

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905720

基于方向调制原理的涡流热成像漆层下裂纹检测技术*

王晓娜, 胡 杨, 侯德鑫, 叶树亮

(中国计量大学 工业与商贸计量技术研究所 杭州 310018)

摘 要:针对传统技术检测漆层下金属表面裂纹信噪比低的问题,提出了一种基于方向调制原理的涡流热成像检测技术。首先介绍了方向调制的原理,通过推导方向调制的数学模型,从理论上证明了方法的可行性,根据理论公式与实际情况选择了调制频率,根据该方法搭建了实验平台;分析了涡流无法完整旋转的问题,并提出了一种基于驱动 PWM 驱动信号翻转的改进方法;针对加热可能导致的谐振频率漂移问题,提出了一种双通道频率跟踪策略;最后对不同漆层厚度下 45#钢的人工裂纹与 0.517 mm 漆层厚度下 20#钢磨平焊缝裂纹进行检测并与磁粉法的结果对比。实验结果表明:方向调制方法可检测出 0.902 mm 漆层下的人工裂纹与 0.517 mm 漆层下的模拟自然裂纹;对比 0.486 mm 漆层下人工裂纹与 0.451 mm 漆层下模拟自然裂纹的磁粉法检测结果,方向调制方法有效提升了漆层下裂纹的检测能力。

关键词: 涡流热成像;方向调制;旋转涡流;漆层;裂纹检测

中图分类号: TG115.28 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Eddy current thermography for under paint coating crack detection based on directional modulation

Wang Xiaona, Hu Yang, Hou Dexin, Ye Shuliang

(Institute of Industry and Trade Measurement Technique, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The metal surface crack under paint coating has the problem of low signal-noise ratio using conventional detection methods. To address this issue, an eddy current thermography detection technique based on the directional modulation principle is proposed. Firstly, the principle of direction modulation is introduced. By deducing the mathematical model, the feasibility of the method is proved. The modulation frequency is selected according to the theoretical formula. According to the directional modulation, the experimental platform is established. Then, the reason that the eddy current cannot rotate in full angle is analyzed. One kind of improved method based on PWM drive signals flipping is proposed. To solve the problem of resonance frequency drift caused by heating, a two-channel frequency tracking strategy is proposed. Finally, the artificial cracks of 45# steel under different paint coating thicknesses and the cracks of 20# steel weld under 0.517 mm paint coating thickness are detected and compared with the results of magnetic powder detection. Detection results show that the direction modulation method is competent to detect the artificial cracks under 0.902 mm paint coating and the simulated natural cracks under 0.517 mm paint coating. Compared with the magnetic particle detection results of the artificial cracks under 0.486 mm paint coating and the simulated natural crack under 0.451 mm paint coating, the directional modulation method effectively improves the detection ability of under paint coating cracks.

Keywords: eddy current thermography; directional modulation; rotating eddy current; paint coating; crack detection

0 引 言

域^[1-3]。金属在加工过程中常会出现开裂、崩坏等情况,从而造成严重的后果,因此对金属裂纹的检测意义重大。

实际应用中金属表面往往涂有防腐漆,对于防腐漆层下的缺陷,主要的无损检测方法有磁粉检测、超声检测

金属材料广泛应用于交通工程、航空航天等领

等,前人对这些方法对漆层下裂纹检测的应用做出了一定研究。中铁宝桥集团的研究人员运用磁粉检测法在不同漆层厚度下的检测了低碳钢的表面裂纹^[4],并检测出了 0.3 mm 漆层厚度下的裂纹,而超过 0.3 mm 厚度时裂纹变得难以检测;航天材料及工艺研究所的研究人员采用超声检测与显微技术结合的方法,检测出了 0.5 mm 涂层下的脱粘缺陷^[5];大连理工大学的研究团队采用有限元仿真的方法建立了涂层下温度场的数值模型并检测了 50 μm 涂层厚度下的缺陷^[6]。但是这些检测方法具有需要耦合剂、检测范围小等缺点。涡流热成像是结合涡流检测^[7]与主动热成像^[8]的检测方法,具有非接触、结果直观、可分离干扰、可进行数值仿真、检测范围广等优点^[9-12],因此涡流热成像在漆层下裂纹检测具有应用前景。

