



图解

磁性材料

田民波 编著



指南针大家都见过，磁铁大家都玩过，
看不见、摸不着的**磁力线**呢？

手机、电视、随身听；飞机、火车、大轮船；
哪一样都离不开**磁性材料**。



化学工业出版社



图解

磁性材料

田民波 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《图解磁性材料》是“名师讲科技前沿系列”中的一本，内容包括材料磁性之源，磁化、磁畴和磁滞回线，铁氧体磁性材料，常用软磁材料，永磁材料及其进展，钕铁硼永磁材料，磁路计算和退磁曲线，磁性材料的应用等内容。涉及磁性材料的方方面面。

针对入门者、制作者、应用者、研究开发者、决策者等多方面的需求，本书在掌握大量资料的前提下，采用图文并茂的形式，全面且简明扼要地介绍磁性的原理，磁性材料的制作工艺以及磁性材料的新进展、新应用及发展前景等。采用每章之下“节节清”的论述方式，图文对照，并给出“本节重点”。力求做到深入浅出，通俗易懂；层次分明，思路清晰；内容丰富，重点突出；选材新颖，强调应用。千方百计使磁性材料的相关知识新起来、动起来、活起来，做到有声有色。

本书可作为材料、机械、微电子、计算机、显示器、精密仪器、汽车、物理、化学、光学等学科本科生及研究生教材，对于相关领域的科技、工程技术人员，也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

图解磁性材料 / 田民波编著. —北京：化学工业出版社，2019.1

(名师讲科技前沿系列)

ISBN 978-7-122-33088-8

I. ①图… II. ①田… III. ①磁性材料—图解 IV. ①TM27-64

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第219727号

责任编辑：邢涛

文字编辑：陈雨

责任校对：宋夏

装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）

印装：北京新华印刷有限公司

880mm×1230mm 1/32 印张8 字数224千字 2019年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888

售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：49.00元

版权所有 违者必究

前 言

受惠于电子技术和数字化的飞快发展，我们身边的信息设备及家电制品不断高性能化，使我们的生活日益高效便捷。与此同时，装置日益轻薄短小化，过去难以想象的复杂装置，变为今天可以装在便服口袋中的袖珍产品。例如，智能手机、小型信息终端、无人机、肠内检查用的胶囊照相机、IC卡等。在这些高技术产品中，使用了大量的磁性材料。磁性器件的绝对数量可能不多，但其作用不可替代，对于电子设备的高品质化、高性能化、节能化起着至关重要的作用。

磁性材料按其功能，可分为几大类：①易被外磁场磁化的磁芯材料；②可产生持续磁场的永磁材料；③通过变化磁化方向进行信息记录的磁记录材料；④通过光（或热）使磁化发生变化进行记录与再生的光磁记录材料；⑤在磁场作用下电阻发生变化的磁致电阻材料；⑥因磁化使尺寸发生变化的磁致伸缩材料；⑦形状可以自由变化的磁性流体等。磁性材料是多种多样的。

利用上述功能，人们在很早以前就开始制作指南针、变压器、马达、扬声器、磁致伸缩振子、记录介质、各类传感器、阻尼器、打印机、磁场发生器、电磁波吸收体等各种各样的磁性器件。在由上述器件组成的设备中，除了机器人、计算机、工作母机等产业机械之外，我们身边的汽车、电脑、音响设备、电视机、录像机、电话、洗衣机、吸尘器、电子钟表、电冰箱、空调器、电饭锅、电表等不胜枚举，应用磁性材料的机器多得令人吃惊。

近年来的磁性材料，在非晶合金、稀土永磁化合物、超磁致伸缩、巨磁电阻等新材料相继发现的同时，得益于组织的微细化、晶体学方位的控制、薄膜化、超晶格等新技术的开发，其特性显著提高。这些不仅对电子、信息产品等特性的飞跃提高做出了重大贡献，而且成为新产品开发的原动力。目前，磁性材料已成为支持并促进社会发展的关键材料。

