

主动热激励式红外热成像管道缺陷深度检测

王卓**, 张云伟*, 喻勇, 樊阳阳

昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500

摘要 针对管道内壁缺陷深度检测的问题, 建立了一种基于电涡流主动热激励的红外热成像管道缺陷深度检测方法。阐述了红外热成像管道缺陷深度检测的机理, 针对埋地管道检测对热激励的特殊要求, 设计了参数可调控的电涡流热激励实验装置, 按照管道内壁形状制作了检测试件, 通过基于电涡流的主动热激励实验, 分析了谐振频率、脱离高度、输入电功率这 3 个重要参数对热激励效率的影响, 并得出它们的优化值。在此基础上, 对预先设计带有不同深度缺陷的检测试件进行主动热激励, 并获取其红外热图像, 通过分析热图像数据发现, 缺陷与非缺陷区域间灰度均值的差值随缺陷深度的变化而变化, 在一定条件下二者呈单值对应关系, 且具有较好的线性度。利用这一规律, 通过实验数据拟合建立了槽形缺陷和圆形缺陷的深度检测模型, 实验测试显示所建立的模型具有一定的检测精度。研究表明: 在优化的电涡流主动热激励条件下, 可以通过红外热图像计算出缺陷深度, 所提出的基于电涡流主动热激励的红外热成像管道缺陷深度检测方法具有可行性。

关键词 测量; 无损检测; 缺陷深度; 红外热成像; 管道检测; 电涡流; 热激励

中图分类号 TG115.28

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0912003

Depth Test of Pipeline Defects by Active Thermal Excitation and Infrared Thermography

Wang Zhuo**, Zhang Yunwei*, Yu Yong, Fan Yangyang

Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

Abstract Aiming at depth test of pipeline inwall defects, we propose a method of measuring the depth of pipeline defects, which based on the active thermal excitation by eddy current and infrared thermography. The theory of infrared imaging pipeline defects measuring is described. According to the special requirements of buried pipeline detection, a test device of eddy current thermal excitation with adjustable parameters is designed. Some specimens are fabricated according to the shape of the pipeline. With the active thermal excitation experiment based on eddy current, the influences of three important parameters, such as resonant frequency, lift-off distance and input electrical power on thermal excitation efficiency are analyzed, and the optimized values are obtained. Based on the above work, the infrared images of specimens with pre-designed defects which have different depths are acquired. The thermal image data analysis shows that the difference of grayscale between the defects and the non-defective areas varies with the defect depth, and the two factors show a single value correspondence, which has a good linearity under certain conditions. The defect depth detection model of groove-like and circular defects are established by the law. The experimental results show that the established model has certain detection accuracy. The research results show that the depth of defect can be calculated by infrared thermal image under the optimized active eddy current excitation condition. The proposed method based on active eddy current excitation of infrared thermal imaging pipeline is feasible.

Key words measurement; nondestructive testing; infrared thermal imaging; defect depth; pipeline detection; eddy current; thermal excitation

OCIS codes 120.4290; 120.6660; 110.3080; 120.6810

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-04-12; 录用日期: 2018-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(51365019)

* E-mail: 1657824262@qq.com; ** E-mail: 824976084@qq.com

1 引 言

对于埋地管道内壁缺陷的检测而言,缺陷深度信息是一个非常重要的参数,缺陷深度的大小直接影响着管道泄漏的危险程度,因此,对缺陷深度进行定量测定非常重要。目前,可用于管道缺陷检测的无损检测技术主要有视频检测、漏磁检测、涡流检测(远场涡流、脉冲涡流)、射线检测、超声导波检测等,这些技术在实际应用中有各自的优势和局限性^[1-4]。特别是超声导波检测技术近年来发展较快,其可在较大范围内快速发现管壁上有无缺陷以及缺陷的位置。