由于金属导热率远大于漆层,故大部分热量信号会向金属内部传递,少量向漆层传递的热量也会在传递过程中混杂大量干扰,因此传统涡流热成像技术在检测漆层下裂纹时存在信噪比低的问题。巴斯大学与纽卡斯尔大学^[13]的研究团队通过脉冲涡流热成像方法检测了表面涂有金属薄膜保护层下涡轮叶片上长约 4 mm 的缺陷,并对 0~800 μm 不同漆层情况下的信噪比进行了分析,并得到了检测信噪比随漆层厚度增加而减小的结论;Liu 等^[11]通过有限元仿真软件对脉冲涡流热成像检测漆层下裂纹的情况进行了仿真,仿真结果表明通过漆层表面温度分布能够识别出 0.24 mm 以下的裂纹,但温差不明显;国防科技大学的研究团队^[14]运用脉冲涡流热成像结合独立成分分析(independent component analysis, ICA)、主成分分析(principal component analysis, PCA)的方法,在表面覆有约 100 μm 漆层的情况下检测了 S275 钢的气泡、腐蚀缺陷;Schönberger 等^[15-16]应用涡流脉冲相位热成像(eddy current pulse pulsed thermography, ECPPT)的方法检测了镀锌钢板表面下的腐蚀缺陷;Yang 等^[16]运用 ECPPT 方法检测了约 100 μm 漆层下的 S275 钢的自然腐蚀缺陷;西南交通大学的研究团队^[17]对漆层表面温度情况分布进行了有限元仿真并得出了表面温度的理论公式,并对 175 μm 漆层下的自然裂纹进行了检测。以上方法没有从根源上解决漆层下检测信噪比低的问题。唐波等^[18]提出了增加电源功率来提高信噪比的方法。另外,洪婷婷等^[19]提出了一种拍频调制的方向调制技术,可检出 0.8 mm 漆层下的人工凹槽裂纹。本文提出一种新的方向调制涡流热成像技术,提高漆层下裂纹检测的能力。

1 检测原理

1.1 方向调制涡流热成像检测原理

交变磁场在金属试样表面会产生感生涡流。而裂纹

将干扰涡流流动,迫使涡流在裂纹底部与两端聚集。裂纹周围将产生明显的温升,通过热像仪提取温升数据就能区分出裂纹与非裂纹区域。

方向调制利用了裂纹走向对涡流方向的敏感性^[20]:当涡流方向垂直于裂纹走向时,裂纹对涡流的阻碍面积最大,其温升较高;当涡流方向平行于裂纹走向时,裂纹对涡流的阻碍面积最小,其温升较小。因此当涡流方向发生旋转时,裂纹处温升将发生周期性变化而非裂纹处将不会有周期性变化。根据这种差异,可以将周期性变化的热信号提取出来。

根据此原理,设计的方向调制涡流热成像系统结构如图 1 所示。根据磁场理论,当两路相位差 90° 的正弦电流通入两组互相垂直的线圈时,线圈在空间中产生的合磁场会产生旋转效果^[21-22],据此原理制备两相探头。该探头由磁环、4 根磁柱 A1、A2、B1、B2 组成,两组线圈分别缠绕在 4 根磁柱上,A1、A2 为探头的 A 相,B1、B2 为探头的 B 相。当幅值经低频信号调制且相差 90° 的两组正弦电流分别通入两组线圈时,试样上将感生出按低频调制信号频率旋转的涡流。

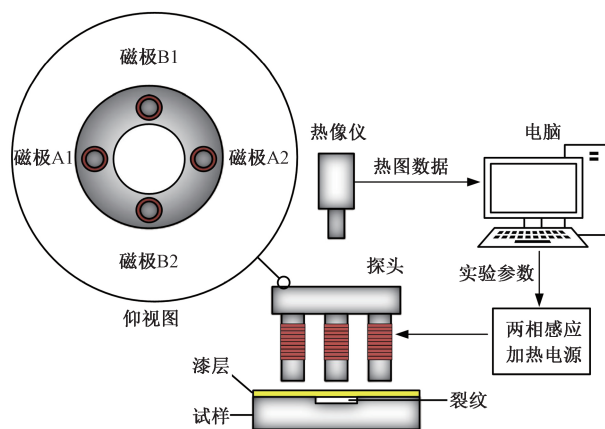


图 1 方向调制涡流热成像系统结构

Fig.1 Directional modulation eddy current thermography system structure

1.2 数学模型

为描述涡流分布情况,以磁极 A1、A2 的连线为 x 轴,磁极 B1、B2 连线为 y 轴。在两组线圈中电流幅值较为一致的前提下,经调制后的涡流的分布如为式(1)所示。

$$\begin{cases} A_x = A_0 \sin(\omega_0 t) \sin(\omega_m t) \\ A_y = A_0 \sin(\omega_0 t) \sin\left(\omega_m t - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_x 、 A_y 分别为试样在 x 、 y 轴方向上产生的涡流; A_0 为涡流幅值; t 为加热时间; ω_0 为谐振角频率; ω_m 为调制角频率。

两轴所产生的涡流可视为矢量,合成后涡流的方向随时间变化的关系可表示为:

$$\theta = \arctan \frac{A_y}{A_x} = \omega_m t - \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

