



信息与自动化系列

磁记忆检测信号处理 与井下应用

编 著 张 军 刘志林

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

信息与自动化系列

磁记忆检测信号处理与井下应用

张 军 刘志林 编著

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

新兴的磁记忆检测技术,被称为 21 世纪最有前景的无损检测技术之一,具有预测铁磁工件寿命的优点。《磁记忆检测信号处理与井下应用》从磁记忆检测仪表的硬件设计、信号多信息处理、特征提取和故障特征非线性定量反演入手,针对复杂环境的井下套管故障诊断提出系统的定量分析方法。同时,注重理论与实践的紧密结合,基于复杂实际现场采集磁记忆信号难以准确预测故障的难题,从信号智能处理的角度出发,给出了多层次信号特征提取方法,解决了工程应用的难题。

《磁记忆检测信号处理与井下应用》理论与工程实际应用紧密结合,不仅丰富了磁记忆检测技术信号处理内容,同时扩大了磁记忆的工程应用范围。本书适用于大专院校的教师、学生和科研人员阅读,同时他适用于现场工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁记忆检测信号处理与井下应用/张军,刘志林编著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2012.7
ISBN 978-7-5661-0418-2

I. ①磁… II. ①张… ②刘… III. ①磁性检验-信号处理 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 179269 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东市一兴印刷有限公司
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 7.25
字 数 180 千字
版 次 2012 年 7 月第 1 版
印 次 2012 年 7 月第 1 次印刷
定 价 17.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn



前 言

金属磁记忆检测技术是一种利用金属磁记忆效应来检测部件应力集中部位的快速无损检测方法,能够对微观缺陷和早期失效损伤进行诊断,被称为 21 世纪最有前景的无损检测技术之一。该技术由俄罗斯学者 Doubov 提出金属应力集中区的磁记忆检测效应,并形成了一套全新的无损检测与诊断技术——金属磁记忆检测技术(Metal Magnetic Memory Test)。在 1997 年第 50 届国际焊接学术会议上,磁记忆法获得承认,我国 1999 年引进此技术,目前在机械、航空、铁路、石化等领域有着极其广泛的应用前景。

不同领域的研究发现:磁记忆现象明显存在,但是磁记忆机理不明确。工程中磁记忆检测虽然可以做到早期诊断,但是还存在许多困难,出现这种情况主要原因是磁记忆涉及到磁性物理学、铁磁学、金属材料学、弹塑性力学、断裂力学、磁弹性理论、信号与系统分析等多个学科的知识。国内外学者主要在地面试验室上围绕磁记忆微观机理和试验展开研究,探讨磁记忆信号特征过零点与外部载荷的关系。本书依托作者承担的大庆油田责任公司的《金属磁记忆预测井下套管故障研究》课题,从工程实际出发,研究了井下磁记忆检测仪表的硬件设计、信号多信息处理、特征提取和故障特征非线性定量反演入手,给出了复杂环境的井下套管故障诊断提出系统的定量分析方法。

第 1 章回顾了金属磁记忆的发展过程,阐述了最新的金属磁记忆效应的物理机理、理论模型、试验、信号分析、工程应用等内容,提出了井下金属磁记忆仪表特有的研制思路和信号处理方法。第 2 章基于 HMC1022 磁阻传感器设计磁记忆检测仪表,保证了高精度信号的获取。第 3 章设计了套管的挤压试验,模拟地应力对套管的作用影响。第 4 章对低信噪比的套管故障磁记忆信号采用先进信息处理技术,采用傅里叶变换和多种小波消噪方法提取故障特征量,准确确定应力集中区。提出了奇异性指数作为衡量套管应力集中程度,丰富了俄罗斯动力诊断公司的单一衡量应力集中程度指标梯度。第 5 章建立了套管定量故障的多特征量,将 RBF 神经网络和支持向量机软测量方法应用到故障的非线性反演计算中,通过试验和实际油井测试实现了套管应力集中的定量判断。

本书由张军和刘志林共同撰写。大庆油田责任公司测试服务分公司的刘兴斌教授级总工担任本书的主审,他对本书提出了许多宝贵的指导意见。在编写过程中,编著者参阅了国内外许多专家、同行的专著和论文。本书的编写工作得到了哈尔滨工业大学、中山大学长江特聘教授王彪教授,大庆油田责任公司的计秉玉副总地质师两位导师莅临指导,以及哈尔滨工程大学朱齐丹教授,大庆油田博士后工作站孙彦书记、王英、万金荣老师,大庆测井研究所刘青昕、陈茂龙、谢进庄、张友明等工程师的大力支持和帮助,在此向他们表示诚挚的感谢。

由于磁记忆技术发展尚未成熟,编著者个人水平有限,书中难免存在缺点甚至错误,敬请广大读者批评指正。

编著者
2012 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究目的	1
1.2 金属磁记忆检测技术及其特点	1
1.3 金属磁记忆检测技术研究现状	5
1.4 金属磁记忆检测技术的发展趋势	10
1.5 井下套管金属磁记忆检测系统的结构	10
1.6 井下套管磁记忆检测的可靠性关键技术	12
1.7 本书的内容和结构	13
第 2 章 井下金属磁记忆检测系统的软硬件设计	15
2.1 金属磁记忆传感器的选择	15
2.2 HMC1022 磁阻传感器工作原理	16
2.3 HMC1022 电桥偏置的补偿	17
2.4 HMC1022 传感器外围电路设计	18
2.5 放大电路设计	19
2.6 低通滤波器设计	21
2.7 看门狗电路设计	22
2.8 硬件 PCB 关键设计	23
2.9 系统的软件设计	24
2.10 本章小结	25
第 3 章 金属磁记忆信号分析基础与试验设计	26
3.1 傅里叶变换(FT)	26
3.2 离散傅里叶变换(DFT)	27
3.3 快速傅里叶变换(FFT)	28
3.4 小波分析和信号处理	28
3.5 小波分析与瞬态信号	29
3.6 小波和小波变换	30
3.7 离散小波和离散小波变换	32
3.8 小波变换与时-频分析	36
3.9 离散小波与时-频分析	37
3.10 Mallat 算法和金字塔算法	39
3.11 金属套管加力试验设计	43
3.12 本章小结	47
第 4 章 金属磁记忆信号的多信息处理	48
4.1 弱磁信号处理	48

