

基于微分磁导率的铁磁性材料无损检测新方法^{*}

吴德会, 刘志天, 王晓红, 苏令锌
(厦门大学航空航天学院 厦门 361005)

摘要: 利用微分磁导率变化特性, 提出了一种可对材料的宏观缺陷进行快速扫查的无损检测新方法。首先, 将铁磁性材料置于偏置磁化场环境下, 缺陷将导致内部磁通的畸变; 其次, 磁通畸变进一步体现在材料表面微分磁导率分布的差异性; 再次, 通过特殊设计的微分磁导率检测探头, 对材料表面微分磁导率的分布进行扫查; 最后, 由磁导率分布差异获得材料内部的不连续性信息, 从而实现缺陷的无损检测。开展了系列验证实验, 结果表明, 相对于传统的漏磁检测方法, 新方法具有磁化强度低、磁通泄漏少、检测信号稳定的特点。新方法正、反面缺陷探测信号存在差异, 在缺陷深度识别方面亦存在优势。

关键词: 微分磁导率; 宏观缺陷; 无损检测; 偏置磁化场

中图分类号: TP212.9 TP211+.5 TH87 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

New NDT method for ferromagnetic materials based on differential permeability

Wu Dehui, Liu Zhitian, Wang Xiaohong, Su Lingxin
(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: A new non-destructive testing method is proposed to fast scan and detect the macroscopic defects of materials using the variation characteristics of the differential permeability of ferromagnetic materials. Firstly, the ferromagnetic material, such as steel plate, is placed under the bias magnetic field, and the defects in the material will inevitably lead to the distortion of its internal magnetic flux. Secondly, the magnetic flux distortion is further reflected in the difference of the differential permeability distribution on the surface of the tested material. Thirdly, using a specially designed probe, the distribution of differential permeability on the surface of tested material is rapidly scanned. Finally, from the difference of the differential permeability distribution, the discontinuity information in the material can be obtained, so as to realize the nondestructive testing of macroscopic defects. Series of experiments were carried out, and the results show that, compared with traditional magnetic flux leakage method, the new method has the advantages of low magnetic intensity, less flux leakage and stable detection signals. Moreover, the detection signals for the front-side and back-side defects have obviously different distribution characteristics, and the method also has obvious advantages in the field of defect depth identification.

Keywords: differential permeability; macroscopic defect; non-destructive testing (NDT); bias magnetic field

1 引言

铁磁性材料广泛应用于船舶运输、油气储运、铁路交通等行业, 对于国民经济的发展起着举足轻重的作用。在铁磁性材料的服役过程中, 容易在结构表面或内部形成缺陷, 进而造成重大恶性事故。因此, 开展铁磁性材料的无损检测对减小经济成本和损失, 保障国家、人民的人身和财产安全具有实际意义^[1-2]。

在利用微分磁导率检测铁磁性材料内部结构的微变

化方面, 国内外学者已进行大量的研究, 并取得了一定的成果。任尚坤等人^[3]开发了微分磁导率检测的实验平台, 对拉应力和疲劳造成的微损伤与铁磁材料微分磁导率的关系进行了论证和测定; 刘秀成等人^[4]开发出双功能的单体传感器, 实现了缺陷与应力的同时测量; 唐德东等人^[5]基于微分磁导率与钢缆索力对应函数关系, 提出并优化了双励磁双循环的磁路结构; 陈伟民等人^[6]进一步统一了积分电压、微分磁导率、应力三者的关系模型, 可对应力集中造成的微结构变化精确评估; Liu J 等人^[7]研究了钢型材 P9 以及 T22 在不同热和应力条件下

收稿日期: 2016-12 Received Date: 2016-12

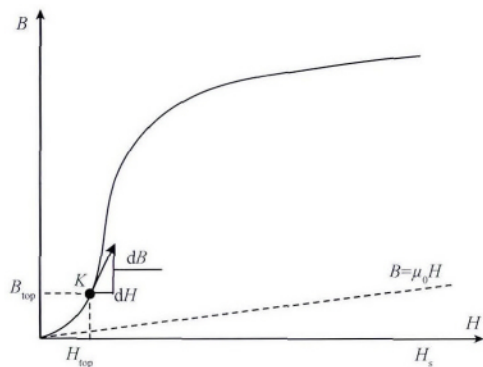
^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51677158)、福建省科技计划重大专项(2015HZ0002-4)资助

的微结构,及其所引发微分磁导率的变化规律; Chen H. E. 等人^[8]通过实验比较了巴克豪生噪声法、微分磁导率法、漏磁法 3 种方法检测到的由材料塑性形变产生的无损检测 (non-destructive testing, NDT) 信号; Ktena A 等人^[9]研究了铁芯硅钢与加载应力相关的磁特性参数,并开展不同角度拉力下的微分磁导率、磁滞回线测量试验。

