

金属磁记忆检测技术研究现状与发展前景

任吉林¹, 林俊明², 任文坚¹, 宋 凯¹

(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2. 爱德森(厦门)电子有限公司, 厦门 361001)

摘 要:金属磁记忆检测技术可以检测金属构件上以应力集中为特征的危險区域, 对这一技术的深入研究有望解决构件损伤早期诊断与寿命预测中的关键问题。概述了金属磁记忆检测的原理和应用范围, 归纳了磁记忆检测的国内外研究现状, 提出了目前磁记忆检测技术亟待研究的关键性问题以及磁记忆检测技术的未来发展方向。

关键词:金属磁记忆检测; 铁磁性; 应力集中; 早期诊断

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)04-0003-08

Metal Magnetic Memory Testing Technology Development Status and Prospects

REN Ji-Lin¹, LIN Jun-Ming², REN Wen-Jian¹, SONG Kai¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Test(Ministry of Education), Nanchang Hangkong

University, Nanchang 330063, China;

2. Eedysuns (Xiamen) Electronic Co Ltd, Xiamen 361001, China)

Abstract: The metal magnetic memory testing (MMMT) can detect the stress concentration zone of ferromagnetic metal components. The technology researches were hopeful that solving the key of the components early diagnosis and life-time prediction. This paper introduces the metal magnetic memory testing principles and applications, analyzes the magnetic memory testing research situation in domestic and foreign, proposes the inadequacies on MMMT researches and the trend of MMMT development in the future.

Keywords: Metal magnetic memory testing; Ferromagnetic; Stress concentration; Early diagnosis

金属磁记忆检测技术可检测受载铁磁构件缺陷产生前的局部应力集中, 为缺陷的预诊断及寿命预测提供依据, 进而保障构件的安全。该技术自诞生以来, 受到了国内外业界人士的广泛关注, 目前已经取得了一批宝贵的研究成果。

笔者依据金属磁记忆检测原理, 分析国内外研究现状和已有的研究成果, 进而提出磁记忆检测中亟待研究的关键性问题, 探索磁记忆检测技术的发展方向及可能取得的突破性进展, 可为促进金属磁记忆检测技术研究的深入发展提供参考。

1 金属磁记忆检测原理及应用范围

根据能量最小原理, 铁磁构件在外应力作用下会产生磁致伸缩性质的形变, 引起磁畴壁的位移, 从而改变磁畴的自发磁化方向, 以增加磁弹性能来抵消应力能的增加。这种在外应力和地磁场共同作用下, 铁磁体内产生的晶粒转动和磁致伸缩逆效应会引起材料宏观磁特性的不连续性分布, 在应力撤除后, 由应力集中所造成的该区域宏观磁特性的不连续性得到保留的现象被称为磁记忆效应。

磁记忆检测原理可表述为: 处于地磁场环境下的铁磁构件受载荷的作用, 其内部会发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向或不可逆的重新取向, 从而导致应力或应变集中区域表面的漏磁场 H_p 发生改变, 出现法向分量 $H_p(y)$ “过零”及切向分量

收稿日期: 2011-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51065022)

作者简介: 任吉林(1949—), 男, 教授, 主要从事电磁无损检测技术的研究。

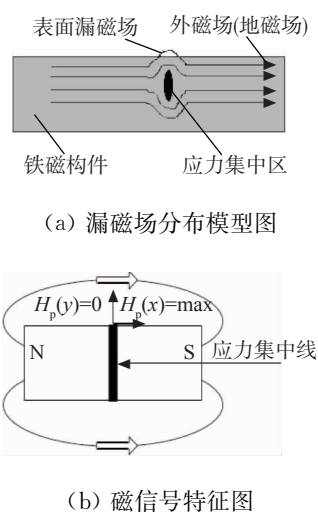


图1 应力集中区漏磁场分布图

$H_p(x)$ 具有峰值的现象,如图1所示。铁磁构件这种磁状态的不可逆变化在工件载荷消除后仍被保留。因此,利用测磁仪器,通过测定构件表面漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 过零点或梯度等,便可以推断出该工件的应力集中部位及预损伤区。

金属磁记忆检测法的主要用途如下^[1]:① 确定设备和构件的应力应变状态的不均匀性和应力集中区。② 确定在应力集中区的金属取样位置以评估金属结构状态。③ 早期诊断疲劳损坏和评估设备以及构件的寿命。④ 将其与常规无损检测方法结合起来减少检测成本与材料成本。⑤ 各种类型焊接的质量控制(包括接触焊与点焊)。⑥ 通过构件的不均匀性对新生产与在用的机械制造产品实施快速分类等。

