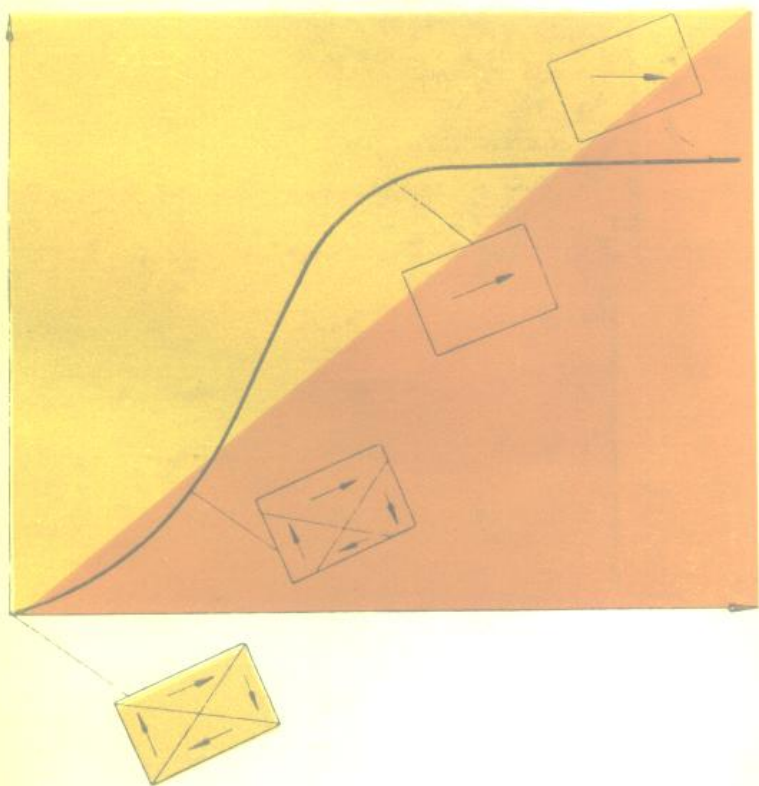


磁性材料基础

张世远 路 权 编著
薛荣华 都有为



312210

磁性材料基础

张世远 路权 编著
薛荣华 都有为



科学出版社

1988

内 容 简 介

本书系统地讲述了磁性材料的基本知识,重点阐述铁磁学、金属学的有关理论及规律,较详细地介绍了在实用中如何提高磁性材料的性能,书中充分反映了近年来在磁性材料的生产和研究方面取得的新成就。

本书可供高等院校磁学、磁性材料专业的师生及从事磁性材料生产、研究、检验、应用的科技人员参考,并可作为有关技术人员和具有高中文化程度的专业人员的培训材料。

磁 性 材 料 基 础

张世远 路 权 编著
薛荣华 都有为

责任编辑 姜淑华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1988年7月第 一 版 开本:787×1092 1/32

1988年7月第一次印刷 印张:14 1/4

印数:0001—6,400 字数:322,000

ISBN 7-03-000361-6/O·98

定价: 3.70 元

前 言

磁学是研究物质磁性的科学。

按照磁学的观点，世界上一切物质都是具有磁性的。我们通常所说的磁性材料是指目前在工程技术上得到广泛应用的强磁性材料。这些材料已经成为现代电子、电力、能源、信息等工业的重要支柱，与社会生产力的发展以及人类生活水平的提高有着紧密的联系。

在现代社会中，到处都可以找到磁性材料的踪迹。工业上各种变压器的铁芯、发电机定子和转子的主体、雷达中产生微波的磁控管里的永磁体、人造卫星上探测星际磁场的磁强计的探头、电子计算机中存储信息的磁鼓、磁带、磁盘，都是用磁性材料制成的。诸如收音机、录音机、电视机、洗衣机和电冰箱等各种家用电器设备，也都离不开磁性材料。可以毫不夸张地说，没有磁性材料就没有现代工业技术。

