

本教材是国防科技工业部门无损检测人员的公共培训教材(全套教材共 11 本),按照国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证考试大纲编写。内容包括:磁粉检测的基本原理、设备和器材、磁化方法与规范、检测工艺与操作、磁痕分析与工件验收、质量管理、应用实例以及 10 个磁粉检测实验等。

本书主要供生产第一线的工作人员、参加无损检测等级培训的师生、质量管理人员、安全监察人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

磁粉检测/国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训
教材编审委员会编. —北京:机械工业出版社, 2004.3
国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材
ISBN 7-111-14076-1

I. 磁... II. 国... III. 磁粉检验—技术培训—教材
IV. TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 014415 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:吕德齐 武 江
封面设计:鞠 杨 责任印制:洪汉军
三河市宏达印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行
2004 年 6 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·12.75 印张·290 千字
0 001—4 000 册
定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

第1章 绪 论

1.1 磁粉检测的发展简史和现状

1.1.1 磁粉检测的发展简史

磁粉检测是利用磁现象来检测工件中缺陷的，它是漏磁检测方法中最常用的一种。磁现象的发现很早，远在春秋战国时期，我国劳动人民就发现了磁石吸铁现象，并发明了指南针，最早地应用于航海。17世纪以来，一大批科学家对磁力、电流周围存在的磁场、电磁感应规律以及铁磁物质等进行了系统研究。这些伟大的科学家在磁学史上树立了光辉的里程碑，也给磁粉检测的创立奠定了基础。

早在19世纪，人们就已开始从事磁通检漏试验。1868年，英国《工程》杂志首先发表了利用罗盘仪探查磁通以发现枪管上不连续性的报告。8年之后，Hering利用罗盘仪检查钢轨不连续性获得美国专利。

关于磁粉检测的设想是美国人霍克于1922年提出的。他在切削钢件的时候，发现铁末聚集在工件上的裂纹区域。于是，他第一个提出可利用磁铁吸引铁屑这一人所共知的物理现象来进行检测。但是，在1922~1929年的7年间，他的设想并没有付诸实施，其原因是受到当时磁化技术的限制以及缺乏合格的磁粉。

1928年，Forest为解决油井钻杆断裂，研制了周向磁化，使用了尺寸和形状受控的并具有磁性的磁粉，获得了可靠的检测结果。Forest和Doane开办的公司，在1934年演变为生产磁粉检测设备和材料的Magnaflux（磁通公司），对磁粉检测的应用和发展起了很大的推动作用，在此期间，首次用来演示磁粉检测技术的一台实验性的固定式磁粉检测装置问世。

磁粉检测技术早期被用于航空、航海、汽车和铁路部门，用来检测发动机、车轮轴和其它高应力部件的疲劳裂纹。在20世纪30年代，固定式、移动式磁化设备和便携式磁轭相继研制成功，湿法技术也得到应用，退磁问题也得到了解决。

1938年德国发表了《无损检测论文集》，对磁粉检测的基本原理和装置进行了描述。1940年2月美国编写了《磁通检验的原理》教科书，1941年荧光磁粉投入使用。磁粉检测从理论到实践，已初步形成一种无损检测方法。

第二次世界大战后，磁粉检测在各方面都得到迅速的发展。各种不同的磁化方法和专用检测设备不断出现，特别是在航空、航天及钢铁、汽车等行业，不仅用于产品检验，还在预防性的维修工作中得到应用。在20世纪60年代工业竞争时期，磁粉检测向轻便式系统方面进展，并出现磁场强度测量、磁化指示试块（试片）等专用检测器材。由于硅整流器件的进步，磁粉检测设备也得以完善和提高，检验系统也得到开发。随着无损

检测工作的日益被重视,磁粉检测 I、II、III级人员的培训与考核也成为重要工作。1978 年,第一次将可编制程序的元件引入,代替了磁粉检验系统的逻辑继电器。高亮度的荧光磁粉和高强度的紫外线灯问世,极大地改善了磁粉检验的检测条件。如今,湿法卧式磁粉检验系统已发展到使用微机控制,磁粉检验法已包括适配的计算机化的数据采集系统。

值得一提的是,前苏联全苏航空研究院的瑞加德罗,毕生致力于磁粉检测的研究和开发工作,作出了卓越的贡献。50 年代初期,他系统地研究了各种因素对检测灵敏度的影响,在大量试验的基础上,制订了磁化规范,被世界许多国家认可并采用。

解放前,我国仅有几台进口的美国蓄电池式直流检测机,用于航空工件的维修检查。新中国成立后磁粉检测在航空、兵器、汽车等机械工业部门首先得到广泛应用。几十年来,经各国磁粉检测工作者和设备器材制造者的共同努力,使磁粉检测已经发展成为一种成熟的无损检测方法。

1.1.2 磁粉检测的现状

国外很重视磁粉检测设备的开发,因为只有检测设备的进步,才能给磁粉检测带来成功的应用。现在国外磁粉检测设备从固定式、移动式到便携式,从半自动、全自动到专用设备,从单向磁化到多向磁化,设备已系列化和商品化。由于晶闸管等电子元器件和计算机技术用于磁粉检测设备,使设备小型化并实现了电流无级调节,智能化设备大量涌现,这些设备可以预置磁化规范和合理的工艺参数,进行荧光磁粉检测和自动化操作。国外成功地运用电视光电探测器荧光磁粉扫查和激光飞点扫描系统,实现了磁粉检测观察阶段的自动化,将检测到的信息在微机或其它电子装置中进行处理,鉴别可剔除的不连续性,并进行自动标记和分选,提高了检测的灵敏度和可靠性,代表了当代磁粉检测的新成就。

我国近年来磁粉检测设备发展也很快,磁粉检测设备已实现了专业化和系列化,三相全波直流检测超低频退磁设备的性能与国外同类设备的水平相当,交流磁粉探伤机用于剩磁法检验时加装的断电相位控制器保证了剩磁稳定,是我国的特色。断电相位控制器利用了晶闸管技术,可以代替自耦变压器无级调节磁化电流,为我国磁粉检测设备的电子化和小型化奠定了基础。半自动化检测设备的广泛使用,大大提高了检测的速度和质量。智能化设备和光电扫描图像识别的磁粉检测设备已研制成功,荧光磁粉检测电视摄像观察系统已投入生产检验,用电脑处理磁痕显示的试验研究也有了很大进展。

