

DOI: 10.3901/JME.2021.22.080

基于偏置磁化的管道内表面裂纹涡流热成像检测方法研究*

伍剑波¹ 许钊源¹ 吉 方² 张目超¹ 夏 慧¹ 陈彦廷³ 康宜华³

(1. 四川大学机械工程学院 成都 610065;

2. 中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 绵阳 621900;

3. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘要: 因高频热激励磁场趋肤效应的限制, 涡流热成像无法实现生产过程中管道内表面裂纹的在线检测。为突破上述问题, 提出了基于偏置磁化的管道涡流热成像检测方法: 在偏置磁化场作用下, 铁磁性管道内表面裂纹会引起外表面趋肤深度层内磁导率分布发生畸变, 进一步形成表面非均匀温度场分布, 从而可建立内表面裂纹与外表面温度场的关联关系。以电磁感应加热原理与铁磁性材料非线性磁特性为基础, 对新方法检测原理进行了阐述; 建立有限元仿真模型, 利用数值有限元仿真方法分析并获得不同埋藏深度裂纹缺陷引起的磁力线挤压现象以及磁导率变化规律; 建立管道偏置磁化涡流热成像检测系统, 对不同埋藏深度内表面裂纹进行自动化检测试验, 试验结果证明, 在移动速度为 150 mm/s 条件下新方法能够有效检测埋藏深度为 5.0 mm 的内表面裂纹。新方法不仅可以用于管道涡流热成像自动化检测, 对其他铁磁构件的热成像无损检测同样具有重要的理论意义与实用价值。

关键词: 管道; 涡流热成像; 磁导率; 内表面缺陷; 偏置磁化

中图分类号: TG156

DC-biased Induction Thermography for Sub-surface Defects of Pipelines

WU Jianbo¹ XU Zhaoyuan¹ JI Fang² ZHANG Muchao¹ XIA Hui¹ CHEN Yanting³ KANG Yihua³

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065;

2. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900;

3. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: Due to the limitation of skin effect of high frequency electromagnetic field, induction thermography cannot realize the scanning detection of sub-surface defects of pipeline. In order to overcome this problem, a DC-biased induction thermography for pipelines based on DC-biased magnetization is proposed: under direct current(DC) magnetization, the sub-surface defects will cause the distortion of the permeability distribution in the skin depth layer of the outer surface, and further form the non-uniform temperature field distribution on the surface, which will establish the correlation between sub-surface defect and the temperature field on the surface. Firstly, based on the principle of induction heating and the characteristics of non-linear ferromagnetic materials, the detection principle of the proposed method is described; then, the finite element simulation model is established to analyze and obtain the squeezing effect of magnetic lines and the permeability variation law caused by defects in different buried depths; finally, DC-biased induction thermography system for pipelines is developed. The experimental results show that the novel method can effectively detect the sub-surface defects with buried depth up to 5.0 mm at the inspection speed of 150 mm/s. The proposed method can not only be used for the scanning detection of pipelines, but also has important theoretical significance and practical value for induction thermography of other ferromagnetic components.

Key words: pipeline; induction thermography; permeability; sub-surface defect; DC-biased magnetization

* 国家自然科学基金(92060114)和四川省重大科技专项课题(2020YFG0090, 2021YFG0039 和 2020ZDZX0024)资助项目。20211117 收到初稿, 20211012 收到修改稿

0 前言

作为重要的基础承压构件, 管道被广泛应用于石油、天然气的长距离运输过程, 而管道质量是保证安全运输的基础。在生产过程中, 由于轧制工具、工艺参数和原材料等问题, 管道内外表面会形成裂纹等缺陷^[1], 若未及时发现会降低后期服役性能, 甚至会造成严重的安全事故。为保证出厂质量, 在管道生产过程中通常利用各种自动化无损检测方法进行质量检测, 如超声检测^[2]、漏磁检测^[3-5]等。超声检测是管道生产过程中较为常见的一种自动化检测方案, 检测精度高, 对内部缺陷敏感, 但其对管道表面洁净度要求较高且需要液态耦合剂, 对表面缺陷不敏感, 并因重复频率较低限制了检测速度。漏磁检测具有不受表面非铁磁性附作物影响、检测速度快、适应性强等优点, 广泛应用于管道生产与服役过程的快速检测, 但由于提离效应的影响, 为提高检测灵敏度, 漏磁探头需要紧贴管道表面, 导致严重的磨损问题以及因摩擦生热造成的传感器温漂问题, 影响探头使用寿命与检测精度。

作为一种非接触、高效率、可直接成像的多物理场耦合无损检测方法, 涡流热成像被用于各种关键构件的热成像检测, 如碳纤维增强复合材料^[6]、叶片^[7]、焊线^[8]、钢轨^[9]等。在高频感应线圈产生的交变激励磁场作用下, 构件表面会感应出涡流。构件中存在的裂纹等缺陷会导致涡流分布发生畸变, 根据焦耳定律, 畸变涡流分布会产生非均匀的温度场分布, 被红外成像仪拾取后可实现缺陷识别。涡流热成像分为静态检测和运动检测两种形式^[10]。静态检测时, 被测构件与加热线圈保持静止, 热成像仪记录视野范围内被测构件完整的加热与热扩散过程, 一般适用于对效率要求低的离线检测过程。运动检测时, 被测构件相对于加热线圈运动, 热成像仪主要记录视野范围内被测构件某一瞬间的加热温度分布情况, 可实现细长铁磁构件自动化在线检测。