2 国内外研究与应用现状

1994年,俄罗斯 Doubov 教授在“Metal magnetic memory”一文中首次提出了金属磁记忆概念^[2]。1998年,在美国旧金山举行的第50届国际焊接学术会议上,以 Doubov 教授为代表的俄罗斯专家首次提出了“金属应力集中区-金属微观变化-磁记忆效应”相关学说,以及相应的一套全新无损检测技术——金属磁记忆技术^[3](Metal Magnetic Memory, MMM),在无损检测学界引起了强烈反响。针对该项检测技术,俄罗斯联邦工程监督部门已通过了30多种指导性文件,如:π10-262-98, π153-34.1-17.421-98《火力发电厂锅炉、汽轮机管道主要部件金属检测和延长使用寿命典型规程》, π03-380-00《储存可燃气体压力球罐和气罐检测规程》等,并有效地应用于各工业部门^[4]。2007年,18

个 IIW 国际焊接学会会员国和超过10个 ISO 委员会国通过投票,批准了金属磁记忆检测法的国际标准 ISO 24497-1:2007(E)、24497-3:2007(E)^[5]等。

在磁记忆检测仪器设备与软件开发方面,俄罗斯动力诊断公司研制了 TSC-1M 系列仪器,该系列仪器还配有多种扫描装置、传感器和软件。

磁记忆检测在我国的研究始于1999年10月于广东汕头召开的第七届全国无损检测学术年会暨国际学术研讨会。期间, Doubov 教授发表了一篇题为《Diagnostics of Metal Items and Equipment by Means of Metal Magnetic Memory》的学术论文,介绍了金属磁记忆检测技术基本原理和在管道、压力容器上的应用^[6];同年,东北电力科学研究院从俄罗斯动力诊断公司购置了 TSC-1M-4 型金属磁记忆应力检测仪,在电站锅炉管道中开始了国内首例金属磁记忆检测;2000年5月,林俊明等在西安热工院召开的火电厂寿命管理与延寿国际学术会议上发表了国内第一篇金属磁记忆文章^[7],并展示了由爱德森公司研发的我国第一台磁记忆诊断仪;同年12月,任吉林、林俊明等人合作出版了首本关于金属磁记忆检测技术的专著^[8];2001年8月,由全国无损检测学会和国家质监局锅炉和压力容器检测研究中心主办,爱德森公司发起并协办的我国首届金属磁记忆检测技术学术研讨会,汇集出版了国内各工业部门与科研单位有关磁记忆检测技术的研究和应用成果;2002年,在无损检测学会电磁(涡流)检测专业学术会议上又收录了十余篇关于磁记忆检测技术研究和应用的学术论文;国内的《无损检测》杂志还开辟了关于磁记忆检测技术的专题论坛;2010年5月,我国电力部门参照俄罗斯联邦国家及俄罗斯焊接学会标准 СТНТСО000-04 并结合我国电力行业实际应用情况,发布了电力行业磁记忆检测标准 DL/T 1105.4^[9],是我国首个磁记忆检测标准。

在国内,目前已有清华大学、南昌航空大学、北京理工、北京科技、北京交通、北京工业、北京化工、天津大学、东南大学、哈工大、合肥工业大学、国防科大、装甲兵工程学院、大庆石油学院、南京航空航天大学、中国特种设备研究院、中科院电工所、铁道科学研究院、南京汽轮机研究所、爱德森电子有限公司等数十所高等院校、研究院所和单位开展了多个方面的磁记忆检测的研究工作。

2.1 磁记忆检测基础理论研究

通过研究现已提出了诸多理论,如:

(1) 应力和外磁场共同作用理论,即应力的磁效应是在应力和外磁场(如地磁场)的共同作用下产生的^[6]。

(2) 能量最小原理的应力磁化理论,即在外应力的作用下,试件产生磁致伸缩,引起磁畴壁移动,改变其自发磁化的方向以增加磁弹性能,来抵消应力能的增加,从而影响试件在外磁场中的磁化状态^[10]。

(3) 应力的等效磁场理论,即应力的作用等效于外磁场,应力改变试件的微观特性和磁畴结构,在环境磁场作用下金属试件表现出磁化特性^[11]。

(4) 应力的磁导率效应理论,即机械应力的不均匀性导致磁导率分布的不均匀性,进而在地磁场的作用下引起漏磁场,漏磁场的量值取决于磁导率的不均匀程度^[12]。

(5) 应力磁效应的电磁感应理论,即应变引起通过金属试件的磁通量发生变化,产生感生电流,进而引起试件磁化^[13]。

另外,还提出了不少模型,如管件缺陷段的磁偶极子的漏磁场模型(图2)、磁偶极子模型(图3)、空洞及畴壁聚合模型(图4)、磁畴变化模型、裂纹类缺陷理论模型、地磁场中铁磁构件应力集中区的力磁耦合模型等^[14-16]。