式中: θ 为合成后的涡流方向。可见,涡流会以调制角频率 ω_m 进行旋转,进而会对试样进行周期性加热。

根据焦耳定律,在不考虑损耗的情况下,涡流焦耳热密度可表示为:

$$Q = \frac{1}{\sigma} |E(t)| \quad (3)$$

式中: Q 为焦耳热密度; σ 为试样电导率; E 为涡流矢量。而涡流焦耳热可视为两个涡流矢量的焦耳热之和,故结合式(2)、(3)可得:

$$Q = \frac{1}{2\sigma} A_0^2 (1 - \cos 2\omega_0 t) \quad (4)$$

1.3 裂纹处与无裂纹处焦耳热密度分析

对于无裂纹处,在对式(4)按一个激励周期进行积分之后,可得:

$$\int_0^{\pi/\omega_0} A_0^2 (1 - \cos 2\omega_0 t) / 2\sigma \cdot dt = A_0^2 \pi / 2\sigma \quad (5)$$

由此可见,在一个激励周期之内,平均焦耳热不随时间变化,故无裂纹区域没有周期性温度波动。

对于有裂纹处,电阻率 σ 随着涡流旋转而改变,因此。有裂纹处的热量情况无法通过式(5)来表示。但根据式(3),仍能推测出裂纹处焦耳热密度会出现周期性变化,表现为裂纹处升温会出现周期性变化,据此可将裂纹与非裂纹区域区分开来。

1.4 调制频率的选择

根据锁相热成像理论,热波穿透深度^[23-24]可表示为:

$$\mu_{th} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega_m}} \quad (6)$$

式中: μ_{th} 为热波穿透深度; α 为热扩散率。较低的调制频率将增加热波穿透深度,但会损伤漆层并降低检测效率,较高的调制频率将提高检测效率但会减小热波穿透深度。据文献[11],在漆层约为1.0 mm情况下,计算得调制频率约为0.43 Hz。考虑到该涂层材料的差异,最终选择0.5 Hz为调制频率,此频率下能够较好地平衡检测效果与加热时间。

2 方向调制实现

根据方向调制的要求,搭建了一套实验平台搭配以对应的数据处理方法。

2.1 平台搭建

实验平台结构如图2所示。

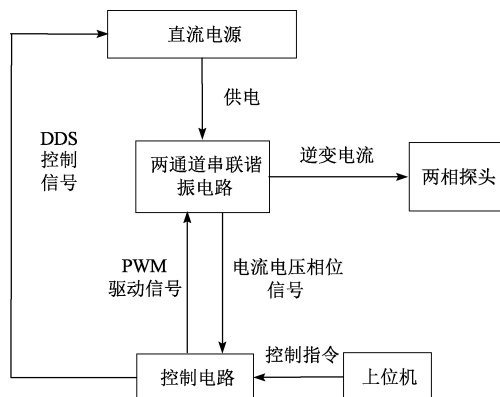


图2 实验平台结构

Fig.2 Experimental platform structure

实验平台包括两通道逆变电路、控制电路、直流电源、两相探头。PC机向下位机发送指令,控制电路根据指令产生对应的控制信号控制两通道逆变电路与直流电源,并且根据电流、电压采样信号实现频率跟踪^[18],直流电源给两相逆变电路提供负载电压,两相逆变电路将负载电压转换为正弦逆变电流,两相探头通过逆变电流产生交变磁场。

2.2 基于PWM相位翻转的完整旋转方法

供电电源只能输出对地正的负载电压,而两通道逆变电路又总是同时工作的,故在逆变频率相同的情况下电流在两个逆变通道中的走向总是一致的。如图3所示,电流方向是总是从正(+)流向负(-),因此A相与B相在试样上产生的涡流只有两种组合区域,故涡流只能在试样表面的部分区域旋转,减弱了裂纹处的温度波动,影响检测效果。

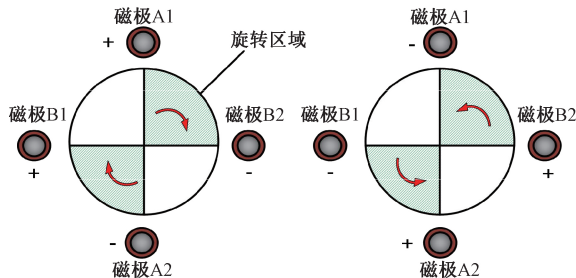


图3 涡流旋转情况

Fig.3 Eddy rotation status

为了使涡流完整旋转,提出了一种基于PWM驱动信号翻转的完整旋转方法。图4所示为电流走向随PWM驱动信号翻转而改变的示意图,其中Q1-Q8表示MOSFET管,红色箭头代表电流走向, i_a 、 i_b 分别表示两通道的逆变电流,1、0分别表示驱动信号的开通、关断。

