

铁磁性材料早期损伤 无损检测新技术

**The New NDT Technology for Testing Early
Damage of Ferromagnetism Material**

于凤云 / 著

哈尔滨工程大学出版社

铁磁性材料早期损伤无损检测新技术

The New NDT Technology for Testing Early Damage of Ferromagnetism Material

于风云 著

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

铁磁性材料早期损伤无损检测新技术/于风云著.
哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2006
ISBN 7-81073-817-8

I.铁… II.于… III.金属-铁磁材料-无损检
验 IV.TM274.06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 063094 号

内 容 简 介

金属磁记忆检测技术以其早期诊断、防止设备突发性疲劳破坏、不需要对被检测对象专门充磁的独特优势,近年来受到无损检测界的关注。本书总结了传统无损检测方法在保障设备和结构可靠性方面存在的缺点和不足,系统地介绍了作者关于金属磁记忆效应的研究成果。本书共分 8 章,结合作者近年来的研究工作,对不同放置方向、不同提离值、不同初始磁场条件、不同热处理方式下试样的金属磁记忆特性进行了试验研究,对试验结果进行了较为深入的理论分析。研究了在保载和卸载状态下拉应力引起的磁记忆特性,提出了应用残余磁场强度均值及其标准差来评估结构材料变形程度的检测方法,建立了残余磁场强度标准差与拉伸载荷、应变之间的函数关系。发现试样水平放置时的磁场强度代数值最大,探头的提离值对磁场强度分布规律有一定影响。焊接试样的法向和切向残余磁场强度梯度最大值附近对应其残余应力集中区,V 型坡口的残余磁场强度及其梯度均高于 X 型坡口。并将磁记忆检测方法应用在矿用圆环链及热处理质量检测中,使金属磁记忆检测技术的应用范围更加广泛。

本书可供从事无损检测、断裂力学、金相学、焊接生产方面的科技人员使用,也可供科研院所、高等院校从事相关专业的教师与研究生参考。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市东大直街 124 号
发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001
新华书店经销
黑龙江省教育厅印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 8.75 字数 185 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

印数:1—1 000 册

定价:30.00 元

前 言

金属磁记忆检测技术是俄罗斯学者于 20 世纪 90 年代提出的一种无损检测新技术,它是继声发射之后又一个利用材料自身结构发射信号的方法来进行检测的。金属磁记忆检测技术以其早期诊断、防止设备突发性疲劳破坏、不需要对被检测对象专门充磁的独特优势,近年来受到无损检测界的关注。由于诸多因素对检测结果的影响,使其在实际应用中只能与其它无损检测方法配套使用,才能实现对结构损伤的定量检测。为此,国内外很多学者和研究人员进行了大量的研究工作。

本书对在地磁场作用下,普通板状试样在不同放置方位、不同提离值下的磁场强度进行了磁记忆检测;对不同热处理状态、不同材料、不同初始磁场情况下的试样进行了拉伸试验,分析了在保载和卸载状态下应力引起的磁记忆特性;对不同坡口形式的同种和异种材料焊接试样的残余磁场分布特点进行了研究;并将磁记忆检测方法应用在矿用圆环链及热处理质量检测中。

全书共 8 章。第 1 章介绍了应力集中的无损检测方法,阐述了金属磁记忆检测技术的特点,在文献综述基础上,总结了金属磁记忆检测技术存在的不足,对其未来的发展方向进行了预测。第 2 章阐述了金属磁记忆检测方法的原理及其相关概念,依据铁磁学基本理论,分析了铁磁体的基本特性和与金属磁记忆有关的铁磁体的各种能量。第 3、4、5 章介绍了构件在地磁场中不同的放置方向和不同探头提离值对磁记忆信号的影响,详细介绍了拉应力作用下铁磁性材料的磁记忆特性。第 6 章通过对板类焊接件残余磁场强度的检测,得出了同种材料焊接试样、异种材料焊接试样、V 型坡口、X 型坡口的残余磁场分布特点;通过对焊接试样硬度的测定,找到了硬度与残余磁场强度的对应关系。第 7 章介绍了金属磁记忆检测技术在矿用圆环链和焊接构件应力集中及热处理质量评价方面的应用。第 8 章对下一步的研究工作进行了展望。

本书是作者近年来从事金属磁记忆方法研究工作的结晶,希望本书的介绍能为金属磁记忆检测技术的定量化研究和检测标准的制定奠定良好的理论基础,为热处理质量的有效评价及硬度的无损检测提供新的方法,为铁磁性结构材料的变形评估提供指导,推动金属磁记忆检测技术向更广、更适用的方向发展。

本书的主要内容是在吴森教授的精心指导下完成的,在此,谨向吴森教授表示最崇高的敬意和深深的谢意。由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请专家和学者不吝赐教。

作 者

2006 年 4 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 金属磁记忆检测技术及产生背景	5
1.3 金属磁记忆检测技术的发展	10
1.4 金属磁记忆检测技术的发展趋势	17
1.5 本书的主要内容	18
1.6 本章小结	20
第2章 与金属磁记忆现象有关的铁磁体基本理论	21
2.1 铁磁性材料常见的缺陷	21
2.2 缺陷引起的漏磁场	22
2.3 铁磁体内的相互作用能量	25
2.4 金属磁记忆检测技术的基本原理	35
2.5 本章小结	36
第3章 试样放置方向和探头提离值对磁记忆检测信号的影响	38
3.1 概述	38
3.2 地磁场的应用	39
3.3 试验设计	39
3.4 试样放置方向对磁场强度的影响	42
3.5 提离值对磁场强度的影响	48
3.6 本章小结	51
第4章 板状试样反复拉伸时的金属磁记忆特性	52
4.1 不同热处理状态下未退磁板状试样的反复拉伸磁记忆特性	52
4.2 退磁试样反复拉伸时的金属磁记忆特性	75
4.3 本章小结	81
第5章 退磁及无明显磁化的板状试样在保载状态下的磁记忆特性	82
5.1 不同材质的退磁板状试样在保载状态下的磁场强度	82
5.2 无明显磁化铣削试样保载状态下的拉伸磁记忆特性	96
5.3 本章小结	98
第6章 焊接结构的金属磁记忆检测	100
6.1 焊接缺陷及焊缝无损检测技术	100
6.2 焊缝的金属磁记忆检测	102
6.3 焊接结构残余磁场强度与硬度的关系	108
6.4 本章小结	110
第7章 金属磁记忆检测技术的应用研究	111
7.1 刮板输送机圆环链的金属磁记忆检测	111