管道在生产过程中内外表面均会存在裂纹等缺陷, 当将高频电磁场作用于移动管道时, 由于管道外表面缺陷能与感应涡流直接作用, 形成扰动涡流场以及非均匀温度场分布, 因此外表面缺陷易于实现检测。然而, 因高频激励磁场趋肤效应的限制(常用 200 kHz 交变激励磁场作用于铁磁性材料时, 趋肤深度约 0.1 mm), 感应涡流无法

与内表面裂纹等缺陷直接作用, 无法直接探测构件内部缺陷。因此, 能否突破内表面缺陷检测能力限制是关键问题。

在静态检测工况条件下, 针对内部缺陷检测难题, OSWALD 等^[11]利用小波变换实现了次表面缺陷定位。HE 等^[12]将脉冲相位技术应用于涡流成像检测, 建立了缺陷深度与两个提取特征(盲频率和最小相位)之间的单调关系。此外, 使用对数分析来量化次表面缺陷的深度^[13]。LI 等^[14]利用周期性脉冲激励构件, 实现了深层内部缺陷检测。XU 等^[15]研究了基于主成分分析算法的腐蚀金属表面隐藏裂纹检测。然而, 由于需要被测区域完整的升温 and 降温过程数据, 上述几种检测方法中只能在静态检测工况条件下进行, 也就是热像仪与构件相对静止, 因此, 上述几种方法不能满足管道在线检测需求。除此之外, WU 等^[16-17]提出了偏置磁化感应涡流热成像方法, 利用 U 型直流磁化器对钢板进行激励, 次表面缺陷会引起钢板表面趋肤效应层的磁导率分布发生畸变, 进一步在高频磁场作用下产生非均匀温度场, 从而将次表面缺陷与表面非均匀温度场直接关联起来, 该方法为管道内表面裂纹的运动检测奠定了基础。

为突破内表面缺陷检测能力限制, 本文提出了基于直流偏置磁化的管道自动化涡流热成像检测方法, 包括基于亥姆霍兹线圈的轴向直流偏置磁化方法, 基于环形线圈的高频交变磁场激励方法, 以及运动热图像重构方法。针对管道内表面缺陷检测问题, 利用数值有限元仿真方法对不同埋藏深度的裂纹缺陷进行了磁导率畸变分布分析。在此基础上, 开发了涡流热成像检测系统并进行了试验验证。

1 管道偏置磁化涡流热成像检测原理

内表面缺陷检测能力是涡流热成像检测能否用于管道在线检测的关键, 即如何将管道内表面缺陷与管道外表面温度分布之间建立关联关系。当高频感应线圈对管道进行激励时, 根据焦耳定律, 感应涡流单位时间内产生的热量 q 可表示为^[18]

$$q \sim I_c^2 \sqrt{\frac{\mu f}{\sigma}} \quad (1)$$

式中, I_c 为激励线圈中的电流, μ 为磁导率, σ 为电导率, f 为激励磁场频率。可见, 热量与激励电流的

平方成正比,与频率的平方根成正比,与磁导率成正比相关。如果管道缺陷能够引起磁导率发生变化,缺陷区域将产生不同的热量与温度场分布,从而可实现内表面缺陷检测。

另外,感应涡流分布受趋肤效应影响,趋肤深度 δ 代表涡流密度降为表面 $1/e$ 时的深度,表示为

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \sigma f}} \quad (2)$$

针对铁磁性管道,在频率为 200 kHz 高频磁场作用下,趋肤深度仅为 0.1 mm 左右。因此,常规涡流热成像无法实现内部缺陷的有效检测。解决该问题的核心在于如何使得管道内表面缺陷影响管道外表面趋肤深度层磁导率的分布。

为此,本文提出如图 1 所示的基于偏置磁化的管道涡流热成像检测原理。首先,利用通有直流电的亥姆霍兹线圈建立轴向磁化场对管道进行直流偏置磁化,如带有单向箭头的实线所示。同时,利用环形高频交流感应线圈对管道进行交变激励,如带有双向箭头的实线所示。其中,直流磁场与交流磁场在检测区域两者方向平行^[16]。管道属于铁磁性材料,当管道内表面存在裂纹时,磁力线将会被挤压通过磁导率更高的管壁,从而会影响外表面趋肤深度层的磁场分布。在趋肤深度层中,因挤压作用,缺陷区域 A 点的磁场强度将大于非缺陷区域 B 点。如图 2 所示,根据铁磁性材料磁导率 μ 与磁场强度 H 的非线性关系,趋肤深度层中缺陷与非缺陷区域将形成不同的磁导率分布。进一步,根据式(1),不同的磁导率将形成不同的热量和温度场分布,最终将管道内表面裂纹与管道外表面温度场分布之间建立直接对应联系。由于新方法是利用趋肤深度层磁导率差异产生的表面温度变化来直接表征管道内表面缺陷,因此新方法可以突破内表面缺陷检测能力限制,可应用于管道生产过程中的内表面裂纹缺陷在线检测。

