DOI: 10.3901/JME.2020.10.027

基于 ACFM 的奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化 重构方法研究*

袁新安 李 伟 殷晓康 陈国明 赵建明
蒋维宇 张 展 薛瑞琪

(中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心 青岛 266580)

摘要: 奥氏体不锈钢具有良好的耐腐蚀性、高韧性和塑性,在石化特种装备和海洋结构中有着广泛应用。奥氏体不锈钢通常在高温、高压、强腐蚀介质中服役,结构表面可产生各种类型不规则裂纹缺陷,威胁结构安全服役。由于不导磁、弱导电、晶粒粗大的特性,传统无损检测对奥氏体不锈钢表面不规则裂纹检测和评估存在诸多挑战。提出基于交流电磁场检测(Alternating current field measurement, ACFM)技术的奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构方法,建立奥氏体不锈钢不规则裂纹 ACFM 有限元仿真模型,分析不规则裂纹周围电磁场畸变规律,提出垂直方向磁场(垂直于试块方向磁场,称为 B_z)图像梯度场的不规则裂纹表面轮廓可视化重构方法,利用不规则裂纹检测试验验证可视化重构方法的效果。结果表明,ACFM 探头感应电流可在奥氏体不锈钢不规则裂纹端点聚集,聚集电流引起垂直方向磁场 B_z 畸变, B_z 图像梯度场可反映电流聚集位置, B_z 图像梯度场可视化重构方法能够实现奥氏体不锈钢不规则裂纹表面轮廓可视化成像显示及精确评估。

关键词: 交流电磁场检测; 可视化重构; 不规则裂纹; 奥氏体不锈钢

中图分类号: TG156

Visual Reconstruction of Irregular Crack in Austenitic Stainless Steel Based on ACFM Technique

YUAN Xinan LI Wei YIN Xiaokang CHEN Guoming ZHAO Jianming
JIANG Weiyu ZHANG Zhan XUE Ruiqi

(Center for Offshore Engineering and Safety Technology,
China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580)

Abstract: For the advantages of corrosion resistance, high toughness and plasticity, the austenitic stainless steel is widely used in the petrochemical special equipment and offshore structure. The austenitic stainless steel usually services in high temperature, high pressure and corrosive medium environment. Various types of irregular cracks are easily introduced in the surface of the austenitic stainless steel, which threatens the safety of the structure. Due to the property of non-magnetic, weak conductivity and coarse grain, it is still a challenge to detect and evaluate irregular cracks in the austenitic stainless steel using the nondestructive testing (NDT) method. The visual reconstruction method is presented to detect and evaluate the irregular crack in the austenitic stainless steel based on the alternating current field measurement (ACFM) technique. The austenitic stainless steel irregular crack ACFM finite element simulation model is set up. The distorted electromagnetic field around the irregular crack is analyzed. The vertical direction magnetic field (magnetic field perpendicular to specimen, called B_z) image gradient field visual reconstruction method is presented to reconstruct the surface profile of the irregular crack. The irregular crack testing experiments are carried out to verify the efficiency of the visual reconstruction method. The results show that the current field induced by the ACFM probe gathers at the tips of the irregular crack in the austenitic stainless steel. The gathered current makes the vertical direction magnetic field B_z distorted. The B_z image gradient field can reflect the location of the gathered current. The surface profile of the irregular crack can be imaged visually and evaluated accurately by the B_z image gradient field visual reconstruction method.

Key words: ACFM; visual reconstruction; irregular crack; austenitic stainless steel

* 国家重点研发计划(2017YFC0804503)、博士后创新人才支持计划(BX20190386)、中国博士后科学基金(2019M662461)、国家自然科学基金(51574276)、中央高校基本业务经费(18CX05017A)和山东省重点研发计划(2018GHY115026)资助项目。20190420 收到初稿, 20190913 收到修改稿

