



基于 ACFM 检测技术的表面裂纹特征评价方法研究

王景林, 任尚坤, 张丹, 张文君
(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)

摘要: 交变电磁场检测技术 (alternating current filed measurement, ACFM) 是利用电磁感应原理, 通过拾取缺陷处的磁场畸变信号, 分析判断缺陷信息的一种电磁无损检测方法。ACFM 检测技术在探头扫描方向与裂纹走向一致的情况下检测效果最佳。但在实际检测中, 检测的金属表面通常都有油漆层保护, 并不知道裂纹走向。因此, 该文重点研究裂纹长度、裂纹深度、探头扫描方式、探头起落波动、探头偏离裂纹的水平距离及探头提高高度对 ACFM 检测信号的影响。实验结果表明: 不同的扫描模式, 检测信号具有不同的特征, 可以从不同的模式特征对裂纹特征进行综合评价。该研究成果可为表面裂纹的检测与评价提供参考。

关键词: 交变电磁场检测; 探头扫描方式; 裂纹走向; 检测与评价

中图分类号: TP319

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2019)01-0040-07

Research on surface crack feature evaluation method based on ACFM detection technology

WANG Jinglin, REN Shangkun, ZHANG Dan, ZHANG Wenjun
(Key Laboratory of Nondestructive Testing of Ministry of Education,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Alternating current filed measurement (ACFM) utilizes the principle of electromagnetic induction to pick up the magnetic field distortion signal at the defect and analyze the electromagnetic defect non-destructive testing method to determine the defect information. The ACFM detection technique works best when the probe scanning direction is consistent with the crack direction. However, in the actual test, the metal surface of the test is usually protected by a paint layer, and the crack direction is not known. Therefore, this paper focuses on the effects of crack length, crack depth, probe scanning mode, probe fluctuation, probe horizontal distance from the crack and probe lift height on the ACFM detection signal. The experimental results show that the detection signals have different characteristics in different scanning modes, and the crack characteristics can be comprehensively evaluated from different pattern features. The research results have important significance for the detection and evaluation of surface cracks.

Keywords: alternating current filed measurement; probe scanning method; crack direction; testing and evaluation

收稿日期: 2018-08-20; 收到修改稿日期: 2018-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51065024)

作者简介: 王景林 (1992-), 男, 江西抚州市人, 硕士研究生, 专业方向为交变电磁场检测。

通信作者: 任尚坤 (1963-), 男, 河南周口市人, 教授, 博士, 主要从事无损检测方面的研究。

0 引言

交变电磁场检测技术 (ACFM) 是一种在涡流和漏磁检测基础上发展起来的新兴无损检测技术^[1]。相比于涡流检测, ACFM 检测发展较晚, 其检测原理是由激励探头在待测工件表面感应出均匀交变电流, 当工件中无缺陷或者远离缺陷时, 工件表面感应电流均匀分布; 当感应电流流经缺陷区域时, 电流从裂纹的两边和底部绕过, 引起表面电磁场的扰动, 检测探头采集缺陷上方电磁场畸变信息并处理分析, 可获得描述缺陷状态的尺寸信息, 其检测原理如图 1^[2]所示。

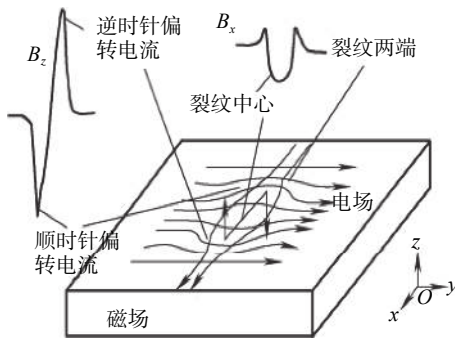


图 1 ACFM 检测原理图

由 ACFM 检测理论分析可知, 缺陷部位的检测磁场有 3 个方向的分量, 其方向分别为: 在表面内与裂纹方向平行标注为 x 方向, 在表面内与裂纹方向垂直标注为 y 方向及与工件表面垂直标注为 z 方向^[3-4]。当探头扫查无缺陷工件表面时, 其工件表面感应电流平行于 y 方向均匀分布, B_y 和 B_z 磁场分量为 0^[5]。当探头平行扫查工件表面裂纹时, 探头在刚进入裂纹及离开裂纹的两个位置, B_z 分量上表现出一对极性相反的特征极值信号, 同时在探头进入裂纹区域时; B_x 分量信号会表现出先降后升的趋势, 呈现出一个宽凹陷区。由于 B_y 分量与感应电流方向平行, 因而变化微弱不予考虑, 在检测时, 只对 B_x 和 B_z 进行信号分析处理就可获得描述裂纹状态的尺寸信息, 实现检测目的^[6-7]。该项技术具有非接触检测的特点, 对金属表面的油漆、涂层和杂质无须清理或只做少量清理即可。对金属表面和近表面的裂纹, 可一次性定性和定量完成, 检测的精度高, 且检测速度快^[8-9]。

