

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108082

基于双轴 TMR 电磁传感器的裂纹检测方法研究*

闫 梁^{1,2}, 万本例², 胡 斌², 范孟豹¹

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116; 2. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘 要:针对单一激励交流电磁探头检测任意方向裂纹容易出现漏检问题,设计了用于检测奥氏体不锈钢表面斜裂纹的新型双激励传感器,建立了奥氏体不锈钢表面裂纹交流电磁场检测仿真模型,开发了基于新型双激励传感器和高分辨率隧道效应磁阻传感器的金属平板表面裂纹检测系统。基于理论模型和试验系统研究了试件上裂纹走向和裂纹宽度对传感器拾取到磁场分量幅值的影响规律,研究了裂纹检测与方向判定方法。仿真和实验结果表明,利用磁场分量 B_x 、 B_y 畸变特征能够以相同的灵敏度检测出试件表面尺寸为 15 mm×0.2 mm、深度大于 3 mm 的微小裂纹,并实现裂纹方向判定。引入宽度补偿参数后减小了横向、纵向裂纹判定误差,判定误差最大为 3.9°。

关键词: 交流电磁场检测; 传感器模型; 有限元模型; 裂纹方向

中图分类号: TM154 TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

Research on crack detection method based on double axis TMR electromagnetic sensor

Yan Liang^{1,2}, Wan Benli², Hu Bin², Fan Mengbao¹

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the problem that when a single excitation AC electromagnetic probe is used to detect cracks in arbitrary direction, missing detection happens easily, a novel dual excitation sensor for detecting the oblique cracks on the surface of Austenitic stainless steels is designed. A simulation model for the detection of surface cracks of Austenitic stainless steel with alternating current field measurement is established. A metal plate surface crack detection system based on a novel double-excitation sensor and high-resolution TMR sensors was developed. Based on the theoretical model and experiment system, the influence rule of crack orientation and crack width on the magnetic field component amplitude picked up by the sensor are studied. Simulation and experiment results show that using the distortion characteristics of magnetic field components B_x , B_y , the tiny cracks with surface dimension of 15 mm×0.2 mm and depth greater than 3 mm can be detected with the same sensitivity, and the determination of the crack direction can be achieved. After the width compensation parameter is introduced the determination errors of transverse and longitudinal cracks are reduced, and the maximum determination error is 3.9°.

Keywords: alternating current field measurement; sensor model; finite element model; crack orientation

0 引 言

交流电磁场检测技术是近些年在涡流检测基础上发展起来的电磁无损检测技术^[1-2],由于该技术的定量分

析、无需标定、对检测环境要求不高等优点,存在广阔的应用前景^[3-4]。

传统的交流电磁场检测技术采用单线圈激励,在试件表面产生方向固定的均匀感应电流^[5-6]。当试件表面出现与电流方向垂直的横向裂纹时,电流在裂纹端点聚

收稿日期:2021-06-12 Received Date: 2021-06-12

* 基金项目:国家重点研发计划 NQI 重点专项项目(2017YFF0209700)、国家自然科学基金(51671216)、中国特种设备检测研究院青年基金(2018 青年 09)、江苏高校优势学科建设工程项目资助

集形成畸变磁场^[7-8],拾取畸变磁场信号可以实现裂纹的检测和定量分析^[9];当试件表面出现纵向裂纹时,裂纹宽度方向引起的磁场扰动较小,不利于裂纹缺陷的检测与分析^[10]。实际检测过程中,裂纹走向是未知的,操作者不能始终沿着裂纹方向扫查,采用单一激励的探头,不能保证检测灵敏度,甚至会出现漏检的现象。为防止漏检现象发生,需要进行多向性扫查或机械旋转探头,增加了检测时间和系统复杂度,降低了检测效率。针对此问题,许多学者^[11-16]提出改进传感器形式及激励原理的方法,对任意方向的裂纹均有最大的检测灵敏度。

探头的结构直接影响检测的效果,因此检测探头的设计至关重要。Bernieri 等^[11]学者设计了新型双激励线圈探头,利用隧道效应磁阻传感器(tunneling magnetoresistance, TMR)检测到任意方向的埋深缺陷和小缺陷。Li 等^[12]将双 U 型激励探头应用到水下检测,成功检测到了试件表面任意方向裂纹。Ye 等^[13]设计了基于巨磁阻阵列的新型传感器,在旋转磁场下利用 B_z 特征 C 扫图检测并识别出不定方向裂纹。张娜等^[14-15]利用三相激励原理设计新型线圈,利用 TMR 磁场阵列探头进行磁场成像,进行缺陷的识别和定位。Betta 等^[16]设计了三轴 TMR 电磁传感器,根据 X 、 Y 、 Z 轴磁场分量信噪比特征检测出任意方向裂纹。