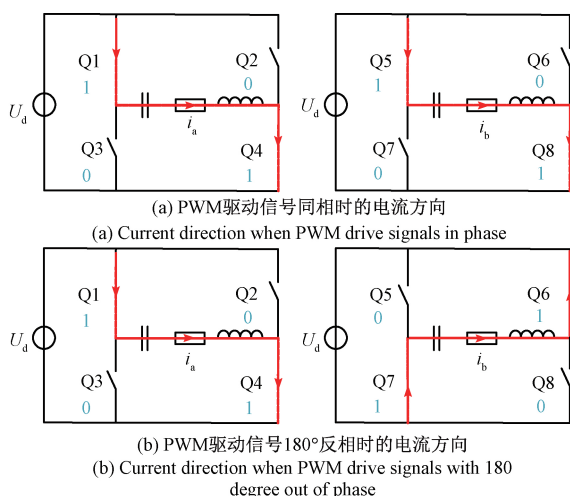


图4 PWM驱动信号相位不同时的电流方向

Fig.4 Current direction of different PWM drive signal phases

根据式(1), 电流幅值包络线由调制信号的频率决定。故可以在任意一个通道调制信号幅值接近于0时, 对相应串联谐振电路的PWM驱动信号进行翻转。图4(a)所示表示两通道对应的PWM驱动信号翻转前同相位, 故电流方向保持一致; 图4(b)所示表示两通道对应的PWM驱动信号翻转后相位相反, 因此电流方向相反。故试样上的涡流可以围绕裂纹完整地旋转起来。

2.3 双通道频率跟踪策略

长时间加热试样会带来谐振频率的偏移, 造成加热功率下降。所以需要引入频率跟踪技术, 使两通道工作在弱感性状态, 提高加热效率。而传统的频率跟踪策略有以下问题:

1) 电流相位信息依靠互感器与过零比较器获得^[25]。当逆变电流幅值较小时, 比较器输入信号将被噪声淹没, 造成输出信号错乱。实测当电流幅值小于2 A时, 无法进行跟踪。

2) 实验平台两通道的电气参数将会存在细微差异, 可能导致两通道的跟踪结果有所不同。而方向调制需要两通道频率保持一致。

针对上述问题, 本文提出了一种简单的双通道频率跟踪策略。下位机通过检波滤波电路及ADC获取两通道电流的幅值, 并作进一步判断:

1) 当两通道电流都小于等于2 A时, 保持之前跟踪到的频率, 避免跟踪失败。

2) 当两通道电流都大于2 A时, 表明两通道频率跟踪结果都是有效的, 这时取二者频率跟踪结果的平均值作为PWM驱动的输出频率。

3) 当只有一个通道电流幅值大于2 A时, 以该通道

频率跟踪结果为PWM驱动的输出频率。

应该策略后, 进行频率跟踪时的加热功率基本保持稳定。

2.4 数据处理方法

由于原始热图存在噪声, 故需要对原始热图数据做均值滤波以减小噪声。为了获取温度的周期性变化信息, 还需要去除基础温升。去除前后的温度曲线如图5所示, 红色曲线为热图原始温升曲线, 黑色曲线为移除基础温升后的温度波动曲线。

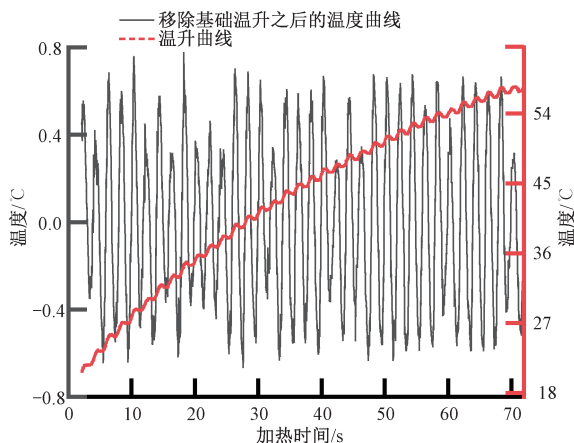


图5 试样表面温升曲线

Fig.5 Temperature rise curve on the sample surface

去除基础温升之后, 通过傅里叶变换提取热图数据在调制频率下的幅度信息与相位信息, 即可组成幅度图与相位图^[26]。根据幅度异常与相位异常, 就能判断检测区域是否存在裂纹。

3 实验验证

3.1 实验条件

两相实验平台单相加热功率设定为1 300 W, 两相合计2 600 W左右, 谐振频率44 kHz左右, 加热时间约24 s。热像仪选用Flir-A35, 分辨率320×256, 帧频60 Hz。喷漆剂采用富锌喷漆剂。实验装置如图6所示, 检测试样选用45#钢人工裂纹与20#钢焊缝裂纹。

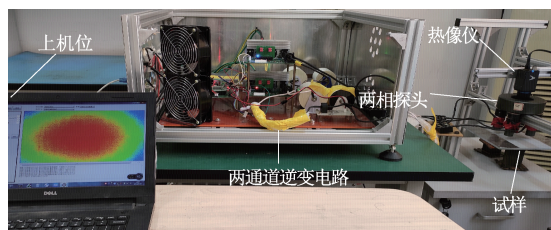


图6 实验装置

Fig.6 Experimental platform

3.2 45#钢人工裂纹检测结果

45#钢试样未喷漆时如图 7 所示。从左至右,人工凹槽型裂纹的尺寸分别为 $5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, $10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, $10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$, $20\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 深)。为了探究漆层厚度对检测效果的影响,采用富锌防腐漆在试样表面从薄到厚进行喷涂,确保得到每一条人工裂纹在 4 个不同厚度下的检测数据。其平均漆层厚度依次为 0.537, 0.902, 1.160, 1.377 mm。喷漆时的误差大约在 $100\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 之间,漆层厚度取裂纹附近测量厚度的平均值。