目前 ACFM 检测技术对于表面覆盖有防腐涂层或绝缘层结构的表面和近表面裂纹检测是一重要的检测应用领域。由于结构表面都覆盖有防腐涂层

或绝缘层, 在未打磨前, 事先并不清楚构件内部情况, 且裂纹外形和电磁场信号是非线性关系^[10]。检测信号受裂纹长度、裂纹深度、探头抖动、提离高度和偏移距离等影响因素较多, 因而, 基于 ACFM 检测技术的表面裂纹特征评价方法研究对缺陷评定及量化评估具有参考意义。

1 检测系统构建

检测系统的构建主要包括探头的设计, 检测信号的分析, 信号 A/D 转换及计算机对信号的处理与分析, 检测系统的构建框图如图 2 所示。

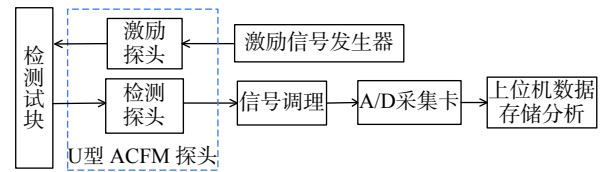


图 2 检测系统构建框图

在探头设计中, 将激励+检测线圈两者设计为一体, 用于拾取 B_x 和 B_z 磁场信号的检测线圈放置于缠绕线圈的 U 型磁芯下^[11]。其中, 激励线圈骨架用锰锌铁氧体材料的 U 型磁芯, U 型磁芯尺寸规格为: 两脚外径 45 mm, 内径 33 mm, 高度 25 mm。采用 0.67 mm 粗的紫铜漆包线在 U 型磁芯上绕制 200 匝^[12-13]。检测线圈骨架用锰锌铁氧体材料的圆柱形磁芯, 磁芯直径 1 mm。由于需要拾取 B_x 和 B_z 磁场分量, 因此需要相互垂直的两个检测线圈。竖直线圈用于拾取 B_z 磁场分量, 磁芯长度 7.6 mm, 在磁芯上绕制 400 匝直径为 0.07 mm 的紫铜漆包线; 水平线圈用于拾取 B_x 磁场分量, 磁芯长度 3 mm, 在磁芯上绕制 200 匝直径为 0.07 mm 的紫铜漆包线。探头结构示意图如图 3 所示。

对检测线圈拾取的信号进行放大、滤波、A/D 转换, 最后将数据传输给上位机软件进行显示。本文基于实验室自制的 ACFM 检测仪及检测界面进行试验研究。试验过程中, 探头应尽量保持平稳。

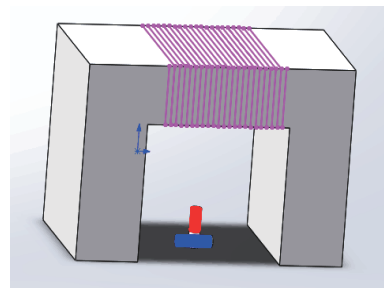


图 3 探头结构示意图

2 影响 ACFM 检测信号和裂纹特征评价的相关因素分析

2.1 金属表面裂纹长度对 ACFM 检测信号的影响

试验选取如图 4 所示尺寸规格为 600 mm×150 mm×10 mm 的 45# 钢板试块为研究对象, 研究金属表面裂纹长度对 ACFM 检测信号的影响。在 45# 钢板表面中心线上利用电火花技术加工宽度和深度均为: 0.5 mm×3 mm, 长度分别为 10, 20, 30, 40, 50 mm 的矩形凹形缺陷。



图 4 45# 钢板试块

探头沿着与裂纹平行的方向进行扫查, 将检测信号进行分析处理后通过 MySQL 数据库进行数据保存, origin75 软件进行绘图, 分析如图 5 所示。 B_x 和 B_z 特征信号最大幅值与最小幅值之间的差值 ΔB_x 和 ΔB_z 随裂纹长度变化如图 1 所示。

