

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2104228

多频涡流检测连续油管偏焊缝晶粒尺寸的试验研究*

周兆明¹ 杜铁成¹ 万 夫² 张 健² 尹武良³
(1. 西南石油大学机电工程学院 成都 610500; 2. 川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检查研究院 广汉 618300;
3. 曼彻斯特大学电子电气工程学院 曼彻斯特 M601QD)

摘 要:连续油管作业技术在钻修作业中广泛应用,技术核心是连续油管。偏焊缝的质量直接决定疲劳寿命,偏焊缝微观结构与母材是否一致,决定焊缝抗疲劳性能是否达到母材水平。运用多频涡流检测技术,通过检测 CT90、CT100 连续油管钢带偏焊缝区域与母材区域的电抗来区分母材区域与焊缝区域微观结构及晶粒尺寸是否一致,判断偏焊缝微观组织结构是否达到母材水平。根据其信号特征云图识别焊缝区与母材区,结果表明,连续油管偏焊缝区域与母材相比晶粒尺寸明显变大,并可以看出 CT90 的焊缝质量好于 CT100。根据焊缝区与母材区的微观结构不同对偏焊缝质量进行评价,这对连续油管生产过程质量控制及改进具有指导意义。

关键词: 偏焊缝;连续油管;晶粒尺寸;微观组织;多频涡流

中图分类号: TG115. 27;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 430. 1020

Experimental research on grain size of coiled tubing bias welding with multi-frequency eddy current testing

Zhou Zhaoming¹ Du Tiecheng¹ Wan Fu² Zhang Jian² Yin Wuliang³
(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. HSE Quality Surveillance & Inspection Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Guanghan 618300, China;
3. School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, Manchester M601QD, UK)

Abstract:Coiled tubing operation technology is widely used in drilling and repair operations, and the core of the technology is coiled tubing. The quality of the bias weld directly determines the fatigue life. Whether the microstructure of the bias weld is consistent with the base material determines whether the fatigue resistance of the weld reaches the level of the base material. This paper uses multi-frequency eddy current testing technology to detect the reactance of the CT90 and CT100 coiled tubing steel strips in the bias weld area and the base material area to distinguish the microstructure and grain size of the base material area and the weld area, and judge whether the microstructure of the bias weld reaches the level of the base material. According to the signal characteristic cloud map, the weld area and the base material area are identified. The results show that the grain size of the coiled tubing bias weld area is significantly larger than that of the base material. It can be seen that the weld quality of CT90 is better than CT100. According to the microstructure difference between the weld area and the base material area, the quality of the bias is evaluated, which has guiding significance for the quality control and improvement of the coiled tubing production process.

Keywords: bias weld; coiled tubing; grain size; microstructures; multi-frequency eddy current

0 引 言

连续油管技术是 21 世纪油气生产一项革命性技术,广泛应用于修井和钻井作业。连续油管是钢带通过等离子弧焊焊接而成,连接钢带的焊缝被称作为偏焊缝,偏焊缝在热处理后无法识别^[1]。偏焊缝由于晶粒尺寸相对母材较大,其相比于母材更容易受到腐蚀和硫化物应力开

裂。偏焊缝会降低连续油管整体的疲劳性能,因此连续油管的整体疲劳性能决定于偏焊缝的疲劳性能^[2]。目前新的焊接热处理工艺可使母材与焊缝晶粒尺寸一致,为避免焊缝处理不达标,需要进行无损检测其晶粒尺寸的变化。

传统的微观组织结构特性测量的方法有光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)、透射电镜和X-ray等。长期以来,微观组织评价就使用这些静态、离线和破坏性检测方法,虽然能够获得最终产品的组织性能参数,但是效率较低、随机性较大,并且不能在生产过程中对产品的组织性能进行在线检测和质量控制,所得结果只对测量部分是客观的^[3]。

国内外一些研究机构主要针对钢带微观组织的无损检测进行了一些研究。超声波和电磁技术等多种无损检测技术被用来表征由于高温或者热处理导致的钢带微观组织变化和材料机械特性改变,这些技术都存在优缺点^[4]。文献[5-8]利用超声测量碳钢相组分及晶粒尺寸的变化,发现超声波的声速和衰减法能提供微观组织的信息。但超声检测较难实现在线检测,并且需要耦合。在电磁技术方面,大量学者研究发现钢带微观组织结构与材料电磁特性的存在关系,剩磁、矫顽力、相对磁导率这些磁性参数与材料的微观结构密切相关,材料的晶粒大小、相分布等均会影响材料的磁性能^[9]。

