



“工学结合、校企合作” 高等职业教育改革创新教材

磁粉与渗透检测技术

CIFEN YU SHENTOU JIANCE JISHU

路宝学 © 主编



5.2

(960)



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“工学结合、校企合作”高等职业教育改革创新教材

磁粉与渗透检测技术

主 编 路宝学

副主编 魏同锋

参 编 李丽茹 王 子 瑜
主 审 刘春伟
藏 书 章

王清满



机械工业出版社

为突出职业教育的特点,本书以工作过程为导向,采用项目化形式编写,紧密围绕高素质技能型人才的培养目标,结合职业技能鉴定标准,融入了理论和技能知识要求。本书内容注重理论结合实际,以实现“教、学、做”一体化教学,同时注重学生学习能力的培养与可持续发展。

本书共有磁粉检测和渗透检测两个部分。第一部分内容包括磁粉检测基础,磁粉检测的设备、器材及试块,磁粉检测的应用、磁痕分析与质量评级;第二部分内容包括渗透检测基础、渗透检测的材料与设备、渗透检测的方法、显示的解釋与缺陷评定。

本书可作为高职高专、中职、各类成人教育材料检测类专业教材或培训用书,也可供从事无损检测技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

磁粉与渗透检测技术/路宝学主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 7
“工学结合、校企合作”高等职业教育改革创新教材
ISBN 978-7-111-47415-9

I. ①磁… II. ①路… III. ①磁粉检验-高等职业教育-教材②渗透检测-高等职业教育-教材 IV. ①TG115. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 161663 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:齐志刚 责任编辑:齐志刚 李超 版式设计:霍永明
责任校对:佟瑞鑫 封面设计:张静 责任印制:刘岚

北京玥实印刷有限公司印刷

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·12.75 印张·306 千字

0001—1500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-47415-9

定价:32.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前言

本书是为了进一步贯彻“国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定”的文件精神，加强职业教育教材建设，满足现阶段职业院校金属材料检测类专业对教材的需求，结合无损检测技术的现状及国家有关法规、标准的规定，依据教学标准和高职教育培养目标编写的。

本书由磁粉检测和渗透检测两部分组成。编写过程中紧密结合职业教育的办学特点和教学目标，强调实践性、应用性和创新性，内容安排上提炼典型工作任务，以工作过程为主线。结合无损检测专业高职学生的岗位需求特点，全书按照“学历证书与职业资格证书嵌入式”的设计要求确定课程的知识、技能等内容。

在本书的编写过程中，作者参阅了最新的标准文献，还参考了国内外的相关专著、教材、手册和行业的培训教材，在此对相关的作者表示衷心的感谢。

本书由路宝学任主编，魏同锋任副主编，具体编写分工如下：项目一由王子瑜编写，项目二、项目三、项目四由路宝学编写，附录由王清满编写；项目五、项目七、项目八由魏同锋编写，项目六由李丽茹编写。全书由渤海船舶重工集团高工刘春伟任主审。

限于作者水平，书中难免存在缺点和不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言 1
绪论 1

第一部分 磁粉检测

项目一 磁粉检测基础 3
 任务一 工件的磁化现象 3
 任务二 漏磁场 11
 任务三 磁化方法与磁化电流 15
 综合训练 23
项目二 磁粉检测的设备、器材及试块 27
 任务一 磁粉检测设备 27
 任务二 磁粉及磁悬液 34
 任务三 磁粉检测标准试片和标准试块 42
 综合训练 46
项目三 磁粉检测的应用 50
 任务一 轴向通电法磁粉检测 50
 任务二 中心导体法磁粉检测 60
 任务三 线圈法磁粉检测 65
 任务四 铸件的支杆法磁粉检测 75
 任务五 焊缝的磁轭法检测 78
 任务六 平对接焊缝的交叉磁轭法检测 82
 任务七 剩磁法磁粉检测 88
 项目考核 90
 综合训练 91
项目四 磁痕分析与质量评级 94
 任务一 磁痕分析 94
 任务二 磁痕的观察、记录与质量评级 103
 综合训练 105

第二部分 渗透检测

项目五 渗透检测基础 108
 任务一 渗透检测的表面化学基础 108



任务二 渗透检测的光学基础	119
综合训练	124
项目六 渗透检测的材料与设备	126
任务一 渗透检测材料	126
任务二 渗透检测设备	144
综合训练	151
项目七 渗透检测的方法	154
任务一 渗透检测的操作方法	154
任务二 水洗型渗透检测法	163
任务三 溶剂去除型渗透检测法	167
任务四 后乳化型渗透检测法	172
综合训练	177
项目八 显示的解释与缺陷评定	180
任务一 显示的解释与常见缺陷显示特征	180
任务二 缺陷迹痕显示的等级评定	185
综合训练	189
附录	191
参考文献	196

发展。随着检测设备研制成功,磁粉检测从手动、全手动发展到专用设备,从手动磁化发展到半自动、设备已实现了系列化和商品化,磁粉检测的器材也得到了很好的发展,如大型磁化线圈能配合使用的400W冷光源黑光灯和高强黑光灯、按通断电试验器、标准磁片等磁化设备能配合使用的磁强计都形成了系列产品。断裂力学在无损检测领域的应用,为国内外磁粉产品磁粉检测验收标准提供了依据。这些磁粉检测设备、器材的成功研制是磁粉检测技术发展的基础,促进了磁粉检测技术的发展。

