文章编号:1001-5078(2021)03-0333-06

·红外技术及应用 ·

小径管内壁缺陷的涡流热成像定量检测

王勇勇1,孙全德2,王恪典3,原 鹏1

(1. 新疆大学机械工程学院,新疆 乌鲁木齐 830047;2. 新疆维吾尔自治区特种设备检验研究院,新疆 乌鲁木齐 830047;3. 西安交通大学机械工程学院,陕西 西安 710049)

摘 要:管道内壁腐蚀对化工企业的安全生产造成重大隐患,因此对于内壁腐蚀缺陷深度的预 估极其重要。本文采用涡流热成像技术对内壁不同深度的腐蚀缺陷进行检测与评估。利用 COMSOL 建立不同深度缺陷的3维有限元模型,提取不同深度缺陷在冷却阶段温度信号,并进 行数据归一化处理,分析缺陷深度对于热传导影响。同时,通过实验对数值模拟分析结果进行 验证,并提出以瞬态温度衰减信号的积分值为特征量预估腐蚀缺陷的深度。结果表明:缺陷深 度越深,冷却阶段温度衰减速率越快,瞬态温度衰减信号的积分值越小。对于壁厚4 mm 的小 径管,可以从原始热图像中可识别直径6 mm,最小深度为1.5 mm 腐蚀缺陷。 关键词:小径管;涡流热成像;缺陷检测;缺陷深度

中图分类号:TN219 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2021.03.013

Quantitative detection of inner defects of small diameter tube by eddy current thermal imaging

WANG Yong-yong¹, SUN Quan-de², WANG Ke-dian³, Yuan Peng¹

(1. College of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Special Equipment Inspection and Research Institute, Urumqi 830047, China;

3. College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiao Tong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The inner wall corrosion of pipeline causes great serious problems to the safety production of chemical enterprises, so it is very important to estimate the inner wall corrosion defect depth. Eddy current thermal imaging technology is used to detect and evaluate the corrosion defects in different depths of the inner wall. COMSOL was used to establish 3D finite element models of defects with different depths, and temperature signals of defects with different depths were extracted during the cooling stage. Through data normalization method, the influence of defect depth on heat conduction was analyzed. At the same time, the numerical simulation results were verified by eddy current thermal imaging experiment, and the depth of corrosion defects was estimated by using the integral value of transient temperature attenuation signal as the characteristic quantity. The results show that the deeper the defect depth, the faster the temperature attenuation rate in cooling stage and the smaller the integral value of temperature attenuation signal in transient state. At the same time, for the 4 mm pipe with a wall thickness, the corrosion defect with a diameter of 6 mm and a minimum depth of 1.5 mm can be identified from the original thermal image.

Keywords: small diameter tube; eddy current thermal imaging; defect detection; defect depth

基金项目:新疆维吾尔自治区科技援疆项目(No. 2019E0239);新疆维吾尔自治区自然基金项目(No. 2020D01A104)资助。 作者简介:王勇勇(1994 –),男,硕士,从事红外无损检测研究。E-mail:513913238@ qq. com 收稿日期:2020-07-09

1 引 言

压力管道被广泛应用于石油、天然气、化工原料 的输送。由于输送介质大多具有腐蚀性,容易导致 管道内壁出现局部腐蚀缺陷,造成管道穿孔、泄露、 减薄等安全隐患。为确保压力管道安全运行,避免 重大安全生产事故的发生,对管道内壁腐蚀缺陷的 深度的定量评估至关重要。

压力管道中小径管是指外径 57~89 mm,壁厚 3~8 mm 的管子。目前对于小径管缺陷的无损检测 手段主要有涡流、超声、射线等检测手段^[1]。由于 小径管曲率大、壁厚薄,导致常规无损检测手段在对 内壁缺陷检测时具有一定局限性。射线法多采用椭 圆透射工艺,由于管径小,射线束与裂纹夹角往往大 于11°,造成缺陷拍摄不清晰,容易漏检^[2]。超声检 测受管道曲率的影响,造成超声波能量的损失,降低 缺陷检测的灵敏度,特别是对于尺寸较小的缺陷。

