的磁通变化量 $\Delta\phi_s$ 无法直接测量。但在实际变励磁检测过程中,可以保持磁轭中的总磁通变化量 $\Delta\phi_y$ 基本恒定,则钢板内部与泄露在空气中的磁通变化量 $\Delta\phi_s$ 、 $\Delta\phi_F$ 呈互补特性。因此可利用 $\Delta\phi_F$ 实现对评价函数 $F(\cdot)$ 的估计,从而达到缺陷探测的目的。

在实际测试过程中,磁轭中总磁通 ϕ_y 通过励磁电流 I 来实现,可理解为励磁电流 I 的函数,不妨记为 $\phi_y = \phi(I)$ 。则磁轭中磁通的变化量(即励磁变化量) $\Delta\phi_y$ 满足:

$$\Delta\phi_y \approx \frac{d\phi(I)}{dI} \Delta I = \phi'(I) \Delta I \quad (4)$$

由式(4)可以看出,磁轭中磁通变化量 $\Delta\phi_y$ 是励磁电流 I 及其变化量 ΔI 的函数。空气中漏磁场强度 B_F 可由霍尔元件构成的检测系统进行测量,不妨记检测系统的电压输出为 U_{MFL} ,其与漏磁场强度 B_F 的函数关系为 $B_F = B(U_{MFL})$ 。同理,空气中漏磁场强度的变化量 ΔB_F 可表示为:

$$\Delta B_F \approx \frac{dB(U_{MFL})}{dU_{MFL}} \Delta U_{MFL} = B'(U_{MFL}) \Delta U_{MFL} \quad (5)$$

磁通 ϕ 为磁感应强度 I 与面积 s 的积分,即有 $\phi_F = \int B_F ds$ 。在本文中,漏磁场强度 B_F 为变化量,而空气中漏磁通的面积基本不变。因此,空气中漏磁通变化量 $\Delta\phi_F$ 可近似使用下式进行计算:

$$\Delta\phi_F = \int \Delta B_F ds = \int B'(U_{MFL}) \Delta U_{MFL} ds \approx B'(U_{MFL}) \Delta U_{MFL} S \quad (6)$$

式中: S 为常量,表示空气中漏磁通的等效面积。

将式(4)和(6)代入式(3)并整理可得到实际等效的评价函数 $F(\cdot)$ 表达为:

$$F(\cdot) \approx 1 - \frac{B'(U_{MFL}) \Delta U_{MFL} S}{\phi'(I) \Delta I} \quad (7)$$

2.2 探测系统的设计与分析

针对式(7)所示缺陷检测的评价函数,设计了一种新型变励磁 MFL 检测探头。与常规的 MFL 检测装置类似,新型探头亦采用 U 形磁轭结构^[12],并在磁轭 2 个极靴上绕制励磁线圈建立磁化器。新探头上的励磁线圈由直流(direct current, DC)线圈和交流(alternating current, AC)线圈两部分构成。DC 线圈提供一个稳定的励磁电流 I , AC 线圈则驱动以交变电流,以形成励磁电流的波

动 ΔI 。DC 线圈在钢板周边空气形成稳定的漏磁场 B_F , 对应检测系统的电压输出为定值 U_{MFL} 。励磁电流的波动 ΔI 亦会造成漏磁场 B_F 的波动 ΔB_F , 对应检测系统电压输出的波动 ΔU_{MFL} 。在所设计的新型变励磁 MFL 检测探头中,励磁电流 I 和检测输出 U_{MFL} 均为定值,即 $B'(U_{MFL})$ 和 $\phi'(I)$ 亦为定值。则式(7)定义的评价函数亦可简化为:

$$F(\cdot) \approx 1 - g \frac{\Delta U_{MFL}}{\Delta I} \quad (8)$$

式中: $g = \frac{SB'(U_{MFL})}{\phi'(I)}$ 为常量。

很明显,式(8)中评价函数 $F(\cdot)$ 的灵敏度由 g 的大小决定。新型变励磁 MFL 检测探头中,励磁电流 I 与漏磁场检测结果 U_{MFL} 之间的关系如图 2 中曲线所示。