对于交流电磁场下裂纹方向判定的研究,Liu 等^[17]在旋转磁场激励上,利用振荡旋转涡流解决了铁磁性试件 45° 方向裂纹难以检测和非铁磁性试件裂纹定向的问题,降低了裂纹方向判定误差。Ye 等^[18-19]在正交双激励下,通过降低背景磁场幅值,利用单磁场传感器进行二维栅格扫查生成 C 扫图像,拾取 B_z 峰峰值判断裂纹方向。然而,目前没有较好的方法能够一次扫查实现裂纹的检测和方向的判定。主要有以下两点原因:传感器形式设计上,线圈叠加放置导致高度不一致,带来了激励原理上的误差,需要复杂激励和后处理补偿方案^[20-21]。且由于线圈结构体积较大,不适合不规则结构及小尺寸对象检测^[22-23];裂纹定向方法上,利用两轴磁场特征变化关系判断裂纹方向误差较大^[18],且没有从检测机理及公式角度减小判定误差的方法。

针对目前检测传感器和判定方法存在的不足,本文设计了两轴 TMR 三角激励传感器,消除了激励高度不一致带来的误差,降低了系统复杂度。设计了裂纹检测及方向判定的方法,降低了因裂纹宽度磁场扰动导致的判定误差。本文的主要工作有:

1) 设计了直角三角电磁线圈,在试件表面形成方向互相垂直的感应电流场,利用 TMR 高分辨率磁场传感器拾取磁场信号,能够检测出任意方向的裂纹。借助 Ansys Maxwell 有限元软件,分析了该新型探头下的感应电流分布情况,确定线圈激励参数等。

2) 分析裂纹方向变化与磁场特征值的变化关系,利用两轴磁场特征检测任意方向裂纹,建立裂纹走向判定方法,引入宽度补偿参数,减小了横向和纵向裂纹的方向判定误差。

1 基于仿真的传感器设计原理

本节设计了两轴 TMR 三角线圈传感器,建立了 Maxwell 有限元模型,分析了试件表面感应电流分布,研究了线圈间距对磁场幅值的影响。

1.1 传感器设计及原理

本文设计的三角激励传感器可以产生两个方向垂直的感应电流,在一次扫查过程中完成传统单激励扫查两次的工作任务,提高了工作效率,避免漏检现象的发生。同时消除了双激励线圈^[24]因激励高度不一致带来的误差,降低了系统复杂度。

三角探头包括两个放置在斜边上的高精度 TMR 传感器和三个两两垂直倾斜放置的线圈,如图 1 所示。线圈呈等腰直角分布以在试件表面产生方向垂直的感应电流场,为了增强磁场传感器放置区域的磁场强度,线圈采用倾斜放置的形式。高精度 TMR 传感器放置在线圈下方中线位置。由于涡流场中,磁场方向总是垂直于感应电流方向,所以敏感轴与感应电流方向垂直,拾取 X 轴与 Y 轴方向磁场信息。

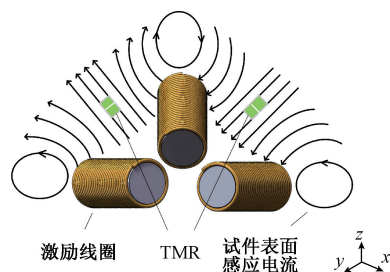


图 1 传感器模型

Fig. 1 Sensor model

3 个线圈所通激励信号相同,表达式如式(1)所示。

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

式中: $\omega = 2\pi f$, 其中激励频率 f 为 1 kHz, 幅值 I_0 为 5 V, 初相位 θ 为 0° 。为避免感应电流相互抵消,图 1 中直角顶点线圈通顺时针方向激励信号,其余两个线圈通逆时针激励信号。

由电磁感应原理可知,通电激励可以在试件表面产生感应电磁场,则线圈在试件表面产生的感应磁场强度如式(2)所示。

$$H(t) = \sqrt{2} k H_p \cos(\omega t + \theta) \quad (2)$$

根据麦克斯韦方程组,激励线圈在试件表面产生的

感应电流密度 J_e , 表达式^[12,25] 为:

$$J_e(t) = \frac{2kH_p}{d} e^{\frac{-z}{d}} \cos(\omega t + \theta) \quad (3)$$

式中: d 为趋肤层厚度, mm; H_p 为感应磁场总强度值, A/m; k 为工件表面感应磁场强度值与感应磁场总强度值的比率。

根据矢量合成定理, 试件表面磁场传感器位置处的感应电流密度 J_e 可以由两个相同的电流密度矢量迭加而成, 合成的感应电流幅值大小不变, 方向沿着 X 轴负方向和 Y 轴正方向。

1.2 有限元模型

借助电磁场有限元仿真建模软件 Ansys Maxwell, 建立正交激励仿真模型, 如图 2 所示。

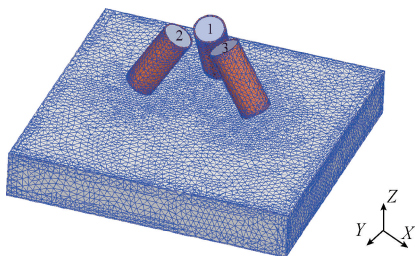


图 2 有限元模型网格划分

Fig. 2 Mesh division of finite element model

介质材料参数设置如表 1 所示。网格划分采用软件自动划分和部分细化的方式结合, 对缺陷和提取路径通过细化网格得到较高的计算精度, 周围空气层和试件边缘则采用自由划分的方式, 节省计算量。