磁粉检测的发展历史及现状

磁粉检测于20世纪初,起初发展较慢,利用铁桥检查裂纹,是渗透检测的初级阶段。“磁粉法”是磁粉检测最早应用的一种渗透检测方法。20世纪50年代,我国从苏联引进一直使用至今的磁粉检测材料和设备。到了20世纪六七十年代,国内许多大型企业和科研单位开始自行研制磁粉检测材料,主要供自己使用。到了20世纪70年代后期,国内已研制出可替代国外磁粉检测材料的产品,且成本很低。随后,我国研制出水洗型和后乳化型荧光渗透剂,但数量不多,质量也不稳定,取得了广泛应用。

渗透检测技术的发展,主要是渗透检测剂和设备的发明。随着渗透检测技术的发展,国内外的磁粉检测材料和设备,将更加系统化和商品化,同时促进了渗透检测技术的进步。现在所使用的磁粉检测材料和设备,其检测灵敏度高的,今后所检测的是系统化的材料和新的特殊用途的渗透检测材料和设备。随着技术的改进,提高渗透检测的可靠性和检测速度,不断降低检测成本,提高渗透检测的自动化程度。

二、磁粉与渗透检测方法的选择

磁粉检测和渗透检测都属于无损检测的常用方法,但其原理和适用范围区别很大,并且有各自独特的优点和局限性。在实际检测中,人员应根据具体情况选择检测方法,并能根据工

绪 论

一、磁粉与渗透检测技术的发展

磁粉与渗透检测技术主要应用于各类工件表面和近表面缺陷的检测，在现代产品质量检验中得到广泛的应用。

1. 磁粉检测的发展简史及现状

磁粉检测是利用磁现象来检测材料和工件中表面及近表面缺陷的一种无损检测方法。人们发现磁现象比较早，早在 18 世纪，人们就已经开始从事磁通检漏试验。1928 年，Forest 为了解决油井钻杆的断裂失效问题，研究出周向磁化技术，并经过不懈努力，将磁粉检测方法基本研制成功，并获得了较可靠的检测结果。

现在，随着新型设备的研制成功，磁粉检测从半自动、全自动发展到专用设备，从单向磁化发展到多向磁化，设备已实现了系列化和商品化。磁粉检测的器材也得到了很好的发展，如与固定式探伤机配合使用的 400W 冷光源黑光灯和高强黑光灯、快速断电试验器、标准试片和试块及测量剩磁用的磁强计都形成了系列产品。断裂力学在无损检测领域的应用，为制订更合理的产品磁粉检测验收标准提供了依据。这些磁粉检测设备、器材的成功研制与检测标准的成功开发，加速了磁粉检测技术的发展。

2. 渗透检测的发展简史及现状

渗透检测始于 20 世纪初，起初发展较慢，利用铁锈检查裂纹，是渗透检测的初级阶段。“油白法”被认为是最早应用的一种渗透检测方法。20 世纪 50 年代，我国的渗透检测一直使用前苏联工业应用的材料和技术。到了 20 世纪六七十年代，国内许多大型企业和科研单位纷纷自行研制渗透剂，主要供自己使用。到了 20 世纪 70 年代后期，国内已研制出可检测微米级缺陷的渗透检测剂，且毒害很低。随后，我国研制出水洗型和后乳化型荧光渗透剂，性能可与国外同类产品水平相当，取得了广泛应用。

渗透检测技术的发展，实际上就是渗透检测剂和设备的发展。随着渗透检测技术的发展，国内外的检测材料已成套化，并更加系统化和标准化，同时促进了渗透检测技术的进步。现在所使用的渗透检测剂都是低毒和高灵敏度的。今后所面临的是系统化的材料和新的特殊用途的渗透检测剂的开发以及配方的改进，提高渗透检测的可靠性和检验速度，不断降低检测成本，提高渗透检测剂的综合性能。

二、磁粉与渗透检测方法的比较

磁粉检测和渗透检测都属于表面缺陷无损检测方法，但其原理和适用范围区别很大，并且有各自独特的优点和局限性，所以无损检测人员应熟练掌握这两种检测方法，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。如磁粉检测对铁磁性材料工件的表面和近表面缺陷具有很高的检测灵敏度，可发现微米级宽度的小缺陷，所以承压设备对铁磁性材料工件表面和近表面缺陷的检测宜优先选择磁粉检测，确因工件结构形状等原因不能使用磁粉检测时，方可使用渗透检测。表面缺陷无损检测方法的比较见表 0-1。

表 0-1 表面缺陷无损检测方法的比较

方法 项目	磁粉检测 (MT)	渗透检测 (PT)
方法原理	磁力作用	毛细渗透作用
适用材质	铁磁性材料	非多孔性材料
能检测的缺陷	表面和近表面缺陷	表面开口缺陷
应用对象	焊接件、铸钢件、锻钢件、压延件、管材、棒材、型材、机加工件及使用中的上述工件	任何非多孔性材料工件及使用中的上述工件
主要检测缺陷	裂纹、发纹、白点、折叠、夹杂物、冷隔	裂纹、白点、疏松、针孔、夹杂物
显示缺陷的器材	磁粉	渗透剂和显像剂
缺陷表面形式	漏磁场吸附磁粉形成磁痕	渗透剂回渗
缺陷显示	直观	直观
缺陷性质判断	能大致确定	能大致确定
灵敏度	高	较高
检测速度	较快	慢
污染	较轻	较重
相对优、缺点	检测几乎不受工件几何形状和缺陷方向的限制；检测时的灵敏度与磁化方向有很大的关系；只能检测铁磁性材料及其制品，不能检测奥氏体材料及其焊接接头和非铁磁性材料	检验不受工件几何形状和缺陷方向的影响；不 用水、电，特别适用于现场检验；只能检测表面开口性缺陷（表面开口性缺陷被堵塞时也检测不出来）