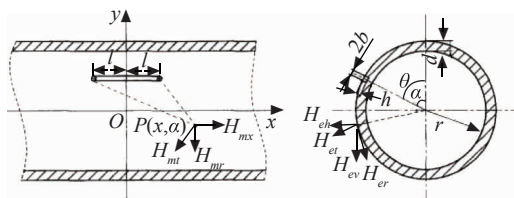


图2 管件缺陷段的磁偶极子的漏磁场模型

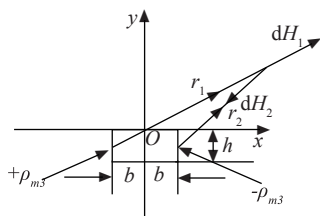


图3 带磁偶极子模型

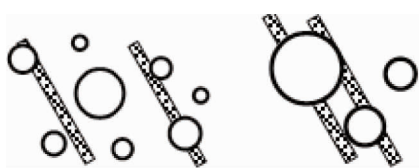


图4 空洞及畴壁聚合模型

2.2 仪器设备研发

国内有不少公司及科研院所研发了磁记忆检测仪器,略举如下:

(1) EMS系列磁记忆诊断仪:EMS-1000、EMS-2000智能磁记忆诊断仪,磁记忆-涡流一体的EMS-2003诊断仪,EMS-2005多功能诊断仪等(图5)。该系列仪器传感器采用霍尔元件,配有不同形式的长度计数器,以适应不同形式的检测需要。



(a) EMS-2003

(b) EEC-2008net

图5 诊断仪

(2) 其它:便携式掌上微磁检测仪、RM-1型金属磁记忆寿命评估仪等一些自行设计研发的检测仪器等(图6)^[17-18]。



(a) 掌上微磁检测仪

(b) RM-1型金属磁记忆检测仪

图6 检测仪

(3) 检测探头:用于磁记忆检测探头的传感器主要有霍尔传感器、磁阻传感器、磁矩传感器等,一般都具有高分辨率与高灵敏度。

同时,还有单位开展了多探头磁记忆检测装置的研制工作,如图7所示^[19]。

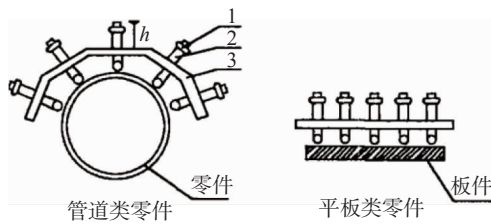
2.3 基础试验研究

为得到磁记忆检测信号在不同条件作用下的变化规律,我国学者对常见铁磁材料等做了不少试验研究,其中主要有:

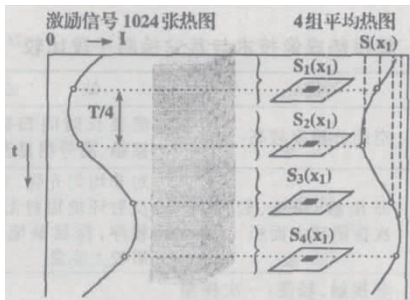
(1) 常温下的各类型(如中心圆孔)平板、圆棒等标准试样的静载荷拉伸试验(图8)^[20]、疲劳拉伸试验(图9)^[21]、压缩试验、三点弯曲试验、扭转试验等。