红外热成像检测技术目前主要应用于集成电路板的焊接质量及工业上各种器件的焊缝检测等方面,也可应用于复合材料和飞机蒙皮的缺陷检测中。由于红外热成像检测具有无损、无磁、非接触、快速实时、缺陷信息丰富直观(包括缺陷的形状、大小、位置等)的优点^[5],在埋地管道内部缺陷实时在线检测方面具有潜在的应用价值,可作为超声导波检测技术的补充。如:Lahiri等^[6]将低频交变磁场作为热激励源对铁磁性方槽形缺陷进行了红外图像检测的测试;Endo等^[7]提出了利用红外热像仪确定炼钢厂气体管道管壁减厚分布的高效方法;王永茂等^[8-9]阐述了红外检测的基本原理,并提出了两种不同的红外检测和确定缺陷尺寸的方法;杨黎俊等^[10]给出了金属管三维非稳态导热方程,并对内壁缺陷大小及最小可检测缺陷进行了详细的理论研究。朱亚昆等^[11]以电磁感应作为热激励源,对红外热像无损检测的影响因素和应对措施进行了阐述和仿真实验;田裕鹏等^[12]针对红外检测缺陷的定量检测进行了研究,得出了时间序列图像与缺陷大小之间的规律;赵石彬等^[13]利用红外图像序列对聚丙烯管道的缺陷进行了检测,利用图像处理方法测量了缺陷的面积;张学武等^[14]提出了一种基于小波纹理特性的红外图像视觉检测方法,该方法对金属表面缺陷的识别率较高。从目前的研究现状来看,红外热成像缺陷检测技术的应用研究主要集中在有无缺陷、缺陷形状及大小的检测方面,但对于埋地管道内部缺陷的检测,特别是缺陷深度检测方面的研究还比较少。

针对这一问题,本文建立了一种基于电涡流主动热激励的红外热成像管道缺陷深度检测方法。在分析红外热成像管道缺陷深度检测机理的基础上,针对埋地管道检测对热激励的特殊要求,设计参数可调控的电涡流热激励实验装置,通过主动热激励实验,分析讨论谐振频率、提离高度、输入电功率等

参数对热激励效率的影响,寻找其优化值;然后,对预先设计带有不同深度缺陷的检测试件进行主动热激励,并获取红外热图像,通过分析热图像数据发现红外图像灰度与缺陷深度之间的定量关系,建立缺陷深度检测模型,并进行实验验证。

2 红外热成像管道缺陷深度检测的机理

传热的3种方式分别是:热传导、对流、辐射。在基于电涡流主动热激励红外热成像对管道缺陷深度进行检测的过程中,通过电涡流将能量注入被测试件中,其中的一部分热量与周围的空气进行热交换,大部分热量在试件中进行热传导,试件内的热量在其表面激发热辐射,辐射频谱中包含红外波段,因此能采用红外热像仪获取试件表面的热辐射图像。

热传导公式为:

$$q = -k \nabla T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

式中: k 为热传导系数; q 为热流密度; T 为温度。由(1)式可知,在相同的 k 和 q 下,在三维空间中,若 x 、 y 、 z 任意一个方向的材料出现缺陷,即该方向上的微分不连续,都会导致 T 发生变化。当某一个方向的缺陷长度较大或者位置较深时,该处的温度变化会更加明显^[15-16]。

根据斯特藩-玻尔兹曼公式有:

$$\Phi = \epsilon' A \sigma T^4, \quad (2)$$

式中: σ 为斯特藩-玻耳兹曼常量; A 为辐射面积; ϵ' 为表面辐射率; Φ 为红外辐射通量。由(2)式可知,在相同的 A 和 ϵ' 下,随着缺陷处辐射面的温度上升,红外辐射显著增加。据此,可以通过红外热像仪测得的红外图像的灰度值对缺陷的深度进行定量分析。

3 基于电涡流的主动热激励实验

3.1 埋地管道热激励的特殊性

在城市中,各种输送管道大多埋在地下。由于地下温度较低,采用埋地管道自然温度场进行热成像的效果不好,难以保证对缺陷的有效分辨,因此需要对管道内壁待检测部分进行主动热激励。受埋地管道内部安全性、空间限制以及能量有限等因素的影响,所采用的热激励方式应满足非接触式、结构简单、尺寸小、工作电压低、功耗小、热激励效率高等特殊要求。考虑到输送压力等问题,埋地输送管道多采用碳钢,因此,经过优化的电涡流主动热激励方式能较好地满足上述要求。