7.2 金属磁记忆检测技术在热处理质量评价中的应用	118
7.3 本章小结	123
第8章 结论与展望	125
8.1 本书主要结论	125
8.2 后续工作展望	126
附录 主要符号说明	127
参考文献	128

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

应力引起的塑性变形是造成设备或者构件疲劳损伤的主要因素。早期损伤一般多发生在构件应力集中区域,因此,预防或发现早期损伤比较有效的办法是尽早发现应力集中或残余应力区域^[1]。

1.1.1 应力集中和残余应力的产生

当构件存在裂纹时,在断裂破坏时其应力能与同样构件没有裂纹存在时的破坏应力相比要小得多。如图 1-1(a)所示,在板件的单向拉伸中,若没有裂纹存在,应力流线是平行并均匀分布的;若构件存在裂纹,在距离应力集中区较远处(构件的水平对称中心和左右两端附近),应力流线是均匀分布的,但在应力集中区(缺口)附近,由于缺口的表面没有应力作用,应力流线不能从此处经过,那么应力流线就在该区域密集起来,形成了应力集中^[2],如图 1-1(b)所示。

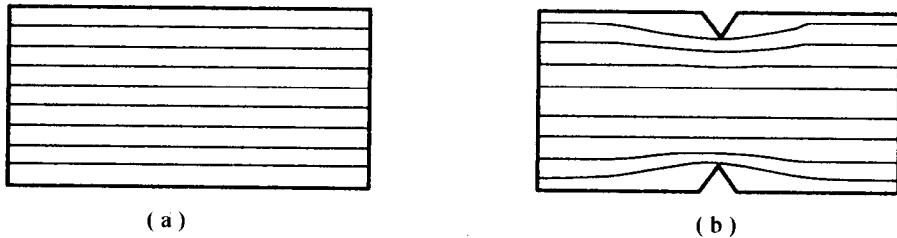


图 1-1 应力流线图
(a)无应力集中;(b)有应力集中

残余应力是指在没有载荷和温度变化等外界因素作用下,存在于金属材料或机械构件内部并保持平衡的力。在工程构件的制造、运输、安装和使用过程中,构件内部都会产生残余应力。残余应力对构件结构强度、断裂韧性、金属材料的耐腐蚀性和疲劳寿命等有很大的影响。图 1-2 是 1912 年 Martens、Heyn 等提出的残余应力产生的弹簧模型^[3],设有三个弹簧,一种情况是让弹簧处于自由状态,如图 1-2(a);另一种情况如图 1-2(b)所示,用钢板将弹簧两端连接起来,在无外力作用时,各弹簧之间也会产生相互作用力。设弹簧长度为 L_1 、 L_2 、 L_3 ,弹性常数为 c_1 、 c_2 、 c_3 ,如用钢板连接后各弹簧长度变为 L 的话,那么各个弹簧上产生的力为 $p_1 = c_1(L - L_1)$ 、 $p_2 = c_2(L - L_2)$ 、 $p_3 = c_3(L - L_3)$,这就是各个弹簧上产生的残余应力,并且各个力之间保持平衡,即 $p_1 + p_2 + p_3 = 0$ 。物体内部残余应力的产生过程如图 1-3 所示,在无外力作用的物体内部 S 区域内,截取一个小正方形 A, A 取下后采取一定的

方式使其体积和形状发生变化为 B 的形状,如将其再放回到 S 中,将变成(c)图的状态,这时必须对其施加作用力使它变成原始的小正方形才能将它放回原来的位置,如图(d)所示。之后,小正方形在物体外所受的力要被释放,结果放回原位的小正方形和它周围的部分就要发生变形,如图(e)所示,该区域将产生应力场。