4.2	金属磁记忆信号处理目的	49
4.3	金属磁记忆信号的分析	49
4.4	金属磁记忆信号的数字滤波预处理	52
4.5	磁记忆信号的小波滤波	53
4.6	金属磁记忆信号的小波消噪方法	57
4.7	基于小波系数的“Teager”能量算子信号处理	74
4.8	小波自适应阈值消噪磁	77
4.9	基于奇异性指数检测	80
4.10	应力集中的定性判断规则	84
4.11	本章小结	86
第5章	套管应力集中的磁记忆非线性定量反演	87
5.1	金属磁记忆的非线性定量反演	88
5.2	金属磁记忆信号的特征量提取	88
5.3	神经网络	92
5.4	试验结果	97
5.5	支持向量机	98
5.6	井下套管应力检测的应用	103
5.7	本章小结	105
参考文献		106

第1章 绪 论

1.1 研究目的

目前全国各油田开发均已进入中后期阶段,油井套管的损坏(套损)数量逐年增加,并且套损程度越来越严重,套损成为影响各油田正常开发的重要因素,其中仅大庆油田至2004年末,套损井增至10 573口,占已投产油水井的18.86%^[1]。此外,大港油田、玉门油田、辽河油田、青海油田、吐哈油田等均存在着严重的套管变形,套损成为目前中国石油油气生产所面临的重要问题。

复杂断块油气田的套损井,有近70%是由于地质因素和工程因素造成的。地质因素包括泥岩吸水和蠕变、储集层沉积压实、岩盐层蠕变、地质古应力和现代地应力和地层出砂等。工程因素包括套管材质和强度、井深结构设计、固井质量、射孔、注水和采油作业等。这些因素使套管受到非均匀载荷的作用产生塑性变形。套管承受力而失去平衡,该失衡点为应力集中区,易造成套管弯曲、变形或错断^[2]。套损井数的逐年增加,对油田生产和发展是极其不利的,其经济损失是不容忽视的。套损检测可有效地指导套损的检验及修复状况,恢复油井产能。准确地检测出油田井下套管的损坏状况、方位和种类以及套管所受的应力分布状况,能为套损机理的分析、套损的预测以及注采方案的调整提供准确的依据,从而可以有效地保护油水井套管。预防套损的发生,并指导套损井的治理和修复,对油田的稳产及发展起着重要的作用。

现阶段套损检测技术的方法及种类相对比较多,但是均不能进行前期的套损预测,达到预防套损发生的目的。采用多臂井径、超声电视和管子分析仪等传统套损检测方法所能检测到的都是已经发生形变或破损之后的状况,属于被动检查。套损预报预防的前提是对套管物理状况的了解和有关信息的反馈,即能否给出局部(单井或具体层位)的应力变化情况,然后作出单井进一步区域性预测;其目的是研究能直接检测套管内部应力变化的方法,使其在套管发生塑性形变之前就能给出指示,真正实现预测预报的目标,以便地质工程师能够及时调整注采方案,从而避免套损尤其是片损现象的发生,尽可能地减少油田经济损失和社会资源的浪费^[3]。因此,工程上迫切需要寻求一种主动预测——预报——预防套损的新途径,而应用新型的金属磁记忆技术预测和检测井下套管故障成为研究趋势之一^[4,5]。

1.2 金属磁记忆检测技术及其特点

20世纪90年代后期,俄罗斯动力诊断公司 Doubov 教授率先提出了全新的金属磁记忆检测诊断技术,即金属应力集中区——金属微观变化——磁记忆效应相关学说,解决了这一难题^[6]。金属磁记忆方法不仅是迄今为止对金属部件(各种碳钢、奥氏体钢和铁磁奥氏体钢制品)进行早期诊断唯一行之有效的方法,而且可以快速检测出已经出现的金属应力集中区、缺陷和不均匀性,在机械、航空、铁路、石化等领域有着极其广泛的应用前景,已经

在东欧二十多个国家申请了专利技术。

现代材料科学和铁磁学研究证明:地球是一个庞大的磁体,其磁场强度很微弱,在北纬 $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 地域的磁场强度约为 $40 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右。而铁磁体在载荷和微弱地球磁场的作用下,产生磁记忆现象的内部原因取决于铁磁晶体微观结构特点^[7]。铁制工件在经熔炼、锻造、热处理等加工工艺时,温度超过居里点,构件内部的磁畴组织被互解,磁性消失。随后在金属冷却到居里点以下的过程中,一方面铁磁晶体在重新结晶的同时形成磁构造;另一方面,由于材料内部各种不均匀性(如形状、结构及含有夹杂或缺陷等)而形成组织结构不均匀的遗传性。这些组织结构的不均匀部位往往是缺陷或内应力集中部位,一般以位错的形式存在,并在地球磁场中由于磁机械效应作用出现磁畴的固定节点,产生磁极,形成退磁场,以微弱散射磁场的形式在工件表面出现,表现为金属的磁记忆性。对于铁磁材料的晶体,在外磁场作用下由于磁晶体受外应力或者本来存在的内应力,处于稳定状态的磁晶体内总自由能

$$E_F = E_K + E_{ms} + E_{\sigma} + E_{el} \quad (1-1)$$

式中 E_K ——磁晶各向异性能;

E_{ms} ——磁弹性能;

E_{el} ——弹性能;

E_{σ} ——应力能。

它们的表达式分别为:

• 从能量的观点考虑,单晶体在磁场作用下增加的自由能等于磁化功,由于任何铁磁晶体在磁化特性上都显示各向异性,晶体的这一部分自由能与磁化方向有关。以立方晶体为例,晶体总的各向异性能

$$E_K = K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_1^2 \alpha_3^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 \quad (1-2)$$

式中, K_1, K_2 为各向异性常数; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为磁化方向与三个晶轴间的夹角余弦。

磁的各向异性能是在假设磁晶体无任何形变情形下,由于磁化矢量 M_s 离开易磁化轴方向而增加的自由能部分。

• 当磁化矢量离开易磁化轴方向时,晶体同时发生微小的形变,形变结果是使与形变相联系的形变能加上单纯的磁晶各向异性能之和达到总自由能为极小值的稳定状态。伴随磁化发生的晶体形变表现为长度变化或体积变化即为磁致伸缩。这部分因磁致伸缩现象而产生的形变能为磁弹性能。以立方晶系为例,可得磁弹性能

$$E_{ms} = B_1 \sum_i e_{ii} (\alpha_i^3 - \frac{1}{3}) + 2B_2 \sum_{i \neq j} e_{ij} \alpha_i \alpha_j \quad (1-3)$$

式中, B_1, B_2 为磁化与形变相互作用的磁弹性耦合系数; α_i, α_j 为磁化方向与各晶轴间的夹角余弦; e_{ii}, e_{jj} 为形变分量($i, j = x, y, z$),即沿各轴的位伸应变。

• 当把晶体看成无磁性时,晶体的弹性形变使得晶体内的原子位置发生变化。根据弹性力学,晶体弹性能

$$E_{el} = \frac{1}{2} C_{11} (e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2) + 2C_{44} (e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2) + C_{12} (e_{xx} e_{yy} + e_{yy} e_{zz} + e_{xx} e_{zz}) \quad (1-4)$$

式中, $e_{xx}, e_{yy}, e_{zz}, e_{xy}, e_{yz}, e_{zx}$ 为形变的6个分量,即沿 X, Y, Z 轴的位伸应变; C_{11}, C_{44}, C_{12} 为弹性模量。

• 当弹性应力作用于铁磁体时,铁磁体不但产生弹性应变,也会产生磁致伸缩性质的应变。其内部磁畴排列、自发磁化的方向发生变化,引起磁化强度 M 本身也发生变化。若对铁磁构件施加载荷,动态应力的存在会使物体产生应变,构件内部的位错沿着由位错线与柏格斯矢量所确定的滑移面产生滑移运动。位错滑移运动的结果引起晶体内位错密度的增加,形成应力集中区。应力集中区的应力能大小与动态应力的作用时间及频率均有对应关系;并且由于磁致伸缩应变,磁晶体增添应力能,引起磁畴壁的位移,改变其自发磁化方向。根据铁磁学的研究,以各向同性磁致伸缩材料为例,其应力能

$$E_{\sigma} = -\frac{3}{2}\sigma\lambda_s\cos^2\theta \quad (1-5)$$

式中 σ ——应力;

λ_s ——磁致伸缩系数;

θ ——应力方向与磁化方向之间的夹角。

根据“实际存在的状态必定是能量最小的状态”原则,由式(1-5)可知,减小应力能的途径是改变磁化强度的方向。当存在外应力时,对于各向同性磁致伸缩的材料,当 $\lambda_s > 0$ 时,若 $\theta = 0$ 或 π ,都将使应力能最小。这表示对于磁致伸缩为正的材,施加拉力将使材料的磁化强度趋向于拉力方向;而当 $\lambda_s < 0$ 时,若 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 或 $\frac{3\pi}{2}$,使应力能最小,即对于负磁致伸缩的材料,施加拉力将使材料的磁化强度垂直于拉力的方向^[8,9]。

由此可见,当铁磁体受外应力作用时,体内磁化强度会在应力作用下被迫改变方向以减小应力能,使其趋于最小。但应力的存在,或者铁磁体内残余应力引起应力能的增加,由于磁机械效应的作用引起构件内部的磁畴在地球磁场中作畴壁的位移甚至不可逆的重新取向排列,主要以增加磁弹性能的形式来抵消应力能的增加,从而铁磁构件内部产生大大高于地球磁场强度的磁场强度。图1-1所示为磁弹性效应示意图,表明当铁制工件的某一部位在周期性负载和外部磁场(如地球磁场)共同作用下,出现残余磁感应强度和自磁化的增长;图1-1中 ΔM_{σ} 为残余磁感应强度, $\Delta\sigma$ 为周期应力变化量。根据金属力学性能的研究表

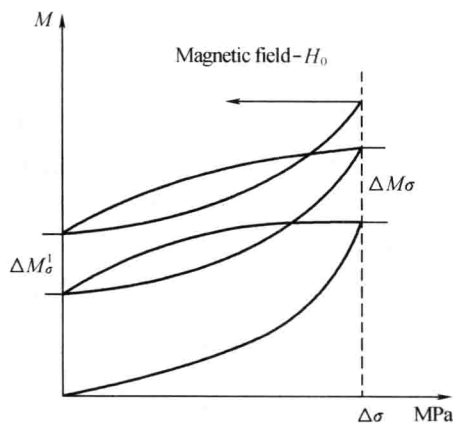


图1-1 磁弹效应示意图

明,由于金属内部存在多种内耗效应(如黏弹性内耗、位错内耗等),势必造成在动态载荷消除之后,加载时在金属内部形成的应力集中区会得以保留,保留下来的应力集中区同样具有较高的应力能。因此,为抵消应力能引发的磁畴组织重新取向排列也会保留下来,并在应力集中区形成类似缺陷的漏磁场分布形式。

处于地磁环境下的铁制工件受工作载荷的作用,其内部会发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向和不可逆的重新取向,并在应力与变形集中区形成最大的散射漏磁场 H_p 的变化,即漏磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值,而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号且具有零值点(见图1-2和图1-3)。分量 $H_p(x)$ 为最大值,而法向分量 $H_p(y)$ 的符号发生改变,且具有过