3.2 电涡流热激励实验装置

为了实现电涡流主动热激励,设计并制作了一个谐振频率、提高高度、输入电功率等参数可调控的高频电涡流热激励实验装置,该装置主要由控制模块、驱动模块和谐振激励线圈等组成。如图 1(a)所示,控制模块以 STM32 微控制器为核心,可根据控制参数产生脉宽可调、频率可调的高频方波信号,送入图 1(b)所示的驱动模块,经隔离和放大后驱动线圈与电容串联谐振,产生交变磁场,在被检测试件内感应出电涡流,进而产生热量。整体的工作状态如图 1(d)所示。考虑到管道内壁检测的特殊性,热激励线圈采用平面绕制方式。与其他绕制方式相比,平面绕制方式在同样线圈匝数下可以扩大单次检测面积,具有轴向尺寸小、便于贴近待检测面、散热好等优点^[17]。此外,在线圈平面的一侧,沿径向等间隔布置了 6 块铁氧体磁条,如图 1(c)所示,目的是使磁场分布得更加均匀,提高待检测面热激励区域中温度场分布的均匀性,获得更理想的红外热图像。利用控制模块连续测量试件的实际温度,达到设定温度时记录时间,停止热激励,并立即将试件送入暗箱采集红外图像。为了避免其他热辐射的干扰,实验在专门制作的暗箱中进行。

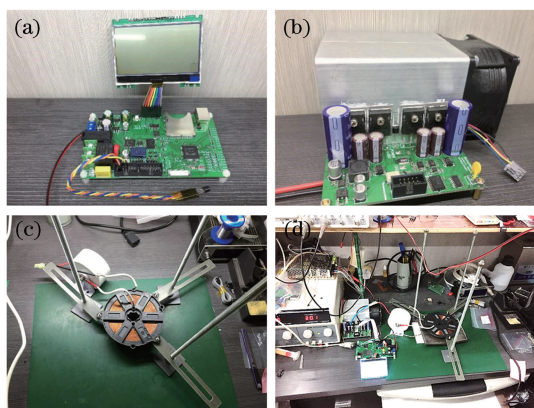


图 1 (a)激励控制模块;(b)激励驱动模块;
 (c)谐振涡流激励线圈;(d)电涡流热激励装置工作状态
 Fig. 1 (a) Excitation controller module;
 (b) excitation driver module; (c) resonant coil for eddy current thermal excitation; (d) eddy current excitation device in service

3.3 检测试件

检测试件的材质为 45 钢,每块试件的尺寸均为 150 mm×150 mm×10 mm,经过特殊加工后形成类似管道内壁的圆弧状,圆弧的曲率半径为 300 mm。这样,检测试件就可以近似认为是在埋地管道内壁局部取样。在检测试件上设计缺陷时,为

了尽量减小热激励时各缺陷之间温度场的相互干扰,单块检测试件上只设计两个缺陷,且两个缺陷均匀分布在钢板的凹面上。此外,考虑到实际上缺陷的表面形状大致可以归并为圆形、槽形两类,因此,主要考虑圆形和槽形两种缺陷形状。被测试件如图 2 所示,根据缺陷的形状、尺寸及深度将被测试件分为两组。第 1 组试件设有宽度相同、长度相同、深度不同的槽形缺陷,如图 2(a)所示,缺陷的宽度为 2 mm,长度为 50 mm。由于加工误差,实际的缺陷深度分别为 1,2,3,4,4.9,6.2,6.8,7.6,9 mm,这 9 种深度的缺陷分别分布在 5 块试件上。第 2 组试件设有直径相同、深度不同的圆形缺陷,如图 2(b)所示,缺陷直径为 2 mm,缺陷深度分别为 1,2,3,4,5,6,7,8,9 mm,其中:深度为 1~8 mm 的圆形缺陷均按相邻尺寸进行两两分组,分布在一块试件上;深度为 9 mm 的圆形缺陷和槽形缺陷分别单独占用一块试件。

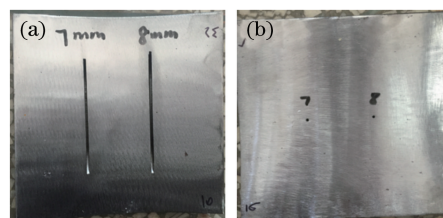


图 2 检测试件的实物图。(a)深度不同的槽形缺陷;
 (b)深度不同的圆形缺陷

Fig. 2 Physical maps of test specimens.