(2) 利用粉纹法观察受力程度不同的试件的磁畴结构(图10),从微观角度证明了金属磁记忆检测是以铁磁构件的力-磁效应为基础^[22]。

(3) 以压力容器典型材料16MnR为研究对象,采用宏观试验、不同变形阶段的微观及磁记忆跟踪

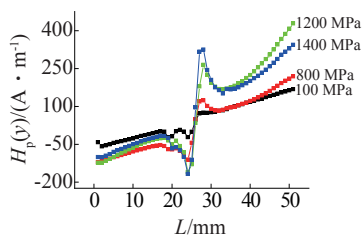


(a) 探头与扫查架结构图

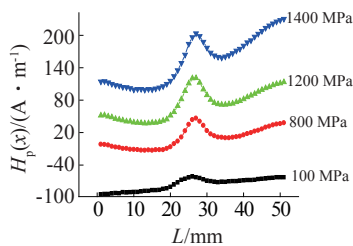


(b) 多探头检测系统侧视图

图 7 多探头检测系统图



(a) 不同应力下的法向磁信号



(b) 不同应力下的切向信号

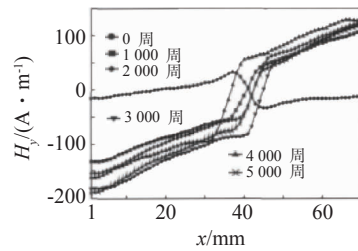
图 8 30CrMnSiNi2A 材料在不同应力下法向与切向磁场分布

检测、有限元数值模拟相结合的方法,从多角度评估结构塑性极限载荷^[23]。

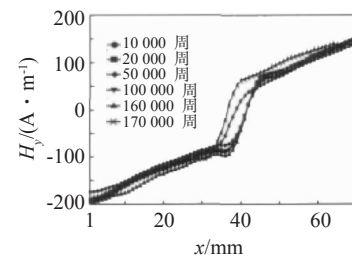
(4) 提出利用地磁场环境下试件表面三维弱磁信号进行检测的新方法,采用二维磁记忆检测传感器实现螺线法向、轴向和切向三维弱磁信号的在位测量^[24]。

2.4 信号处理研究

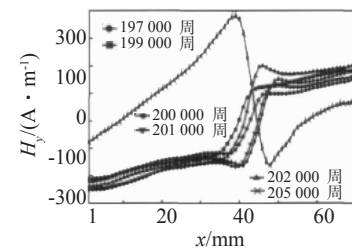
(1) 信号特征量的提取 例如,在法向分量过



(a) 初始阶段



(b) 中间阶段



(c) 最后阶段

图 9 45 号钢磁信号随循环次数的变化

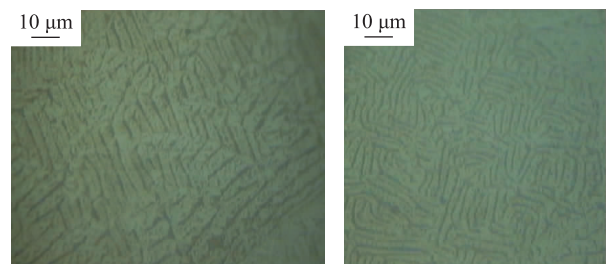
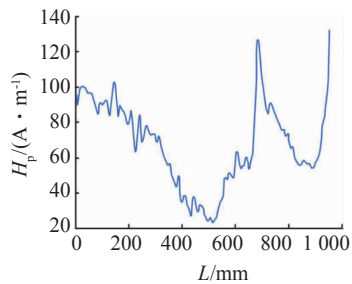


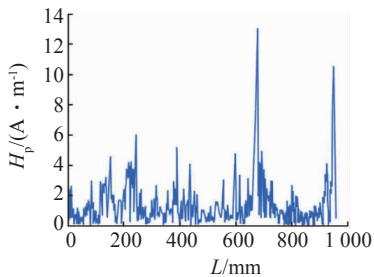
图 10 粉纹法观察磁畴变化情况

零和切向分量极大值点特征的基础上,利用傅里叶分析相位突变位置、区域信号的最大值和最小值差值、信号在检测方向的梯度、信号在垂直方向上的梯度;采用 Lipschitz 指数法对磁记忆信号进行特征分析,根据信号奇异性与模极大值的关系确定信号突变位置,以此作为过零点和梯度值特征的补充等^[25-26]。

(2) 信号降噪 对含有噪声的套管金属磁记忆检测信号,利用指数小波技术进行信号处理,基于信号与噪声在小波分析中不同尺度的传播特性,去除



(a) 小波消噪后的包络图



(b) 包络的梯度

图 11 小波消噪后的包络图与包络的梯度

噪声以提高信噪比(图 11);利用改进小波阈值函数与自适应阈值相结合的方法,克服软阈值信号失真和硬阈值不连续、振荡等缺点,提高了重建信号的信噪比等^[27-28]。

(3) 其它 以 X70 管线钢为研究对象,研究在拉伸条件下金属磁记忆检测信号的二维特征谱熵分布规律,实现幅值谱熵和重心频率确定点的位置的分类,进而研究材料内部裂纹的形核与发展(图 12)。其中相对谱熵 H_r 反映了该谱的能量集中程度,谱的重心频率 CG 指标则可反映谱的能量集中位置^[29]。

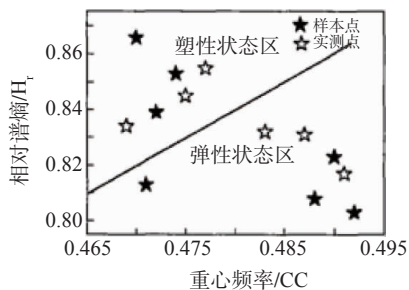


图 12 二维谱熵分布图

2.5 定量化及损伤评估方面研究

(1) 探讨法向与切向联合检测的磁记忆二维检测法,即通过同时检测磁记忆信号切向与法向分量,一阶微分后合成为李莎如图再求出面积,然后根据面积大小判断应力集中程度,如图 13 所示。该法为