零值点。俄罗斯动力诊断公司 Doubov 教授提出了被测工件上漏磁场 H_p 与机械应力的变化 $\Delta\sigma$ 的关系

$$H_p = \frac{\lambda^H}{\mu_0} \Delta\sigma \quad (1-6)$$

式中 λ ——磁弹性效应不可逆分量;

μ_0 ——真空磁导率。

应力变化量 H_p 与 $\Delta\sigma$ 关系的重点研究对象为 λ^H 值。 λ^H 是一个取决于机械应力、外磁场强度和温度的函数,目前已经对管道钢等材料的 λ^H 进行了研究。

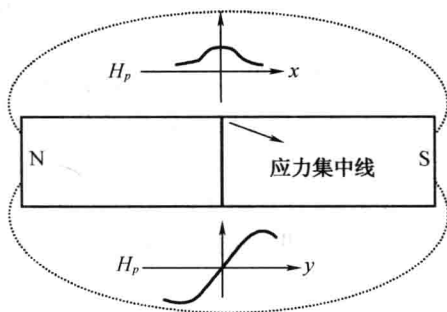


图 1-2 磁记忆检测原理

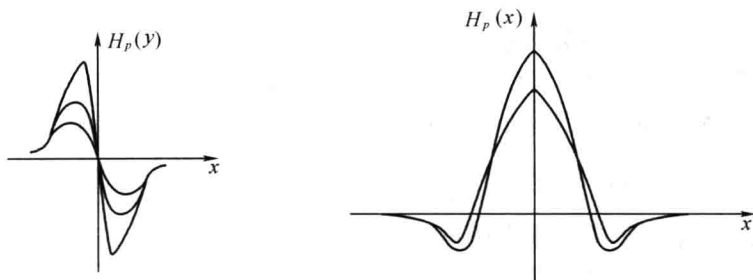


图 1-3 金属磁记忆信号特征

金属磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后继续保留,工程上通过对散射漏磁场法向分量 $H_p(y)$ 的测定,便可准确地对部件缺陷和(或)应力集中区域进行诊断;并以磁场变化梯度极大值的绝对值作为诊断参数来判断应力集中程度(俄罗斯动力诊断公司的专利),即 $K = \left| \frac{dH_p(y)}{dx} \right|$ 作

为衡量指标。磁记忆技术适用于铁磁性金属构件失效的早期诊断,已经通过大量拉伸试验得到验证(图 1-4),尤其在机械设备承载部件疲劳强度评估和寿命预测的应用研究中极具潜力^[10]。磁记忆技术能检测到最为危险的濒临损伤前状态,这是传统的无损检测方法做不到的,被认为是 21 世纪最有前景的诊断技术之一,其主要优点如下:

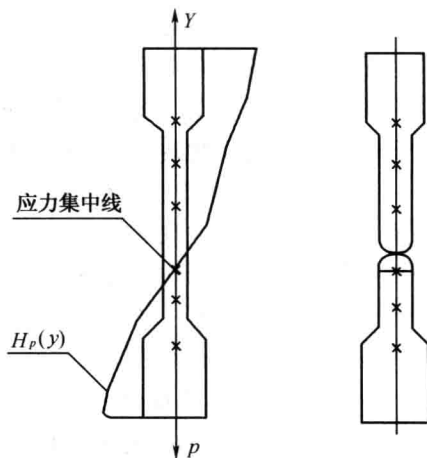


图 1-4 金属磁记忆拉伸试验

(1) 磁记忆检测是以应力和变形集中区为标志的最危险区域的无损检测方法,通过磁记忆检测可以早期诊断,并较为准确地评价设备的安全性。

(2) 对设备外露部分的检验无需设备停止工作,因此磁记忆检测不仅能检测检修的设备,也能检测正在运行的设备。

(3) 无需对被检测对象表面进行去除涂层、打磨等预处理,降低了成本;最大提高高度为 150 mm,提离效应小。

(4) 利用地球磁场,无需专门的磁化装置(消磁或者激磁)。检测设备体积小、质量轻,同时能改善劳动条件,降低劳动强度。

(5) 与传统的无损检测方法配合,能提高检测效率和精度。

1.3 金属磁记忆检测技术研究现状

不同领域的研究发现:磁记忆现象明显存在,但是磁记忆机理不明确。工程中磁记忆检测虽然可以做到早期诊断,但是还存在许多困难,主要体现在很难给出金属构件疲劳损伤定量评估,检测强烈依赖于检测人员的经验,在实际应用中很不方便,无法发挥自身的技术优势等^[7]。出现这种情况的主要原因是磁记忆涉及到磁性物理学、铁磁学、金属材料学、弹塑性力学、断裂力学、磁弹性理论、信号与系统分析等多个学科的知识,很难单纯从某一个学科理论阐述明确的量化模型关系^[12]。这项技术发展历程相对较短,尚有很多问题有待完善,主要集中在下面几大方向:磁记忆微观机理和试验研究、磁记忆传感器硬件系统开发、基于磁记忆信号的故障识别和磁记忆定量评估损伤等。

