



金属磁性材料

上海人民出版社

金属磁性材料

戴礼智 编著

上海人民出版社

内 容 提 要

磁性材料为电器电机、电子工业、仪表制造、自动传动及计算技术领域中的应用的材料，也是现代磁学发展的基础。由于近年磁学及磁性材料迅速的进展，内容极为丰富，本书以少而精为目标，提供较为全面但仍属导论性质的在金属磁性材料这一支科的系统介绍。

全书共分十二章。头三章阐述物质的磁性，材料的畴结构和金属与合金的某些特性。随后各章论述软磁材料、永磁材料、金属薄膜及磁弹性材料等。末尾几章使本书区别于一般有关磁性材料的著作，讨论了弱磁场与交变场中的行为，感生各向异性，反磁化过程及起始磁导率减落等问题。

本书可供冶金学、金属学、金属物理学、磁学以及磁性器件、电工材料等方面的研究和生产人员参考，并可作为广大科学爱好者的读物。

金 属 磁 性 材 料

戴礼智 编著

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海群众印刷厂印刷

开本850×1168 1/32 印张10.0625 字数246,000

1973年5月第1版 1973年5月第1次印刷

印数1—36,000

书号: 15171·96 定价: 0.85元

毛主席语录

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。

自然科学是人们争取自由的一种武装。……人们为着要在自然界里得到自由，就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然里得到自由。

古为今用，洋为中用。

序

人类在生产劳动中，不断地要求认识自然，改造自然。伟大领袖毛主席指出：“人的认识，主要地依赖于物质的生产活动，逐渐地了解自然的现象、自然的性质、自然的规律性、人和自然的关系”。磁的现象为物质的现象的一种，通过生产劳动和科学实验，人们逐步地对这些现象有所认识，但至今也不能说已经臻于完善了。随着工业的发展，磁性材料以及磁性器件广泛地为人利用，需要日益增多。近三十年来在磁性材料这一领域里取得了迅速的进展，但还是不能满足在这方面愈来愈高的要求。

伟大导师恩格斯指出：“辩证法在考察事物及其在头脑中的反映时，本质上是从它们的联系、它们的连结、它们的运动、它们的产生和消失方面去考察的。”磁学以及磁的现象在自然考察的各个领域中不是孤立的，孤立地考察往往不能使问题得到解决。物理学史中曾经记述，在十七世纪末，航海船只作星辰观测时发现了罗盘磁针因空中闪电袭击而反转了方向，指北一端反向指南。从而初步认识到自然界中电现象和磁现象的互相联系。1820年奥斯特发现，当电流通过铜线的时候，附近的指南针发生偏转。这一实验说明了磁和电的联系。十九世纪，在原子结构、热力学、电学和磁学各领域的实验中，有了丰富的发现，因而提出了其中有关规律性的解释，虽然这当中有许多研究者并不是自觉地运用了辩证方法。

物质的磁性，表现为顺磁性和逆磁性，以及近年在反铁磁性与亚铁磁性材料中自旋结构的实验，说明了物质运动的矛盾性。1831年法拉第的电磁感应实验也说明了物质运动的矛盾。他在解释物质的磁性时首先应用了磁场这一名词。上述两个基本的实

32189

• i •

验,明确了电动生磁和磁动生电这一辩证关系。可以说,今日的电工技术就是以这种辩证关系为基础的。

有关电子的实验,是从十九世纪过渡到二十世纪这个期间重要的科学发现。由于这一发现,使后来对磁性特别是金属的磁性得出了新的概念。同时,在金属的研究中发现,由磁性金属与非磁性金属组成的合金显示广阔的技术性能。在这方面,讨论电子运动的量子力学以及晶体物理学对金属磁性的研究起了重要作用。这为金属磁性材料的应用开辟了新的领域。

本书对金属磁性材料作了较为详细的讨论,但由于这一领域发展极为迅速,取材一定不尽合乎读者的理想和期待。近年来国内在这方面进展甚快,有关这方面的工作均未能提到。这主要是因为本书仍属于导论性质。另一原因是本书大部分于1965年写成,虽然在1972年增删和重写了一部分,但多迁就了原来的底稿。因此期待广大读者对本书提出宝贵意见,以便将来作出改进。