本书第1、2章讨论磁性和磁学的一些基本概念，以便对磁性材料的基本问题有较深入的了解；第3~6章将分别针对具体的磁性材料进行讨论，包括磁性特征、制备及性能改进；第7、8章针对磁性材料的应用，专门讨论磁路计算和退磁曲线以及硬磁材料的典型应用。

物质的磁性并不起因于自由电子而是源于受电子核束缚的壳层内的电子，进一步讲是源于壳层内不成对电子的自旋磁矩（Fe、Co、Ni及其合金的磁性）和轨道磁矩（稀土永磁的磁性）。一方面，对于初学者来说，磁学比电学要难得多。但从另一方面讲，对磁性材料相关知识的掌握，有利于读者跨入功能材料的广阔领域。

针对入门者、制作者、应用者、研究开发者、决策者等多方面的需求，本书在论述中尽量避免或少用数学公式，注意对专用

名词术语的解释。在掌握大量资料的前提下，采用图文并茂的形式，全面且简明扼要地介绍芯片工作原理，磁性材料的制作工艺、新进展、新应用及发展前景等。采用每章之下“节节清”的论述方式，图文呼应，并给出“本节重点”。力求做到深入浅出，通俗易懂；层次分明，思路清晰；内容丰富，重点突出；选材新颖，强调应用。千方百计使磁性材料的相关知识新起来、动起来、活起来，做到有声有色。

本书的内容既不同于磁学基础理论，又有别于磁性材料的加工工艺，而是从材料科学的角度论述磁性材料，重点讨论磁性材料微观结构与宏观性能之间的关系。为此，本书将涉及原材料、冶炼加工、热处理、特殊加工、组织结构调整与控制等。分析这些因素对于磁性材料在原子、电子结构层次、晶体结构层次、相结构层次的微观组织结构中有什么作用，使其发生什么变化，进而对宏观性能产生什么影响等，从而使读者对各类磁性材料的理解、使用，提高原有磁性材料的性能，对新型磁性材料的研究、开发，有所启发与帮助。

本书可作为材料、物理、机械、化学、微电子、计算机、精密仪器等学科本科生及研究生学习，对于相关领域的科技、工程技术人员，也有参考价值。

本书得到清华大学本科教材立项资助，并受到清华大学材料学院的全力支持，在此致谢。作者水平和知识面有限，不妥之处恳请读者批评指正。

田民波

2019年1月

目 录

第 1 章 材料磁性之源

1.1 磁性源于电流, 磁力之源是电子的自旋运动	2
1.1.1 “慈石召铁, 或引之也”	2
1.1.2 磁性源于电流	4
1.1.3 铁磁性之源	6
1.1.4 按物质对磁场的反应对其磁性进行分类	8
1.1.5 按磁化曲线对材料磁性分类	10
1.2 磁矩、磁化率和磁导率	12
1.2.1 磁通密度、洛伦兹力和磁矩	12
1.2.2 何谓材料的磁导率	14
1.2.3 元素的磁化率及磁性类型	16
1.3 铁、钴、镍磁性之源	18
1.3.1 3d壳层的电子结构	18
1.3.2 某些 3d 过渡金属原子及离子的电子排布及磁矩	20
1.3.3 3d 原子磁交换作用能与比值 a/d 的关系	22
1.3.4 Fe 的电子壳层和电子轨道, 合金的磁性	24
1.4 稀土元素磁性之源	26
1.4.1 稀土元素	26
1.4.2 稀土元素的主要用途	28
书角茶桌	
地磁场消失则会导致天下大乱	30