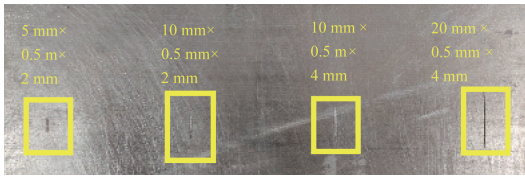


图 7 45#试样表面裂纹

Fig.7 Surface cracks of 45# steel sample

根据实验条件,对 4 个漆层厚度下的 45#钢的裂纹进行了检测,其检测结果如图 8 所示。

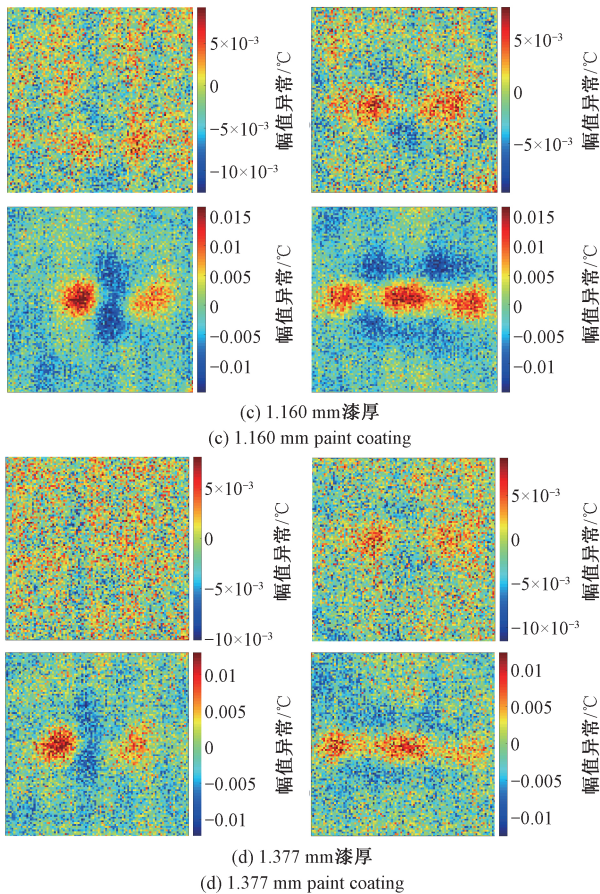
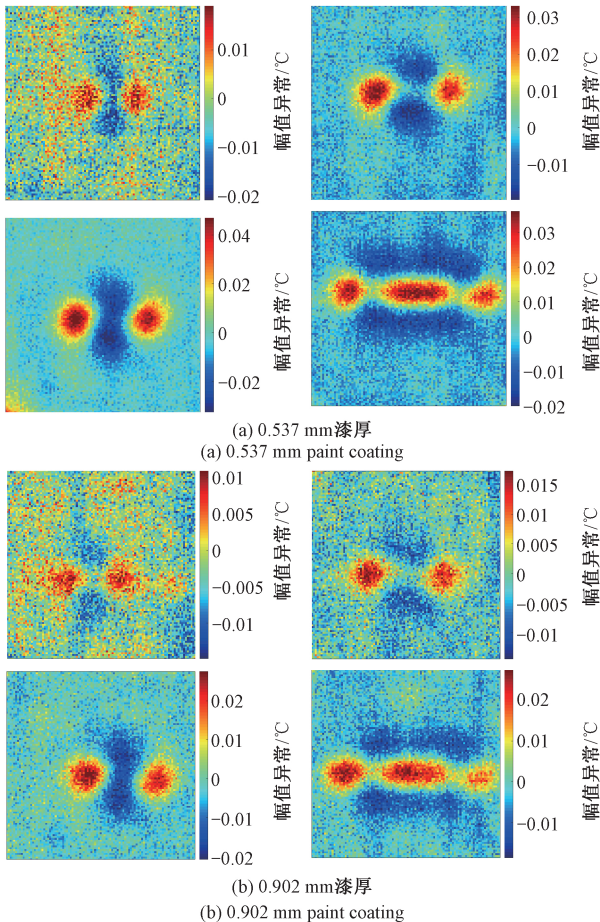


图 8 45#钢裂纹检测结果

Fig.8 45 # Steel crack detection result

图 8 中每一幅分图的左上、右上、左下、右下依次为 $5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, $10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, $10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$, $20\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 尺寸裂纹的检测效果。裂纹尖端点分布在图 8 中左右两侧,这是因为试样在实验时摆放的角度与图 12 中的放置角度相互垂直,但并不影响检测效果。