红外热成像技术作为一种新兴高效的无损检测 手段,具有检测面积大、检测速度快、非接触、灵敏度 高、缺陷信息直观准确等优点[3]。此前红外热成像 检测多用于铁轨表面 RCF 裂纹、金属腐蚀,以及复 合材料裂纹、冲击损伤等缺陷检测[4-8]。涡流热成 像(Eddy Current Pulsed Thermography, ECPT) 是一 种主动热激励检测方法,基于电磁学中的涡流现象 与焦耳热现象,在对金属内壁腐蚀缺陷的检测具有 潜在的有效性。近几年部分国内外研究学者,将红 外热成像技术应用于内部缺陷的检测,并提出多种 方法定量缺陷深度。例如,王卓^[9]等人利用缺陷与 非缺陷区域灰度均值的差值与缺陷深度的关系,建 立了对于缺陷深度检测拟合模型。He^[10]等人利用 峰值时间与剩余厚度线性关系,建立缺陷深度与峰 值时间线性拟合曲线来预估缺陷深度。Lahiria^[11] 等人利用缺陷区域与非缺陷区域衰减速率的不同拟 合出用于定量未知缺陷深度曲线。Rui^[12]等人利用 对数分析法将温度转化到对数域内分析,通过分析 缺陷的深度与分离时间线性关系,来量化缺陷的深 度。Wang^[13]等人提出利用高斯变换将峰值对比度 时间与缺陷深度之间的非线性关系转化为线性,并 通过实验验证了修正后的线性关系能更准确地定量 缺陷深度。以上在对于缺陷大小定量方面,大多利 用缺陷点与无缺陷点最大热对比度、峰值时间为特 征量对缺陷深度定量,且研究对象多为金属板试件 的检测,对于小径管内壁腐蚀缺陷的研究较少。

针对这一问题,本文采用涡流热成像技术,通过 数值模拟与实验相结合,分析不同深度缺陷对温度 信号的影响,提取冷却阶段温度信号,利用温度衰减 信号与时间围成的面积作为特征量定量缺陷的 深度。

2 脉冲涡流热成像检测原理

如图 1 所示涡流热成像检测原理:依据电磁学 中电磁感应定律,当感应线圈中通入高频交变电流 时,在靠近激励线圈的铁磁性导电材料将会感应出 电涡流,涡流产生的热辐射将被红外摄像仪接收。 依据焦耳定律可知,涡流在被测件中转换成焦耳热, 由于受趋肤效应的影响,热量主要集中材料表面,然 后通过热传导从向材料内部温度较低地方传播,以 达到热平衡。如果材料中存在缺陷时,会阻碍涡流 分布和热传导过程。因此,通过红外热像仪观察试 件表面温度图像分布,可以实现缺陷的检测。





Fig. 1 Schematic diagram of eddy current thermal imaging

3 感应加热数学模型

在电涡流脉冲热成像检测中,激励电流在导体 内产生感应涡流会存在趋肤效应,由式(1)可以 计算:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma \mu f}} \tag{1}$$

式中,f为激励电流的频率; σ 为被测件的电导率; μ 为材料磁导率。

由于材料本身的电阻,当涡流在铁磁性材料的 流动过程中将产生热量,而这些热量受趋肤效应的 影响主要集中在材料表面,依据焦耳定律可知,导体 内的涡流产生热量用 Q 可以表示为:

$$Q = \frac{1}{\sigma} |j_c|^2 = \frac{1}{\sigma} |\sigma E|^2$$
(2)

其中, j_e 为线圈电流密度; E 为电场强度。

从式(2)可知,产生的热量 Q 与被测试件电场 强度和线圈电流密度呈正比。由于产生热量受趋肤 效应的影响热量主要集中在材料表面施加于材料的 表面,然后逐渐从加热区域传导到材料内部温度较 低的地方,以达到热平衡,热传导方程可表示为:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla (k \nabla T) = Q$$
(3)

其中, ρ 为材料密度; C_p 为材料比热容; ρ 为热传导 系数;T是被测试件表面的温度;k为材料的导热 系数。

被测试件表面热量以热波的形式随时间 t 向材 料内部传播一定深度,这个深度被定义为热透入深 度,用 σ_{th} 表示为:

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \tag{4}$$

其中,*t*为记录的时刻; α为材料的热扩散系数可表 示为:

$$a = k/\rho C_p \tag{5}$$

由此可见,电涡流脉冲热成像检测缺陷的能力 取决于材料趋肤效应与热透入深度。例如,铁磁性 材料趋肤深度在频率100 kHz时为0.04 mm, 200 kHz为0.03 mm,非铁磁材料如铝,其趋肤深度 在100 kHz时约为0.34 mm。由于实验试件采用铁 磁性材料,趋肤深度较小,加热方式为近表面加热。

