

BMWSJY

表面无损检验

能源部西安热工研究所 吴前驱 贺潜源 编著
丁 伟

水利电力出版社

表面无损检验

能源部西安热工研究所

吴前驱
贺潜源
丁伟

编著

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书系统地论述了表面无损检验的各种方法和新技术，内容包括磁粉检验、磁场检验、电流检验、涡流检验、渗透检验、红外检验、液晶检验和应用光电系统的目视检验的基本原理、工艺、设备及应用实例。

本书可供从事无损检验人员阅读，大专院校师生参考，也可作无损检验人员培训班教材。

表面无损检验

能源部西安热工研究所

吴前驱、贺潜源、丁伟 编著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 10.125印张 222千字

1991年11月第一版 1991年11月北京第一次印刷

印数 0001—2270册

ISBN7-120-01336-X/TK·221

定价 8.20元

前 言

随着现代工业的发展,对材料和构件,特别是对承受高压高温的材料和构件,对其质量和安全性评价的要求越来越高,因此无损检测技术日益受到各工业部门及其他领域的极大重视。在影响材料和构件质量及安全性的诸多因素中,由于表面缺陷的危害性极大,所以作为无损检测技术一个重要方面的表面无损检验就显得更为重要了。

表面检验要求能检出和测量位于材料和构件表面的缺陷或近表面下的隐匿缺陷。常规的表面检验方法有磁粉检验、渗透检验、涡流检验和电流检验,作为新技术的表面检验方法有红外检验、磁场检验、液晶检验和应用光电系统的目视检验。这些表面检验方法各俱特点。实践证明,这些表面检验方法已经成为检验材料和构件质量、保证产品和设备安全必要的、可靠的技术手段。

近年来,由于对重要设备和部件的性能尤其是安全性要求不断提高,以及新材料的应用,对无损检验的可靠性和经济性也提出了更高的要求,需要给出尽可能详细和准确的缺陷特征描述(如缺陷的位置、真实尺寸、走向及形状等),配合断裂力学分析,对构件的现行状态作出准确的判断。因此,正确地应用表面检验方法显得尤为重要。而且科学技术的发展,产品的更新换代迅速,许多新技术(如红外检测、微机数据处理、多频涡流、液晶及工业电视等)都有了新的应用。为了使无损检验人员能正确应用表面检验方法,提高表面检验的可靠性,本书对常规的表面检验方法从检验原理、检验方

法、仪器设备和结合现场的实际应用等都作了较为详细和系统的阐述，同时也介绍了近年来出现的新技术和新方法。期望本书能对无损检验工作者有所帮助。

本书由吴前驱主编。第一～五章及第六章第五节由吴前驱编写，第六章第一～四节由贺潜源编写，第七章由丁伟编写。

武汉水利电力学院焊接教研室毛森祥副教授对本书进行了审阅，提出了宝贵意见，刘长久、侯善敬二同志对本书编写提供了一定的帮助，我们谨致衷心的感谢。

由于作者水平有限，倘有错讹遗漏之处，祈请批评指正。

作者

1990年10月

目 录

前 言

第一章 磁粉检验	1
第一节 磁场和磁性物质	1
一、磁现象和磁场；二、相对磁导率和磁性物质；三、磁学基本物理量；四、磁化和磁化曲线；五、磁滞回线	
第二节 磁粉检验原理和方法	7
一、磁粉检验原理；二、磁化工作点选择；三、磁粉检验的分类；四、磁化规范；五、退磁	
第三节 磁粉检验材料和设备	29
一、磁粉和磁悬液；二、磁粉检验灵敏度试样；三、磁粉检验设备	
第四节 缺陷磁痕分析	43
一、磁痕分类；二、缺陷磁痕分析；三、无关显示	
第五节 磁粉检验在电力工业中应用	49
一、汽轮发电机转轴中心孔表面磁粉检验；二、水轮机铸造叶片磁粉检验；三、铆接锅炉汽包和胀管孔苛性脆化磁粉检验；四、管道母材和焊缝磁粉检验；五、汽轮机汽缸表面和结合面裂纹磁粉检验；六、汽轮机叶片和转轴磁粉检验；七、磨煤机端盖表面磁粉检验；八、弹簧表面裂纹磁粉检验	
第二章 磁场检验	73
第一节 磁场及漏磁场检验基础	73
一、漏磁场产生原因；二、缺陷的漏磁场分布和计算；三、漏磁场检测元件	
第二节 漏磁场检验原理和方法	87
一、表面裂纹深度测量原理和方法；二、表面裂纹倾角测量原理和方法；三、反作用磁场检验原理和方法；四、录磁探伤原理和方法	