Wang等^[10]基于裂纹参数与多频ECT信号特征之间的关系,提出了一种基于域分解的参数多输出支持向量回归算法。该算法依次实现了对裂纹多个参数的定量评估。Xu等^[11]提出了一种多频涡流测试中新颖的频率特征(电感的实部达到指定值的频率),来对X70焊接横截面进行成像。从该特征获得的成像结果反映了样品的电磁特性(尤其是磁导率)。结果表明这种新的成像方法对微结构的变化具有很高的灵敏度,并且可以调节频率范围以适应特定仪器的能力。Yoshimura等^[12]研究了厚钢板背面缺陷的涡流检测方法,基于实验和有限元电磁模拟,评估了检测10 mm厚钢板背面狭缝缺陷的最佳频率。结果表明,当狭缝高度超过6 mm时,检测缺陷的最佳频率约为8~10 Hz。同样,在仿真中,当频率为8~10 Hz时,信号最大化,验证了实验结果。在此基础上,提出了一种利用多频数据来强调深层缺陷的方法。Yusa等^[13]从涡流测试的角度评估了奥氏体不锈钢焊缝的电磁特性。采用两种焊接金属和几种焊接条件来讨论一般性。使用3种不同类型的涡流探头对样品进行涡流检测。结果证实,焊缝会产生较大的噪音。通过有限元模拟对信号进行分析后发现,从涡流测试的角度来看,焊缝的磁性能不可忽略。文献[14-20]联合开展研究多频电磁传感器测定铁氧体金属板的磁导率与电导率,提出了基于多频电磁传感器反演任意磁导率、电导率、厚度和发

射距离的方法;同时,Zhou等^[21]研究了传感器的提高对钢板电磁性能的影响,提出了一种新的磁导率测量方法。该联合课题组研究发现,在一定的提高条件下,消除电导率对电感的影响后,可以准确地估算相对磁导率;相对磁导率对微观组织结构改变相比电阻率更为敏感;多频涡流检测线圈可以测量相对磁导率与微观组织的关系。陈宸等^[22]针对涡流检测的边缘效应提出了一种基于简单线性代聚类(SLIC)超像素算法和密度聚类算法的涡流C扫描图像分割方法,实验表明,该方法能够有效地实现检测样品表面缺陷的可视化、量化分析,与传统方法相比准确性更高。

目前,多频涡流检测方法主要用于检测钢带的微观组织,对于焊缝的微观组织参数进行无损评估相对于钢带难度大大增加,所以针对焊缝微观组织进行无损检测的试验研究很少。本文使用多频涡流检测技术非接触、实时无损的评价焊缝与母材微观组织的区别,定量获得焊缝与母材的微观组织参数的变化量。这对连续油管带偏焊缝的热处理工艺评价及发展更高强度连续油管具有重大指导意义,同时可替代目前耗费大量试样和试验时间的有损评价方法,简化偏焊缝质量的评估方法,减少连续油管作业中的事故发生率,加深对微观组织参数与无损检测信号关系的理解。

1 检测原理与试验方法

1.1 检测原理

在焊接过程中,由于高温影响,焊缝区域晶粒尺寸变大,晶粒尺寸的变化会影响到材料的磁性能,即焊缝区域的相对磁导率比母材大。焊接对金属材料的电阻几乎无影响,微观组织的相变主要体现在电抗的变化上。而电抗的变化在实验中主要表现为相对磁导率的变化,本实验通过检测由相对磁导率改变引起的线圈电感变化来检测金属的相变。图1所示为检测原理示意图,母材的相对磁导率为 μ ,焊缝的相对磁导率为 μ' 。

焊缝处由于微观组织相组分改变,焊缝区晶粒尺寸变大,导致相对磁导率增大,即 $\mu' < \mu$,产生磁异常。磁异常产生的原因可以简单描述为:焊缝对磁力线产生吸引作用,使得焊缝靠近母材边界处的磁力线密度变小,也就是母材表面的磁感应强度与无焊缝时相比变小,此时焊缝位置的磁感应强度产生一个向外突起的异常。