在 0.537 mm 与 0.902 mm 漆层厚度下,所有的裂纹都有明显的尖端效应;随着漆层厚度增加,在 1.160 mm 漆层厚度下 $5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, $10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 这两个尺寸的裂纹尖端已经难以判断,而 $10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$, $20\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 尺寸裂纹的尖端效应仍然明显;在 1.377 mm 漆层厚度下, $5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$, $10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 这两个尺寸的裂纹尖端效应近乎消失而 $10\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 4\text{ mm}$, $20\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 两个尺寸的裂纹也变得模糊而难以辨认。

根据上述检测结果,在目前的实验条件下,方向调制技术最多能检测 0.902 mm 漆层厚度下的 45#钢人工凹槽裂纹。理论上,还可以通过减小调制频率来提高检测

能力。

为了进一步评估方向调制技术是否对漆层下裂纹的检测效果有显著的提升,也对该试样在表面涂有约 0.486 mm 漆层厚度时进行磁粉检测,将磁粉检测法的检测结果与方向调制技术的检测结果进行对照,检测结果如图 9 所示。喷漆前事先标记好裂纹位置,以方便进行磁粉检测时快速找到检测区域。

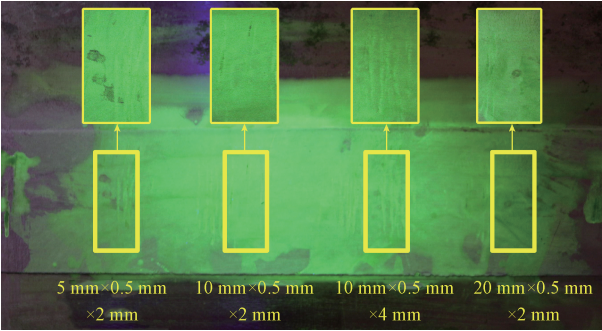


图 9 0.486 mm 漆层厚度下 45#钢磁粉检测结果
Fig.9 Magnetic particle detection results of 45# steel under 0.486 mm paint coating thickness

图 9 在 0.486 mm 漆层厚度下,45#钢人工凹槽裂纹的检测结果。可见磁粉检测方法无法检测出任何一条裂纹,而只能看到表面漆层的轻微划痕。那么在漆层更厚的情况下,磁粉检测法也无法检测出裂纹。结果表明,与传统的磁粉检测方法相比,方向调制技术对漆层下裂纹的检测能力有显著提升。

3.3 20#钢磨平焊缝裂纹检测结果

为验证方向调制技术对自然裂纹的检测效果,选用 20#钢磨平焊缝裂纹试样来模拟自然裂纹。为确认方向调制检测自然裂纹的准确性,在表面未喷漆时,用磁粉检测法检测了表面裂纹,确定了裂纹的形态,走向。如图 10 所示。

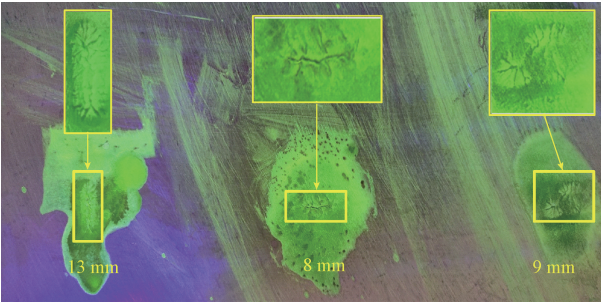


图 10 20#钢磨平焊缝裂纹
Fig.10 20# steel flat weld cracks

漆层平均厚度为 0.517 mm,裂纹的长度从左到右分别为 13,8,9 mm,宽度与深度未知。另外为了对比裂纹

区域与无裂纹区域的检测效果,共进行了 17 组实验,每次实验时手动将试样移动 1 cm 左右。最后将 17 组的检测结果拼接成一幅完整的图像。另外,为减小视野内障碍物对拼接结果的影响,适当地减小了热像仪的视场与焦距,因此图 11 与 8 中裂纹的尺寸比例不一致,但并不影响检测效果。拼接的幅值异常如图 11 所示。

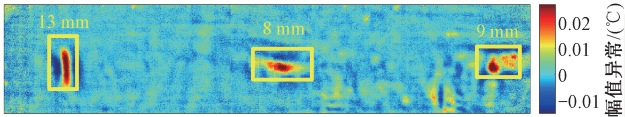


图 11 0.517 mm 漆层厚度下 20#钢磨平焊缝裂纹检测结果
Fig.11 20# Steel flat weld cracks detection result under 0.517 mm paint coating thickness