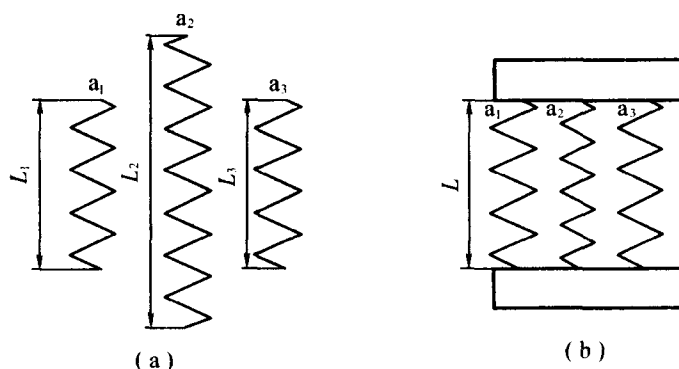


图 1-2 残余应力产生的弹簧模型

(a)自由状态;(b)连接状态

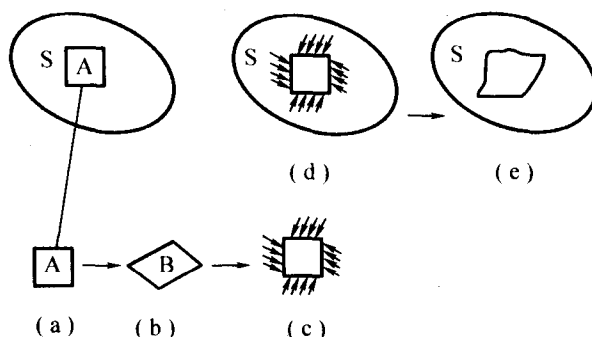


图 1-3 残余应力的产生过程

根据残余应力相互影响范围的大小,残余应力有宏观残余应力和微观残余应力之分,一般将宏观残余应力称为第一类,它是由于零部件受到外部机械的、热的或化学的不均匀作用形成的;而把微观残余应力称为第二、第三类,也有人将其进一步分为第四类,它是由于组织结构不均匀等内部原因造成的。表 1-1 所示是按 L. Reimer 的分类。

残余应力的产生原因归纳起来无外乎有两种,一是物体受到不均匀的外力作用时,例如弯曲、拉拔等,物体会产生不均匀的作用应力。对于大多数物体来说,其形状都是不对称的,甚至有些结构是极为复杂的,这样的一些零部件在加热或冷却过程中,各部分的热传导状态不同,因而各部分会存在温度梯度。由于不均匀加热造成不均匀的热膨胀,产生热应力,在这种应力作用下物体易产生塑性变形。二是由于物体自身原因引起的,如果物体内部各部分组织的浓度不同或晶粒的位向不同,则其各部分显示的屈服行为就会不同;另外,物体在冷加工或热加工过程中,由于物体内部各部分弹性模量、导热系数、热膨胀系数的不同,也容易产

生塑性变形。

表 1-1 残余应力的分类

残余应力	领域的长度/mm							
	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
第一类	不均匀外部载荷引起的应力							
第二类	结构的残余应力、Heyn 应力							
第三类	晶体内的不均匀残余应力							
	位错引起不均匀变形的应力							

应力集中或残余应力是引起事故的重要原因之一,由此引发的事故所造成的后果严重、经济损失巨大,历史上许多灾难性事故的发生都是由它引起的。机器在使用过程中,对于意外事故的发生,除了材料本身的结构和强度外,多数是由于应力集中或残余应力的影响造成的。因此,应力集中或残余应力在工程中的重要性和广泛性已得到人们的极大重视,对应力集中或残余应力的测量技术进行研究,具有重要的现实意义。

1.1.2 应力集中和残余应力的检测方法

应力集中检测技术的研究始于 20 世纪 30 年代,发展至今已形成了几十种测量方法,这些测量方法概括起来大致分为两类:常规检测法和无损检测法,或者称之为有损测量法和无损测量法。

1. 常规检测法

用机械测定法测量时是将局部分离或分割,从而使局部的残余应力被释放,应力释放的同时物体会发生变形,通过对变形的测量,再应用弹性力学理论就可反求残余应力的大小,用机械法测定残余应力会对工件造成一定损伤甚至破坏。典型的有切槽法和钻孔法,这方面技术已比较成熟,理论也较完善。其中尤以小孔松弛法(压痕试验)是最早也是最常使用的测量构件残余应力的方法。它是利用机械加工方法释放被测点处的应力,使被测件产生相应的位移与应变,通过测量其应变或位移,得到被测点处的残余应力。它的测量精度与灵敏度都比较好,但是被测试件会受到一定的损伤,所以在实际应用中受到很大限制,而且它的测量结果是小孔处被测试表面残余应力的平均值,无法精确表述残余应力随被测试件深度而变化的情况,还不能完全解决被测试件残余应力的测量问题,盲孔法、环孔法及双平行槽法常用于测量构件局部表面残余应力^[3]。目前已在这种方法的基础上开发出一种基本不破坏被测构件的纳米压痕技术来测量应力集中和早期损伤区域。

2. 无损检测法

对于残余应力的检测,根据检测对象的不同可以采用不同的无损检测方法。主要有射线法、磁性法、超声波法等。射线法理论完善,但因有射线伤害和仅能测定表面应力,使其应用受到很大限制;磁性法是根据铁磁体磁饱和过程中应力与磁化曲线之间的变化关系进行测定的,在一定范围内适用。下面仅介绍其中的几种:

(1) 光测法

光测法主要有光弹性法、激光超声干涉法、散斑干涉法等。它是利用偏振光通过具有双折射效应的透明受力模型获得干涉条纹图,直接观察模型的全部应力分布,特别是可以观察到应力集中的部位,并可迅速确定应力集中系数。这种方法的缺点是应力测量周期长,检测成本高,不是在线应用检测发展的方向。

其中光弹性法是现在常用的量化应力检测方法之一,它是应用光学原理研究弹性力学问题的一种实验应力分析方法。20 世纪初, E. G. 科克尔和 L. N. G 菲伦用光弹性法研究桥梁结构等的应力分布。20 世纪 40 年代, M. M. 弗罗赫特对光弹性法的基本原理、测量方法和模型制造等方面的问题作了全面系统的总结,从而使光弹性法在工程上获得广泛的应用。光弹性法和其它许多应力检测方法结合,形成多种新型应力检测方法。光弹性法的缺点在于原理和操作过程均很复杂,对被测物体表面状况有较严格的要求。单独使用光弹性法时,需要制作与被测材料相似的模型,增加了检测的难度。其中以 X 射线衍射法最为常用,金属材料是由一定点阵排列组成的晶格结构,晶格内某一取向的原子间距是一定的。通过测量自由状态下的原子间距与在弹性应力作用下的原子间距的差值,求得残余应力的大小。这一检测方法是 20 世纪 60 年代德国科学家提出的。自 Macherauch、Müller 的 $\sin^2 \varphi$ 法发表后, X 射线衍射法的测量精度提高了很多,使应力测定向实用化方向迈进了一大步。X 射线衍射法的最大优点是可以测量出应力的绝对值^[1],它在焊接结构残余应力测量中应用较广泛,美国汽车工程师学会和日本材料学会都把 X 射线衍射法作为测量材料应力的标准来使用。由于 X 射线的穿透深度极浅,它只能在表层深度 30 μm 左右的范围测量,适用于精确测定应力沿层深的分布。这种方法更适合实验室测量,在外场使用有很多不便之处。

