

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210342

钢板硬斑的增量涡流扫查成像方法与仪器*

邢智翔¹,何存富¹,刘秀成¹,张建卫²

(1. 北京工业大学材料与制造学部 北京 100124; 2. 钢研纳克检测技术股份有限公司 北京 100081)

摘 要:硬斑测试是高端钢板产品质量评价的关键内容。本文基于增量涡流检测原理,研制了国产化的钢板硬斑磁检测仪器,并对仪器功能和性能进行了实验测试。首先,研制了增量涡流检测传感器,开发了基于交流电桥测试和相位旋转解调方法的增量涡流检测电路,集成了专用仪器;其次,利用仪器在 Cr12MoV 钢板和 X70 管线钢中开展了多组检测试验,结果表明:传感器的横向分辨率可达 10 mm,增量涡流信号解调波形峰峰值 U_p 随表面硬度增加近似线性下降。在高出基准 34.8% 的硬斑区域内, U_p 值下降约 75%。利用 U_p 这一敏感参数对 X70 管线钢进行扫查成像,可准确识别出宽约 10 mm 的硬斑。上述研究结果为高端钢板硬斑的在线无损检测提供了方法和仪器支撑。

关键词:钢板硬斑;增量涡流;无损检测;扫查仪器

中图分类号: TH871 TM936 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Incremental eddy current scanning method and instrument
for hard spots imaging in steel plates

Xing Zhixiang¹, He Cunfu¹, Liu Xiucheng¹, Zhang Jianwei²

(1. Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. NCS Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: The hard spot detection is one of the key contents during quality evaluation of high-end steel plate products. In this study, a domestically developed instrument based on the principle of incremental eddy current method is presented for detecting hard spots in steel plates. The function and performance of the developed instrument are experimentally examined. First, a sensor of incremental eddy current and its detection circuit are developed by using AC-bridge, phase rotation and demodulation techniques. As a result, a specialized instrumentation of incremental eddy current is integrated. Secondly, several groups of experimental testing are performed on steel plate of Cr12MoV and pipeline steel of X70 with the developed instrument. The obtained results show that the spatial resolution of the sensor can reach around 10 mm. The peak-to-peak value (U_p) of the demodulated waveform of the incremental eddy current signal is used as feature parameter, which demonstrates approximately linear decreasing trend as the increase of the surface hardness. The value of U_p is decreased by at least about 75% in the hard spot region in which the hardness is about 34.8% higher than the baseline. Magnetic imaging of pipeline steel of X70 is realized by using the parameter of U_p and the hard spots with a width around 10 mm is accurately identified from the imaging results. The above research results provide support in method and instrument for on-line, nondestructive testing of hard spots in high-end steel plates.

Keywords: hard spot; incremental eddy current; nondestructive testing; scanning instrument

0 引 言

热轧钢板在生产过程中,受轧制温度、冷却速率控制

不均匀等因素影响,易在钢板中形成硬度偏高的区块(硬斑)^[1-3]。硬度是评价热轧钢板力学性能的重要指标。以热轧管线钢为例,硬度高的管线钢虽具有高强度,但抗氢致开裂的性能降低^[4-7]。因此,局部硬斑成为了管线钢的

性能“弱区”,在高端产品制造过程中需要进行严格控制。

目前欧盟在制订的行业标准(DNV-OS-F101)中规定了海底油气管道用碳锰钢的表面硬度控制要求,将内、外表面硬度值分别高于250HV10和275HV10(生产标准值为200HV10)且任意方向尺寸大于50 mm的硬斑视为缺陷^[8]。欧盟对进口热轧管线钢产品要求在其制造阶段进行100%的硬斑检测。国际上能够对钢板硬斑进行无损、在线检测的仪器报道极少,只有德国Rohmann公司和Frounhofer-IZFP研究所开发了专用的磁检测仪器^[9-10],国内尚处于空白。国产化钢板硬斑无损检测仪器的缺乏,导致我国高端管线钢不具备出口通行证,亟待开展相关方法研究、突破钢板硬斑无损检测关键技术。

硬斑和硬度合格区域的材料组分存在较大差异,表现出不同的磁特性。利用磁性测量结果可以间接表征材料硬度^[11-12],通过对钢板进行磁性扫描可以有效识别硬斑并对其进行定位。研究表明:磁巴克豪森噪声、涡流和磁滞回线等磁信号均具有定量表征钢材表面硬度的潜力^[13-15],但在热轧管线钢硬斑检测中仍存在一些不足。例如磁巴克豪森噪声易受工业现场的电气噪声干扰而难以获取^[16],涡流易受钢板表面氧化皮影响而测试不准确^[9],磁滞回线测试需在准静态磁场条件下进行,测试效率较低^[17]。相比而言,前述已有的钢板硬斑磁检测仪器都基于增量涡流(或增量磁导率)原理研发,更适用于钢板硬斑的在线、快速无损检测,但仪器的关键技术细节未向外公布。