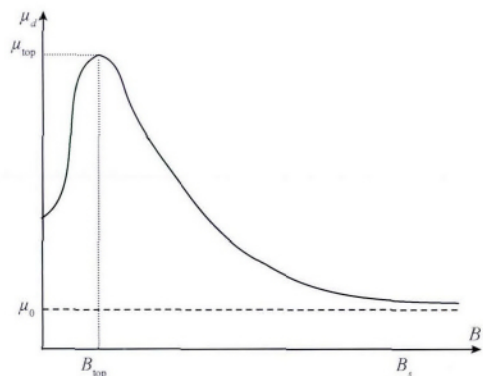
在前人的相关研究的基础上,本文利用微分磁导率特性提出了一种新的针对铁磁性板材的无损检测方法。在该方法中,将铁磁性材料置于偏置磁化环境下,材料缺陷会直接导致其内部磁通的畸变。并且这种磁通畸变进一步体现为材料表面磁导率分布的差异性。因此在新方法中,仅需要对铁磁性材料表面微分磁导率进行扫查,即可获得材料内部的宏观不连续性信息,从而实现铁磁性材料宏观缺陷的无损检测。

2 检测原理及分析

典型铁磁材料的磁化曲线如图 1 所示。铁磁性材料在外磁场 H 的作用下而产生磁通密度 B 。随着外磁场强度 H 的增加,磁通密度 B 呈非线性变化。



(a) 铁磁材料的磁化曲线
(a) Magnetizing curve of ferromagnetic material



(b) 铁磁材料微分磁导率与磁通密度关系曲线
(b) Relationship curve between differential permeability and magnetic flux density of ferromagnetic material

图 1 典型铁磁材料的磁化特性曲线

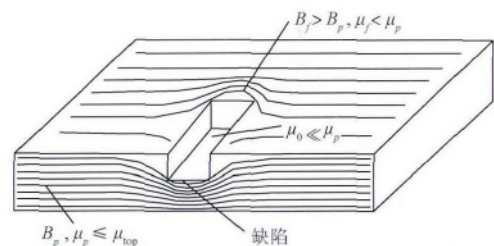
Fig. 1 The magnetization characteristic curve of typical ferromagnetic material

若以磁化曲线变化率 dB/dH 作为参数,称之为该铁磁性材料的微分磁导率 μ_d ^[10]。从图 1(a) 中可以发现,铁磁材料的 μ_d 与 B 有密切的联系,且存在唯一最大的微分磁导率 μ_{top} 。记 μ_{top} 处对应的外磁场强度和磁通密度分别为 H_{top} 和 B_{top} 。则根据典型铁磁材料的磁化曲线,可绘制出 μ_d 与 B 的关系如图 1(b) 所示。

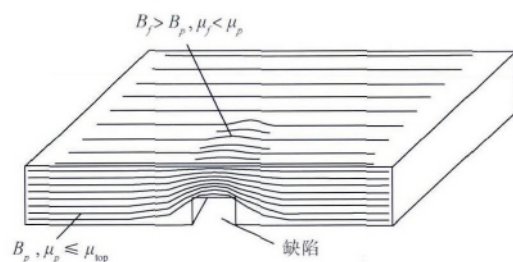
从图 1(b) 中可以看出,铁磁性材料的 μ_d 随 B 的变化规律呈先上升后下降的趋势。首先,在初始磁化阶段, μ_d 迅速上升并达到 μ_{top} ; 然后, μ_d 逐渐下降。特别是在饱和磁化阶段, μ_d 逐渐趋于真空磁导率 μ_0 。

当对钢板进行偏置磁化时,记此时钢板内平均磁通密度为 B_p , 对应的微分磁导率为 μ_p 。若此时钢板存在缺陷,则磁通不可避免地会在缺陷附近形成畸变,从而导致钢板正面(检测面)上的 μ_d 的分布差异。

缺陷导致钢板微分磁导率分布差异的原理如图 2 所示。如图 2(a) 所示,若缺陷存在于检测面,缺陷处 μ_d 近似为真空磁导率 μ_0 。缺陷周边形成磁通的密集区。不妨记密集区的平均磁通密度为 B_f , 则明显有 $B_f > B_p$ 。根据图 1(b) 所示的 μ_d 与 B 的关系曲线,若钢板内的磁通密度 $B_p > B_{top}$, 则在磁通密集区 $\mu_f < \mu_p$ 始终成立。因此,在缺陷处或陷周边的磁通密集区,对应局部的微分磁导率 μ_0 和 μ_f 均小于 μ_p , 即在检测面上形成了一个微分磁导率分布的低点。



(a) 含正面(检测面)缺陷的磁通密度分布
(a) Magnetic flux density distribution in the steel plate containing front-side defects



(b) 含内部或反面缺陷的磁通密度分布
(b) Magnetic flux density distribution in the steel plate containing internal or back-side defects

图 2 缺陷导致钢板微分磁导率分布差异的原理

Fig. 2 Schematic diagram of differential permeability distribution difference caused by defects in steel plate

对于分布于钢板内部或反面的缺陷,如图 2(b)所示,也会在钢板表面产生一个对应的磁通密集区。所以,利用磁通密度变化引发的钢板检测面微分磁导率分布差异,可实现对钢板内部及表面缺陷的有效检测。