第一部分

磁粉检测

项目一 磁粉检测基础

铁磁性材料工件被磁化后,由于不连续性的存在,使工件表面和近表面的磁感应线发生局部畸变而产生漏磁场,吸附施加在工件表面的磁粉,在合适的光照下形成目视可见的磁痕,从而显示出不连续性的位置、大小、形状和严重程度。磁粉检测的能力取决于磁化方法、磁化电流及缺陷的延伸方向、位置、大小和形状等因素。

任务一 工件的磁化现象

►学习目标

- 1) 了解磁化现象及磁感应线的特性。
- 2) 熟悉不同物质对磁场的影响。
- 3) 掌握铁磁性材料的磁化过程、磁特性曲线及磁滞回线。

一、磁化现象和磁场

1. 磁的基本现象

我国劳动人民远在春秋战国时期就发现了磁石吸铁现象。磁铁能够吸引铁磁性材料的性质称为磁性,凡能够吸引其他铁磁性材料的物体都称为磁体,磁体是能够建立或有能力建立外磁场的物体。磁体分为永磁体、电磁体和超导磁体等。永磁体是不需要外力维持其磁场的磁体;电磁体是需要电源维持其磁场的磁体;超导磁体是用超导材料制成的磁体。

磁铁各部分的磁性强弱不同,靠近磁铁两端磁性特别强、吸附磁粉特别多的区域称为磁极。条形磁铁周围的磁场如图 1-1 所示。

如果将条形磁铁(或磁针)的中心用线悬挂起来,以保证它能够在水平面内自由转动,则两极总是分别指向南北方向。通常称磁针指向北的一端为北极,用 N 表示;指南的一端为南极,用 S 表示。如果用另一磁铁去接近悬挂着的磁铁,则可发现同性磁极相互排斥,异性磁极相互吸引。

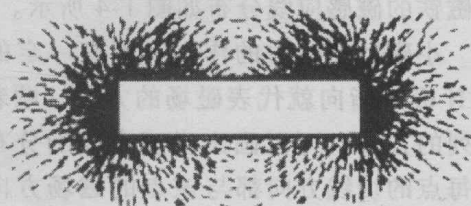


图 1-1 条形磁铁周围的磁场

地球按地理位置有南极和北极,如果在地球表面放一指南针,可发现指南针的北极(N 极)总是指向地球地理位置的北极,指南针的南极(S 极)总是指向地球地理位置的南极。根据同性磁极相互排斥、异性磁极相互吸引的原理,可推断出整个地球也是一个大磁体,存在于地球周围的磁场称为地磁场。地磁场的北极(N 极)位于地球南极附近,地磁场的南



极（S 极）位于地球北极附近，所以在地球的北极，地磁场的磁感应线方向指向地球表面，而在地球的南极，地磁场的磁感应线方向是离开地球表面的。地球的磁场方向如图 1-2 所示。

条形磁铁被折断时，每段和破裂处即形成新的磁极，并成对出现。自然界没有单独的 N 极和 S 极存在。折断的条形磁铁新形成的磁极如图 1-3 所示。

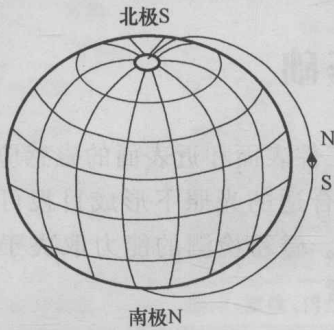


图 1-2 地球的磁场方向

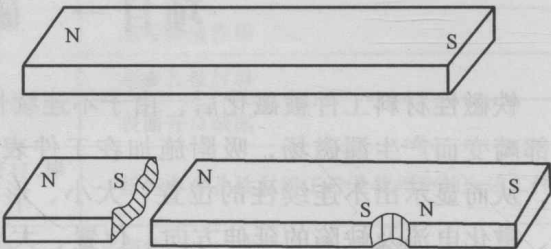


图 1-3 折断的条形磁铁新形成的磁极

磁极间相互排斥和相互吸引的力称为磁力。磁力的大小和方向是可以测定的，同一个磁体两个磁极的磁力大小相等，但方向相反。把一个磁体靠近原来没有磁性的铁磁性物体时，该物体不仅能被磁体吸引，还能被磁体磁化，并具有了吸引其他铁磁性物体的性质。使原来没有磁性的物体得到磁性的过程称为磁化。

2. 磁场与磁感应线

磁体间的相互作用是通过磁场来实现的。所谓磁场，就是具有磁力作用的空间。磁场存在于被磁化物体或通电导体的内部和周围，它是由运动电荷形成的。磁场的特征是对运动电荷（或电流）具有作用力，在磁场变化的同时也产生电场。