为研制国产化的钢板硬斑磁检测仪器,本文首先从增量涡流的基本测试原理出发,研制了专用传感器及检测仪器。其次,在Cr12MoV钢板中试验测试了表面硬度变化对增量涡流的影响,验证了方法的有效性;最后,将研制的仪器成功应用于X70管线钢表面硬斑的扫查检测与成像。

1 检测原理

铁磁性材料在外加交变磁场作用下会形成电涡流,涡流的空间密度分布及其形成的次级感生磁场和材料的电磁特性(磁导率、电导率)相关。材料的组分变化会改变磁导率,通过涡流检测方法可以对材料的磁导率及其决定因素——组分进行间接表征。常规的互感型涡流检测传感器,一般采用通入高频电流的螺旋线圈提供交变磁场,携带被测材料电磁特性信息的次级感生磁场被感应线圈所接收。通过解调得到感应线圈输出电压信号的幅值和相位,即可作为材料电磁特性的表征参量。

常规涡流检测提供的高频交变磁场在图1(a)所示的材料零磁场位置附近振荡,解调参量仅能反映初始点的磁导率信息,不能记录材料的完整磁化过程。常规涡流检测结果是位于涡流复阻抗平面上的一个点,会同时受多因素(提离、表面粗糙度等)影响,利用初始点的磁导率信息难以实现钢板硬斑区域材料组分(或硬度)的有效表征。此外,常规涡流检测的频率一般在几千赫兹以上,受集肤效应影响只能对浅表层材料进行测试,不能适应厚钢板中硬斑的测试要求。为解决上述问题,需要研究可检测深度大、携带丰富磁化信息的涡流测量方法。

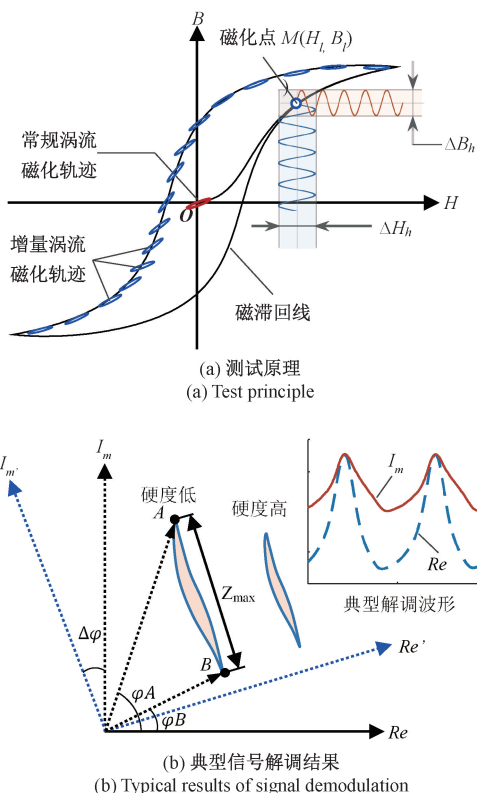


图1 增量涡流测试原理及其典型信号解调结果
Fig. 1 The test principle of incremental eddy current and the typical results of signal demodulation

增量涡流方法是一种利用高、低频叠加磁场对铁磁性材料进行复合磁化,记录材料磁响应的测试手段。复合磁化场 $H(t)$ 的表达式为:

$$H(t) = H_l \cos(2\pi f_l t) + H_h \cos(2\pi f_h t) \quad (1)$$

低频磁场频率 f_l 一般推荐小于1 kHz,最大强度 H_l 可使材料接近饱和磁化。高频磁场频率 f_h 一般推荐高于10 kHz,其强度 H_h 和常规涡流测试条件相当。增量涡流是在材料沿其磁滞回线行进过程中开展的涡流检测,其磁化轨迹如图1(a)所示。增量涡流检测过程中施加的低频磁场穿透深度相比常规涡流大幅提升。低频磁化

过程中材料的磁导率也是时变的,在磁导率低于初始磁导率的磁化区间内电涡流的穿透深度也比常规涡流大。此外,在低频磁化过程同步进行高频涡流测试,可以测得材料完整磁化过程中的磁导率变化历程,丰富了可用于表征组分变化的磁参量。

在文献[18]中,上述增量涡流的检测技术也被称作增量磁导率。严格意义上的材料增量磁导率需要在闭合磁路和准静态磁化条件下进行测量,在无损检测中难以直接应用。工程/上常利用增量涡流检测技术,测量材料在高低频叠加磁场作用下的涡流阻抗(虚部为主)间接反映增量磁导率的信息^[9]。因此,目前无损检测中提到的增量磁导率检测实质上是基于增量涡流原理开展的。增量涡流测得的材料复合磁化响应信号为:

$$U_o(t) = A(t) \sin[2\pi f_h t + \varphi(t)] \quad (2)$$

其中,幅值 $A(t)$ 和相位 $\varphi(t)$ 均会随施加的低频磁场而变化,携带了低频磁化全程中材料的磁导率变化信息。复合磁化响应信号可视为磁导率变化信号(低频分量)对高频涡流信号的调制结果。利用正交解调方法对信号 $U_o(t)$ 进行解调,使用一组频率相同且相位正交的参考信号 $y_s(t) = \sin(2\pi f_h t)$ 和 $y_c(t) = \cos(2\pi f_h t)$ 分别与 $U_o(t)$ 相乘得到:

$$U_o(t) \cdot y_s(t) = \frac{1}{2} A(t) \{ \cos[\varphi(t)] - \cos[4\pi f_h t + \varphi(t)] \} \quad (3)$$

$$U_o(t) \cdot y_c(t) = \frac{1}{2} A(t) \{ \sin[\varphi(t)] + \sin[4\pi f_h t + \varphi(t)] \} \quad (4)$$