第三节 磁场检测仪器和设备	105
一、特斯拉计；二、漏磁场探伤装置	
第四节 磁场检验应用	112
一、非磁性材料厚度测量；二、磁性材料厚度测量；三、有缝钢管焊缝质量检验；四、管道内表面缺陷检验；五、钢材热处理质量和含碳量的磁场检验；六、用测量磁化率变化监控腐蚀程度	
第三章 电流检验	129
第一节 电流检验基础	129
一、直流电流在导体中的分布；二、交流电流在导体中的分布；三、电流检验的特点	
第二节 电流检验原理和方法	132
一、直流电流检验的厚度测量；二、裂纹深度测量；三、裂纹倾斜角的测量	
第三节 电流检验测量仪器	153
一、直流电流检验测量仪器 直流裂纹深度测量仪；三、交流裂纹深度测量仪	
第四节 电流检验应用	161
一、在役锅炉水冷壁管内壁腐蚀测量；二、石油专用管材表面凹坑缺陷深度测量；三、裂纹深度测量在断裂力学中的应用；四、电站运行部件表面开裂裂纹深度测量；五、原材料和工件验收检验	
第四章 涡流检验	178
第一节 涡流检验基础	178
一、电磁感应基本定律；二、影响线圈阻抗的因素；三、趋肤效应	
第二节 涡流检验原理和方法	187
一、涡流检验原理；二、有效磁导率和特征频率；三、裂纹对阻抗图变化关系与缺陷的涡流检测；四、涡流检验方法的分类	
第三节 涡流检测仪器	199

一、涡流检测仪器基本电路;二、涡流信号显示装置;三、常用
涡流检测仪器

第四节 涡流检验在工业中应用.....204

一、在役汽轮机凝汽器铜管的涡流检验;二、汽轮机和涡轮机
叶片涡流检验;三、汽轮机转轴中心孔表面涡流检验;四、焊
缝涡流检验;五、发电机护环内表面涡流检验;六、多频涡
流检验的特点和应用

第五章 渗透检验.....221

第一节 渗透检验基础.....222

一、液体特性;二、乳化作用和乳化剂

第二节 渗透检验的原理和方法.....227

一、渗透检验原理;二、渗透探伤剂;三、渗透检验操作步骤

第三节 渗透检验装置和对比试块.....239

一、渗透检验装置;二、渗透检验的对比试块

第四节 显示图像分析.....247

一、真实缺陷显示;二、假显示和无关显示

第五节 渗透检验应用.....249

一、发电机护环表面渗透检验;二、汽轮机高压转子叶轮表面
缺陷检验;三、焊接裂纹检验;四、汽轮机叶片疲劳裂纹检验

第六章 红外检验和液晶检验.....255

第一节 红外检测基础.....255

一、红外线及其特性;二、黑体辐射;三、非黑体辐射;四、大
气传输

第二节 红外无损检测原理.....263

一、基本原理;二、主动式检测的加热方式;三、被动式检测法

第三节 红外检测仪器及设备.....266

一、热像仪;二、红外辐射计;三、红外显微镜;四、红外
探测器及其性能参数

第四节 红外检测技术的应用.....279

.....	292
一、液晶和液晶特性；二、液晶检验原理；三、液晶检验的应用；四、液晶检验应用的实例	
第七章 应用光电系统的目视检验	297
第一节 光纤内窥镜检验	297
一、光导纤维传光传像原理；二、光纤内窥镜；三、光纤内窥镜表面检验的应用	
第二节 视频探测镜检验	301
一、视频探测镜成像原理；二、视频探测镜的应用	
第三节 闭路电视检验	305
一、汽轮机转子中心孔表面检验对闭路电视性能的要求；二、汽轮机转子中心孔检验用闭路电视摄像机；三、摄像机在转子中心孔内的安装；四、摄像机光圈、照明度的调节和扫查速度；五、检验数据的显示和记录	
参考文献	312

第一章 磁 粉 检 验

磁粉检验是检查铁磁性金属表面或近表面裂纹和其它缺陷的一种无损检验方法。由于它具有显示直观、灵敏度高、设备简单和操作方便等优点，因而广泛应用于锻钢件和铸钢件制造过程、结构件焊接加工过程、设备使用和检修过程中的检查，特别是在高压容器、电站锅炉等受压设备的定期检查中，磁粉检验是检查焊接质量的一种不可缺少的无损检验手段。