（1）磁感应线 为了形象地表示磁场的强弱、方向和分布情况，可以用假想的磁感应线来反映磁场中各点的磁场强度和方向。用小磁针来描述的条形磁铁的磁感应线分布如图 1-4 所示。

小磁针在磁力的作用下都有一定的指向，小磁针 N 极的指向就代表磁场的方向，顺着许多小磁针排列的方向，可以画出磁感应线的分布。磁感应线上每点的切线方向都与该点的磁场方向一致。单位面积上的磁感应线数目与磁场的强弱成正比。因此，可用磁感应线的疏密程度反映磁场的强弱，磁感应线密的地方磁场强，磁感应线稀的地方磁场就弱。

磁感应线具有以下特性。

- 1) 磁感应线是具有方向性的闭合曲线。在磁体内，磁感应线由 S 极到 N 极；在磁体外，磁感应线是由 N 极出发，穿过空气进入 S 极的闭合曲线。
- 2) 磁感应线互不相交。
- 3) 磁感应线可描述磁场的强弱和方向。

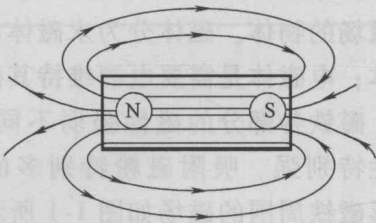


图 1-4 用小磁针来描述的条形磁铁的磁感应线分布



4) 磁感应线沿磁阻最小路径通过。

(2) 磁场

1) 圆周磁场。马蹄形磁铁如图 1-5a 所示，在磁铁外部，磁感应线从 N 极出发穿过空气进入 S 极；在磁铁内部，磁感应线从 S 极到 N 极闭合，它的两极能吸引铁磁性材料。

如图 1-5b 所示，将上述磁铁弯曲，使两磁极靠得很近，磁极间距变小，磁感应线离开磁极 N，穿过空气又重新进入磁极 S，产生漏磁场，漏磁场能强烈地吸附磁粉。

如图 1-5c 所示，将磁铁两端再弯曲，使两极熔合形成一圆环，此时磁铁内既无磁极又不产生漏磁场，因而不能吸引铁磁性材料，但在磁铁内包容了一个圆周磁场或磁铁已被周向磁化。

如果已周向磁化的零件存在与磁感应线垂直的裂纹，则在裂纹两侧立即产生 N 极和 S 极，形成漏磁场，吸附磁粉形成磁痕，显示出裂纹缺陷，有裂纹处漏磁场分布及磁痕显示如图 1-5d 所示。

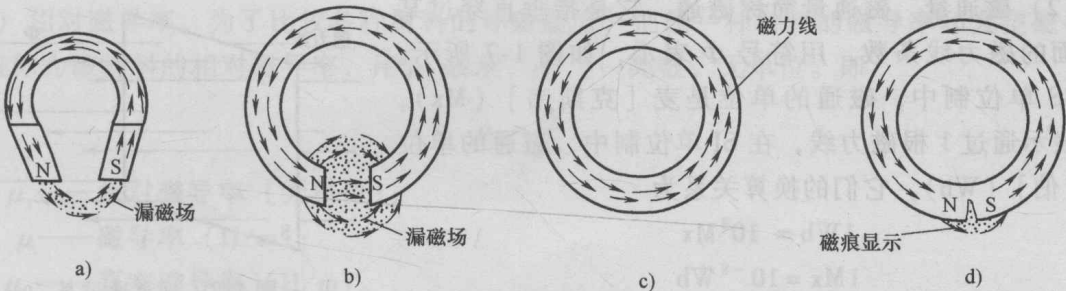


图 1-5 用马蹄形磁铁描述圆周磁场

2) 纵向磁化。如果将马蹄形磁铁校直为条形磁铁，则其两端是 N 极和 S 极。条形磁铁的两极能强烈地吸附磁粉，说明该条形磁铁已被纵向磁化，如图 1-6a 所示。

如图 1-6b 和图 1-6c 所示，如果磁感应线被不连续性或裂纹阻断而在其两侧形成 N 极和 S 极，则会产生漏磁场，吸附磁粉形成磁痕，从而显示出不连续性或裂纹，这就是磁粉检测的基础。