戴 礼 智

1973年1月 于北京

目 录

引 言	1
第一章 磁性材料的物理学基础	6
一、基本定义	6
二、原子的磁矩, 抗磁性	10
三、顺磁性	15
四、顺磁性理论	17
五、周期表中元素的顺磁性	20
六、铁磁性	22
七、外斯模型与自发磁化	27
八、居里点以上的顺磁性	31
九、伊馨模型	32
十、磁化过程的热力学	36
十一、周期表中的铁磁性元素	40
参考文献	44
第二章 铁磁行为与磁畴结构	45
一、晶体的各向异性	45
二、磁畴理论概述	49
三、畴壁与畴壁几何形状	54
四、铁中 180° 畴壁能与壁厚的计算	56
五、简单磁畴结构	61
六、磁畴的实验观察	66
七、反磁化过程中的畴壁位移	74
参考文献	76
第三章 金属与合金	77
一、单晶	77
二、晶体的形变	79

三、冷加工产生的晶体择优取向性·····	84
四、再结晶·····	86
五、相变与脱溶·····	89
六、掺杂与缺陷·····	94
参考文献·····	94
第四章 永磁材料·····	96
一、永磁材料发展简史·····	96
二、永磁材料的用途·····	99
三、永磁材料的标准·····	102
四、永磁材料的稳定性·····	106
五、工业用永磁钢·····	109
六、可加工的永磁合金·····	113
七、铸造铝镍钴永磁合金·····	117
八、微粉永磁材料·····	120
九、单畴粒子的矫顽力·····	121
十、稀土永磁合金·····	123
参考文献·····	127
第五章 硅钢片, 硅钢薄带·····	129
一、冶炼和其他元素的影响·····	132
二、硅铁合金的相图与金相组织·····	136
三、加工与最后退火·····	138
四、晶粒大小的影响·····	139
五、冷轧硅钢片的生产和最后退火·····	140
六、晶粒取向的影响·····	142
七、掺杂对磁性的影响·····	150
八、立方织构硅钢片·····	151
九、硅钢片磁性的改进·····	161
参考文献·····	163
第六章 软磁材料·····	166
一、软磁材料发展概述·····	166
二、工业纯铁·····	168
三、羰基铁·····	170

四、电解铁	171
五、工业用纯铁的再提纯	172
六、纯铁的性能	172
七、镍铁合金及坡莫合金	177
八、二元镍铁合金的应用	187
九、镍铁合金的再结晶织构	189
十、矩形磁滞回线材料	191
十一、三元及多元镍铁基合金	194
十二、等导磁合金	199
十三、铁钴合金	200
十四、铁铝合金	202
参考文献	207
第七章 铁磁材料的弹性行为	210
一、 $4E$ 效应	213
二、爱林瓦合金的性能	215
三、机械阻尼	217
四、机械滤波	220
参考文献	222
第八章 金属薄膜	223
一、薄膜的制备	223
二、薄膜的磁性	224
三、各向异性	226
四、薄膜的低频测试	229
五、薄膜的动态性能	229
六、薄膜的共振实验	233
七、磁通反转	233
八、坡莫合金的畴壁结构	235
九、磁膜的应用	235
参考文献	236
第九章 磁场处理与感生各向异性	238
一、软磁材料的磁场热处理	238
二、永磁材料的磁场热处理	242

三、单轴各向异性	242
四、方向有序理论	246
五、方向有序理论的实验证明概述	252
参考文献	253
第十章 弱磁场与交变场中的磁特性	255
一、瑞利回线	256
二、在低磁通密度的磁滞测试	261
三、瑞利区域中的交流测试	264
四、复数磁导率	265
五、涡流对磁导率的影响	267
六、磁后效简述	271
七、自旋弛豫	276
参考文献	280
第十一章 反磁化过程	281
一、西克斯突斯-汤克斯实验	281
二、小回线	284
三、计算技术应用	288
四、多晶材料磁通反转模型讨论	294
参考文献	297
第十二章 铁磁后效及起始磁导率减落	298
一、猴基铁磁后效的研究	299
二、热波动后效	302
三、取向后效与扩散后效	304
四、高温下的磁导率减落及与频率的关系	311
参考文献	311

引 言

磁性材料为现代科学研究与应用研究的产物，并由于已建立起较完整的理论和具有独特的实验方法而形成一门专门的科学。磁性材料本身则为电力工业、电信工业、仪表工业和计算技术所不可缺少的材料。近年由于较易进行解释分析的材料（如微粉永磁材料）的发现，磁性材料的基本研究与技术应用更是日益紧密地结合起来。这一领域具有极为丰富的内容，最近三十多年来的发展尤其迅速。