(2) 声弹性法^[4]

20 世纪 80 年代初期,声弹性法作为一种非破坏性的应力分析方法出现,它主要依据构件中的应力场与透过它的超声波传播速度和衰减相关的原理,可测定沿厚度方向的平均应力。但是这种技术目前还不是标准的非破坏性应力分析的方法,主要是因为它还不能消除纹理结构引起的声双折射而导致的应力误差,在特殊情况下,如轴对称应力分布和有主次向应力的应力场,残余应力的分布可由此方法测出,它测到的是平均残余应力。

(3) 巴克豪森噪声法

铁磁材料在磁化过程中,磁畴会产生大小和取向的变化,所以材料中的磁感应强度 B 也会发生变化,磁畴的突然转向,会使 B 产生不连续的阶跃变化,如图 1-4 所示^[5]。这就是铁磁材料的巴克豪森效应。巴克豪森效应遍及整个磁畴运动过程,磁畴的转动不但使磁感应强度 B 发生不连续的变化,同时还伴随有声音的发射,这种磁力声发射就是巴克豪森噪声 (BN)。

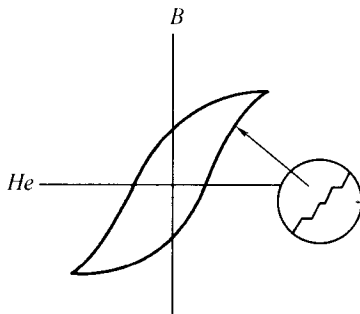


图 1-4 磁滞回线中的巴克豪森效应

测量残余应力时, BN 信号与应力的类型有关,当磁化场一定,磁化方向与应力方向平行时, BN 信号变化大,如图 1-5 中的 A 线所示;当磁化方向与应力方向垂直时, BN 变化小,如图 1-5 中的 B 线。应力幅值越大, BN 信号的变化也越大。巴克豪森效应要通过低频交变磁场得到,磁场在材料中的分布受到涡流的作用,会产生趋肤效应。此外, BN 信号传感器对磁畴运动的响应受距离的影响比较大,导致该方法仅对表面和近表面缺陷的检测有效。目前,巴克豪森

噪声法已用于对焊缝残余应力的测定、轴承环的磨损、铁路车轮压缩应力的测量。

磁学检测方法是用于检测铁磁性材料应力状态的无损检测方法之一,其基本原理是通过强磁场对被检测对象进行磁化,使检测部位达到磁饱和状态,以形成足够大的缺陷漏磁场。通过传感元件对漏磁场信号进行检测,从中得出缺陷的信息。主要的检测方法除上面介绍的巴克豪森噪声外,还有磁声发射、磁各向异性法和磁场旋转法等。磁学应力检测方法在检测时传感器不需要紧贴构件表面,因此检测对构件表面状况没有严格的要求。与电学检测和光学检测

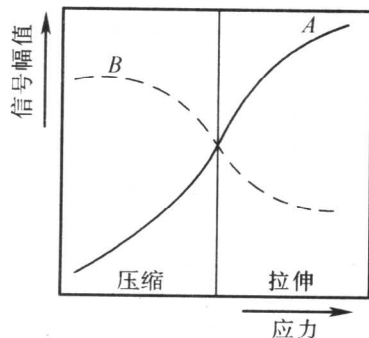


图 1-5 残余应力与 BN 信号

检测方法相比,其操作简单,可以进行非接触检测,缩短了检测时间,适合工业在线检测的需要,便于实现现场的快速自动化检测。其缺点是信号产生原理复杂,定量检测困难,因磁化产生的不一致性导致工程应用的局限性,在内应力和磁化场作用下,构件内部磁畴结构的运动机理还没有得到彻底的解释。目前主要通过实验的方法,研究应力场作用下构件的各类磁参数变化,通过科学的假设,结合实验结果研究构件内部磁畴运动机理。采用磁学方法检测应力目前主要用于定性和定量化要求不高的场合。在检测精度较高的时候,常与电阻应变、光弹性检测等常用定量检测方法配合使用。通常采用磁学方法快速定性地判断构件应力状况,找出应力集中或危险位置,再有针对性地进行定量检测。

若在应力集中的早期阶段(在破损发生之前)对其进行有效的检测,防止突发性事故的发生,这是我们所期望的。金属磁记忆检测技术就具有早期损伤无损诊断的独特优势。

1.2 金属磁记忆检测技术及产生背景

1.2.1 金属磁记忆检测技术产生背景

20 世纪 80 年代中期,俄罗斯学者曾发现在锅炉管子破损处有强烈的磁化现象,金属屑末像被吸到永久磁铁上那样被吸到这个小块上,如图 1-6 所示。这一磁化现象引起了专家们的兴趣。当时,按照发明人的建议,在莫斯科电力公司的一系列电厂对锅炉管子使用过程中出现的磁化现象进行了工业试验。在试验过程中,发现了发电设备管子及其它部件应力变形状况同其残磁分布和漏磁场之间存在着联系。在此基础上,经过多年的研究和试验,俄罗斯专家和学者提出了一种新的无损检测方法——金属磁记忆检测 MMT (Metal Magnetic Memory Testing) 技术。在 1997 年召开的第 50 届国际焊接会议上,金属磁记忆方法得到了国际社会的承认^{[6][7]},它是继声发射之后又一个利用材料自身结构发射信号的方法来进行检测的。众所周知,由铁磁材料制成的构件



