

199

7G115.28
R25

金属磁记忆检测技术

任吉林 林俊明 池永滨

胡先龙 林发炳 林春景

编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

磁记忆检测是迄今为止唯一能用于金属早期诊断的无损检测新技术,可望在机械、电力、航空、航天、铁道、石油、化工等工业部门得到广泛的应用。

本书介绍了金属磁记忆检测技术,包括物质的磁化、磁记忆检测原理、磁记忆检测仪器和磁记忆检测技术在工程中的应用实例等内容。

本书可供上述部门从事无损检测技术的工程技术人员、科研院所相关专业的研究人员以及大专院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属磁记忆检测技术/任吉林等编著. -北京:中国电力出版社,2000

ISBN 7-5083-0504-3

I. 金… II. 任… III. 金属-磁检验-技术
IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 86530 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 12 月第一版 2000 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 5.25 印张 114 千字

印数 0001—3000 册 定价 9.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

金属磁记忆检测技术利用铁磁构件的磁记忆特性,可以准确可靠地探测被测对象上以应力集中为特征的危險部件和部位。磁记忆检测具有设备轻便、操作简单、灵敏度高、可靠性好,以及提高效应影响小、不需要专门的磁化设备等特点,因此,它是迄今为止对金属部件进行早期诊断唯一行之有效的无损检测的新方法,可望在机械、电力、航空、航天、铁道、桥梁、石油、化工等工业部门得到广泛的应用。

磁记忆检测技术是俄罗斯学者多年来的研究成果。1997年首次在第50届国际焊接学术会议上提出,立即得到国际学术界的承认和关注,成为世界各国同仁的研究热点,在许多国家和地区迅速得到推广应用。1999年底,这项技术开始引进中国,同样引起了国内同行的广泛兴趣和高度重视。然而,由于磁记忆检测技术的发展历史还比较短,目前国内还没有一本专门介绍这项技术的书籍,许多研究应用或拟使用这项技术的科技人员又希望对它能有较全面的了解。为此,作者在认真参考有关文献,结合俄罗斯电力部门的应用实例和中国开展磁记忆检测的部分研究资料以及实践的基础上,编写了这本小册子。希望能通过本书的介绍,抛砖引玉,推动磁记忆检测技术在国内的应用和发展。

全书共五章,第1~3章由任吉林编写,主要阐述铁磁金属构件产生磁记忆现象的机理和磁记忆检测的基本原理;

第4章由林俊明编写，介绍磁记忆检测仪器的工作原理、设计思路和主要功能（包括传感器、信号检出与处理电路、计算机系统等）；第5章主要由池永滨、胡先龙编写，介绍磁记忆检测技术在电力系统及其他领域的应用实例，此外，林发炳、林春景也为本书的编著做了相应的工作。

本书在编写过程中，得到了全国无损检测学会的大力支持，耿荣生理事长亲自作序，特在此表示深深的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有所不足，也可能有些提法值得商榷，敬请读者批评指正。

编 著 者

2000年12月8日

结 言

包括磁粉检测在内的漏磁检测方法是基于铁磁材料磁性变化的一种无损检测技术，其基本原理是当铁磁材料或工件被外磁场磁化后，处于表面和近表面的缺陷会使工件内的磁力线发生畸变，从而逸出工件表面形成“漏磁场”，通过探测工件表面“漏磁场”的存在便可以确定缺陷的位置、形状和大小。可见，依赖外部磁场激励是这一方法的主要特点。

有关磁粉检测方法应用的最早记载是在 20 世纪 20 年代，当时，一位叫霍克（Hoke）的美国人在机械加工时，发现切削下来的铁屑会吸附在钢件的裂纹上，于是，他在 1922 年第一个提出可利用磁铁吸引铁屑这一人所共知的磁现象进行钢件探伤——磁粉探伤。以后，随着工业生产发展的需要和科学技术的进步，磁粉检测不仅在理论研究、设备研制和工业应用等方面都得到了很大的发展和进步，而且还与射线、超声、渗透、涡流等几种无损检测方法一道，并列在工程技术中得到较为广泛应用的常规无损检测方法。