对相乘后的信号进行滤波,滤除频率为 $4\pi f_h$ 的高频分量,得到实部分量:

$$U_c(t) = \frac{1}{2} A(t) \cos[\varphi(t)] \quad (5)$$

虚部分量:

$$U_s(t) = \frac{1}{2} A(t) \sin[\varphi(t)] \quad (6)$$

与常规涡流不同,增量涡流解调得到的分量仍是时变信号,其实部和虚部表达式为:

$$Re(t) = A(t) \cos[\varphi(t)] \quad (7)$$

$$Im(t) = A(t) \sin[\varphi(t)] \quad (8)$$

在复阻抗平面内,增量涡流解调结果形成如图 1(b) 所示的封闭曲线,这一轨迹与常规涡流探伤仪的信号形式相似,两者的差异如下:1) 增量涡流检测时探头不移动,轨迹反映的是探头下方材料在低频磁化过程中磁导率的时变信息;2) 常规涡流探伤时探头移动,轨迹反映的材料磁导率在空间的变化信息。图 1(b) 所示的增量涡流轨迹特征参量(如长轴长度 $Z_{\max}$ 、封闭曲线面积等)可以用于材料组分区分或表面硬度表征。

如图 1(b) 所示,在交变磁化的过程中,被测材料的磁导率会随磁化过程发生变化,而电导率保持不变,涡流阻抗会在阻抗平面上产生朝某一方向($Z_{\max}$)移动的趋势。因此,该方向包含了反映材料硬度的磁导率信息。对于解调增量涡流信号所得到的封闭曲线,A 点和 B 点分别为曲线上相位角最大和最小的点,AB 两点的连线为 $Z_{\max}$ 所在的方向。为了在解调的过程中获得 $Z_{\max}$ 所在方向的增量涡流信号,需要旋转原阻抗平面的坐标轴,使得虚轴与 $Z_{\max}$ 所在的方向平行。具体做法是:在标定阶段,通过计算 AB 两点连线的方向,确定坐标轴需要旋转的角度 $\Delta\varphi$,然后在正交参考信号中加入相位偏移 $\Delta\varphi$,使之变为:

$$y_{s,r}(t) = \sin(2\pi f_h t + \Delta\varphi) \quad (9)$$

$$y_{c,r}(t) = \cos(2\pi f_h t + \Delta\varphi) \quad (10)$$

最终解调得到的虚部信号为:

$$U(t) = A(t) \sin[\varphi(t) - \Delta\varphi] \quad (11)$$

即实际用于表征材料硬度的增量涡流信号。

2 传感器与仪器

基于增量涡流测试原理,研制了图 2 所示的传感器及检测仪器。如图 2(a) 所示,传感器主要由 U 型电磁铁、检测线圈和参考线圈构成。U 型电磁铁的磁芯横截面积为 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,顶部绕制的漆包铜线线径为 0.5 mm ,匝数为 200。检测线圈和参考线圈的规格相同,均为圆形空心线圈(内径 6 mm 、外径 11 mm 、高度 1.5 mm),绕制匝数为 400。磁芯端面固化粘贴厚度约为 1.2 mm 的氧化铝陶瓷,以保护磁轭和检测线圈在传感器扫查过程中不发生磨损失效。

图 2(b) 所示的增量涡流检测仪器由多通道信号发生器、功率放大器、电桥电路、信号解调电路和信号采集卡等构成。电压-电流转换型功率放大器的转换系数为 1,最大功率约 100 W 。信号发生器可同时产生低频和高频正弦信号。低频信号通过功率放大器,将放大后的交变电流输入至传感器电磁铁的线圈绕组;高频信号经驱动电路扩流后,输入至电桥电路的激励端,并在试件表面激励产生高频涡流。传感器采用交流电桥法^[19]测量材料复合磁化响应信号 $U_o(t)$ 。检测线圈随传感器靠近被测钢板表面,参考线圈则远离试件,分别接入交流电桥的两个桥臂。电桥的输出端与 20 dB 的差分放大器连接,输出信号经前置放大后进入解调电路。解调电路的核心为模拟乘法器,根据前述信号解调原理,在输入模拟乘法器的参考信号中,增加相位偏移 $\Delta\varphi$,使得阻抗平面的虚轴旋转至 $Z_{\max}$ 所在方向,由此仅使用单通道解调电路,即可获得特征信号 $U_o(t)$ 。