0 前言

奥氏体不锈钢具有良好的耐腐蚀性、高韧性及机加工性能,在石化特种装备、海洋装备、发电装备等领域有着广泛的应用^[1]。一般地,奥氏体不锈钢在高温、高压、腐蚀介质环境中服役,结构表面很容易产生各类应力腐蚀开裂、疲劳开裂及晶间腐蚀,最终形成走向不规则的裂纹缺陷^[2-3]。不规则裂纹在外力作用下可迅速聚集、扩展,最终引起结构失效,严重威胁结构安全服役^[4]。因此,开展奥氏体不锈钢表面不规则裂纹可视化重构技术研究,及时掌握裂纹扩展形貌信息,对结构的安全评估及维修决策具有重要意义和工程应用价值。

奥氏体不锈钢具有非导磁、弱导电、晶粒粗大的特性,常规磁粉检测、漏磁检测技术无法实施^[5-6]。超声检测主要用于内部缺陷检测,对表层开裂不敏感。此外,由于奥氏体不锈钢内部晶粒粗大,声波反射信号复杂,不利于表面不规则裂纹检测^[7]。渗透检测可用于表面微小裂纹检测,可呈现表面裂纹开口走向,但渗透需要彻底清理奥氏体不锈钢表面附着物、油污及涂层,作业效率低,难以实现现在役检测,渗透剂可造成环境污染。电压降法可依靠注入电流和接触式探针实现结构局部区域裂纹的检测和监测,但探头需要破坏涂层,直接与结构表面接触^[8]。涡流检测是广泛应用的结构表面缺陷无损检测技术,依靠阻抗分析检测并评估缺陷。但是涡流检测容易受到提离扰动影响,对结构表面平整度要求较高^[9-10]。

交流电磁场检测(Alternating current field measurement, ACFM)技术是近年来新兴的电磁无损检测技术,整合了涡流检测和电压降法的优势,利用激励线圈在结构表面感应出均匀电流,当出现裂纹时,电流在裂纹端点聚集,扰动电流引起空间磁场畸变,通过测量缺陷上方畸变磁场,可实现结构表面裂纹的检测和评估^[11-12]。均匀电场的优势,可使探头不易受提离高度影响,在不祛除附着物和涂层(10 mm 厚度以内)情况下实现裂纹检测和评估;ACFM 数学模型精确,可对裂纹长度和深度精确评估^[13]。针对不规则裂纹检测与评估问题,NICHOLSON 等^[14]将 ACFM 技术用于钢轨表面不规则滚动接触疲劳裂纹检测,给出了表面斜裂纹的评估方法。NOROOZI 等^[15]基于 ACFM 技术,利用模糊学习方法对任意剖面裂纹检测和重构。RAVAN 等^[16]给出了任意剖面裂纹周围电磁场扰动规律计算模型,利用有限差分法求解裂纹内部区域电磁场解析解。PASADAS 等^[17]研究

了均匀电流激励下铝板试块表面不规则裂纹周围电流扰动规律,提出了 Tikhonov 归一化表面裂纹可视化反演方法。LI 等^[18]基于脉冲均匀涡流技术,借助特征信号梯度场实现铝板埋深缺陷的可视化成像显示。课题组在前期研究中提出旋转交流电磁场的任意走向裂纹检测方法,实现任意走向裂纹的高灵敏度检出^[19-20]。以上研究为不规则裂纹检测和评估奠定基础,但针对奥氏体不锈钢不规则裂纹表面轮廓可视化重构方法研究和报道较少。

针对奥氏体不锈钢表面不规则裂纹检测和评估问题,本文提出基于 ACFM 技术的奥氏体不锈钢表面不规则裂纹可视化重构方法,通过仿真模型分析不规则裂纹周围电磁场畸变规律,提出垂直方向磁场 B_z 图像梯度场的不规则裂纹表面轮廓可视化重构方法,开展 ACFM 奥氏体不锈钢不规则裂纹检测试验,利用 B_z 图像梯度场可视化重构方法实现不规则裂纹表面轮廓可视化成像显示和精准评估。

1 不规则裂纹仿真模型

1.1 模型建立

利用 ANSYS 有限元仿真软件建立奥氏体不锈钢不规则裂纹 ACFM 仿真模型,如图 1 所示。仿真模型中主要由激励线圈、U 型磁芯、试块和不规则裂纹组成,激励线圈在 U 型磁芯的横梁上缠绕 500 圈,不规则裂纹位于激励线圈下方。