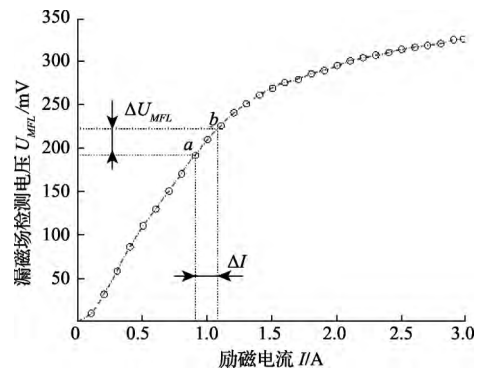


图 2 以漏磁场变化率为检测对象的原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of detection object with leakage magnetic field gradient

从图中不难看出, $\Delta U_{MFL} / \Delta I$ 实际为图中所示关系曲线的导数(即变化率)。而由上面的分析可知,小型磁化器条件下钢板的磁化过程呈现 3 个阶段:初始阶段、建立阶段和稳定阶段。在初始阶段和建立阶段(尤其是建立阶段)漏磁场强度随励磁场(励磁电流)的变化比较敏感,两者关系曲线的变化率较大。而在稳定阶段,励磁回路逐渐进入饱和状态,漏磁场不再随励磁电流明显变化。因此,式(7)所示的评价函数 $F(\cdot)$ 在磁化过程的建立阶段变化比较显著,而在稳定阶段基本没有对缺陷的探测能力。

本文中所设计的新型变励磁 MFL 探头具有 2 个比较明显的特点。首先,从本质上说,新型变励磁 MFL 探头是以漏磁场“变化率”(而非漏磁场强度)作为检测对象。因此,无需对漏磁场的直流成分 U_{MFL} 进行检测,仅需要采集 ΔU_{MFL} 信号,即漏磁场的交变成分。其次,常规漏磁检测需要将钢板磁化至局部饱和状态,而新型 MFL 探头却在磁化的建立阶段进行检测,在饱和磁化状态下反而失去缺陷探测能力。因此,新技术适合“浅磁化”条件下的缺陷探测,可较好地应用于小型磁化器。

3 变励磁 MFL 实验平台的构建

为验证变励磁 MFL 法的有效性, 根据上述原理研制了一个小型磁化器条件下的变励磁 MFL 实验平台。整个变励磁 MFL 实验平台主要由 U 形磁轭、DC 电流源、DC 线圈、交变信号源、AC 功率放大器、AC 线圈、霍尔元件、交流放大器、低通滤波、数据采集等几个部分组成, 实验平台构成框图如图 3 所示。

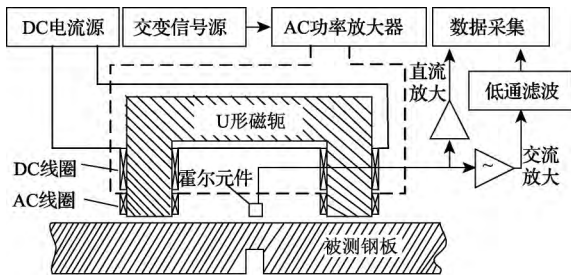


图 3 小型磁化器条件下的变励磁 MFL 实验平台结构框图
Fig. 3 Structure diagram of variable excitation MFL testing under the condition of small magnetizer

U 形磁轭选择高磁导率的铁氧体材料, 其外型尺寸为 $0.12\text{ m} \times 0.04\text{ m} \times 0.08\text{ m}$ 。DC 线圈和 AC 线圈均采用双线圈对称性结构串联构成, 并对称安装于 U 形磁轭的 2 个极靴上。无论是 DC 线圈还是 AC 线圈, 加载于双组线圈励磁电流恰好反相, 故其激励的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的空气泄漏(尤其在法向方向上)对检测结果的影响^[13]。DC 线圈由直径 0.001 m 的漆包线均匀缠绕 200 匝制作而成(即每个极靴的骨架上各绕制 100 匝), AC 线圈用相同漆包线均匀缠绕 40 匝制作(即每个极靴的骨架上各绕制 20 匝)。