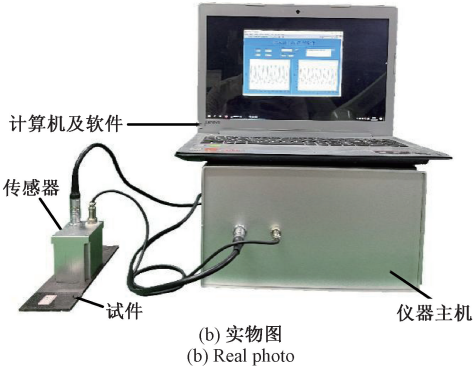
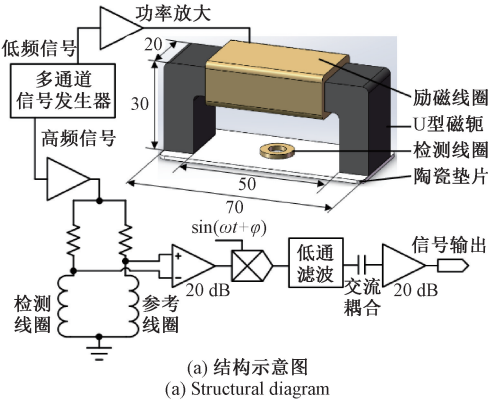


图 2 传感器与仪器

Fig. 2 Sensor and instrument

3 仪器功能测试

为验证研制仪器的功能,分析得到可应用于硬度表征的最佳参量,在—批 Cr12MoV 钢板中开展增量涡流检测实验。试样共计 5 块,尺寸均为 220 mm×60 mm×3 mm,通过热处理工艺调整钢板的硬度值,具体工艺如下:1) 淬火。加热 60 min 升温至 650℃后保温 60 min,继续加热 30 min,升温至 850℃并保温 90 min;继续加热 40 min,升温至 1 030℃后保温 150 min,随后经氮气冷却 25 min; 2) 回火。将淬火后的试件在不同温度下 (180℃~540℃ 范围内) 进行 210 min 的回火处理,以获得具有不同硬度的钢板试样。利用维氏硬度计 (30 HV, 载荷 30 kg) 对热处理得到的钢板试样进行测试,测得的表面硬度值分布在 346~457 HV 范围。

实验测试过程中,低频励磁电流幅值控制为 1.5 A, 频率为 $f_l = 200\text{ Hz}$; 高频涡流激励幅值为 7.5 V, 频率为 $f_h = 50\text{ kHz}$ 。信号发生器与采集卡同步触发,每次检测采集 5 个励磁周期的信号波形并进行平均,信号采样率设置为 200 kS/s。在具有不同表面硬度的钢板中测得的 1 个磁化周期内的增量涡流信号如图 3 所示。

图 3 所示波形中每一磁化时刻的增量涡流信号 $U(t)$ 的幅值,均可作为表征硬度的候选参量。为分析得

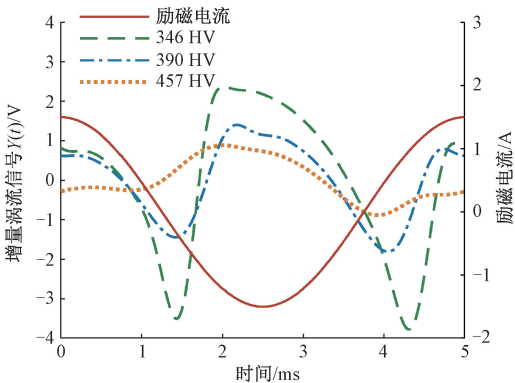


图 3 一个磁化周期的增量涡流信号

Fig. 3 Incremental eddy current signal in one magnetization cycle

到最佳的表征参量,使用线性方程 $y = ax + b$,分析每一时刻增量涡流信号 $U(t)$ 幅值和试样表面硬度的拟合优度。将方程的拟合优度 (R^2) 和拟合直线的斜率 (代表灵敏度) 绝对值 $|a|$ 作为参量表征能力的评价指标。某一磁化时刻分析结果所得的 R^2 和 $|a|$ 值越大,说明对应信号幅值对硬度具有更好的表征能力。评价指标 R^2 和 $|a|$ 随时间的变化如图 4 (a)。其中 R^2 的最大值 ($R^2_{\max} = 0.936$) 出现在 $t = 1.495\text{ ms}$, $|a|$ 的最大值 ($|a|_{\max} = 0.031$) 出现在 $t = 1.475\text{ ms}$ 。上述两个时刻对应的特征值随表面硬度的变化规律如图 4 (b) 所示。

