



国防科技图书出版基金

再制造质量控制中 的金属磁记忆检测技术

Metal Magnetic Memory Testing Method
in Remanufacturing Quality Control

徐滨士 董丽虹 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

再制造质量控制中的 金属磁记忆检测技术

Metal Magnetic Memory Testing Method in
Remanufacturing Quality Control

徐滨士 董丽虹 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

再制造质量控制中的金属磁记忆检测技术 / 徐滨士,
董丽虹著. —北京:国防工业出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 118 - 10521 - 6

I. ①再… II. ①徐… ②董… III. ①军事装备—
机械元件—无损检验 IV. ①E23 ②TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 234288 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 6 $\frac{3}{4}$ 字数 162 千字

2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 50.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着

记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金

第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

再制造是循环经济“再利用”的高级形式,是解决资源、能源短缺与环境污染之间矛盾的重要途径。由于再制造工程的节能减排效果十分明显,已经被国家确立为战略型新兴产业。随着装备再制造工程领域的迅速扩大,再制造对象越来越复杂,如何保证再制造产品质量成为产业健康发展的关键,急需尽快构建再制造产品的质量控制体系。

再制造的生产对象(即再制造毛坯)具有特殊性,它们是具有服役历史、包含潜在的隐性或显性损伤的废旧零部件。由于再制造毛坯损伤的随机性、复杂性和个体差异性,使得依靠先进的无损检测技术评估再制造毛坯及产品寿命成为实现再制造质量控制的必然选择。

金属磁记忆检测技术是尚处于成长期的一种磁性无损检测方法,它在早期疲劳损伤评估方面极具潜力。但是,由于缺乏系统的基础理论与实践研究,磁记忆现象产生的物理机制仍未澄清,导致该技术只能作为先期检测手段、还须匹配常规检测技术才能在工程领域使用。

本书基于装备再制造的工程背景,通过对金属磁记忆检测技术开展系统的试验研究,揭示铁磁零件自发磁化规律与微观磁畴结构演变机制,分析多种因素对磁信号的影响,提取损伤表征参量,建立疲劳损伤表征方法,同时,基于研究结果研发相关设备,探索金属磁记忆检测技术在再制造毛坯质量控制中应用的方式方法。

本书汇集了作者近年来在金属磁记忆检测技术领域获得的一些粗浅的研究结论,希望不仅为再制造质量控制提供有用的理论指导和技术支持,也为从事金属磁记忆检测评估工作的研究人员提供可借鉴的方法和经验。希望本书的出版能够为推动金属磁记忆检测技术理论研究更加深入、应用对象进一步明确、检测标准逐步规范而奉献微薄的

力量。

本书的研究工作获得国家自然科学基金面上项目(50975283)、国家 973 计划项目(2011CB013401、2011CB013403、2011CB013405)、中国第一汽车集团公司院士工作站项目、中联重科横向项目的支持,在此表示衷心感谢!特别是十余年来研究团队成员董世运、魏世丞、王海斗、史佩京、王丹、王慧鹏、薛楠等的科研成果为本书撰写提供了很大的帮助,一并表达深切的谢意!

本书的出版得到国防科技图书出版基金资助,本书撰写过程中参考了相关著作及大量国内外文献,在此对所有同行作者一并致以诚挚的感谢!

当前再制造产业发展非常迅猛,而作者仅在装甲车辆、工程机械、空气压缩机等有限的机械装备再制造领域开展了一点先期探索工作,加之金属磁记忆检测技术涉及材料学、力学、物理学、信息学等多门学科内容的交叉,磁记忆现象的复杂机理难以短时间内澄清。作者受专业水平局限,深感许多理论工作依然亟待业界同仁携手深入研究。书中的不妥之处,恳请专家和广大读者批评指正。

