

Crack Detection of Ferrite Based on the Initial Permeability*

QIU Jian, XU Hao, HOU Dexing, YE Shuliang*

(China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Ferrite is widely used as anti-interference components in circuitry and its electrical properties is seriously affected by crack defects caused by production stress; the traditional method of ferrite detection is inaccurate, slow, and difficult to meet the demand for rapid detection of the product. The detection method based on initial magnetic permeability will be applied to the detection of ferrite workpieces, and the detection sensor will be optimized to enable obtain accurate output response under small excitation. Considering the structure, size, magnetic permeability and other parameters, several experiments are designed to compare the performance of the optimized sensor with the original. These experiments demonstrate the validity of our method and the parameters optimization.

Key words: non-destructive testing; crack; initial permeability; ferrite; optimization

EEACC: 7310L; 5140; 7210A

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.07.025

基于初始磁导率的铁氧体裂纹检测*

邱建, 徐浩, 侯德鑫, 叶树亮*

(中国计量学院计量测试工程分院, 杭州 310018)

摘要: 铁氧体是电子电路中广泛使用的抗干扰元件, 生产中应力引发的内部缺陷裂纹严重影响其电气性能。其传统检测方法准确率低、速度慢, 难以满足产品的快速检测需求。将基于初始磁导率的缺陷检测方法运用于铁氧体工件的检测, 对检测传感器进行优化, 使之能够在微小激励下获得准确的输出响应。对改进前后的传感器进行了对比实验, 分别就其结构、尺寸、磁导率等参数进行了针对性分析, 证明了该检测方法和参数优化的有效性。

关键词: 无损检测; 裂纹; 初始磁导率; 铁氧体; 优化

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)07-1025-05

我国是全球最大的铁氧体生产国, 该材料被大量地应用于电子制造业以降低电子设备的电磁干扰^[1-2]。铁氧体裂纹缺陷对产品性能有严重影响^[3], 而现有检测方法步骤繁琐, 难以满足产量突飞猛进现状下的快速检测需求, 市场急需一种准确高效的铁氧体裂纹检测方法。

铁氧体材料裂纹检测的传统方法主要有听音法和渗透法, 两者都依赖于人工, 准确率低且检测速度慢^[4-5]。基于初始磁导率的缺陷检测方法是一种非接触式的检测方法, 近年来因无需退磁、对工件表面要求低等优点在检测领域得到广泛应用。日本和欧美等国家基于初始磁导率值与钢材硬度成反比的原理实现了带钢硬度在线自动测定^[6-8]; 哈尔滨理工大学万国庆团队依据初始磁导率与缺陷的对应关系

实现了对钢材的表面裂纹、内部裂纹、折迭、疏松、气孔夹杂等方面的检测^[9-11]。然而以上的研究对象皆为大尺寸规则钢材, 未见对小尺寸、窄初始磁化区的铁氧体材料检测研究。

本文将基于初始磁导率的裂纹检测方法运用于铁氧体裂纹检测中, 针对铁氧体工件小且不规则、初始磁化区较窄、原有模型不适用等情况, 对检测原理进行改进, 优化了检测模型, 在微小激励下对输出响应的进行提取, 实现了准确、有效的铁氧体裂纹缺陷检测。

1 基于初始磁导率的裂纹检测原理

磁导率是铁氧体材料的重要属性, 裂纹的存在会改变铁氧体的磁导率^[12], 检测铁氧体工件的磁导率变化可判断工件是否存在缺陷。

项目来源: 国家质检总局公益性行业科研专项项目(2012QK335)

收稿日期: 2013-03-14 修改日期: 2013-05-21

1.1 检测模型

通过构建磁回路和施加磁场激励,将备检铁氧化物材料的磁阻变化反应在电压输出上,实现对铁氧化物裂纹的检测。如图1所示,模型的主体部分为一探头,距离被测件有一定高度,与两极之间的被测件部分构成磁回路。

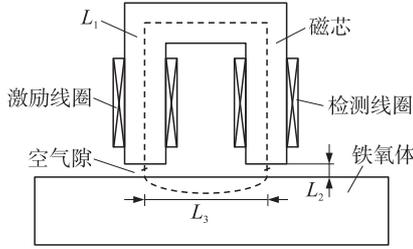


图1 检测原理示意图

依据安培环路定理 $\oint_L H \cdot dl = \sum i$ 和磁路的欧姆定律 $F = \sum \phi R$, 可得

$$\phi = \frac{N_1 i}{\frac{L_1}{\mu_1 S} + \frac{2L_2}{\mu_2 S} + \frac{L_3}{\mu_3 S}} \quad (1)$$