实验平台中所用 DC 电流源输出电流可在 $0 \sim 10\text{ A}$ 范围内任意可调, 在 U 形磁轭内产生稳定的静态偏置磁化场。交变信号源选用任意波形发生器 DG-2041A, 产生 $5 \sim 20\text{ Hz}$ 范围内的低频正弦激励信号。AC 功率放大器的增益可调, 使 AC 线圈产生的交变励磁有效幅度控制在静态磁化偏置强度的 5% 以内, 即满足“小幅度”的约束条件。交变漏磁场 ΔB_F 选用模拟型霍尔传感器 UGN3503 作为检测元件, 垂直放置于磁轭中间的探测点, 以探测漏磁场水平分量。下文中若无特别说明, 所述的检测信号, 均指漏磁场 B_F 的水平分量检测值。

霍尔传感器检测到的漏磁场信号含有直流和交流 2 个信号分量。第 1 路为直流信号分量 U_{MFL} 的提取, 主要是采用直流放大器提高信号增益, 并通过滤波处理以提取直流漏磁场强度; 第 2 路为交流信号分量 ΔU_{MFL} 的提取, 其检测信号经过交流放大器提高信号增益, 并由低

通滤波电路(与 AC 线圈激励同频)进行信号调理以提高信噪比^[14-15]。当然, 在实际工程应用中, 变励磁 MFL 法无需检测信号的直流分量, 因此亦可使用感应线圈进行交变漏磁场的拾取, 并采用交流信号提取通道进行处理。

4 实验与分析

4.1 直流偏置磁化条件下的漏磁场分布特性

现有研究中普遍采用在钢板表面加工若干凹槽作为人工预制缺陷, 以模拟自然缺陷的方法^[16-17]。实验中, 选用 2 块尺寸相同的 Q235 材质的低碳钢板作为试样, 其中一块保持完好(无缺陷); 另一块加工矩形凹槽作为人工缺陷。其中, 钢板尺寸为: 厚 0.003 m 、宽 0.35 m 、长 0.4 m ; 所加工的矩形凹槽尺寸为: 长 0.05 m 、宽 0.005 m 、深 0.002 m 。实验时, 当矩形凹槽处于磁化器所在侧, 称之为正面缺陷; 反之, 称之为背面缺陷。

将磁化器的 U 形磁轭置于被测钢板正中央, 霍尔传感器 UGN3503 置于被测钢板表面正上方 0.002 m 处, 即提离值为 0.002 m 。实验过程中, AC 线圈不施加交变激励电流 ΔI , 仅通过 DC 电流源来改变 DC 线圈的励磁电流强度 I 。励磁电流 I 从 $0 \sim 3\text{ A}$ 调整(电流间隔为 0.1 A)进行多次实验, 同时记录不同励磁条件下钢板漏磁场 B_F 对应的检测电压 U_{MFL} 。实际检测探头和测试过程如图 4 中所示。

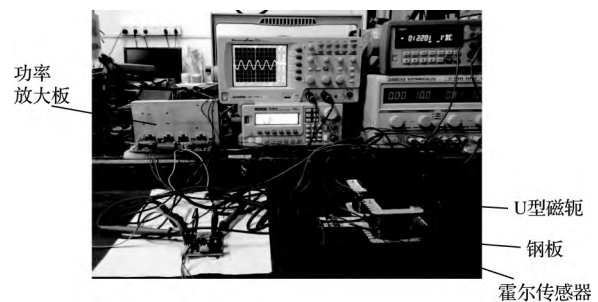


图 4 小型磁化器条件下的变励磁 MFL 试验
Fig. 4 Variable excitation MFL testing under the condition of small magnetizer

针对上述 2 块试样开展直流偏置磁化的漏磁场检测实验, 其中含缺陷钢板再进行正面、背面缺陷的 2 组实验。将实测漏磁场检测电压 U_{MFL} 与励磁电流 I 进行对比, 绘制两者关系曲线如图 5 所示。

从图中可以看出, 在钢板磁化的初始阶段和建立阶段, 漏磁场 B_F (由检测电压 U_{MFL} 体现) 随励磁电流 I 的变化非常明显; 而在励磁电流 I 达到一定强度后(本文实验中约为 2 A), 漏磁场 B_F 逐渐趋于稳定, 其检测电压 U_{MFL} 基本不再随励磁电流 I 变化, 即对应上文机理分析中的稳定状态, 该实验结果与小型磁化器条件下的假设结果相一致, 验证了上文中对小型磁化器条件下的漏磁场分