3 微分磁导率检测模型

为实现对钢板表面 μ_d 分布的扫查,特别设计了一种微分磁导率检测探头,其结构如图 3 所示^[11-12]。

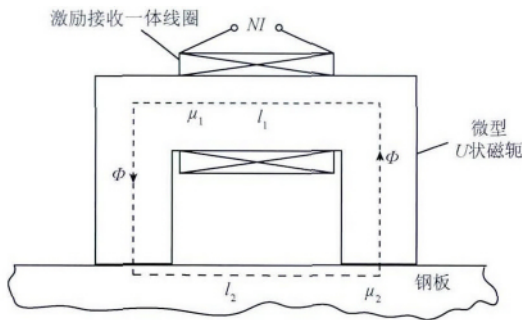


图 3 微分磁导率检测探头的结构

Fig. 3 Structure diagram of differential permeability test probe

不妨假设一体化线圈的匝数为 N , 并通以正弦交流激励 $I = A \sin \omega t$, 其中, A 为激励电流幅值、 ω 为角频率。在一体化线圈的激励下, U 状磁轭以及被测钢板构成了有效的交流磁回路。暂不考虑回路中磁通泄露, 则回路中的磁通 Φ 满足如下等量关系:

$$\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2 \quad (1)$$

式中: B_1 、 B_2 表示 U 状磁轭和钢板中的磁通密度, S_1 、 S_2 分别表示 U 状磁轭回路以及钢板的等效横截面积。

根据电磁感应定律, 线圈自感电动势 V 为:

$$V = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2), 可得:

$$V = NS_1 \frac{dB_1}{dH_1} \cdot \frac{dH_1}{dt} = NS_1 \mu_1 \cdot \frac{dH_1}{dt} \quad (3)$$

式中: $\mu_1 = dB_1/dH_1$ 表示磁轭的微分磁导率, H_1 为磁轭内的磁场强度。

线圈的自感电动势 V 同样与被测钢板表面的微分磁导率 μ_2 有关, 同理可得:

$$V = NS_2 \frac{dB_2}{dH_2} \cdot \frac{dH_2}{dt} = NS_2 \mu_2 \cdot \frac{dH_2}{dt} \quad (4)$$

式中: $\mu_2 = dB_2/dH_2$, H_2 为钢板表面等效磁场强度。

再根据磁路定理有:

$$NI = H_1 l_1 + H_2 l_2 \quad (5)$$

式中: l_1 、 l_2 分别为磁轭以及被测钢板内的有效长度。

则将式 (4) 代入式 (5) 可得:

$$V = \frac{NS_2 u_2}{l_2} \cdot \frac{d(NI - H_1 l_1)}{dt} = \frac{NS_2 u_2}{l_2} \left(N \frac{dI}{dt} - \frac{dH_1}{dt} l_1 \right) \quad (6)$$

再对式 (3) 进行化简为:

$$\frac{dH_1}{dt} = \frac{V}{NS_1 \mu_1} \quad (7)$$

联立式 (6) 和式 (7), 并整理可得:

$$V = \frac{NS_2 u_2}{l_2} \left(N \omega A \cos \omega t - \frac{V}{NS_1 \mu_1} l_1 \right) \quad (8)$$

对式 (8) 进行整理, 可得:

$$V = \frac{N^2 S_1 S_2 \mu_1 \mu_2 \omega A \cos \omega t}{S_1 \mu_1 l_2 + S_2 \mu_2 l_1} \quad (9)$$

再由交流电路欧姆定律, 可计算线圈复阻抗:

$$\dot{Z} = \frac{N^2 S_1 S_2 \mu_1 \mu_2 \omega A e^{j\omega t}}{A e^{j(\omega t - \frac{\pi}{2})}} = j \frac{N^2 S_1 S_2 \mu_1 \mu_2 \omega}{S_1 \mu_1 l_2 + S_2 \mu_2 l_1} \quad (10)$$

一体化线圈复阻抗 \dot{Z} 为一个正值纯虚数, 其等效电阻很小, 可忽略。则线圈 L 可通过复阻抗得到:

$$L = \frac{\dot{Z}}{j\omega} = \frac{N^2 S_1 S_2 \mu_1 \mu_2}{S_1 \mu_1 l_2 + S_2 \mu_2 l_1} \quad (11)$$

为便于表达, 不妨对式 (11) 进行整理和简化:

$$\frac{1}{L} = \frac{l_1}{N^2 S_1 \mu_1} + \frac{l_2}{N^2 S_2 \mu_2} = K_1 + \frac{K_2}{\mu_2} \quad (12)$$

式中: $K_1 = \frac{l_1}{N^2 S_1 \mu_1}$, $K_2 = \frac{l_2}{N^2 S_2}$ 。

在检测过程中, 线圈匝数 N , 磁轭与被测钢板磁回路的有效长度 l_1 、 l_2 , 有效横截面积 S_1 、 S_2 , 均不会发生改变。因此, 上述系数 K_1 、 K_2 可视为恒定系数。则线圈电感 L 主要由被微分磁导率 μ_2 决定, 而几乎不受空气中漏磁场、背景磁场的影响。