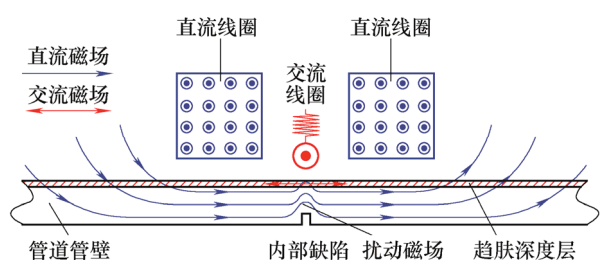


图 1 基于偏置磁化的管道内表面裂纹涡流热成像检测原理

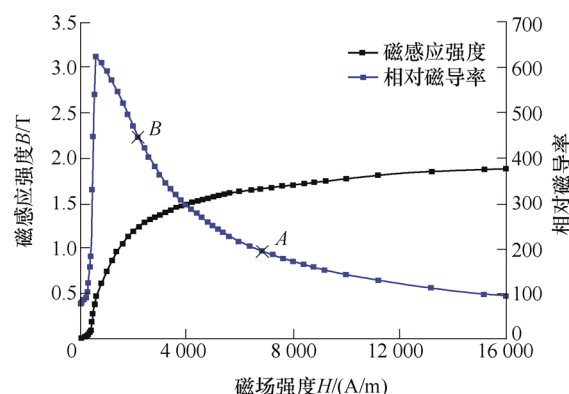


图 2 45 号钢 $B-H$ 曲线与 $\mu-H$ 曲线

2 偏置磁化下磁导率分布仿真分析

管道内表面缺陷引起管道外表面趋肤深度层磁导率发生变化是新方法的基础。为获得缺陷引起的磁场强度分布与磁导率变化规律,采用 ANSOFT 有限元仿真软件对不同埋藏深度内表面缺陷进行分析。建立如图 3 所示的仿真模型,具体尺寸如图中所示。亥姆霍兹线圈对管道进行偏置磁化,管道壁厚为 7.0 mm。根据管道探伤标准^[19],在管道内表面设置宽度均为 1.0 mm 而埋藏深度不同的刻槽,模拟内表面裂纹。仿真采用轴对称模型,管道材料为 45 号钢,采用如图 2 所示 $B-H$ 曲线。直流激励线圈材料为铜,激励线圈中通入电流的密度为 $1 \times 10^6 \text{ A/m}^2$,将管道磁化至近饱和状态。网格划分时,最大网格尺寸设置为 0.2 mm。

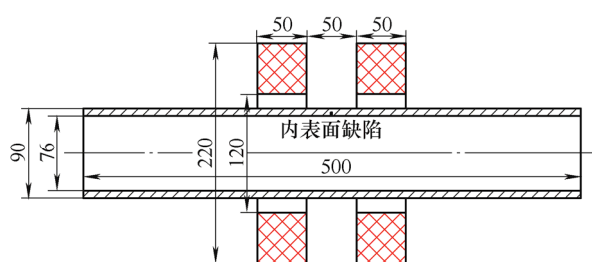


图 3 管道偏置磁化有限元仿真几何模型(单位: mm)

首先,仿真获得管道中无内表面裂纹缺陷时磁力线分布,如图 4 所示。从图中可以看出,由于管道具有高磁导率且无缺陷,磁力线基本被吸引入管道管壁区域内,且在管壁中呈现均匀分布状态。

为研究内表面裂纹缺陷对管壁内磁场分布的影响,设置不同埋藏深度的刻槽进行仿真。埋藏深度 d_b 定义为内表面刻槽顶端与外表面的距离。分别取埋藏深度 d_b 为 6.0 mm、5.0 mm、4.0 mm、3.0 mm 和 2.0 mm,仿真获得内表面裂纹引起的磁力线分

布, 将缺陷区域放大如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 在内表面裂纹缺陷的作用下, 磁力线被挤压, 更多的磁力线从裂纹缺陷上方通过, 从而使得管壁内磁场分布发生变化, 并且埋藏深度越小的缺陷造成扰动越明显。