图 1 奥氏体不锈钢不规则裂纹 ACFM 仿真模型

仿真模型及试验试块选用奥氏体不锈钢 316L, U 型磁芯为锰锌铁氧体,激励线圈为铜线,其余介质环境为空气,仿真模型材料参数见表 1。不规则裂纹由四段同样长度(20 mm)裂纹组成,裂纹深度均为 3 mm,裂纹角度分别与扫查方向呈 0° , 30° , 60° 和 90° 。

表 1 仿真模型参数

模型 参数	介质 环境	激励 线圈	U 型 磁芯	不锈钢 试块
电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	0.5×10^4	1.7×10^{-8}	1.9×10^{-6}	7.4×10^{-7}
相对磁导率 μ_r	1.0	1.0	2 000	1.1

1.2 电磁场仿真分析

将频率 2 kHz 幅值 5 V 的正弦激励信号加载至激励线圈上, 激励线圈在奥氏体不锈钢表面感应出均匀电流场。提取试块表面感应电流矢量图, 如图 2 所示。在无缺陷区域, 感应电流呈现均匀状态, 由于不规则裂纹的存在, 感应电流在不规则裂纹端点和两侧聚集。

图 2 感应电流在不规则裂纹周围扰动规律

在无缺陷区域, 感应电流均匀分布, 垂直方向磁场 B_z 为 0。当不规则裂纹存在时, 聚集电流引起空间磁场畸变, 不同旋转方向的电流, 造成 B_z 在裂纹端点位置呈现峰值或波谷。提取试块表面 2 mm 位置处 B_z 图像, 如图 3 所示。 B_z 在裂纹不同位置呈现波峰和波谷, 峰谷畸变位置与电流在不规则裂纹端点聚集位置一致。

图 3 垂直方向磁场 B_z 图像

仿真结果表明 ACFM 感应电流可在不规则裂纹端点和两侧聚集, 聚集电流引起垂直方向磁场 B_z 畸变, B_z 图像在电流聚集位置呈现正负峰值, 反映不规则裂纹的表面形貌信息。

2 可视化重构方法

2.1 梯度场算法

梯度场能够反映数量场大小和方向, 可通过求取梯度场获取数量场的畸变位置, 梯度场定义如下

$$\text{gradu}(x, y, z) = \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} \right), \nabla u(x, y, z) \quad (1)$$

式中, $u(x, y, z)$ 为数量场, $\text{gradu}(x, y, z)$ 或 $\nabla u(x, y, z)$ 称为数量场 $u(x, y, z)$ 的梯度场。

垂直方向磁场 B_z 正反峰值位置反映不规则裂纹表面形貌信息, 可通过对 B_z 图像求取梯度场获取畸变峰值位置及走向信息。如图 4 所示, 分别对 B_z 图像求取 X 方向(探头扫查方向)和 Y 方向(感应电流方向, 与扫查方向垂直)梯度场, 得到特征信号 B_z 图像两个方向梯度场图像(梯度图像为量纲一量, 仅表示相对量大小变化)。

图 4 B_z 图像梯度场信号

图 4a 中 B_z 图像 X 方向的梯度场图像呈现不规则裂纹的表面轮廓, 图 4b 中 B_z 图像 Y 方向梯度场反映了不规则裂纹两侧轮廓, B_z 图像 X 方向梯度场更有利于重构不规则裂纹表面轮廓。因此, 本文提出垂直方向磁场 B_z 图像梯度场的不规则裂纹表面轮廓可视化重构方法, 具体步骤如图 5 所示。

(1) 对垂直方向磁场 B_z 求取 X 方向梯度场。将探头扫查方向定义为 X 方向, 对特征信号 B_z 求取 X 方向梯度场, 得到 X 方向梯度场 $G_{X_{B_z}}$ 。

(2) 求取极值。判定 $G_{X_{B_z}}$ 的极值 $PG_{X_{B_z}}$ 正负, 若为正直接进入下一步处理, 若为负值 $\times(-1)$ 。