磁粉检测的器材,国内外开发的很多。如与固定式探伤机配合用的 400W 冷光源紫外灯,解决了紫外灯工作时的发热问题。快速断电测量器的开发解决了直流磁化“快速断电效应”的测量问题。标准试片、试块和测量剩磁用的磁强计都形成系列产品配套使用。国内研制的 LPW—3 号磁粉检验载液(无臭味煤油),性能指标高于国外同类产品。照度计和紫外辐射计的性能也不亚于国外同类产品。但国产紫外灯的质量还有待提高,袖珍式磁强计的生产还满足不了市场需要。国内磁粉检测用磁粉,尤其是荧光磁粉,质量尚待进一步提高。

国外有不同规格(包括黑光和白光)的光导纤维内窥镜,能满足工件上孔内壁缺陷

的检测要求,仪器型号和生产厂家一般都纳入有关技术标准中。国内已研制出光导纤维内窥镜,希望提高黑光辐照度后能大力推广应用。

在工艺方法方面,我国兵器行业组织测定了常用的百余个钢种的磁特性曲线,为准确地选择磁化规范提供了很好的依据。航空行业发明的磁粉检测-橡胶铸型法,为定量检测孔内壁早期疲劳裂纹闯出了一条新路,还为记录缺陷磁痕提供了良好的方法,比国外应用的磁橡胶法有无可比拟的优越性。在对缺陷和激励磁场间相互作用所产生的漏磁场分布特性、磁粉在漏磁场中的受力分析等基础问题的研究上,我国学者也取得了较大的进展。

磁粉检测的质量控制,是对影响磁粉检测灵敏度的诸因素逐个地加以控制,国外非常重视,不仅制定了具体控制项目、检验周期和技术要求,并设有质量监督检查,保证贯彻执行。在我国,通过借鉴国外先进经验对磁粉检测质量控制日益受到重视,并能较好地贯彻执行。目前,国内颁布了一系列磁粉检测标准来保证磁粉检测工作的正常进行。但各行业、各单位发展不平衡,有些质量控制项目没有纳入标准,有些虽纳入标准,但流于形式,这种局面急待改变。

随着我国国防实力的逐步提高,对无损检测工作也提出了更高的要求,磁粉检测工作的重要性也日益受到重视,磁粉检测的方法也将日臻完善和拓展。国防科学技术工业无损检测的人员资格鉴定与认证工作的进一步实施,将大大提高无损检测人员素质,提高国防科技工业的检测能力。磁粉检测工作必将出现一个新局面,达到一个新水平,为实现我国国防现代化做出应有的贡献。

1.2 漏磁场检测与磁粉检测

1.2.1 漏磁检测方法的分类

漏磁场检测是无损检测中用得较多的一种形式。它是利用铁磁性材料或工件磁化后,如果在表面和近表面存在材料的不连续性(材料的均质状态或致密性受到破坏),则在不连续性处磁场方向将发生改变,在磁力线离开工件和进入工件表面的地方产生磁极,形成漏磁场。用传感器对这些漏磁场进行检测,就能检查出缺陷的位置和大小。

根据漏磁场检测的方法,漏磁场检测可以分为:

(1) 漏磁场测定法 利用某种传感器件,直接对漏磁场进行检测的方法。

能够检测漏磁场的器件很多,主要有两大类,即检测线圈和磁敏元件。检测线圈是利用电磁感应原理,当线圈接收到漏磁场的变化,线圈中将有感应电流产生。将这种电流进行放大和处理分析,就可以得到材料缺陷状况的信息。磁敏元件(霍尔元件、磁敏二极管等)是一种能将磁信号转换成电信号的磁电转换器件,利用它们可以检查材料表面是否存在由缺陷引起的漏磁场。

(2) 磁性记录法 这是一种利用录磁材料(如磁带)来记录缺陷产生的漏磁信息,然后将这些信息设法再现以供分析处理的检测技术。

(3) 磁粉检测法 用磁粉作为漏磁场的检测介质,利用磁化后工件缺陷处漏磁场吸

引磁粉形成的磁痕显示，从而确定缺陷存在的一种检测方法。

比较上述三种方法，可以看出磁粉法最简单、实用，灵敏度也较高，成本也较低廉，适合于多种场合和不同产品，因而在生产实际中得到广泛应用。但是，磁粉法检测速度低，难于实现自动化，人为影响因素复杂，比不上其它方法容易实现自动控制。利用漏磁和录磁的检测方法，能实现对大批量工件的自动化检测，不仅可以检出缺陷，还能对缺陷的某些特性进行测量。对形状复杂、检测影响因素多的工件，磁粉检测优势较强；但对形状或检测要求单一，并且批量很大的工件，漏磁和录磁检测则具有较强优势。

1.2.2 磁粉检测的特点

磁粉检测 (Magnetic Particle Testing, 缩写符号为 MT)，又称磁粉探伤或磁粉检验，是五种应用较为广泛的常规无损检测方法之一。磁粉检测的对象是铁磁性材料，包括未加工的原材料（如钢坯），加工后的半成品、成品及在役或使用中的零部件。磁粉检测的基础是缺陷处漏磁场与磁粉间的相互作用。在铁磁性工件被磁化后，由于材料不连续性的存在，使工件表面和近表面的磁力线在材料不连续处发生局部畸变而产生漏磁场，吸附施加在工件表面的磁粉，形成了在合适光照下目视可见的磁痕，从而显示出材料不连续性的位置、形状和大小，通过对这些磁痕的观察和分析，就能得出对影响制品使用性能的评价。

钢铁零件采用磁粉检测有以下优点：

1) 可发现裂纹、夹杂、发纹、白点、折叠、冷隔和疏松等缺陷，缺陷显现直观，可以一目了然地观察到它的形状、大小和位置。根据缺陷的形态及加工特点，还可以大致确定缺陷是什么性质（裂纹、非金属夹杂、气孔等）。

2) 对工件表面的细小缺陷也能检查出来，也就是说，具有较高的检测灵敏度。一些缺陷如发纹，宽度很小，用磁粉检测也能发现。但是太宽的缺陷将使检测灵敏度降低，甚至不能吸附磁粉。

3) 只要采用合适的磁化方法，几乎可以检测到工件表面的各个部位。也就是几乎不受工件大小和形状的限制。

4) 与其它检测方法相比较，磁粉检测工艺比较简单，检查速度也较快，相对说来，所需要的检查费用也比较低廉。

磁粉检测的主要缺点是：

1) 只能适用于铁磁性材料，而且只能检查出铁磁工件表面和近表面的缺陷，一般深度不超过 1~2mm（直流电检查时深度可大一些）。对于埋藏较深的缺陷则难于奏效。磁粉检测不能检测奥氏体不锈钢材料和用奥氏体不锈钢焊条焊接的焊缝，也不能检测铜、铝、镁、钛等非磁性材料。马氏体不锈钢和沉淀硬化不锈钢具有磁性，可以进行磁粉检测。

