

Research Progress of Magnetic Nondestructive Testing Technology

Meiquan Liu, Bin Lang, Binkun Tao, Nan Ma

Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang Hebei
Email: liumqyh@163.com

Received: Jul. 30th, 2020; accepted: Aug. 13th, 2020; published: Aug. 20th, 2020

Abstract

Magnetic nondestructive testing technology has a broad application prospect in the field of judging and identifying fatigue damage of ferromagnetic materials. It is of great significance of the nondestructive evaluation of ferromagnetic material properties and life evaluation. Fundamentals and latest developments of magnetic nondestructive testing are introduced. Problems demanding prompt solution for magnetic powder inspection, magnetic flux leakage testing, magnetic memory testing and micro magnetic testing are discussed.

Keywords

Defect, Magnetic Field, Magnetic Measurement, Nondestructive Testing

磁性无损检测技术研究进展

刘美全, 郎 宾, 陶斌坤, 马 南

陆军工程大学石家庄校区, 河北 石家庄
Email: liumqyh@163.com

收稿日期: 2020年7月30日; 录用日期: 2020年8月13日; 发布日期: 2020年8月20日

摘 要

磁性无损检测新技术在判断与识别铁磁材料疲劳损伤领域具有广阔的应用前景, 对铁磁材料性能无损评价和寿命评估具有重要的实践意义。本文介绍了磁性无损检测的分类和基本原理, 针对磁粉探伤、漏磁检测、磁记忆检测和微磁检测提出了目前亟待解决的关键技术问题以及未来发展的方向, 为进一步提高磁性无损检测质量具有重要意义。

关键词

缺陷, 磁场, 磁性测量, 无损检测

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

磁性无损检测技术是随着磁性材料、磁敏检测元件、检测信号处理技术、磁效应现象及计算机技术的应用而发展起来的新技术。磁性检测法主要依据裂纹或其它缺陷以及内应力等因素对铁磁性材料的内在性质或磁化状态有影响, 通过测量被检工件的特征磁场, 将缺陷处产生的畸变磁信号由磁电转换器件或传感器变换成对应的电信号, 从而实现对缺陷识别和诊断的一种无损检测技术。磁场信号形成和磁场信号测量是磁性检测技术的两个基本部分, 分析处理电信号是其核心, 而新材料、新元件、新原理和基于计算机的信息处理技术的综合应用是这一技术的显著特点。由于磁性无损检测易于实现非接触和在线实时检测, 因此, 磁性无损检测的应用越来越广泛, 被认为是目前较经济、可靠、实用的检测方法[1] [2] [3]。

2. 磁性无损检测技术分类

按磁场信号形成方式可将磁性检测分为有源磁场检测法(Active Field Testing, 简称 AFT)和剩余磁场检测法(Residual Field Testing, 简称 RFT) [4]。有源磁场检测法是通过磁源磁化被测对象(铁磁性材料)产生磁场信号, 并同时测量这一信号, 根据测量信号的奇异特征变化识别判断材料中的缺陷。其中, 磁化装置即励磁器的性能和磁场测量装置即检测探头或探头组的精度是有源磁场检测的两个重要环节, 磁化效果和磁场测量精度决定了有源磁场检测的质量。目前主要采用的方法有磁粉法和漏磁法。剩余磁场检测法主要依靠检测缺陷处剩余磁场进行缺陷识别, 它所检测的漏磁信号是一种“记忆磁”, 检测时不需要励磁器。目前应用的剩余磁场检测法有磁记忆检测和微磁检测。有源磁场检测法检测时需要对工件进行磁化, 且一般是饱和磁化, 所以缺陷对外呈现的磁特征比较明显, 检测效果真实可靠, 因此, 有源磁场检测法经常作为其它检测方法的验证手段。但是对工件磁化易受工件形状和环境影响, 因此, 有源磁场检测一般在室内进行, 实时在役检测比较困难。而剩余磁场检测法由于不需要对工件磁化, 主要依靠材料外部的磁场测量进而进行缺陷识别, 因此便于实现在役设备缺陷检测, 但对磁场测量传感器的精度要求高, 随着磁场传感器测量精度的不断提高, 剩余磁场检测法逐渐成为在役设备缺陷实时检测的主要方法。