设检测探头的微型 U 状磁轭以及被测 Q235 型钢板各参数值如下: $l_1 = 3l_2 = 36 \text{ mm}$, $N = 40$, 空气的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^7 \text{ Hm}^{-1}$, $\mu_1 = 6000\mu_0$, $S_1 = 20 \text{ mm}^2$ 。激励频率取 40 Hz, 钢板相对磁导率为 450, 电导率为 1.0×10^7 。根据趋肤效应公式, 可计算趋肤深度 1.0 mm, 为磁极宽度的 1/5, 因此, 令钢板磁路的趋肤横截面积 $S_2 = S_1/5 = 4 \text{ mm}^2$ 。微分磁导率 μ_d 取值范围为 $(\mu_0, 450\mu_0)$, 由式 (12) 可得该检测探头电感量与被测钢板表面微分磁导率的相关曲线如图 4 所示。

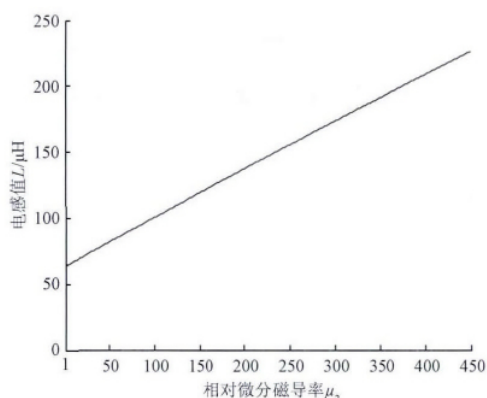


图 4 材料微分磁导率与一体化线圈电感值关系曲线
Fig. 4 Relationship curve between differential permeability of the material and inductance of the integrated coil

相对于漏磁检测(magnetic flux leakage , MFL) 方法 , 新方法具有显著特点: 首先 , 新方法中仅需提供一个偏置磁场 , 而无需对被测钢板进行饱和磁化 , 有利用检测器的轻便化; 其次 , 新方法通过对材料表面微分磁导率分布来探测缺陷 , 不会在空气中形成明显的漏通泄漏; 再次 , 新方法通过对线圈电感的监测来达到检测缺陷的目的。而对于电感的测量 , 其激励及检测信号均为交流信号。因此 , 由零漂和温漂而造成的放大器静态工作点变化 , 对本文方法中所采用的交流信号的影响可忽略。从而避免了传统 MFL 检测使用直流放大器而导致的零漂和温漂问题。

4 实验与验证

4.1 微分磁导率的测量实验

参考第 3 节算例中的计算结果 , 研制本文实验用的微分磁导率检测探头。探头选用高频铁氧体材料 , 外形为 12 mm × 4 mm × 6 mm。使用 0.1 mm 的漆包线均匀绕制 100 匝作为探头的一体化线圈。实验材料选用 Q235 钢板 , 外形尺寸 400 mm × 200 mm , 厚度为 9 mm。并使用 HIOKI IM3523 型阻抗测试仪进行电感量的检测。

首先 , 将探头置于空气中(即空载状态) , 并记此时一体化线圈的电感值为探头空载电感 L_0 。设置 IM3523 的激励电压为 2.0 V , 激励频率 f 在其量程 40 Hz ~ 200 kHz 变化^[13]。开启 IM3523 同步动态测量功能 , 在对数坐标下均匀扫描 200 个采样点 , 记录对 L_0 的扫频结果。其扫频曲线如图 5 中 L_0 曲线所示。

如图 5 所示 , 空载电感 L_0 的扫频曲线近似呈现一条水平线。这说明该探头频率特性较好 , 在 200 kHz 以内 , 其空载电感 L_0 几乎不受激励频率的影响。

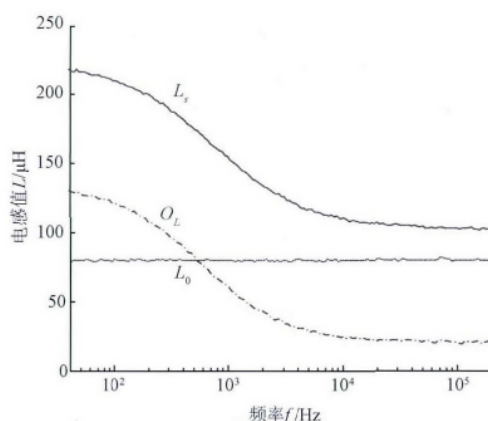


图 5 微分磁导率检测探头的空载电感 L_0 、负载电感 L_s 及探头输出 O_L 随频率变化曲线
Fig. 5 Curves of no-load inductance L_0 , load inductance L_s and output O_L of differential permeability test probe vs. frequency

将探头置于被测 Q235 钢板上方。此时 , 记一体化线圈的电感值为探头的负载电感 L_s 。利用 IM3523 再对 L_s 进行动态测试 , 测试过程如图 6 所示。

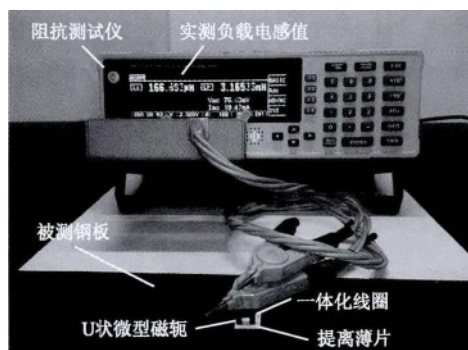


图 6 探头负载电感 L_s 的频率特性测试
Fig. 6 Frequency characteristic test of load inductance L_s of the probe