2) 检查缺陷时的灵敏度与磁化方向有很大关系。如果缺陷方向与磁化方向平行，或与工件表面夹角小于 20° 的缺陷就难于显现。另外，表面浅的划伤、埋藏较深的孔洞及锻造皱折等，也不容易被检查出来。

3) 如果工件表面有覆盖层、漆层、喷丸层等，将对磁粉检测灵敏度起不良影响。覆

盖层越厚, 这种影响越大。

4) 由于磁化工件绝大多数是用电流产生的磁场来进行的, 因此, 大的工件往往要用较大的电流。而且, 磁化后一些具有较大剩磁的工件还要进行退磁。

*1.2.3 漏磁的其它检测方法

(1) 漏磁场检测元件 用来检测漏磁场的元件种类很多, 主要有感应线圈、磁敏元件(霍尔元件和磁敏二极管等)和磁带。它们主要特点是:

磁带: 漏磁场可直接记录在磁带上, 然后再转换成电信号进行处理。

感应线圈: 输出取决于线圈的匝数、被检材料的相对速度。

磁敏检测元件: 直接将漏磁场转换成电信号。有霍尔元件和磁敏二极管等。其中, 霍尔元件中传感元件的尺寸(有效感磁面积)与感磁灵敏度是重要参数; 磁敏二极管的灵敏度比霍尔元件高, 但温度特性不如霍尔元件。霍尔元件目前已作成集成电路, 在钢丝绳漏磁检测中应用。

(2) 漏磁检测法 漏磁法利用磁敏元件做成的探头检测工件表面的漏磁。所测得的漏磁信号的大小与缺陷之间有明显的关系, 而缺陷宽度对漏磁信号的振幅影响较小。漏磁检测法主要适用于对称及旋转的工件, 例如轴类、管材、棒材等, 因此易于实现自动化。

图1-1是用磁轭法检查管子表面裂纹的一种探头形式。在这种方法中, 磁轭探头不动, 管子在旋转的同时作纵向运送。

用于探头的磁敏元件可用磁敏二极管或霍尔元件, 也可以采用其它弱磁场测量装置。

(3) 录磁检测法 录磁检测法是用磁带记录漏磁场方法来进行检测的, 又称磁录像法。它是将具有很高矫顽力和剩磁的磁带紧贴在被检工件表面上, 对工件进行适当磁化, 则在不连续性处产生的漏磁场信息就全部记录在磁带上, 然后通过磁电转换器(又称磁

头)将录制的漏磁场信息再转换成电信号, 显示在荧光屏上, 或使用自动记录器获得材料不连续性漏磁场的完整曲线或图像, 从而确定不连续性的部位、性质和大小。磁带在记录漏磁场与复放磁带时, 有较高的灵敏度和良好的再现性。检测结果也可长期保存。

录磁检测常用于如钢坯、方钢、平板或平板焊缝的漏磁场检测, 可检测极微弱的漏磁信息。它不仅可以记录工件表面缺陷的散射磁场, 还可以记录埋藏在工件近表面的内部缺陷的散射磁场。磁带记录的信息可以长期保存。录磁法对被检工件的表面粗糙度要求不严, 适应性强。

进行录磁法的条件是, 必须在直流或脉动电流励磁的磁场下进行, 励磁应使工件达到磁饱和。为了分析磁场分布信息, 应当采用电子技术对所获得的信息进行处理。

目前, 录磁检测技术应用逐步扩大, 例如检测石油管道焊缝、化工容器与管道、电站承压管道等。国外已将录磁检测技术成功地应用于轧钢生产线及潜艇焊缝的检查。

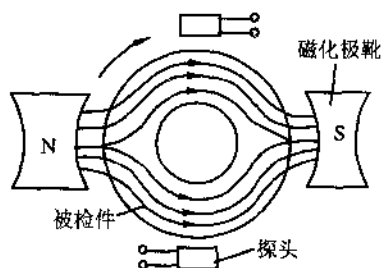


图1-1 管子旋转漏磁检查

1.3 表面无损检测方法的比较

磁粉检测、渗透检测和涡流检测都属于表面无损检测方法，但其方法原理和适用范围区别很大，有各自的优点和局限性，在使用时互相补充。应该很好掌握各种检测方法，并能根据工件材料、状态和检测要求，选择合理的方法进行检测。对于钢铁材料制成的工件，磁粉检测不管是在灵敏度还是在检测方法及检测成本上都占有相当的优势，只有在因材料或工件形状等原因不能采用磁粉检测时，方使用渗透检测或涡流检测。

表 1-1 列出了三种检测方法各自的特点。

表 1-1 表面无损检测方法的比较

	磁粉检测 (MT)	渗透检测 (PT)	涡流检测 (ET)
方法原理	缺陷漏磁场吸附磁粉	毛细渗透作用	电磁感应作用
能检出的缺陷	表面及近表面缺陷	表面开口缺陷	表面及近表面缺陷
缺陷表现形式	磁粉附着在缺陷附近形成磁痕	渗透液渗出形成缺陷显示	检测线圈电压和相位发生变化
显示材料	磁粉	渗透液和显像剂	记录仪、电压表和示波器
适用材质	铁磁性材料	非松孔性材料	导电材料
主要检验对象	锻钢件、铸钢件、压延件、焊缝、管材、棒材、机加工件及使用中的钢件	任何非多孔材料制成的零部件及组合件，以及使用过的上述零部件	管材、线材、棒材等及零件可检查缺陷，材料分选及厚度测量等
主要检测缺陷	裂纹、发纹、白点、折叠、夹杂物、冷隔等	裂纹、疏松、针孔	裂纹、材质变化、厚度变化
缺陷显示	直观	直观	不直观
检测速度	快	较慢	最快
应用	探伤	探伤	探伤、材质分选、测厚
污染	轻	较重	最轻
灵敏度	高	高	较低

复 习 题

- *1. 检测漏磁场通常有哪些方法?主要区别是什么?
- 2. 磁粉检测有哪些主要特点?其适用范围是什么?
- 3. 对比磁粉检测与渗透检测的优点与局限性。

第2章 磁粉检测的物理基础

2.1 磁现象和磁场

2.1.1 基本磁现象

磁铁具有吸引铁屑等磁性物体的性质叫做磁性。凡能够吸引其它铁磁性材料的物体叫做磁体，磁体是能够建立或有能力建立外加磁场的物体。有永磁体、电磁体及超导磁体等种类。

将一根条形磁铁放在铁粉堆里再取出来，可以看到靠近它的两端的地方吸引铁粉最多，其它地方很少或没有。磁铁上这种磁性最强的区域称为磁极。见图 2-1。

磁极具有方向性。将一根能绕轴旋转的条形小磁铁放在空间，它的两个磁极将指向地球的南北方向。指北的一端叫北极，用 N 表示；指南的一端叫南极，用 S 表示。小磁铁指向地球南北的原因，是地球本身就具有磁性，它是一个大磁体。