第2章 磁化、磁畴和磁滞回线

2.1 磁化、磁畴及磁畴壁的运动	32
2.1.1 磁性体的自发磁化和磁畴的形成	32
2.1.2 磁畴	34
2.1.3 磁畴结构及磁畴壁的移动	36
2.1.4 外加磁场增加时,磁畴的变化规律	38
2.1.5 顺应外磁场的磁畴生长、长大和旋转, 不顺应的收缩、消亡	40
2.2 决定磁畴结构的能量类型	42
2.2.1 决定磁畴结构的能量类型之一	42
2.2.2 决定磁畴结构的能量类型之二	44
2.2.3 决定磁畴结构的能量类型之三	46
2.2.4 决定磁畴结构的能量类型之四	48
2.3 磁滞回线及其决定因素	50
2.3.1 铁磁性体的磁化曲线	50
2.3.2 磁滞回线的描画及磁滞回线意义	52
2.3.3 何谓软磁材料和硬磁材料	54
2.3.4 铁磁体的磁化及磁畴、磁畴壁结构	56
2.3.5 铁磁体的磁滞回线及磁畴壁移动模式	58
2.3.6 磁畴壁的种类和单磁畴的磁化曲线	60

书角茶桌

梦幻般的单极子	62
---------	----

第3章 铁氧体磁性材料

3.1 铁磁性材料和亚铁磁性材料	64
3.1.1 铁磁性和亚铁磁性的差异之源	64
3.1.2 软磁铁氧体的晶体结构及正离子超相互作用模型	66
3.1.3 多晶铁磁性的微观组织	68
3.1.4 软 (soft) 磁铁氧体和硬 (hard) 磁铁氧体的对比	70
3.2 软磁铁氧体材料	72
3.2.1 软磁铁氧体的磁学特征和应用领域	72
3.2.2 软磁铁氧体的结构及磁性	74
3.2.3 微量成分对 Mn-Zn 铁氧体的影响效果	76
3.2.4 软磁铁氧体的代表性用途	78
3.3 硬磁铁氧体和半硬质磁性材料	80
3.4 磁性材料的一些名词术语和基本概念	82

书角茶桌

受永磁体吸引的磁性液体	84
-------------	----

第4章 常用软磁材料

4.1 工业常用的高磁导率材料	86
4.1.1 高磁导率材料	86
4.1.2 铁中的磁畴及其在外磁场作用下的磁化变化	88
4.1.3 硅钢和坡莫合金	90

4.1.4	电磁钢板及在变压器中的使用	92
4.2	金属玻璃——非晶态高磁导率材料	94
4.2.1	非晶电磁薄带	94
4.2.2	非晶态金属与软磁铁氧体的对比	96
4.2.3	利用熔融合金甩带法制作非晶薄带	98
4.2.4	非晶态高磁导率材料的特性	100

书角茶桌

	由 N、S 磁极指路而行走的走磁性细菌	102
--	---------------------	-----

第 5 章 永磁材料及其进展

5.1	永磁材料的主要类型	104
5.1.1	好的永磁体需具备哪些条件	104
5.1.2	永磁材料的分类	106
5.1.3	高矫顽力材料	108
5.1.4	半硬质磁性材料	110
5.1.5	SmCo ₅ 系和Sm ₂ Co ₁₇ 系永磁体	112
5.2	铁氧体永磁材料	114
5.2.1	常用铁氧体磁性材料的分类	114
5.2.2	铁氧体永磁体与各向异性铝镍钴永磁体制作工艺的对比	116
5.2.3	铁氧体永磁体的制作工艺流程	118
5.2.4	铁氧体中有各向同性和各向异性之分	120
5.3	永磁材料的进展	122
5.3.1	高矫顽力材料的进步	122

5.3.2	从最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 看永磁材料的进步	124
5.3.3	实用永磁体的种类及特性范围	126
5.3.4	永磁体的历史变迁	128