在漆层厚度为 0.517 mm 的情况下,3 条裂纹都能检出,而对于无裂纹区域,则没有明显的迹象。总体上,方向调制技术对于漆层下的自然裂纹有着一定的检测能力。

同样也对 20#试样在表面涂有约 0.451 mm 漆层厚度时进行磁粉检测,结果如图 12 所示。

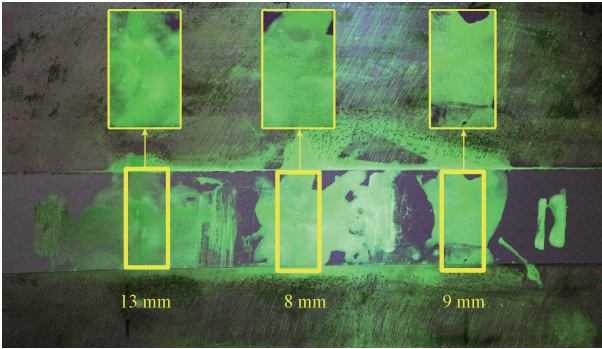


图 12 0.451 mm 漆层厚度下 20#钢磨平焊缝磁粉检测结果
Fig.12 Magnetic particle detection results of 20# steel flat weld under 0.451 mm paint coating thickness

图 12 表明在 0.451 mm 漆层厚度下,磁粉检测无法检测出任何 20#钢上的裂纹。这说明与传统的磁粉检测方法相比,方向调制技术在检测漆层下的自然裂纹时也能有效地提升漆层下检测能力。

4 结 论

本文提出了一种基于方向调制原理的漆层下裂纹检测技术,从理论上推导了该方法的数学模型;根据该方法的要求搭建了一套实验平台,并解决了其中涡流完整旋转与频率跟踪的问题;检测了不同漆层厚度下的 45#钢人工裂纹试样缺陷,利用 20#钢磨平焊缝裂纹试样模拟自然裂纹试样,并在漆层厚度为 0.517 mm 的情况下检测

出了焊缝试样的裂纹。有如下结论:

1) 基于方向调制的检测技术对 0.537, 0.902 mm 漆层下的 45#钢裂纹有着良好的检测效果;漆层厚度为 1.160 mm 时,裂纹已经变得模糊;而对于 1.377 mm 漆层厚度下的裂纹,已无法清晰地判断出裂纹的存在。随着漆层厚度的增加,漆层对热量传播的阻挡越加显著。目前方向调制技术最多能检测出 0.902 mm 漆层厚度下的人工裂纹。根据热波穿透公式,检测能力可以通过减小调制频率进一步提升。

2) 方向调制技术也能较好地检测 0.517 mm 漆层下 20#钢磨平焊缝试样的裂纹。说明方向调制技术对一定漆层厚度下的自然裂纹也有着较好的检测效果。

3) 与 0.486 mm 漆厚下人工裂纹、0.451 mm 漆厚下模拟自然裂纹的磁粉检测结果相比,方向调制方法有效地提升了漆层下裂纹的检测能力。

参考文献

- [1] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1763-1780.
TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(8): 1763-1780.
- [2] 彭建平. 涡流脉冲热成像检测铁轨滚动接触疲劳的方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
PENG J P. Research on eddy current pulsed thermography detect rolling contact fatigue crack in railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [3] SHI ZH J, XU X Y, MA J J, et al. Quantitative detection of cracks in steel using eddy current pulsed thermography[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1070.
- [4] 苏鹏涛. 工件表面油漆层厚度对焊缝磁粉检测的影响[J]. 无损检测, 2017, 39(7): 58-60.
SU P T. Influence of workpiece surface paint layer thickness on the weld magnetic particle testing [J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(7): 58-60.
- [5] 吴时红, 陈颖, 何双起. 超声显微检测系统在涂层检测中的应用研究[J]. 宇航材料工艺, 2005, 35(4): 55-57.
WU SH H, CHEN Y, HE SH Q. Application of scanning acoustic microscope for coat testing [J]. Aerospace Materials and Technology, 2005, 35(4): 55-57.
- [6] 黄建华. 激光超声检测带涂层金属表面裂纹的数值研究[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
HUANG J H. Numerical study of coated metal surface Crack by laser ultrasonic detection [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [7] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11-25.
ZHANG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(02): 11-25.
- [8] 王昵辰, 杨瑞珍, 何赞泽, 等. 多模红外热成像检测碳纤维布加固混凝土粘结缺陷[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 37-44.
WANG N CH, YANG R ZH, HE Y Z, et al. Detection of interface bonding defects in carbon fiber sheet reinforced concrete using multi-mode infrared thermography [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 37-44.
- [9] 马炬, 邹金慧. 铁质部件内部缺陷的脉冲涡流红外热成像检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 137-144.
MA X, ZOU J H. Pulsed eddy current infrared thermal imaging detection of internal defects of iron components [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(7): 137-144.
- [10] ZHOU D Q, CHANG X, DU Y, et al. Research on the crack detection of conductive components using pulsed eddy current thermography [J]. Instrumentation, 2017, 4(3): 59-68.
- [11] LIU Z P, LIU H L, JIANG L, et al. Simulation of non-destructive testing on weld surface crack of metal structure by electromagnetically stimulated infrared thermography [J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 590: 639-644.
- [12] 闫会朋, 杨正伟, 田干, 等. 基于涡流热成像的铁磁材料近表面微裂纹检测[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(3): 231-236.
YAN H P, YANG ZH W, TIAN G, et al. Micro crack detection near surface of ferromagnetic materials based on eddy current thermography [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(3): 231-236.
- [13] KOSTSON E, WEEKES B, ALMOND D P, et al. Crack detection using pulsed eddy current stimulated thermography [C]. AIP Conference Proceedings. AIP, 2011, 1335(1): 415-422.
- [14] HE Y Z, TIAN G Y, PAN M, et al. An investigation into eddy current pulsed thermography for detection of corrosion blister [J]. Corrosion Science, 2014, 78(1): 1-6.
- [15] SCHÖNBERGER A, VIRTANEN S, GIESE V, et al. Non-destructive detection of corrosion applied to steel and