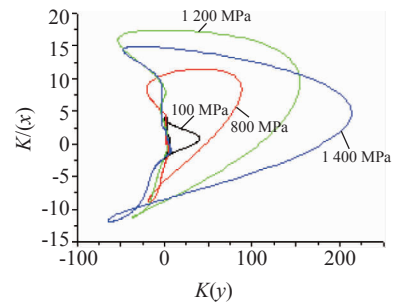
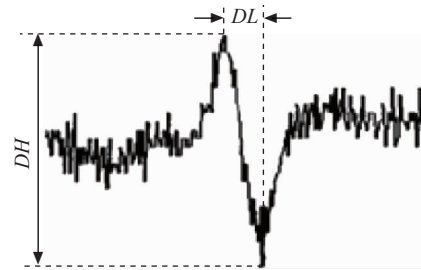


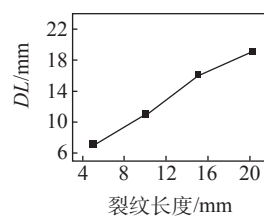
图 13 四种应力情况下二维检测曲线

磁记忆检测定量分析开辟了一条新途径^[30]。

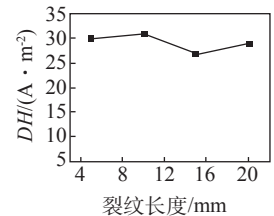
(2) 通过对预制焊接裂纹一阶微分后的磁记忆信号进行分析,寻找焊接裂纹存在的定位特征,并建立微分后的磁记忆信号与焊接裂纹的长度及埋深的定量关系(图 14)^[31]。



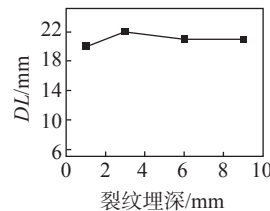
(a) 微分信号波形特征量



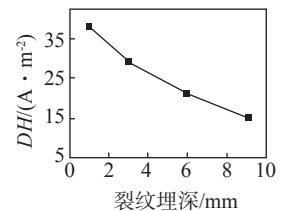
(b) 裂纹长度-DL 关系



(c) 裂纹长度-DH 关系



(d) 裂纹埋深-DL 关系



(e) 裂纹埋深-DH 关系

图 14 焊接裂纹参数与定量特征(DL、DH)之间的关系

(3) 对铁磁材料钢缺口试件进行疲劳试验和磁记忆信号检测,提出一种新疲劳损伤模型,探讨磁场强度梯度 K 平均值法对于定量评估试件疲劳损伤的可行性^[32-33]。

另外,还有将金属磁记忆技术用于再制造毛坯

的寿命评估;通过检测自然磁化漏磁场强度实现对奥氏体不锈钢材料损伤程度的定量检测和评估等^[34]。

2.6 工程检测应用研究

目前,我国已在诸多工程领域开展了磁记忆检测的应用研究。如:航空(飞机起落架、直升机尾桨变距拉杆等)、电力(电站涡轮汽轮机叶片、高压汽缸、在役火力发电机组中的高温联箱管脚焊缝等)、压力容器(CNG 储气瓶、氧气球罐等)、管道(蒸汽管道、石油输油管、压力管道焊缝等)、铁路(无缝钢轨、铁路槽车等)、船舶(柴油机曲轴等)、机械(起重机轨道、高强度连接螺栓、石油钻具、钢丝绳等),见图 15~19^[35-40]。

3 存在问题与发展趋势

3.1 存在问题

金属磁记忆检测在我国经过十多年发展,虽然取得了不少研究成果与检测经验,但还存在着不少亟待解决的问题。

(1) 磁记忆检测的机理。国内虽有不少理论研究成果,如基于铁磁学基本理论的能量平衡说,基于电磁学的“电磁感应”学说等,但尚未形成一套有共识的系统严密的理论体系。



图 15 电站高温联箱管脚焊缝磁记忆现场检测

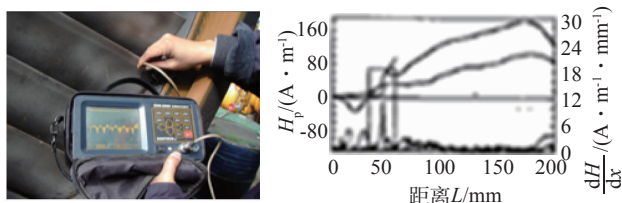


图 16 某汽轮叶片磁记忆检测现场与结果图

(2) 磁记忆检测的影响因素。如:

- 地磁场的存在是否是诱发铁磁构件应力集中区形成表面漏磁场的必要条件;
- 地磁场是矢量场,且随纬度和地理环境的不



图 17 氧气球罐器现场检测



图 18 钢轨现场检测



图 19 轮毂现场检测

同而变化,因此,磁记忆现象是否具有一定的空间方向性;

• 由于金属磁记忆检测提取试件表面的自有漏磁(SMLF)属于弱磁信号,极易受到外界环境及人为等诸多因素的影响,采用什么方法能消除这些干扰^[41-42]。

(3) 磁记忆检测的重复性与可靠性问题。该方法属于弱磁信号检测方法,信号易受其它因素干扰,这就使磁记忆检测的重复性与可靠性面临着一定的挑战。

(4) 磁记忆检测能否检测缺陷的问题。目前的共识是磁记忆可用来检测受载铁磁构件的应力集中部位,但仍存在把应力集中部位与宏观缺陷等同,从而认为磁记忆检测技术可以探测铁磁材料宏观缺陷的误区。

(5) 磁记忆检测能否对被检测对象损伤情况进行量化评价的问题。金属磁记忆效应实质上是一种广义的漏磁场效应,理论上可以实现量化。但目前磁记忆检测只能作为铁磁构件是否存在危险的一种前期初步判定方法。制约磁记忆检测定量评估主要有两方面原因:一是目前的仪器只能获取被检对象的部分信息,如法向磁场分量过零值,未能获取全面信息;二是由于机械应力与其引起的试件表面漏磁场之间有着复杂的非线性关系,尚未提出合理的理论模型,也未得出试件到达屈服或紧缩临界状态时的磁记忆敏感参数。所以在磁记忆检测量化评估方面,还未有真正的突破,有待进一步深入研究。

3.2 发展趋势

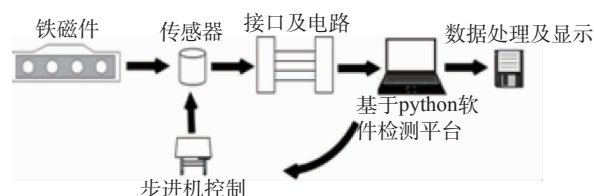
磁记忆检测技术在我国虽然只有十余年的发展历程,但该技术在铁磁构件早期诊断与寿命预判方面的应用前景,已得到了业界专家学者的普遍认可。也正是因为该技术发展时间不长,还不成熟,其理论基础与应用还有待进一步深入研究。总的来说,磁记忆检测技术的发展趋势有:

(1) 磁记忆检测机理研究 有可能如涡流检测理论分析出现阻抗分析法一样,在已有的理论研究基础上,从磁性物理学、金属材料学、弹塑性力学、铁磁学、现代材料分析测试学等多学科、多角度的综合来探讨研究磁记忆检测机理。并在大量试验研究的基础上,建立不同金属材料在不同外界条件作用下的磁记忆效应、不同形状构件在不同约束和受载条件下应力场和磁记忆场之间的对应关系等。从而得出能获得共识的理论分析模型,在微观与宏观两方面建立起系统的磁记忆检测理论体系。

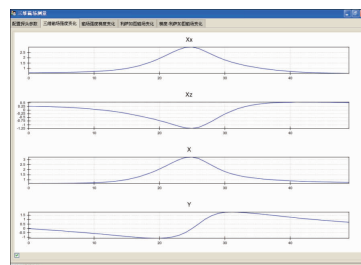
(2) 磁记忆检测仪器研制 为了能够满足现场实际检测要求,磁记忆检测探头会向三维化、专用化方向发展。检测探头三维化既能检测法向分量磁场信号又能获得切向分量磁场信号,是全面评价信号特征的有效途径;专用化即根据检测环境实际情况开发专用探头。同时,随着电子及计算机技术的发展,磁记忆检测设备必定会朝着三维高精度、多参量、多功能、智能化及与其它检测方法如超声、涡流、漏磁等相结合的集成检测方向发展。

(3) 磁记忆信号处理及定量分析 小波去噪、Hilbert 变换、人工神经网络等现代信号处理技术以及软件必将在磁记忆检测信号处理及分析过程中得到更好的应用。其中,南昌航空大学首先提出的法

向与切向联合的二维检测法及信号处理技术的进一步完善(如以 HMC5883L 三维磁传感器为检测探头的二维检测系统的出现,见图 20),不仅能依靠法向过零与切向极值的联合检测来准确判断应力集中部位,而且可望利用两分量组成的李莎如图面积实现磁记忆检测定量评价的突破。