式中, ϕ 为磁回路磁通; μ_1, μ_2, μ_3 为探头磁芯、空气隙、被测件的磁导率; L_1, L_2, L_3 为探头、空气隙和被测区域长度; N_1 为激励线圈匝数; i 为激励电流; S 为磁路截面积。

引入麦克斯韦第二方程 $\oint_L E \cdot dl = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot ds$, 代入式(1)得到

$$u_{out} = \frac{N_1 N_2}{\frac{L_1}{\mu_1 S} + \frac{2L_2}{\mu_2 S} + \frac{L_3}{\mu_3 S}} \cdot \frac{di}{dt} \quad (2)$$

式中, N_2 为响应线圈匝数。

由上式可知, 当被测铁氧化物磁导率 μ_3 发生变化时, 可造成对应的输出响应电压发生变化。因为裂纹可减小铁氧化物的磁导率, 所以根据输出电压幅值大小的变化, 即可判断被测对象内部裂纹存在情况。

1.2 检测工况设计

铁氧化物材料的磁导率不是一个常数^[13], 在不同激励作用下呈现不同磁阻, 因而磁阻与裂纹不能保持固定对应关系, 进而不能准确检测出材料裂纹。铁氧化物磁化曲线如图2所示。

由图2可见, 铁氧化物的磁化曲线呈现S型, 磁阻和磁导率都有大范围的变化幅度^[14]。裂纹检测需要磁导率保持不变, 可见仅在激励处于初始阶段区域, 即图2中 H 值处于 $0 \sim a$ 点范围内时, 磁化曲线近似为一条直线, 磁导率固定, 磁阻为常数, 才能满足要求。该区域被称为初始磁化区^[15]。

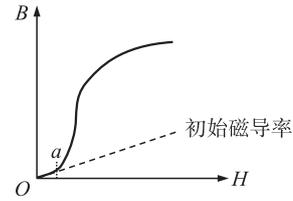


图2 铁氧化物材料磁化曲线

铁氧化物是一种铁磁性金属氧化物, 其磁化特性较金属材料有更窄的初始磁化区^[16-18], 因此对检测时所需的激励信号有更高的要求。参考 $Mn-Zn, Ni-Zn$ 等铁氧化物材料的磁化曲线, 对初始磁化区均要求 $B < 0.1 \text{ mT}$ 时才能满足检测要求, 因此检测激励电流

$$i = \frac{BL}{\mu N} < \frac{0.1L}{\mu N} \times 10^{-3} \quad (3)$$

可见铁氧化物材料的裂纹检测必须实现对微小激励信号作用下的输出响应的准确提取。

2 铁氧化物缺陷检测系统优化

鉴于铁氧化物缺陷检测存在弱激励、高灵敏度的要求, 对检测系统加以改进。

2.1 差动式传感器分析

图1所示的2极检测探头易受干扰, 尤其在激励为微小信号情形下, 检测信号更容易被噪声掩盖, 对其改进为图3所示的差动检测模式。

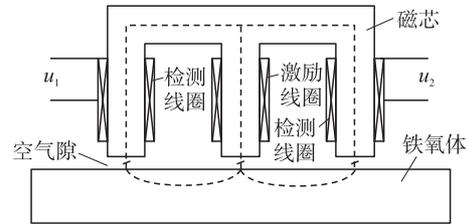


图3 差动检测探头示意图

图3中, 激励由3极探头的中间端输入, 分别与左右两端形成磁回路, 形成输出 u_1, u_2 , 二者差值为

$$\Delta u = u_1 - u_2 \quad (4)$$

当左右两侧磁回路中均不含有裂纹, 两检测探头信号差值为零; 当其中一边磁回路因裂纹产生变化时, 差值输出信号出现输出电压值, 实现对裂纹的存在检测。

将式(2)代入式(4)中, 令 $X = \frac{L_1}{\mu_1 S} + \frac{2L_2}{\mu_2 S} + \frac{L_3}{\mu_3 S}, Y =$

$N_1 N_2 \frac{di}{dt}$, 化简得到:

$$\Delta u = \frac{Y L_3 \Delta \mu_3}{S \mu_3^2 X^2 - (S \mu_3 X^2 - X L_3) \Delta \mu_3} \quad (5)$$

由于两磁路所处检测条件相同, 两者的干扰属于共模干扰, 可以相互抵消, 式(5)的输出信号将不包含

干扰信号,信噪比大幅提升,裂纹信号可以突显出来。

2.2 传感器优化

式(5)所得到的仅为差动探头输出的交流信号,为方便检测,将其经后续放大、整流等过程,得到最终的直流电压输出

$$U = A \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot |\Delta u|_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{2} AN_1 N_2 \omega i_{\max} \cdot \frac{L_3 \Delta \mu_3}{S \mu_3^2 X^2 - (S \mu_3 X^2 - XL_3) \Delta \mu_3} \quad (6)$$