- galvanized steel coated with organic paints by the pulsed phase thermography [J]. *Materials & Corrosion*, 2015, 63(3): 195-199.
- [16] YANG R, HE Y, ZHANG H, et al. Through coating imaging and nondestructive visualization evaluation of early marine corrosion using electromagnetic induction thermography [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 277-288.
- [17] WANG Y, GAO X, FINCKBOHNER M, et al. The effect of paint coatings on detection of vertical surface cracks in metals by induction thermography [J]. *NDT & E International*, 2019, 104: 58-68.
- [18] 唐波, 方旭, 侯德鑫, 等. 面向脉冲涡流热成像的激励电源特性研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(1): 208-215.
- TANG B, FANG X, HOU D X, et al. Exciting power supply characteristics for pulsed eddy current thermography [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(1): 208-215.
- [19] 洪婷婷, 侯德鑫, 叶树亮. 基于方向调制涡流热成像的防腐漆下裂纹检测 [J]. *仪表技术与传感器*, 2019(11): 91-94.
- HONG T T, HOU D X, YE SH L. Crack detection under anticorrosive paint based on directional modulation eddy current thermography [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(11): 91-94.
- [20] 常东, 左宪章, 田贵云, 等. 裂纹方向对脉冲涡流激励热成像的影响 [J]. *上海交通大学学报*, 2013, 47(5): 779-785.
- CHANG D, ZUO X ZH, TIAN G Y, et al. Analysis of the crack orientation effect on pulsed eddy current stimulated thermography [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2013, 47(5): 779-785.
- [21] 李伟, 陈国明. 基于双 U 形激励的交流电磁场检测缺陷可视化技术 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(9): 233-237.
- LI W, CHEN G M. Defect visualization for alternating current field measurement based on the double U-shape inducer array [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9): 233-237.
- [22] 戴军军, 唐波, 侯德鑫, 等. 面向涡流热成像的双路正交激励电源系统 [J]. *仪表技术与传感器*, 2017(3): 68-72, 77.
- DAI J J, TANG B, HOU D X, et al. double orthogonal excitation power supply system for eddy current thermography [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(3): 68-72.
- [23] 陶春先, 李霞, 李大伟, 等. 基于表面热透镜的薄膜弱吸收测量的调制频率研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 609-612.
- TAO CH X, LI X, LI D W, et al. Research of modulation frequency in surface thermal lens technique for coatings weak absorption measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 609-612.
- [24] RIEGERT G, ZWESCHPER T, BUSSE G. Eddy-current lockin-thermography: Method and its potential [J]. *Journal De Physique IV*, 2005, 125: 587-591.
- [25] 王晓娜, 方旭, 唐波, 等. 脉冲式感应加热电源频率跟踪技术的研究与实现 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(18): 4357-4364.
- WANG X N, FANG X, TANG B, et al. Research and implementation of a frequency tracking technology for the pulsed induction heating power [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(18): 4357-4364.
- [26] 潘孟春, 何泽, 陈棣湘. 涡流热成像检测技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 154-156.
- PAN M CH, HE Z, CHEN D X. Eddy current thermography non destructive testing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 154-156.

作者简介



王晓娜, 2004 年于浙江大学获硕士学位, 现为中国计量大学精密仪器专业副教授, 主要研究方向为几何精密测量与光电检测技术。

E-mail: wangxn@cjlu.edu.cn

Wang Xiaona received her M. Sc. degree from Zhejiang University in 2004. She is currently an associate professor at China Jiliang University. Her main research interests include geometric precision measurement and photoelectric detection technology.



叶树亮 (通信作者), 2005 年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现为中国计量大学教授, 主要研究方向为新型传感技术及仪器信号处理。

E-mail: itmt_paper@126.com

Ye Shuliang (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2005. He is currently a professor at China Jiliang University. His main research interests include novel transducer technology and signal processing.