图 1-6 锅炉管道破损部位碎片吸附铁屑的照片

和设备在工作载荷和外部磁场(如地磁场)作用下,其残余磁感应和残余磁化强度会增长,显现出不同形式的磁致伸缩效应,而金属的磁记忆检测方法利用的是磁致伸缩的逆效应。

其实,我国有人曾经发现过铁磁性构件无特殊磁化而显现磁性的现象。20世纪70年代末和80年代初,仲维畅^[8]曾在生产实践中遇到一系列自发磁化现象,即原先不显磁性的某些铁磁性材料工件经切削加工后,工件本身和刀具被强烈磁化。同样,某些本来并无磁性的机器零部件在运转一段时间之后却显出了磁性。1998年苏胜昔^[9]在对低碳钢、铸铁和铜棒进行拉伸的过程中,发现低碳钢和铸铁都存在着拉伸磁性,并且低碳钢的磁性比铸铁要高,在拉伸断口处磁场强度较大,而铜棒的拉伸磁场强度为零。这些现象正是金属磁记忆检测技术典型的表征。下面将金属磁记忆检测方法和与其关系密切的无损检测方法进行对比分析。

1.2.2 金属磁记忆检测技术和传统无损检测方法

无损检测 NDT(Nondestructive Testing)技术以德国科学家伦琴 1895 年发现 X 射线为标志,已历经一个多世纪,其重要性在全世界已得到公认。无损检测是利用声、光、电、磁、射线等与被测对象的相互作用,在不损伤被检测对象的情况下,对其内部的缺陷、结构、形状和状态等进行检测。根据检测结果,对被评价对象的固有属性、功能、状态和发展趋势(安全性和剩余寿命)等进行分析、预测,并作出综合评价。随着航空、航天、机械及核能等工业的不断发展,对其相应产品质量的要求也越来越高,尤其是随着动力机械的发展和高压容器的出现,现代工业重要产品正向着“高温、高压、高速、高应力”的方向发展,对产品内在缺陷提出了精确的要求。与此同时,无损检测技术倍受重视,并得以迅速发展和广泛的应用。它对设备的运行安全、产品质量的保证等都有着极其重要的意义。

无损检测在工业生产中主要有以下二方面的应用^[10]:

一是产品的质量。在产品的制造过程中,由于原材料质量欠佳或工序操作不当等诸多因素的影响,会出现产品的质量问题的,采用合适的无损检测方法能够及时剔除这些不合格品,从而保证产品的质量。

二是检验。其一是验收检验,在用户对所定购的货品进行验收检查时,用合适的无损检测方法来检验产品的质量是否达到了设计要求,可靠性程度如何,最终对产品作出质量鉴定;其二是维护检验,设备在使用过程中,视情或定期对故障多发部位进行检测,明确其目前的运行状态,发现隐患及时解决,保证设备安全运行,防止事故发生。

无损检测在工业产品中的首次应用一般认为是在第一次世界大战期间,德国人使用 X 射线检验双翼飞机的木制支撑件;20 世纪中期,建立了以射线检测(RT)、超声检测(UT)、磁粉检测(MT)、渗透检测(PT)和电磁检测(ET)五大常规检测方法为代表的无损检测体系;进入 20 世纪后期,世界科学技术得到飞速发展,以计算机和新材料为代表的新技术,促进了无损检测技术的快速发展。射线实时成像检测技术、工业 CT 技术的出现,使射线检测不断拓宽其应用领域。 γ 射线的应用和高能加速器的出现,增大了射线的检测厚度,使原来不易被低能射线穿透构件的检测变为可能,例如海关对集装箱物品的检验。随着纳米技术的发展,纳米材料制成图像采集器件比现在的图像增强器体积更小,容量更大,分辨率更高,图像更加清晰。可以预想,纳米技术将会进一步推动射线成像技术的发展^[11]。

在当今的无损检测技术中,超声检测以检测灵敏度高、声束指向性好、对裂纹等危害性缺陷检出率高、适用性广泛等优点在无损检测领域中占有重要的地位。由于计算机技术的

介入,使超声检测技术向数字成像自动化方向发展;超声检测在复合材料和非金属材料以及市政工程(例如城市供水供气管网的核查)、水利工程(例如水库大坝蚁穴的检查)将发挥越来越大的作用。目前无损检测技术正向无损评价 NDE (Nondestructive Estimation) 方向发展^[12],无损检测以检出缺陷为目的,如果有超标缺陷,一般由无损检测人员决定是否返修。但不一定所有超标缺陷返修得越干净越好;是否返修应取决于对缺陷进行有效的评价,因此,无损评价在无损检测的基础上应运而生。无损检测评价的出现促进无损检测向更高的层次发展。

常规无损检测方法获得了广泛的应用,但无法通过早期诊断,防止设备发生突发性的疲劳破坏;有些方法(如 X 射线衍射法、红外热图法、激光干涉法以及超声波测速法)比较适合在实验室应用,对于外场和现场的快速诊断有诸多不便之处。常规磁学检测方法在检测时需要对被检测表面做一定的处理;必须对被检测对象进行专门的充磁和退磁,探头的提高效应对检测结果的影响较大;无法确定金属濒临损伤的状态,即微观缺陷存在的位置。