布特性机理分析的合理性。

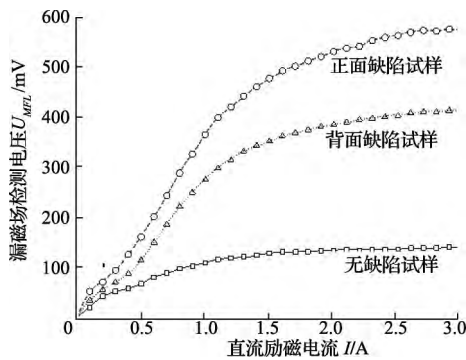


图5 小型磁化器条件下的直流偏置漏磁检测实验

Fig.5 Dc bias testing of MFL under the condition of small magnetizer

另外,仔细对比图5中实测的3条检测电压 U_{MFL} 与励磁电流 I 关系曲线可以看出:初始阶段的励磁电流 I 较小,漏磁场检测电压 U_{MFL} 幅值亦较小,此时3条曲线变化率 $\Delta U_{MFL}/\Delta I$ 的差别并不明显。而在建立阶段, U_{MFL} 随励磁电流 I 近似线性地增加,特别是含缺陷钢板的漏磁场变化率 $\Delta U_{MFL}/\Delta I$ 要比无缺陷条件下大得多,明显的多。因此,通过漏磁场变化率 $\Delta U_{MFL}/\Delta I$ 这一新尺度,实现对钢板缺陷探测是可行的。

4.2 变励磁 MFL 探测实验

为验证所提变励磁 MFL 法的有效性,分别对上述被测钢板进行直流偏置磁化条件下的交变励磁实验。实验过程中分别对无缺陷、正面缺陷和背面缺陷进行3组对比实验,以扩大实验范围,验证实验结论的一般性。实验时,始终保持交变励磁强度不变,即交变励磁电流 ΔI 的有效值恒为 0.5 A, ΔI 的频率 f 分别选择 5 Hz、10 Hz、20 Hz 3 组。而直流偏置电流 I 从 0 ~ 3 A (每次间隔 0.1 A) 连续变化进行漏磁场信号检测。利用存储数字示波器 GDS-4102AU 对交变励磁电流 ΔI 和漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 进行观测;图6(a)中给出了频率 f 为 5 Hz 时交变励磁 ΔI 的实测电流波形图。图6(b)为 0.8 A 的直流偏置励磁条件下,该交变励磁电流 ΔI (有效值 0.5 A, 频率 f 为 5 Hz) 作用下,含有正面缺陷钢板的交变漏磁场信号 ΔU_{MFL} 的实测波形图。

从图6(a)中可以看出,交变信号源 DG-2041A 生成的低频正弦激励信号,经磁化器探头后生成的励磁电流 ΔI 发生了一定畸变,这主要是由于 U 形磁轭和钢板的磁滞特性(非线性)所造成。但是,整个磁轭和钢板构成的感性器件又具有明显的低通滤波特性,因此该电流 ΔI 的畸变对系统励磁造成的影响不明显,实测漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 仍能呈现了较好的正弦特性,如图6(b)中所示。

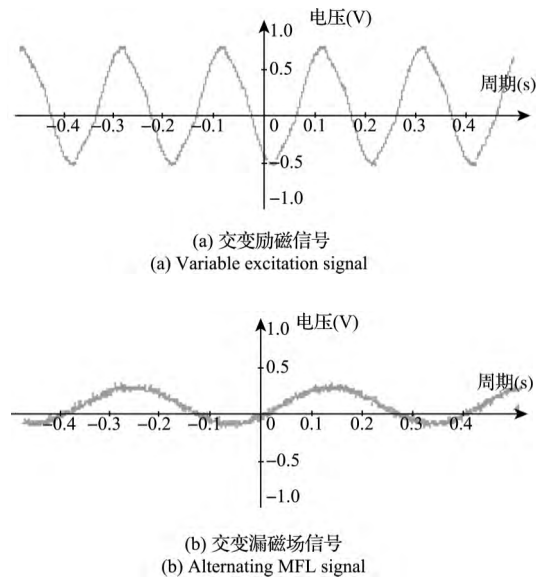


图6 变励磁 MFL 方法中的励磁及漏磁场信号实测波形

Fig.6 Measured excitation and MFL signal waveform of alternating excitation MFL testing