4 数值模拟分析

4.1 建立模型

利用 COMSOL Multiphysics 建立如图 2 所示有 限元模型,分析缺陷深度对温度信号的影响。试件 尺寸为外直径 60 mm,壁厚 4 mm,长 200 mm 半圆形 钢管。在管道内壁存在不同深度与面积的腐蚀缺 陷,缺陷直径 D 为 6 mm,深度 H 为 1 ~ 3 mm。采用 380 A 激励电流,激励频率 256 kHz,由于实验过程 中加热阶段存在一定延迟时间,所以数值模拟采用 加热 260 ms,冷却至 600 ms,激励线圈提离 1 mm,数 值模拟的采用材料参数如表 1 所示。

4.2 数值模拟结果分析

如图 3 所示,不同深度缺陷在加热阶段与冷却阶段的表面温度分布,从图中可以看出在在加热阶段 250 ms 时,虽然可以观察到缺陷位置,但对于深度较小的缺陷,难以检测出缺陷的大小。在冷却阶段 500 ms时,由于缺陷区域相比无缺陷区域具有更高温

度,可以发现缺陷位置与面积轮廓信息更为明显,对 于缺陷深度小于2 mm 缺陷,对于纵向热传导影响较 小,在热图像中难以准确识别缺陷的大小。同时,分 析得出对于铁磁性材料,在冷却阶段对内壁缺陷的定 量分析较为合适,这为下一步实验提供指导。

表1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料参数	空气	铜	锅
电导率/(S・m ⁻¹)	1	5.998×10^{7}	4.68×10^6
相对磁导率	1	1	60
比热容/(J・kg ⁻¹ ・K ⁻¹)	1.005×10^2	385	475
密度/(kg・m ⁻³)	1.205	8940	7850
热导率/(W・m ⁻¹ ・K ⁻¹)	0.0257	400	44.5





为进一步分析缺陷深度对于温度信号影响,如 图4所示提取不同深度缺陷中心处温度变化曲线, 截取冷却阶段温度衰减信号,并进行数据归一化处 理如图5所示,从图中可以看出缺陷深度越深,温度 衰减越快。其原因为缺陷深度越深,则剩余壁厚越 小,缺陷处温度的热散耗越大,导致温度衰减速率 越快。



Fig. 4 Temperature curves of defects at different depths



5 涡流热成像实验分析

5.1 实验装置

涡流热成像实验系统如图6所示,激励线圈采 用感应加热系统(Easyheat 224, Ambrell)。该激励 系统最大励磁功率为2.4 kW,最大电流为400 A, 励磁频率范围为150 kHz~400 kHz。实验中采用 Flir 红外热像仪记录试件热信号分辨率为786 × 562,采样频率60 Hz,灵敏度为20 mK,试验中使 用的激励线圈,由直径为6.00 mm 的空心铜管制 成。实验采用加热时间为0.3 s,摄像机记录时间 为1.5 s。



图 6 涡流热成像试验系统 Fig. 6 Eddy current thermal imaging test system

实验采用的缺陷试件如图 7 所示,小径管外直 径为 60 mm,长度 200 mm,试件内壁加工 5 个不同 深度的人工孔缺陷,缺陷之间距离相等,缺陷直径 D 为 6 mm,深度 H 为 1 ~ 3 mm。



5.2 实验结果分析

如图 8 为所示缺陷深度 1~3 mm 在加热阶段 0.3 s 与冷却阶段 0.5 s、1 s 时表面热图像,从图中 可以看出,在加热阶段从热图像中仅可以识别出深 度 2.5 mm 与 3 mm 的缺陷,而对于深度较小的缺陷 难以检测。在冷却阶段 0.5 s 时,对于深度大于 1.5 mm的缺陷,可以从热图像中观察到缺陷的轮廓 信息,由于横向热传导影响,导致检测缺陷面积大于 实际缺陷面积,并随着冷却时间增加,缺陷的轮廓信 息逐渐变模糊。对于深度 1 mm 的缺陷,对纵向热 传导影响较小,且实验过程中受外界环境与不均匀 加热的影响,导致缺陷区域与无缺陷区域热对比度 较低,难以从红外热图像中观察到缺陷的位置。

如图 9 所示,提取沿缺陷水平方向线段 1 位置, 在冷却阶段 0.5 s 时缺陷深度 1 mm、1.5 mm、2 mm 温度变化值。从图可以看出,对于缺陷深度 1 mm 缺陷,在线段 1 处温度变化比较平缓,缺陷区域与无 缺陷区域热对比度较小,没有缺陷导致的明显的温 度突变,因此难以在热图像中观察到缺陷的位置。