(a) 检测系统构建图



(b) 检测系统的软件界面

图 20 磁记忆二维检测系统及软件界面

(4) 其它 随着磁记忆检测技术进一步发展成熟,它将会被越来越多地应用到工程项目的实际检测当中(如电站锅炉、高铁机车及路轨的磁记忆检测等)。同时,也必定会促进从事磁记忆检测的研究及工程技术人员的交流合作与培训,共同建立磁记忆检测技术的相关数据库,以进一步推动磁记忆检测技术的发展。

4 展望

金属磁记忆检测方法作为一种发展不久的新型无损检测技术,目前,已在磁记忆检测基础理论研究、仪器设备的研发、基础试验研究、信号处理研究、量化及损伤评估研究及工程检测应用等方面取得了不少研究成果。但是,仍然在机理研究、影响因素分析、检测重复性与可靠性、量化评价等方面存在不少亟待解决的问题。然而,由于磁记忆检测具有的独特优点,在我国虽然只有短短十二年的发展历程,但该技术在铁磁构件早期诊断与寿命预判方面的应用前景,已得到了业界专家学者的普遍认可。只要持续不断地进行具有开拓性的深入研究,就可

望在磁记忆检测机理探索、磁记忆检测特征量的提取、定量评价与损伤评估等方面能取得更多的突破性进展,使它在铁磁构件早期损伤预诊断上的优势充分发挥出来,更好地服务于我国工业化检测。

参考文献:

- [1] ISO 24497-1: 2007(E) Non-destructive testing-Metal magnetic memory[S].
- [2] Doubov A A. Diagnostics of boiler tubes with usage of metal magnetic memory [M]. Moscow: Energoatomizdat, 1995.
- [3] Doubov A A. Study of metal properties using magnetic memory method [C]. Proceedings of the 7th European Conference on Nondestructive Testing. Copenhagen: 1998, 920—927.
- [4] Doubov A A. The method of metal magnetic memory—the new trend in engineering diagnostics[J]. Welding in the World, 2005, 49(9): 314—319.
- [5] <http://www.energodagnostika.cn>.
- [6] Doubov A A. Diagnostics of metal items and equipment by means of metal magnetic memory[C]. Proceedings of the CHSNDT 7th Conference on NDT and International Research Symposium. Shantou, China, 1999: 181—187.
- [7] 林俊明,等.一种在役部件早期损伤的无损检测新方法[C]. 2000年火电厂寿命管理与延寿国际会议暨全国第六届电站金属构件失效分析与寿命管理学术会议论文集, 2000.
- [8] 任吉林,林俊明,等.金属磁记忆检测技术[M]. 中国电力出版社, 2000.
- [9] DL/T 1105.4 电站锅炉集箱小口径接管座角焊缝无损检测技术导则第4部分:磁记忆检测.
- [10] 任吉林,郭冠华,等.金属磁记忆检测机理的探讨[J]. 无损检测, 2002, 24(1): 29—31.
- [11] Jiles D C. A new approach to modeling the magneto-mechanical effect [J]. Journal of Applied Physics, 2004, 95(11): 7058—7060.
- [12] 杜波夫. 磁机械效应及其在金属结构损坏论断中的应用[M]. 俄罗斯, 动力诊断公司培训教材, 2003: 20—28.
- [13] 仲维畅. 金属磁记忆法诊断的理论基础[J]. 无损检测, 2001, 23(10): 424—426.
- [14] 王朝霞,张卫民,宋金钢,等.弱磁场作用下的磁偶极子模型建立与分析[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(5): 395—398.
- [15] 宋凯,任吉林,任尚坤,等.基于磁畴聚合模型的磁记忆效应机理研究[J]. 无损检测, 2007, 29(6): 312—314.
- [16] 万强,李思忠,汤紫峰.地磁场中铁磁构件应力集中区的力磁耦合模型[J]. 无损检测, 2011, 33(4): 12—16.
- [17] 李路明,胡斌,黄松岭,等.掌上型金属磁记忆检测仪[J]. 无损检测, 2004, 26(5): 249—252.
- [18] 董丽虹,徐滨士,董世运.金属磁记忆技术用于再制造毛坯寿命评估初探[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 106—111.
- [19] 郭欣,张卫民,史迎雪.多探头磁记忆检测装置的设计与研制[J]. 无损探伤, 2006, 30(3): 30—32.
- [20] 任吉林,罗声彩,王进,等.金属磁记忆二维定量检测试验研究[C]. 全国第九届无损检测学术年会论文集. 上海: 2010, 473—481.
- [21] 冷建成,徐敏强,王坤,等.基于磁记忆技术的疲劳损伤监测[J]. 材料工程, 2011, (05) 26—29.
- [22] Jilin Ren, et al. An experimental research of the effects of stress upon the magnetic domains in magnetic memory testing [C]. The 14th International symposium on applied electromagnetic and mechanics, 2009, 10.
- [23] 张亦良,姜公锋,孙亮,等.结构极限承载与微观金相特征的关系[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(2): 145—151.
- [24] 张卫民,涂青松,殷亮.静拉伸条件下螺纹联接件三维弱磁信号研究[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(10): 1151—1154.
- [25] 梁志芳,王迎娜,李午申,等.焊接裂纹金属磁记忆信号特征研究的进展[J]. 机械科学与技术, 2007, 8(1): 81—83.
- [26] 王继革,王文江,郭爽.金属磁记忆信号特征量提取中的 Lipschitz 指数法[J]. 无损检测, 2008, 30(8): 494—497.
- [27] 张军,王彪,计秉玉.基于小波变换的套管金属磁记忆检测信号处理[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 137—140.
- [28] 易方,李著信,苏毅,等.基于改进型小波阈值的输油管道磁记忆信号降噪方法研究[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 141—144.
- [29] 邸新杰,李午申,白世武,等.金属磁记忆检测信号的二维谱熵特征[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 69—72.
- [30] 任吉林,王进,范振中,等.一种磁记忆检测定量分析的新方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 431—435.
- [31] 邸新杰,李午申,白世武,等.焊接裂纹的金属磁记忆定量化评价研究[J]. 材料工程, 2006, (7): 56—60.
- [32] 刘昌奎,陶春虎,陈星,等.金属磁记忆检测技术定量评估构件疲劳损伤研究[J]. 材料工程, 2009, (8): 33—37.
- [33] 李新蕾,任吉林,任尚坤,等.铁磁构件残余寿命评估方法[J]. 航空学报, 2010, 31(10): 2109—2114.