3. 磁粉探伤技术

对磁粉探伤是通过磁粉在缺陷附近漏磁场中的堆积以检测铁磁性材料表面或近表面处缺陷的一种无损检测方法。磁粉探伤首先是对被检试件加外磁场进行磁化, 若试件表面或近表面处有缺陷, 如裂纹、气孔等, 由于它们是非铁磁性的, 对磁力线的通过阻力很大, 磁力线在缺陷处泄漏到空气中形成漏磁场, 当将导磁性良好的铁磁性粉末(通常为磁性氧化铁粉)施加在试件表面上时, 缺陷处的漏磁场就会吸住磁粉, 堆积形成可见的磁粉痕迹, 从而把缺陷显示出来[5] [6] [7]。如图 1 所示是磁粉探伤的基本原理图。

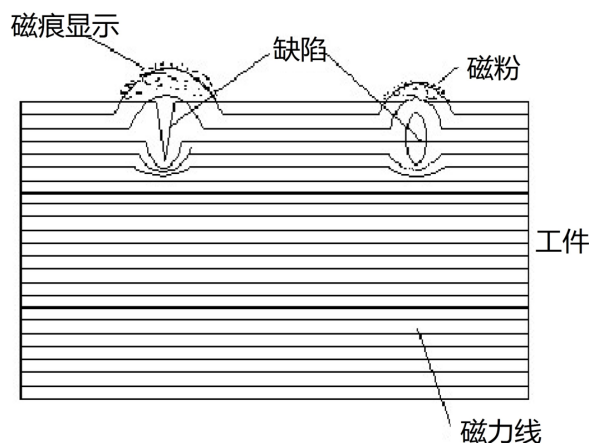


Figure 1. The distribution of leakage field and trace at the defect

图 1. 缺陷处漏磁场和磁痕分布

磁粉探伤的灵敏度高、操作也方便。但它不能发现床身铸件内的部分和导磁性差(如奥氏体钢)的材料,而且不能发现铸件内部分较深的缺陷。铸件、钢铁材被检表面要求光滑,需要打磨后才能进行。磁粉探伤几乎不受工件大小的限制,检查速度快,费用低廉,显示直观,对铁磁性材料和试件表面上的裂纹检查非常有效,通常磁粉探伤作为其他磁性或非磁性无损检测方法的验证性方法。但是磁粉探伤中,磁化的饱和程度会影响检测的效果和精度,同时磁化方向会影响缺陷的检出率;磁粉探伤仅能显示缺陷的近似位置、形状和长度,难以确定其深度,不能实现定量化;磁粉探伤的自动化程度低,检测结果受人为因素较大,可靠性不高。1973年美国空军两项独立的研究表明:磁粉检测在裂纹检测中的检出率只有47%,1984年Martin Marietta Corp也得出了相似的结论,检出率为50%;对表面以下的缺陷,只能得到不很清晰的显示,且随深度的增加越来越模糊;对剩磁有影响的试件,经磁粉探伤后还需要退磁和清洗。因此,逐渐发展了漏磁检测技术。

4. 漏磁检测技术

漏磁检测是利用磁源对被检工件进行局部磁化,材料表面出现裂纹或坑点等缺陷时,使局部区域的磁导率降低,磁阻增加,磁化场的能量将有一部分从此区域外泄出来,形成可检测的漏磁信号。在材料内部的磁力线遇到缺陷而产生铁磁体间断时,磁力线将会发生聚焦或畸变,这一畸变扩散到材料表面,即可形成可检测的磁场信号。如图2所示是漏磁检测的基本原理图。

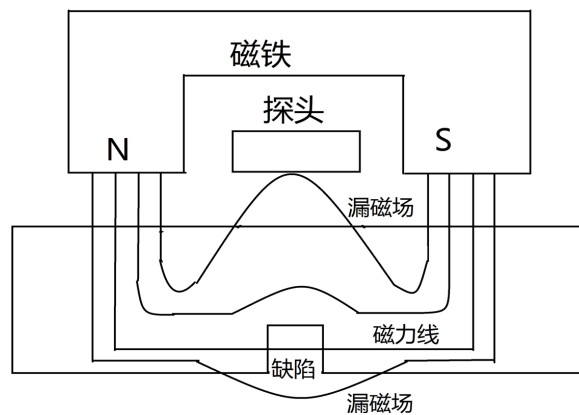


Figure 2. Magnetic flux leakage testing schematic diagram

图 2. 漏磁检测原理图

随着现代科学技术的发展,尤其是计算机技术的发展,仪器的体积越来越小、处理速度越来越快、功能越来越强大。漏磁检测理论研究及探伤系统的传感器性能、数据处理等方面也都有很大的进步。漏磁检测可以实现定量检查,其检测的范围不受被检测件厚度的制约,同时由于没有高频信号,使漏磁检测的信号处理变的非常简单。漏磁检测能探出缺陷的准确度高,还能知道缺陷的某些特征尺寸(如深度、长度等),而且由于漏磁检测装置均为自动化装置,因此能得到不受操作者技术水平影响的客观实验结果,而检测结果具有较好的定量性、客观性和可记录性。目前,漏磁检测的研究主要集中在缺陷的自动识别、定量检测以及漏磁反演成像等方面[8][9][10][11]。