表 1 有限元模型参数设置

Table 1 Finite element model parameter setting

模型参数	线圈	磁芯	试块	空气
电导率 $\sigma / (\text{MS} \cdot \text{m})$	58	1×10^{-8}	1.1	0
相对磁导率 μ_r	1	1 000	1	1

试件表面电流分布如图 3 所示, 当试件表面不存在裂纹缺陷时, 线圈可以在试件表面形成两个方向垂直感应电流。当试件表面存在裂纹缺陷时, 裂纹缺陷两端的感应电流围绕裂纹端点畸变。

1.3 关键参数研究

由于 X 和 Y 方向的感应电流均是由方向一致的感应电流合成而来, 所以有必要研究线圈间距对磁场形成的影响。以线圈间距 D 为参数, 取 TMR 传感器放置区域 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 内 9 个点的磁场幅值, 绘制不同线圈间距下每个点的磁场幅值, 如图 4 所示。

从图中可以看出, 当 D 为 12 mm 时, 试件表面采样

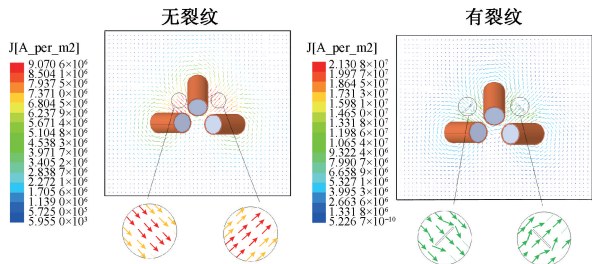


图 3 试件表面有无缺陷感应电流方向

Fig. 3 Induced current orientation of specimen surface with or without surface crack

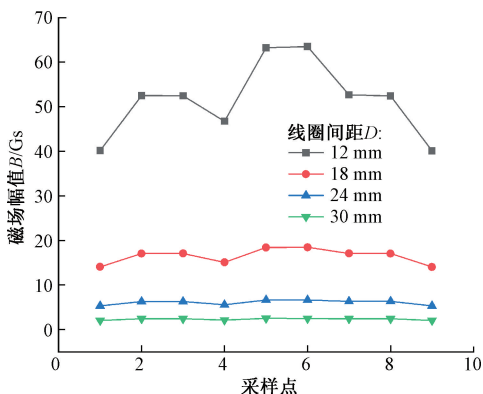


图 4 线圈间距对磁场均匀性的影响

Fig. 4 Influence of coil distances on magnetic field uniformity

点间磁场幅值 B 幅值变化较大, 即当两个线圈距离过近时, 矢量合成的同一个方向的磁场幅值是不均匀的, 对裂纹的检测不利。随着线圈间距 D 增大, 磁场区域的平稳性越来越好。但是当 D 越大, 磁场幅值降低、探头尺寸增大, 不利于提高检测灵敏度, 本文设置为 24 mm。

2 基于仿真裂纹检测方法研究

本节分析了裂纹方向变化对磁场检测结果的影响, 提出了新型传感器下任意方向裂纹检测方法, 分析裂纹宽度大小与磁场畸变幅值的关系, 推导了微小裂纹走向判定公式, 减小了横向、纵向裂纹因宽度方向畸变幅值导致的误差。

检测示意图如图 5 所示, 以试件中心为原点建立坐标系, 定义裂纹与 X 轴正方向夹角为 β 。分别设置沿 X 轴、 Y 轴信号提取路径, 提取试件上方 1 mm 处磁场幅值, 裂纹尺寸为 $10 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。

仿真程序中, 沿着固定路径提取磁场信号幅值, B_s 存在强烈的背景磁场, 为便于后续的信号分析, 对有无缺陷的试件进行仿真, 以此来得到裂纹引起的磁场变化量 ΔB_t , 如式(4)所示。

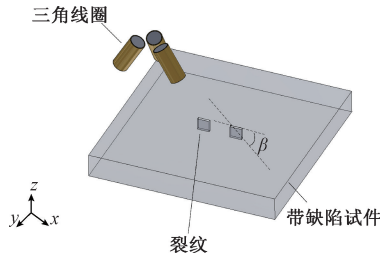


图5 裂纹检测示意图

Fig. 5 Schematic diagram of crack detection

$$\Delta B_i(x) = B_i(x) - B_0(x) \quad (4)$$

式中: $B_i(x)$ 为有裂纹时磁场幅值; $B_0(x)$ 为不存在裂纹时背景磁场幅值。

2.1 不同方向裂纹检测结果

不同走向裂纹检测结果如图6所示,裂纹中心处电流线稀疏, B_x 与 B_y 呈现波谷特征。对于 B_x 特征,当裂纹角度与感应电流方向垂直时,有最大磁场扰动幅值。当裂纹角度与 X 轴夹角增大至 90° 时,其畸变幅值逐渐减小;对于 B_y 特征,当裂纹角度与 X 轴夹角为 90° 时,有最大畸变幅值。当裂纹角度与 X 轴夹角逐渐减小至 0° 时,其畸变幅值逐渐减小。