每个磁体上的磁极总是成对出现的，在自然界中没有单独的 N 极或 S 极存在。如果把条形磁铁分成几个部分，每一部分仍有相应的 S 极和 N 极，如图 2-2 所示。即使把磁铁捣成粉末，S 极和 N 极仍在每个颗粒上成对出现。

磁铁之间所具有的相互作用力叫磁力。极性相同的磁极（S 极和 S 极、N 极和 N 极）互相排斥；极性相反的磁极（S 极和 N 极）彼此间互相吸引。磁力的大小和方向是可以测定的。同一个磁体的两个磁极磁力大小相等，但方向相反。

把一个磁体靠近原来不具有磁性的铁磁性物体，该物体不仅被磁体吸引，而且自己也具有了吸引其它铁磁性物质的性质，即有了磁性。这种使原来不具有磁性的物体得到磁性的过程叫做磁化。铁、钴、镍及其大多数合金磁化现象特别显著。一些物体在磁化的磁体撤离后仍保持有相当的磁性，这种磁性叫剩磁。具有剩磁的磁体也就成为一个新的磁体。

不仅磁铁具有磁性，而且电流也可以对铁及其合金产生吸引和磁化。就是说电流也同样具有磁性。

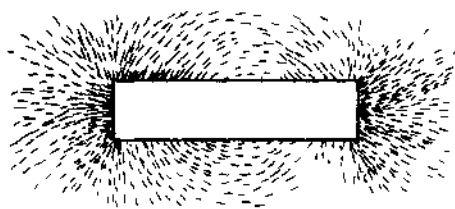


图2-1 条形磁铁吸引磁粉

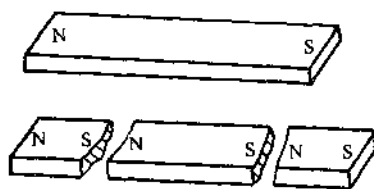


图2-2 折断后的磁铁棒所形成的磁极

2.1.2 磁场

磁体间的相互作用是通过磁场来实现的。所谓磁场，是具有磁力作用的空间。它是物质存在的基本属性之一，具有力和能量。磁场存在于被磁化物体或通电导体的内部和周围空间。

磁力是有大小和方向的。即磁场也有大小和方向。两个磁体间的作用力可以用磁性定律来描述：两个磁极间的磁力与两个磁极强度的乘积成正比，而与它们之间的距离的平方成反比。磁力为斥力还是吸力取决于两个磁极的极性。

为了形象地表示磁场的强弱、方向和分布的情况，可以在磁场内画出若干条假想的连续曲线。这些曲线不会中断，它以连续回路的方式，自行穿过某个行程。曲线的疏密程度表示了磁场的强弱，曲线上任一点的切线方向都表示该点的磁场方向。这些假想的曲线叫做磁力线。

图 2-3 表示了条形磁铁的磁力线。

从图中可以看出，在条形磁铁两极处磁力线紧密相聚，而在远离磁极的中间部位则较稀疏。这说明两极的磁性很强，离磁极较远的地方则较弱。

将一根条形磁铁棒作成 U 形（马蹄形），磁极仍然存在，但磁场和磁力线比条形磁铁更集中，磁性更强。如果

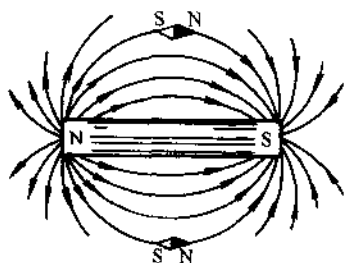


图2-3 条形磁铁的磁力线

磁铁棒做成一个没有间隙的封闭铁环，磁场就全部地包含在铁环之中，如图 2-4 所示。

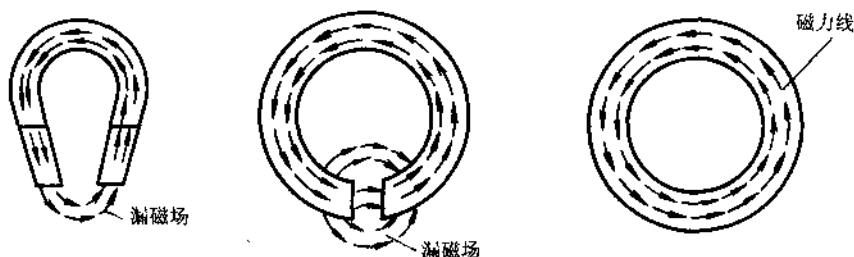


图2-4 U形磁铁形状变化时的磁场

全部磁力线构成了磁场。磁力线所通过的闭合路径叫磁路。磁力线具有以下特性：

- 1) 具有方向性。在磁场中磁力线的每一点只能有一个确定的方向。人为规定，磁铁外部是由 N 极到 S 极。可以用小磁针对磁场方向进行测定。
- 2) 磁力线贯穿于整个磁体，但彼此互不相交。
- 3) 异性磁极的磁力线容易沿着磁阻最小的路径通过，其密度随着距两极的距离增大而减小。
- 4) 同性磁极的磁力线有互相向侧面排挤的倾向。

2.1.3 磁场中的几个基本物理量

1. 磁感应强度与磁通量

磁通量就是磁感应通量。为了使磁力线能定量地表示物质中的磁场，人们规定，通

过磁场中某一曲面的磁力线数叫做通过此曲面的磁通量,简称磁通。用符号 Φ 表示。同样,为了描述磁场中某点磁场的方向和强弱程度,人们采用了磁感应强度的概念。磁感应强度用符号 B 表示,意义为磁化物质中与磁力线方向垂直(法向)的单位面积上的磁力线数目。通过磁场中某一微小面积 ΔS 的磁通量,等于该处磁感应强度 B 在垂直于面积 ΔS 的方向上的法向分量 B_n 和曲面面积 ΔS 的乘积,即

$$\Phi = B_n \Delta S = B \cos \alpha \cdot \Delta S \quad (2-1)$$

式中, α 是磁感应强度方向与面积 ΔS 的法向之间的夹角。

对于非均匀磁场中任意曲面 S 的磁通量,必须利用积分表达式

$$\Phi = \int_S B \cdot ds \quad (2-2)$$

只有在均匀磁场中当磁感应强度方向垂直于截面 S 时,通过该截面 S 的磁通量才能简单地表示成

$$\Phi = B \cdot S \quad (2-3)$$

在国际单位制(SI)中,磁通量的单位是韦伯(Wb),而高斯单位制(CGS)中则是麦克斯韦(Mx)。通常把1Mx叫作1根磁力线。Wb和Mx之间的关系是

$$1\text{Wb} = 10^8 \text{Mx}$$

磁感应强度 B 是一个矢量,即具有方向和大小。由于磁感应强度是磁化物质单位面积上的磁通量,所以又叫做磁通密度。

不同物质在磁场中磁化的情况是不一样的,所得到的磁感应强度也不相同。在采用磁力线来描述物质中的磁场时,其磁力线称为磁感应线。由于铁磁性物质中的磁感应强度较高,为了区别于其它物质,通常将铁磁性物质中的磁力线叫做磁感应线。