4.1. 漏磁检测技术在缺陷识别方面的进展

由于漏磁检测在实际大型工程上的应用,使得漏磁检测技术发展迅速,在缺陷识别方面,通过提取信号的主要特征量,利用改进BP神经网络进行缺陷自动识别并有限确定缺陷尺寸[12][13]。利用裂纹漏磁之间的相互作用关系,采用波形处理和矢量轨迹图方法,对表面裂纹识别及评估[14]。借助缺陷漏磁场图像有效地提取缺陷漏磁场特征和评价缺陷外形尺寸,利用插值函数重构缺陷实现对缺陷识别[15]。采用恒等变换算法对漏磁信号进行等价模式识别[16]。这些方法都在不同程度上提高了缺陷的自动识别能力,但是实际检测中缺陷类别复杂多样,缺陷检测信号受影响因素较多,真实缺陷信号经常混杂在外界干扰甚至与缺陷信号特征相似的信号中,对基于缺陷漏磁场的缺陷识别,主要集中在信号处理方法上的研究,即从复杂的检测信号中有效提取和分离真实缺陷的漏磁场信号,由于对缺陷产生的漏磁场不能从理论上进行定量确定,所以基于检测信号的缺陷识别方法只能实现一定意义(模型)下的缺陷定性识别,对多种缺陷同时存在情况下的识别还存在许多困难。因此,缺陷识别的研究一直是漏磁无损检测研究的热点问题。

4.2. 漏磁检测技术在缺陷定量方面的进展

随着漏磁检测技术的发展,缺陷定量研究正逐步成为漏磁检测技术发展重点研究方向之一。在缺陷定量方面,利用脉冲化漏磁检测技术,通过理论模拟和实验对信号特征进行时频域分析,取得定量缺陷的额外信息,实现缺陷的定量检测[17]。通过分析漏磁信号峰值,采用拟合方法实现了缺陷的漏磁定量[18]。采用替换、平滑、反差等方法改善缺陷的漏磁信号,并把漏磁信号转变成云图,采用非线性方法实现缺陷的定量分析[19]。通过分析裂纹漏磁信号峰值点位置与裂纹宽度和深度及传感器提高值的相互作用关系,采用模糊模式循环逼近算法和现代频谱分析对缺陷进行定量分析,实现了裂纹定量检测[20]。借助多元统计分析方法、特征提取、模式识别技术和谱熵分析方法对缺陷进行量化分析[21][22]。基于偶极子模型预测漏磁场密度分布和检测漏磁密度与理论漏磁分布之间的最小误差的方法实现缺陷识别[23][24]。利用小波分析和人工神经网络对裂纹进行定量检测,并将数字信号处理器应用于管道裂纹定量检测中[25]。上述缺陷定量方法都是基于某种理论模型或者通过改善缺陷的外在漏磁信号或者基于某种材料上多种人工缺陷检测的统计效果实现对某种材料缺陷的定量,在缺陷定量前,往往需要大量的缺陷标定,或者对大量的缺陷检测结果进行统计,进而以一定的经验比例因子对检测结果进行定量,对缺陷漏磁场与缺陷尺寸之间的关系是从缺陷漏磁场的峰值以及峰峰值之间的宽度对缺陷尺寸进行描述,对缺陷的宽度尤其是缺陷宽度小于磁传感器宽度时,更是难以确定。出现上述定量问题的原因是缺乏对缺陷微磁生成机理的认识。因此,目前对缺陷的定量结果只能是对缺陷程度的宏观刻画,还难以保证缺陷定量的精度。

4.3. 漏磁检测技术在缺陷反演方面的进展

漏磁检测技术在基于某种规则下实现缺陷定量后只给出了缺陷几何尺寸大小,由于缺陷定量精度目前还不能完全反映缺陷在材料中的准确位置和空间形状。因此,许多人开始从缺陷的漏磁信号出发采用