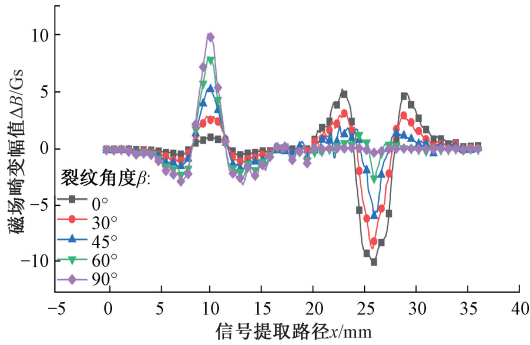


图6 不同角度斜裂纹引起的磁场特征变化

Fig. 6 Variation of magnetic field characteristics caused by oblique cracks at different angles

定义磁场特征的畸变幅值和 B_{rm} 特征:

$$B_{im} = \max | \Delta B_i(x) | \quad (5)$$

$$B_{rm} = B_{xm} + B_{ym} \quad (6)$$

提取不同方向裂纹畸变幅值信号 B_{im} , 如图7所示。

两轴磁场信号存在互补趋势,同时从特征 B_{rm} 可以看出,利用两轴特征能够以相同灵敏度检测出任意方向裂纹。

2.2 传感器检测范围

根据 ACFM 检测原理,当裂纹缺陷存在时,由于空气和工件电阻率的差异,感应电流绕过缺陷两边和底部。但是对于不同尺寸的裂纹缺陷,其磁场畸变特征并不相同。

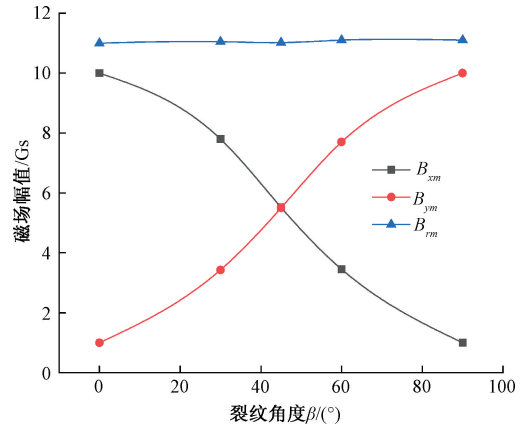


图7 不同方向裂纹的畸变幅值

Fig. 7 Distortion amplitudes for cracks in different directions

裂纹长度对磁场特征变化的影响如图8所示。当裂纹长度小于 15 mm 时,曲线在裂纹区域存在典型的波峰与波谷特征。当裂纹大于 30 mm 时,由于感应电流绕过裂纹两端,所以裂纹端点处的电流密度较大,所以裂纹中心处出现上凹的现象,裂纹长度越长,这一现象越明显。由于本文过裂纹中心提取磁场信号,所以传感器能够检测长度小于 30 mm 的裂纹,小于 20 mm 时检测效果良好。

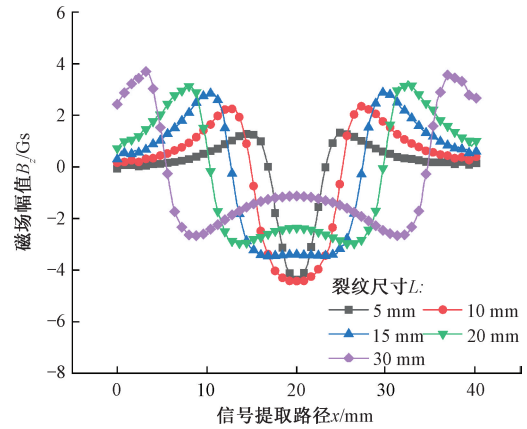


图8 裂纹长度对磁场幅值的影响

Fig. 8 Influence of crack length on magnetic field amplitude

绘制沿着长 15 mm、宽 0.2 mm 提取的 B_x 特征和垂直于宽度分别为 0.2、0.5、2 mm 裂纹提取的 B_x 特征,将两种情况进行对比,研究裂纹宽度尺寸对检测结果影响,如图9所示。

从图中可以看出,沿着裂纹方向扫查时, B_x 在裂纹中心有波谷特征。垂直于裂纹方向扫查时,裂纹的宽度仍会引起磁场畸变幅值。当裂纹宽度为 0.2 mm 时,畸变幅值较小,与沿裂纹方向拾取的畸变幅值相比可以忽略。当裂纹宽度为 2 mm 时,此时裂纹宽度方向上引起的畸

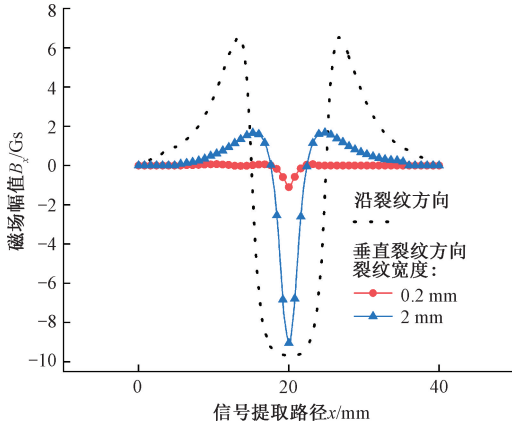


图9 裂纹宽度对磁场幅值的影响

Fig. 9 Influence of crack width on magnetic field amplitude

变幅值较大。前人裂纹方向判定工作中^[17,20]忽略了裂纹宽度方向的扰动幅值,存在判定误差。

2.3 裂纹方向判定方法

以裂纹走向 β 为变量,分析裂纹方向改变对磁场畸变幅值的影响,如图10所示,主要从以下两个方向考虑^[25-26]:

1) 试件表面的磁场扰动大小取决于感应电流与裂纹方向 β 存在的夹角大小。本文建立的传感器在试件表面产生方向固定感应电流: $\alpha_1 = 90^\circ$ 、 $\alpha_2 = 0^\circ$ 。

2) 传感器拾取到的磁场幅值取决于对应传感器特征轴与 β 的夹角大小。工件表面感应电流总密度 J_e 可以分解为垂直于裂纹方向的电流密度分量 J_{e1} 和平行于裂纹方向的电流密度分量 J_{e2} 。与 J_{e1} 引起的磁场扰动相比, J_{e2} 分量较小。 J_{e1} 的方向随着裂纹角度的变化而变化,磁场幅值信息不能被全部提取到。

建立畸变幅值 B_{xm} 、 B_{ym} 与裂纹角度 β 关系:

$$\begin{cases} B_{xm}(\beta) = B_{rm} \cos(\beta) \sin(\alpha_1 - \beta) \\ B_{ym}(\beta) = B_{rm} \sin(\beta) \cos(\alpha_2 - \beta) \end{cases} \quad (7)$$

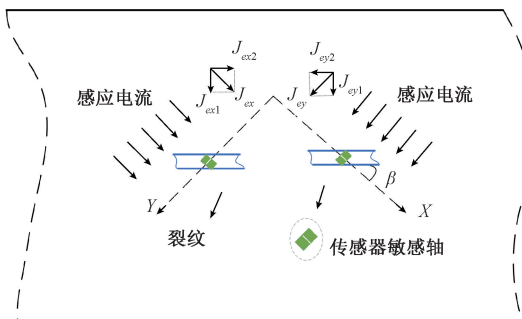


图10 带裂纹试件感应电流分解图

Fig. 10 Variation trend of distortion characteristic amplitude with eddy current

由本文工作可知,当裂纹幅值变化较小,即靠近横向裂纹及纵向裂纹时,此时利用两轴磁场特判定裂纹方向存在较大误差。建立裂纹方向判定公式如式(8)所示,消除干扰因素及裂纹宽度带来的判定误差:

$$\beta = \begin{cases} \arccos \sqrt{\frac{B_{xm}}{B_{rm} - \min B_{ym}}}, & B_{ym} < \lambda \\ \arccos \sqrt{\frac{B_{ym}}{B_{rm} - \min B_{xm}}}, & B_{xm} < \lambda \\ \arctan \sqrt{\frac{B_{ym}}{B_{xm}}}, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\lambda = B_r \sin^2(30) = 1/4 B_r$ 。消除因单轴特征过小导致的误差,补偿忽略的电流密度分量 J_{e2} 带来的磁场畸变幅值 $\min B_{im}$ 。

将仿真结果代入式(8)计算裂纹角度,计算结果如图11所示。与不补偿的判定方法相比,降低了横向和纵向裂纹判定误差。改进后的方法最大误差为 1.22° 。

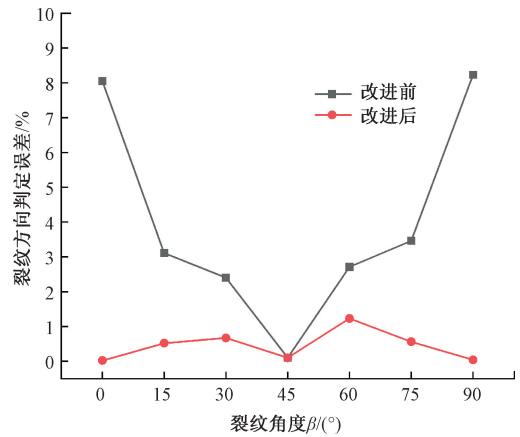


图11 裂纹角度计算结果

Fig. 11 Calculation results of crack angle

3 实验结果与讨论

本文试验系统主要包括:激励发生装置、磁场传感器、信号采集卡、上位机等。原理图如图12所示,实验装置如图13所示。

本文利用信号发生器产生激励频率 1 kHz 和电压幅值 5 V 的三路正弦信号,同时通入激励导线中,激励线圈采用 100 匝直径 $\Phi 0.4\text{ mm}$ 漆包线绕制,磁芯为锌锰铁氧体。传感器的信号拾取部分采用TMR2905磁场传感器,其线性工作范围为 $\pm 10\text{ Gs}$,检测灵敏度为 $50 \sim 60\text{ mV/V} \cdot \text{Oe}$,将TMR传感器放置在激励线圈直角边下方,拾取 X 、 Y 方向磁场信号。