表 1 裂纹长度与 ΔB_x 和 ΔB_z 幅值表

信号	裂纹长度/mm				
	10	20	30	40	50
ΔB_x	46	56	44	66	55
ΔB_z	522	813	838	922	1 006

由表 1 可知, 裂纹长度的变化对 ΔB_x 影响很小, 而对 ΔB_z 的影响较大, 说明裂纹长度的变化更适合由 B_z 来反演计算。从表中提取 ΔB_z 和裂纹长度的值, 通过 origin75 软件绘出长度变化与 ΔB_z 信

号幅值的关系, 如图 5(b) 所示。裂纹长度变化与 ΔB_z 信号幅值的关系符合函数关系式 (1), 带入表 1 数据进行数据拟合, 得到公式 (2), 由此可知在裂纹深度一定的条件下, 探头沿着与裂纹平行的方向进行扫查时, 可以通过 ΔB_z 信号幅值反演出裂纹长度的值。

$$y = b \ln(x - a) \quad (1)$$

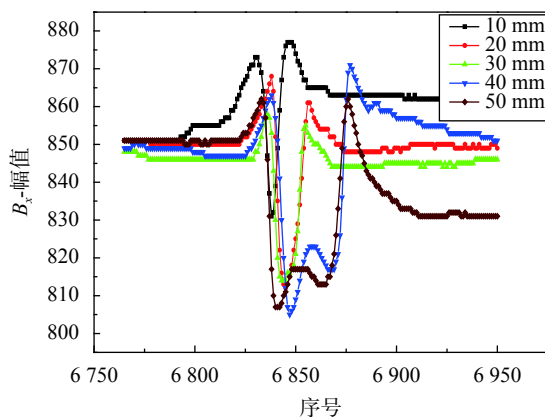
$$y = 259.1 \ln(x - 2) \quad (2)$$

由图 5(a) 可发现, 随着裂纹长度的逐渐增大, B_x 由只有一个最低的波谷出现到有两个波谷转变, 这是因为随着裂纹长度的增大, 感应电流从裂纹中心底部绕过的电流相对增大, 导致感应电流在表面感应磁场的水平分量增大。随着裂纹长度的不断加大, B_x 的凹陷区域的宽度也不断加大, 与裂纹长度影响相对应。

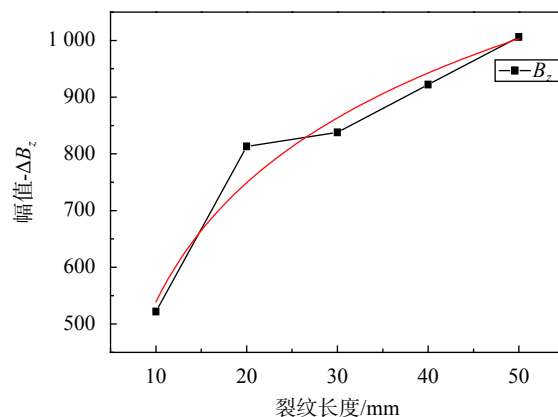
2.2 金属表面裂纹深度对 ACFM 检测信号的影响

因 ACFM 检测技术对于 45# 钢板和 304 奥氏体不锈钢等金属材料的检测原理一样, 在研究裂纹深度对 ACFM 检测信号影响时, 试验选取尺寸规格为 600 mm×200 mm×6 mm 的 304 奥氏体不锈钢试件为研究对象。在 304 奥氏体不锈钢表面中心线上利用电火花技术加工长度和宽度均为 30 mm×0.5 mm, 深度分别为 1, 2, 3, 4, 5 mm 的矩形凹槽裂纹。探头沿着与裂纹平行的方向进行扫查。 B_x 和 B_z 特征信号最大幅值与最小幅值之间的差值 ΔB_x 和 ΔB_z 与裂纹深度的关系如图 2 所示。

由表 2 可知, 裂纹深度的变化对 ΔB_x 和 ΔB_z 检测信号的影响非常明显。从表中提取 ΔB_x 、 ΔB_z 与裂纹深度的值, 通过 origin75 软件绘出裂纹深度变化与 ΔB_x 和 ΔB_z 信号幅值的关系, 如图 6(b) 所