磁粉检验仅限于在铁磁性材料（即铁、镍、钴和它们的合金）上进行。检验灵敏度与缺陷的位置有关，表面的灵敏度最高，随着距表面的深度增加而急剧降低。非铁磁性材料由于不能被强烈磁化，所以不能用本方法检验。

第一节 磁场和磁性物质

一、磁现象和磁场

载流导体的周围存在着磁场，磁化后的物体如磁铁棒的周围也存在着磁场，虽然磁铁棒磁场和载流导体周围磁场的产生不一样，但都认为磁场是由电流产生的。在历史上很长一段时期里，磁学和电学的研究一直彼此独立地发展着。人们曾认为磁与电是两类截然分开的现象，直至19世纪，一系列重要的发现才打破了这个界限，使人们开始认识到电与磁之

间有着不可分割的联系。

一个电子围绕原子核在轨道上旋转，形成一个微小的电流环。由于电流环的存在，就有磁场。而所有物质的原子周围都有电子旋转，所以我们可以想象所有的物质都有磁效应。这种效应对大多数物质是很微弱的，但有一些物质，包括铁、镍、钴等，具有很强的磁效应。电子除沿轨道的运动外，还存在本身的自转，这两种运动都能产生磁效应，而电子自转的效应是主要的。这种电子或电荷的运动相当于一个非常小的电流环，这个小电流环在效果上就是一个微小的磁铁或磁偶极子。显然每一个原子电流环的磁矩都很小，但是一根磁铁棒里的亿万个原子电流环所呈现的总效应就能在磁铁棒的周围形成一个强大的磁场。

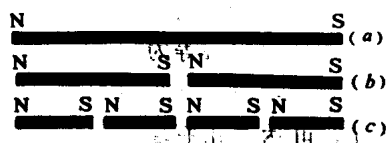


图 1-1 磁极分割点上出现的新磁极

所有磁化物体都有一个北极(N极)和一个南极(S极)，它们不能孤立地存在。例如，图 1-1(a)里，磁铁棒一端为N极，另一端为S极。

如果把它从中间一分为二，则有新磁极出现，如图1-1(b)变成两块磁铁，如果再分一次就得到四块磁铁，如图1-1(c)所示。因而把磁铁棒继续分割下去，每个小块都有一个北极和一个南极。磁极不能孤立存在，而电荷却可以。这是磁场和电场的重要区别之一。

二、相对磁导率和磁性物质

磁导率表示材料被磁化的难易程度，它的符号用 μ 表示，单位为H/m(即 $T \cdot m/A$)。

为了比较各种材料的导磁能力，把任何一种材料的磁导

率与真空磁导率的比值，叫做这种材料的相对磁导率，用 μ_r 表示：

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1-1)$$

式中 μ ——磁导率，H/m；

μ_0 ——真空的磁导率， $4\pi \times 10^{-7}$ H/m。

表1-1列出了常用材料的相对磁导率 μ_r 。铁磁性物质的相对磁导率在比较大的范围内随外磁场变化并和原有磁化情况有关，铁磁性物质的 μ_r 值就是它的最大相对磁导率。

按照物质的磁性质，一般材料可分为抗磁性、顺磁性和铁磁性三类。

(1) 抗磁性物质：置于磁场中，其内部的磁感应强度将减小，相对磁导率 μ_r 略小于1。铜、铅等为抗磁性物质。

(2) 顺磁性物质：置于磁场中，其内部的磁感应强度将增加，相对磁导率 μ_r 略大于1。铝、锰等为顺磁性物质。

(3) 铁磁性物质：置于磁场中，其内部的磁感应强度急剧增加，相对磁导率 $\mu_r \gg 1$ ，可达到几千甚至到几十万。铁、镍、钴及它们与其它金属元素组成的合金为铁磁性物质。

表 1-1 常用材料相对磁导率数值和磁性质分类

材 料 名 称	分 类	相 对 磁 导 率 μ_r
铋	抗磁性物质	0.99983
银	抗磁性物质	0.99998
铅	抗磁性物质	0.999983
铜	抗磁性物质	0.999991
水	抗磁性物质	0.999991
真空	非磁性物质	1(按照定义)
空气	顺磁性物质	1.000004
铝	顺磁性物质	1.00002
钼	顺磁性物质	1.0008