4.3 工艺参数的优化设置

利用多功能六位半台式数字万用表 TH1961 监测交变漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 的有效值,其中,直流偏置电流 I 从 0 ~ 3 A (每次间隔 0.1 A) 连续变化,交变励磁电流 ΔI (有效值 0.5 A, 频率 f 为 5 Hz) 保持恒定。实测直流偏置电流 I 和漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 的关系曲线如图7中所示。

从图7中可以看出,钢板含有缺陷处的漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 一定大于无缺陷处,与实际实施的直流偏置大小无关。而对于相同几何尺寸的正面和背面缺陷,在相同的变励磁 MFL 检测条件下,正面缺陷处的检测信号 ΔU_{MFL} 也明显大于背面缺陷。这两个特点与传统的漏磁检测方法类似。

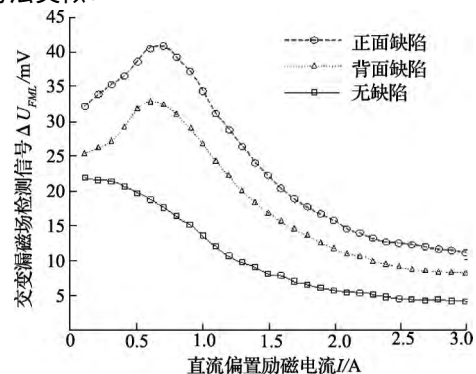


图7 直流偏置电流与漏磁场检测信号的关系曲线

Fig.7 Relation curve between DC bias current and MFL detection signal

但仔细观察图 7 中所示 3 条曲线的分布趋势不难看出, 变励磁 MFL 检测与传统的漏磁检测结果亦存在本质差别。首先, 变励磁 MFL 的漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 并不是随着直流偏置磁化场的增加而增大, 反而总体呈现下降趋势; 其次, 对于无缺陷钢板, 其 ΔU_{MFL} 与直流偏置电流的关系曲线呈单调下降特性; 但含有缺陷钢板的关系曲线却出现明显的单峰。因此利用本文所提的变励磁 MFL 法, 钢板有、无缺陷对应的检测信号不仅仅存在幅值上的差别, 两者的关系曲线在模式上也差别显著。

在实际使用过程中, 进一步提高有缺陷和无缺陷时检测信号 ΔU_{MFL} 的差别, 有利于提高变励磁 MFL 法的探测灵敏度和可靠性。为确定最佳的直流偏置励磁工作状态, 以无缺陷钢板的漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 为基准, 对图 7 中含有缺陷检测信号进行差值计算, 其结果如图 8 所示。

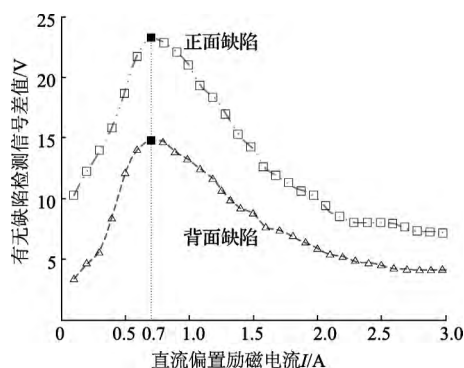


图 8 有、无缺陷 2 类漏磁场检测信号的差值特性曲线
Fig. 8 Difference characteristic curve of MFL detection signal between defect and no defect

由图 8 可见, 无论正面还是背面缺陷, 其与无缺陷条件下漏磁场检测信号的差值曲线均呈单峰分布。且在本案例中, 直流偏置电流 I 约为 0.7 A 时, 有、无缺陷状态下 ΔU_{MFL} 的差别最大, 即对应最佳的缺陷探测灵敏度。对应图 5 中直流偏置的漏磁检测实验结果, 0.7 A 偏置电流约将钢板磁化至局部饱和状态的 30% ~ 35%。该实验结果有验证了, 变励磁 MFL 法无需将钢板磁化至局部饱和状态, 适应于小型磁化器条件。