由于焊缝的相对磁导率与母材不同,所以涡流也会发生相应的变化,产生的感应磁场对线圈的影响也发生变化。本文通过测量传感线圈中电感的变化来检测出焊缝区域与母材区域。

在试样中产生的电感差异为:

$$\Delta L(\omega) = L(\omega) - L_A(\omega) \quad (1)$$

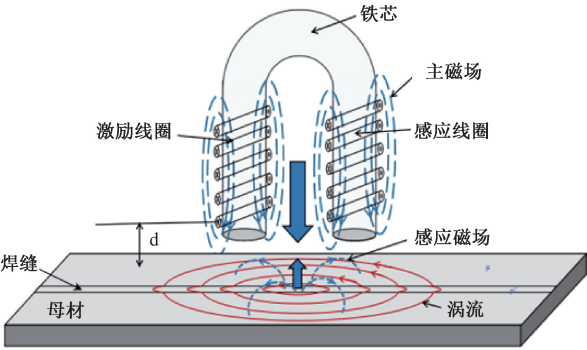


图 1 检测原理
Fig. 1 Detection principle

式中： $L(\omega)$ 是试样上方的线圈电感； $L_A(\omega)$ 是空气中的电感。

Dodd 和 Deeds 提供了计算样品存在时电感差异的解决方案,公式如下:

$$\Delta L(\omega) = K \int_0^\infty \frac{P^2(\alpha)}{\alpha^6} A(\alpha) \Phi(\alpha) d\alpha \tag{2}$$

其中, $\Delta L(\omega)$ 是由于导电板的存在而导致的线圈电感变化。

$$K = \frac{\pi \mu_0 N^2}{(l_1 - l_2)^2 (r_1 - r_2)^2} \tag{3}$$

$$P(\alpha) = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} x J_1(x) dx \tag{4}$$

$$A(\alpha) = (e^{-\alpha l_1} - e^{-\alpha l_2})^2 \tag{5}$$

$$\Phi(\alpha) = \frac{(\alpha_1 + \mu_r \alpha)(\alpha_1 - \mu_r \alpha) - (\alpha_1 + \mu_r \alpha)(\alpha_1 - \mu_r \alpha) e^{2\alpha_1 c}}{-(\alpha_1 - \mu_r \alpha)(\alpha_1 - \mu_r \alpha) + (\alpha_1 + \mu_r \alpha)(\alpha_1 + \mu_r \alpha) e^{2\alpha_1 c}} \tag{6}$$

$$\alpha_1 = \sqrt{\alpha^2 + j\omega\sigma\mu} \tag{7}$$

式中: K 是积分变量; ω 是激励信号的角频率。样品的相对磁导率和电导率以 μ_r 和 σ 提供。 N 表示线圈的匝数。 r_1 和 r_2 分别代表线圈的内半径和外半径, l_1 和 l_2 表示线圈底部和顶部的高度, c 是板的厚度。 μ_0 是空气中的磁导率, $J_1(x)$ 是一阶贝塞尔函数。

式(6)中的 $\Phi(\alpha)$ 随 α 变化比式(2)中的其他分量慢。当 $\Phi(\alpha)$ 是最大值时,特征空间频率 α_0 ,被定义为线圈的最小尺寸的倒数。因此,可以简化上面的公式。

如果在积分之外的 α_0 处取 $\Phi(\alpha)$,则式(2)可以简化为:

$$\Delta L(\omega) = \Phi(\alpha_0) \Delta L_0 \tag{8}$$

其中, $\Delta L_0 = K \int \frac{P^2(\alpha)}{\alpha^6} A(\alpha) d\alpha$ 可以被视为任意高频率极限的电感, $\Delta L_{\omega=\infty} = -\Delta L_0$ 。

与试样的厚度 c 相比,趋肤深度较小,因为假设厚度

为无穷大。式(6)可以简化为:

$$\Phi(\alpha_0) = \frac{\mu_r \alpha_0 - \sqrt{\alpha_0^2 + j\mu_r \mu_0 \sigma \omega}}{\mu_r \alpha_0 + \sqrt{\alpha_0^2 + j\mu_r \mu_0 \sigma \omega}} \tag{9}$$

对于磁性试样,假设相对磁导率 $\mu_r \gg 1$,式(9)可以进一步简化为:

$$\Phi(\alpha_0) = \frac{1 - \sqrt{\frac{j\mu_0 \sigma \omega}{\mu_r \alpha_0^2}}}{1 + \sqrt{\frac{j\mu_0 \sigma \omega}{\mu_r \alpha_0^2}}} \tag{10}$$