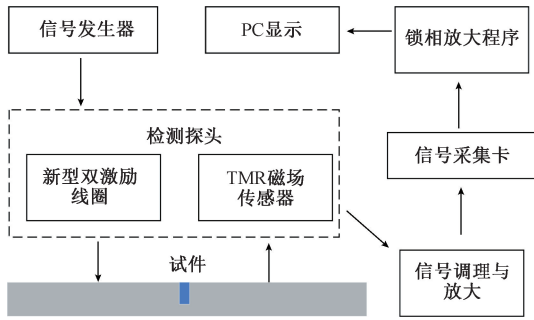


图 12 实验系统原理图

Fig. 12 Principle diagram of the experiment system

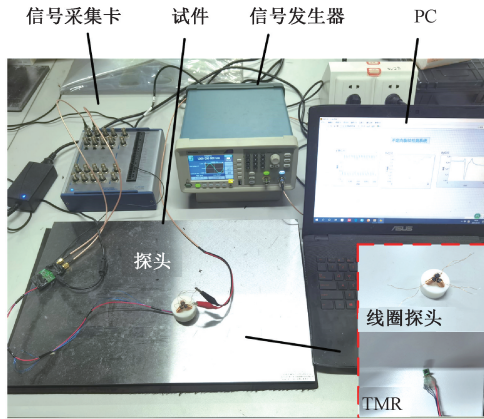
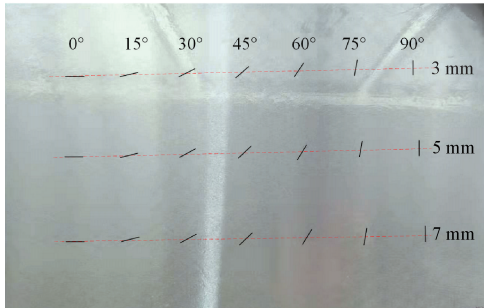
(a) 实验装置
(a) Experimental device(b) 304 不锈钢方向性裂纹试块
(b) 304 stainless steel directional crack test block

图 13 实验装置图

Fig. 13 Experimental setup

传感器拾取的电压信号经过调理放大接入信号采集卡 NI6366 的 DAQ 信号采集模块,采样频率为 10 kHz。经过模数转换送入上位机显示与计算。在软件程序上加入锁相放大模块,滤除与信号无关的噪声信号。本实验中试件采用 304 奥氏体不锈钢,上表面电火花加工出方向不同的裂纹,尺寸为 15 mm×0.2 mm,深度分别为 3、5、7 mm,如图 13(b)所示。

3.1 不同走向裂纹检测结果和方向判定结果

试验中,过裂纹中心扫查。试验采集信号如图 14 所示,图中展示深度 3 mm 不同走向裂纹检测结果。

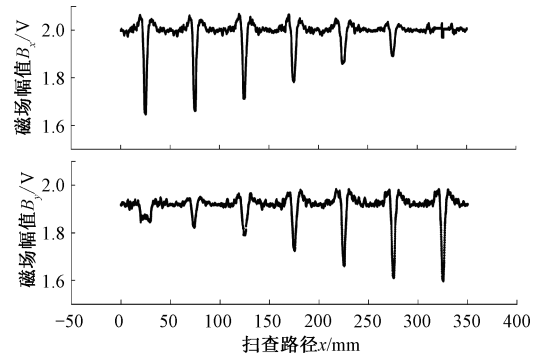


图 14 不同走向裂纹检测结果

Fig. 14 Crack detection results for different directions

从图 14 中可以看出,对于裂纹走向从 0°变化至 90°, B_z 特征幅值呈现递减趋势, B_y 呈现递增趋势,两特征可以互补的趋势完成任意走向裂纹的检测,与仿真趋势一致。

绘制 B_z 幅值随裂纹角度变化曲线,利用实验结果计算裂纹方向判定误差,如图 15 所示。

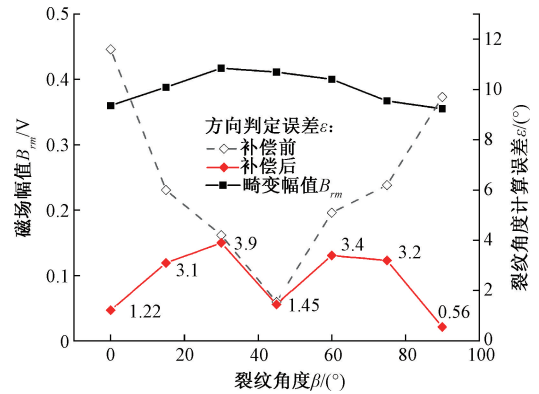


图 15 方向性裂纹检测结果

Fig. 15 Directional crack detection results

从图 15 中数据可知,利用 B_z 特征能够以相同的幅值变化检测出任意方向的裂纹,完成任意方向裂纹检测的任务。同时,由于裂纹宽度方向上的磁场扰动幅值,检测横向和纵向裂纹时,改进前的方法判定方法误差较大。通过引入宽度补偿参数,利用本文提出的裂纹方向判定方法能够判定裂纹方向,实验结果显示,最大判定误差不超过 3.9°。

3.2 裂纹尺寸检测结果

定义传感器检测灵敏度如式(9)所示^[8,12]。

$$S_r = \frac{\|B_r\|}{2B_{x0}} \times 100\% \quad (9)$$

为对比不同间距线圈实验测试结果,制作线圈间距 D 为 12、24 和 30 mm 探头外壳,测试其检测 3 mm 深度不同走向裂纹的检测灵敏度,检测结果如图 16 所示。