金属磁性材料为磁学的应用，内容涉及现代冶金工艺、金属学及金属物理学以及有关电学、电工学、无线电电子学等学科的知识，成为一支边缘学科。

磁性金属与合金的研究，以及成分、结构和制备方法对合金性能的影响，引起了人们广泛的注意。磁性与其他物理性能之间的关系的了解，又进一步为我们提供了一系列有关考察材料的方法，而这些方法对于研究金属与合金的组成和微观结构正愈益显得重要。

1. 我国古代的发明 在很早的时候，中国就有了指南针的发明。据有关考证，我国在战国时代已有用天然磁铁矿琢磨成的指南针，称为“司南”。最早的记载见于韩非子《有度篇》，其著作年代约在公元前三世纪。指南针的发明标志着人类文明的一大进步。



我国古代的指南针——司南

我国古代典籍中最早提到磁石吸铁现象的为《吕览》，在《精通篇》一文中“磁”字作“慈”，据说是取磁石吸铁有如慈母怀子之意。西汉刘安等著《淮南子》中说：“磁石能引铁，及其于铜则不行也。”曹植(192~231)的《矫志》诗中则有“磁石引铁，于金不连”的诗句。由天然磁石改为人工的磁铁，见于《武经总要》。该书为宋代所辑，记述了这样的制作情况：以铁剪成鱼形，经淬火及磁化手续而赋磁性，“令浮水面，以指南北。”

宋代沈括(1030~1094)为我国古代有名的数学家和仪器制造家，在他所著的《梦溪笔谈》*一书里，对于磁石磨成的指南针已有详细记载。朱彧所著《萍洲可谈》中记载了约在1086~1099年间，船舶在苏门答腊间航行时，在大海中“夜则观星，昼则观日，阴晦则观指南针”等情况。在徐竟所著《宣和奉使高丽图经》一书中也提到指南针在航海中的应用。而欧洲关于磁针的记录为时都较晚**。

现在，凡因具有磁性而被利用如铁一类的物质，我们称为磁性材料或铁磁材料。磁性材料在现代工业中有着重要的应用。如果没有磁性材料，电的产生、输送和利用，有线电与无线电的应用，以及现在的电子工业，都将受到严重的限制，甚至成为不可能。

2. 磁学的历史发展 吉柏(Gilbert 1540~1603)开始了磁石的实验研究。库仑(Coulomb 1736~1806)总结出了磁极的排斥与吸引力与其距离的平方成反比这一规律。泊松(Poisson 1781~1840)应用微积分方法能描述任意分布的永磁性磁极间存在的相互作用，开始了静磁学。

今天我们了解到的泊松的工作，主要从格林(Green 1793~1841)所扩展和解释的而来。泊松的工作简单而精确地描写了磁体间相互作用的力，但没有接触到力的实际来源。这一物理学问题的进展开始于安培(Ampère 1775~1836)。安培的工作系从奥

* 梦溪笔谈，卷24，杂志，第27条；补笔谈，卷3，第18条。

** Bozorth, R. M: Magnetism, *Encyclopaedia Britannica*.

斯特 (Oersted) 于 1820 年发现的电流产生磁场的基础出发, 每个原子被假设为含有一环形的电流 (现在常称为“安培电流”)。奥斯特从 1807 年就开始实验, 经过多次失败, 到 1820 年才求得电与磁之间的联系。在本书第一章中我们将指出“安培电流”相当于一磁偶极子, 因此含有众多原子的物质的磁化可以描述为若干相等的原子偶极子的取向。

安培的概念为韦伯 (Weber 1804~1891) 所发展, 他考虑了单元磁体间的相互作用。麦克斯韦 (Maxwell 1831~1879) 进一步发展了包含有磁滞现象的理论, 他假设单元磁体被转动超出一临界量, 它是处于不稳定的平衡态并跃迁到新的位置。他们的概念都以定性的形式在我们现在的理论中存在着。

3. 磁学的原子统计处理 在经典物理基本定律建立以后, 物理学者陆续发现了电子、原子核等粒子, 并建立了原子结构的现代理论。有些物理学者考察物质的力学、热学及磁学的性能, 企图从这些性能了解基本规律的运行。这两方面都牵涉大量的质点, 似乎是一个复杂的问题。统计方法使这些问题得以简化。

铁磁理论系从朗之万 (Langevin 1872~1946) 顺磁性气体处理而来。在朗之万理论中简单地假设每个分子有固定的磁矩, 而磁轴可以旋转到任何方向。适当的统计处理和有关磁质点相互作用的假设, 使得许多性能得到满意的解释。