(a) B_x 信号分布随裂纹长度的关系



(b) 裂纹长度变化与 ΔB_z 信号幅值的关系

图 5 裂纹长度对 B_x 检测信号的影响

表 2 裂纹深度与 ΔB_x 和 ΔB_z 幅值表

信号	裂纹深度/mm				
	1	2	3	4	5
ΔB_x	26	27	66	86	176
ΔB_z	444	527	899	1 271	2 492

示。由图 6(b) 可知, B_x 和 B_z 信号曲线变化幅度随着裂纹深度的加深而快速增大, 但 B_z 检测信号强度变化比 B_x 检测信号强度变化大很多, 这是因为 B_z 方向产生的感应磁场相比 B_x 方向产生的感应磁场大。深度变化与 ΔB_x 、 ΔB_z 信号幅值的关系近似符合函数关系式 (3), 代入表 2 数据进行数据拟合, 得到深度变化与 ΔB_x 函数关系式 (4), 和深度变化与 ΔB_z 函数关系式 (5)。由此可知, 在探头沿着与裂纹平行的方向进行扫描时, 可以通过 ΔB_x 和 ΔB_z 信号幅值反演出裂纹深度的值。

$$y = y_0 + A_1 e^{\left(\frac{x-y_0}{\pi}\right)} + A_2 e^{\left(\frac{x-y_0}{12}\right)} \quad (3)$$

$$y = -5.67 + 22.05 e^{\left(\frac{x-1.08}{2.67}\right)} + 9.3 e^{\left(\frac{x-1.08}{1.38}\right)} \quad (4)$$

$$y = -75.72 + 466.3 e^{\left(\frac{x-1.58}{1.85}\right)} + 131.9 e^{\left(\frac{x-1.58}{1.24}\right)} \quad (5)$$

由图 6(a) 可知, 信号曲线波峰和波谷间的距离基本无变化, 这是由于裂纹长度不变导致感应电流聚集在同一位置引起, B_z 的波峰与波谷各幅值之差 ΔB_z 与裂纹深度有关, 裂纹越深, ΔB_z 越大。

由 2.1 和 2.2 可知, B_x 和 B_z 可以反映裂纹的长度信息, 也可以反映裂纹的深度信息。利用 B_z 信号对表面裂纹进行评价具有更高的灵敏性。

2.3 探头抖动对 ACFM 检测信号的影响

将检测探头水平放置在钢板试件上, 平稳时检测信号平稳。如将探头快速提取并放下, 检测信号

会出现如图 7 所示信号曲线图, 这是由于探头在提取并放下的过程中产生一快速磁场突变的过程。在检测过程中, 当探头不断发生抖动时将会产生特别多的突变信号, 以奥氏体不锈钢板为检测对象, 裂纹尺寸为 $30 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 检测信号曲线图如图 8 所示。特征曲线中有很多微小突变信号, 但 B_x 和 B_z 特征信号变化趋势总体仍保持不变。可见, ACFM 检测技术对于不平滑的待检区域仍可进行检测评价, 但要考虑校正探头抖动对检测信号的影响。

2.4 提高高度对 ACFM 检测信号的影响

试验选取 304 奥氏体不锈钢试件为实验对象, 表面裂纹尺寸为 $30 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 研究提高高度对 ACFM 检测信号的影响。探头沿着与裂纹平行的方向进行扫描, 检测信号强度受提高高度的影响较大, 检测信号如图 9(a) 和 9(b) 所示。图 9(c) 表示提高高度对检测信号幅值的影响, 其中横坐标表示的是探头的提高高度, 纵坐标左右两边分别表示的是 B_x 和 B_z 特征信号最大幅值与最小幅值之间的差值 ΔB_x 和 ΔB_z 。由图 9(c) 可知, 探头离检测工件表面越高, 检测信号强度越弱, 在提高高度达到 6 mm 时, 检测信号仍可达最大值的 20%。这里定义 B_z 检测信号最大值一半时的提高高度称为有效提高高度, 由试验结果可知: 在裂纹深度为 3 mm 左右时, 探头提高有效高度为 3 mm。

2.5 探头与裂纹水平距离对 ACFM 检测信号的影响

试验所选取的试验对象及探头扫描方式和 2.4 相同, 研究探头距离裂纹水平距离对 ACFM 检测信号的影响。检测信号随探头与裂纹水平距离的分布特征曲线如图 10(a) 和图 10(b) 所示。检测信