1.3.1 金属磁记忆微观机理研究

构建反映磁记忆效应的机理模型,是无损检测量化的基础,也是工程应用标准化的要求,对于推广和提高磁记忆技术的实践应用具有重要的指导意义^[13]。

1. 唯象本构模型

金属磁记忆方法的物理基础源自磁弹性效应和磁机械效应、应力集中区中位错壁上磁畴边界的固锁效应以及金属天然磁化强度条件下组织和机械强度不均匀性造成的漏磁场效应,其实质是铁磁性构件在恒定弱磁场(如地磁场下)的力-磁耦合作用。在金属磁记忆理论提出之前,应力与磁性能之间的关系早已受到各国学者的关注,并做了大量的试验来研究拉压、扭转等不同应力下对磁化过程、磁滞回线、磁导率、矫顽力等参数的影响。目前力-磁关系研究中较为系统的是磁机械效应理论。早先 Bozorth 基于磁化过程是可逆的假设,探讨了由于磁致伸缩而引起的磁场强度的变化^[14];Brown 在其提出的理论中,假设弱磁场下应力对畴壁位移的作用遵循瑞利定律,但与后来的试验数据不相符合;无限小可逆条件下建立的热力学关系方程与磁化过程本质上是不可逆的相矛盾^[15]。Jiles 和 Atherton 提出了接近定律,并基于有效场理论建立了单向应力作用下铁磁性材料的磁机械效应理论模型。该模型认为磁化过程包括可逆和不可逆磁化,材料磁化强度的变化不仅与应力有关,还与材料的非滞后磁化强度有关;外加应力对磁化强度的影响是一个剩余磁化强度不断向非滞后磁化强度靠近的不可逆过程^[16,17]。随后, Li 在原有模型的基础上引入弱磁场中磁化的瑞利定律,提出了改进的磁机械效应模型^[18,19]。

在上述磁机械效应的研究中都存在外加磁场,很少提及地磁场的作用;而磁记忆效应强调了地磁场作为激励源的作用。磁机械效应主要描述应力对磁化的关系模型,为磁性材料的各种应用提供理论基础;而磁记忆效应偏重于应力集中及微损伤引起的磁信号畸变特征,并将其应用于无损检测领域。二者的本质是一致的,其根源来自铁磁性材料的自发磁

化和能量平衡原理。目前磁机械效应的研究主要局限于弹性范围,其理论模型仅适用于弹性阶段;磁记忆效应中也只提到磁弹性效应,那么是不是也有相应的磁塑性效应?这些问题的深入研究都有助于解释试验及检测中出现的复杂现象。

2. 微观机制

上述唯象本构模型并不涉及对材料的微观结构的解释,但从微观角度分析,应力的增加将导致磁畴的运动和变化。Fukawa 对 Si-Fe 单晶表面圆珠划痕进行了应力分析和磁畴观察^[20],Sablik 建立了磁滞和应力影响磁性能的微磁模型^[21]。Yamanoto 观察了 1 A/m 弱磁场下应力产生的磁畴变化^[22],Notoji 在塑性变形区发现了材料表面有楔形磁畴出现^[21]。Zhu 建立了应力影响磁畴运动的微磁模型,并通过试验和仿真进行了验证^[23];Bulte 则从原子尺度上引入磁矩的自旋-自旋耦合和自旋-轨道耦合,对应力致磁进行了微观解释^[24,25]。任吉林利用粉纹法来观察受力程度不同的试件的磁畴结构,分析了不同残余应力对磁畴的影响^[26]。事实上,应力将促使材料内部的磁畴组织发生变化,畴壁产生不可逆偏转,并改变了磁导率,进而改变试件表面的微观结构,从而使得所测磁场发生改变。

尽管对于铁磁材料力磁耦合行为的细观本构已有一些探索,但目前还没有较为成熟的模型。借助微磁学理论可以揭示磁性材料内部的磁矩分布和畴壁演化过程,同时得到材料的宏观磁参数,有望建立微观磁性和宏观磁性之间的联系。对于金属磁记忆检测,研究者各自从不同角度解释了磁记忆效应的产生机理,迄今为止还没有形成比较完整和严密的理论体系。目前所取得的成果,大多集中在信号处理和检测仪器开发方面。

1.3.2 金属磁记忆的试验研究

1. 静载试验

大多数静载拉伸试验结果表明:未退磁试件表面各点磁场强度的法向分量,即磁信号在弹性和塑性阶段具有不同的变化趋势,弹性阶段由初始无规律分布逐渐向磁有序状态转变,而塑性阶段磁信号几乎不再随载荷变化^[27,28];退磁试件在弹性范围内近似为一斜直线分布,直线斜率的绝对值随载荷的增加而变大,至屈服极限时达到最大,塑性变形后逐渐减小^[29,30]。无论加载前试件是否经过退磁处理,断裂瞬间均有一致的表现:断口处磁信号激增,且两端极性相反,呈明显的漏磁缺陷信号曲线特征。在拉伸试验中,对弹性范围内磁信号与应力之间的关系研究较多,基于磁机械效应的等效场理论模型很好地解释了应力导致畸变磁场反向的原因^[31];塑性阶段力磁关系变得更为复杂,大多是从位错运动的微观角度进行简单分析。唯一的拉压试验表明压应力对材料磁化强度的影响远小于拉应力^[32,33],这也许是文献中很少利用压缩试验来探讨磁记忆效应的原因。但不管怎样,试件本身的剩余磁场强度会对检测结果产生明显不同的影响;由于某些人为的预制缺口位置也会出现磁信号过零现象,但这实际上并不一定是应力集中区,所以仅仅借助过零点特征不能完全表征试件的潜在危险部位。

相比拉伸试验,压力、扭转、弯曲试验做得较少。在扭转载荷作用下,磁信号在弹性区呈单调递增而在塑性区呈缓慢下降趋势^[34];但也有试验发现试件屈服后磁信号会产生较大幅度的提高。在三点弯曲复杂应力状态下^[35],磁信号在受拉层和受压层表现为不同的极性,中性层中心处的磁场梯度值与切应力相对应。

可见,铁磁性材料中机械应力和由它引起的漏磁场间有着相当复杂的关系,并无期望

的单值对应关系。由于缺乏相应的理论模型,对磁信号与应力之间的对应关系解释很笼统,没有提出试件达到屈服或颈缩临界状态时的磁记忆敏感参数;当然,塑性阶段的应力或应变与磁信号之间的定量关系更无从说起。