4. 铁磁性的热力学处理 本世纪初, 有许多化学和物理学的问题用热力学来解释, 成效甚大, 因此铁磁行为也从这个观点来进行研究和讨论。应用磁能的表达式, 借助热力学定律, 可以联系到许多磁性现象, 例如磁化变化所产生的长度变化和长度变化所产生的磁化变化等。在磁性作为一种综合的现象的研究中, 热力学的相转变理论有了重要的进展。

5. 分子场理论 外斯 (Weiss 1865~1940) 应用朗之万在温度效应上所得的结果, 企图定量地描述铁磁性。他假设了单元磁

体的交互作用,引入“分子场”这一概念。外斯理论使磁学向前迈进了一步。

在外斯假设的基础上,海森伯格(Heisenberg)提出了原子内部电子的交换相互作用。交换相互作用使相邻原子中电子自旋趋于平行或反平行(指电子自旋方向排列)。如相邻原子间距离大于三个或四个原子,交换相互作用随着距离增大而急速减弱。佩斯(Bethe)指出相互作用能为过渡元素晶体中原子间距的函数。

按照外斯理论,铁磁材料在无外加场下即行磁化,称为自发磁化。为了不与实际经验相矛盾,外斯建议“磁畴”的存在。在本书第二章中我们将对磁畴结构以及由它而连系到的铁磁材料的性能进行叙述。

6. 铁磁理论现况* 今天大部分铁磁理论还是应用经典物理学的概念而没有应用量子理论。但与外斯时代不同,今天是从量子理论的电子波动定律引导出铁磁材料的性能。这个目的从三个方面来努力。

第一方面即关于铁磁材料技术上有兴趣的性能还不能由简单的假设给出,因为这些性能依赖于被忽略了交换作用和晶体点阵缺陷。量子理论只能定性地阐明交换作用和为定量地考虑关于居里温度和对于绝对零度饱和磁化值与成分的关系提供说明,也能进一步提供材料的晶能和磁致伸缩常数的数值。

第二方面称为“微磁学”**,通过铁磁晶体中与地区有关联的磁化矢量来描述铁磁材料的状态。按照兰道(Ландау)和里弗西茨(Лифшиц)的假设,所有作用于自旋上的转矩允许归纳为场的转矩形式并描写成一有效场,总结为外场、交换场、内场、各向异性和阐明弹性与范性形变的影响等五项之和。因此在微磁学基础上有可能说明材料中的点阵缺陷对磁化的影响。

* Döring, W.: *Z. Angew. Phys.*, 1964, **17**, 120; *Physikertag Hamburg*, 1963.

** micromagnetics (参阅 Brown, Jr., W. F.: *Micromagnetics*, 1963.)

第三方面是建立在实验基础上的磁畴理论，其目的在于阐明宏观现象的意义。而磁畴理论每前进一步又需要实验为之证实。这些实验与理论的结合，已成为材料研究和发展的依据。

7. 铁磁学在现代的重要性 如上所述，铁磁学为磁性材料的基础。早先有关磁性材料的叙述和讨论均附于铁磁学的著作中。有时磁性材料几占铁磁学专著一半以上的篇幅，如波佐思 (Bozorth) 所著的《铁磁学》。看来有时很难将磁性材料与铁磁学分开。

磁化现象，特别是铁磁材料的磁滞现象，使我们了解到磁性为结构与组成的敏感函数。因此近年来金属与合金的磁性研究引起了很多冶金学者的注意*。在本书第三章中我们将简单地对研究磁性材料所需要的有关金属与合金方面的知识作一介绍。

8. 磁性材料的工业重要性 冶金及各有关工业部门正在努力发展材料的生产，力求满足各方面的需要。各工业生产部门都要求产品的高质量和低成本，并具备适合特殊用途的性能，而产品的性能又与材料的处理、加工、加热和冷却有很大关系。因此现代新工艺正在不断地用于材料的生产方面。随着许多新兴工业和新技术的发展，对磁性材料不断提出了更高和更多的要求，例如在电子工业的微型化以及空间动力系统、宇宙航行控制系统等方面，这种情况非常突出。

本书从第四章起将分别对各类金属材料进行阐述。每章的内容都可以扩充成为专著。现在将它们综合在一本小册子里，只能说是便于读者获得整个概貌。

自从 1945 年氧化物的磁性重新为人们仔细地进行研究以后 (古代已知的磁性铁矿石 $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ，即简单的铁氧体)，发展了一系列在工业上有重要应用的铁氧体材料。作为磁性材料整个领域，自不能将铁氧体排除在外。但本书既已定名为金属磁性材料，因此不讨论到铁氧体。