传统的漏磁检测方法无疑是一种可靠的无损检测技术。采用传统的漏磁检测方法对铁磁材料及设备与构件的相关部位进行百分之百的检测，可以有效地发现已发展成形的宏观或大部分微观缺陷（如裂纹、发纹、折叠、夹杂物等），避免工程应用中各种危害性事故的发生。但是，对于在役金属设备及构件的早期损伤，特别是尚未成形的隐性不连续性变

化，难以实施有效的评价，从而无法避免设备检修后由于意外的疲劳损伤发展而引发的恶性事故。

设备的零部件和金属构件发生损坏的主要原因是由各种微观和宏观机械应力集中所导致的疲劳失效，其基本特征表现为材料在低于静强度极限的交变应力（或应变）的持续作用下，萌生多种类型的微观内部缺陷（如位错、滑移、应力诱发相变等），并逐渐演化成为宏观裂纹，以及由于裂纹扩展而最终导致结构破坏的过程。

进入高科技时代以来，由于现代工业产品正日益向高速、高温、高载的方向发展，疲劳问题相当突出的存在于所有工业部门。例如飞机、铁路机车、路轨、桥梁以及工程应用中的许多关键性设备，如压力容器、管道、蒸汽机的涡轮转子、叶片、壳体等，都不同程度地受到疲劳失效的威胁。仅就电站设备而言，1971～1974年原联邦德国就发生过1393起事故。据统计，在现代工业各领域中，约有80%以上的结构破坏都是由疲劳失效所引发的。因此，进行疲劳分析，有效的评价应力变形状况，特别是导致损伤的临界应力变形状况便成为评价设备与构件的结构强度与可靠性的一个重要依据，而为了及时准确地找出最大机械应力变形区域，就必须开发出新的无损检测方法。

20世纪90年代后期，以杜波夫教授为代表的俄罗斯学者率先提出一种崭新的金属诊断技术——金属磁记忆检测。该方法的原理基于铁制工件在运行时，受工作载荷和地球磁场的共同作用，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，而且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系。

在工程应用中，在周期性或振动性负载的作用下，金属磁化显著增加的效应表现在许多结构上。早在第二次世界大战期间，前苏联的海军舰艇触到德国水雷遭到破坏时，苏联学者亚历山大罗夫院士通过研究后便指出：在振动负载作用下，处于地球磁场中舰艇壳体的磁化率增长是造成这一损失的重要原因。根据这一原理，研制并装备了专用退磁装置便有效地减少了舰艇在磁性水雷的作用下发生爆炸的事件发生。理论与试验研究证明，金属设备与构件运行时，受工作载荷的作用，其残余磁性会发生改变和重新分布，并在工件表面形成漏磁场，这是由于磁弹性和磁机械效应两者共同作用的结果。其残余磁性强度及被测工件表面的漏磁场 H_p 受拉伸、挤压、扭曲和周期性变化负载的作用下，单一的与最大工作应力相关，且表现为在应力集中区域垂直分量 $H_p(y)$ 的符号发生变化，并存在过零值点。因此，利用测磁仪器通过测定铁制工件表面 $H_p(y)$ 量的变化强度便可以很准确的推断工件内部残余应力集中的区域。

磁记忆检测方法与现有的漏磁检测方法相比，其特点是：

- (1) 不需要专门的磁化设备就能对铁制工件进行可靠的检测；
- (2) 不需要对被检测工件的表面进行清理或其他预处理；
- (3) 提离效应的影响很小；
- (4) 设备轻便、操作简单、快速便捷、灵敏度高，重复性与可靠性好。