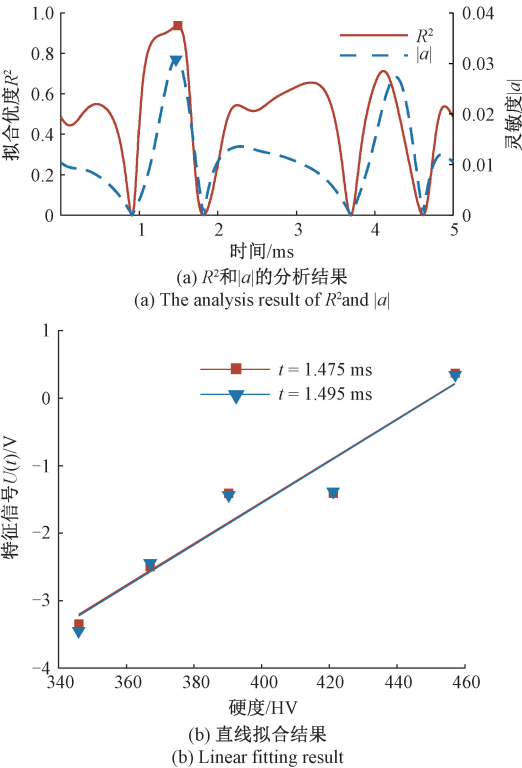


图 4 增量涡流信号对硬度的表征能力

Fig. 4 Performance of incremental eddy current signal in surface hardness characterization

图4(b)的结果表明:增量涡流不仅对表面硬度敏感,也具有定量表征表面硬度的潜力。由于不同表面硬度试件中测得的波形峰值、峰谷出现时刻并不一致,难以利用某一特定磁化时刻的增量涡流信号幅值进行硬度表征。因此,进一步研究增量涡流波形的波峰值 $U_{\max}$ 、波谷值 $U_{\min}$ 和峰峰值 U_p 对硬度的定量表征能力。提取一个磁化周期内 $U(t)$ 的 $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 和 U_p , 它们随表面硬度的变化规律如图5所示(为便于对比图中将 $U_{\min}$ 取绝对值)。3个参量和表面硬度之间均表现出良好的线性关系,其中增量涡流信号峰-峰值 U_p 对应的拟合优度最优 ($R^2=0.91$) 且灵敏度 ($k=0.037$ V/HV) 最高。相较于某一特定时刻的信号幅值,峰峰值 U_p 在实际检测过程中更容易获取,因此后续选择 U_p 作为表征材料硬度的特征量。

文献[8]指出,在管线钢硬斑检测中仪器需有效识别出内、外表面硬度分别高出均值25%和37.5%的硬斑。这里以表面硬度346HV的试件作为基准(对应的 $U_p=6.17$),其它4块钢板的表面硬度值相比基准试件的硬度值分别高出约6.1%、12.7%、21.7%和32.1%。依据图5的分析结果, U_p 和表面硬度之间存在线性单调依赖关系。当表面硬度值分别高出基准21.7%(接近25%)和32.1%(接近37.5%)时,研制仪器测得的特征参量 U_p 分别为2.75V和1.78V,相比基准试件测试结果分别下降了55.4%和71.2%。因此,通过对增量涡流检测结果进行简单的阈值设置,就可以对钢板中的硬斑进行有效检测。

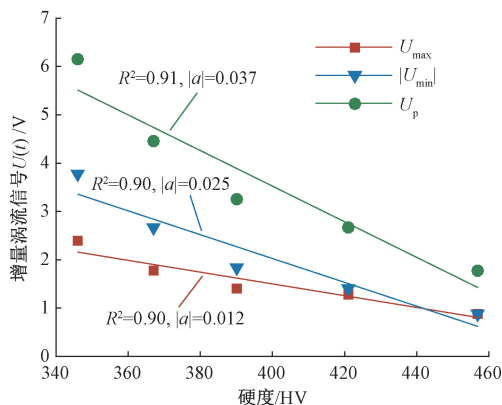


图5 波形特征参数和表面硬度的关系

Fig. 5 Relationship between characteristic parameters of waveform and surface hardness

4 管线钢硬斑检测与扫查成像

利用研制的仪器对X70管线钢平板试件进行硬斑扫查成像检测,成像过程中采用的特征参量为增量涡流信号

峰峰值 U_p 。如图6所示,测试钢板试件尺寸为200 mm×150 mm×23 mm,利用激光淬硬工艺在试件中不同位置共加工4处淬硬区域,形成的真实硬斑和尺寸如图6所示。由于试件的尺寸较大,难以利用维氏显微硬度计进行表面硬度测试,这里利用便携式洛氏硬度计测得未淬硬区域的基准硬度值约为23 HRC,淬硬区域的硬度值约为31 HRC,高出基准值约34.8%。

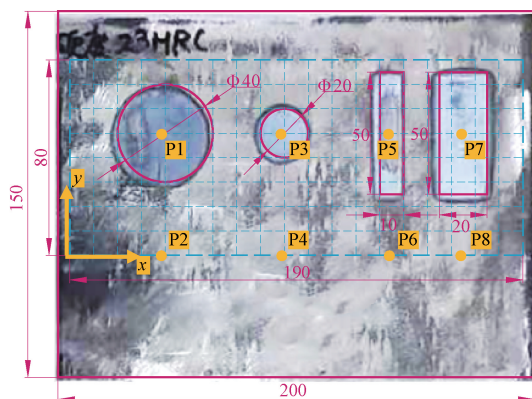


图6 激光淬硬硬斑试件

Fig. 6 Specimen for hard spot induced by laser hardening

测试过程中,仪器的低频励磁电流设置为1 A,其它激励参数与第3节中的实验保持一致。实验共分3组进行,首先将传感器依序放置于图6中标记的位置P1~P8,测试有、无淬硬区域的增量涡流信号并进行对比。从图7(a)所示的测试结果来看,在淬硬区域测得的增量涡流幅值明显低于未淬硬区域的结果。统计不同位置测得的 U_p 进行定量分析,图7(b)的结果表明:相比未淬硬区域,硬斑区域的 U_p 下降约75%~85%,预示着 U_p 对硬斑和基材具有良好的区分检测能力。