某种数学算法直接反演缺陷的空间特征。一般来说, 解决方式为分析缺陷参数和漏磁信号的相互关系, 根据信号的特征反演出缺陷的大小, 然后根据估测出的缺陷的深度、宽度和长度等参数通过计算机三维可视技术模拟出缺陷的外形。依据漏磁测量结果, 应用基于有限元模型和人工神经网络的方法实现漏磁检测缺陷参数的反演[26] [27]。基于奇异值分解和模拟进化的方法, 利用自然选择和末尾选择的全局优化方法对缺陷漏磁进行反演成像[28] [29]。这些反演算法和技术都在一定意义上实现了缺陷漏磁场与缺陷空间分布的一种对应关系, 但是, 由于对缺陷漏磁场与空间缺陷的分布不是一一对应关系, 从缺陷漏磁场反演缺陷是一个不适定问题, 因此, 从缺陷漏磁场反演缺陷只能是某种意义下的优化反演, 优化算法和反演成像正成为无损检测领域成像检测的一个重要的课题。不论是缺陷的智能识别、定量分析或反演重构, 目前研究的方法都是基于缺陷外部检测磁信号的变化特征, 运用各种信号处理方法来进行缺陷识别、定量和反演重构。由于不同在役铁磁构件缺陷生成的原因不尽相同, 因此, 针对一种构件的缺陷检测均需要符合现场测量条件的标准, 而由于工件所受环境的因素不同, 标准难以确定, 导致同样的缺陷得到不同的检测信号, 因而难以实现缺陷的真正定量识别, 因此需要从缺陷内部出发, 研究缺陷共同的和相对固定的磁性特征, 以真正实现缺陷的完全定量化和可视化, 这也是无损检测一直追求的目标。

5. 磁记忆检测技术

磁记忆检测是基于铁磁构件在运行时, 受工作载荷和地球磁场共同作用, 在应力和变形集中区域内会发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向, 这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后不仅会保留, 还与最大作用应力有关, 即产生与作用应力相对应的磁记忆[30]。在应力集中区域, 漏磁信号的切向分量具有最大值, 而法向分量改变方向且具有过零点, 磁记忆检测一般通过检测法向分量对缺陷进行诊断。如图3所示是磁记忆检测的法向和切向分量漏磁场示意图。

金属磁记忆检测技术是近几年发展起来的一项新兴的无损检测技术, 该技术借助于天然的地磁场作用、金属内部各种微观缺陷和局部应力集中对磁作用的特殊反应机制, 能够对铁磁性金属构件进行早期诊断和寿命评估工作, 具有真正的无损检测的早期、快速、预警的意义, 该项技术有着巨大的发展潜力, 在建筑、航空、航天、铁道、电力、锅炉压力容器、石化、机械、桥梁等工业部门都得到了具体应用[31] [32] [33]。但是磁记忆检测是一种弱信号检测, 信号易受环境干扰, 如何消除环境信号干扰; 磁记忆检测时只能发现应力集中可能出现的危险部位, 尚不能对缺陷形状、大小及性质进行定量的具体分析, 如何实现磁记忆技术的定量检测; 应力和地磁场如何产生磁记忆, 两者各起什么作用; 缺陷处漏磁场强度大小与应力、外磁场、缺陷深度与宽度之间的定量关系如何; 根据测得的信号如何判定引起缺陷的原因和缺陷的所在; 磁记忆检测中如何消除外激励或残余磁场以及表面粗糙度对检测磁信号的影响, 这些问题都有待进一步深入研究。

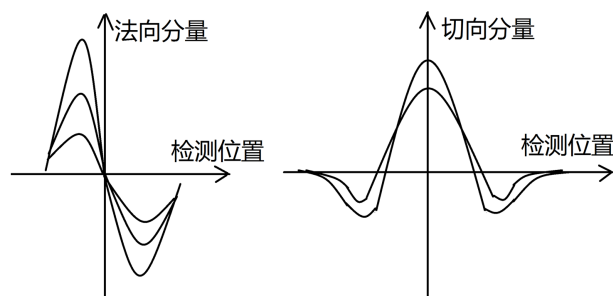


Figure 3. Normal and tangential leakage magnetic fields detected by magnetic memory