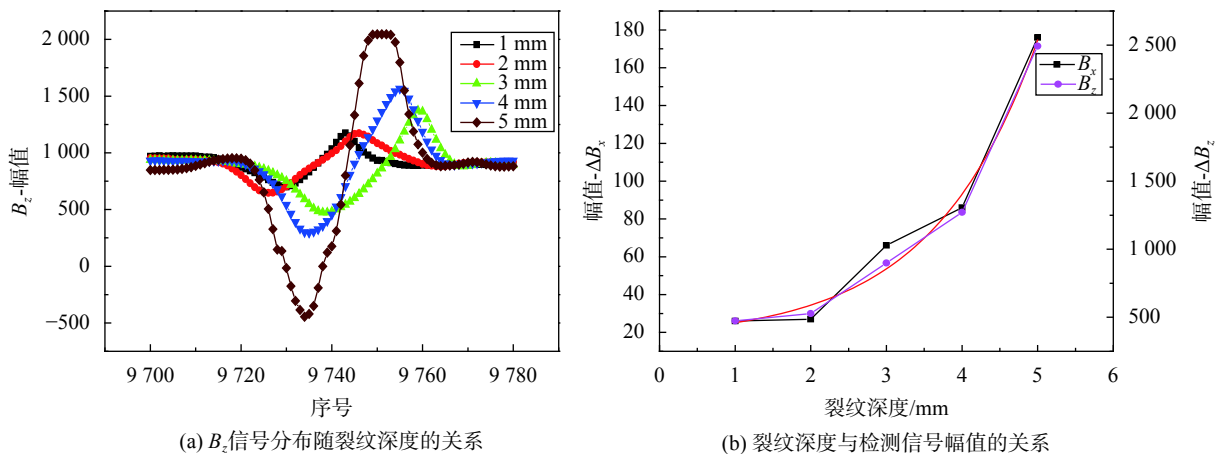


图 6 检测信号与裂纹深度的关系

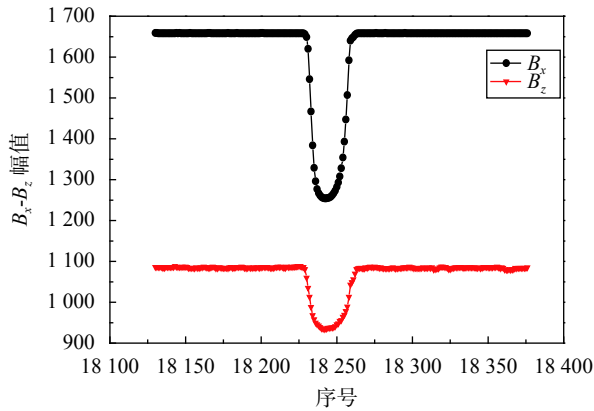


图7 提高对检测信号的影响

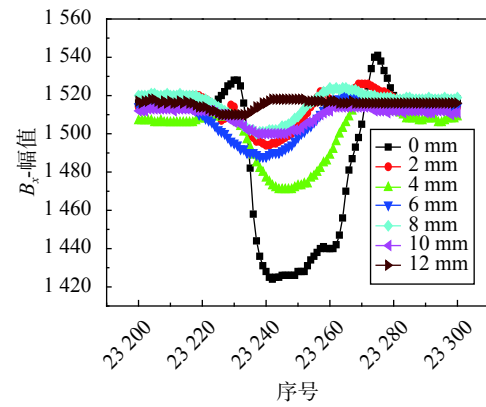
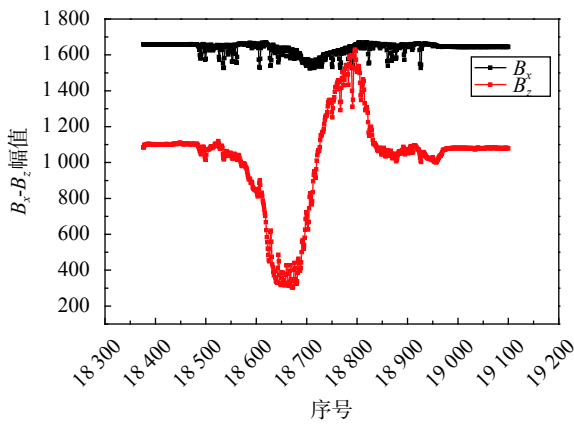
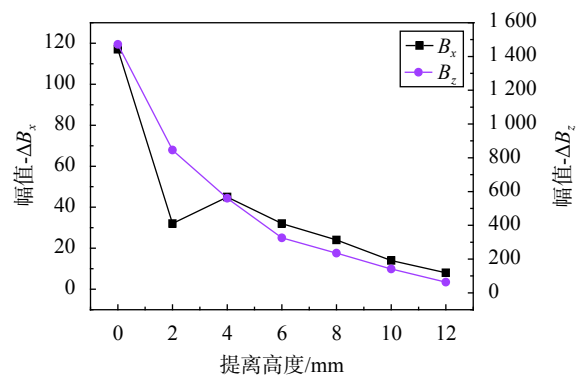
(a) B_x 检测信号(b) B_z 检测信号