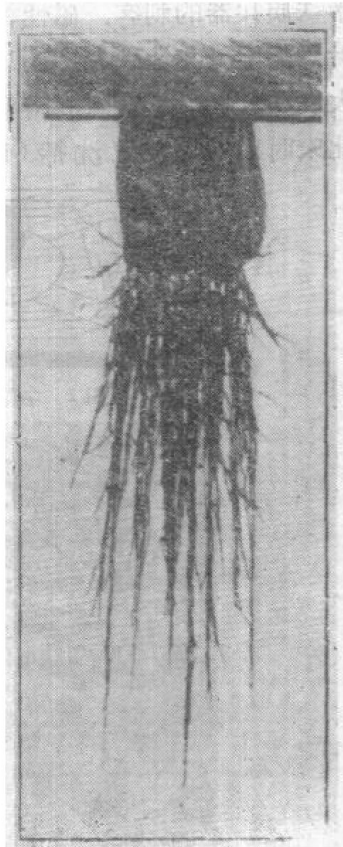


图1 磁铁矿吸引铁屑

在我国,人们对磁性的认识可以追溯到 2000 多年前。磁石吸铁的现象(图 1)早就引起了我们祖先的注意。早在公元前 4 世纪,战国时期的著作《吕氏春秋·精通篇》中已经有“慈石召铁”的记载。慈石即磁石,将磁写为慈,是取磁石吸铁犹如慈母怀子的意思。战国末期韩非著的《有度篇》中已经有关于原始的指南工具——司南的记载。图 2 是古代司南的复原图。传说秦始皇的阿房宫宫门里已安置了磁石来帮助擒获携带铁质兵器的刺客。磁性材料的第一个技术应用是制作指南针。指南针和造纸、活字印刷、火药一起被称为我国古代的四大发明。指南针发明的年代,历史上并没有明确的记载,但北宋时期的科学家沈括(1030—1094)所著《梦溪笔谈》一

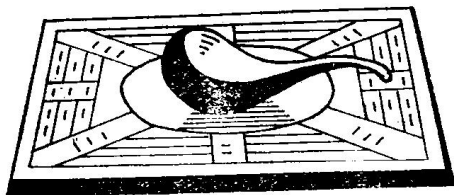


图 2 中国古代司南的复原图

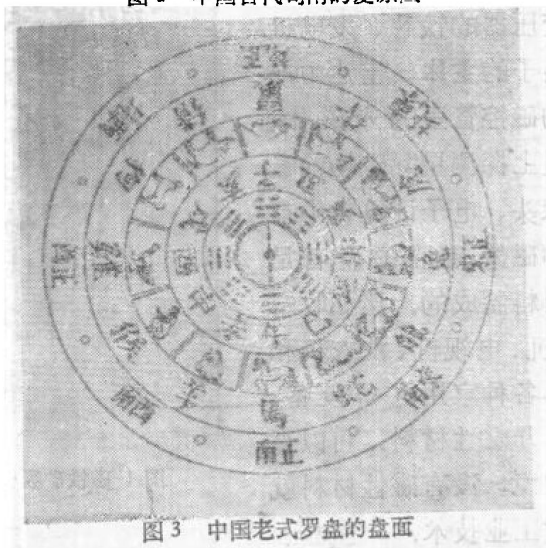


图 3 中国老式罗盘的盘面

书中已有磁针指南及制作指南针的详尽描述。而朱或所著的《萍洲可谈》，在谈到 1086—1094 年间船舶在苏门答腊航行时，有“舟师识地理，夜则观星，昼则观日，阴晦则观指南针”的记载，说明当时指南针已用于航海。从这些记载可以看出，我国发明及使用指南针不迟于 11 世纪。图 3 是我国老式罗盘的盘面图。

在欧洲，关于磁石的发现有两种传说。一种说法是古代希腊人在名叫麦格内西安（Magnesian）的地区发现的；另一种说法则认为是在小亚细亚的牧羊人麦格内斯（Magnes）在山上放羊时，因为鞋跟和牧杖被山石吸引而发现的。因此，欧洲人把磁石叫做麦格内特（Magnet）。