书角茶桌

生物体内存在着指南针?	130
-------------	-----

第6章 钕铁硼永磁材料

6.1	钕铁硼永磁磁性的来源	132
6.1.1	稀土元素在永磁材料中的作用和所占比例	132
6.1.2	稀土元素4f轨道以外的电子壳层排列与其磁性的关系	134
6.1.3	一个 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 晶胞内的原子排布	136
6.2	钕铁硼永磁体的制作	138
6.2.1	钕铁硼永磁体及其制作工艺	138
6.2.2	Nd-Fe-B系烧结磁体的制作工艺及金相组织	140
6.2.3	Nd-Fe-B系快淬磁体的制作工艺及金相组织	142
6.3	钕铁硼永磁体的改进	144
6.3.1	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 单晶体的各向异性磁场与温度的关系	144
6.3.2	Nd-Fe-B永磁体中各种添加元素所起的作用及其原因	146
6.3.3	耐热 Nd-Fe-B系永磁体	148
6.3.4	提高 Nd-Fe-B永磁体矫顽力的方法	150
6.4	添加 Dy 的 Nd-Fe-B系合金	152
6.4.1	添加 Dy 的 Nd-Fe-B系永磁材料的研究开发现状	152
6.4.2	藉由晶粒微细化、原料粉末最佳化提高矫顽力	154
6.4.3	藉由界面纳米构造控制提高矫顽力	156

6.4.4	界面构造解析和矫顽力产生机制的理解和探索	158
6.5	黏结磁体	160
6.5.1	黏结磁体的优点及黏结磁体的分类	160
6.5.2	橡胶磁体和塑料磁体	162
6.5.3	黏结磁体的制造工艺	164
6.5.4	各类黏结磁体的退磁曲线	166

书角茶桌

N极和S极的边界究竟在哪里?	168
----------------	-----

第7章 磁路计算和退磁曲线

7.1	永磁体的磁路计算	170
7.1.1	磁导与磁导系数	170
7.1.2	铁片靠近永磁体时磁导系数会增大	172
7.1.3	磁路计算与电路计算的差异	174
7.1.4	若使永磁体各向异性化,磁力会变强	176
7.2	永磁材料的退磁曲线	178
7.2.1	对 $B-H$ 曲线和 $(BH)_{\max}$ 的理解	178
7.2.2	永磁体的退磁曲线中有 $B-H$ 特性和 JH 特性之分	180
7.2.3	稀土永磁材料的磁化曲线和退磁曲线	182
7.2.4	反磁场 $\mu_0 H_d$ 与永磁体内的磁通密度 B_d	184
7.2.5	退磁曲线与最大磁能积的关系	186
7.3	反磁场对永磁体的退磁作用	188
7.3.1	外部磁场造成的永磁体的退磁	188
7.3.2	永磁体的可逆退磁	190

7.3.3 永磁体的不可退磁	192
----------------	-----

书角茶桌

永磁体的磁力不会因为使用而降低	194
-----------------	-----

第8章 磁性材料的应用

8.1 各种电机都离不开磁性材料	196
8.1.1 电机使用量的多少是高级轿车性能的重要参数	196
8.1.2 软磁材料和硬磁材料在电机中的应用	198
8.1.3 直流电机和空心电机中使用的磁性材料	200
8.1.4 旋转电机、直线电机、振动电机中使用的磁性材料	202
8.1.5 感应式电动机的原理和使用的磁性材料	204
8.2 音响设备和传感器用的磁性材料	206
8.2.1 电机和扬声器的工作原理是可逆的	206
8.2.2 永磁扬声器的工作原理	208
8.2.3 利用霍尔元件测量场强	210
8.2.4 高斯计(磁强计)	212
8.2.5 磁通计(fluxmeter)	214
8.2.6 利用永磁传感器检测假币	216
8.2.7 铁氧体温控开关	218
8.3 磁记录材料	220
8.3.1 磁记录密度随年度的推移	220
8.3.2 硬盘记录装置的构成	222
8.3.3 垂直磁记录及其材料	224

8.3.4	热磁记录及其材料	226
8.4	光磁记录材料	228
8.4.1	光盘与磁盘记录特性的对比	228
8.4.2	光盘信息存储的写入、读出原理	230
8.4.3	可擦除、重写光盘	232
8.4.4	信息存储的竞争	234
附录一	CGS 单位制和 SI 单位制	236
附录二	磁通密度与磁传感器	237
附录三	磁通密度和磁通量的单位换算表	237
参考文献		238
作者简介		239