采用金属磁记忆检测技术能及时、准确找出部件可能导致损坏与事故的最大应力集中区域,从而防患于未然。它能够检测到金属疲劳损伤和濒临损伤的状态;在对设备寿命进行评价时能够给出“从哪里做金属取样”;不需要对被检测对象进行专门的磁化,使用的是结构自身发射出来的信息。同时,金属磁记忆检测方法除了早期发现缺陷之外,还能进一步给出实际的应力-变形状态,并能找出发展破损的原因;它测量的是应力集中区中由位错聚积产生的自有漏磁场参数,而使用其它的磁学检测方法时,测量的是人工磁场在缺陷处的漏磁场。

1.2.3 金属磁记忆检测技术和声发射技术

声发射现象的观察及其在地震学中的应用,历史已久。作为一种现代检测技术,起步于 20 世纪 50 年代初德国凯赛尔所作的研究工作。他在几种金属材料的变形过程中观察到声发射现象,并提出了著名的声发射不可逆效应。此后,美国的研究人员发现了塑性变形中的位错声发射机制。20 世纪 60 年代,声发射作为无损检测技术,在美国原子能、宇航技术中兴起,在焊接延迟裂纹监视、压力容器与固体发动机壳体等检测方面出现了应用实例。20 世纪 70 年代,在日、欧、中国等相继得到发展。20 世纪 80 年代,随着微机技术、基础研究的进展,声发射技术获得迅速发展,其研究与应用从实验室研究扩展到结构评价、工业过程监视等各领域,成为一种新兴的动态无损检测方法。

声发射现象是一种常见的物理现象,其基本原理如图 1-7 所示。它是根据物体在外部条件作用下所发出的声音推断物体的状态或内部结构的变化。物体所发出的声信号包含了物体内部或缺陷性质和状态变化的信息。由于材料在外力或内力作用下,缺陷处或结构异常部位因应力集中发生塑性变形或断裂,其储存能量的一部分以弹性波形式释放应变能。比如树枝折断时伴随有声音产生。但在正常情况下,金属发生塑性滑移变形时所发出的微弱声音我们是听不到的,我们可以利用声发射仪接收、放大信号。声发射检测的第一次成功应用是在 1964 年,美国对北极星导弹舱进行了声发射检测。声发射检测技术在材料塑性变形、断裂韧性、疲劳裂纹扩展、焊接质量控制、压力容器安全性评价、飞行监测等方面都有应用^[13]。

与其它无损检测方法相比,声发射技术能够对动态缺陷进行检测。另外,缺陷的信息直接来自缺陷本身,而不是靠外部输入扫查缺陷^[14]。因此,该技术具有以下特点:

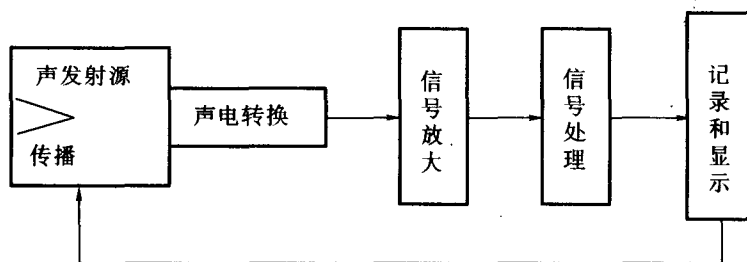


图 1-7 声发射技术原理

- 可检测活动缺陷。能提供缺陷在应力作用下的动态信息,适于评价缺陷对结构的实际有害程度。对大型构件,可提供整体的快速检测,检测效率高。
- 可提供缺陷随载荷、时间、温度等外部变量而变化的实时或连续信息,因而适用于运行和工艺过程在线监控及早期或临近破坏预报。
- 声发射特性对材料敏感,易受噪声干扰,因而,对数据的正确解释要有更为丰富的数据库和现场检测经验。
- 需要适当的加载程序,且一般仅有一或二次加载检测的机会。多数情况下,可利用现成的加载条件,但有时还需要特殊准备。
- 对于声发射检测所发现缺陷的定性定量问题,仍需依赖其它无损检测方法。

因此,声发射技术不是替代传统无损检测的方法,而是一种新的补充手段。金属磁记忆检测技术与声发射技术共同的特点都是利用结构自身发出的信息来进行检测的,但声发射检测是一种动态无损检测,声发射现象是随材料或工件的缺陷发生变化而产生的,即是从疲劳源的出现开始的。由于材料的塑性变形是不可逆的,所以声发射现象具有不可逆性。当第二次重复载荷超过第一次最大载荷时才有声发射现象产生。金属磁记忆检测方法能够“记忆”工件材料的损伤,它的形成机制与声发射的形成机制几乎是同时出现的,不过金属磁记忆现象的出现比由疲劳源引起的声发射现象稍早些,这一点在第 4 章和第 5 章的研究中均有所证明,且在外部载荷超过金属内应力时金属磁记忆检测方法能够检测出磁场强度的异常。但该方法只适用于铁磁性材料,对非铁磁性材料无能为力。

1.2.4 金属磁记忆检测技术和漏磁检测技术

铁磁性材料被磁场强烈磁化后,由于表面或近表面缺陷的存在,该处的磁导率远远小于工件的磁导率,由于磁阻的变化,部分磁力线会外溢,缺陷处形成漏磁场。漏磁检测法就是应用上述原理,利用磁敏元件做成的探头,将铁磁性部件置于外部强磁场的作用下,使缺陷部位产生漏磁的现象来检测部件缺陷的。在磁场的作用下,将磁敏元件通以一定的电流,就会产生霍耳电动势。传感元件可以采用感应线圈、霍耳元件、磁敏二极管、磁通门等,磁敏二极管和霍耳元件应用较多。对于一个成型的探头来说,霍耳元件的材料和几何形状是确定的,在工作电流不变的情况下,霍耳电动势只与磁场强度有关,磁场强度变化时,相应地引起霍耳电动势也发生变化,并在仪器上显示相应的数值。漏磁检测法已应用于各种铁磁部件的质量检验中,特别适用于对称旋转工件,如轴类和管材等,容易实现自动化检测。漏磁法的探头有磁轭旋转和磁轭不旋转两种形式,如图 1-8 所示。