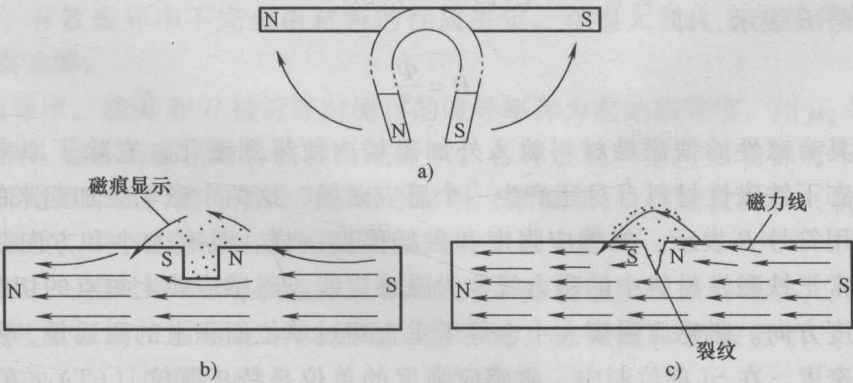


图 1-6 用条形磁铁描述纵向磁化

- a) 马蹄形磁铁被校直成条形磁铁后 N 极和 S 极的位置
b) 具有加工槽的条形磁铁产生的漏磁场及磁痕显示 c) 纵向磁化裂纹产生的漏磁场及磁痕显示



3. 磁场中的基本物理量

(1) 磁场强度 磁场强度是磁场在给定点的强度，是表征磁场强弱和方向的物理量，是一个与磁性材料无关的物理量。在磁场里任一点放一单位磁极（N 级），作用于该单位磁极的磁力大小表示该点的磁场强弱，磁力线上每点的切线方向代表磁场的方向。磁场强度符号用 H 来表示，磁场强度的单位是用稳定电流在空间产生磁场的强弱来规定的，在 SI 单位制中为安[培]/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。即

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (1-1)$$

在 CGS 单位制中，磁场强度的单位是奥[斯特]（Oe），它与安[培]/米（A/m）的换算关系为

$$1 \text{ A/m} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ Oe} \approx 0.0125 \text{ Oe}$$

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

(2) 磁通量 磁通量简称磁通，它是指垂直穿过某一截面的磁力线条数，用符号 Φ 表示，如图 1-7 所示。在 CGS 单位制中，磁通的单位是麦[克斯韦]（Mx），1Mx 表示通过 1 根磁力线，在 SI 单位制中，磁通的单位是韦[伯]（Wb），它们的换算关系为

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

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

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 的磁通量表示为

$$\Phi = BS \quad (1-2)$$

式中 B ——磁通密度（T）；

Φ ——磁通量（Wb）；

S ——磁力线垂直穿过的单位面积（m²）。

(3) 磁通密度与磁感应强度 垂直穿过单位面积上的磁通量（或磁力线条数）称为磁通密度，用符号 B 表示，即

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-3)$$

将原来不具有磁性的铁磁性材料放入外加磁场内便得到磁化，它除了原来的外加磁场外，在磁化状态下铁磁性材料自身还产生一个感应磁场，这两个磁场叠加起来的总磁场称为磁感应强度，用符号 B 表示。磁感应强度和磁场强度一样，具有大小和方向，可以用磁感应线表示。通常把铁磁性材料中的磁力线称为磁感应线。磁感应线上每点的切线方向代表该点的磁感应强度方向。磁感应强度大小也等于垂直穿过单位面积上的磁通量，所以磁感应强度又称为磁通密度。在 SI 单位制中，磁感应强度的单位是特[斯拉]（T），在 CGS 单位制中，磁感应强度的单位是高[斯]（Gs），它们的换算关系为

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

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

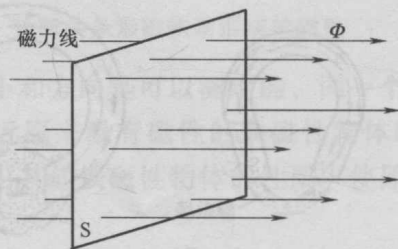


图 1-7 垂直通过某截面的磁力线条数



在 CGS 单位制中, 磁感应强度 B 用垂直通过每平方厘米截面的磁感应线的条数来表示, 如 1cm^2 通过 1 根磁感应线称为 1Gs 。

磁场强度与磁感应强度不同的是, 磁场强度只与激励电流有关, 与被磁化的物质无关, 而磁感应强度不仅与磁场强度有关, 还与被磁化的物质有关, 如与材料磁导率 μ 有关系。因为 $B = \mu H$, 所以铁磁性材料的磁导率 μ 越大, 磁感应强度 B 就越大, 这就是铁磁性材料的磁感应强度 B 远大于磁场强度 H 的原因。

(4) 磁导率

1) 绝对磁导率。磁感应强度 B 与磁场强度 H 的比值称为磁导率, 或称为绝对磁导率, 用符号 μ 表示。磁导率表示材料被磁化的难易程度, 它反映了材料的导磁能力。在 SI 单位制中, 磁导率的单位是亨 [利]/米 (H/m)。磁导率 μ 不是常数, 而是随磁场强弱不同而改变的变量, 有最大值和最小值。

2) 真空磁导率。在真空中, 磁导率是一个不变的恒定值, 称为真空磁导率, 用 μ_0 表示, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。在 CGS 单位制中, $\mu_0 = 1$ 。

3) 相对磁导率。为了比较各种材料的导磁能力, 把任一种材料的磁导率和真空磁导率的比值称为该材料的相对磁导率, 用 μ_r 表示, μ_r 为一纯数, 无单位。即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1-4)$$

式中 μ_r ——相对磁导率 (无单位);

μ ——磁导率 (H/m);

μ_0 ——真空磁导率 (H/m)。

磁粉检测还用到材料磁导率、最大磁导率、有效磁导率和起始磁导率, 以下进行简单介绍。

4) 材料磁导率。材料磁导率是指在磁路完全处于材料内部情况下所测得的 B/H , 主要用于周向磁化。

5) 最大磁导率。在磁化曲线上, B/H 值最大时对应拐点处的磁导率称为最大磁导率, 用 μ_m 表示。

6) 有效磁导率 (表观磁导率)。有效磁导率是指工件在线圈中磁化产生的 B 与空载线圈的 H 的比值。有效磁导率不完全由材料的性质决定, 在很大程度上与零件的形状有关, 它对纵向磁化很重要。