图3. 磁记忆检测的法向和切向漏磁场

6. 微磁检测技术

微磁检测是在漏磁检测基础上结合微磁学理论提出的一种新的磁性无损检测方法。根据微磁检测理论,缺陷的存在就一定存在磁畴固定结点,就一定会出现磁状态不可逆,形成材料内部磁场。磁畴固定结点的磁场十分微弱,因而称为微磁点,而其检测过程称为微磁检测[34]。微磁检测理论对实现损伤缺陷的定量和自动化检测具有重要意义,通过检测微磁点的微磁场可以获取材料的受损情况,基于微磁理论研制的裂纹检测仪应用效果较好,在各行各业得到了广泛应用[35][36][37]。图4是微磁检测系统原理框图。

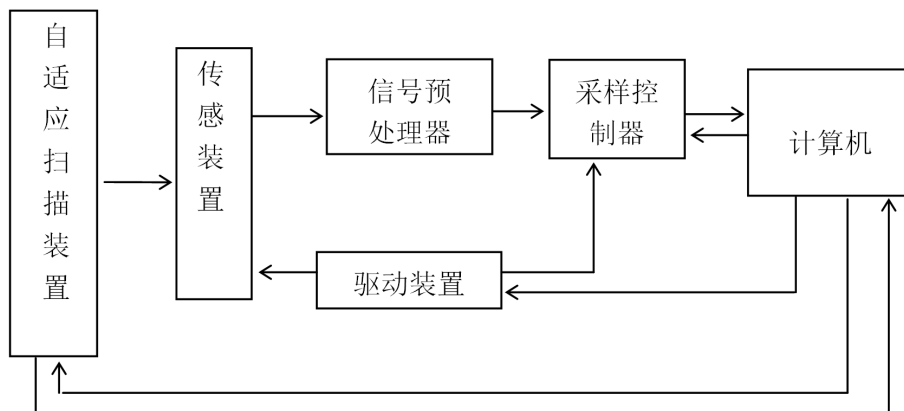


Figure 4. Principle frame of test system
图4. 检测系统组成原理框图

微磁检测理论提出的磁荷聚集和微磁结点理论以及应力作用下缺陷处的微磁特性变化还没有从实验上得以验证,对微磁检测时遇到的如对工件退磁后出现的对原有缺陷误检、磁化方向的强烈改变是否引起相变等奇异现象和问题还不能从理论上进行系统解释,这在一定程度上制约了微磁检测向定量化、可视化方向发展。因此,对缺陷微磁生成机理的研究就成为当前微磁检测亟待解决的焦点问题。

7. 结论及展望

磁性无损检测技术是目前应用最广泛的无损检测技术之一。磁性无损检测技术研究正在由材料的外在磁特征检测向基于材料外在磁特征的内部生成机理演进,随着电子技术、人工智能和计算机技术的发展以及新材料、新效应和新机理的发现,磁性无损检测逐步由定性检测向定量化、自动化、可视化方向发展,逐步减少人为因素的干扰,使磁性无损检测的缺陷检测质量逐步得到提高,为进一步实现材料损伤以及装备全寿命评估奠定基础。

参考文献

- [1] 解源, 彭超男. 磁性无损检测技术[J]. 无损探伤, 2001, 6(4): 322-324.
- [2] 李冲冲, 董丽虹, 王海斗, 等. 疲劳损伤磁性无损评估技术研究现状及发展前景[J]. 材料导报, 2015, 29(6): 107-113.
- [3] 杨辉. 磁性无损检测技术中的信号处理技术[J]. 科技创新导报, 2019, 16(21): 8-9.
- [4] 康宜华, 武新军. 磁性无损检测技术的分类[J]. 无损检测, 1999, 21(2): 58-60.
- [5] 李龙, 康宜华, 李婷婷等. 磁粉探伤发展现状及若干智能技术的应用研究[C]//第十一届全国磁粉渗透检测技术年会论文集. 济宁: 山东工业大学出版社, 2017: 22-25.
- [6] 李远江, 张华, 王姮, 等. 基于支持向量机的磁粉探伤智能识别算法[J]. 西南科技大学学报, 2015, 30(1): 66-70.