(a) Groove-like defects with different depths;
 (b) circular defects with different depths

3.4 电涡流热激励参数的影响及优化实验

在对埋地管道缺陷进行检测时,由于能耗及效率的要求,所采用的热激励装置应具有较高的热激励效率。通常,热激励效率 η 可表示为

$$\eta = \frac{H}{P_i \cdot t} = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{P_i \cdot \Delta t}, \quad (3)$$

式中: P_i 为输入电功率; Δt 为热激励时间长度; H 为检测试件获取的热能; m 为待检测试件的质量,每块试件的质量相同; ΔT 为绝热条件下达到热平衡时的温度差; c 为检测试件材质的比热容,即 45 钢的比热容。由(3)式可知,当 c 、 m 、 ΔT 相同时,热激励效率 η 取决于 P_i 和 Δt 。

定义热激励效率因数 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{1}{P_i \cdot \Delta t}. \quad (4)$$

这样,可以通过比较 ϵ 值来分析热激励效率 η 。 ϵ 值越大,表明热激励效率 η 越高。

对于前述电涡流热激励实验装置,影响热激励效率的参数主要有3个:谐振频率、线圈提高高度、输入电功率。需要对这3个激励参数进行实验分析,获得其优化值。

1) 谐振频率

为了分析谐振频率对热激励效率的影响,固定

表1 谐振频率对热激励效率的影响

Table 1 Effects of resonance frequency on thermal excitation efficiency

Number of coil turns	Resonant frequency /kHz	Heat time for 40 °C /s	Heat time for 60 °C /s	Time difference from 40 °C to 60 °C /s	$\epsilon / 10^{-5}$
54	16.5	250	485	235	4.432
46	17.5	230	413	183	5.692
40	18.5	242	428	186	5.600
39	19.0	221	416	195	5.342
38	20.0	315	532	217	4.800

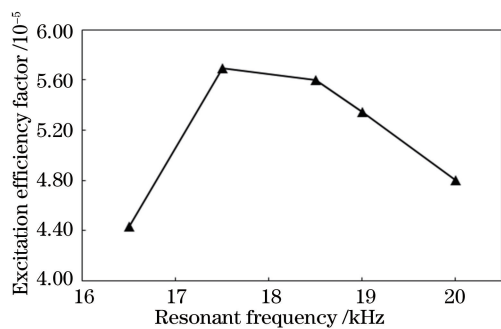


图3 热激励效率因数随谐振频率的变化

Fig. 3 Variation of thermal excitation efficiency factor with resonant frequency

输入电功率为96 W,线圈提高高度为1 cm,改变热激励线圈匝数来调整谐振频率,测量从室温加热至40 °C和60 °C的时间,进而计算热激励效率因数 ϵ ,结果如表1所示。将谐振频率与 ϵ 的变化关系绘制成曲线图,如图3所示。可见,在17.5 kHz谐振频率附近的热激励效率最大。

2) 线圈提高高度

为了分析线圈提高高度对热激励效率的影响,固定输入电功率为135 W,输入电流频率保持为17.5 kHz,通过调整线圈夹持装置来改变线圈与检测试件之间的提高高度,然后测量从室温加热至40 °C和60 °C的时间,计算热激励效率因数 ϵ ,结果如表2所示。将线圈提高高度与 ϵ 的变化关系绘制成曲线图,如图4所示。由图4可以看出,热激励效率随提高高度增加而逐渐下降。考虑到采用非接触式的缺陷检测方式,提高高度不能为0,故而选择1 cm作为优化的提高高度。

表2 线圈提高高度对热激励效率的影响

Table 2 Effects of lift-off distance on thermal excitation efficiency

Lift-off distance /cm	Heat time for 40 °C /s	Heat time for 60 °C /s	Time difference from 40 °C to 60 °C /s	$\epsilon / 10^{-5}$
1.0	162	289	127	5.833
1.5	174	324	150	4.938
2.0	130	297	167	4.436
2.5	161	344	183	4.048