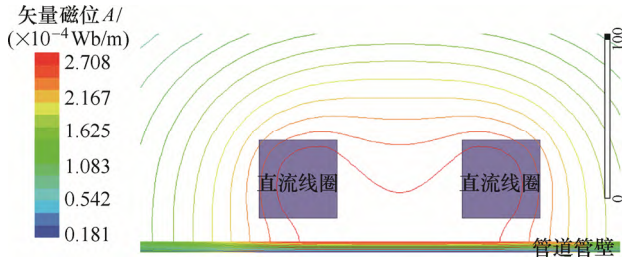


图 4 无缺陷管道磁力线分布

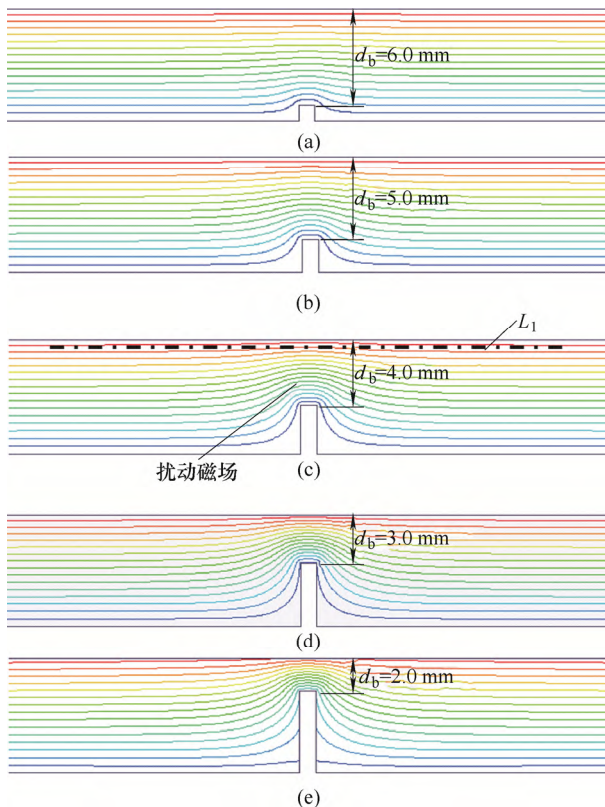


图 5 不同埋藏深度缺陷引起的畸变磁力线分布

为获得不同埋藏深度内表面缺陷造成的磁场扰动量化分布规律, 如图 5c 所示, 在管道外表面趋肤深度层内设置直线 L_1 , 其与管道外表面距离为 0.1 mm, 以裂纹缺陷为中心, 长度设置为 20 mm。沿直线 L_1 拾取不同埋藏深度裂纹缺陷引起的磁场分布, 如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 由于缺陷造成的磁力线挤压作用, 管道趋肤深度层内磁场强度出现变大现象, 尤其是裂纹缺陷正对区域磁场强度最大。另外, 埋藏深度越浅, 造成的磁场变化越大,

其中埋藏深度 2.0 mm 缺陷形成的磁场最强。

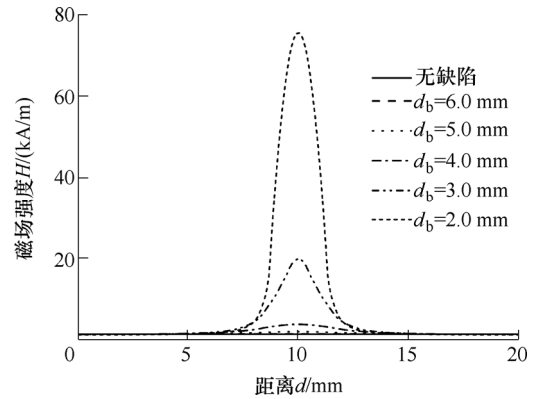


图 6 不同埋藏深度缺陷引起的畸变磁场分布

进一步, 仿真分析缺陷引起的扰动磁导率分布规律。沿着 L_1 拾取不同埋藏深度缺陷对应区域的磁感应强度 B 与磁场强度 H 。根据磁导率公式($\mu=B/H$), 计算获得如图 7 所示的扰动磁导率分布。可以看出埋藏深度越浅的缺陷对应区域的磁导率越低, 如埋藏深度 2.0 mm 的缺陷引起的管道表面区域磁导率最小。该结论可以从图 2 中的非线性曲线 $\mu-H$ 获得。从本质上讲, 只要缺陷区域与非缺陷区域能够形成温度场差异, 即可实现缺陷的有效检测。直流偏置磁化后, 内表面缺陷在 A 点形成的磁导率与非缺陷区域 B 的磁导率不同, 进一步根据式(1)可产生不同的温度场分布。另外, 不同埋藏深度内表面缺陷在趋肤深度层内形成了不同的磁导率分布, 从而为识别不同埋藏深度缺陷奠定了基础。

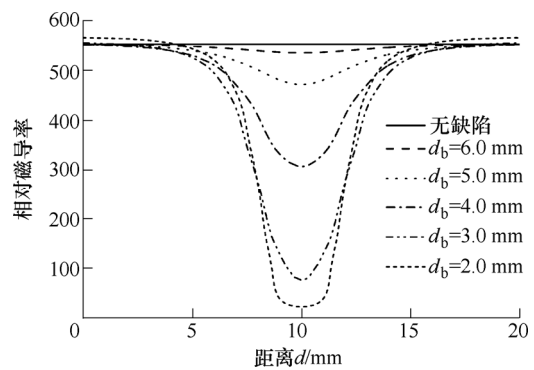


图 7 不同埋藏深度缺陷引起的扰动磁导率分布

3 管道自动化涡流热成像检测试验

进一步设计开发管道偏置磁化涡流热成像检测系统, 进行试验验证。与钢板检测不同, 管道为圆柱形细长铁磁构件。为实现对管道的圆周方向 360° 全覆盖检测, 直流偏置磁化器与高频交变激励