图 5 B_z 图像梯度场可视化重构方法

(3) 祛除背景场负值。判定 GX_{B_z} 是否大于 0, 大于 0 部分进入下一步操作; 小于 0 的数值祛除。

(4) 归一化处理。将 GX_{B_z} 归一化到 0-1 区间, 得到裂纹表面归一化信号 $GX|_{0-1}$, 并绘制为彩色图。

(5) 转化为灰度图。将获取的归一化信号彩色图转化为灰度图, 得到裂纹表面轮廓可视化成像结果。

2.2 仿真结果可视化重构

利用上述算法第二步和第三步对图 4a 中垂直方向磁场 B_z 图像 X 方向梯度场进一步处理, 得到祛除背景场的梯度场信号, 如图 6a 所示。祛除背景场的梯度场信号能够清晰呈现裂纹表面可视化轮廓, 进一步对图 6a 归一化至 0-1, 得到步骤四归一化信号彩色图, 如图 6b 所示。采用步骤五对图 6b 中归一化彩色图转化为灰度图, 得到奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构结果, 如图 6c 所示。可以看出, 可视化重构结果与不规则裂纹轮廓高度吻合, 表明垂直方向磁场 B_z 图像梯度场方法能够实现不规则裂纹表面轮廓的可视化成像显示。

图 6 奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构仿真结果

3 试验验证

3.1 测试系统搭建

为验证奥氏体不锈钢不规则裂纹垂直方向磁场 B_z 梯度场可视化重构方法的可行性, 搭建 ACFM 试验测试系统, 对奥氏体不锈钢试块表面不规则裂纹进行可视化重构。如图 7 所示, ACFM 测试系统主要包括探头、信号箱、控制柜及三轴台架组成, 探头内部主要由激励线圈、U 型磁芯、磁场传感器、放大滤波电路等组成, 信号箱内信号发生模块产生频率 2 kHz 幅值 5 V 正弦激励信号, 激励信号经过功率放大后加载至探头内部激励线圈上, 激励线圈在试块表面感应出均匀电流场, 当裂纹存在时, 电流产生扰动并引起空间磁场畸变, 探头内部的磁场传感器(隧道磁阻磁场传感器)拾取畸变磁场信号, 经过探头内部放大滤波模块初处理后进入机箱内部处理模块再一次放大, 最终磁场传感器检测模拟信号通过信号采集模块转变为数字信号后进入计算机, 计算机内部程序对信号数字滤波、锁相放大并求取均值, 得到特征信号 $B_z^{[21-22]}$ 。控制柜内 PLC 通过驱动器控制三轴台架沿着试块表面做栅格运动, 台架带动探头采用点动方式提取试块上方垂直方向磁场 B_z , 最终绘制扫描区域 B_z 图像。

3.2 试验测试

如图 8b 所示, 奥氏体不锈钢试块选用 316L, 试块表面采用电火花技术加工由四段裂纹组成的不规则裂纹, 裂纹长度 30 mm, 裂纹角度与扫描方向

图7 ACFM 测试系统

分别为 0° 、 30° 、 60° 和 90° ，裂纹宽度 0.5 mm ，裂纹深度 3.0 mm ，裂纹长度及角度如图8所示。

图8 奥氏体不锈钢不规则裂纹试块

利用三轴台架带动探头对不规则裂纹区域栅格扫描，探头提高高度为 2 mm ，扫描面积为 $100 \times 100\text{ mm}^2$ ，扫描步长为 0.5 mm ，扫描完成后求取 B_z 图像，如图9所示。垂直方向磁场 B_z 在不规则裂纹区域呈现正负峰值，裂纹端点及两侧位置呈现较强峰值信号。

采用 B_z 图像梯度场可视化重构方法步骤(1)对图9处理，得到 B_z 图像 X 方向梯度场信号图像，磁场畸变峰值位置呈现线条连接图像，反映不规则裂纹表面轮廓走向，如图10a所示。利用可视化重构方法步骤(2)、步骤(3)和步骤(4)对图10a进一步处理，得到祛除背景的梯度场归一化图像，如图10b