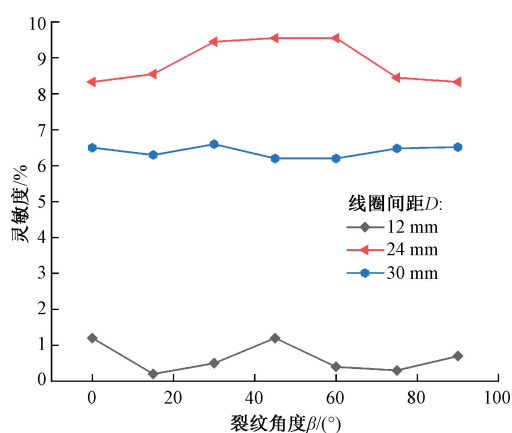


图16 不同间距线圈测试结果

Fig. 16 Test results of different coil distances

从图16可知,当线圈间距为12 mm时,放置TMR传感器位置处感应电流场不均匀,探头无法稳定检测出裂纹缺陷的存在,检测灵敏度小。当间距设置为24 mm和30 mm时,探头能够以相同灵敏度检测出任意方向裂纹,随着间距增大,检测灵敏度降低,与仿真结果一致。

对不同深度的3组方向性裂纹扫查,绘制新型双激励传感器、单线圈激励传感器灵敏度检测结果对比图像,实验结果如图17所示。实验中,单激励线圈激励参数与三角线圈一致。从图17中可以看出,裂纹的检测灵敏度与深度有直接的关系,深度越深,检测灵敏度越大。另一方面,单激励探头检测方向性裂纹时,只对特定方向的裂纹敏感,当裂纹走向与感应电流方向重合时,检测灵敏度较高,不能满足检测需求。而本文设计的新型双激励传感器能够以相同灵敏度检测任意方向裂纹,避免了漏检现象发生。

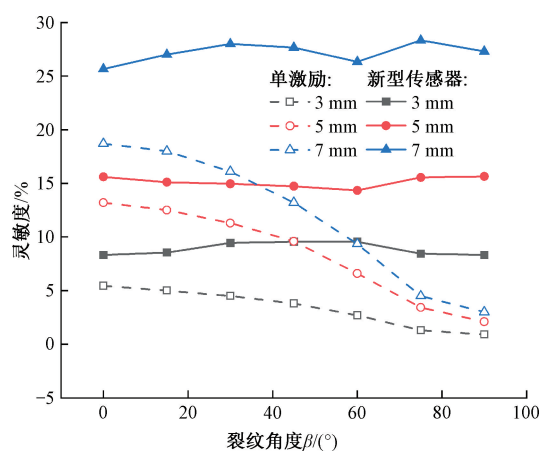


图17 方向性裂纹检测灵敏度

Fig. 17 Directional crack detection sensitivity

4 结 论

针对传统交流电磁场检测任意方向裂纹容易出现漏检的情况,本文设计双轴TMR三角线圈传感器,形成方向垂直的感应电流,一次扫查可以检测出任意方向的裂纹,同时实现裂纹方向的判定,降低了系统复杂度,提高了检测效率。有限元仿真分析和实验结果表明:

1) 直角三角传感器消除了激励高度不一致带来的误差,形成均匀稳定的感应电流场,可以用于不锈钢表面微小裂纹的检测。

2) 沿着固定的路径扫查检测任意方向裂纹,利用 B_x 、 B_y 特征可以实现任意方向裂纹的检出和方向的判定,实验判定误差最大为 3.9° 。

由于本文的传感器及裂纹方向判定方法是在实验室环境中测试,距离现场应用还有一定的改进空间。所以在接下来的研究中,会对传感器参数做进一步的改进,同时研究裂纹方向判定算法以减小判定误差。

参考文献

- [1] 袁新安,李伟,殷晓康,等. 基于ACFM的奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构方法研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 27-33.
- [2] YUAN X A, LI W, YIN X K, et al. Visual reconstruction of irregular crack in austenitic stainless steel based on ACFM technique [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 27-33.
- [3] YUAN X A, LI W, CHEN G M, et al. Inspection of both inner and outer cracks in aluminum tubes using double frequency circumferential current field testing method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 127(15): 16-34.
- [4] AMINEH R K, RAVAN M, SADEGHI S H H, et al. Using AC field measurement data at an arbitrary liftoff distance to size long surface-breaking cracks in ferrous metals[J]. NDT & E International, 2008, 41(3): 169-177.
- [5] ZHAO S X, SUN L S, GAO J Q, et al. Uniaxial ACFM detection system for metal crack size estimation using magnetic signature waveform analysis[J]. Measurement, 2020, 164: 108090.
- [6] YUAN X A, LI W, CHEN G M, et al. Two-step interpolation algorithm for measurement of longitudinal cracks on pipe strings using circumferential current field testing system [J]. IEEE Transactions on Industrial