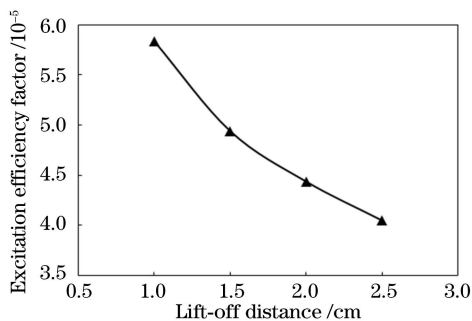


图4 热激励效率因数随线圈提高高度的变化

Fig. 4 Variation of thermal excitation efficiency factor with lift-off distance

3) 输入电功率

为了分析输入电功率对热激励效率的影响,固定热谐振频率为17.5 kHz,线圈提高高度为1 cm,改变输入电功率 P_i ,热激励装置的输入电压固定为30 V,改变输入电功率(即调整线圈电流),然后测量从室温加热至40 °C和60 °C的时间,计算热激励效率因数 ϵ ,结果如表3所示。将 P_i 与 ϵ 的变化关系绘制成折线图,如图5所示。可见:随着输入电功率增加,热激励效率先平缓下降;当输入电功率超过150 W后,热激励效率急剧下降。因此,输入电功率不宜过大,应限制在150 W以内较为合适。此外,

表 3 输入电功率对热激励效率的影响

Table 3 Effects of input power on thermal excitation efficiency

Input power P_i/W	Heat time for 40 °C /s	Heat time for 60 °C /s	Time difference from 40 °C to 60 °C / s	$\epsilon / 10^{-5}$
75	330	588	258	5.168
96	211	413	202	5.157
144	165	300	135	5.144
156	152	277	125	5.128
174	134	247	113	5.086

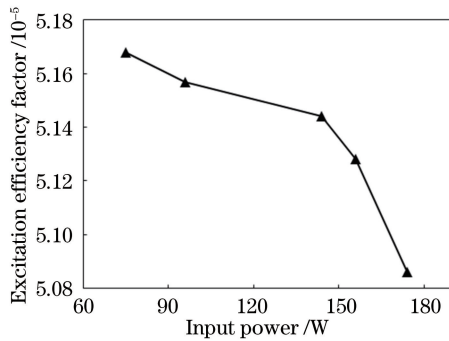


图 5 热激励效率因数随输入电功率的变化

Fig. 5 Variation of thermal excitation efficiency factor with input power

还应兼顾 40 °C 加热到 60 °C 的时间差 Δt , 在热激励效率差距不大的情况下, 可以选择较大的输入电功率以缩短 Δt , 提高检测效率。

4 管道缺陷深度检测

根据上述实验结果, 在 17.5 kHz 谐振频率、1 cm 提高高度和 150 W 输入电功率的条件下, 通过电涡流热激励装置, 在特制暗箱中分别将第 1 组和第 2 组检测试件从室温开始加热, 利用接触式传感器检测试件的温度, 使用优利德 UTi160B 型红外热像仪采集各检测试件表面的红外热图像, 该红外热像仪的空间分辨率为 160 pixel \times 120 pixel, 测温灵敏度为 0.08 °C, 输出图像灰度为 0~255。每一轮实验采集 10 张图像, 每块试件均采集 10 轮, 然后传入计算机, 对红外热图像的灰度图进行图像处理, 包括图像分割、缺陷区域目标识别(涉及缺陷大小、形状、位置等信息识别的图像处理方法)、像素值分析计算等操作。

4.1 缺陷深度检测模型

对第 1 组中各试件的红外热图像进行分析, 得到每块检测试件中各缺陷区域的灰度均值和非缺陷区域的灰度均值, 计算二者间的灰度差, 结果如表 4 所示。分析表 4 的数据可以发现, 缺陷与非缺陷区域间灰度均值的差值随缺陷深度值的变化而变化,