作者

2015 年 6 月

目 录

第 1 章 金属磁检测记忆技术概述	1
1.1 金属磁记忆检测技术的基本原理	1
1.2 金属磁记忆检测技术的特点	3
1.3 金属磁记忆检测技术的研究现状	3
1.3.1 金属磁记忆机理研究	4
1.3.2 力磁耦合关系的研究	4
1.3.3 磁记忆信号表征损伤的应用研究	5
第 2 章 磁记忆检测参量及影响因素	6
2.1 法向信号 $H_p(\gamma)$ 零值点及 K 值意义的试验研究	6
2.1.1 光滑静载拉伸试件的检测结果分析	7
2.1.2 含预制缺陷静载拉伸试件检测结果分析	10
2.1.3 光滑疲劳试件检测结果分析	11
2.1.4 预制缺陷疲劳试件检测结果分析	14
2.2 磁记忆技术表征缺陷、应力集中及残余应力	15
2.2.1 缺陷、应力集中及残余应力之间的关系	16
2.2.2 缺陷的磁记忆信号特征	17
2.2.3 磁记忆信号对应力集中程度的表征	19
2.2.4 磁记忆信号对残余应力的表征	22
2.3 磁记忆技术检测参量的影响因素研究	24
2.3.1 零件制造工艺的影响	24
2.3.2 磁记忆信号的时间效应	28
2.3.3 探头提离值对磁记忆信号的影响	30

第3章	磁记忆信号表征光滑件损伤行为	32
3.1	静载拉伸试件损伤行为表征	32
3.1.1	静载拉伸光滑件	33
3.1.2	退磁静载光滑件	42
3.2	疲劳光滑件损伤行为表征	51
3.2.1	45 钢光滑疲劳件	51
3.2.2	18CrNiWA 钢光滑疲劳件	56
第4章	磁记忆信号表征缺陷件损伤行为	59
4.1	含预制切口的静载拉伸试件	59
4.2	含预制切口的拉拉疲劳试件	62
4.2.1	45 钢预制表面裂纹的拉拉疲劳试件	62
4.2.2	含中心穿透裂纹拉拉疲劳试件	67
第5章	金属磁记忆检测技术的检测机理	84
5.1	金属磁记忆现象的物理机制	84
5.1.1	金属磁记忆信号的实质	84
5.1.2	地磁场及载荷的作用	86
5.2	微观磁畴结构分析	97
5.2.1	磁畴的观测方法比较	97
5.2.2	热处理对磁畴结构的影响	99
5.2.3	拉应力对磁畴结构的影响	101
5.3	铁磁材料断裂发射磁记忆信号的模式	103
5.3.1	静载拉伸断裂模式	103
5.3.2	疲劳裂纹扩展断裂模式	106
第6章	金属磁记忆检测设备研制	110
6.1	水平分量 $H_p(x)$ 磁记忆检测仪器	110
6.1.1	仪器的功能设计	111
6.1.2	仪器的结构设计	111

6.1.3	仪器的软件设计	113
6.1.4	仪器的操作规程	114
6.2	三维磁记忆信号检测仪器	115
6.2.1	RM-3DM 金属磁记忆检测仪的硬件结构	115
6.2.2	RM-3DM 金属磁记忆检测仪的软件设计	117
6.3	CRLE-1 曲轴疲劳损伤的金属磁记忆评估设备	120
6.3.1	曲轴疲劳损伤评估设备的总体设计	121
6.3.2	曲轴疲劳损伤评估设备的硬件设计	122
6.3.3	曲轴疲劳损伤评估设备的软件设计	128
第7章	再制造工程的质量控制要求	134
7.1	再制造工程的内涵	134
7.2	再制造工艺特点	136
7.3	再制造质量控制的要求	137
7.3.1	再制造质量控制的前提	137
7.3.2	再制造质量控制与制造质量控制的区别	138
7.3.3	再制造质量控制的要求	140
7.4	金属磁记忆检测技术与再制造质量控制的关系	143
第8章	再制造工程质量控制中的应用实例	146
8.1	车体裂纹的磁记忆检测	146
8.2	离心式压缩机叶轮的磁记忆检测	149
8.3	汽车发动机曲轴的磁记忆检测	152
8.3.1	曲轴疲劳失效分析	153
8.3.2	磁记忆评估曲轴损伤	155
8.4	混凝土泵车臂架的磁记忆检测	165
8.4.1	臂架疲劳台架试验设计	166
8.4.2	检测位置的确定	168
8.4.3	臂架检测结果分析	171
参考文献		180