式中 A 为调制电路信号放大倍数。

则输出灵敏度为

$$S_d = \frac{\sqrt{2}/2 AN_1 N_2 \omega i_{\max} L_3}{S \mu_3^2 X^2 - (S \mu_3 X^2 - XL_3) \Delta \mu_3} \quad (7)$$

即 $S_d \propto \frac{1}{S \mu_3^2 X^2 - (S \mu_3 X^2 - XL_3) \Delta \mu_3}$, 为获得高灵敏度,设计中应尽量减小变量 X 值。

由式(5)知道 $X = \frac{L_1}{\mu_1 S} + \frac{2L_2}{\mu_2 S} + \frac{L_3}{\mu_3 S}$, 可以看出减小 L_1 、 L_2 、 L_3 , 增大 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 和 S 都可以减小 X 。因为 L_3 、 μ_3 为被测对象参数, μ_2 为检测时气隙参数, 均不受控制, 所以只能尽量减小 L_1 、增大 μ_1 和 S , 即尽可能减小传感器探头磁芯长度、增大磁芯截面积, 并选择具有高初始磁导率的磁芯材料, 同时检测时探头尽量贴近被测件, 以减小 L_2 , 以提升灵敏度。

3 实验与数据分析

3.1 实验工况

在密闭室内环境下进行系统测试实验, 实验期间温度 $24.1^\circ\text{C} \sim 26.5^\circ\text{C}$, 湿度为 $45\% \sim 60\%$, 使用安捷伦 33250A 作为信号源, 泰克 TDS2024B 示波器作为信号检测装置, 设备精度分别为 $\pm 1\%$, 设置值

$\pm 1 \text{ mV}_{\text{pp}}$ 和 $\pm 3\% \text{ DC}$ 垂直精确度^[19]。实验使用不同探头对同一试件进行检测, 实验对象为缺陷参数已知的铁氧体试块, 如图 4 所示。

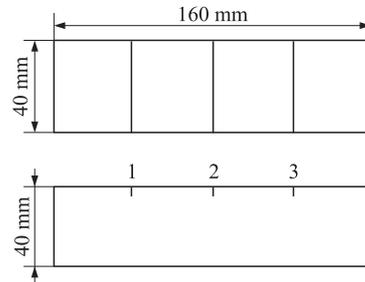


图 4 实验试块示意图

试件为 $160 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的铁氧体, 上面有加工好的细槽, 其中槽 1 深 1 mm; 槽 2 深 2 mm; 槽 3 深 3 mm, 槽宽均为 0.5 mm。

试验以探头极数、磁芯初始磁导率、长度、截面积为研究对象, 实验探头如表 1 所示。

3.2 实验数据与分析

分别使用表 1 中各个探头对图 4 所示试验试块进行扫描检测, 以线圈峰值电压为输出量, 实验结果如表 2 所示。

通过对实验结果的分析可得, 对于探头极数、磁芯初始磁导率、磁芯截面积都对灵敏度有较大影响, 各因素变化时指标的变化规律如图 5 所示。

由图 5 可见, 当传感器探头极数由 2 极变为 3 极时, 输出的信号幅值变大, 灵敏度变高, 如图 5(a); 当磁芯材料由铁换为硅钢, 再换为坡莫合金时, 磁芯的初始磁导率越来越大, 输出电压也越来越大, 灵敏度增高, 如图 5(b); 当磁芯截面积增大和磁芯长度减小时, 输出电压增大, 灵敏度升高, 如图 5(c)、图 5(d)。

表 1 探头参数

| 探头编号 | 探头极数 | 磁芯长度(单位:mm) | 磁芯(初始磁导率) | 磁芯截面积(单位:mm ²) |
|------|------|-------------|-------------|----------------------------|
| 1 | 3 | 30 | 铁(300) | 20 |
| 2 | 3 | 30 | 硅钢(2000) | 30 |
| 3 | 3 | 30 | 坡莫合金(20000) | 40 |
| 4 | 3 | 30 | 铁(300) | 30 |
| 5 | 3 | 30 | 硅钢(2000) | 40 |
| 6 | 3 | 30 | 坡莫合金(20000) | 20 |
| 7 | 3 | 30 | 铁(300) | 40 |
| 8 | 3 | 30 | 硅钢(2000) | 20 |
| 9 | 3 | 30 | 坡莫合金(20000) | 30 |
| 10 | 2 | 20 | 硅钢(2000) | 30 |
| 11 | 2 | 30 | 硅钢(2000) | 30 |
| 12 | 2 | 40 | 硅钢(2000) | 30 |
| 13 | 3 | 20 | 硅钢(2000) | 30 |
| 14 | 3 | 40 | 硅钢(2000) | 30 |