图8 抖动对检测信号的影响

号强度受探头离裂纹水平距离的影响很大,影响规律如图10(c)所示。图10(c)横坐标表示的是探头与裂纹水平距离,纵坐标左右两边分别表示 B_x 和 B_z 特征信号最大幅值与最小幅值之间的差值 ΔB_x 和 ΔB_z 。由图10(c)可知,随着探头与裂纹水平距离的增大, B_x 和 B_z 特征信号幅值变化逐渐减小,在达到12 mm时, ΔB_x 和 ΔB_z 特征信号幅值约减到最大值的15%,随着偏移距离的进一步增加,检测信号回到背景值。这里定义 B_z 检测信号最大值一半时对应的探头与裂纹水平距离称为探头检测的有效偏移距离,由图10(c)结果分析,在裂纹深度3 mm左右时,探头偏离裂纹水平距离的有效距离为6 mm。说明探头扫描裂纹时,一次检测的有效宽度为 $6 \times 2 = 12$ mm。

2.6 探头扫描方向对检测信号的影响

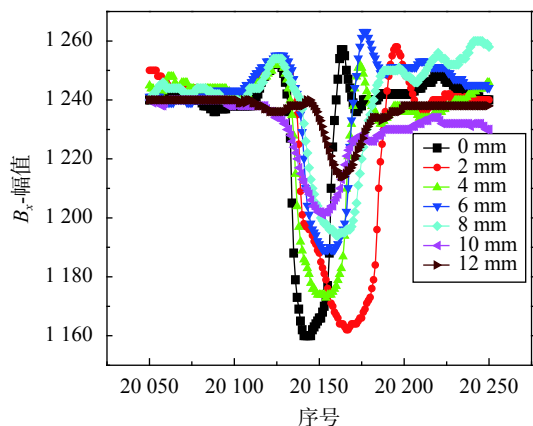
试验选取304奥氏体不锈钢试块为试验对象,裂纹尺寸为 $30 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,研究放置方位和扫描方向对检测信号的影响。分别研究探头6种模式扫描下的特征信号,扫描模式如图11所示。



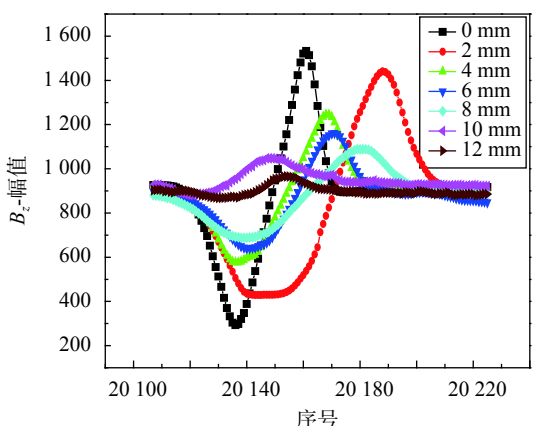
(c) 提高高度与检测信号幅值的关系

图9 提高高度对检测信号的影响

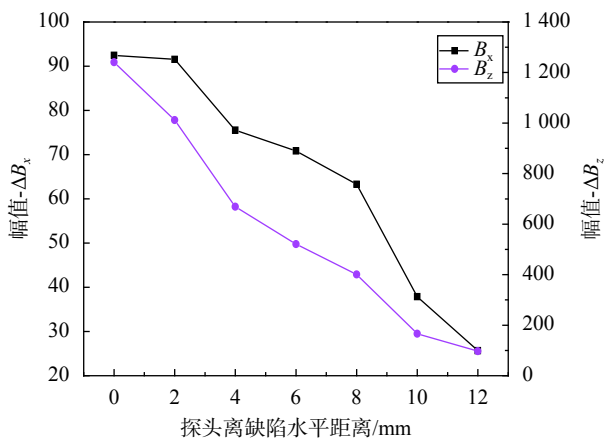
其中 M_1 模式为探头两脚连线方向平行于裂纹方向,且平行于裂纹方向扫描,检测信号为ACFM信号; M_2 模式为两脚连线方向垂直于裂纹方向,且探头垂直于裂纹方向扫描,检测信号为交流漏磁信号; M_3 模式为两脚连线方向平行于扫描方向,且探头与裂纹成 45° 方向扫描; M_4 模式为两脚连线方向平行于扫描方向,且探头与裂纹成 -45° 方向扫描; M_5 模式为激励探头两脚连线方向与裂纹方向垂直,且沿裂纹方向扫描; M_6 模式为激励探头两脚连线方向与裂纹方向平行,垂直于裂纹方向扫描,且探头