金属磁记忆检测可以准确可靠地探测出被测对象上以应力集中区为特征的危险部件和部位，是迄今为止对金属部件

进行早期诊断唯一行之有效的无损检测方法。因此，不仅可以用来准确确定在役运行设备上正在形成或发展中的金属缺陷区段，然后通过其他无损检测方法进一步确定具体缺陷的存在，并根据对构件应力变形状态的评定，及时对构件的受损部件进行强化处理或更换；亦可以在设备或构件的疲劳试验中准确确定应力集中的部位，为疲劳分析、设备定寿及结构与工艺设计发挥有效的先导作用。

金属磁记忆检测技术一经问世，便受到世界各国同行的普遍重视。目前，国际焊接学会批准执行的欧洲规划 EN-RESS——应力和变形检测中，已明确规定金属磁记忆法为切合实用的设备和结构应力变形状态检测方法；在俄罗斯、乌克兰、保加利亚、波兰等国家的国家标准一级上已进行了对该方法和仪器的鉴定；印度和澳大利亚等国正在推广应用该项技术；在中国也已经开始对这项技术的研究和应用。可以预见，在 21 世纪，这项集无损检测、断裂力学、金属学等学科于一体的无损检测技术必将在各工业部门得到广泛的普及与应用。

1

物质的磁化

1.1 物质的磁性

如果在磁场中放入一种物质，就会发现，不管是什么物质都会使物质所占有的空间的磁场发生变化。这就是说，物质在磁场中由于受磁场的作用表现出一定的磁性，这种现象就称之为磁化。通常把能磁化的物质称为磁介质，实际上包括空气在内所有的物质都能被磁化，因而都是磁介质。

根据物质磁化后对磁场的影响，可以把物质分为三大类：使磁场减弱的物质称为抗磁性物质；使磁场略有增强的物质称为顺磁性物质；使磁场剧烈增加的物质称为铁磁性物质。

物质为什么会有磁性呢？众所周知，物质是由原子组成的，而原子则是由原子核和电子构成。近代物理证明，每个电子都参与两种运动，即环绕原子核的运动和电子本身的自旋运动。这两种运动都可看作为形成了一个闭合电流，由此将产生一个个磁矩，都能产生磁效应。一般将由电子绕核运动产生的磁矩称为轨道磁矩，而电子的自旋运动产生的磁矩称作自旋磁矩。事实上，原子核也有磁矩。不过，它的磁矩很小，约为电子磁矩的 $1/2000$ ，故通常情况下就不考虑

了，物质的磁性就认为是由电子循轨和自旋运动而产生的。

由上可知，电子是有磁矩的，电子磁矩就是轨道磁矩和自旋磁矩的和。那么原子有没有磁矩呢？理论证明，当原子中一个电子层已经排满时，这个层电子磁矩的总和就等于零，该原子就没有磁矩；若一个原子的电子层未被排满，电子磁矩的总和就不为零，该原子就有磁矩了。当原子结合成分子时，它们的外层电子磁矩要发生变化，所以分子磁矩并不是各单个原子磁矩的总和。由于不同的原子具有不同的磁矩，故当由这些原子组成不同的物质时，物质就表现出不同的磁性。

通常在外加磁场时，物体本身的自旋和轨道磁矩和为零，所以物体对外不显磁性。但如对物体加上一个外磁场，物体被磁化后，就表现出一定的磁性。我们用 m 来表示物体内部所有的自旋、轨道和附加磁矩（见 1.2 节）的总和。考虑到物体磁矩 m 的大小不仅取决于物体本身的磁性，还与物体的原子量及几何因素有关。评价组成不同物体的物质的磁性大小，常用单位体积中的磁矩来表示，称为物质的磁化强度 M 。若物体的体积为 V ，则有

$$M = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

磁化强度的单位为安/米 (A/m)。

对于弱磁性物质，在一定的磁场和温度范围内，并当磁化是静态的过程时，磁化强度 M 和外加磁场 H 之间通常存在着以下关系

$$M = \chi H \quad (1-2)$$

式中 χ ——物质的磁化率。

如果 $\chi < 0$ ，则该物质称为抗磁性物质。惰性气体、许

多有机化合物以及若干金属如 Bi、ZnAg、Mg 和非金属 Si、P、S 等都是典型的抗磁体，它们的磁化率 $\chi \approx -10^{-6}$ ，实际上不随温度变化。