总之，在世界各地，人类很早就发现了天然磁石的磁性。但是对有关磁性现象本质的认识却经历了漫长的过程，直到 19 世纪发现了电和磁的相互关系后才揭开了磁性的奥秘。1820 年，奥斯特发现了电流能在周围空间产生磁场。不久以后，法拉第、楞次等人又相继发现了电磁感应的规律。随着人们对电磁现象认识的深化，发电机、变压器诞生了，电能的产生和传输的问题得到了解决，电力工业应运而生。与此相应出现了电工纯铁、硅钢片等一大类大功率金属软磁材料。20 世纪 20 年代以后，由于通信技术（有线电、无线电）的不断发展又导致了其它一些重要软磁材料品种的出现，如镍铁合金、铁铝合金等。与此同时，金属永磁材料的品种增长和性能提高也很快，其中，20 世纪 30 年代初铝镍钴合金的出现和 70 年代以来稀土永磁合金的实用化，都是其发展过程中极为重要的里程碑。

20 世纪 30 年代，以斯诺克（Snock）为首的一批荷兰科学家发现了一大类新型的强磁性材料，那就是现在已经普遍使用的铁氧体。铁氧体是一种氧化物磁性材料，它既具有强

磁性，又具有很高的电阻率，在交流，特别是高频条件下使用，具有优良的性能。因此，二次世界大战后，铁氧体磁性材料就被迅速而广泛地应用在无线电技术、雷达技术、计算机技术、磁记录技术中，大大促进了整个电子技术的发展。

在 50 年代磁带录音机问世及电子计算机使用之后，磁带、磁头、磁芯、磁鼓、磁盘等磁记录材料的生产迅猛发展，目前已成为产值最高的磁性材料工业。磁记录方面的研究工作已成了磁学研究的一个重要领域，其主要目标是发展高速度、大容量的磁记录介质。

近年来，除了在上述有关方面得到不断提高和改进之外，还在稀土磁性材料、非晶态磁性材料、磁光材料、超导磁性、天体磁学、生物磁学等各方面进行了大量的研究工作，并都有相当的进展。总之，磁学是一门蓬勃兴旺的科学，相信今后还会有新的突破。

我们编写这本书，旨在向读者介绍磁性材料的基本知识，重点放在铁磁学、金属学的有关理论和规律，对于如何提高磁性材料的性能、磁性材料的生产和新材料的研制，以及近年来在磁性材料的研究领域取得的新成就等，都有较详细的介绍。

本书中出现的单位制有国际单位制和高斯单位制，其中有关计算公式均以国际单位制的形式出现；在反映磁性材料性能的一些表格中，我们对磁性能的有关数据列出了两种单位制的数值，以供对照。

本书第一、二、三章由路权编写，第四、五章由张世远编写、第六章由都有为编写，第七章由薛荣华编写，最后由张世远和路权两人通读了全稿，并对部分内容作了修改和补充工作。

因作者水平有限，书中定有错误、缺点或欠妥之处，恳切希望读者批评指正。

目 录

前言	ix
第一章 磁现象和电磁现象	1
第一节 静磁现象	1
一、永磁体和磁场	1
二、永磁体的性质	2
三、磁化现象	4
四、磁场强度与磁力线	5
五、地磁场	6
第二节 电磁现象	9
一、电流的磁效应——电磁铁	9
二、电磁感应现象——发电机	11
三、载流导体在磁场中的运动——电动机	12
第二章 强磁性材料的磁特性	15
第一节 一些基本磁学量的定义	15
一、磁场强度 H	15
二、磁矩 m 和磁化强度 M	15
三、磁感应强度 B	17
四、磁通量 Φ	18
五、磁化率 χ	18
六、磁导率 μ	20
第二节 强磁性材料的磁化特性	21
一、磁化曲线	21
二、磁化过程中的 μ - H 关系	24
三、退磁曲线	24
四、磁滞回线	26
第三节 磁性材料的饱和磁化强度与温度的关系	27