7) 起始磁导率。在 B 和 H 接近零时测得的磁导率称为起始磁导率, 用 μ_a 表示。

(5) 磁介质 能影响磁场的物质称为磁介质。各种宏观物质对磁场都有不同程度的影响, 因此一般都是磁介质。磁介质分为顺磁性材料 (顺磁质)、抗磁性材料 (抗磁质) 和铁磁性材料 (铁磁质), 抗磁性材料又称逆磁性材料。

顺磁性材料——相对磁导率 μ_r 略大于 1, 在外加磁场中呈现微弱磁性, 并产生与外加磁场同方向的附加磁场, 顺磁性材料如铝、铬、锰, 能被磁体轻微吸引 (如铝的 $\mu_r = 1.000021$, 空气的 $\mu_r = 1.0000036$)。

抗磁性材料——相对磁导率 μ_r 略小于 1, 在外加磁场中呈现微弱磁性, 并产生与外加磁场反方向的附加磁场, 抗磁性材料如铜、银、金, 能被磁体轻微排斥 (如铜的 $\mu_r = 0.999993$)。



铁磁性材料——相对磁导率 μ_r 远大于1，在外加磁场中呈现很强的磁性，并产生与外加磁场同方向的附加磁场，铁磁性材料如铁、镍、钴及其合金，能被磁体强烈吸引（如工业纯铁的 $\mu_r = 5000$ 左右）。

磁粉检测只适用于铁磁性材料。通常把顺磁性材料和抗磁性材料都列入非磁性材料。

二、铁磁性材料

1. 磁畴

任何物质都是由分子和原子组成的，原子是由带正电的原子核和绕核旋转的电子组成的，电子不仅绕核旋转，而且还进行自转，而电子自转效应是主要的。产生此效应，相当于一个非常小的电流环，原子、分子等微观粒子内电子的这些运动便形成了分子流，这是物质磁性的基本来源。在铁磁性材料内部形成自发磁化的小区域，在每个小区域内分子电流的磁矩方向是相同的，所以把铁磁性材料内部自发磁化的小区域称为磁畴，其体积数量级约为 10^{-3}cm^3 。在没有外加磁场作用时，铁磁性材料内各磁畴的磁矩方向相互抵消，对外不显示磁性，如图1-8a所示；当把铁磁性材料放到外加磁场中去时，磁畴就会受到外加磁场的作用，一是使磁畴磁矩转动，二是使畴壁（畴壁是相邻磁畴的分界面）发生位移，最后全部磁畴的磁矩方向转向与外加磁场方向一致（图1-8b），铁磁性材料被磁化，变成磁体，显示出很强的磁性；去掉外加磁场后，磁畴出现局部转动，但仍保留一定的剩余磁性，如图1-8c所示。

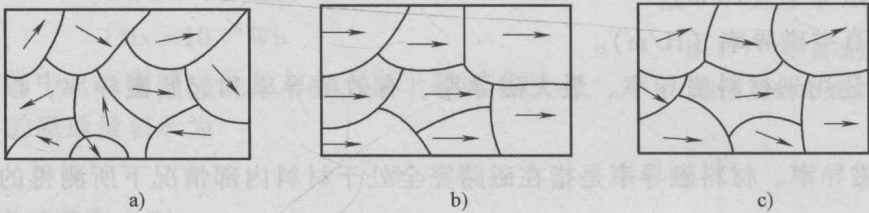


图 1-8 铁磁性材料的磁畴方向

a) 不显示磁性 b) 磁化 c) 保留一定的剩余磁性

永久磁铁中的磁畴，在一个方向上占优势，因而形成N极和S极，能显示出很强的磁性。

在高温情况下，磁体中分子热运动会破坏磁畴的规则排列，使磁体的磁性削弱。超过某一温度后，磁体的磁性也就全部消失而呈现顺磁性，实现了材料的退磁。铁磁性材料在此温度以上不能再被外加磁场磁化，失去原有的磁性的临界温度被称为居里点或居里温度。从居里点以上的高温冷却下来时，只要没有外磁场的影响，材料仍然处于退磁状态。

一些铁磁性材料的居里点见表1-1。

表 1-1 铁磁性材料的居里点

材 料	居里点/℃	材 料	居里点/℃
铁	769	铁, 铬的质量分数为 10%	740
镍	365	铁, 锰的质量分数为 4%	715
钴	1150	铁, 钒的质量分数为 6%	815
铁, 硅的质量分数为 5%	720		