如果 $\chi > 0$ ，则该物质称为顺磁性物质。氧分子 O_2 、一氧化氮 NO、许多稀土金属和铁族元素的盐类、碱金属等都是顺磁性物质。它们的磁化率 $\chi \approx 10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。

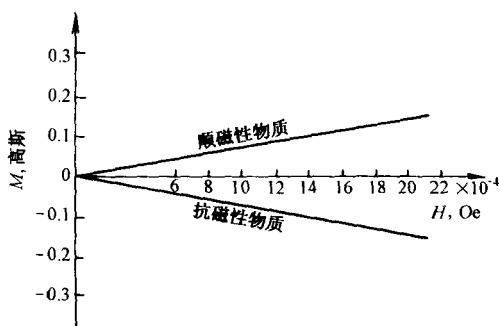


图 1-1 弱磁性物质的磁化曲线

此外，还有许多物质（铁磁性物质），它们的磁化强度 M 不是磁场 H 的线性函数，两者之间存在着很复杂的关系。 χ 的数值很大，同时也是磁场的函数。铁、钴、镍、钆以及它们的化合物和合金，还有铬和锰的合金等都是铁磁物质。

抗磁性物质和顺磁性物质的磁化曲线（磁化强度和磁场强度的关系曲线）都是直线，如图 1-1 所示。铁磁性物质的磁化曲线则是复杂的曲线，但也具有典型的形状。

实际上，当物质被磁化之后必然反过来使物质所在部分的磁场发生相应变化。该磁场变化以后的总磁感应强度为 B ，物质磁化后引起的磁场变化为 H' ，则有：

$$B = \mu_0 H + \mu_0 H' \quad (1-3)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

式中 μ_0 ——真空磁导率，H/m。

H' ——附加磁场，其大小应等于 M ，表明物质的磁化强度愈高，附加磁场强度也愈大。

从式 (1-2) 和式 (1-3) 可得

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (1-4)$$

$$B = \mu_0 H + \mu_0 \chi H \quad (1-5)$$

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H \quad (1-6)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (1-7)$$

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1-8)$$

式中 μ ——物质的绝对磁导率，H/m；

μ_r ——物质的相对磁导率，是磁导率与真空磁导率的比值。

1.2 抗磁性和顺磁性

除去铁磁质，物质按磁性可以分为抗磁性和顺磁性。其基本特征是抗磁性 $\chi < 0$ ，而顺磁性 $\chi > 0$ 。这说明，两种磁性的产生虽然和电子磁矩有关，但还存在着不同的原因。

1.2.1 抗磁性

抗磁性也叫逆磁性。物质具有抗磁性的原因是由于电子的循轨运动在外磁场的作用下产生了抗磁矩 Δm_0 所造成的。

设电量为 e 的电子以半径 r 、角速度 ω 绕原子核作圆周运动，电子绕行一周所需的时间为 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 。电子的轨道运动可看成是环行电流，其电流强度和轨道面积分别是