第四节	磁性材料的分类	28
第五节	磁学中常用的两种单位制	30
第三章	强磁性的来源	33
第一节	原子的电子结构及原子的磁性	33
一、	原子的电子结构、过渡元素	33
二、	电子的磁性	39
第二节	化学键与大块材料的磁性	41
第三节	交换作用与强磁性	43
第四节	强磁性的形成条件及物质磁性的分类	47
第五节	磁性材料中的磁畴结构	47
第六节	多畴结构的成因	50
第七节	影响磁畴结构的因素	51
一、	磁晶各向异性	51
二、	磁致伸缩及磁弹性能	53
第八节	磁化过程	55
第九节	磁化过程的阻滞	57
第四章	金属学的基本概念	59
第一节	晶体的特征和表示法	59
一、	金属和合金	59
二、	晶态材料和非晶态材料	60
三、	常见的金属晶格类型	64
四、	晶向指数和晶面指数	65
第二节	金属的结晶过程——成核和长大	69
一、	自发成核和非自发成核	71
二、	晶核的长大	74
三、	单晶体和多晶体	76
第三节	合金的相结构	80
一、	固溶体	81
二、	金属间化合物	82
第四节	合金的相图	83
一、	什么是相图?	83
二、	二元系合金相图的特点	84

三、二元系合金典型相图分析	89
四、三元系合金的相图	100
第五节 固态金属中的扩散	106
第六节 塑性变形、回复和再结晶	110
一、金属变形的三个阶段	110
二、塑性变形对金属材料的组织和性能的影响	113
三、回复和再结晶	115
第七节 合金中的固态转变	118
一、同素异晶转变	118
二、有序无序转变	120
三、马氏体型转变	121
四、过饱和固溶体的分解	124
第八节 热处理	127
一、一般热处理	128
二、真空热处理	130
三、气氛热处理	131
四、磁场热处理	131
第五章 金属磁性材料	133
第一节 衡量软磁合金性能的重要指标	134
一、直流应用和交流应用	134
二、交流应用中的能量损耗	136
第二节 提高软磁合金磁性能的基本途径	142
一、初始磁导率	142
二、交流磁化时的能量损耗	146
第三节 纯铁和低碳钢	150
一、纯铁	150
二、低碳钢	153
第四节 铁硅合金	154
一、铁硅合金相图	156
二、硅对合金性能的影响	157
三、非取向硅钢	158
四、晶粒取向硅钢	160

第五节 镍铁合金	168
一、镍铁合金相图	169
二、镍铁合金的物理性能和机械性能	170
三、合金成分对磁性能的影响	172
四、镍铁合金的主要类别	179
五、高初始磁导率合金	181
六、矩磁合金	183
七、恒磁导合金	185
八、具有特殊用途的其它镍铁合金	186
第六节 其它软磁合金	187
一、铁钴合金	187
二、铁铝合金和铁硅铝合金	191
三、铁粉芯	198
第七节 软磁合金应用举例	200
一、电磁感应	201
二、磁屏蔽	203
三、磁致伸缩	206
四、磁性力	207
五、矩形磁滞回线	208
第八节 衡量永磁材料性能的重要指标	210
第九节 提高永磁合金磁性能的基本途径	218
一、剩磁 B_r	218
二、矫顽力 H_c	219
第十节 铝镍钴永磁合金	223
一、铝镍钴合金相图	224
二、影响铝镍钴合金磁性能的主要因素	227
三、铝镍钴合金矫顽力的起因	232
四、铝镍钴合金的磁性能	239
第十一节 稀土永磁合金	239
一、概述	239
二、稀土钴永磁合金的相图及晶体结构	241
三、稀土钴永磁合金的制造工艺	243
四、稀土钴永磁合金的磁性能	244