- Informatics, 2018, 14(2):394-402.
- [6] 王晓娜, 胡杨, 侯德鑫, 等. 基于方向调制原理的感应电流热成像漆层下裂纹检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12):56-63.
- WANG X N, HU Y, HOU D X, et al. Eddy current thermography for under paint coating crack detection based on directional modulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12):56-63.
- [7] WANG Y, YE C F, WANG M L. Synthetic magnetic field imaging with triangle excitation coil for inspection of any orientation defect in riveted structure [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(2):533-541.
- [8] GE J H, LI W, CHEN G M, et al. Analysis of signals for inclined crack detection through alternating current field measurement with a U-shaped probe[J]. Insight, 2017, 59(3):121-128.
- [9] LU M Y, MENG X B, HUANG R C, et al. Determination of surface crack orientation based on thin-skin regime using triple-coil drive-pickup eddy-current sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70:6003509.
- [10] REPELIANTO A S, KASAI N, SEKINO K, et al. Flaw detection in aluminum plates using a rotating uniform eddy current probe with two pairs of excitation coils[J]. Metals, 2019, 9(10):1069.
- [11] BERNIERI A, FERRIGNO L, MARCO L, et al. Eddy current testing probe based on double-coil excitation and GMR sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(5):1533-1542.
- [12] LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. High sensitivity rotating alternating current field measurement for arbitrary-angle underwater cracks [J]. NDT and E International, 2016, 79:123-131.
- [13] YE CH F, HUANG Y, UDPA L, et al. Differential sensor measurement with rotating current excitation for evaluating multilayer structures [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(3):782-789.
- [14] 张娜, 彭磊, 吴瑶, 等. 高分辨率 TMR 传感器阵列磁场成像感应电流检测探头[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7):45-53.
- ZHANG N, PENG L, WU Y, et al. ECT probe based on magnetic field imaging with a high resolution TMR sensor array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7):45-53.
- [15] ZHANG N, YE C, PENG L, et al. Eddy current probe with three-phase excitation and integrated array TMR sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68(6):5325-5336.
- [16] BETTA G, FERRIGNO L, LARACCA M, et al. A novel TMR based triaxial eddy current test probe for any orientation crack detection [J]. Measurement, 2021, 181:109617.
- [17] LIU X C, YANG J M, WU B, et al. A novel generation method of oscillatory rotating eddy current for crack orientation determination and detection in metal plates[J]. NDT & E International: Independent Nondestructive Testing and Evaluation, 2018, 97:1-10.
- [18] YE C F, WANG Y, TAO Y. High-density large-scale TMR sensor array for magnetic field imaging[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(7):2594-2601.
- [19] YE CH F, ROSELL A, HAQ M, et al. EC probe with orthogonal excitation coils and TMR sensor for CFRP inspection [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59:1247-1255.
- [20] MARESCHAL O, CORDIER C, DOLABDJIAN C, et al. Aluminum alloy sensitization evaluation by using eddy current techniques based on IGMR-magnetometer head[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(1):6200104.
- [21] CHEN G M, LI W, WANG Z X. Structural optimization of 2-D array probe for alternating current field measurement [J]. NDT&E International, 2007, 40:455-461.
- [22] 李伟, 张传荣, 陈国明, 等. U 型 ACFM 探头精确建模和实验测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7):658-662.
- LI W, ZHANG CH R, CHEN G M, et al. Precise modeling and experimental testing of the U-shaped probe for ACFM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2013, 27(7):658-662.
- [23] 杨理践, 郑文学, 高松巍, 等. 基于平衡电磁技术的钢板裂纹缺陷检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10):198-205.
- YANG L J, ZHENG W X, GAO S W, et al. Steel plate crack defect detection method based on balanced electromagnetic technology [J]. Chinese Journal of

Scientific Instrument, 2020, 41(10):198-205.

- [24] XU Z Y, WANG X, DENG Y M. Rotating focused field eddy-current sensing for arbitrary orientation defects detection in carbon steel [J]. Sensors, 2020, 20(8): 2345.
- [25] WU D H, LIU Z T, WANG X H, et al. Composite magnetic flux leakage detection method for pipelines using alternating magnetic field excitation [J]. NDT & E International, 2017, 91:148-155.
- [26] SHEN J L, ZHOU L, ROWSHANDEL H, et al. Determining the propagation angle for non-vertical surface-breaking cracks and its effect on crack sizing using an ACFM sensor [J]. Measurement Science & Technology, 2015, 26(11): 115604.

作者简介



闫梁, 2019 年于中国矿业大学获得学士学位, 现为中国矿业大学硕士研究生, 主要研究方向为交流电磁场检测和裂纹检测方法研究。

E-mail: TS19050039A31LD@cumt.edu.cn

Yan Liang received his B.Sc. degree in 2019 from China University of Mining and Technology. Now, he is a postgraduate student of China University of Mining and Technology. His main research interests include ACFM and crack detection method.



胡斌(通信作者), 2000 年于华中理工大学获得学士学位, 2004 年于清华大学获得硕士学位, 2017 年于清华大学获得博士学位, 现为中国特种设备检测研究院研究员, 主要研究方向为智能检测监测。

E-mail: hubin@csei.org.cn

Hu Bin (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2000 from Huazhong University of Science and Technology, received his M.Sc. degree in 2004 from Tsinghua University, received his Ph.D. degree in 2017 from Tsinghua University, now he is a researcher of China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research direction is intelligent detection and monitoring.