$$I = \frac{-e}{T} = -\frac{e\omega}{2\pi} \quad (1-9)$$

$$S = \pi r^2 \quad (1-10)$$

则对应的轨道磁矩为

$$m_0 = IS = -\frac{1}{2}er^2\omega \quad (1-11)$$

式中的负号是表示 S 的方向与运动角速度 ω 的方向相反。

当物质放入外磁场时，取外磁场与电子循轨运动的轨道平面垂直，如图 1-2 所示。这时有两种可能，一是外磁场 H 与循轨运动角速度 ω 方向相同；另一种是相反。

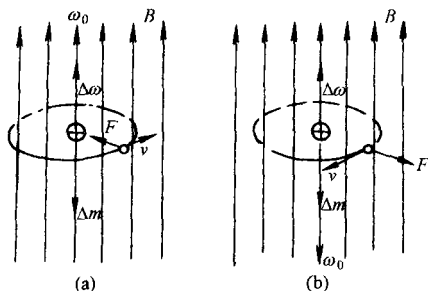


图 1-2 外磁场与电子循轨运动的轨道平面垂直

(a) $\omega // H$; (b) $\omega // -H$

首先考虑外磁场 H 与循轨运动角速度 ω 方向相同的情况 [见图 1-2 (a)]。电子在作循轨运动时，必然要受到一个向心力 F ，并且其循轨运动产生的轨道磁矩和外磁场方向相

反。当加上一个外磁场后，电子在磁场的作用下将产生一个附加力 ΔF ，称为洛伦兹力，其方向和 F 的方向是一致的。这种情况无疑等于使向心力得到增加，总的向心力应为 $F + \Delta F$ 。因向心力 $F = mr\omega^2$ （向心加速度 $a = r\omega^2$ ），可以认为电子的质量 m 和循轨运动半径 r 是不变的，这样，只能设想，当向心力增加时，必然导致电子循轨运动的角速度 ω 发生变化，即 $F + \Delta F = mr(\omega + \Delta\omega)^2$ 。 ω 增加一个 $\Delta\omega$ ，从公式 (1-11) 可以得出磁矩 m_0 会增加一个 Δm_0 ，称为附加磁矩，且 Δm_0 与轨道磁矩的方向相同，但与外磁场的方向相反。同样的道理，可以证明，[图 1-2 (b)] 中外磁场 H 与电子循轨运动角速度方向相反时，电子循轨运动同样会产生一个与外磁场方向相反的附加磁矩 Δm_0 。

对于一个电子产生的附加磁矩可用式 (1-12) 表示

$$\Delta m_0 = -\frac{e^2 r^2}{6mc^2} H \quad (1-12)$$

式中 c ——光速。

对于一个原子来说，有 N 个分布在不同壳层的电子，它们有不同的轨道半径 r ，故一个原子产生的附加磁矩为

$$\Delta m_0 = -\frac{e^2 H}{6mc^2} \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (1-13)$$

式 (1-12) 和式 (1-13) 中的负号表示附加磁矩 Δm_0 的方向与外加磁场 H 的方向相反。同时， Δm_0 的大小和外加磁场强度成正比，说明当外加磁场去除之后，原子的附加磁矩即行消失。

由以上分析可知，在外磁场的作用下，电子的循轨运动必然会产生一个与外磁场方向相反的附加磁矩，这就是物质的抗磁性。抗磁性存在于所有材料中，但是，当材料还有其

他磁化现象时，因为抗磁性的磁化率远比其他磁化率小，所以除抗磁质外，其他物质的抗磁性现象都被其他磁化现象所掩盖。

在抗磁质中，每个原子中所有电子的磁效应相互抵消，即电子轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和为零，没有原子磁矩。但是，在外磁场的作用下，电子的循轨运动仍然会产生与外磁场方向相反的附加磁矩，从而使物质呈现抗磁性。

1.2.2 顺磁性

顺磁物质的单个原子是有磁矩的，同时，原子的磁矩在外磁场的作用下会产生顺磁。对于金属来说，当点阵离子的顺磁矩和自由电子的顺磁矩大于外加磁场下产生的抗磁磁矩时，即表现为顺磁物质。但是由于热振动的影响，在无外加磁场时，其原子磁矩的取向是无序的，也就是磁矩沿着所有可能的方向分布着，如图 1-3 (a) 所示。图中箭头是指磁矩的方向，此时物质的总磁矩为零。假如将物质放在磁场中，原子磁矩便排向磁场方向，总磁矩便大于零了，即表现为正向磁化，如图 1-3 (b) 所示。应当指出，当温度约为室温或室温以上范围时，顺磁物质的原子或分子热运动产生无序的倾向是很大的，所以进行磁化十分困难，故室温下磁化很微弱。