*在物理学中,磁感应强度 B 采用的是另一种定义方法,即磁场中某一点磁感应强度的大小,等于放在该点与磁场方向垂直的通电导线所受的磁场力,跟该导线中的电流强度和导线长度的乘积之比,为

$$B = \frac{F}{IL} \quad (2-4)$$

其方向规定为放在该点的检验小磁针N极所指的方向。两种定义方法的本质是一样的。

在国际单位制中,磁感应强度的单位为特斯拉(T)。

1特斯拉(T)=1牛·安培/米(N/A·m)=1韦伯/米²(Wb/m²)。

在高斯单位制中,磁感应强度单位为高斯(G)。T与Gs之间的关系为

$$1\text{T} = 10^4 \text{Gs}$$

2. 磁场强度

不同物质在磁场中的 B 值是不一样的,即它们的磁性有所不同,为了反映不同物质在磁场中的变化,人们引用了磁场强度的概念。同磁感应强度一样,磁场强度也是一个

用来描述磁场的物理量。磁场强度用 H 表示，它是由导体中的电流或永磁体产生的，有大小和方向。它与磁感应强度的区别在于，它不考虑磁场中物质对磁场的影响，与磁化物质的特性无关。

磁场强度 H 和磁感应强度 B 都是描述磁场的重要物理量。

磁场强度 H 的单位是用稳定电流在空间产生磁场的大小来规定的，国际单位制中磁场强度的单位为安/米 (A/m)。它的意义为：一根载有直流电流 I 的无限长直导线，在离导线轴线为 r 的地方所产生的磁场强度为

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2-5)$$

如取 $I=1\text{A}$ ，则在离导线距离为 $r=1/2\pi$ 处所得的磁场强度就是单位磁场强度，称为 1A/m 。

在高斯单位制中磁场强度单位是奥斯特，符号为 Oe。两种单位制间的换算为

$$1\text{Oe} = (10^3/4\pi) \text{A/m} = 79.577\text{A/m} \approx 80\text{A/m}.$$

3. 磁导率

不同物质在相同磁场中的磁感应强度 B 值是不一样的。为了反映这种变化，引入磁导率的概念。磁导率又叫导磁系数，它表示了材料磁化的难易程度，用符号 μ 表示。磁导率是物质磁化时磁感应强度与磁场强度的比值，反映了物质被磁化的能力。用公式表达为

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2-6)$$

磁导率的单位为亨/米 (H/m)。真空中的磁导率用 μ_0 表示，它是一个不变的恒量， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米 (H/m)。

一般将 B 与 H 的比值 μ 称为绝对磁导率。有

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2-7)$$

μ_r 叫相对磁导率，它是一个纯数。在高斯单位制中，因为真空中的 μ_r 等于 1，所以 B 和 H 值是相同的。

由于空气中的 μ 值接近于 μ_0 ，在磁粉检测中，通常将空气中的磁场值看成是真空中的磁场值，其 μ_r 也等于 1。其它物质的磁导率与真空磁导率比较的值为相对磁导率，也是一个纯数。

在磁粉探伤中，还经常用到材料磁导率、最大磁导率、有效磁导率等概念。它们的意义是：

材料磁导率：在磁路完全处于材料内部情况下所测得的 B/H 值，常用于周向磁化。

最大磁导率：由于铁磁材料的磁导率是随外加磁场变化的量，从变化曲线中所获得的磁导率最大值叫做最大磁导率，用 μ_m 表示。通常出现在磁化曲线拐点附近，可以通过查磁特性曲线手册或对材料进行磁测量获得。

有效磁导率：又叫表观磁导率，它是指磁化时零件上的磁感应强度与外加磁化磁场强度的比值。它不完全由材料的性质所决定。在很大程度上与零件形状有关，对零件在

线圈中纵向磁化极为重要。

*4. 磁极化强度 J

为了衡量物质的磁化程度,采用了磁极化强度 J 这个物理量。物质的磁化程度愈高,磁极化强度愈大。

通常,我们把尺寸小到原子的小磁体称为磁偶极子,并把它们等效为环绕回路流动的电荷,诸如电子绕原子核的运动、电子自旋以及旋转的带正电的原子核都是磁偶极子。

我们知道,磁针及条形磁体在外加磁场中都会受到一力矩的作用,该力矩总是力图使磁针或条形磁体转动到沿外加磁场方向排列。观测结果表明,在同样的磁场中,不同的磁体所受的力矩是不同的,其大小不仅和磁场有关,而且还与材料本身的磁化状态有关;对于同一磁针或条形磁体则可发现,当其轴线和外加磁场方向垂直时,它所受的力矩将为最大力矩。

为了充分反映磁偶极子的固有特性,人们用真空中每单位外加磁场作用在磁偶极子上的最大力矩来度量它的磁偶极矩。单位体积材料内磁偶极矩的矢量和称为磁极化强度 J ,单位与磁感应强度相同,为特斯拉(T)。

磁极化强度与磁感应强度的关系为

$$B = \mu_0 H + J \quad (2-8)$$

磁极化强度反映了物质磁化的程度。物质的磁化程度越高,磁极化强度就越大。其物理意义为:由于被磁化的铁磁材料内部存在磁畴,如果磁场中的磁极化强度矢量大小和方向都相同,则该磁化是均匀磁化,否则是非均匀磁化。

2.2 磁场中的物质

2.2.1 磁介质

如果在磁场中放入一种物质,可以发现,这种物质将产生一个附加磁场,使物质所占空间原来的磁场发生变化,即磁场将增加或减少。这种能影响磁场的物质叫做磁介质。

设原来的磁场强度为 H_0 ,磁感应强度为 B_0 ,磁介质经磁化后得到的附加磁场为 B' ,总磁场的磁感应强度 B 则为

$$B = B_0 + B' \quad (2-9)$$

实验证明,磁介质产生的附加磁场 B' 可以与原磁场 B_0 的方向相同,也可以相反。与原磁场相同方向的磁介质叫顺磁物质,如铝(Al)、钨(W)、钠(Na)、以及氯化铜(CuCl_2)等都是顺磁物质。与原磁场方向相反的叫抗磁物质(逆磁物质),如汞(Hg)、金(Au)、铋(Bi)、氯化钠(NaCl)以及石英等都是抗磁物质。顺磁物质和抗磁物质在外磁场 B_0 中所引起的附加磁场 B' 是很小的,接近于原磁场,对外基本上不显示磁性,故把它们统称为非磁质。但另外有一类物质所引起的附加磁场 B' ,却比原来的磁场 B_0 大得很多,是原来磁场 B_0 的几百倍到数千倍,如铁(Fe)、钴(Co)、镍(Ni)、钆(Gd)及其大多数合金。这一类物质叫做铁磁性物质,简称铁磁质。通常称它们为强磁质或磁性材料。