二者呈单值对应关系, 且具有较好的线性度。因此, 可以通过实验数据建立槽形缺陷的缺陷深度检测模型, 拟合线性曲线如图 6 所示, 其数学关系为:

$$y = 1.9456x + 5.3694, \quad (5)$$

式中: y 为灰度差; x 为缺陷深度。

表 4 不同深度槽形缺陷的灰度数据

Table 4 Grayscale data of groove-like defects at different depths

Defect depth /mm	Average grayscale of non-defect area	Average grayscale of defect area	Average grayscale difference
1.0	27.87	35.35	7.48
2.0	27.87	36.95	9.08
3.0	29.51	40.20	10.69
4.0	29.51	44.23	14.72
4.9	25.22	40.54	15.32
6.2	25.22	41.77	16.55
6.8	25.20	42.37	17.17
7.9	25.20	44.69	19.49
9.0	24.78	49.17	24.39

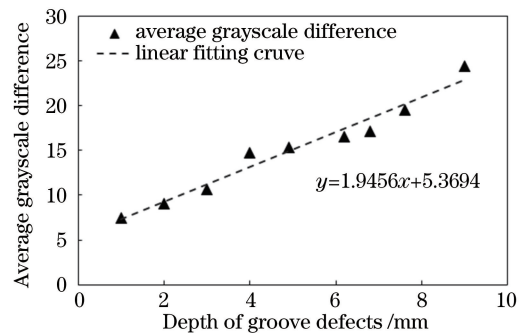


图 6 槽形缺陷深度与平均灰度差值的关系

Fig. 6 Relationship between groove-like defect depth and average grayscale difference

同样, 对第 2 组中各试件的红外热图像数据进行分析, 得到每块检测试件中各个缺陷区域的灰度均值和非缺陷区域的灰度均值, 计算二者间的灰度差数据, 结果如表 5 所示。分析表 5 可以发现, 缺陷与非缺陷区域灰度均值的差值同样随缺陷深度的变化而变化, 二者能够拟合出曲线, 但不再呈单值对应

关系。通过实验数据建立圆形缺陷的缺陷深度检测模型,拟合多项式曲线如图 7 所示,其数学关系为

$$y = -0.096x^3 + 1.2267x^2 - 2.1938x + 9.5876, \quad (6)$$

式中: y 为灰度差; x 为缺陷深度。

表 5 不同深度圆形缺陷的灰度数据

Table 5 Grayscale data of circular defects at different depths

Defect depth /mm	Average grayscale of non-defect area	Average grayscale of defect area	Average grayscales difference
1.0	28.60	36.92	8.32
2.0	28.60	38.47	9.87
3.0	29.10	40.10	11.00
4.0	29.10	43.71	14.61
5.0	28.29	45.13	16.84
6.0	28.29	48.37	20.08
7.0	28.33	49.58	21.25
8.0	28.33	49.9	21.57
9.0	28.60	47.66	19.06

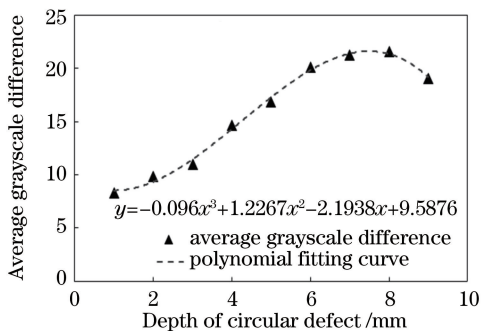


图 7 圆形缺陷深度与平均灰度差值的关系

Fig. 7 Relationship between circular defect depth and average grayscale difference

分析图 7 的多项式曲线可以得到,缺陷深度超过一定值后,曲线呈下降的趋势,如果在上述数据中取出 1~7 mm 深度之间的数据点进行拟合,则可以得到一条较为理想的线性曲线,拟合线性曲线如图 8 所示,其数学关系为

$$y = 2.3234x + 5.2737, \quad (7)$$

式中: y 为灰度差; x 为缺陷深度($x \leq 7$ mm)。

4.2 缺陷深度检测的实验验证

单独加工两块验证用检测试件,按前述实验方法获取红外热图像,图 9(a)和图 9(b)为经过灰度变换后的局部图像。在图 9(a)中,实际测得非缺陷处表面的平均灰度为 25.8,槽形缺陷区域的平均灰度为 41.3,代入(5)式求出缺陷深度为 5.206 mm,检测