- [7] 牛乾, 刘桂华, 康含玉. 磁粉探伤钢轴表面裂纹智能识别方法研究[J]. 自动化仪表, 2018, 39(3): 55-59.
- [8] 林俊明. 漏磁检测技术及发展现状研究[J]. 无损探伤, 2006, 30(1): 1-5.
- [9] 沈功田, 王宝轩, 郭锴. 漏磁检测技术的研究与发展现状[J]. 中国特种设备安全, 2017, 33(9): 43-52.
- [10] 邱光友, 王雪. 油气管道内检测技术研究进展[J]. 石油化工自动化, 2020, 56(1): 1-5.
- [11] 杨华, 綦成兰, 樊佳芳. 漏磁检测技术在我国管道腐蚀检测上的应用和发展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018(13): 51-52.
- [12] 金涛, 阙沛文, 陈天璐, 等. 基于改进 BP 神经网络算法的管道缺陷漏磁信号识别[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(7): 1140-1144.
- [13] 宋志强, 张莹, 黄军. 输油管道裂纹缺陷漏磁检测信号辨识分析[J]. 化工自动化及仪表, 2015, 42(5): 487-491.
- [14] 刘美全, 徐章遂. 基于漏磁的表面裂纹识别及评估[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(6): 575-579.
- [15] 蒋奇. 管道缺陷漏磁检测智能识别技术[J]. 中国仪器仪表, 2004(6): 6-8.
- [16] Mandayam, S.A. (2001) Invariance Algorithms for Non-Destructive Evaluation. *IEEE Transactions on Magnetis*, **36**, 3397-3400.
- [17] Sophian, A., Tian, G.Y. and Zairi, S. (2006) Pulsed Magnetic Flux Leakage Techniques for Crack Detection and Characterization. *Sensors and Actuators*, **125**, 186-191.
- [18] 刘美全, 徐章遂. 一种基于漏磁峰值相互作用的裂纹定量计算方法[J]. 测控技术, 2003, 22(11): 28-30.
- [19] 杨涛, 王太勇, 蒋奇. 人机合作式管道漏磁信号分析与缺陷定量识别[J]. 中国机械工程, 2004, 15(6): 488-490.
- [20] 吕绍旭, 张春才, 宋志强. 管道漏磁探头提高效应仿真分析[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(5): 41-45.
- [21] 蒋奇, 隋青美, 高瑞. 管道缺陷漏磁场和缺陷尺寸关系的研究[J]. 无损检测, 2005, 27(8): 396-399.
- [22] 王太勇, 杨涛, 蒋奇. 油气运输管道缺陷漏磁检测量化技术研究[J]. 计量学报, 2004, 25(3): 247-250.
- [23] Minkov, D. and Shoji, T. (1998) Method of Sizing of 3-D Surface Breaking Flaws by Leakage Flux. *NDT & E International*, **31**, 317-324.
- [24] 仲维畅. 磁偶极子理论在无损检测中的用途[J]. 无损检测, 2010, 32(1): 49-52.
- [25] 丁克勤, 刘丽媛, 徐章遂. 油气管道裂纹漏磁定量检测技术研究[C]//第十一届全国实验力学学术会议论文汇编. 大连: 大连理工大学出版社, 2005: 736-741.
- [26] 刘志平, 康宜华, 杨叔子. 漏磁检测信号的反演[J]. 无损检测, 2003, 25(10): 531-535.
- [27] 王长龙, 徐章遂, 傅君眉. 基于小波神经网络的火炮裂纹形状重构[J]. 兵工学报, 2005, 26(3): 379-382.
- [28] 彭丽莎, 黄松岭, 赵伟, 等. 漏磁检测中的缺陷重构方法[J]. 电测与仪表, 2015, 52(3): 1-6.
- [29] 钱作勤, 邓苏楠, 彭文韬. 漏磁检测系统缺陷重构算法研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(3): 107-111.
- [30] 王正道, 姚凯, 丁克勤. 金属磁记忆检测法研究进展[J]. 无损检测, 2009, 31(12): 1011-1014.
- [31] 冷建成, 李政达. 疲劳载荷下的磁记忆效应研究综述[J]. 化工机械, 2018, 45(2): 137-140.
- [32] 任吉林, 胡伟利. 磁记忆检测技术在飞机起落架检测中的应用[J]. 无损检测, 2002, 24(8): 346-348.
- [33] 高雅田. 油气管道金属磁记忆检测技术的研究进展[J]. 化工机械, 2019, 46(2): 107-111.
- [34] 徐章遂等. 裂纹漏磁定量检测原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 22-24.
- [35] 林炎, 陈兵芽, 何莎, 等. 油气管内壁缺陷的微磁检测技术[J]. 无损探伤, 2014, 38(6): 34-36.
- [36] 戴超, 于润桥, 夏桂锁, 等. 平板焊缝的微磁检测技术研究[J]. 无损探伤, 2015, 39(2): 14-16.
- [37] 吴斌, 王学迁, 刘秀成, 等. 基于微磁检测技术的钢杆淬硬层深度定量预测[J]. 北京工业大学学报, 2018, 44(5): 687-692.