在室温下，使顺磁物质达到饱和磁化程度所需要的磁场经计算约为 $8 \times 10^{10} \text{ A/m}$ ，这在技术上是很难达到的。但是如果把测量温度降低到接近绝对零度，达到磁饱和就容易得多了。例如顺磁体 GdSO_4 在 1K 的温度时，磁场强度只要有 $24 \times 10^4 \text{ A/m}$ ，便达到磁饱和状态，如图 1-3 (c) 所示。

可以认为，顺磁物质的磁化是磁场克服原子或分子热运

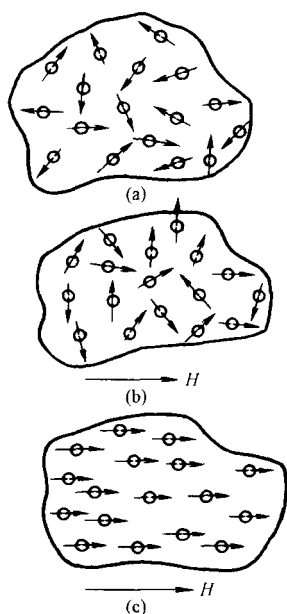


图 1-3 顺磁物质磁化过程示意图

(a) 无外加磁场；(b) 有外加磁场；
(c) 磁饱和状态

动的干扰，使原子磁矩排向磁场方向的结果。

常见的顺磁物质如氧、铂、钨、稀土金属；铁、钴、镍的盐类；以及铁磁金属在相当高的温度时都是顺磁的。顺磁物质原子的磁化率和温度有很强烈的依赖关系，一般通过居里定律来表示

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (1-14)$$

式中 C ——居里常数；

T ——绝对温度。

应当说，只有部分顺磁性物质能准确地符合这个定律，而相当多的固溶体顺磁物质，特别是过渡族金属元素居里定律实际上是不适用的。它们的原子磁化率和温度的关系要

用居里—外斯定律表达

$$\chi = \frac{C'}{T + \Delta} \quad (1-15)$$

式中 C' 是常数， Δ 对于某一种物质来说也是常数，不同的物质可大于零或小于零。

对铁磁物质来说，居里点（居里温度）以上是顺磁的，

其磁化率大致服从居里—外斯定律，这时的 Δ 为 $-\theta$ ， θ 表示居里温度，此时磁化强度 M 和磁场强度 H 保持着线性关系。

应当指出，抗磁磁化率和顺磁磁化率一般和磁场的强弱无关，而且磁化过程是可逆的。

1.2.3 金属的抗磁性与顺磁性

众所周知，金属是由点阵的离子和自由电子构成的。在磁场的作用下，电子运动产生了抗磁磁矩，与此同时，还有点阵的离子和自由电子产生顺磁磁矩。其中自由电子所引起的顺磁性是比较小的，故只有当内层电子未被填满，自旋磁矩未被抵消时，才可能产生较强的顺磁性。根据这些磁矩在具体情况下所起的作用，可以粗略地讨论金属的抗磁性与顺磁性。

金属中 Cu、Ag、Au、Cd、Hg 等，它们的离子所产生的抗磁性大于自由电子的顺磁性，因此是抗磁性的。非金属除氧和墨外，都是抗磁性的。如硅、硫、磷以及许多有机化合物，它们的原子结合是共价的，共价电子的磁矩相互抵消，无顺磁矩，故成为抗磁物质。在元素周期表中，接近非金属的一些金属元素，如 Sb、Bi、Ga 及 Sn 等，它们的自由电子在原子价增加时逐步向共价结合过渡，因此，表现出异常的抗磁性。

所有碱金属都是顺磁性的，碱土金属（除 Be 外）也都是顺磁性的。可以设想，以上两族金属元素在离子状态时都与惰性气体相似，具有相当的抗磁磁矩，但由于电子产生的顺磁性占主导地位，故表现为顺磁。

三价金属 Al、Se、La 也是顺磁性的，它们的顺磁性主