(a) B_x 检测信号



(b) B_z 检测信号



(c) 探头距裂纹水平距离与检测号幅值的关系

图 10 探头距离裂纹水平距离对检测信号的影响

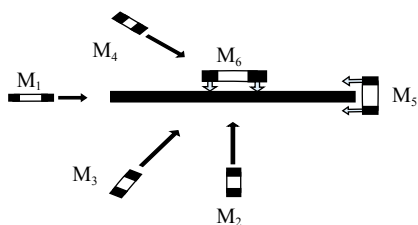


图 11 探头 6 种扫描模式

移动路径与裂纹保存一定的距离。 M_3 和 M_4 模式检测信号为 ACFM 信号与漏磁信号之和。 M_5 模式检测信号为交流漏磁信号, M_6 模式为 ACFM 信号。

不锈钢规格为 $600\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, 分别在 6 种模式下对裂纹尺寸为 $30\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 的裂纹试验, 检测信号特征如图 12(a) 和图 12(b) 所示。由图 12(a) 和图 12(b) 可知, 在 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 模式下, B_x 和 B_z 的特征信号符合一般的 ACFM 裂纹信号规律, 但检测信号幅值变化相差明显。其中, M_1 和 M_2 模式相当于分别检测的是纵向裂纹和横向裂纹, 在探头进行 M_2 扫查时, 相当于检测的是长度更短的一段裂纹, 所以检测信号相比平行扫描时信号强度低^[14]。而在 M_3 和 M_4 扫查模式过程中, 根据 2.5 所研究的探头离裂纹水平距离的影响分析可知, 探头同样能感知其一定水平距离内的感应磁场, 只是感应强度相对水平扫描来说有所下降。

对于 M_5 模式, 检测试块中的感应电流是沿着裂纹方向流动的, 且裂纹宽度较窄, 裂纹两端电流扰动较小^[15]。在探头进入和离开试件表面裂纹时, 信号变化都较小, 仅 B_y 方向上的磁场变化更明显一些, 由于 B_x 和 B_z 上磁场变化很小, 所以出现如图 12 所示检测信号微弱的特征^[16]。

对于 M_6 模式, 由检测结果图可知, B_x 向下凹陷, 而 B_z 向上凸起, B_x 方向上的检测信号较强。由于此种模式下扫描, 相当于检测的是很短的一段裂纹长度, 在探头刚进入缺陷时, B_z 出现明显的凸起特征信号, 但裂纹长度太短, 导致 B_z 上的信号来不及经历波谷就回到了背景值。

通过试验, 研究了放置方位和扫描方向对检测信号的影响。当探头两脚连线方向平行于裂纹方向, 且平行于裂纹方向扫描模式时, 检测信号最强。在实际检测过程时, 因不知裂纹走向, 因而当检测信号微弱时, 不能定义此处无裂纹的产生, 而需改变探头扫描方向进行来回的检测, 以达到裂纹的最大检出率。

3 结束语

通过试验研究可知, 裂纹长度、裂纹深度、探头扫描方式、探头起落波动、探头偏离裂纹的水平距离及探头提高高度等因素的变化对 ACFM 检测信号的影响较大。本文的试验研究对于金属表面裂纹的评定及量化具有较重要的指导意义, 由试验结果可知:

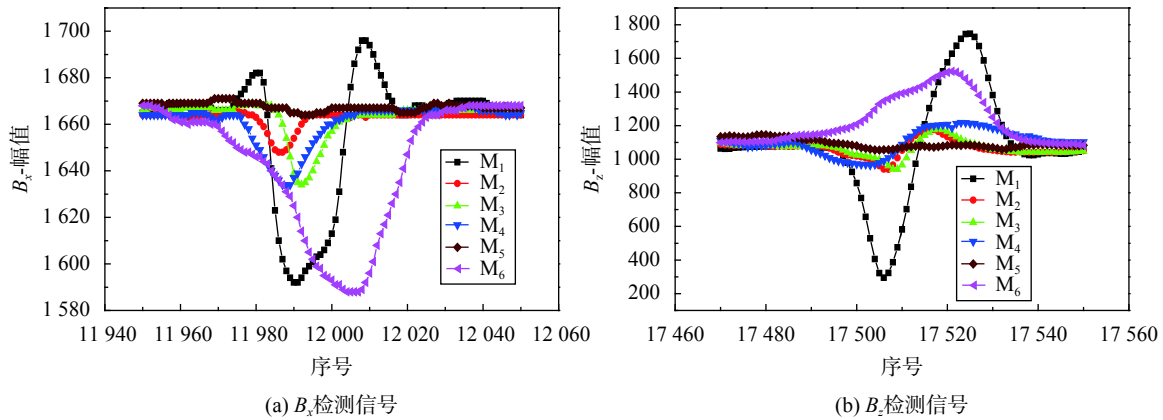


图 12 探头扫描方位对检测信号的影响

1) 裂纹长度在 10~50 mm, 深度在 1~5 mm 范围内, 裂纹长度和深度对 ACFM 检测信号的影响较大。裂纹深度一定, 随着裂纹长度增大, 检测信号的幅值变化幅度不断增大, 可通过 ΔB_z 反演出裂纹长度; 裂纹长度一定, 随着裂纹深度的加深, 检测信号的幅值变化也不断增大, ΔB_x 和 ΔB_z 都可以用来反演裂纹深度的信息。

2) 在扫描过程中, 探头的抖动对 B_x 、 B_z 检测信号影响较明显, 但检测特征信号的总体趋势仍符合 ACFM 法特征信号一般变化规律。

3) 探头的提高高度对检测信号的影响较大, 对于深度为 3 mm 左右深的裂纹, 其提高有效高度为 3 mm, 探头偏离有效距离为 6 mm。

4) 扫描方式的不同将会对检测信号产生较大的变化。对于平行, 垂直和与裂纹成一定角度的扫描模式下, 特征信号的变化规律符合 ACFM 法特征信号变化一般规律。其中探头两脚连线方向平行于裂纹方向, 且平行于裂纹方向扫描模式下检测效果最佳。而在探头两脚连线方向与裂纹方向垂直, 且沿裂纹方向扫描模式下基本无检测信号, 在探头两脚连线方向与裂纹方向平行, 且垂直于裂纹方向扫描模式下特征信号存在凹陷与凸起的变化。

参考文献

[1] 李伟. 基于交流电磁场的缺陷智能可视化检测技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2007.
 [2] 冯蒙丽, 蔡玉平, 宋春荣, 等. 几种电磁无损检测技术比较及发展现状[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(2): 107-110.
 [3] 杨理践, 曹鸿威, 高松巍, 等. 基于交变电磁场的钢板表面裂

纹检测方法[J]. 仪表技术与传感器, 2015, 10(9): 107-110.

- [4] 李伟, 陈国明. 交流电磁场缺陷检测系统建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(20): 6344-6347.
 [5] 孙广彬. 基于交变电磁场的钢板表面缺陷检测系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
 [6] REN S K, ZHU Z B, LIN T H, et al. Design for the ACFM sensor and the signal processing based on wavelet denoise[C]//2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing (CISP'09). IEEE, 2009.
 [7] DARIUSH M S, REZA F M. 1- D probe array for ACFM inspection of large metal plates [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 74-382.
 [8] 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.
 [9] 宋凯, 李俊江, 康宜华, 等. 不同扫描方向对 ACFM 法检测信号的影响研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(7): 1750-1752.
 [10] 冯蒙丽, 蔡玉平, 宋春荣, 等. 交流磁场检测中激发频率与提离的影响分析[J]. 中国测试, 2012, 38(1): 32-34.
 [11] PAPALIEAS M P, LUGG M C, ROBERTS C, et al. High-speed inspection of rails using ACFM techniques[J]. NDT&E International, 2009, 42: 328-335.
 [12] 吴德会, 游德海, 柳振凉. 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.
 [13] 李伟, 陈国明, 郑贤斌. 交流电磁场检测中裂纹形状反演研究[J]. 无损检测, 2006, 28(11): 573-576.
 [14] 宋凯, 康宜华, 孙燕华, 等. 基于 U 形探头 ACFM 和 AC-MFL 法的机理辨析[J]. 测试技术学报, 2010, 24(1): 67-72.
 [15] 康中尉, 罗飞路, 陈棣湘. 交变磁场测量的缺陷识别模型[J]. 无损检测, 2005, 3(27): 123-126.
 [16] 郭旭东, 颜国正, 何文辉. 交流励磁三维定位系统中磁传感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2007(7): 1211-1216.

(编辑:刘杨)