假设 $x = \frac{\mu_0 \sigma \omega}{\mu_r \alpha_0^2}$,式(10)可以表示为:

$$\Phi(\alpha_0) = \frac{1 - \sqrt{jx}}{1 + \sqrt{jx}} \tag{11}$$

然后 $\frac{1 - \sqrt{jx}}{1 + \sqrt{jx}} \frac{1 - x^2}{1 + x^2}$ 仅在 $x = 1$,即 $\frac{\mu_0 \sigma \omega}{\mu_r \alpha_0^2} = 1$ 时的实部

为 0,等式(10)的实部等于 0。

因此,在实际电感等于 0 的情况下,激励频率和相对磁导率之间的关系如下所示:

$$\omega_0 = \frac{\mu_r \alpha_0^2}{\mu_0 \sigma} \tag{12}$$

由式(12)可知,在相对磁导率明显大于 1 的情况下,激励频率与相对磁导率成线性关系。而电导率的变化对传感器的输出影响非常小,在后续分析中可忽略不计^[14]。因此通过电感的变化可以计算出相对磁导率的变化。

本文使用多频涡流传感器检测连续油管偏焊缝质量,在检测过程中,被检对象中影响涡流传感器输出信号的因素很多,诸如磁导率、电导率、外形尺寸和缺陷等,各种因素的影响程度各异。与单频涡流检测相比,使用多频涡流检测可实现涡流检测过程中的干扰抑制。

1.2 试验材料

连续油管制作过程中需要经过钢带斜角焊接、焊缝热处理、整管热处理等步骤,这些步骤会导致钢的微观组织发生改变。本文中选取 JASON 公司连续油管作为试验对象,经过工厂焊接及热处理后研究其微观组织的改变。选择规格等级为 CT90 与 CT100 两种典型钢级的连续油管,连续油管的尺寸为 $\Phi 50.8 \times 4.3 \text{ mm}$,表 1 为 CT90 连续油管和 CT100 连续油管的化学成分。

表 1 CT90 和 CT100 连续油管化学成分
Table 1 Chemical composition of CT90 and

CT100 coiled tubing (%)						
钢级	C	Si	Mn	P	S	Al
CT90	0.10	0.35	1	0.015	0.005	0.003
CT100	0.17	0.35	0.40	0.045	0.045	0.02

图 2 所示为连续油管偏焊缝示意图。钢带经过焊接后,会进行正火后高温回火的热处理,热处理可以改善焊接接头的组织和性能、消除焊接残余应力、使焊接接头中的扩散氢逸出。高强度钢对焊接要求更高,焊缝热处理后,表面无法区分母材与偏焊缝,目前也没有在线检测偏焊缝微观组织结构的技术。图 3 所示为沿着偏焊缝走向进行切割的连续油管试验样品,实验样品均为长 8 cm,宽 4 cm 的钢带,*a* 为 CT90 钢带的焊接试样,*b* 为 CT100 钢带的焊接试样,2 个实验样品使用相同焊接技术及热处理工艺且中央均存在偏焊缝。实验样品的物理参数如表 2 所示。



图 2 偏焊缝
Fig. 2 Bias weld



(a) CT90焊接试样
(a) CT90 welding sample



(b) CT100焊接试样
(b) CT100 welding sample

图 3 试样样品
Fig. 3 Samples

表 2 实验材料的物理参数

Table 2 Physical parameters of experimental materials

钢级	电导率/($\text{MS}\cdot\text{m}^{-1}$)	磁导率
CT90	8.55	154
CT100	7.98	146

实际微观组织的图像处理如图 4 所示,对比可知,连续油管母材的微观组织与焊缝的微观组织有明显区别,图 4(a)为电子显微镜图,可以明确看出连续油管母材区域的微观组织为等轴铁素体和贝氏体晶粒,焊缝区的微观组织为粗晶奥氏体晶粒,图 4(c)为晶粒上色图,可以明确看出,母材区的晶粒较小,铁素体和贝氏体晶粒交叉分布;焊缝区的晶粒尺寸更大,焊缝区与母材区出现差别的原因是:在焊接过程中,由于焊接时升温速度快,熔合区温度可达 1 300 ℃,金属处于过热状态,从而使焊缝区奥氏体晶粒急剧长大,并且温度越高奥氏体晶粒长大速度越快,形成粗大的奥氏体晶粒。所以焊缝区的晶粒尺寸明显大于母材区^[23]。