线圈需满足以下要求：① 磁化场范围需覆盖 360° 圆周方向；② 磁化场分布需均匀，以保证检测一致性；③ 直流磁化场强度足以磁化钢管，且强度可调，使适应不同管径与壁厚。为此，设计了如图 8 所示的管道偏置磁化涡流热成像检测方案，直流偏置磁化器由电流强度可调的亥姆霍兹线圈构成。高频感应加热器放置于亥姆霍兹线圈中间位置，为环形铜管。管道在传输轮驱动下做直线运动，恒速通过加热线圈。四个热像仪放置于加热线圈之后，均匀布置在管道圆周方向。当管道内部存在裂纹缺陷时，磁导率畸变会在管道表面形成非均匀温度场分布，并及时被热像仪拾取，通过分析温度场分布即可实现管道缺陷自动化检测。

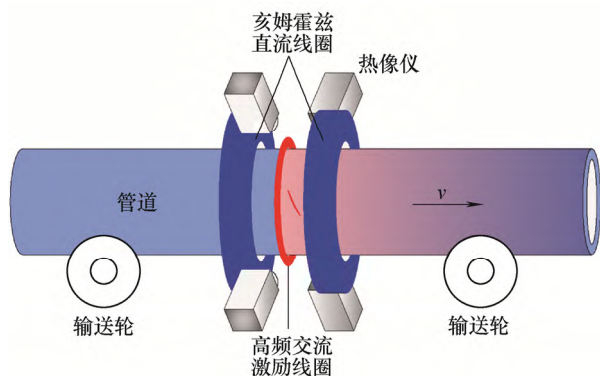


图 8 管道偏置磁化涡流热成像自动化检测方案

根据图 8 所示系统方案，开发如图 9 所示的管道偏置磁化涡流热成像自动化检测系统，主要包括直流偏置磁化器、高频交流磁化器、热成像系统、被测管道以及可变速传输装置。直流偏置磁化器由亥姆霍兹线圈以及直流电源组成，单根线圈直径为 1.7 mm，线圈匝数为 3 000，直流电强度为 20 A 时可将管道磁化至饱和状态。高频加热线圈为中空铜管，外径为 6.0 mm，中间有冷却循环水通过，环形加热器内径为 80.0 mm，加热线圈与管道外表面脱离距离为 5.0 mm。交流电源为 EASYHEAT 0112，检测过程中高频交流电有效值设置为 380 A，频率为 256 kHz。局部放大直流偏置磁化器与高频交流磁化器如图 10 所示。管道在输送轮作用下匀速前进，经涡流感应加热后表面温度升高，缺陷处会形成非均匀温度分布，之后由热成像拾取并在计算机中存储、处理与显示。热成像型号为 FLIR A655sc，光谱范围为 $7.5\sim 14.0\ \mu\text{m}$ ，采集频率为 200 Hz，分辨率为 640 像素 \times 120 像素。

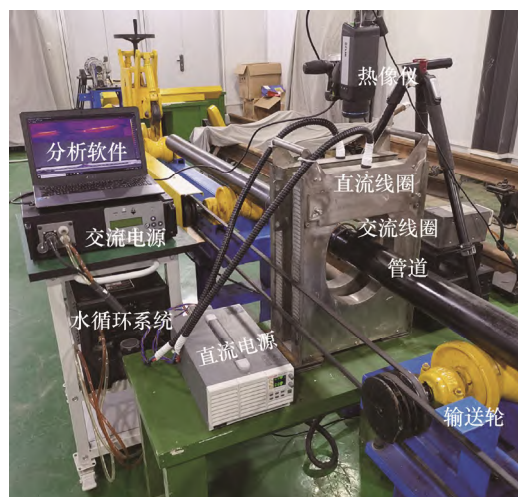


图 9 管道偏置磁化涡流热成像检测系统



图 10 直流偏置磁化器与高频交流磁化器

管道材料为 45 号钢，外径 70.0 mm，内径 56.0 mm，长度 3.6 m。为验证新方法的管道内表面裂纹缺陷检测能力，与仿真模型参数相同，在管道中刻制了不同埋藏深度的内表面裂纹缺陷(图 11)。制作方法如下：利用电火花线切割机将管道剖开，利用电火花雕刻机夹持宽度为 1.0 mm 的石墨片在管道内表面刻制不同深度的刻槽，具体尺寸如表 1 所示，之后将管道焊接复原，形成具有不同埋藏深度内表面裂纹缺陷的管道样管。

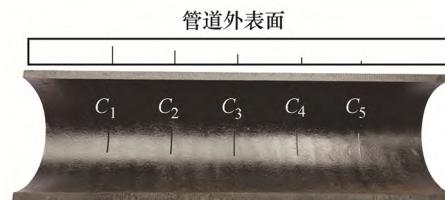


图 11 不同埋藏深度内表面缺陷试样

表 1 缺陷尺寸

缺陷编号	长/mm	宽/mm	埋藏深度/mm
C ₁	20.0	1.0	2.0
C ₂	20.0	1.0	3.0
C ₃	20.0	1.0	4.0
C ₄	20.0	1.0	5.0
C ₅	20.0	1.0	6.0