非磁质在磁化时的磁导率与真空中的磁导率接近,其 μ_r 近似为 1。

2.2.2 铁磁质及其磁化原因

铁磁质是一种强磁物质。它与非磁质有很大的区别,即 $\mu_r \gg 1$ 。对于铁磁质,不太大的外加磁场就可以使它强烈磁化以至饱和。也就是说铁磁质产生的附加磁场 B' 远大于原来的磁化磁场。

为什么铁磁质能被强烈地磁化呢?这与它的物质结构有关。铁磁质元素(铁、镍、钴)是过渡族的金属元素,原子中有着较强的电子自旋磁矩。这些磁矩能在一个小的区域内(约 10^{-15}m)相互作用,取得一致的排列方向,形成一种自发磁化的小区域——磁畴。磁畴的开路端,具有极性,其排列通常平行于材料结晶的轴线。磁畴是铁磁物质特有的。磁畴的大小约在 $1\mu\text{m}\sim 0.1\text{mm}$ 之间,一个磁畴中包含有 $10^7\sim 10^{17}$ 个原子。各个磁畴的小区域因大小不等,它们的磁矩也就不同,但磁极化强度却都相等。这一磁极化强度叫做自发磁极化强度。在未受到外磁场作用时,由于各个磁畴的磁矩取向混乱,互相作用抵消,它们的矢量和为零,因而在整体上并不呈现磁性。当外磁场作用于铁磁物质时,磁畴的取向或自旋排列将平行于外加磁场,物质内的磁畴迅速改变成与外磁场一致的方向,显示出较强的磁性。这种在外磁场作用下磁畴改变方向的过程,就是铁磁质被磁化的过程,如图2-5所示。磁化时,磁场力克服阻力做功。通过磁畴壁的位移和磁矩的转动,使各个不同方向的磁畴改变到与外磁场方向接近的方向上来并形成强大的内磁场,强大的内磁场大大的增强了外磁场,使铁磁质对外具有很大的磁性。若克服阻力所需的能量较小,则磁化过程易于实现;反之则难于磁化。

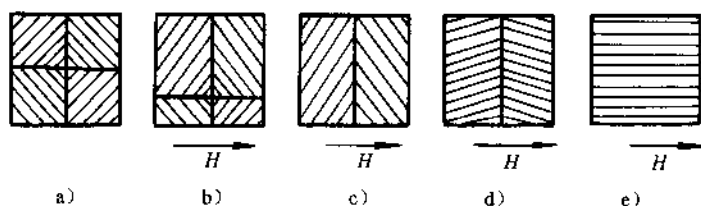


图2-5 磁化过程中的磁畴方向的变化

随着温度的升高,铁磁质内的磁性将逐步降低,即磁化强度数值将会减小。在达到某一个临界温度时,铁磁性将完全消失而呈现出顺磁性。这种铁磁性随温度升高而降低的原因是由于物质内部的热扰动破坏了原子磁矩的平行排列。到达一定程度时,磁畴将完全消失而呈现出顺磁性。这个使磁性完全消失的临界温度叫做该铁磁物质的居里点。不同铁磁物质的居里点不相同,工程纯铁的居里点为 770°C ,热轧硅钢的居里温度为 690°C ,而碳化三铁(Fe_3C)的居里温度只有 210°C ,一般铁合金的居里温度约在 $650\sim 870^{\circ}\text{C}$ 之间。

2.3 钢铁材料的磁化

2.3.1 钢铁材料的磁特性曲线

1. 钢铁材料的磁化

磁粉检测的主要对象是钢铁,它是强磁性物质,众多的钢铁材料是铁磁材料的一部

分。当把没有磁性的铁磁材料及其制品直接通电或置于外加磁场 H 中时, 其磁感应强度 B 将明显地增大, 产生比原来磁化场大得多 ($10 \sim 10^5$ 倍) 的磁场, 对外显示出磁性。可通过实验来测定 H 和 B 的关系。实验中 H 和 B 都从零开始, 逐渐增大磁场 H 的数值并进行测定, 就能得到一组组对应的 B 和 H 值。从而画出 B 与 H 的关系曲线。这种反映铁磁材料磁感应强度 B 随磁场强度 H 变化规律的曲线, 叫做材料的磁化曲线, 又叫做 $B-H$ 曲线。它反映了铁磁质的磁化程度随外磁场变化的规律。铁磁质的磁化曲线是非线性的, 各类铁磁质的磁化曲线都具有类似的形状, 如图 2-6 所示。

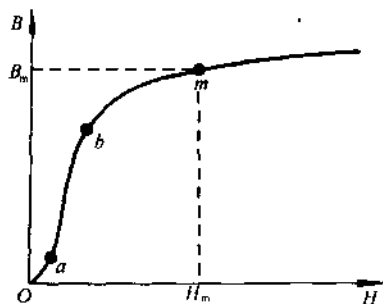


图2-6 铁磁材料的磁化曲线

从曲线中可以看出, 铁磁材料磁化过程可分成四个部分。即初始磁化阶段、急剧磁化阶段、近饱和磁化阶段和饱和磁化阶段。在初始阶段 (oa 段), H 增加时 B 增加得较慢, 说明此时磁化缓慢, 磁化很不充分; 第二阶段 (ab 段), H 增加时 B 增加得很快, 材料得到急剧磁化; 第三阶段 (bm 段), H 增加时 B 的增加又缓慢下来, 产生了一个转折, b 点常称为膝点; 过了 m 点以后, H 增加时 B 几乎不再增加, 这时铁磁质的磁化已经达到饱和, m 点的磁感应强度称饱和磁感应强度 B_m , 相应的磁场强度为 H_m 。

曲线的斜率 $\mu = B/H$ 是材料的磁导率。四个阶段的斜率数值都不一样: 初始阶段变化较缓; 急剧磁化阶段上升很快, 在达到最大点后开始下降; 近饱和阶段曲线从较快下降到缓慢下降; 在饱和磁化阶段磁导率数值则基本不再发生大的改变。这些变化反映材料在磁化过程中的不一致。可以看出, μ 是一个随磁场强度 H 变化的量。图 2-7 表示了磁导率随磁场强度的变化关系。