2. 磁化过程

铁磁性材料的磁化过程如图 1-9 所示。

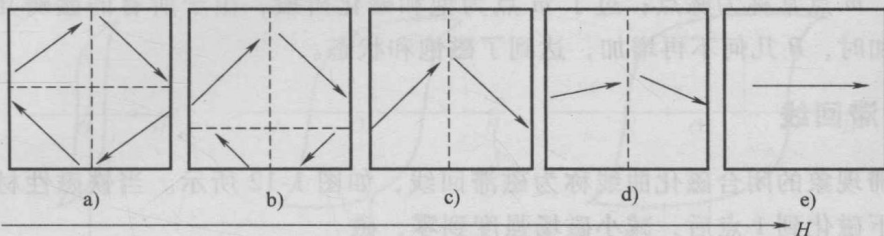


图 1-9 铁磁性材料的磁化过程

- 1) 未加外加磁场时，磁畴磁矩杂乱无章，对外不显磁性，如图 1-9a 所示。
- 2) 在较弱的磁场作用下，磁矩方向与外加磁场方向一致或接近的磁畴体积增大，而磁矩方向与外加磁场方向相反的磁畴体积减小，畴壁发生位移，如图 1-9b 所示。
- 3) 增强外加磁场时，磁矩转动畴壁继续位移，最后只剩下与外加磁场方向比较接近的磁畴，如图 1-9c 所示。
- 4) 继续增强外加磁场，磁矩方向转动，与外加磁场方向接近，如图 1-9d 所示。
- 5) 当外加磁场增加到一定值时，所有磁畴的磁矩都沿外加磁场方向有序排列，达到磁化饱和，相当于一个微小磁铁，产生 N 极和 S 极，宏观上呈现磁性，如图 1-9e 所示。

3. 磁特性曲线

初始磁化曲线是表征铁磁性材料磁特性的曲线，用以表示 $B-H$ 的关系。

将铁磁性材料做成环形样品，绕上一定匝数的线圈，线圈经过换向开关 K 和可变电阻器 R 接到直流电源上，其电路如图 1-10 所示。

通过测量线圈中的电流 I ，算出材料内部的磁场强度 H 值，用磁通计测量此时穿过环形样品横截面的磁通量 Φ ，从而计算出磁感应强度 B 值，由此可得到该材料的初始磁化曲线（图 1-11），又称磁化曲线，它反映了材料磁化程度随外加磁场变化的规律。

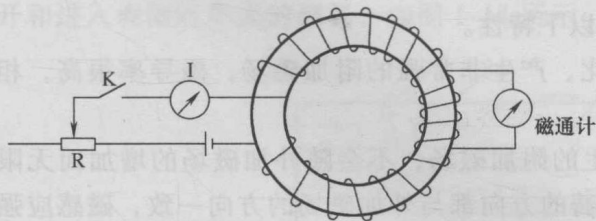


图 1-10 磁化曲线测量电路

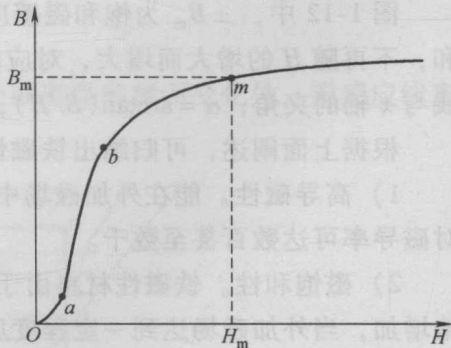


图 1-11 初始磁化曲线

由图 1-11 所示的曲线可以看出，铁磁材料的磁化过程可以看成是由四个部分组成的，即初始阶段、急剧磁化阶段、近饱和磁化阶段和饱和磁化阶段。其中： Oa 段称为初始阶段，由于磁畴的惯性，当 H 增加时， B 不能立即上升很快，使得这一阶段的曲线较平缓，这时的磁化过程是可逆的，即当 H 退回到零时， B 也会退回到零； ab 段为急剧磁化阶段， H 增加



时 B 增加得很快, 材料得到急剧磁化, 这个阶段是不可逆的, 即 H 退回到零, B 并不沿原曲线减退; bm 段为近饱和磁化阶段, 在这一阶段, H 增加时 B 的增加又缓慢了下来, 产生了一个转折, m 点常称为膝点; 过了 m 点为饱和磁化阶段, 由于所有的磁畴几乎都转向 H 方向, H 增加时, B 几何不再增加, 达到了磁饱和状态。

三、磁滞回线

描述磁滞现象的闭合磁化曲线称为磁滞回线, 如图 1-12 所示。当铁磁性材料在外加磁场强度作用下磁化到 1 点后, 减小磁场强度到零, 磁感应强度并不沿曲线 1-0 下降, 而是沿曲线 1-2 降到 2 点, 这种磁感应强度变化滞后于磁场强度变化的现象称磁滞现象, 它反映了磁化过程的不可逆性。当磁场强度增大到 1 点时, 磁感应强度不再增加, 得到的 0-1 曲线称为初始磁化曲线。当外加磁场强度 H 减小到零时, 保留在材料中的磁性称为剩余磁感应强度, 简称剩磁, 用 B_r 表示, 如图中的 02 和 05。为了使剩磁减小到零, 必须施加一个反向磁场强度, 使剩磁降为零所施加的反向磁场强度称为矫顽力, 用 H_c 表示, 如图中的 03 和 06。

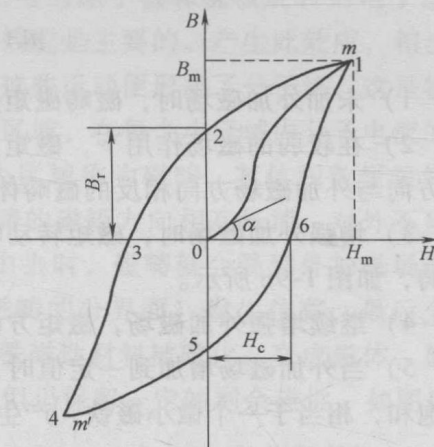


图 1-12 磁滞回线

如果反向磁场强度继续增加, 材料就呈现与原来方向相反的磁性。同样可达到饱和点 m' , 当 H 从负值减小到零时, 材料具有反方向的剩磁 $-B_r$, 即 05。磁场经过零值后再向正方向增加时, 为了使 $-B_r$ 减小到零, 必须施加一个反向磁场强度, 如图中的 06, 磁场在正方向继续增加时曲线回到 1 点, 完成一个循环, 如图中的 1-2-3-4-5-6-1, 即材料内的磁感应强度 B 是按照一条对称于坐标原点的闭合磁化曲线变化的, 这条闭合曲线称为磁滞回线。只有交流电才产生这种磁滞回线。