2. 疲劳试验

拉-拉疲劳被广泛用于疲劳试验研究,未退磁试件表面各点的磁信号在前几轮加载循环后迅速改变,达到一定次数后逐渐趋于稳定并保持至试件断裂^[36],同时表明磁记忆信号对高载疲劳和含缺陷试件的损伤判别能力更强^[37];退磁含缺口试件在应力集中部位磁信号出现异常畸变,且峰峰值和疲劳裂纹长度具有线性相关性^[38,39]。与拉伸断裂时相似,在疲劳破坏前瞬间也产生磁场突变现象。由于散射磁场法向分量和切向分量的物理意义并不明确,切向分量被尝试用于拉压疲劳试验分析中,结果表明在整个疲劳过程中表现出振荡、突变和收敛的规律^[40]。

在三点弯曲疲劳试验中,不同循环次数下应力集中区的磁场峰峰值与疲劳过程的三个阶段相对应,表明磁记忆技术可用于疲劳损伤评估^[41]。如何提取表征疲劳损伤的特征参数,以及建立特定铁磁材料的剩余寿命预测模型还需要很多工作要做。

综上所述,磁记忆效应的基础性试验研究常见于对特定试验条件下的现象进行定性分析和解释,试验结果没有比较的标准,致使不同学者做的相同试验可能会得到不同的试验现象,其中的原因还有待澄清,不同材料、形状、热处理条件以及环境磁场等初始参数对磁记忆检测的影响有待明确,只有找出不同应力作用下磁记忆效应适用的一般性规律,才能对检测结果作出准确、科学的评价。

1.3.3 磁记忆检测信号的影响因素分析

除了基础性试验研究中涉及的铁磁材料的化学成分、试件形状和人为缺口、热处理工艺、环境磁场等原始参数对磁记忆信号具有明显的影响之外,人为因素如检测方法与分析手段也会影响到检测信号中特征量的提取,从而影响最终诊断结果。

研究者在大量的磁记忆检测实践中发现,同一工件处于不同的检测(如工件处于南北朝向和处于东西朝向)或者磁记忆检测仪器采用不同的检测参数时(如不同的检测速度、检测探头提离值等),采集所得的磁记忆信号是不完全相同的,因此,磁记忆检测信号受到各种外在因素的影响而表现出一定的随机性,不同的因素对检测信号的影响程度都不一样。清华大学李路明等通过研究磁记忆现象和地磁场的关系后,认为磁记忆检测方法可有效判断钢管应力集中区域,地磁场在磁记忆检测过程中不产生决定性影响^[42]。黎连修用磁致伸缩方程组详细研究了磁记忆现象产生的条件和规律,认为应力可改变材料的磁特性,地磁场则可改变材料的压磁性,两者共同作用产生净磁场,磁记忆现象不仅与应力和材料的磁特性有关,而且还与工件在空间的位置和方向有关^[43]。于风云等通过试验研究了构件的放置方向对磁记忆信号的影响,认为无论试样如何放置,其表面的磁场强度分布规律没有发生变化,水平放置时磁场强度信号最大,构件水平(或铅垂)放置时,检测面平行和垂直于地磁轴两个方向的磁场强度几乎相等^[44]。构件的放置方向影响磁场强度的大小,对应力集中区的判断不产生影响。虽然构件的放置方向会影响所测磁场强度的大小,但磁场的分布规律没有改变,即对应力集中区的判断不会影响。

另外,提离值对所测磁信号的影响类似漏磁检测^[45]:随着提离值的增加,磁信号值越来越

越小,但整个磁场强度分布曲线并没改变。所以,为了减小人为测量误差,可采用自动扫描装置进行信号采集。在工程实际中,由于被检对象的安装位置和放置方向一般来说都是固定的,所以尽可能在方便的方位进行检测,但探头与检测面的提离值应尽量保持相同。

当试件在加载和卸载不同条件下进行磁记忆检测时,得到的磁信号差别显著^[46]:当试验机夹具由铁磁性材料制成时会产生较强的磁场,这就相当于在试件两端有一个变化的外加磁场干扰,因而在线检测结果就会受到较大影响,从而使诊断判据失效;相比之下,对应的离线检测效果良好,能够捕捉到应力集中区或危险部位。实质上,在线加载检测对应工作应力下的磁信号变化,而离线卸载检测对应残余应力下的磁信号变化。如果没有外加磁场的干扰,在线检测可用于确定局部应力集中区的位置并评价其性质;离线检测可反映制件和焊接接头的组织的不均匀性。不管哪种检测都可以发现早期缺陷,从而找到构件损坏发展的主要根源。

1.3.4 磁记忆信号降噪及信号影响因素分析

1. 磁记忆信号降噪

检测获取的磁记忆信号往往混入较为严重的噪声,对后续的分析工作造成干扰,这使得对信号进行降噪十分必要。近年来,由于小波及小波包分析在信号处理中的显著优点,磁记忆信号的降噪研究主要在应用小波或小波包方法对信号的降噪处理上。如笔者对于含有噪声非平稳性的井下磁记忆信号,把指数小波去噪技术和希尔伯特(Hilbert)变换应用到了磁记忆的信号分析中,基于信号与噪声在小波分析中不同尺度的传播特性,利用小波非线性滤波方法消除了噪声,提高了信噪比^[47]。易方等提出了一种改进小波阈值函数与自适应阈值相结合的方法,采用自适应方法计算阈值^[48],克服了软阈值信号失真、硬阈值不连续及振荡等缺点,提高了重建信号的信噪比,消除了磁记忆检测信号噪声。