从图中可以看出, 磁导率曲线上有一最大值点, 该点叫做最大磁导率, 用 μ_m 表示。从坐标原点作一直线与磁化曲线相切, 则此切点处具有最大磁导率。

由于磁导率 μ 和相对磁导率 μ_r 之间只差了一个定值 μ_0 且为无量纲的纯数, 实际应用中通常用 μ_r 代替 μ 进行计算。

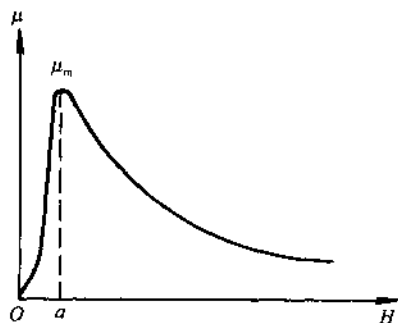


图2-7 铁磁材料的磁导率曲线

2. 磁滞回线

磁滞是铁磁质的另一重要性质。前面讨论的磁化曲线是铁磁质在初始时 H 由零逐渐增加的情况下得到的。如果从磁化曲线上饱和点 m 开始减小 H 值, 这时的 $B-H$ 关系并非按原曲线 mO 退回, 而是沿着在它上面的另一曲线 mr 变化, 如图 2-8 所示。当 $H=0$ 时, B 并不为零, 而等于 B_r (图中 Or 段)。即铁磁质仍保留一定的磁性。 B_r 称为剩磁感应强度, 简称剩磁。这说明当铁磁质被磁化后再去除外磁场时, 内部磁畴不会完全恢复到原来未被磁化前的状态。要消除剩磁, 必须外加反向磁场, 当反向外磁场 $H=H_c$ 时, $B=0$ 。 H_c 称为矫顽力。从剩磁状态到完全退磁状态的一段曲线 rc 称为退剩磁曲线 (简称退磁曲线), 继续再增大反向磁场, 则铁磁质反向磁化, 同样达到饱和点 m' , 如这时不

断减小反向磁场到 H 为正值并增加至 H_m , 则曲线将沿 $m'r'c'm$ 变动, 完成一个循环。由此可见, B 的变化总是滞后于 H 的变化, 这种现象称为磁滞现象, 又称磁滞。铁磁质在交变磁场内反复磁化的过程中, 其磁化曲线是一个具有方向性的闭合曲线, 称磁滞回线, 图 2-8 是铁磁材料的磁滞回线。

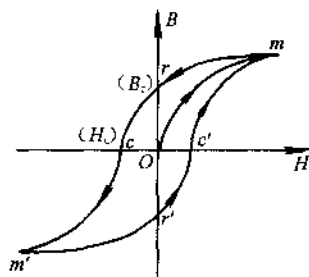


图2-8 磁滞回线

在磁化曲线上任取一点 P , 将其所对应的磁场强度变化一周, 可以得到一个相应的磁滞回线。可以作出若干个这样的回线。把经过若干个不同大小的磁滞回线的顶点连成曲线, 这曲线称基本磁化曲线。随着 P 点的升高, 所对应的磁场强度也增加, 磁滞回线的面积也随着增加。当 P 点在磁饱和状态时, 所对应的磁滞回线面积最大, 叫做极限磁滞回线, 也叫做主磁滞回线或最大磁滞回线。如图 2-9 所示。

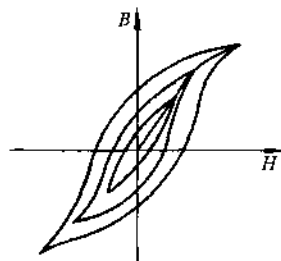


图2-9 反复磁化的磁滞回线

磁滞回线所包围的面积与该材料在单位体积内的铁磁质循环磁化一次所消耗的功(或能量)成正比。不同的铁磁材料的极限磁滞回线包围的面积不同。磁滞回线比较狭窄的材料磁性较软, 所包围的面积较小, 磁化时消耗的功也较少, 比较容易磁化; 而磁滞回线形状比较“肥大”的材料磁性较硬, 所包围的面积也比较大。在磁化时消耗的功较多, 磁化也比较困难。图 2-10 表示了不同材料的磁滞回线的形态。

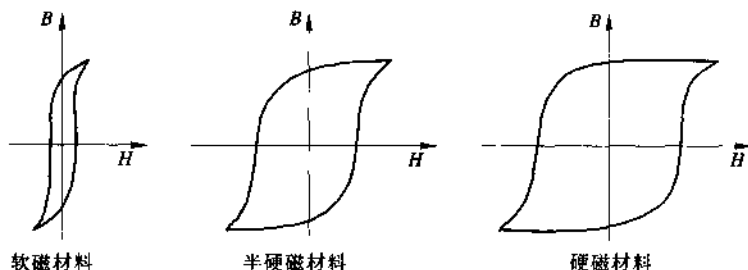


图2-10 不同材料磁滞回线的比较

剩磁感应强度 B_r 的单位与磁感应强度相同, 在 SI 制中都是特斯拉(T)。矫顽力 H_c 的单位与磁场强度相同, 在 SI 制中为安/米(A/m)。

矫顽力的大小常用来区别磁性的软硬。一般 H_c 小于 10^2 安/米的叫软磁材料, 而 H_c 大于 10^4 安/米的叫硬磁(永磁)材料。钢铁材料矫顽力大多在这两者之间, 多数为半硬磁材料。

*3. 退磁曲线和磁能积

退磁曲线是指最大磁滞回线在第二象限中的部分, 即 H_c 至 B_r 之间的曲线段。如图 2-11 所示。

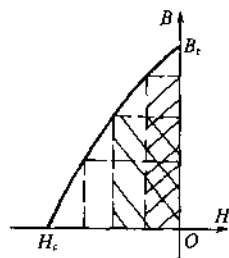


图2-11 退磁曲线和磁能积

在退磁曲线上任一点所对应的 B 与 H 的乘积, 是标志磁性材料在该点上单位体积内所具有的能量。因为乘积 (BH) 的量纲是磁能密度, 所以叫 (BH) 为磁能积。(BH) 的乘积正比于图中划斜线的矩形面积。可以在退磁曲线上找到一点 P 其所对应的 B 与 H 的乘积为最大值, 这点叫做最大磁能积点, 其值 $(BH)_m$ 叫做最大磁能积。磁能积是 B_r 和 H_c 的综合参数, 它表明工件在磁化后所能保留磁能量的大小, 亦即剩磁的大小。磁能积的数值越大, 表明保留在工件中的磁能越多。这在磁粉检测中是很有意义的。最大磁能积可采用等磁能曲线法或几何作图法来确定。