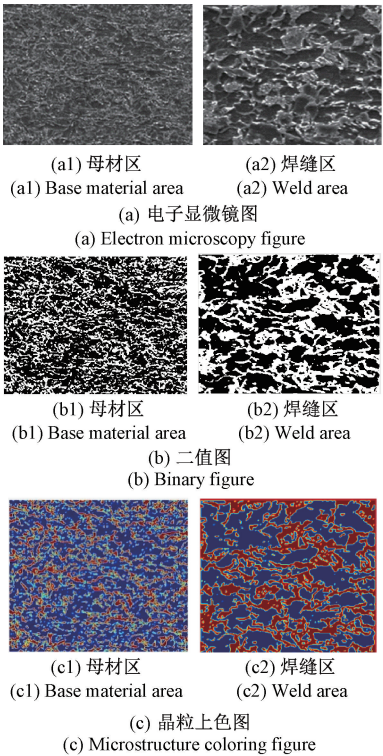


图 4 实际微观组织图像处理

Fig. 4 Image processing of actual microstructure

1.3 试验方法

本文通过涡流传感器检测焊缝与母材中的相对磁导率的差异来反映焊缝与母材微观结构的变化。这种类型的无损检测方法具有非接触,响应快速,设置简单,成本低廉的优点。涡流传感器由励磁线圈和传感线圈组成。在本文实验中使用 U 形涡流传感器进行检测试验。U 形传感器朝向目标引导磁场,有助于使磁通量更集中于目标物体并增加响应信号的强度,传感线圈可使有效信号最大化,同时有助于减少由环境磁场引起的共模干扰^[24]。

本文使用由两个铁氧体磁芯线圈组成的 U 形涡流传

感器。传感器探头参数如表 2 所示。在导电材料的存在下,涡流产生的次级磁场与发射线圈的初始磁场相反,从而降低了互感。由于磁性材料的存在,磁路被磁性材料吸引,增强了线圈的耦合作用,从而增加了互感。该传感器具有 70.3 μH 互感和 631 kHz 谐振频率。

表 3 传感器探头参数
Table 3 Sensor probe parameters

参数	参数值
内径/mm(激励线圈/感应线圈)	0.75/0.75
外径/mm(激励线圈/感应线圈)	1.25/1.5
两线圈间距/mm	3.5
线圈高度/mm	3
铁氧体磁芯直径/mm	1.5
铁氧体磁芯磁导率	2 300
线圈匝数(激励线圈/感应线圈)	160/200

图 5 所示为检测系统,检测系统由 PC、电磁仪器、传感器和扫描台组成。本实验中使用工作频率在 5 ~ 200 kHz 的检测仪器,工作时以 100 k/s 的速度进行数字解调,并且通过以太网与 PC 进行通信。

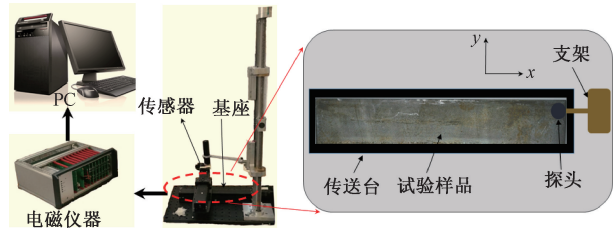


图 5 检测系统
Fig. 5 Detection system

电磁仪器的系统原理如图 6 所示。发射线圈由 FPGA 板产生的交流电激励,然后,电流通过数字模拟转换器(DAC)进行转换,再进行总增益为 0.8 的放大。感应线圈的信号进行增益为 205.8 的放大,然后,信号再被增益为 0.32 的 PGA 放大,放大完成后送入模拟数字转换器(ADC),再将解调后的信号通过以太网接口传输给 PC。本仪器的驱动电流为 48 mA,信噪比可以达到 96 dB。

本文将多个频率的正弦信号通过加法运算合成,驱动涡流传感器;再将传感器输出信号通过带通滤波器分离,信号检测电路进行参数提取;然后对参数进行混合运算,实现干扰抑制。运用多频涡流检测技术降低边缘效应和探头抖动的影响,提高了焊缝检测的可靠性。

在扫描阶段,由两个位于试验板基座上的步进电机驱动 X 轴和 Y 轴。激励线圈和传感线圈与 X 轴平行,传感器在 X 轴上扫描焊缝试样;在 Y 轴由上向下移动,然后