五、钕铁硼永磁合金	246
第十二节 可加工永磁合金	249
一、铁铬钴永磁合金	249
二、铜镍铁永磁合金	255
三、铂钴和铂铁永磁合金	255
四、铁钴钒永磁合金	257
五、锰铝碳永磁合金	257
第十三节 半硬磁合金	258
第十四节 液态急冷永磁合金	259
第十五节 永磁合金应用举例	262
一、磁电式仪表	263
二、扬声器	266
三、永磁电机	267
四、磁力的应用	270
五、电子束控制器件	273
第十六节 非晶态磁性合金	276
一、概述	276
二、非晶态合金的制造方法	279
三、过渡金属-类金属非晶态合金的磁性	285
四、过渡金属-类金属非晶态磁性合金的应用	296
五、稀土-过渡族非晶态合金薄膜的磁性	300
六、稀土-过渡族非晶态合金薄膜的应用	305
第六章 铁氧体磁性材料	310
第一节 铁氧体——古老而年轻的磁性材料	310
第二节 铁氧体的三大晶系	312
一、尖晶石型铁氧体	312
二、磁铅石型铁氧体	316
三、石榴石型铁氧体	319
第三节 铁氧体的磁性——亚铁磁性	320
第四节 多晶铁氧体的制备	326
第五节 单晶铁氧体的制备	334
一、布里吉曼法	334

二、拉晶法	335
三、熔剂法	336
第六节 铁氧体薄膜的制备	337
一、铁氧体单晶薄膜的制备	337
二、铁氧体多晶薄膜的制备	339
第七节 永磁铁氧体	340
第八节 软磁铁氧体	346
第九节 旋磁铁氧体	354
第十节 压磁铁氧体	359
第十一节 磁记录材料	360
一、磁头材料	361
二、磁带材料	363
第十二节 磁泡材料	364
第十三节 磁光材料	366
第十四节 磁性液体	367
第七章 磁性材料的检验和测量	370
第一节 磁场的产生	370
一、直流磁场线圈	370
二、电磁铁	374
三、脉冲磁场	377
四、充磁问题	379
第二节 磁场的测量	383
一、利用电磁感应的方法	384
二、利用由磁场引起的物理变化的方法	394
三、利用核磁共振的方法	396
第三节 磁性材料静态磁性能的检验和测量	397
一、冲击法测量软磁环形试样的磁性	398
二、冲击法测量硬磁材料的磁性	406
三、高矫顽力硬磁材料的测量	412
四、静态磁性自动测量简单介绍	413
第四节 磁性材料动态磁性的检验和测量	415
一、交流磁化曲线的简单测量	415

二、交流磁滞回线的测量和观察	419
三、交流磁性自动测量介绍	425
第五节 复数磁导率及损耗测量	429
一、复数磁导率 μ_1, μ_2 及电桥法测量	429
二、 Q 量计在磁测量中的应用	433
三、其它谐振法测复数磁导率	435
四、软磁材料损耗的测量	438

第一章 磁现象和电磁现象

第一节 静磁现象

一、永磁体和磁场

天然磁石是人类最早认识的一种磁性材料，它的主要成分是四氧化三铁。根据现代的研究，它是一种尖晶石结构的铁氧化物磁性材料。随着科学和工业的发展，人类已经制出了许多与天然磁石相似但性能远比天然磁石优良的材料。这类材料的特点是，它们本身具有吸铁的能力(实际上是吸引所有强磁性材料，如铁、钴、镍、硅钢片、铁氧化物等)。这种本身能吸