续表

材 料 名 称	分 类	相 对 磁 导 率 μ_r
2-81坡莫合金粉(2Mo, 81Ni)	铁磁性物质	130
钴	铁磁性物质	250
镍	铁磁性物质	600
锰锌铁淦氧 3	铁磁性物质	1 500
软钢 (0.2 C)	铁磁性物质	2 000
铁(0.2杂质)	铁磁性物质	5 000
硅钢 (4Si)	铁磁性物质	7 000
78坡莫合金 (78.5Ni)	铁磁性物质	100 000
纯铁 (0.05杂质)	铁磁性物质	200 000
导磁合金 (5Mo, 79Ni)	铁磁性物质	1 000 000

三、磁学基本物理量

在研究磁特性时，必须对磁学基本物理量的意义和单位作简单叙述。

1. 磁感应强度 B

磁感应强度又称磁通密度，表示磁场内某点性质的基本物理量。其方向与该点的磁感应线方向一致，大小用通过垂直于磁场方向的单位截面积上的磁感应线数目来表示。国际单位制中，磁感应强度单位是特斯拉 (T)。

$$1\text{T} = 1\text{Wb/m}^2$$

2. 磁通量 Φ

磁通量表示在磁场中穿过某一截面积 A 的磁感应线数，即

$$\Phi = \iint_{(s)} B dA \quad (1-2)$$

在均匀磁场中，由于各点 B 的大小与方向相同，如取截面 A 与磁场方向垂直，则

$$\Phi = B \cdot A$$

国际单位制中，磁通量的单位为韦伯 (Wb)。

3. 磁场强度 H

因为磁感应强度 B 与磁场内的介质有关，为了排除磁介质的影响，引入磁场强度矢量 H ，它的大小仅与产生该磁场的电流大小及载流导体的分布形状有关。其数值由安培环路定律决定：

$$\oint_l H dl = \sum I \quad (1-3)$$

式中 H ——磁场强度，A/m；

l ——闭合环路，m。

磁场强度 H 和磁感应强度 B 有如下关系

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_r \mu_0}$$

在国际单位制中，磁场强度的单位为 A/m。

四、磁化和磁化曲线

1. 磁化

通常在未磁化的铁磁性物质中，电子自旋磁矩可以在小范围内“自发地”排列起来，形成约为 10^{-9}m^3 的自发磁化区，此区域称之为磁畴。无外磁化场作用时，磁畴呈无规则的排列，所以在宏观上不显示磁性(如图1-2, a)。

在施加外磁场后，在磁化场力矩作用下，各磁畴在一定程度上沿着磁场方向排列起来(如图1-2, b)，这种过程称为铁磁性物质的磁化。

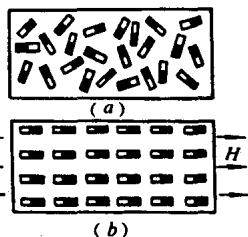


图 1-2 铁磁性物质磁化
(a) 无外磁化场作用的磁畴分布，
(b) 有磁化场作用的
磁畴定向排列

2. 磁化曲线

铁磁性材料的磁化特性通常用磁化曲线(即 $B-H$ 曲线)来表征，它反映了材料磁化程度随外

磁场变化的规律以及铁磁性材料所具有的高磁导率、磁饱和性和磁滞性。

图1-3中 $0ab$ 曲线为起始磁化曲线。在施加外磁场 H 之前，材料是没有磁化过的（或完全退磁的），外磁场 $H = 0$ ， $B = 0$ 。当 H 增大时， B 起先增大得快，然后较慢，到后来变成几乎不增加了，这一状态叫做磁饱和，饱和点 b 处的 B 值叫做饱和磁感应强度 B_m 。