图 12 所示为管道通过热激励装置时由热成像仪拾取的实时典型温度图像。可以看出管道沿移动方向依次经历了常温、升温 and 降温阶段, 其中在交流线圈附近温度最高。由于直接成像区域处于不同的热阶段, 无法明显识别缺陷区域与非缺陷区域的温度场有何不同。为此, 开展运动热图像重构处理, 如图 12 所示, 在钢管匀速移动过程中, 对热像仪依次拾取的每帧图像进行提取处理, 均沿交流线圈下方提取线 L_2 , 提取温度分布并按照采集顺序进行依次拼接, 以保证重构图像中所有区域均处于相同的加热时刻。

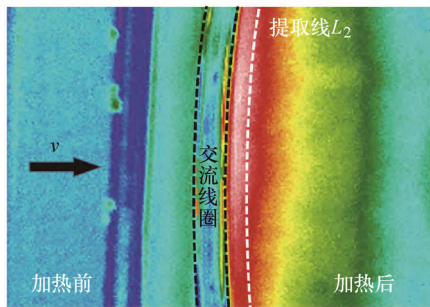


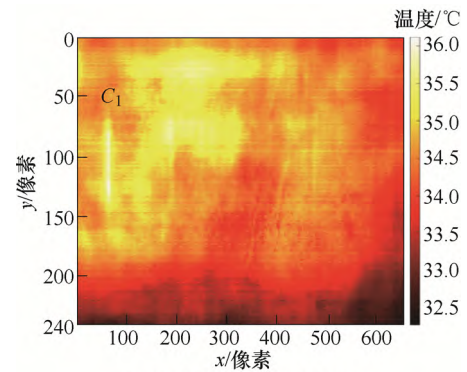
图 12 管道自动化检测的实时典型温度图像

首先, 在相同运动速度下(20 mm/s), 对比分析传统涡流热成像与偏置磁化涡流热成像检测效果。图 13a 为偏置磁化电流强度为 0 A 时拼接处理后的重构图像, 即传统涡流热成像方法检测结果。可以看出, 除裂纹缺陷 C_1 以外, 其余缺陷均无法明显识别。由于高频涡流趋肤效应限制, 内表面缺陷不能对涡流分布造成影响, 因此不能进一步形成不同的温度场响应。 C_1 缺陷处产生明显的温度升高的原因是, C_1 埋藏深度较小, 管道表面热量传导至内部缺陷处产生反射, 进而在管道表面形成热量集中现象, 形成高温响应。

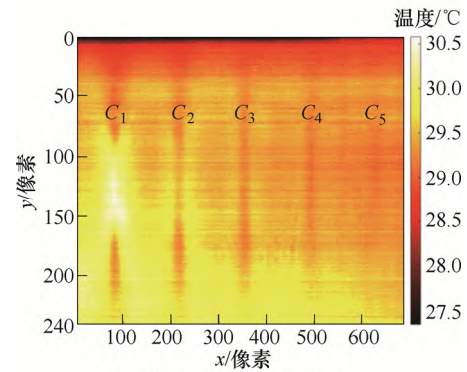
图 13b 为偏置磁化电流强度为 20 A 时的重构图像。可以看出, 裂纹 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 处形成了明显的温度场差异, 特别地, 裂纹 $C_2 \sim C_5$ 区域中间位置温度较低。究其原因, 如图 6 和图 7 仿真结果所示, 由于内表面裂纹缺陷的存在, 引起中间位置磁场强度最大, 磁导率最低, 根据式(1), 更低的磁导率将产生更小的热量和温度响应。缺陷 C_1 同时受磁导率与热反射效应的影响, 在两侧出现低温区域, 在中间位置产生高温响应。因此, 在偏置磁化作用下内表面裂纹引起的磁导率扰动效应, 可以突破内表面缺陷热成像检测能力限制, 具有重要意义。

此外, 如图 13a、13b 所示, 当偏置磁化电流分别为 0 A 和 20 A 时, 管道加热后最高温度分别为 36 °C 和 30.5 °C 左右。原因在于直流偏置磁化降低

了整体管道的磁导率, 从而减弱了加热效果。



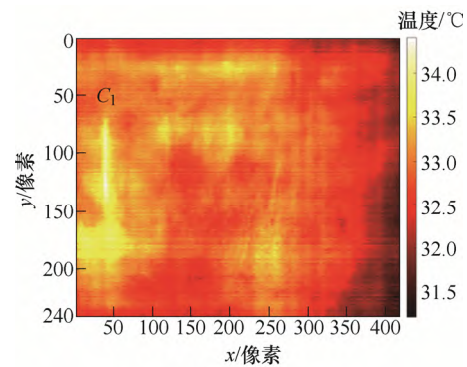
(a) 偏置磁化电流强度为 0 A



(b) 偏置磁化电流强度为 20 A

图 13 管道内表面裂纹检测结果($v = 20$ mm/s)