Contents

Chapter 1	Introduction to MMMT	1
1.1	MMMT fundamental	1
1.2	Features of MMMT	3
1.3	Present status of MMMT	3
1.3.1	Study on mechanism of MMMT	4
1.3.2	Study on couple relation between load and magnetism	4
1.3.3	Research on application of damage characterization by MMMT signals	5
Chapter 2	Influence factors and measured parameters of MMMT	6
2.1	Meaning of zero point of $H_p(y)$ signal and K	6
2.1.1	Analysis of measured results of smooth tensile test specimen	7
2.1.2	Analysis of measured results of tensile test specimen with precut notch	10
2.1.3	Experimental results of smooth fatigue specimen	11
2.1.4	Experimental results of fatigue specimen with precut notch	14
2.2	Characterization of defect, stress concentration and residual stress	15

2. 2. 1	Relation between defect , stress concentration and residual stress	16
2. 2. 2	Signal feature of defect by MMT	17
2. 2. 3	Signal feature of stress concentration by MMT	19
2. 2. 4	Signal feature of residual stress by MMT	22
2. 3	Influence factors of measured parameter of MMT	24
2. 3. 1	Influence of manufacturing process of component	24
2. 3. 2	Time effect of MMT signals	28
2. 3. 3	Influence of lift – off value of probe on MMT signals	30

Chapter 3 Characterization of damage behavior of smooth specimen by MMT signals

3. 1	Characterization of damage behavior of tensile specimen	32
3. 1. 1	Smooth tensile specimen	33
3. 1. 2	Demagnetized smooth tensile specimen	42
3. 2	Characterization of damage behavior of smooth fatigue specimen	51
3. 2. 1	45# steel fatigue specimen	51
3. 2. 2	18CrNiWA steel fatigue specimen	56

Chapter 4 Characterization of damage behavior of precut defect specimen

4. 1	Tensile specimen with precut notch	59
4. 2	Tensile – Tensile fatigue specimen with precut notch	62
4. 2. 1	Tensile – Tensile fatigue specimen with precut notch	62
4. 2. 2	Tensile – Tensile fatigue specimen with central penetration crack	67

Chapter 5	Measurement mechanism of MMMT	84
5.1	Basic physical principle of MMMT	84
5.1.1	Essence of MMMT signals	84
5.1.2	Effect of earth magnetic field and applied load	86
5.2	Micro magnetic domain structure observation	97
5.2.1	Comparison of magnetic domain observation method	97
5.2.2	Influence of heat treatment on magnetic domain structure	99
5.2.3	Influence of tensile stress on magnetic domain structure	101
5.3	Self – leakage magnetic signals induced by ferromagnetic material fracture	103
5.3.1	Fracture mode of dead – load tensile fracture	103
5.3.2	Fatigue crack propagation fracture mode	106
Chapter 6	Development of MMMT device	110
6.1	Horizontal component $H_p(x)$ device	110
6.1.1	Functional design	111
6.1.2	Structure design	111
6.1.3	Software design	113
6.1.4	Operating instruction	114
6.2	Three dimensional magnetic signals device	115
6.2.1	Hardware structure of RM – 3DM MMMT device	115
6.2.2	Software design of RM – 3DM MMMT device	117
6.3	Fatigue damage evaluation of CRLE – 1 crankshaft MMMT device	120
6.3.1	Integrated design of model machine	121
6.3.2	Hardware design of model machine	122

6.3.3	Software design of model machine	128
-------	--	-----

Chapter 7 Demand for quality control of

remanufacturing engineering	134
--	------------

7.1	Meaning of remanufacturing engineering	134
7.2	Features of remanufacturing engineering process	136
7.3	Demand for remanufacturing quality control	137
7.3.1	Premiss of remanufacturing quality control	137
7.3.2	Difference between remanufacturing or manufacturing quality control	138
7.3.3	Demand for remanufacturing quality control	140
7.4	Relation between signals of MMT and remanufacturing quality control	143

Chapter 8 Application cases in the field of

remanufacturing engineering	146
--	------------

8.1	Armored vehicle crack measurement by MMT	146
8.2	Blade wheel of radial compressor by MMT	149
8.3	Automobile engine crankshaft remanufacturing core by MMT	152
8.3.1	Fatigue failure analysis of crankshaft	153
8.3.2	Fatigue damage evaluation of crankshaft by MMT	155
8.4	Arm support structure of concrete pump vehicle measurement by MMT	165
8.4.1	Design of fatigue bench test of arm support	166
8.4.2	Determination of measurement position	168
8.4.3	Analysis of measuring results of arm support	171