表2 探头扫描实验数据 (单位:V)

| 传感器 | 裂纹1 | 裂纹2 | 裂纹3 | 传感器 | 裂纹1 | 裂纹2 | 裂纹3 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 探头1 | 0.34 | 0.45 | 0.62 | 探头8 | 2.96 | 3.91 | 4.69 |
| 探头2 | 3.56 | 4.78 | 5.69 | 探头9 | 5.25 | 6.78 | 8.96 |
| 探头3 | 6.17 | 8.1 | 9.34 | 探头10 | 2.67 | 3.52 | 4.53 |
| 探头4 | 0.8 | 1.48 | 2.13 | 探头11 | 2.69 | 3.15 | 4.1 |
| 探头5 | 4.86 | 5.67 | 6.62 | 探头12 | 2 | 2.5 | 3.5 |
| 探头6 | 5.22 | 6.34 | 8.1 | 探头13 | 4 | 5.4 | 6.1 |
| 探头7 | 1.26 | 2.01 | 3.18 | 探头14 | 3.3 | 4.8 | 5.53 |

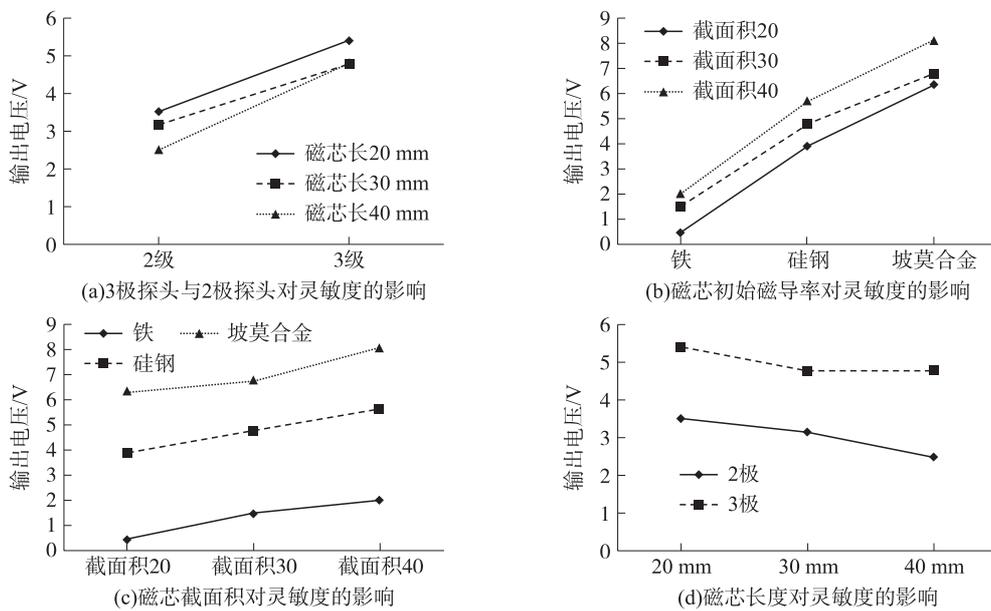


图5 传感器各参数对灵敏度的影响

综上所述,差式探头有效屏蔽外界干扰,探头磁芯材料初始磁导率越大、截面积越大,检测灵敏度越高。按照正交设计的思想把这三个因素的最好水平组合起来就得到一个好的检测条件。

4 结论

针对铁氧体工件的准确高效的检测需求,提出了基于初始磁导率的铁氧体缺陷检测方法。对检测模型和传感器进行改进和优化,使之能够满足小尺寸、窄初始磁化区的铁氧体检测要求,比对实验结果表明:①基于初始磁导率的缺陷检测方法能够完成铁氧体裂纹的检测;②差动式结构的传感器可有效屏蔽干扰,灵敏度更高;③探头磁芯材料初始磁导率越大、截面积越大,长度越短检测灵敏度越高。

参考文献:

[1] 李家伟,陈积懋.无损检测手册[M].北京:机械工业出版社,

2002:392-397.
 [2] 牛青山,贾虎生,许并社.低温烧结 NiCuZn 铁氧体材料的研究现状及进展[J].中北大学学报(自然科学版),2008,29(5):453-460.
 [3] 张辉,杨宾峰,荆毅飞.基于连通磁路的脉冲远场涡流传感器设计及缺陷定量评估与分类识别[J].传感技术学报,2012,25(10):1370-1375.
 [4] 仇海珍,李良超,徐烽. 锌锰铁氧体纳米粉体的制备与磁性[J].中国有色金属学报,2008,18(6):1100-1104.
 [5] 桑商斌,黄可龙,古映莹.水热法制备的锌锰铁氧体纳米晶的离子分布、缺陷与磁性能[J].中国有色金属学报,2003,13(4):1041-1045.
 [6] Nacereddine N, Tridi M, Hamami L, et al. Statistical Tools for Weld Defect Evaluation in Radiographic Testing [C]//Proceedings of 12th European Conference on Non-Destructive Testing-ECNDT 2006.
 [7] Ohtsu M, Shigeishi M. Three-Dimensional Visualization of Moment Tensor Analysis by SiGMA-AE [J]. Journal of Nondestructive Testing(Germany), 2002, 7(9):1-8.
 [8] Esveld C. Principles of Track Quality Recording and Assessment [J]. Rail International, 2007(1):59-73.

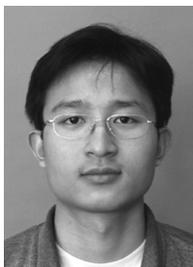
- [9] 何辅云,张海燕,丁克勤. 钢管漏磁高速检测技术与系统[M]. 机械工业出版社,2009:9.
- [10] 万静,樊景云. Development and Application of WGQ Type Micro-Computer-Based Electromagnetic Nondestructive Testing Instrument for Quality of Metal Material[J]. 中国有色金属学会会刊:英文版,2004,12(6):1058-1062.
- [11] 高剑森,张宁. 异型磁体/铁电复合材料中的电致变磁导及电致变阻抗效应[J]. 物理学报,2009(12):8607-8611.
- [12] 姜坤良,刘先松,王超. 低损耗铁粉芯的制备与磁性研究[J]. 功能材料,2012,43(16):2153-2155.
- [13] 胡祥超,罗飞路,何赆泽. 航空原位涡流无损检测传感器数控阻抗信号调理电桥研究[J]. 传感技术学报,2010,23(8):1123-1128.
- [14] Nacereddine N, Tridi M, Hamami L, et al. Statistical Tools for Weld Defect Evaluation in Radiographic Testing [C]//Proceedings of 12th European Conference on Non-Destructive Testing-ECNDT 2006. 2006.
- [15] Goumeidane A B, Khamadja M, Odet C. Parametric Active Contour for Boundary Estimation of Weld Defects in Radiographic Testing [C]//Signal Processing and Its Applications, 2007. ISSPA 2007. 9th International Symposium on IEEE, 2007:1-4.
- [16] Fu Lin, Yang Suijun, Wang Xueying, et al. Relationship between Crack Defects in Magnetic Tiles and Vibration Frequencies of High-Order Vibration Mode Based on Modal Technology [C]//Proc SPIE Int Soc Opt Eng v7544(2010), ISPEMI2010, Sixth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, 2010.
- [17] 竺冉,吕福在,唐志峰. 磁致伸缩纵向导波传感器中偏置磁场的优化设计[J]. 传感技术学报,2011,24(3):371-375.
- [18] 邱建,傅琳,王晓娜,等. 基于高阶多振型频率的磁瓦缺陷音频检测方法[J]. 制造业自动化,2011,33(8):26-29.
- [19] 朱维斌,朱善安,叶树亮,等. 基于相位跟踪原理的超精密定位平台研究[J]. 仪器仪表学报,2012,33(10):2301-2306.



邱建(1980-),男,2005年于哈尔滨工业大学获工学硕士学位,现为中国计量学院精密仪器专业讲师,主要研究方向为新型传感技术及仪器信号处理,qj_qiujian@163.com;



徐浩(1989-),男,2011年于南京师范大学获工学学士学位,现为中国计量学院在读硕士研究生,主要研究方向为电磁无损检测技术与信号处理,jlxuhao@163.com;



侯德鑫(1983-),男,2005年于清华大学获工学学士学位,2007年于清华大学获工学硕士学位,现为中国计量学院计量测试工程学院实验师,主要研究方向为无损检测检测,dexin_hou@163.com;



叶树亮(1973-),男,1999年于东北林业大学获工学硕士学位,2005年于哈尔滨工业大学获工学博士学位,现为中国计量学院精密仪器专业教授,主要研究方向为新型传感技术及仪器信号处理,IITMI_paper@126.com@126.com。