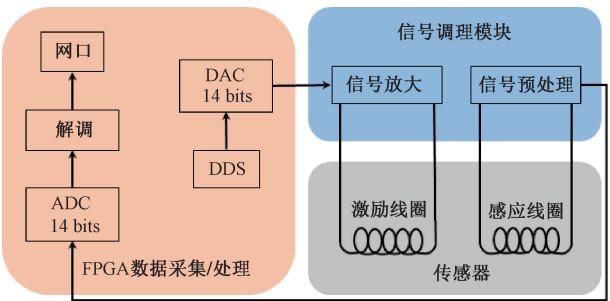


图 6 电磁仪器系统原理
Fig. 6 Schematic of electromagnetic instrument system

向后返回,同时在这个方向上光栅化。扫描速度为 100 mm/s,位移长度为 200 mm,分辨率为 0.2 μm 。在扫描过程中,焊接试样被附着在平台上,并在工作台的工作空间中移动。电磁传感器安装在高度可调的测量杆上,测量精度为 8 μm 。扫描区域和路径由 PC 上的控制器控制。X 轴和 Y 轴的分辨率分别为 0.019 和 0.5 mm。

2 结果和讨论

图 7 所示为 CT90 连续油管焊缝试样的扫描检测结果。本文实验通过获得电抗的变化量来得到试样微观组织的变化,通过分析此电磁检测云图,可以发现偏焊缝与母材的微观组织会产生不同的信号,母材区的颜色比焊缝区的颜色更浅,说明母材区的电抗小于焊缝区域。图 7 中,焊缝区域存在多种不同的颜色,说明焊缝区的相组分存在不同。同时融合区的颜色比热影响区更深,这是由于融合区到热影响区的晶粒尺寸逐渐变小,可知晶粒尺寸更大的微观组织的电抗更大。在焊缝区,由于边缘效应的影响,焊接开始区域的相对磁导率较母材有明显增加,焊接开始区域的微观组织与母材有明显区别;焊接中间区域的相对磁导率与母材相比,仍有较大区别,但比焊接开始区域明显改善,可知焊接中间区域的疲劳寿命高于焊接开始区域,但疲劳寿命仍与母材有较大差距。

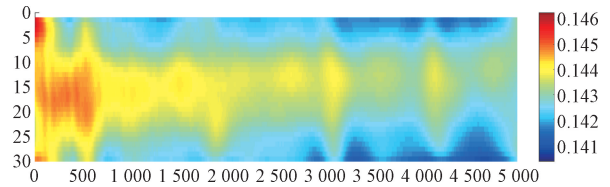


图 7 CT90 焊接及热处理工艺试样检测信号成像云图
Fig. 7 Imaging cloud image of test signal of CT90 welding and heat treatment process sample

图 8 所示为 CT100 连续油管焊缝试样的扫描检测结果。针对此电磁检测扫描成像云图,云图总体情况与

图7类似,但图8的偏焊缝更大,颜色更深。这代表CT90偏焊缝比CT100偏焊缝的电抗更小,更加接近母材的微观组织,疲劳寿命更加的长。

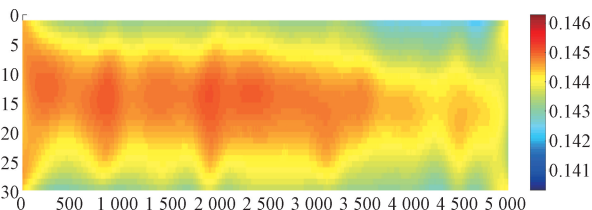


图8 CT100焊接及热处理工艺试样检测信号成像云图

Fig.8 Imaging cloud image of CT100 welding and heat treatment process sample detection signal

通过扫描结果图可以看出,不同钢级的连续油管试样所生成的二维云图存在不同,并且可以直观的区分出母材区域与焊缝区域。本方法可以识别不同钢级的连续油管焊缝,通过母材与焊缝的微观结构的差别程度,判断连续油管焊接质量的好坏,从而评估连续油管的疲劳寿命。

因为两个试验样品的母材与焊缝区的对比图的趋势一致,本文只对图7进行分析,如图9所示。由于边缘效应的影响,焊接开始区域的电抗明显较大,图中所有曲线的焊接起始区域电抗均大于焊接后续区域的电抗。同时,更接近焊接中心的曲线的电抗明显高于远离焊接中心的曲线的电抗。可以证实焊缝区的电抗大于母材区的电抗,焊缝的微观组织结构与母材的微观组织结构有明显差距。