图9 垂直方向磁场 B_z 试验结果

所示。利用步骤(5)对图10b进处理，得到不规则裂纹表面轮廓可视化重构结果，如图10c所示。可视化重构图像反映不规则裂纹的端点位置及表面轮廓，由于裂纹端点电流聚集效应，端点位置聚集电流引起的垂直方向磁场 B_z 较为强烈。 B_z 图像梯度场计算结果反映极值信号位置，由于极值信号较为强烈掩盖了部分裂纹中间区域图像，呈现特别突出的裂纹端点位置信息。

(c) 可视化重构结果

图10 奥氏体不锈钢不规则裂纹可视化重构试验结果

3.3 重构精度评估

利用图 10c 不规则裂纹表面轮廓可视化图像峰值位置, 将不规则裂纹划分为 4 段, 每段裂纹端点位置坐标分别为(13.5, 16.0)、(42.0, 17.0)、(75.0, 29.0)、(89.0, 56.0)和(86.5, 87.0), 绘制裂纹端点及走向图, 得到奥氏体不锈钢表面不规则裂纹精确评估结果, 如图 11 所示。

图 11 不规则裂纹评估结果

由裂纹端点位置坐标可求每段裂纹的长度和角度, 分别为 $28.5 \text{ mm} \times 2.0^\circ$, $35.1 \text{ mm} \times 20.0^\circ$, $30.4 \text{ mm} \times 62.6^\circ$, $31.1 \text{ mm} \times 85.4^\circ$ 。对比奥氏体不锈钢试块表面不规则裂纹的真实尺寸和角度, 可知不规则裂纹长度可视化重构最大误差 5.1 mm, 角度最大误差 10° , 得到较高的评估精度。

4 结论

(1) 本文仿真了奥氏体不锈钢不规则裂纹周围电磁场畸变规律。结果表明, ACFM 感应电流可在不规则裂纹端点和两侧聚集, 聚集电流引起垂直方向磁场 B_z 畸变, B_z 在裂纹端点位置呈现峰谷极值, 反映了不规则裂纹端点和轮廓信息。

(2) 利用垂直方向磁场 B_z 图像梯度场可视化重构方法对奥氏体不锈钢不规则裂纹 ACFM 仿真结果进行重构。结果表明, B_z 图像 X 方向梯度场图像能够呈现不规则裂纹表面轮廓, 通过祛除背景、归一化处理及灰度图转变可获得清晰的不规则裂纹表面轮廓可视化图像。

(3) 搭建 ACFM 测试系统, 开展奥氏体不锈钢不规则裂纹检测试验, 验证垂直方向磁场 B_z 图像梯度场可视化重构方法可行性。结果表明, B_z 图像 X 方向梯度场图像能够呈现不规则裂纹表面轮廓可视化图像, 在裂纹端点位置呈现极值, 通过对可视化结果评估, 裂纹长度最大误差 5.1 mm, 角度最大误差 10° , 验证了该方法的可行性。本文的研究结果

对奥氏体不锈钢表面不规则裂纹的检测和评估具有极强的指导意义和工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 孙世成. 高氮无镍奥氏体不锈钢的微观结构和力学性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
SUN Shicheng. Microstructure and mechanical properties of high nitrogen nickel-free austenitic stainless steel[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [2] 马飞, 潘邻, 张良界, 等. 奥氏体不锈钢低温气体渗碳后的组织性能[J]. 材料保护, 2014, 47: 68-71.
MA Fei, PAN Lin, ZHANG Liangjie, et al. Structure and property of AISI 316 & 304 austenitic stainless steel after low-temperature gas carburizing[J]. Materials Protection, 2014, 47: 68-71.
- [3] 赵艳, 管建军, 刘峰, 等. Fe-Zn 化合物粘附的不锈钢高温水腐蚀氧化物显微结构表征[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(6): 603-608.
ZHAO Yan, GUAN Jianjun, LIU Feng, et al. Microstructure characterization of oxides formed on stainless steel with attachments of Fe-Zn intermetallics in high temperature water[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(6): 603-608.
- [4] PARIS P C, ENDORGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-534.
- [5] SHELIKHOV G S, GLAZKOV Y A. On the improvement of examination questions during the nondestructive testing of magnetic powder[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2011, 47(2): 112-117.
- [6] WU J B, FANG H, HUANG X M, et al. An online MFL sensing method for steel pipe based on the magnetic guiding effect[J]. Sensors, 2017, 17: 2911.
- [7] 李旺明, 刘晴岩, 张建华. 奥氏体不锈钢管母材和焊缝的显微组织对超声检测的影响[J]. 理化检验, 2015, 51(1): 22-26.
LI Wangming, LIU Qingyan, ZHANG Jianhua. Effect of microstructure of parent metal and weld metal of austenitic stainless steel pipe on ultrasonic testing[J]. Physical Testing and Chemical Analysis, 2015, 51(1): 22-26.
- [8] SAGUY H, RITTEL D. Alternating current flow in internally flawed conductors: A tomographic analysis[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(9): 094102.
- [9] TIAN G Y, SOPHIAN A. Reduction of lift-off effects for pulsed eddy current NDT[J]. NDT&E International, 2005, 38: 319-324.
- [10] GAO B, HE Y Z, WOO W L, et al. Multi-dimensional tensor-based inductive thermography with multiple