欢迎索取——

《2011'中国无损检测年度报告》

——实时记录中国 NDT 技术与行业发展进程

学术指导:全国无损检测学会

全国无损检测标准化技术委员会

策划出版:《无损检测》编辑部

价值呈现:汇聚精英观点,点评年度热点

展示发展进程,引领行业方向

出版时间:2012 年 3 月

栏目策划:

一 特别策划:NDT 技术

——全程保障中国铁路运行安全

二 2011'中国 NDT 技术发展年度报告

- 各类 NDT 技术的研究进展
- 各行业 NDT 技术的应用进展
- NDT 仪器设备的发展

三 2011'中国 NDT 标准化进程年度报告

- 2010'中国国家 NDT 标准发展进程
- 2010'中国行业 NDT 标准发展进程

四 2011'中国 NDT 技术服务发展年度报告

五 2011'NDT 新设备展示

- 国内 NDT 新设备展示
- 国外 NDT 新设备展示

六 2011'中国 NDT 专利汇总

七 2011'年度人物访谈

发行与赠阅:

- 《无损检测》杂志 2012 年度订户免费赠阅

注:请在完成邮局订阅程序后,将邮局订单传真至《无损检测》杂志发行中心(Fax:021-65527634),并在订单上注明您的联系电话和联系人

- 全国无损检测学会理事会成员赠阅
- 全国无损检测标准化技术委员会成员赠阅
- 《无损检测》编辑部专家库专家赠阅
- 2012 年度全国无损检测学会资格考证 3 级班赠阅
- 2012 年度各行业学会无损检测资格考证 3 级班赠阅
- 2012 年度各类无损检测技术交流会赠阅
- 2012 年度各类行业及专业展览会赠阅

.....

联系方式:

策划出版:《无损检测》编辑部

联系人:符艳

电话:021-65556775-225

E-mail:ndt@mat-test.com

[34] 李红梅,赵天飞,陈振茂.基于自然磁化现象的损伤定量无损检测方法[J].西安交通大学学报,2011,45(1):58-63.

[35] 任吉林,宋凯,郭冠华,等.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.

[36] 任吉林,高春法,宋凯,等.电站铁磁构件的磁记忆检测[J].仪器仪表学报,2003,24(5):470-472.

[37] 杨其明,李国直,王大生.铁路专用金属磁记忆检测仪的研制及初步应用[J].中国铁道科学,2005,26(1):138-141.

[38] 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(2):1011-1014.

[39] 高广兴,沈功田,胡斌,等.在用起重机金属磁记忆检测的信号特征及验证[J].无损检测,2010,32(5):317-320.

[40] 孙吉业,樊建春,张来斌.基于磁记忆效应的新型管道机器人[J].石油机械,2011,39(1):51-53.

[41] 钟力强,李路明,陈研.地磁场方向对应力集中引起的磁场畸变的影响[J].无损检测,2009,31(1):1-3.

[42] 冷建成,徐敏强,邢海燕.铁磁构件磁记忆检测技术的研究进展[J].材料工程,2010,(11):88-93.

欢迎网上投稿 网址:www.mat-test.com