进一步, 研究检测速度对涡流热成像检测的影响。分别针对传统涡流热成像与偏置磁化涡流热成像进行不同速度下的检测对比试验。图 14 为传统涡流热成像(磁化电流 0 A)在 30 mm/s、90 mm/s、150 mm/s 速度下的检测结果。可以看出, 随着检测速度不断增加, 加热温度降低, 缺陷 C_1 造成的温度差异逐渐变弱, 导致检测效果变差。另外, 速度增加会导致热图像更加模糊。图 15 为不同速度下偏置磁化涡流热成像的检测效果。同样, 随着检测速度增加, 裂纹检测效果变差。然而, 在 150 mm/s 的速度下仍可明显识别埋藏深度为 5.0 mm 的内表面裂纹 C_4 。因此, 相对于传统涡流热成像方法, 新方法具有更好的检测效果。



(a) 运行速度 $v=30$ mm/s

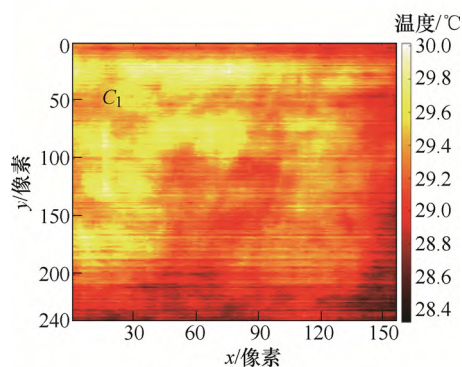
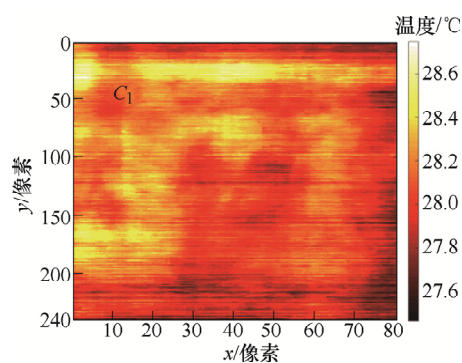
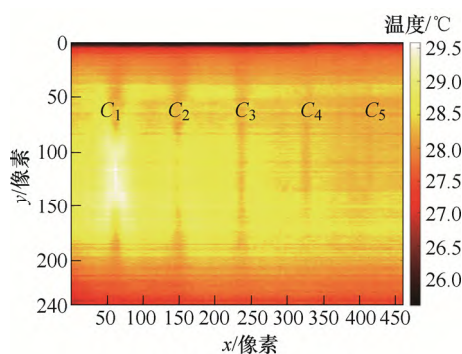
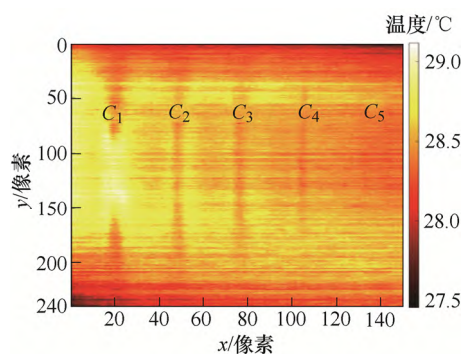
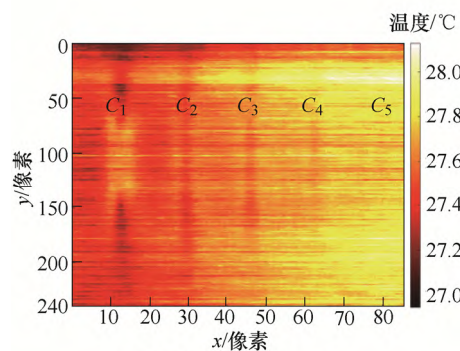
(b) 运行速度 $v=90$ mm/s(c) 运行速度 $v=150$ mm/s图 14 不同速度传统涡流热成像检测结果
(电流强度 0 A)(a) 运行速度 $v=30$ mm/s(b) 运行速度 $v=90$ mm/s(c) 运行速度 $v=150$ mm/s

图 15 不同速度偏置磁化涡流热成像检测结果(电流强度 20 A)

4 结论

(1) 本文针对管道内表面缺陷检测能力限制问题,提出了基于直流偏置磁化的涡流热成像检测方法,为实现全周 360° 全覆盖检测,设计了基于亥姆霍兹线圈的直流偏置磁化器,通过产生轴向磁化,在内表面裂纹缺陷与表面磁导率扰动分布之间建立关联联系,为内表面裂纹的涡流热成像检测奠定基础。

(2) 设计与开发了管道偏置磁化涡流热成像自动化检测系统,并提出了基于相同热激励过程的管道温度图像重构方法。通过试验发现,内表面裂纹缺陷区域产生了明显的低温效应分布特征,证明了新方法检测内部缺陷具有可行性,且可以通过温度场响应来识别不同埋藏深度的内表面裂纹缺陷。