2. 应力集中区判据研究

金属磁记忆检测技术的独到优势是可以探测铁磁性金属构件的早期损伤,对存在严重应力集中的危险区域做出预报,从而避免事故的发生。Doubrov 提出的应力集中区的判定规则是:寻找磁场切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值,而法向分量 $H_p(y)$ 改变符号且具有零值点的区域,通过计算梯度值 $K = dH_p(y)/dt$,即可推断该区域是否为应力集中区。但大量的工程实践表明,上述关于应力集中区的判定准则会出现误判。南昌航空工业学院范振中通过分析应力集中磁记忆信号的小波包能量谱,提出基于小波包能量谱的磁记忆检测方法^[49]。天津大学邸新杰等研究了利用磁记忆信号的小波能量谱特征来判定的方法^[50],笔者提出采用小波变换与磁场强度法向分量的梯度相结合的方法来判断异常应力集中区^[51]。上述几种应力集中区判定规则都是提取信号的某一或某几个方面的特征对其进行分析,判定规则的准确性和可靠性还有待提高,未来可以全面分析信号特征,进而提高判定规则的可靠性。

3. 应力集中区和缺陷的定量化研究

对应力集中区的定性分析仅仅是确定构件的损伤区域,还无法满足对设备进行寿命预测和评估的需要,需要进一步对应力集中区进行分析,判定其应力集中程度或缺陷的参数,如裂纹的长度、深度及角度等。南昌航空工业学院任吉林等同时提取法向和切向磁记忆信号作李萨如图,用图中封闭的缺陷环的大小反映应力集中的程度^[52]。天津大学黄炳炎等利用磁场中的高斯方程和预制焊接裂纹处金属磁记忆信号的强度,建立了应力与漏磁信号之

间的关系模型,并对管线钢裂纹尖端应力集中的定量分析进行了初步探讨^[53]。武汉大学丁辉等通过建立裂纹类缺陷应力场与磁通量变化间的数学模型^[54],阐明裂纹埋藏深度、宽度、走向、受力条件及外磁场等不同时的磁通量变化规律,为磁记忆检测裂纹类缺陷提供了理论依据。

4. 金属磁记忆检测仪器的研发

目前,基于金属磁记忆原理的无损检测仪器的研发单位主要有俄罗斯动力诊断公司、厦门爱德森电子有限公司等。俄罗斯动力诊断公司最早开发出 TSC 系列应力集中磁检测仪,及其扫描装置。其中,检测仪包括 TSC-1M-4、TSC-2M-8、TSC-3M-12 和 TSC-4M-16 共 4 种型号;扫描装置有多种型号,与不同型号的检测仪配套使用。厦门爱德森电子有限公司根据金属磁记忆效应,也相继研发出 EMS 系列智能化磁记忆金属诊断仪。仪器配有多种不同形式的传感器及长度计测器,以适应不同形式的检测需要,可用于锅炉压力容器、管道、叶片、轴承、铁轨、齿轮对、焊接部位及其他铁磁性金属构件的检测。其他研发的用于各自相关领域试验研究的磁记忆检测仪器还有清华大学的磁记忆研究的探测仪、北京理工大学的便携式磁记忆检测仪、南京航空航天大学的磁场梯度检测仪以及中国特种设备检测研究中心的多通道磁记忆检测仪样机等。

1.3.5 金属磁记忆工程应用

在工程应用方面,Dubov 等证明了金属磁记忆方法用于早期诊断的可行性,将磁记忆技术应用于化工设备、锅炉、涡轮叶片、管道的现场检测,并提出了用金属磁记忆技术来判断金属性能的方法;通过对带有缺陷的铁磁性管件受力时散射磁场特点的研究,提出了确定铁磁性材料产品中残余应力的方法,并利用金属磁记忆方法来控制焊接质量;总结了传统无损检测方法在剩余寿命评估上的局限性,对比论证了磁记忆技术探测应力集中区域进行寿命评估的可行性。波兰学者 Lesiak 等将神经元分类器应用于铁轨的磁记忆检测,英国学者 Wilson 等通过拉伸试验研究用磁记忆技术测量应力。国内对磁记忆技术的应用也进行了大量研究,李午申等对焊接裂纹磁记忆信号的零点特征及特征提取、量化进行了比较深入的研究;张卫民等将磁记忆技术应用到应力腐蚀、压力容器、承载铁磁性连接件等金属零部件。目前,磁记忆检测技术已应用于航空、电力、石油、化工、机械等各行业。可见,磁记忆技术在压力容器、管道等领域应用较多,有研究表明块状构件并不适于磁记忆检测;因此该技术对检测对象是否有局限性或其适用范围,还有待于理论和实践来证实。

在行业检测标准制定和推广方面,俄罗斯国家标准委员会正式出版三个无损检测金属磁记忆方法的标准:术语与定义、基本要求、工业和运输项目应力-变形状态检测基本要求,俄罗斯焊接科学技术学会批准了设备和结构焊接接头金属磁记忆方法(磁记忆方法-检测)标准,但这些标准多为指导性的,只是作为实际检测的参考。国际标准化组织颁布了三个金属磁记忆技术的标准,包括词汇、一般要求及焊接接头检测。在国内,磁记忆技术虽然在不同领域得到了应用,但检测的可靠性还需得到验证,目前还未在任何行业领域建立相应的检测标准,尚缺乏统一的指导性建议。

1.4 金属磁记忆技术的发展趋势

虽然早在 1900 年就发现了拉应力作用下铁制工件磁化强度会发生改变,1982 年应力致磁化改变现象用于无损检测应用,但直到磁记忆概念的提出,一种确定金属结构实际应力-变形状态的新无损检测方法才得到大家的关注。作为一门问世不久的全新技术,磁记忆检测还面临许多有待解决的问题,尤其在以下几个方面需要开展进一步研究。

1. 磁记忆效应的宏微观机理研究

磁记忆检测机理的研究涉及铁磁学、磁性物理学、金属学、弹塑性力学、断裂力学等多个学科,借助磁弹性和热磁弹性理论可研究应力场和磁场之间的关系,尤其是磁场畸变与结构发生塑性变形、细观损伤以及宏观缺陷之间的定量关系;借助铁磁学和磁性物理学从微观角度可研究应力作用时磁畴、畴壁的可逆与不可逆转向,分析组织的微观变化与宏观磁化之间的对应。磁记忆技术宏观规律和微观机制理论体系的建立,无疑会大大促进磁无损检测技术的发展。