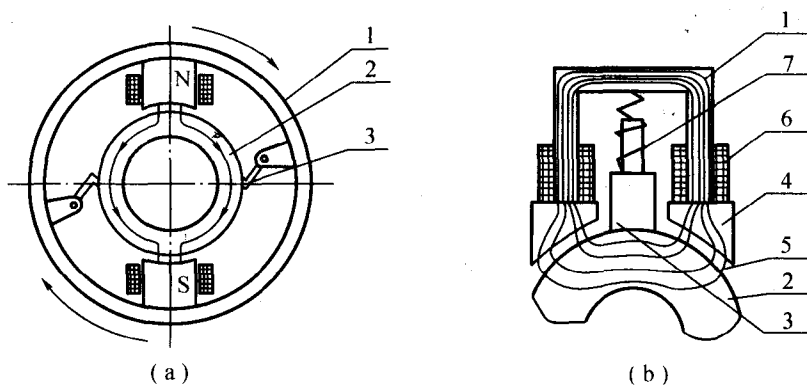


图 1-8 漏磁法探头的原理结构

(a)磁轭旋转式;(b)磁轭不旋转式

1—磁轭;2—被测件;3—探头;4—极靴;5—磁力线;6—励磁线圈;7—弹簧

漏磁检测对于形状规则的工件可以实现高效率的自动检测线,检测速度快,检测灵敏度高,裂纹检测深度可达 $0.1\text{ mm} \sim 0.3\text{ mm}$ 。为了对信号和缺陷的大小进行评定,采用不同深度的人工缺陷试件进行调节,设定信号判据值,当信号超过设定的数值时,系统报警,同时在缺陷部位打上标记。这类装置比较先进的有日本的 SAM 系列漏磁探伤装置,德国 FORSTER 系列漏磁探伤装置和美国 AMALOG、SONOSCOPE 漏磁探伤装置。对于中小型零件、形状不规则零件,漏磁检测同样适用,如对轴承内圈的质量检测以及齿轮的轮齿、发动机叶片、钢丝绳等的检测等^[13]。漏磁检测方法的缺点^[15]:

- 无法检测应力集中,而应力集中往往会引起疲劳裂纹。
- 检测时必须对被检工件磁化,对于形状复杂而且尺寸较大的被测件,给磁化带来一定的难度,同时也增加了检测难度。检测后为了不影响构件的性能,往往要求对检测件进行退磁,增加了检测成本。
- 检测前必须对被测件表面进行表面处理,即清理检测区域的覆盖层、油漆和腻子等,这不仅大大增加了检测成本、检测时间,而且打磨过程本身会使被检工件形成新的缺陷。
- 检测速度慢,无法对整个承载部件全面检查,只能在目测的基础上重点检测一些部位,使检测存在一定的隐患。

可见,仅靠传统的检测方法已经无法适应目前早期、快速、准确的检测需求。

在此基础上出现的先进无损检测技术——金属磁记忆诊断技术,它能有效地应用于在役设备早期损伤检测。但从本质上讲,它也是基于铁磁体的磁弹性效应,并可看成是漏磁检测的一种特殊形式^[1]。其特殊之处在于它是利用地磁场作为磁化场,而不是利用人为外加的磁化场,并且能够实现对缺陷的早期诊断。

1.2.5 金属磁记忆检测技术的意义

1. 金属磁记忆检测技术的研究将促进无损检测理论的发展

对设备和构件的运行状态进行检测,采用传统的无损检测方法检测到的结果只能发现

已发展成形的宏观裂纹或大部分微观裂纹,不能发现金属构件的早期损伤,也就不能避免由于设备和构件意外疲劳损伤而引发的恶性事故。由于金属磁记忆检测技术是传统无损检测所没有的技术,它的产生丰富了传统的无损检测方法,迫于无损检测实践的需要,揭示这种技术本质和检测理论的研究已经兴起,这将极大地丰富无损检测理论,使其更加趋于完善。

2. 金属磁记忆检测技术的诞生将促进无损检测与 NDE 的结合和发展

诊断是前提,治疗是目的,金属磁记忆检测技术能够检测出在构件还没有出现宏观裂纹前的应力集中区域,及时提醒我们对该区域进行监测。现在,无损检测技术正向着无损评价的方向发展,只有早期发现才能早期治疗,金属磁记忆检测技术的兴起,将促进 NDT 与 NDE 技术的结合与发展^[12]。

3. 金属磁记忆检测技术的研究是经济全球化的需要

21 世纪世界经济发展的重要标志之一是经济全球化。对于发达国家和发展中国家遵守同一经济规则的今天,对中国无损检测界提出了更大的挑战,谁不掌握高超的无损检测技术,在跨国检测项目中就没有立足之地。中国入世后,国内巨大的 NDT 市场也是国外无损检测公司想分占的一块蛋糕。可喜的是在金属磁记忆检测技术的研究中我国已取得了不错的成绩。为了将我国的无损检测事业和世界接轨,在世界无损检测界占有一席之地,我们必须大力发展无损检测技术,特别是无损检测新技术,在其起步阶段就缩短和先进国家的差距。