测试激励频率 f 仍在 40 Hz ~ 200 kHz 变化 , 实测 L_s 随频率 f 变化曲线如图 5 中 L_s 曲线所示。很明显 , 探测 Q235 钢板时 , 探头的负载电感 L_s 随着频率 f 的增加 , 呈现较明显的 S 形衰减趋势。

由于钢材的有效工作频率远小于微型 U 状磁轭 , 因此当 f 提高时 , 被 Q235 钢板的磁损耗增大并逐渐失去导磁能力。特别是在高频 ($f > 100$ kHz) 时 , 负载电感 L_s 衰减趋于稳定 , 并逐渐趋于空载电感 L_0 。

实际应用中 , 可用 L_s 减去 L_0 作为探头的检测输出 O_L , 则 O_L 随 f 的响应曲线如图 5 中 O_L 曲线所示。根据图 5 中 O_L 的分布特点 , 本文实验中选择 100 Hz 作为一体化线圈的激励与测试频率^[14]。

4.2 偏置磁化场对微分磁导率的影响

为实现偏置磁化场强度的可调性,实验中设计一款采用U型磁轭的偏置磁化器。U型偏置磁轭的外形尺寸为200 mm×50 mm×70 mm,微分磁导率检测探头被置于偏置磁化器正中间。直流励磁线圈采用1.0 mm的漆包线绕制200匝制作而成,并使用直流稳压电源RXN-302-D2进行驱动,使偏置电流 I 在0~3.0 A。检测探头的输出 O_L 通过电感测量电路转换为模拟电压,并通过USB接口的数据采集器采样进行计算机。该实验系统及相关仪器如图7所示。

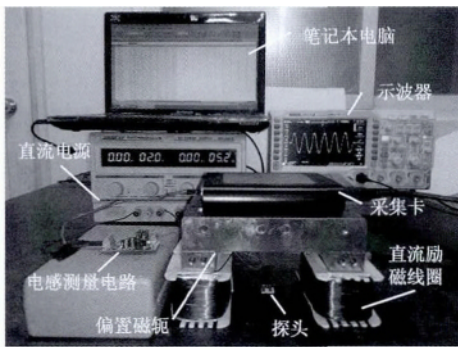


图7 钢板微分磁导率测量系统的实验现场
Fig. 7 The photo of the test system of differential permeability for steel plate in laboratory

将偏置磁化器和检测探头装配在行进小车上并保持1.0 mm的有效提离值,置于被测钢板的表面,并对一个大小为8 mm×2.5 mm×2 mm正面缺陷进行扫查实验。实验时,一体化线圈的激励频率 f 保持在100 Hz。从小到大逐渐调整偏置电流 I (每次递增0.2 A)并均沿相同路径对该缺陷进行反复扫查。同时,记录静态下的探头输出 O_L ,其与偏置电流 I 的关系曲线见图8(a)所示。在扫查过程中,用数据采集卡采集行进小车位移 x 和探头输出值 O_L 。绘制不同偏置电流 I 下,探头的扫查输出曲线如图8(b)所示。

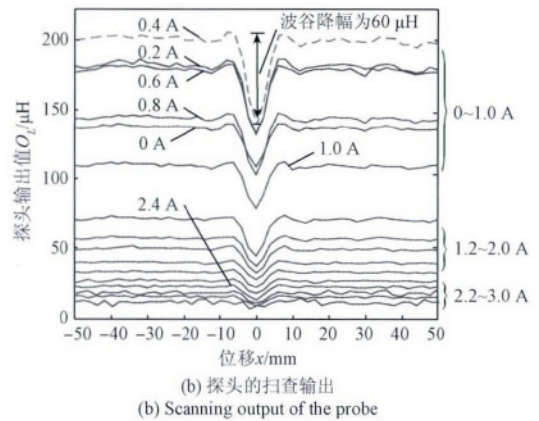
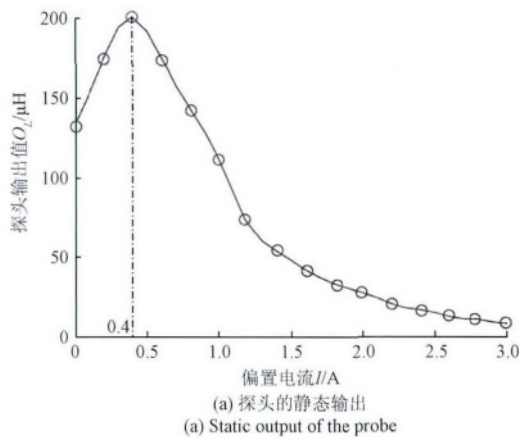


图8 探头输出 O_L 与偏置电流 I 的关系

Fig. 8 Relationship of probe output O_L vs. bias current I

在直流励磁系统中,偏置磁场强度和偏置电流 I 成正比。因此,从图8(a)中可以看出,随 I 的增大, O_L 也逐渐增大,并当 $I=0.4$ A左右达到峰值。此时,钢板的微分磁导率达到最大值 μ_{top} 。但随 I 进一步增加, O_L 开始逐渐减小。当 $I>2.4$ A时,被测Q235钢板已逐渐趋于饱和。此时, μ_d 近似为 μ_0 ,探头输出 O_L 趋于0。上述实测规律与如图1(b)所示微分磁导率变化规律完全一致,实际证明本文方法的可行性。根据文中实验,偏置电流 I 应设为0.4~0.5 A时较佳。