References	180
-------------------------	------------

第 1 章 金属磁检测记忆技术概述

金属磁记忆检测技术是一种弱磁性无损检测技术。该技术是 1997 年在美国旧金山举行的第 50 届国际焊接学术会议上,由俄罗斯学者 Doubov 正式提出^[1-3]。金属磁记忆检测技术认为:铁磁材料在地磁场环境中,受到工况载荷的作用,在应力集中区域,磁畴结构发生不可逆变化,在应力集中部位生成自有漏磁场。即使卸除载荷,自有漏磁场依然存在,“记忆”着应力集中部位,即产生金属磁记忆现象。

金属磁记忆现象的发现可以追溯到第二次世界大战期间,苏联海军舰艇的壳体受到海浪反复拍打,在交变载荷作用下产生疲劳损伤,损伤部位生成自有漏磁场,吸引德国磁性水雷而发生损毁事故。金属磁记忆现象的实质是铁磁材料受载荷作用产生的自发磁化,金属磁记忆检测技术就是利用铁磁材料自身产生的磁信息进行应力集中的检测评估。由于应力集中状态常常和隐性损伤相关联,这意味着金属磁记忆检测技术有可能用于宏观缺陷发现之前阶段的早期损伤诊断。金属磁记忆检测技术这一潜在的应用前景受到工程界和学术界的密切关注,被誉为 21 世纪绿色诊断技术。

1.1 金属磁记忆检测技术的基本原理

铁磁材料是一种强磁性物质,具有良好的强度、硬度、塑性、韧性,已被广泛应用于工业生产的各个领域^[4]。机械装备中许多重要结构都是由铁磁材料制成,如车辆、舰船、飞机、航天设备等的关键部件。在服役过程中,随着服役时间的延长,铁磁材料的宏观性能将逐渐劣化,材料内部出现损伤,产生微观缺陷,当微观缺陷逐渐长大、合并,达到临界尺寸时,便会导致构件发生突然的快速断裂,引发重大事故^[5]。

在损伤产生及累积过程中,铁磁材料的物理、化学、力学等性能也随之变化,产生声、光、电、热、磁等物理参量的改变。利用这些参量的变化可以测量铁磁材料的损伤,从而出现各种类型的无损检测技术^[6]。磁性无损检测技术是铁磁材料应用最广泛的一种检测技术。它利用磁性材料受激励磁化场作用,产生电磁等信号的变化,通过对信号进行分析,实现缺陷、应力、硬度、晶粒度等状态参数的测量^[7-9]。目前常用的磁性检测技术包括磁粉法、漏磁法、磁巴克豪森法、磁声发射法等^[10,11]。这些方法都需要外加磁化装置、产生激励磁场、磁化被检构件、分析损伤部位磁化性能的变化来进行。由于存在励磁装置,检测设备体积相对笨重,便携灵活性不足。并且构件受激励磁化后存在剩余磁性,还需增加退磁处理工艺。

金属磁记忆检测技术则是利用过去被忽略的铁磁材料自身所具有的微弱磁性而形成的新方法。金属磁记忆检测技术检测时,地磁场是唯一的外磁场,铁磁构件在加工及使用过程中,由于工作载荷和地磁场的共同作用,磁畴结构和分布发生改变,出现残余磁场和自磁化的增长,形成磁畴的固定节点,以漏磁场的形式出现在铁磁材料的表面。在应力和变形集中区域发生磁畴组织定向和不可逆的重新取向,在工作载荷消除后仍然保留。这一增强的磁场能够“记忆”部件表面缺陷和应力集中的位置,即为磁记忆效应。

在缺陷及应力集中部位出现的漏磁场 H_p ,其法向分量 $H_p(y)$ 具有过零点及较大梯度值,水平分量 $H_p(x)$ 则具有最大值,如图 1-1 所示。

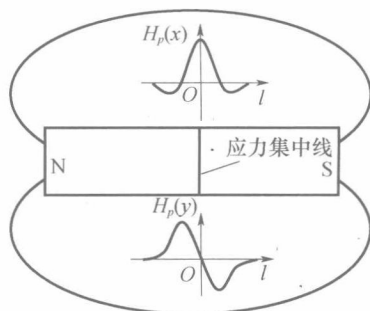


图 1-1 金属磁记忆检测技术检测原理示意图