在变励磁 MFL 法中, 励磁频率 f 对漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 亦会产生影响。为研究其影响规律, 分别对上述实验中相同的被测钢板施加以不同频率交变励磁, 进行对比实验。实验过程中保持其他条件不变, 调整任意波形发生器 DG-2041A 分别输出 5 Hz、10 Hz 和 20 Hz 3 组正弦激励信号, 并分别记录不同频率 f 条件下的漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 。图 9 中给出了正面缺陷对应的 3 组偏置电流 I 与检测信号 ΔU_{MFL} 的关系曲线。

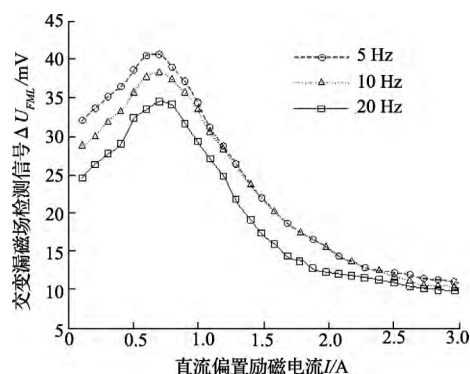


图 9 不同频率条件下直流励磁电流与交变漏磁场的关系曲线

Fig. 9 Relation curve of DC excitation current and alternating MFL with different frequency

从图 9 可以看出, 虽然在不同频率 f 的交变励磁条件下, 漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 存在差异, 但其规律明显。首先, 漏磁场检测信号 ΔU_{MFL} 均呈现清晰的单峰分布趋势; 其次, 峰值点出现的位置与交变励磁频率 f 无关, 均在直流偏置电流 $I = 0.7$ A 左右。再次, 励磁频率 f 越高, 对应的检测信号 ΔU_{MFL} 幅值也越小。

因为交变励磁 $\Delta\phi_y$ 必然存在涡流效应, 会阻碍钢板内部磁场变化。而且, 励磁频率 f 越高, 其涡流效应越明显, 造成了漏磁场检测信号 U_{MFL} 幅值下降。该实验有效验证了变励磁 MFL 法直流偏置的设置与励磁频率 f 无关的结论, 客观上也说明了机理分析中提到励磁频率 f 应尽量使用低频交变信号源的原因。

5 结 论

所提的变励磁 MFL 法中, 通过检测变励磁条件下漏磁场的“变化率”, 代替传统饱和磁化条件下的漏磁场的“强度”, 实现对钢板缺陷的检测是完全可行的。

变励磁条件下漏磁场的“变化率”可通过以下方法测试实现: 首先对被测铁磁性材料进行浅直流励磁以形成偏置磁化场, 再叠加小幅度低频交流电磁场实现变励磁条件, 最后通过测量漏磁场的交变分量来等效漏磁场的“变化率”, 进而实现对缺陷的探测。

变励磁 MFL 法使用了新的评估参数——漏磁场的“变化率”, 避免了传统 MFL 方法中对被测钢板进行的局部饱和磁化, 从而有效减小了磁化器体积和耗能。而且, 变励磁 MFL 法在浅磁化条件下具有较高的灵敏度; 在饱和磁化状态下缺陷探测能力反而下降, 因此该技术适合浅磁化条件下的缺陷探测, 可较好的地应用于小型磁化器。

变励磁 MFL 法直接以漏磁场“变化率”(漏磁场的交

变成分)作为检测对象,并采用交流信号提取通道进行处理。该交变成分可直接通过线圈或霍尔元件进行拾取,而具有易提取、无零点漂移、易放大处理、不受背景磁场干扰等特点,相对于传统 MFL 中直流量检测具有明显优势。

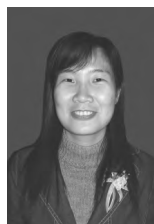
变励磁 MFL 法中的检测信号与直流偏置励磁的关系曲线呈单峰分布,且峰值点出现在局部饱和磁化的 30%~35%。变励磁 MFL 法中只是以漏磁场的“变化率”为评估指标,本质上仍是直流 MFL 检测,因此叠加变励磁成分应为小幅度低频电磁场,以避免涡流效应对检测结果的影响。