图8(b)表示不同的偏置电流 I 对应的探头扫查曲线,其中 I 以0.2 A为间隔从0~3.0 A变化。从图8(b)中可以看出,当 I 较小(0~1.0 A)时,探头输出 O_L 对缺陷较为敏感。尤其 $I=0.4$ A时,检测灵敏度可达到最佳,缺陷所造成的检测波谷可达60 μH 。

随着 I 的继续增加,探头静态输出单调减小,缺陷检测的波谷降幅也逐渐减小,检测灵敏度下降。当 $I>2.2$ A时,钢板已接近饱和状态,此时探头无检测能力。传统MFL方法在接近饱和和磁化时检测能力最强,而本文所提方法的该特性与MFL完全相反。

从该实验看出,新方法中需要的偏置磁场强度很小,仅为饱和磁化强度的20%左右,不会产生明显的磁泄漏。因此,相比现有MFL检测方法,新方法在减小磁化器体积和磁辐射噪声方面也具有优势。

4.3 正、反面缺陷的探测实验

在Q235钢板不同区域的正面和反面,分别机械加工了两个外形尺寸完全相同的凹槽以模拟裂纹缺陷,两缺陷的长、宽、深均为10 mm×2.5 mm×2 mm。

将行进小车置于正面缺陷的上方,且暂不施加偏置磁场,即 $I=0$ A。然后,沿缺陷垂直方向进行扫查,扫查间隔为2.0 mm。取该缺陷中心两侧±50 mm范围的扫查数据,结果如图9(a)所示。

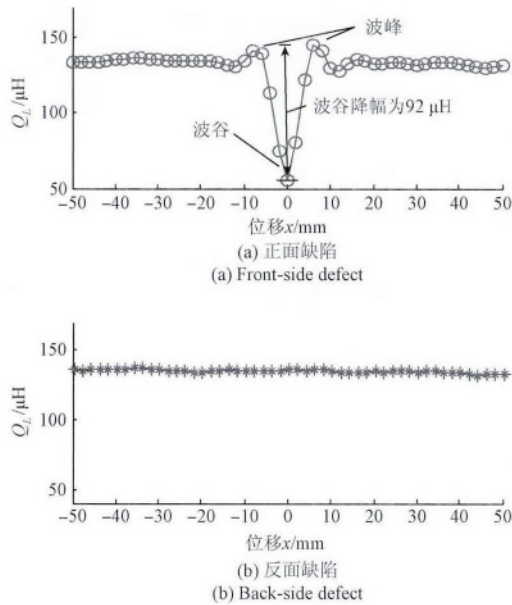


图 9 无偏置磁场条件下的正、反面缺陷的扫查结果
Fig. 9 Scanning results of the front-side and back-side defect without bias magnetic field

由图 9 可以看出, 在无缺陷处, 探头输出 O_L 相对稳定, 输出值约为 $134 \mu\text{H}$, 波动在 $\pm 2 \mu\text{H}$ 范围。当探头处于正面缺陷上方时, O_L 波谷降幅达到 $92 \mu\text{H}$ 。主要是由于微型 U 状磁轭的磁回路受到缺陷阻碍, 从而造成探头输出电感量 L_s 明显衰减。

需要特别注意的是对正面缺陷的检测过程中, O_L 在缺陷的边缘处还会形成两个小的检测波峰。如图 9 中所示, 该波峰值约为 $146 \mu\text{H}$, 相对于无缺陷处有 $12 \mu\text{H}$ 左右的差异。这主要是由于微型 U 状磁轭的极靴处会形成涡流导致实测电感量的暂时上升。

在无偏置磁场的条件下, 对反面缺陷进行扫查, 其结果如图 9(b) 所示。在无偏置磁场条件下, 反面缺陷并不会改变检测面的微分磁导率, 探头的输出维持在 $134 \mu\text{H}$ 左右。因此, 若无偏置磁场, 微分磁导率探头, 对钢板反面及内部缺陷无探测能力。

在 $0.4 \sim 2.0 \text{ A}$, 从小到大逐渐调整偏置电流 I (每次递增 0.2 A)。再对上述反面缺陷进行扫查。扫查结果如图 10 所示, 其中, 各扫查曲线从上至下分别对应 $0.4 \sim 2.0 \text{ A}$ 的偏置磁化场。

图 10 中, 箭头方向表示偏置电流 I 以 0.2 A 为间隔递增的方向。对比图 9 和 10 中反面缺陷的扫查结果可以看出, 偏置磁场对检测结果的影响非常明显。对钢板浅度磁化后, 探头输出 O_L 对正、反面缺陷均有探测能力。但随着偏置电流在 $0.4 \sim 2.0 \text{ A}$ 增加, 波谷降幅也从 $52 \mu\text{H}$ 到 $3 \mu\text{H}$ 单调减小。