几何作图法: 在退磁曲线图上, 分别以 H_c 和 B_r 点作 H 和 B 轴的垂线, 两线交于 Q 点, 连结 OQ , 退磁曲线与 OQ 相交的点即为最大磁能积点 P 。如图 2-12 所示。

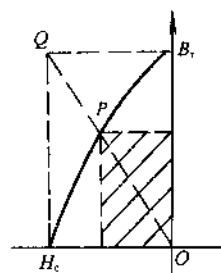


图2-12 最大磁能积点的确定

2.3.2 铁磁材料的磁性分类

铁磁性材料品种繁多, 磁性各异。按照材料的磁性, 大致可分成硬磁材料、软磁材料和介于二者之间的常用钢铁材料。

(1) 硬磁材料 硬磁材料的特点是磁滞回线较宽, 具有较大的矫顽力 ($H_c > 10^4 \text{ A/m}$) 和磁能积, 剩磁也较大, 磁滞现象比较显著, 若将硬磁材料放在外加磁场中充磁后取出, 它能保留较强的磁性, 而且不易消除。因此常用它制造永久磁铁。最早的硬磁材料为淬火后的高碳钢, 或加有钨、铬等元素的碳钢。另外钴钢、铝镍钴、稀土钴、钕铁硼等都是很好的永磁性材料。

(2) 软磁材料 软磁材料的磁滞回线狭窄, 具有较小的矫顽力 ($H_c < 10^2 \text{ A/m}$), 磁导率高, 剩磁也较小, 故其磁滞现象不很显著, 磁滞损耗也低。常用的软磁材料有电工纯铁、铁硅合金 (硅钢)、铁镍合金 (坡莫合金) 和软磁铁氧体等。

(3) 常用钢铁材料 工业上常用的钢铁材料范围很广, 它们的磁性差别很大, 有的接近于硬磁材料, 而有的又相似于软磁材料。然而更多的是介于软硬磁材料之间, 亦即半硬磁状态。根据工业上常用钢材的成分状态所引起的磁特性参数变化的规律, 大致可分为四类:

第一类, 磁性较软。它们包括供货状态下含碳 (质量分数) 低于 0.4% 的碳素钢, 含碳低于 0.3% 的低合金钢, 以及退火状态下的高碳钢 (组织为球状珠光体)。这类钢磁导率高, 矫顽力低, 剩磁较小, 容易被磁化, 剩磁也不大。

第二类, 磁性中软。它们包括供货和正火状态下含碳量大于 0.4% 的碳素钢及同种状态下的低中合金钢、工具钢及部分高合金钢 (硬度值较低者), 同时还包括此类钢在淬火后进行 450°C 以上回火温度者。这类钢较第一类磁导率有所下降, 矫顽力有所提高, 磁性有所降低。但总的还是容易被磁化, 剩磁也不大。

第三类, 磁性中硬。此类材料包括淬火后进行 $300\sim 400^\circ\text{C}$ 回火的中碳钢、低中合

金钢、高合金工具钢的供货状态，半马氏体和马氏体钢的正火和正火加高温回火状态，以及大部分冷拉材料。它们的磁性较前两类为“硬”，磁化有所困难，剩磁也较高。

第四类，磁性较硬。包括合金钢淬火后回火温度低于 300℃ 的材料，以及工具钢和马氏体不锈钢热处理后硬度较大的材料。这类钢由于磁性较硬，磁化困难，需要较大的外加磁场进行磁化。同时，此类材料剩磁也较大，退磁比较困难。

值得说明的是，以上较软、中软、中硬及较硬磁性等提法是为了区别于常见的软磁和硬磁材料而言的，它们之间没有一个明显的量的差别。在磁粉检测中，应该根据材料各自的磁性以及检测要求来选取磁化的最佳技术条件。

2.3.3 影响钢铁材料磁性的因素

磁粉检测的基本对象是钢铁。钢铁材料的基体是铁，因而大部分能够被磁化。它们的磁性并不都是一样的：有的磁性很强，容易被磁化；有的磁性较弱，需要较大的磁化力才能使其得到磁化；甚至也有不具备磁性的钢（如 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢），它们在磁场中根本得不到磁化。不同钢的磁性差别主要受到钢铁的化学成分含量、材料组织结构差异等的影响。

1. 钢铁的化学成分及杂质含量的影响

钢分为碳素钢和合金钢两大类。在碳素钢中，影响磁特性最大的是碳的含量。一般地说，随着含碳量的增加，钢的磁性将“硬化”。合金钢中的合金组元也与碳相似，随着合金元素种类和含量的增加，磁化曲线斜率下降，初始磁导率和最大磁导率减小，矫顽力增大，最大磁能积也有增大的趋势，磁滞回线也逐渐变得“肥大”。但合金组元对钢的磁性影响也各不相同，一些常用的合金元素如 Si、Mn、Cr、Ni、Mo 的加入影响了钢的磁性并干涉碳与磁性能之间的关系，使材料磁性变“硬”。但 Si 在作为专用的组元加入时，也可能使磁性变“软”（如硅钢）。另外，钢中的杂质元素 S、P 等的失常也将使磁性变“硬”。

图 2-13 表示了几种碳钢在退火状态下的磁化情况。

2. 钢材组织结构的影响

（1）晶体结构与大小的影响 钢是一种合金。它的晶体结构与铁的晶体结构有关。从晶体结构来说，面心立方的 γ 铁是非磁性体，不能被磁化；体心立方的 α 铁是铁磁体，可以被磁化。但 α 铁具有不同状态，也就具有不同的磁性。在晶格处于平衡状态时，磁性表现为软磁性，即高磁导率，高磁化强度及低矫顽力。随着晶格内碳原子数的增加和晶格歪扭程度的增加，磁导率将降低，矫顽力上升，即磁性变硬。另外晶体大小、组织形状和分布也将影响磁性。晶粒增大时磁性向“软”的方向变化。表 2-1 列出了纯铁部分晶粒与磁性的关系。

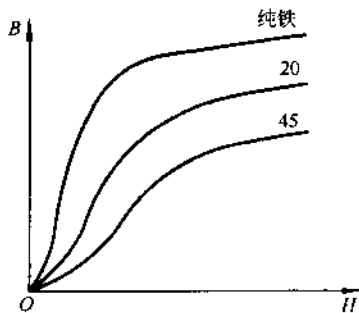


图2-13 几种碳钢退火状态下的磁化曲线

（2）热处理工艺的影响 不同的热处理工艺对材料的磁特性影响很大。在同一材料