硬斑从其几何中心向外可以分为完全淬硬区、过渡区和基材区。传感器检测信号反映的是检测线圈下方区域的增量涡流平均效应。实际采用的线圈外径为11 mm,在测点P1时线圈处于完全淬硬区内;在测点P3和P8处时,线圈感知的增量涡流应来自于完全淬硬区和过渡区;在测点P5时,线圈尺寸大于硬斑宽度,输出信号同时受完全淬硬区、过渡区和基材区的影响。线圈敏感范围内材料组分的不同,导致了不同淬硬位置点(P1、P3、P5和P7)处测得的 U_p 存在一定差异。增量涡流信号除受材料组分影响外,也对测点位置的残余应力较为敏感。在同为基材区域的4个测点位置(P2、P4、P6和P8),仪器测得的 U_p 并不相等,推测的原因是与各测点附近的残余应力分布不一致有关。

第2组实验中,利用传感器从测点P8开始,沿y轴以步长为2.5 mm进行逐点检测,直至测点P7位置结束。共测试得到从基材区域向硬斑中心过渡的21个位置的

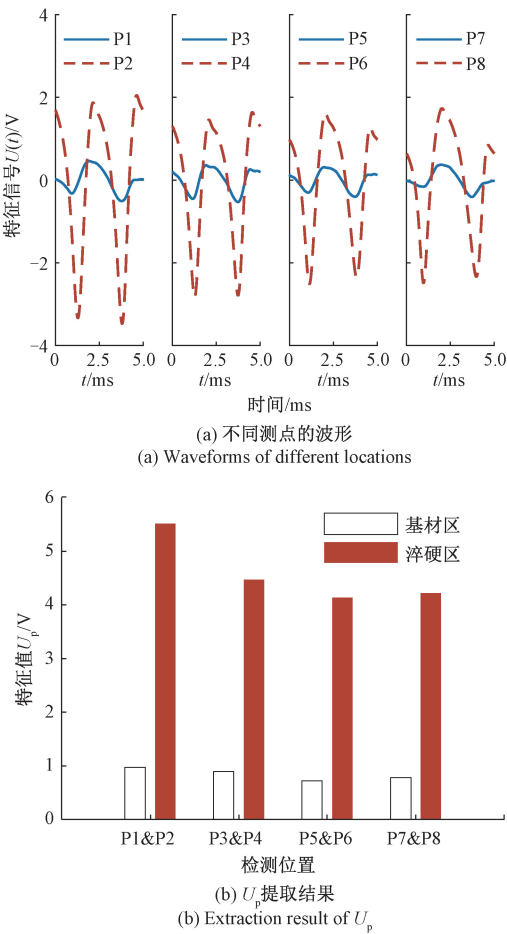


图 7 基材区与硬斑区的检测结果对比
Fig. 7 Comparison results obtained from base material and hard spot

增量涡流信号, 提取得到的峰峰值 U_p 沿扫查路径的分布曲线如图 8 所示。

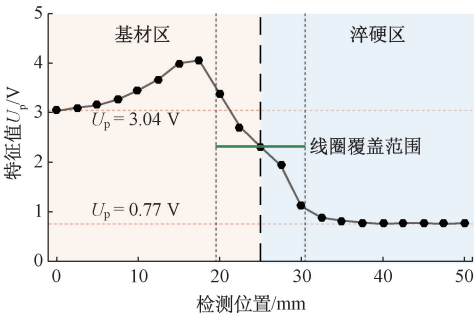


Fig. 8 The trend of U_p as the change of testing position

图 8 所示的曲线可分三阶段进行讨论: 1) 检测线圈逐渐由基材靠近硬斑边缘(过渡区)时, U_p 呈现缓慢上升趋势; 2) 当检测线圈敏感区域开始与硬斑交叠后, 完全淬

硬区内材料对增量涡流的影响逐渐显现, 导致 U_p 迅速下降; 3) 检测线圈全部进入完全淬硬区后, 在不同测点位置测得的增量涡流信号峰峰值趋于稳定。

从图 8 中可以看出, 在完全淬硬区和基材测得的 U_p 分别约为 0.77 和 3.04 V, 两者均值 $U_{\text{mean}} = 1.91$ V。当传感器中心点位于硬斑边缘线附近 ($y = 25$ mm) 时, 其所覆盖区域内基材和完全淬硬区约各占 50%。此时测得的 U_p 约为 2.32 V, 与 U_{mean} 接近且高出完全淬硬区内的测试结果约 200%。这表明检测线圈下方 50% 的面积内覆盖淬硬区, 即可对淬硬区进行有效检测。检测线圈的内径为 6 mm, 外径为 11 mm, 以 10 mm 作为扫查步长, 对任意方向尺寸大于 10 mm 的硬斑, 均可保证检测线圈有 50% 的覆盖面积位于硬斑区域中。因此, 传感器的横向分辨率至少为 10 mm。