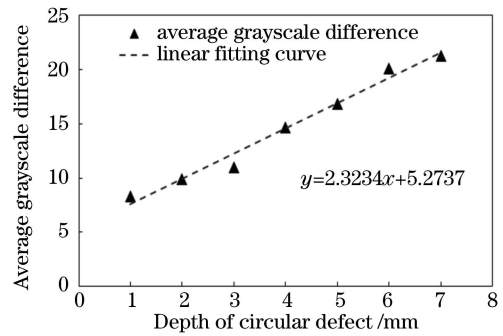


图 8 缺陷深度小于 7 mm 的圆形缺陷深度与平均灰度差的关系

Fig. 8 Relationship between circular defect depth with average grayscale difference when the depth is less than 7 mm

试件的实际缺陷深度为 5 mm,相对误差为 4.12%。在图 9(b)中,实际测得非缺陷处表面的平均灰度为 30.7,圆形缺陷区域的平均灰度为 49.4,代入(7)式求出缺陷深度为 5.779 mm,检测试件的实际缺陷深度为 6 mm,相对误差为 3.69%。

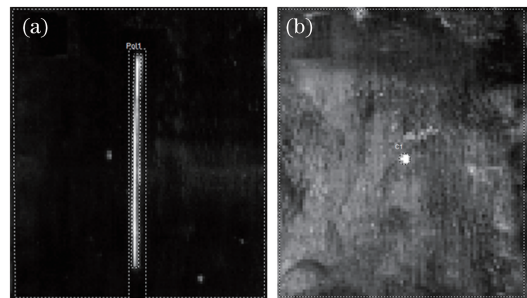


图 9 验证用检测试件的红外热图像。

(a) 5 mm 深槽形缺陷;(b) 6 mm 深圆形缺陷

Fig. 9 Infrared thermal images of verifying specimens.

(a) Groove-like defect with 5 mm depth;

(b) circular defect with 6 mm depth

5 结 论

提出了一种基于电涡流主动热激励的红外热成像管道缺陷深度检测方法,并开展了相关的实验研究,得到以下结论:

1) 对于电涡流热激励装置,热激励效率受谐振频率的影响,在谐振频率为 17.5 kHz 处有最高点;热激励效率随提高高度增加而下降,线圈应贴近被测试件表面;热激励效率随输入电功率的升高而降低,不宜采用超过 150 W 的热激励功率;谐振频率、提高高度、输入电功率这 3 个参数的优化值分别为 17.5 kHz、1 cm、150 W。

2) 无论是槽形缺陷还是圆形缺陷,缺陷与非缺

陷区域间红外图像灰度均值的差值均随缺陷深度的变化而变化。槽形缺陷深度与灰度呈单值对应关系,且具有较好的线性度,而圆形缺陷深度与灰度在一定范围内的线性拟合度较好。因此,可以通过实验数据拟合的方法建立槽形缺陷和圆形缺陷的深度检测模型,实现对缺陷深度的检测。