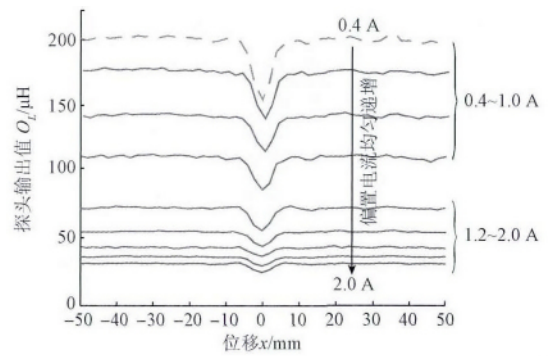


图 10 不同偏置磁场条件下反面缺陷的扫查结果
Fig. 10 Scanning results of the back-side defect under different bias magnetic fields

对比图 8 和 10 可以看出, 在偏置磁化加深到饱和状态时(图 8 中 I 在 $2.2 \sim 3.0 \text{ A}$, 图 10 中 I 在 $1.2 \sim 2.0 \text{ A}$), 波谷降幅几乎观察不到, 新方法对正、反面缺陷的检测均失效。因此, 新方法不但具备对被测材料正、反面缺陷同时检测的能力, 而且由于正面缺陷存在边缘效应, 还可对正、反缺陷的进行区分。该优越性也是常规 MFL 方法所不具备的。

最后, 利用永磁铁代替直流励磁线圈提供偏置磁场。当采用 12 mm 钕铁硼时, 被测 Q235 钢板内的平均磁通密度 B_p 与偏置电流 I 为 0.5 A 左右时的励磁效果相当。在偏置磁化器正中间, 布置 11 个微分磁导率探头, 间距为 4.0 mm , 以形成阵列^[15]。采用永磁铁进行偏置磁化的检测器原型机如图 11 所示。

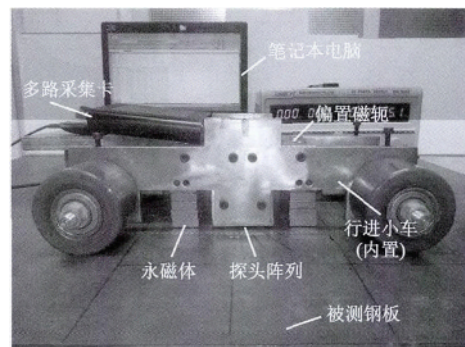


图 11 检测器原型机外形及测试现场照片
Fig. 11 The photo of the detector prototype and test scene

重复上述扫查实验, 用多路数据采集卡记录阵列中 11 个探头的电感输出 $O_L(i)$, $i = 1, 2, \dots, 11$ 。根据对缺陷 11 路探头的阵列输出 $O_L(i)$, 分别绘制缺陷的 3 维扫查成像, 其中, x 方向(即检测器扫查方向)的分辨率为 2.0 mm , y 方向(即探头阵列)的分辨率为 4.0 mm 。3 维扫查成像如图 12 所示。

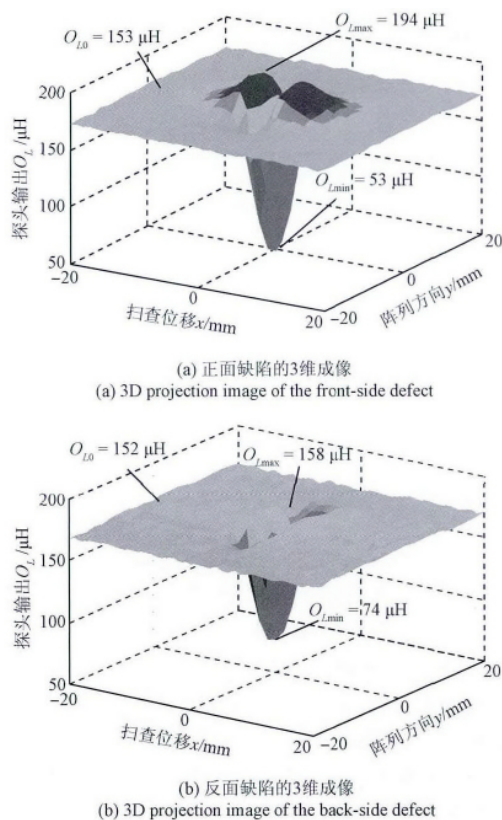


图 12 检测器对正、反面缺陷扫描的 3 维成像
Fig. 12 3D projection images of the scanning results
for the front-side and back-side defects

从图 12 中可以看出,所提新型检测器对正面和反面缺陷均有较高的灵敏度,均在缺陷处会形成检测波谷;该特征信号形态与传统 MFL 检测信号特征完全相反。

通过对图 12 的对比,新型检测器对反面缺陷的检测灵敏度低于正面缺陷,但两者的波谷形态非常接近。但正面缺陷除了形成一个清晰的波谷之外,还会缺陷两侧形成两个小的波峰,如图 12(a) 所示。而反面缺陷的 3 维成像中,无该现象。该检测信号分布的差异,对有效识别缺陷发生的正、反面是有明显价值的。

因此,实际测试与验证的结果表明,新方法利用铁磁材料的微分磁导率特性,仅需要对表面微分磁导率分布进行扫描,即可获得材料内部的缺陷信息,并能实现正、反面缺陷的识别。

5 结 论

本文提出利用微分磁导率来实现钢板缺陷的无损检测新方法。新方法的偏置磁场仅为饱和磁化强度的 20% 左右,亦不会产生漏磁场,在减小磁化器体积以及减小磁场泄漏噪声方面具有优势。