在确定传感器的横向分辨率后, 进行第三组实验测试, 将试件平面进行均匀网格划分并进行增量涡流扫查成像。划分的网格尺寸为 10 mm×10 mm, 考虑到传感器 U 型电磁铁不能跨出试件边界, 实际检测线圈所能覆盖的扫查成像区域约为 200 mm×80 mm (图 6 中虚线标记的网格区域)。将传感器的检测线圈置于每个网格几何中心进行增量涡流信号检测, 提取峰峰值 U_p 。利用 U_p 作为空间网格点的色带值进行成像, 结果如图 9(a) 所示。对图 9(a) 进行简单的图像二值化处理, 结果如图 9(b) 所示。二值化图像中清晰地显示出 4 处硬斑图像, 与实际硬斑的位置基本符合。由于硬斑的边界“穿过”了扫查成像的单位网格, 造成了 P3 和 P7 对应的硬斑成像位置略有偏差。上述结果表明以 10 mm×10 mm 像素进行

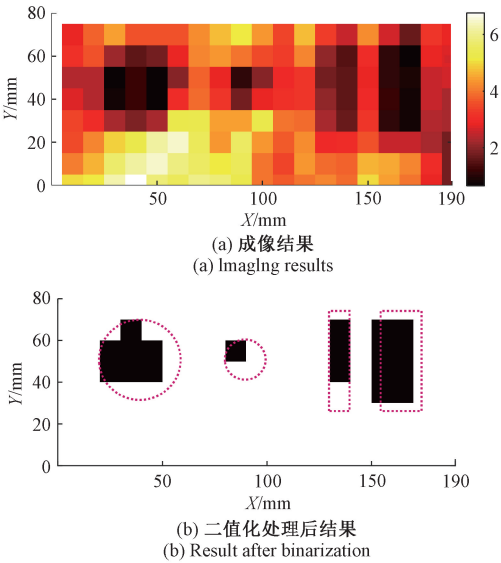


图 9 硬斑的增量涡流成像结果
Fig. 9 Imaging results of hard spots using the incremental eddy current

增量涡流扫描成像,可以有效识别出钢板试件中不同位置、不同尺寸的硬斑。

5 结 论

本文基于增量涡流检测原理,研制了专用传感器和检测仪器,实现了钢板硬斑的扫描成像检测,得到的主要结论如下:

1) 增量涡流信号解调波形对钢板材料组分或表面硬度变化敏感,在 Cr12MoV 钢板中测得的结果表明:波峰值、波谷值和峰峰值均与表面硬度间存在良好的线性关系,峰峰值 U_p 适合作为表征硬度的特征参量;

2) 研制的仪器对不同材质、不同热处理工艺的钢板硬斑区域具有良好的检测能力。硬度高于基准 21.7% 时,在淬火和回火的 Cr12MoV 钢板中增量涡流信号波形峰峰值下降 55.4%;硬度高于基准 34.8% 时,在激光淬硬的 X70 管线钢中,相应的下降比率不低于 75%。

3) 研制的增量涡流传感器横向分辨率至少为 10 mm,利用其对 X70 管线钢进行扫描成像,可以识别出硬度高于基准约 34.8%、宽为 10 mm 的硬斑。

参考文献

- [1] 黄刚,温德智,焦国华,等. 薄板坯连铸连轧 30CrMo 钢的热轧组织与力学性能[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(6): 109-113.
HUANG G, WEN D ZH, JIAO G H, et al. Microstructure and mechanical properties of a hot-rolled 30CrMo steel produced by compact strip production[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(6): 109-113.
- [2] LIEBEHERR M, BERNIER N, LEBRE D, et al. Microstructure-property relationship in 22 mm thick X80 coil skelp[C]. International Pipeline Conference, 2010, 44212: 435-445.
- [3] LIU Y, YI S, LIU C, et al. Microstructure evolution of HSLA pipeline steels after hot uniaxial compression[J]. Materials, 2016, 9(9): 721.
- [4] 赵小宇,黄峰,甘丽君,等. MS X70 酸性环境用管线钢焊接接头氢致开裂敏感性及氢捕获效率研究[J]. 金属学报, 2017, 53(12): 1579-1587.
ZHAO X Y, HUANG F, GAN L J, et al. Hydrogen-induced cracking susceptibility and hydrogen trapping efficiency of the welded MS X70 pipeline steel in H_2S environment [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(12): 1579-1587.
- [5] DOMIZZI G, ANTERI G, OVEJERO-GARCIA J. Influence of sulphur content and inclusion distribution on the hydrogen induced blister cracking in pressure vessel and pipeline steels [J]. Corrosion Science, 2001, 43(2): 325-339.
- [6] MOHTADI-BONAB M A, SZPUNAR J A, RAZAVI-TOUSI S S. A comparative study of hydrogen induced cracking behavior in API 5L X60 and X70 pipeline steels[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 33: 163-175.
- [7] PARK J S, LEE J W, HWANG J K, et al. Effects of alloying elements (C, Mo) on hydrogen assisted cracking behaviors of A516-65 steels in sour environments [J]. Materials, 2020, 13(18): 4188.
- [8] DET N V. Offshore standard submarine pipeline systems: DNV-OS-F101[S]. Det Norske Veritas AS, 2013.
- [9] DOBMANN G, KÖNIG C, HOFMANN U, et al. Development and qualification of the Eddy-Current testing techniques “EC” and “EC+” in combination with Leeb-Hardness-Measurements for detection and verification of hardness spots on heavy steel plates [J]. Badania Nieniszczące i Diagnostyka, 2017 (3): 24-31.
- [10] YOUSSEF S, SCHUPPMANN M, BÄHR W, et al. Mikromagnetische detektion von härteinhomogenitäten an grobblechen [C]. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren and Messsysteme 2019, AMA Service GmbH, 2019: 385-390.
- [11] ANKENER W, BÖTTGER D, SMAGA M, et al. Micromagnetic and microstructural characterization of ferromagnetic steels in different heat treatment conditions [J]. Sensors, 2022, 22(12): 4428.
- [12] KIKUCHI H, ITO F, MURAKAMI T, et al. Relationship between magnetic properties and hardness and its effect on recovery and recrystallization in cold-rolled steel[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- [13] 程志远,宋凯,门平,等. 磁巴克豪森噪声重构磁滞参数的硬度测定方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 117-125.
CHENG ZH Y, SONG K, MEN P, et al. Hardness determination method based on reconstructed magnetic hysteresis parameters with magnetic Barkhausen noise[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 117-125.