(3) 检测速度会影响管道检测效果。随着检测速度的增加,相同激励条件下会产生更少的热量,从降低缺陷可识别性。偏置磁化涡流热成像方法在 150 mm/s 速度下仍可识别埋藏深度为 5.0 mm 的内表面裂纹。另外,由于相机采样频率限制,速度增加会影响热成像效果。

(4) 本文研究主要针对管道圆周方向缺陷进行研究。然而,在实际生产过程中,管道中还存在轴向缺陷、斜向缺陷,需要进行后续分析。同时,管道直径、管道壁厚、运行速度等对检测的影响也需要进一步讨论。

参 考 文 献

- [1] WU Jianbo, FANG Hui, WANG Jie, et al. The influence of non-uniform wall thickness on the MFL testing for pipeline[J]. Insight, 2015, 57(12): 703-708.
- [2] 王哲. 考虑表面粗糙度的钢管和钢球超声检测工艺与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

- WANG Zhe. Research on ultrasonic inspection technology and system for steel pipes and balls considering surface roughness[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [3] 伍剑波, 王杰, 康宜华, 等. 感生磁场对高速运动钢管磁化的影响机理[J]. 机械工程学报, 2015, 51(18): 7-12.
- WU Jianbo, WANG Jie, KANG Yihua, et al. Influence mechanisms of the induced-magnetic field on the magnetization of steel pipe at high speed[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(18): 7-12.
- [4] 孙燕华, 康宜华, 石晓鹏. 基于单一轴向磁化的钢管高速漏磁检测方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 8-13.
- SUN Yanhua, KANG Yihua, SHI Xiaopeng. High-speed mfl testing method for steel pipe under unidirectional axial magnetization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 8-13.
- [5] 康宜华, 伍剑波. 钢管漏磁自动无损检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- KANG Yihua, WU Jianbo. Magnetic flux leakage testing of steel pipe[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [6] CHENG Liang, GAO Bin, TIAN Guiyun, et al. Impact damage detection and identification using eddy current pulsed thermography through integration of PCA and ICA[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(5): 1655-1663.
- [7] HUANG Danping, LI Kongjing, TIAN Guiyun, et al. Thermal pattern reconstruction of surface condition on freeform-surface using eddy current pulsed thermography[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016(251): 248-257.
- [8] LI Kongjing, TIAN Guiyun, CHENG Liang, et al. State detection of bond wires in IGBT modules using eddy current pulsed thermography[J]. IEEE Trans. Power Electr., 2014, 29(9): 5000-5009.
- [9] NETZELMANN U, WALLE G, EHLEN A, et al. NDT of railway components using induction thermography[C]// AIP Conference Proceedings. 42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE): Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability of NDE, July 26-31, 2015, Minneapolis, Minnesota, 2016, 1706(1): 150001. doi: 10.1063/1.4940613.
- [10] 田贵云, 何赞泽, 高斌, 等. 电磁无损检测传感与成像[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- TIAN Guiyun, HE Yunze, GAO Bin, et al. Electromagnetic nondestructive testing sensing and imaging[M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [11] OSWALD-TRANTA B, SORGER M. Detection of subsurface defects in aluminium with thermo-inductive inspection[J]. Proc. SPIE 8013, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIII, 2011, 8013: 801310.
- [12] HE Y, PAN M, TIAN G Y, et al. Eddy current pulsed phase thermography for subsurface defect quantitatively evaluation[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(14): 4108.
- [13] YANG R, HE Y. Logarithmic analysis of eddy current thermography based on longitudinal heat conduction for subsurface defect evaluation[J]. Infrared Physics & Technology, 2014(67): 467-472.
- [14] LI X, GAO B, ZHU Y, et al. Periodic pulsed thermography for inner defects detection of lead-steel bonded structure[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(11): 4679-4688.
- [15] XU C, ZHOU N, JING X, et al. Investigation on eddy current pulsed thermography to detect hidden cracks on corroded metal surface[J]. NDT & E International, 2016(84): 27-35.
- [16] WU Jianbo, ZHU Junzhen, XIA Hui, et al. DC-biased magnetization based eddy current thermography for subsurface defect detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6252-6259.
- [17] WU Jianbo, ZHU Junzhen, TIAN Guiyun. Depth quantification of surface-breaking cracks in ferromagnetic materials using DC-biased magnetization based induction thermography[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020(141): 106719.
- [18] VRANA J, GOLDAMMER M, BAILEY K, et al. Induction and conduction thermography: optimizing the electromagnetic excitation towards application[C]// AIP Conference Proceedings. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Proceedings of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, July 22-25, 2008, Univ Chicago, Chicago, IL, 2009, 1096: 518-525. DOI: 10.1063/1.3114299.
- [19] API. EN ISO 3183-2019 Petroleum and nature gas industries-Steel pipe for pipeline transportation systems[S]. Washington DC: American Petroleum Institute, 2008.

作者简介: 伍剑波(通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为涡流热成像检测、漏磁检测、巴克豪生噪声检测。

E-mail: wujianbo@scu.edu.cn

康宜华, 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为漏磁、超声、电磁超声等无损检测新技术研究和数字化、自动化无损检测装备开发。

E-mail: yihuakang@hust.edu.cn