新方法对于正面缺陷,扫描信号呈现中间波谷、两边波峰分布特点,而对于内部及反面缺陷,却仅在缺陷处形成检测波谷,不会产生波峰。该特征值有利于新方法实现正、反面缺陷的识别。

新方法存在最佳偏置磁化强度。当被测钢板被磁化接近饱和状态时,新方法反而失去对缺陷的检测能力,该特点与现有的 MFL 方法刚好相反。新方法作为一个新思路,本文只是抛砖引玉,如何提高缺陷检测灵敏度,如何实现缺陷尺寸的量化,及进一步的理论模型分析等还有待深入研究。

致 谢

该项目得到了“福建省高端装备制造协同创新中心”的大力支持并提供了相关条件,在此表示感谢。

参考文献

- [1] 杨理践,耿浩,高松巍. 长输油气管道漏磁内检测技术[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746.
YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology of the long distance oil pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1736-1746.
- [2] 王国庆,杨理践,刘斌. 基于磁记忆的油气管道应力损伤检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2017,38(2):271-278.
WANG G Q, YANG L J, LIU B. Study on the testing method of oil-gas pipeline stress damage based on magnetic memory [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 271-278.
- [3] 任尚坤,郭峰,徐振瀚. 20#钢构件应力疲劳检测的新技术及试验研究[J]. 仪器仪表学报,2014,35(5):1155-1160.
REN SH K, GUO F, XU ZH H. Studies on new testing technique and experiment of stress fatigue damage for 20# steel component [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1155-1160.
- [4] 刘秀成,吴斌,何存富. 磁致伸缩与磁弹一体化传感器的研制[J]. 机械工程学报,2013,49(22):46-52.
LIU X CH, WU B, HE C F. Novel design of integrated sensor based on magnetostrictive and elastomagnetic effect [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(22): 46-52.
- [5] 唐德东,黄尚廉,陈伟民,等. 基于磁弹效应的钢缆索力测量中励磁磁路研究[J]. 仪器仪表学报,2006,27(12):1695-1699.
TANG D D, HUANG SH L, CHEN W M, et al. Study on the magnetic excitation circuit for measuring the cable

- tension based on magneto-elastic effect in steel cable [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(12): 1695-1699.
- [6] 陈伟民, 姜建山, 章鹏, 等. 钢缆索力磁性传感理论模型与实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(4): 794-799.
CHEN W M, JIANG J SH, ZHANG P, et al. Modeling and experiment of cable tension magneto-sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(4): 794-799.
- [7] LIU J, WILSON J, STRANGWOOD M, et al. Magnetic characterisation of microstructural feature distribution in P9 and T22 steels by major and minor BH loop measurements [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2016, 401(3): 579-592.
- [8] CHEN H E, XIE S, ZHOU H, et al. Numerical simulation of magnetic incremental permeability for ferromagnetic material [J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2014, 45(1): 379-386.
- [9] K TENA A, DAVINO D, VISIONE C, et al. Stress dependent vector magnetic properties in electrical steel [J]. Physica B Condensed Matter, 2014, 435(1): 25-27.
- [10] PALA J, UŠÁK E. New parameters in adaptive testing of ferromagnetic materials utilizing magnetic Barkhausen noise [J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2016, 402(3): 172-177.
- [11] GABI Y, WOLTER B, GERBERSHAGEN A, et al. FEM Simulations of incremental permeability signals of a multi-layer steel with consideration of the hysteretic behavior of each layer [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(4): 1-4.
- [12] 韩赞东, 李晓阳. 基于动态磁化的结构钢磁导率和电磁损耗测量方法 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2014, 54(11): 1471-1474.
HAN Z D, LI X Y. Measurement of magnetic permeability and magnetic loss of structural steel for dynamic magnetization [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2014, 54(11): 1471-1474.
- [13] TIAN G, ZHOU X, ADEWALE I D. Pulsed Electromagnetic Non-destructive Evaluation and Applications [J]. Instrumentation, 2014(1).
- [14] 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 internal and external cracks of ferromagnetic structures [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1808-1817.
- [15] 于霞, 张卫民, 邱勇, 等. 弱磁场激励下基于阵列磁传感器的缺陷检测方法 [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(5): 460-463.
YU X, ZHANG W M, QIU Y, et al. Defect detection methods based on array magnetic sensor under weak magnetic field [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(5): 460-463.

作者简介



吴德会 2006 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为厦门大学机电系副教授, 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 received his Ph. D. degree in 2006 from Hefei University of Technology. Now, he is an associate professor in Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University. His main research direction includes NDT, sensor technology, intelligent measurement and control technology.



王晓红 (通讯作者) 2009 年于大连理工大学获得硕士学位, 现为厦门大学机电系高工, 主要研究方向为传感器技术。

E-mail: wxh@xmu.edu.cn

Wang Xiaohong (Corresponding author) received her M. Sc. degree in 2009 from Dalian University of Technology. Now, she is a senior engineer in Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University. Her main research direction is sensor technology.