- [14] MERCIER D, LESAGE J, DECOOPMAN X, et al. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decarburizing[J]. *Ndt & E International*, 2006, 39(8): 652-660.
- [15] KAHROBAEE S, NOROUZI SAHRAEI H, AHADI AKHLAGHI I. Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of heat treated H13 tool steel using magnetic hysteresis loop methodology[J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2019, 30(5): 303-315.
- [16] 潘立, 张士晶, 万刚, 等. 基于巴克豪森效应的铁磁性材料硬度检测[J]. *无损检测*, 2016, 38(12): 28-31.
- PAN L, ZHANG SH J, WAN G, et al. The detection of ferromagnetic material hardness based on barkhausen effect [J]. *Nondestructive Testing*, 2016, 38(12): 28-31.
- [17] JIAO J, CHANG Y, KOBAYASHI S, et al. Experimental evaluation and theoretical analysis of the mechanical properties of ferromagnetic materials using the magnetic hysteresis properties[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 554: 169310.
- [18] WOLTER B, GABI Y, CONRAD C. Nondestructive testing with 3MA—An overview of principles and applications[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(6): 1068.
- [19] 李满宏, 王经天, 吴玉, 等. 电涡流传感器性能优化关键技术[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(7): 233-243.
- LI M H, WANG J T, WU Y, et al. Key technologies for eddy current sensor performance optimization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(7): 233-243.

作者简介



邢智翔, 2014 年于内蒙古工业大学获得学士学位, 2017 年于北京工业大学获得硕士学位, 现为北京工业大学在读博士研究生, 主要研究方向为现代测控技术与方法。

E-mail: xingzhixiang@hotmail.com

Xing Zhixiang received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2014, and received his M. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2017. He is currently pursuing his Ph. D. degree at Beijing University of Technology.

His main research interests include modern control and measurement technology and method.



何存富, 1985 年于太原理工大学获得学士学位, 1990 年于华中科技大学获得硕士学位, 1996 年于清华大学获得博士学位, 现为北京工业大学教授, 主要研究方向为现代测控技术与方法、无损检测新技术。

E-mail: hecunfu@bjut.edu.cn

He Cunfu received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 1985, received his M. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1990, and received his Ph. D. degree from Tsinghua University in 1996. He is currently a professor at Beijing University of Technology. His main research interests include modern control & measurement technology and method, and new nondestructive test technologies.



刘秀成(通信作者), 2007 年于北京航空航天大学获得学士学位, 2013 年于北京工业大学获得博士学位, 现为北京工业大学教授, 主要研究方向为现代测控技术与方法、无损检测新技术。

E-mail: xiuchliu@bjut.edu.cn

Liu Xiucheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beihang University in 2007, and received his Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing University of Technology. His main research interests include modern control & measurement technology and method, and new nondestructive test technologies.



张健卫, 2000 年于北京科技大学获得学士学位, 2011 年于北京科技大学获得硕士学位, 现为钢研纳克检测技术股份有限公司正高级工程师, 主要研究方向为超声、电磁检测技术研究和自动化、智能化检测装备研发。

E-mail: zhangjianwei@ncschina.com

Zhang Jianwei received his B. Sc. degree from University of Science and Technology Beijing in 2000, and received his M. Sc. degree from University of Science and Technology Beijing in 2011. He is currently a senior engineer at NCS Testing Technology Co., Ltd. His main research interests include ultrasonic and electromagnetic testing technology and automatic and intelligent testing equipment.