图 1-12 中, $\pm B_m$ 为饱和磁感应强度, 表示工件在饱和磁场强度 $\pm H_m$ 磁化下 B 达到饱和, 不再随 H 的增大而增大, 对应的磁畴全部转向与磁场方向一致。 α 为初始磁化曲线的切线与 x 轴的夹角, $\alpha = \arctan(B/H)$, α 的大小反映铁磁性材料被磁化的难易程度。

根据上面阐述, 可归纳出铁磁性材料具有以下特性。

1) 高导磁性。能在外加磁场中强烈地磁化, 产生非常强的附加磁场, 磁导率很高, 相对磁导率可达数百甚至数千。

2) 磁饱和性。铁磁性材料由于磁化所产生的附加磁场, 不会随外加磁场的增加而无限地增加, 当外加磁场达到一定程度后, 全部磁畴的方向都与外加磁场的方向一致, 磁感应强度 B 不再增加, 呈现磁饱和。

3) 磁滞性。当外加磁场的方向发生变化时, 磁感应强度的变化滞后于磁场强度的变化。当磁场强度减小到零时, 铁磁性材料在磁化时所获得的磁性并不完全消失, 而保留了剩磁。

铁磁性材料根据矫顽力 H_c 大小可分为软磁材料和硬磁材料两大类。 $H_c \leq 100 \text{ A/m}$ 的认为是软磁材料, 其磁滞回线如图 1-13a 所示; $H_c \geq 8000 \text{ A/m}$ 的认为是硬磁材料, 其磁滞回线如图 1-13b 所示。一般磁粉检测的铁磁性材料, 矫顽力在软、硬磁之间, 称为半硬磁材



料，其磁滞回线如图 1-13c 所示。

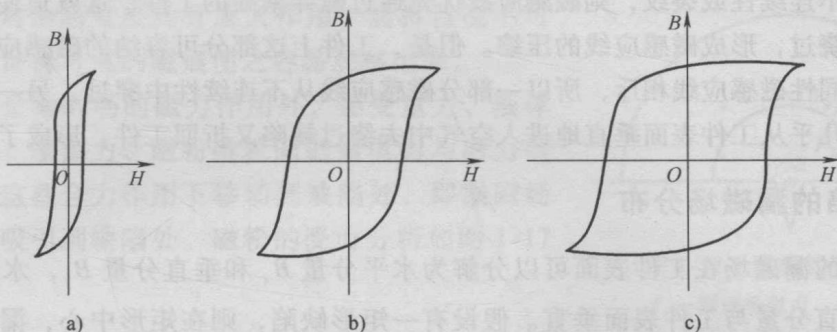


图 1-13 不同材料的磁滞回线

a) 软磁材料 b) 硬磁材料 c) 半硬磁材料

软磁材料和硬磁材料具有以下特征。

- 1) 软磁材料。磁滞回线狭长，具有高磁导率、低剩磁、低矫顽力和低磁阻的铁磁性材料。软磁材料磁粉检测时容易磁化，也容易退磁。软磁材料有纯铁、低碳钢和软磁铁氧化体等材料。
- 2) 硬磁材料。磁滞回线肥大，具有低磁导率、高剩磁、高矫顽力和高磁阻的铁磁性材料。硬磁材料磁粉检测时难以磁化，也难以退磁。硬磁材料有铝镍钴、稀土钴和硬磁铁氧化体等材料。

任务二 漏 磁 场

►学习目标

- 1) 了解漏磁场的形成。
- 2) 熟悉影响漏磁场强度的因素。
- 3) 掌握磁场方向与发现缺陷的关系。

一、漏磁场的形成

所谓漏磁场，就是铁磁性材料磁化后，在不连续性处或磁路的截面变化处，磁感应线离开和进入表面时形成的磁场，如图 1-14 所示。

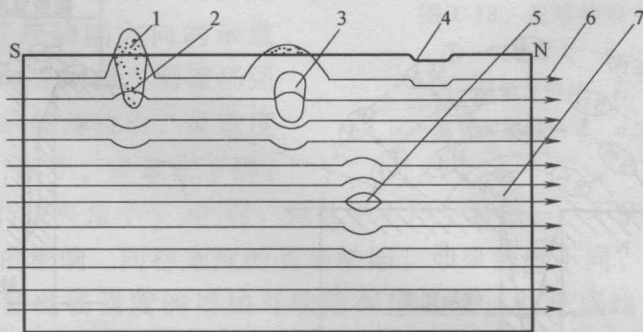


图 1-14 不连续处漏磁场的分布

1—漏磁场 2—裂纹 3—近表面气孔 4—划伤 5—内部气孔 6—磁感应线 7—工件