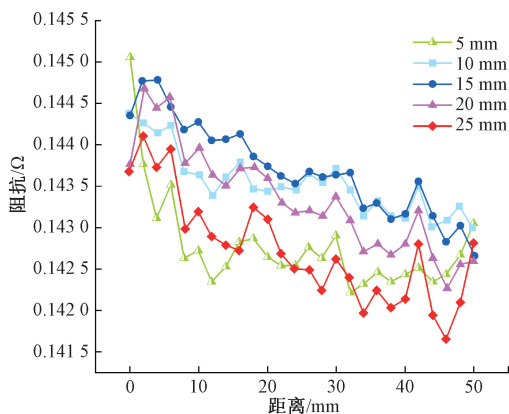


图9 CT90焊接及热处理工艺试样母材、焊缝区对比

Fig.9 Comparison of base material and weld zone of CT90 welding and heat treatment process samples

图10所示为两个试验样品的对比。从图10可以看出,CT100连续油管焊缝试样的电抗高于CT90连续油管焊缝试样的电抗,说明CT90焊缝区晶粒尺寸与CT100焊缝区晶粒尺寸相比更小,焊缝质量更好。可以看出随

着连续油管钢级的提升,可焊性越来越差。证明在使用同种焊接技术及热处理工艺情况下,CT90连续油管的疲劳寿命高于CT100。

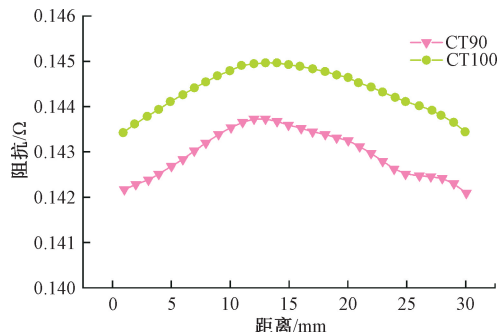


图10 试验样本对比

Fig.10 Comparison of test samples

3 结论

本文通过观察连续油管钢带微观组织引起材料的磁特性的变化,进而开展电磁检测研究连续油管偏焊缝晶粒尺寸及焊缝质量。通过文中所建立的检测方法,对比CT90、CT100连续油管偏焊缝试样。利用多频涡流检测方法可以检测出偏焊缝部分微小的电抗变化,从而得出不同钢级的焊缝与母材之间的晶粒尺寸的差别。并通过生成的二维云图可以直观的区分出母材区域与焊缝区域,识别二者之间微观结构的差别程度,同时可以区分出不同钢级连续油管的焊缝。利用该方法可以判断出不同钢级的焊接质量以及可焊性的差异,并且可以实时在线评价连续油管偏焊缝质量。

参考文献

- [1] ZHOU Z. Improvement and determination of the influencing factors of coiled tubing fatigue life prediction[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(9):1-9.
- [2] VALDEZ M, MORALES C, ROLOVIC R, et al. The development of high-strength coiled tubing with improved fatigue performance and H₂S resistance [C]. SPE/ICOTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition, 2015.
- [3] DAVIS C L, STRAGNWOOD M, PEYTON A J. Overview of non-destructive evaluation of steel microstructures using multifrequency electromagnetic sensors[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2011, 38(7): 510-517.
- [4] TOOZANDEHJANI M, MATORI K A, OSTOVAN F, et al. On the correlation between microstructural evolution and ultrasonic properties: A review [J].