2. 磁记忆信号的影响因素分析

影响力-磁效应的因素很多,包括前文提到的原始参数和人为干扰,只有找到各种因素之间的关联,并确定在不同初始条件下应力集中区损伤程度与磁信号之间的定量对应关系,才能用于铁磁制件早期损伤的准确诊断。研究如何去除诸多因素对磁记忆检测方法的干扰,为确定可靠的诊断参数提供依据。

3. 检测手段的提高与判断准则的制定

尽管磁记忆检测技术有着一系列优点,但在实际检测中仍存在不足,可以通过同时采用其他无损检测手段,将所获取信息取长补短,进行信息融合,使得检测工作无盲区、无死角。目前的磁记忆检测仪大多只提供散射磁场的法向分量,这样就很难精确描述应力引起的磁场变化,因此发展和完善多通道、多参量诊断系统具有重要的应用意义;并在此基础上确定特定条件下的检测过程和损伤判断准则。另外,任何一种无损检测方法都不是万能的,磁记忆技术也不例外,在工程应用中应注意和其他方法相结合,在充分发挥其早期发现缺陷的优势的同时,利用传统无损检测方法如漏磁检测可更好地实现宏观缺陷量化。

1.5 井下套管金属磁记忆检测系统的结构

目前市场上主流产品是由俄罗斯开发的 TSC-1M-4 型、TSC-2FM 型应力集中磁指示仪。该仪表采用金属磁记忆法检测结构应力变形状态,配有专用四通道铁磁探测式传感器,能够根据检测得到磁场法向分量强度值和变化特性,对结构应力变形状态进行评价。TSC-1M-4 型、TSC-2FM 型技术磁记忆检测仪功能较强、灵敏度较高且适用性强。其配套数据处理软件 MM-CYSTEM 具有较丰富的图形显示和灵活的打印功能,目前该套仪器在多个国家得到推广和应用。

国内 1999 年由中国机械工程学会国外科技发展研究会引进该项技术,目前俄罗斯动力诊断公司在中国设立了分支机构,进行磁记忆检测仪器的销售和技术培训。目前国内仪器的研制,主要是厦门 EMS22000 金属磁记忆诊断仪,已经广泛应用在航空、铁路和电厂领域。

金属磁记忆诊断仪表的系统框架,如图1-5所示。主要结构包括^[50]:

(1)传感器 传感器是本仪器的关键元件,由于被检部件的磁场微弱,需选择灵敏度很高的磁敏传感器件。

(2)温度补偿 磁敏感元件对温度较敏感,需设置温度补偿电路。

(3)放大电路 不同的使用场合,传感器与制件的间距不同或制件表面本身的记忆磁场强弱不等,信号的大小差异较大。为了保证适当的信号动态范围,放大电路的增益需可变,本仪器增益受计算机控制。此外放大电路还需完成A/D转换器对信号所要求的电平转换任务。

(4)步进测距电路 该电路完成传感器在制件表面相对位置信息的传送。它由可逆光电编码器和探头导轮组成,行程最终由软件计算完成并显示。

(5)A/D转换器 为保证适当的分辨力,A/D转换器要求适当的位数。本仪器选用逐次通过型A/D转换器,同时为简化电路选用了多路输入的A/D变换器。

(6)显示输出 检测信号在屏幕上直观输出,其显示的时基(行程)由菜单设置完成。

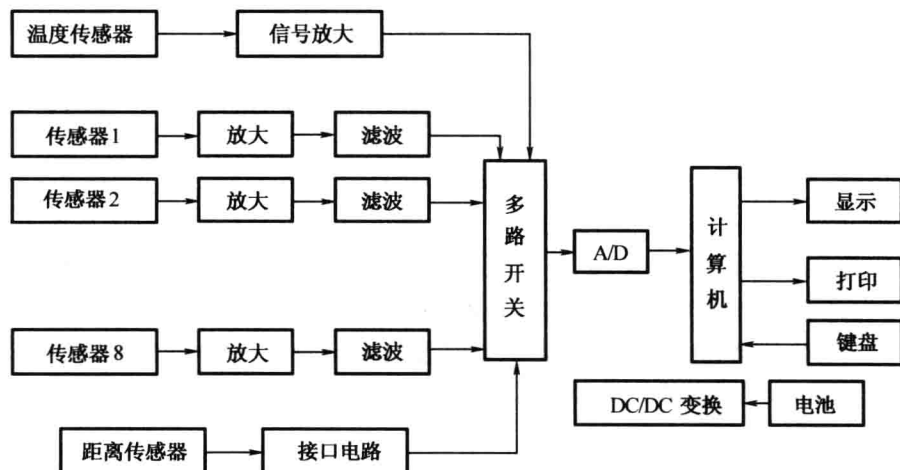


图1-5 金属磁记忆诊断仪硬件框图

1.5.1 井下金属磁记忆硬件结构

目前的金属磁记忆检测设备都是应用到地面,使用环境相对良好。而井下环境存在高温、高压、高湿度和干扰多等特点,极其恶劣。同时,由于套管深埋在地下,包有隔热防护层,其阻尼特别大,波形衰减很快,所以实际到达传感器的信号很微弱,有的信号基本上被噪声所淹没,而磁记忆又是微弱的磁信号,这对磁记忆信号的梯度特征量影响很大,梯度的极大值对噪声极其敏感,对于特殊井下环境的套管应力检测仪器难以准确量化评估危险等级,对井下金属磁记忆检测的硬件和软件提出了挑战,除了上面的基本组成部分外,还需要采用几点关键设计技术^[56-58]:

(1)传感器采用基于磁敏电阻的磁记忆传感器,从提高关键部件的精度来保证整个系统的精度。