- physical fields for offshore wind turbine gear inspection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6305-6315.
- [11] YUAN Xinan, LI Wei, CHEN Guoming, et al. Two-step interpolation algorithm for measurement of longitudinal cracks on pipe strings using circumferential current field testing system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14: 394-402.
- [12] 李伟, 袁新安, 陈国明, 等. 基于 ACFM 的隔水管表面裂纹链式阵列检测探头设计与试验研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 8-15.
- LI Wei, YUAN Xinan, CHEN Guoming, et al. Research on the detection of surface cracks on drilling riser using the chain alternating current field measurement probe array[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 8-15.
- [13] LEWIS A M, MICHAEL D H, LUGG M C, et al. Thin-skin electromagnetic fields around surface-breaking cracks in metals[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(8): 3777-3784.
- [14] NICHOLSON G L, DAVIS C L. Modeling of the response of an ACFM sensor to rail and rail wheel RCF cracks[J]. NDT&E International, 2012, 46(1): 107-114.
- [15] NOROOZI A, HASANZADEH R P R, RAVAN M. A fuzzy learning approach for identification of arbitrary crack profiles using ACFM technique[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(9): 5016-5027.
- [16] RAVAN M, SADEGHI S H H, MOINI R. Field distributions around arbitrary shape surface cracks in metals, induced by high frequency alternating current carrying wires of arbitrary shape[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(9): 2208-2214.
- [17] PASADAS D J, RIBEIRO A L, ROCHA T, et al. 2D surface defect images applying Tikhonov regularized inversion and ECT[J]. NDT&E International, 2016, 80: 48-57.
- [18] LI Yong, YAN Bei, DA Li, et al. Gradient-field pulsed eddy current probes for imaging of hidden corrosion in conductive structures[J]. Sensors and Actuators, 2016, 238: 251-265.
- [19] LI W, YUAN X A, CHEN G M, et al. High sensitivity rotating alternating current field measurement for arbitrary-angle underwater cracks[J]. NDT&E International, 2016, 79: 123-131.
- [20] 李伟, 陈国明. 基于双 U 型激励的 ACFM 缺陷可视化技术研究[J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 233-237.
- LI Wei, CHEN Guoming. 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.
- [21] YUAN Xinan, LI Wei, CHEN Guoming, et al. Circumferential current field testing system with TMR sensor array for non-contact detection and estimation of cracks on power plant piping. Sensors and Actuators, 2017, 263: 542-553.
- [22] YUAN Xinan, LI Wei, CHEN Guoming, et al. Inspection of both inner and outer cracks in aluminum tubes using double frequency circumferential current field testing method[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 127: 16-34.

作者简介: 袁新安, 男, 1990 年出生, 博士研究生, 副教授。主要研究方向为电磁无损检测、信号处理及缺陷智能识别技术。

E-mail: xinancom@163.com

李伟(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能无损检测技术、电磁场仿真、信号处理及仪器开发。

E-mail: ronald8044@163.com

陈国明, 男, 1962 年出生, 教授, 博士研究生导师。研究方向为海洋油气开采安全保障技术、石油装备安全可靠性工程、计算机辅助机械工程。

E-mail: offshore@126.com