从数值模拟与实验结果分析得出,对于深度较 小的缺陷,在冷却阶段缺陷深度信息较为明显,如图 10 所示,提取部分冷阶段温度衰减信号,得到与数 值模拟结果具有相同趋势,即缺陷深度越深,冷却阶段温度衰减越快,但由于实验过程中受室内环境温度与提离效应影响,与数值模拟分析出的温度分布存在一定差异。



图 8 不同深度缺陷的涡流热图像

Fig. 8 Eddy current thermal images of defects at different depths





依据图 10 可以得出缺陷深度越深温度衰减信 号越快,因此可以通过温度衰减信号与时间所围成 面积的不同为特征量预估缺陷深度,如图 11 所示, 缺陷深度越深,温度衰减越快,与时间围成面积越 小。如图 12 所示,采用线性拟合方法,建立缺陷深 度与温度衰减信号积分面积的线性拟合模型,实现

对缺陷深度的预估。



图 10 不同缺陷深度归一化温度信号 Fig. 10 Normalized temperature signals at different defect depths











6 结 论

(1)通过数值模拟与实验数据分析得出相同趋势,缺陷深度越深,冷却阶段温度衰减越快。同时对于铁磁性材料内壁缺陷的检测中发现,在冷却阶段可以从原始热图像中识别出深度较小的缺陷。

(2)利用温度衰减信号与时间所围成面积的不同为特征量,建立缺陷深度与积分面积线性拟合模型,实现对缺陷深度的预估。

(3)在涡流热成像实验中,可以检测出缺陷直径6mm,最小深度1.5mm缺陷,验证该方法对小径管内壁腐蚀检测的有效性。但在实验过程中由于检测线圈对缺陷检测存在遮挡,造成缺陷可视化效果差,后续研究将设计一种激励线圈,提高缺陷检测的可视化。

参考文献:

- [1] Wang Donglin, Wu Gang. Ultrasonic testing and analysis of welding seam of nickel-based alloy pipe with small diameter [J]. Thermal Processing Technology, 2013, 42 (21):204 207. (in Chinese)
 王冬林,武刚. 镍基合金小径管焊缝超声检测探析 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (21):204 207.
- [2] Xiao Xiang. Feasibility analysis of pulsed eddy current thermal imaging for defect detection in thin-walled smalldiameter tubes[C]//Far East Forum on New Nondestructive Testing Technologies, 2015:456-459. (in Chinese) 肖湘. 脉冲涡流热成像在薄壁小径管中缺陷检测可行 性分析研究[C]//远东无损检测新技术论坛, 2015: 456-459.
- [3] Tong Z,Xie S, Liu H. et al. An efficient electromagnetic and thermal modelling of eddy current pulsed thermography for quantitative evaluation of blade fatigue cracks in heavy-duty gas turbines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 142:106781.
- [4] Yi Q, Tian G Y, Malekmohammadi H, et al. New features for delamination depth evaluation in carbon fiber reinforced plastic materials using eddy current pulse-compression thermography[J]. Ndt & E International, 2019, 102: 264 – 273.

- [5] Liang C, Yun T G. Comparison of nondestructive testing methods on detection of delaminations in composites[J]. Journal of Sensors, 2012, 2012:1-7.
- [6] Koyama K, Hoshikawa H, Kojima G. Eddy current nondestructive testing for carbon fiber-reinforced composites
 [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2013, 135 (4):041501.
- [7] Xu C,Zhou N,Xie J, et al. Investigation on eddy current pulsed thermography to detect hidden cracks on corroded metal surface [J]. NDT & E International, 2016, 84: 27-35.
- [8] Wilson J, Tian G, Mukriz I, et al. PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue[J].
 NDT & E international, 2011, 44(6):505 - 512.
- [9] Wang Zhuo, Zhang Yunwei, Yu Yong, et al. Defect depth detection of active thermal excitation infrared thermal imaging pipeline [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38 (9): 201 208. (in Chinese)
 王卓,张云伟,喻勇,等. 主动热激励式红外热成像管 道缺陷深度检测[J]. 光学学报, 2018, 38 (9): 201 208.
- [10] He Y, Pan M, Luo F. Defect characterisation based on heat diffusion using induction thermography testing [J]. Review of Entific Instruments, 2012,83(10):1-10.
- [11] Lahiri, S. Bagavathiappan, C. Soumya, 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.
- [12] 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.
- [13] Wang M, Gao B, Wu T. et al. Defect depth retrieval method based on nonlinear transformation for pulsed thermographic inspection [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 149:106196.