在无损检测领域完全存在对于这项技术的现实需求,特别是对于电力、锅炉压力容器、航空、石油、机械、铁道、造船、石化行业中等承受高温、高压的构件,这些构件在制造和使用的过程中易产生残余应力,残余应力对构件的力学性能、耐腐蚀性、疲劳强度、形状精度和安全使用都有重要影响,它是造成构件断裂,疲劳破坏和应力腐蚀的重要因素。研究金属磁记忆检测技术在构件中的应用,尽早发现应力集中区,分析残余应力对构件整体性能的影响,为最终减少或消除残余应力对构件的危害,防止灾难性事故的发生具有重大意义。

1.3 金属磁记忆检测技术的发展

1.3.1 金属磁记忆检测技术在工业中的应用

1. 国外金属磁记忆检测技术在工业中的应用

俄罗斯学者杜波夫(Dubov)发现爆裂的锅炉管道壁上吸附着大量铁屑,从而首次提议利用这种“应力-磁化”效应来进行应力集中的诊断^{[15][16]},经若干年试验获得成功,创立了“金属磁记忆检测法”,1995 年获专利^[17],并将其应用到多个工业部门^[18-22],更推广到包括中国在内的一些国家,但进展不够理想。主要原因是对影响其可靠性和局限性的一些基础理论问题未获澄清。俄罗斯金属磁记忆方法发展的第一阶段可追溯到 20 世纪 80 年代中期。当时,按照发明人的建议,在甘斯科电力公司系统的一系列电厂对锅炉管子在使用过程中出现的磁化现象组织了工业试验^[16]。其发展的第一阶段是在工业条件下走过的,这也是金属磁记忆方法区别于其它无损检测方法的独特之处。

俄罗斯“动力诊断技术”公司联合莫斯科 BT 研究所,对电站长期使用的蒸汽管道焊接

接头进行了研究。在1990~1999年期间,该公司完成的工业性检测包括:500多台蒸汽锅炉和水管锅炉、200台汽轮机和燃气轮机、200多台容器和装置、100多公里各种用途的管道、俄罗斯50多个工厂和公司机械产品的质量检测、铁路企业铁轨和轮对、桥梁结构、起重机械以及其它检测对象。金属磁记忆方法在管件特别是锅炉管道检测中的应用是较为成功的应用之一^[22]。

2. 我国金属磁记忆检测技术在工业中的应用

1999年10月在广东汕头召开的第七届全国无损检测年会上,Doubov教授在大会论文^[23]中介绍了金属磁记忆检测的基本原理及其在管道、锅炉等压力容器上的应用,将该技术介绍到了我国。同年,华北电力科学研究院金属研究所从俄罗斯“动力诊断技术”公司购置了一台TSC-1M应力检测仪,在电站锅炉管道检验中开始了国内金属磁记忆检测应用的首例。此后,该项技术立即得到国内无损检测界的关注,国内一些科研院所开始了对该技术的研究和应用。虽然我国在金属磁记忆检测技术方面的研究起步尚晚,但却取得了可喜的成果。不但有论著问世,还做了不少试验并取得了许多有益的结论,研制出了自己的金属磁记忆检测仪器。

在现场对焊缝做了很多实际的检测,如对船用钢板局部母材(高强度合金钢)及对接焊缝^[24]、某机组的部分E油管道焊缝^[25]等进行了检测,检测后认为用金属磁记忆检测技术可以发现焊缝中已经存在的缺陷,可以检测出焊缝的应力集中区,证明了金属磁记忆检测方法对微小缺陷或应力集中区均可以测出,并用其它方法如超声、磁粉和涡流进行了验证。对异种钢焊接接头进行了磁记忆检测,通过测量受热面管异种钢接头的磁场分布,定性研究了磁记忆信号与异种钢接头应力、淬硬组织的对应关系^[26]。许多电厂、电站对汽轮机叶片、压力容器受热面管焊缝、主蒸汽机弯管、焊制三通焊缝等部件进行了检测,得到了令人满意的结果^{[24][26~30]}。

国家质量监督检验检疫总局锅炉压力容器检测研究中心曾于2000年7月在燕山石化锅炉改造检验项目中,检测了新焊接的水冷壁管焊缝共136道,于2001年5月在茂名乙烯公司氧气球罐检验中,检测球罐焊缝,证明了该技术的有效性^[31]。

文献[32~34]用磁记忆检测技术对现场汽轮机叶片进行了检测 and 数据分析。结果表明,磁记忆检测技术是检测汽轮机叶片缺陷和应力集中程度的有效方法,可快速、准确检测出汽轮机叶片的裂纹和应力集中区。该技术在飞机构件早期损伤检测中也有应用。文献[1]、[35~36]阐明了磁记忆检测技术的主要优势及其在飞机主承力构件状态监测与早期损伤快速诊断中的应用前景,探讨了磁记忆检测技术在起落架构件疲劳试验中的应用。该技术有利于把飞机和武器装备结构件的突发性事故消灭在萌芽状态,在构件疲劳分析、设备定寿及结构与工艺设计中发挥先导作用。文献[37]系统介绍了金属磁记忆检测技术的概念及其产生背景和发展概况,阐述了该技术的检测机理以及该技术在设备检测中的应用,分析了该技术的应用前景。

此外,金属磁记忆检测技术在电厂机组刮板捞渣机的链条检测方面也有所尝试,通过检验消除了设备隐患,取得了良好的效果^[38]。在金属磁记忆方面开展研究工作较早的还有厦门爱德森电子有限公司,该公司已于2000年3月研制出了亚洲第一台便携式智能化金属磁记忆诊断仪——EMS-2000智能金属磁记忆诊断仪(八通道)^[39],并在《无损探伤》杂志上发表了国内首篇关于磁记忆检测的论文^[40]。