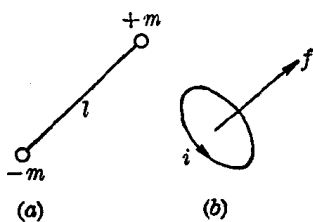
* 例如参阅 Beck, P. A.: 《合金中磁性研究的某些结果》 *Metallurgical Trans.*, 1971, 2, 2015。

第一章

磁性材料的物理学基础

一、基本定义

1. 偶极 一般将磁极描写为“偶极”或称“偶极子”，即两个相



等而相反的磁荷 $+m$ 与 $-m$ ，它们之间的距离为 l 。矢量 l 指向从“ $-$ ”到“ $+$ ”。偶极矩 $\mathbf{p} = m\mathbf{l}$ 。同样，我们可以用一环形电流来描绘磁偶极 (图 1-1)。

图 1-1 磁偶极

设环形电流为 i ，环的面积为 f 。

以 \mathbf{f} 表示矢量，它的量等于所包含的面积。矢量 \mathbf{f} 垂直于表面并与电流方向 i 组成一右手螺旋，这个磁偶极具有磁矩 \mathbf{p}^* ，

$$\mathbf{p} = \frac{i}{c} \mathbf{f} \quad (1-1)$$

当 $i \rightarrow \infty$ ， $f \rightarrow 0$ ，乘积保持常数。式中 c 表示常数。

2. 磁化 上述磁偶极只是一个数学的假设。对于实际磁性物体，我们通过下列定义引用磁化的概念。设物体的体积单元为 dV ，这单元代表一个偶极磁矩

$$\mathbf{p} = \mathbf{J} dV \quad (1-2)$$

矢量 \mathbf{J}^{**} 通过上式定义为磁化。比较不严格地说， \mathbf{J} 为单位体积的磁矩。 \mathbf{J} 一般是一个与地区有关的矢量。如果在已磁化的物体中磁化为常数，我们称这物体为均匀磁化。

* 在磁学书中，也常用字母 μ 表示磁矩，但勿与表示磁导率的 μ 混同。

** 在本书中用字母 J 表示磁化；别的书中一般用 I ，也可以用 M 。

3. 磁场 从偶极而来的磁场可以借泊松引入的位势 φ 这一概念来表示。它在任何一点与偶极的距离为 r ($r \gg l$) 时, 位势可以作如下的引伸: 如 r_1 与 r_2 系从极到已知点的距离 (图 1-2), 而 θ 为 \mathbf{p} 与 \mathbf{r} 间的夹角 ($\mathbf{p} = m\mathbf{l}$), 则

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{m}{r_1} - \frac{m}{r_2} \\ &= \frac{m}{r - \frac{l}{2} \cos \theta} - \frac{m}{r + \frac{l}{2} \cos \theta} \\ &= \frac{m}{r} \left(\frac{1}{1 - \frac{l}{2r} \cos \theta} - \frac{1}{1 + \frac{l}{2r} \cos \theta} \right) \\ &= \frac{ml}{r^2} \cos \theta \quad \left(\text{含有 } \frac{l^2}{r^2} \text{ 的项忽略不计} \right) \end{aligned} \quad (1-3)$$

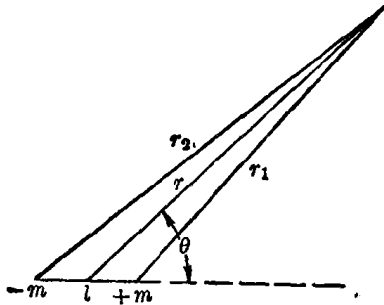


图 1-2 偶极的磁场

我们已经假定 p 为偶极的强度, 也就是磁矩, 上式可以写为 $-\mathbf{p} \cdot \nabla \frac{1}{r}^*$, 我们即得到从偶极引出的磁场的式子:

$$\mathbf{H} = -\nabla \left(-\mathbf{p} \cdot \nabla \frac{1}{r} \right) = -\frac{\mathbf{p}}{r^3} + \frac{3\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{r^5} \mathbf{r} \quad (1-4)$$

4. 电在运动中的磁作用 奥斯特于 1820 年发现电流产生磁的作用。这一作用可以用数学式表示, 单元电流 $d\mathbf{i}$ 在距离 \mathbf{r} 产生微小的磁场 $d\mathbf{H}$,

* $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}$, 式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 为单位矢量, 平行于正交坐标系的 x, y, z 轴。