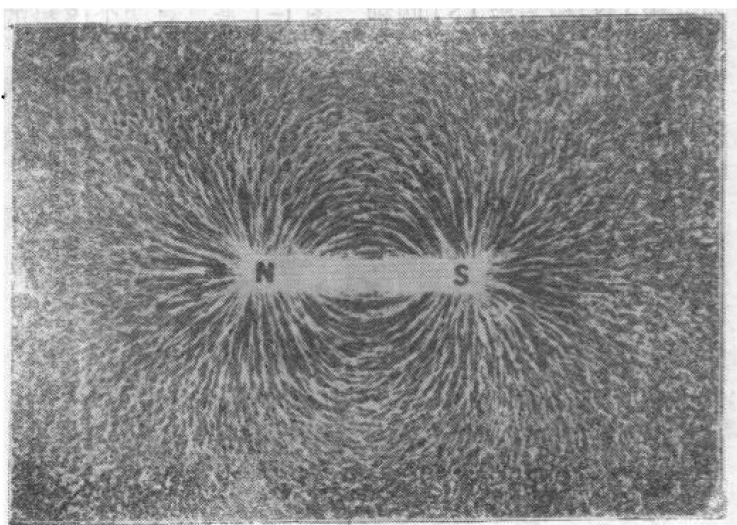


图 1-1 条形磁体周围的铁屑分布图

引强磁性物质的材料一般叫做永磁材料(也叫硬磁材料,恒磁材料)。

从图 1-1 我们可以看到一条形永磁体周围的空间与普通空间有所不同,它具有吸引铁屑的能力。现代物理理论指出,永磁体在它的周围产生了一个磁场,这个磁场对磁性材料产生作用。磁场是场的一种,而场是物质存在的一种形态。这里应顺便说明,不仅磁性物质能产生磁场,电流也能产生磁场。

二、永磁体的性质

仔细考察永磁体,可以发现它们具有如下的特点。

1. 磁极

在永磁体的某些部分,铁屑分布最密集,我们把这些区域叫做磁极。实际上,它们是永磁体磁性最强的部分。磁极可分为北极(N)和南极(S)两种。图 1-1 是具有两个磁极的条

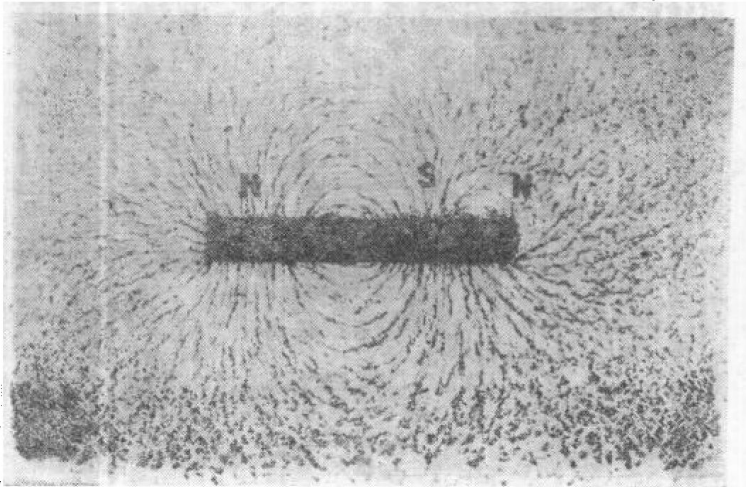


图 1-2 具有三个磁极的条形磁体周围铁屑的分布

形永磁体,而图 1-2 则是具有三个磁极的条形永磁体。

如将图 1-1 那种具有两个磁极的磁体拦腰折断,结果并不是一段变为 N 极,另一段变为 S 极,而是变成两块较小的条形永磁体,各有一个 N 极和一个 S 极,如图 1-3 所示。在磁性材料中, N 极或 S 极不会单独存在。

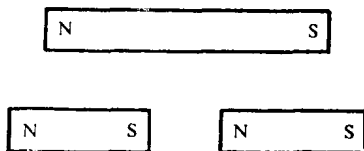


图 1-3 一块长磁体折断后变为两块小磁体

研究发现,磁体上的这种磁极是由磁化的不均匀和不连续产生的。如能消除这种不均匀和不连续,就能消除磁极。比如拿一只高碳钢的圆环(高碳钢是一种永磁材料),将它沿圆周磁化,如果高碳钢质地均匀,制成圆环后内部既无空洞又无裂缝,那么这一圆环的磁化既没有不连续又没有不均匀,它也就不会显现出磁极。

在原子、电子的微观范畴内究竟是否存在独立的磁极——磁单极子呢?这是现代物理学正在探索的几个重大课题之一。从理论上说,它是可能存在的,但在实验上至今尚未得到证实。

2. 指向性

将一块具有两个磁极的条形永磁体用细线水平悬挂起来,它的北极会指向北方,南极会指向南方。如将条形永磁体上连接北极和南极的直线称为磁轴,那么磁轴的方向就是南北方向。这就是用磁针来制造指南针所依据的原理。