- Journal of Materials Science, 2015, 50(7):2643-2665.
- [5] MUTLU I, OKTAY E, EKINIC S. Characterization of microstructure of H13 tool steel using ultrasonic measurements [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2013, 49(2):112-120.
 - [6] FREITAS V L D A, ALBUPUERQUE V H C D, SILVA E D M, et al. Nondestructive characterization of microstructures and determination of elastic properties in plain carbon steel using ultrasonic measurements [J]. Materials Science and Engineering, 2010, 527(16-17): 4431-4437.
 - [7] GUO B, ZHANG Z, LI R. Ultrasonic and eddy current non-destructive evaluation for property assessment of 6063 aluminum alloy [J]. NDT & E International, 2018, 93 (jana):34-39.
 - [8] JI H, WANG J, LI M. Evolution of the bulk microstructure in 1100 aluminum builds fabricated by ultrasonic metal welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(2):175-182.
 - [9] 张志东. 磁性材料的磁结构、磁畴结构和拓扑磁结构[J]. 物理学报, 2015, 64(6):67503-067503.
ZHANG ZH D. Magnetic structure, domain structure and topological magnetic structure of magnetic materials [J]. Journal of Physics, 2015, 64(6): 67503-067503.
 - [10] WANG L, CHEN Z. Sizing of natural crack using multi-output support vector regression method from multi-frequency eddy current testing signals [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64(1-4): 721-728.
 - [11] XU H Y, LU M Y, AVILA J R S, et al. Imaging a weld cross-section using a novel frequency feature in multi-frequency eddy current testing [J]. Insight, 2019, 61(12): 738-43.
 - [12] YOSHIMURA W, SASAYAMA T, ENPUKU K. Optimal frequency of low-frequency eddy-current testing for detecting defects on the backside of thick steel plates [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7):1-5.
 - [13] YUSA N, HASHIZUME H, UCHIMOTO T, et al. Evaluation of the electromagnetic characteristics of type 316L stainless steel welds from the viewpoint of eddy current inspections [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2014, 51(1): 127-132.
 - [14] YIN W, PEYTON A J, STRANGWOOD M, et al. Exploring the relationship between ferrite fraction and morphology and the electromagnetic properties of steel[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(16):6854-6861.
 - [15] YIN W, HAO X J, PEYTON A J, et al. Measurement of permeability and ferrite/austenite phase fraction using a multi-frequency electromagnetic sensor [J]. NDT & E International, 2009, 42(1):64-68.
 - [16] YIN W, MENG X, LU M, et al. Permeability invariance phenomenon and measurement of electrical conductivity for ferrite metallic plates [J]. Insight Nondestructive Testing & Condition Monitoring, 2019, 61(8):472-479.
 - [17] LU M, XU H, ZHU W, et al. Conductivity lift-off invariance and measurement of permeability for ferrite metallic plates [J]. NDT & E International, 2018, 95: 36-44.
 - [18] LU M, XIE Y, ZHU W, et al. Determination of the magnetic permeability, electrical conductivity, and thickness of ferrite metallic plates using a multi-frequency electromagnetic sensing system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, DOI: 10.1109/TII.2018.2885406.
 - [19] LU M, HUANG R, YIN W, et al. Measurement of permeability for ferrous metallic plates using a novel lift-off compensation technique on phase signature [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(17): 7440-7446.
 - [20] AVILA J R S, HOW K Y, LU M, et al. A novel dual modality sensor with sensitivities to permittivity, conductivity, and permeability [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, DOI:10.1109/JSEN.2017.2767380.
 - [21] ZHOU L, LIU J, HAO X J, et al. Quantification of the phase fraction in steel using an electromagnetic sensor [J]. NDT & E International, 2014, 67:31-35.
 - [22] 陈宸, 叶波, 邓为权, 等. 基于SLIC超像素算法和密度聚类的TA2钛板表面缺陷定量评估研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(11):128-135.
CHEN CH, YE B, DENG W Q, et al. Quantitative evaluation of surface defects in TA2 titanium plate based on SLIC superpixel algorithm and DBSCAN [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(11): 128-135.
 - [23] 张敏, 赵鹏康, 王文武, 等. 连续油管TIG焊接热影响区组织及性能热模拟分析 [J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(1):31-34.
ZHANG M, ZHAO P K, WANG W W, et al. Thermal simulation analysis of microstructure and performance of coiled tubing TIG welding heat affected zone [J]. Weapon Material Science and Engineering, 2011, 34(1):31-34.
 - [24] GE J, LI W, CHEN G, 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.

作者简介



周兆明,2016 年于西南石油大学获得博士学位,现为西南石油大学副教授,主要研究方向为油气设施健康安全监/检测、油气计量、油气生产安全工程与测量。
E-mail:Zhouzhaom@126.com

Zhou Zhaoming received his Ph. D. degree from Southwest Petroleum University in 2016. He is currently an associate professor at Southwest Petroleum University. His main research interests include health and safety monitoring/inspection of oil and gas facilities; oil and gas

measurement; and oil and gas production safety engineering and measurement.



杜铁成,2019 年于西南石油大学获得学士学位,现为西南石油大学研究生,主要研究方向为油气设施健康安全监/检测。
E-mail:804366800@qq.com

Du Tiecheng received his B. Sc. degree from Southwest Petroleum University in 2019. He is currently a M. Sc. candidate at Southwest Petroleum University. His main research interest includes health and safety monitoring/inspection of oil and gas facilities.