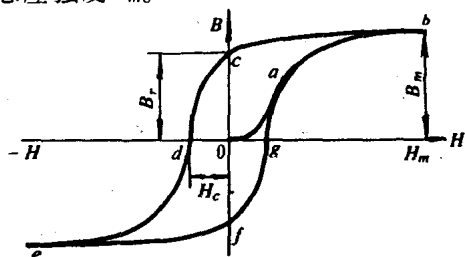


图 1-3 起始磁化曲线和磁滞回线

五、磁滞回线

图1-3中，由 b 点处减小外磁场时，材料中的磁感应强度不沿原来 $ba0$ 下降变化，而沿着 bc 变化。即使外磁场为零，仍剩余一个 oc 的磁感应强度，这个磁感应强度叫做剩磁 B_r 。当反方向增加磁场时，磁感应强度沿 cd 变化，至 H 值为 od 时， B 值为零，这时的磁场强度称为矫顽力 H_c （ H_c 的大小反映了铁磁材料保存剩磁状态的能力）。进一步向反向增大磁场，则沿 de 变化，磁感应强度在负的方向饱和。如果这时沿反方向减小磁场，磁感应强度的曲线就沿 ef 变化。当进一步沿正向增大磁场时，便出现 fgb ，这个封闭的曲线 $bcd efgb$ 不管以后进行多少次反复都不会发生变化。可以看出， B 的变化总是落后于 H 的变化，这种现象称为磁滞，因此该曲线也称作磁滞回线。

钢材的磁化曲线随合金成分，特别是含碳量、加工状态、热处理等不同而有很大的变化。因而为满足饱和所需要的磁场强度也有很大的差异。因此，为了正确地选择磁化电流，需要预先知道被检验钢材的磁化曲线。一些特定钢号、不同热处理状态的磁化曲线可以在专门的资料中查到。

第二节 磁粉检验原理和方法

一、磁粉检验原理

磁粉检验是利用铁磁性材料和缺陷之间的磁导率变化来发现缺陷的。存在缺陷的工件经适当磁化后，处于表面或近表面缺陷周围的磁场部分越出工件表面形成漏磁场。如将高磁导率的磁粉施加至经过磁化的试验工件表面上，它们即被漏磁场所吸附而聚集在缺陷处，从而显示出缺陷的形状和尺寸。图1-4为磁粉检验原理图。

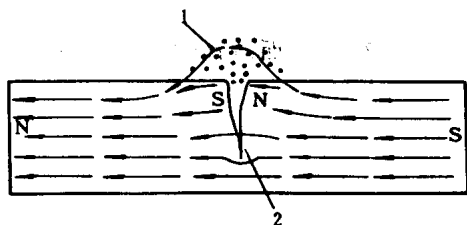


图 1-4 磁粉检验原理图

1—磁粉；2—裂纹

当缺陷走向与磁场方向垂直时，探伤的灵敏度最高。灵敏度正比于缺陷与磁场交角的正弦值，当交角小于 45° 时，探伤灵敏度将显著降低。因而，要完全地检出任何取向的表面缺陷，每次探伤必须使磁感应线相互垂直地通过被检表面的

两个方向。

磁粉检验通常由三个基本步骤组成：

- (1) 在被检工件中建立起一定的磁场；
- (2) 在被检工件表面施加磁粉或磁悬液；
- (3) 观察被检表面聚集的磁痕。

由于磁粉直接显示在工件表面,并形成真实的缺陷图象,因此,应用磁粉法检验时,基本操作正确与否将会影响其探伤效果。任何被检部件都应按照如下基本操作步骤进行：

(1) 预清理和准备。被检查工件的表面应当清洁、干燥。工件表面有油脂、涂料、锈斑及其它异物附着时,不但会妨碍缺陷对磁粉的吸附,而且在使用磁悬液时这些异物会污染检查液,从而影响检验效果。对于装配件,应分解为单个零件进行探伤。因为装配件的形状一般较复杂,难以进行恰当的磁化,退磁也困难。分解后的零件,探伤操作方便,而且能观察到所有的探伤面。检查前,对油孔及其它孔穴等应用软木塞或其它对检验无害物质封堵,防止进入磁粉。被检工件表面的颜色相对于磁粉颜色应有最好的对比度,如用黑磁粉检验暗色表面工件对比度很差时,可在表面喷涂一层很薄的白色反差增强剂。

(2) 磁化。工件的磁化必须按照标准规定进行,或按公认的检验该缺陷的最佳方法进行。我国 JB3965-85《钢制压力容器磁粉探伤》标准和 HB/Z 72-83《航空零件磁粉探伤说明书》都对磁化方法和磁化规范作了具体规定。

(3) 磁粉的使用。即使正确实施和选择了磁化条件,若喷洒磁粉不合格,也会降低检验能力。应根据工件的磁性、形状、尺寸、表面状况、预计的缺陷特征和磁化方法,选定相应的磁粉及分散剂的种类、磁悬液浓度及磁粉的施加