3) 在优化的电涡流主动热激励条件下,可以通过红外热图像计算出缺陷深度,所提出的基于电涡流主动热激励的红外热成像管道缺陷深度检测方法具有可行性。

参 考 文 献

- [1] Shen G T, Jing W K. Review of nondestructive testing technique for buried pipelines [J]. *Nondestructive Testing*, 2006, 28(3): 137-150.
沈功田, 景为科. 埋地管道无损检测技术[J]. *无损检测*, 2006, 28(3): 137-150.
- [2] Zuo Y T, Yu H D. Methods of NDT technique for buried pipelines [J]. *Chemical Equipment Technology*, 2010, 31(6): 53-56.
左延田, 俞厚德. 在用埋地钢质管道管体无损检测技术[J]. *化工装备技术*, 2010, 31(6): 53-56.
- [3] Zhang Y Q, Zhang Z X, Hao J C, *et al.* Development of ultrasonic guided wave technique used in pipeline inspection[J]. *Process Equipment & Piping*, 2016 (3): 72-75.
张跃强, 张早校, 郝建成, 等. 管道超声导波检测技术进展[J]. *化工设备与管道*, 2016(3): 72-75.
- [4] Lu H F, Wu X N, Tom I, *et al.* The status quo of natural gas line pipe inspection technologies abroad and its implications for China [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(2): 103-111.
卢泓方, 吴晓南, Tom I, 等. 国外天然气管道检测技术现状及启示[J]. *天然气工业*, 2018, 38(2): 103-111.
- [5] Dai J M, Wang Z J. Infrared thermography non-destructive testing technology and its applications[J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2007, 26(1): 1-7.
戴景民, 汪子君. 红外热成像无损检测技术及其应用现状[J]. *自动化技术与应用*, 2007, 26(1): 1-7.
- [6] Lahiri B B, Bagavathiappan S, Soumya C, *et al.* Infrared thermography based defect detection in ferromagnetic specimens using a low frequency alternating magnetic field [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 64: 125-133.
- [7] Endo H, Kusaka T. Efficient inspection for gas pipes by infrared thermography [J]. *Technology Review*, 2015, 33(2): 50-55.
- [8] Wang Y M, Guo X W, Li R H. Measuring defect diameter and depth in infrared testing [J]. *Laser & Infrared*, 2002, 32(6): 404-406.
王永茂, 郭兴旺, 李日华. 红外检测中缺陷大小和深度的测量[J]. *激光与红外*, 2002, 32(6): 404-406.
- [9] Wang Y M, Guo X W, Li R H, *et al.* Defect dimension and depth measurement by infrared thermography[J]. *Nondestructive Testing*, 2003, 25 (9): 458-461.
王永茂, 郭兴旺, 李日华, 等. 缺陷大小和深度的红外检测[J]. *无损检测*, 2003, 25(9): 458-461.
- [10] Yang L J, Geng W Z, Jiang L Z, *et al.* Evaluation of defect size in infrared imaging testing [J]. *Nondestructive Testing*, 1999, 21(2): 65-67.
杨黎俊, 耿完桢, 姜玲珍, 等. 红外成像检测中的缺陷大小评估[J]. *无损检测*, 1999, 21(2): 65-67.
- [11] Zhu Y K, Zhu Z B, Zheng R B, *et al.* Thermal excitation method in infrared thermography nondestructive testing [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2014, 43(4): 86-89.
朱亚昆, 朱志彬, 郑荣部, 等. 红外热像无损检测的热激励技术[J]. *石油化工设备*, 2014, 43(4): 86-89.
- [12] Tian Y P, Zhou K Y, Liang H, *et al.* Research on quantitative evaluation of infrared thermography[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29 (11): 2413-2418.
田裕鹏, 周克印, 梁华, 等. 缺陷红外检测的定量分析研究[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(11): 2413-2418.
- [13] Zhao S B, Zhang C L, Wu N M, *et al.* Infrared thermal wave non-destructive inspection for defects of polypropylene pipeline[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 456-460.
赵石彬, 张存林, 伍耐明, 等. 红外热波无损检测技术用于聚丙烯管道缺陷的检测[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 456-460.
- [14] Zhang X W, Ding Y Q, Yan P. Vision inspection of metal surface defects based on infrared imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0312004.
张学武, 丁燕琼, 闫萍. 一种基于红外成像的强反射金属表面缺陷视觉检测方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0312004.
- [15] Rohsenow W M. Handbook of heat transfer fundamentals [M]. Beijing: Science Press, 1992.
罗森诺. 传热学基础手册[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [16] Hua H R. Research on quantitative detection of defect depth through reflection method and transmission method of infrared thermal imaging technology [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong

University, 2015.

华浩然. 红外热成像反射与透射法的缺陷深度定量检测[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.

- [17] Liu Z T, Pan J, Yin X, *et al.* Effects of induction heating coil parameters on temperature field of tested

subjects [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(3): 317-323.

刘震涛, 潘俊, 尹旭, 等. 感应加热线圈参数对被试件温度场的影响分析[J]. *机电工程*, 2015, 32(3): 317-323.