参考文献

- [1] CORBETT K T, BOWEN R R, PETERSEN C W. Use of high-strength line pipe can improve economic of long-distance gas lines[J]. *Oil and Gas Journal* (S0030-1388), 2003, 101(46): 56-61.
- [2] 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 of gas pipeline detector [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(11): 2407-2413.
- [3] 吴德会, 柳振凉, 张忠远, 等. 漏磁检测中提离值影响的三维有限元仿真分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(6): 1188-1198.
WU D H, LIU ZH L, ZHANG ZH Y, et al. 3D finite element simulation analysis of the effect of the lift-off value in magnetic flux leakage testing [J]. *Journal of Applied Foundation and Engineering Science*, 2013, 21(6): 1188-1198.
- [4] 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. The transient simulation analysis of the crack magnetic flux leakage testing in long distance oil and gas pipeline [J]. *Journal of Oil*, 2009, 30(1): 136-140.
- [5] 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. The mechanism research of signal generation with the composite magnetic flux leakage and eddy current in flaw detection [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7): 233-237.
- [6] 唐莺, 潘孟春, 罗飞路, 等. 基于三维场测量的脉冲漏磁检测技术[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(10): 2297-2302.
TANG Y, PAN M CH, LUO F L, et al. The pulse magnetic flux leakage detection technology based on three dimensional field measure [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(10): 2297-2302.
- [7] ROMERO RAMÍREZ A, 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.
- [8] 刘志平, 康宜华, 武新军, 等. 大面积钢板局部磁化的三维有限元分析 [8]. *华中科技大学学报*, 2003, 31(8): 10-12.
LIU ZH P, KANG Y H, WU X J. The finite element analysis of local magnetization in large steel plate [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2003, 31(8): 10-12.
- [9] 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. AC/DC magnetization of magnetic flux leakage testing [J]. *Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition*, 2002, 42(2): 154-156.
- [10] 宋凯, 康宜华, 孙燕华, 等. 基于 U 型探头的 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. The mechanism analysis based on ACFM and AC-MFL method of U probe [J]. *Journal of Testing Technology*, 2010, 24(1): 67-72.
- [11] 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. The mechanism analysis of ac magnetic flux leakage test in U yoke probe [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(9): 1980-1985.
- [12] SINGH W S, 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 magnetoresistive sensor [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(1): 1-8.
- [13] 吴德会, 游德海, 柳振凉, 等. 交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(2): 327-336.
WU D H, YOU D H, LIU ZH L, et al. The mechanism and experimental study of skin depth with ac magnetic flux leakage test [J]. *Chinese Journal of Scientific Instru-*

- ment, 2014, 35(2): 327-336.
- [14] 徐超. 基于形态滤波和提升小波变换的漏磁信号处理研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 35(8): 23-25.
WU CH. Processing research of magnetic flux leakage signal based on morphological filtering and wavelet transform [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 35(8): 23-25.
- [15] 韩保, 刘文刚, 张宏. 工频磁场抗扰度试验装置校准的研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(8): 108-110.
HAN B, LIU W G, ZHANG H. The research of testing equipment calibration in power frequency magnetic field immunity [J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(8): 108-110.
- [16] KOVÁCS G. Simulation and measurement of magnetic based nondestructive tester [J]. Journal of Advanced Research in Physics, 2011, 2(1): 1-6.
- [17] LI X B, LI X, CHEN L, et al. Numerical simulation and experiments of magnetic flux leakage inspection in pipeline steel [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(1): 109-113.

作者简介



王晓红, 2009 年于大连理工大学获得硕士学位, 现为厦门大学机电系工程师, 主要研究方向为传感器技术。

E-mail: wxh@xmu.edu.cn



Wang Xiaohong received her master's degree in 2009 from Dalian University of Technology; now, she is an engineer in Xiamen University. Her main research interests direction is sensor technology.

吴德会(通讯作者) 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、传感器技术和智能测控技术等。

E-mail: wudehui@xmu.edu.cn

Wu Dehui (Corresponding author) 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, sensor technology, intelligent measurement and control technology.