第 1 章

材料磁性之源

- 1.1 磁性源于电流，磁力之源是电子的自旋运动
- 1.2 磁矩、磁化率和磁导率
- 1.3 铁、钴、镍磁性之源
- 1.4 稀土元素磁性之源

书角茶桌

地磁场消失则会导致天下大乱

1.1 磁性源于电流，磁力之源 是电子的自旋运动

1.1.1 “慈石召铁，或引之也”

——中国古代四大发明之一的指南针中就使用了磁性材料

早在公元前3世纪，《吕氏春秋·季秋记》中就有“慈石招铁，或引之也”的记述，形容磁石对于铁片犹如慈母对待幼儿一样慈悲、慈爱。而今，汉语中“磁铁”中的“磁”，日语中“磁石”中的“磁”即起源于当初的“慈”。

司马迁在《史记》中，有黄帝在作战中使用指南车的记述，如果确实，这可能是世界上关于磁石应用的最早记载。

公元1044年出版的北宋曾公亮《武经总要》中描述了用人造磁铁片制作指南鱼的过程：将铁片或者钢片剪裁成鱼状，放入炭火烧红，尾指北方斜放入水，便形成带剩磁的指南针，可放在盛水的碗内，藉由剩磁与地磁感应作用而指南。《武经总要》记载该装置与纯机械的指南车并用于导航。宋朝的沈括在1088年著述了《梦溪笔谈》，是第一位准确地描述地磁偏角（即磁北与正北间的差异）和利用磁化的绣花针做成指南针的人，而朱彧在1119年发表了《萍洲可谈》，是第一位具体提到利用指南针在海上航行的人。有一种说法认为，马可·波罗带着中国人发明的罗盘返回欧洲，并对欧洲的航海业发挥了巨大作用。

指南针见图1-1，地磁磁场示意如图1-2所示。作为中国人引以为豪的四大发明之一，其中的关键就是磁性材料。

- (1) 中国古代四大发明之一的指南针中使用的是何种磁性材料？
- (2) 请介绍用人造磁铁片制作指南鱼的过程。
- (3) 请分析地磁场产生的根源是什么。

图 1-1 司南——中国发明的指南针

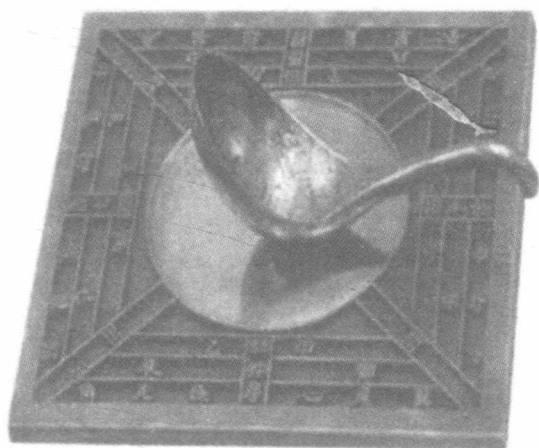
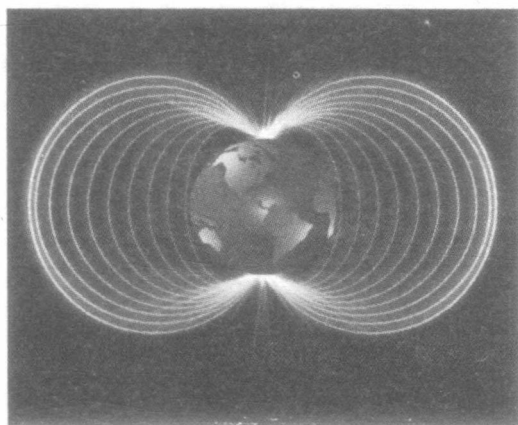


图 1-2 地磁磁场示意



1.1.2 磁性源于电流

——物质的磁性源于原子中电子的运动

早在 1820 年，丹麦科学家奥斯特就发现了电流的磁效应，第一次揭示了磁与电存在着联系，从而把电学和磁学联系起来。安培认为，任何物质的分子中都存在着环形电流，称为分子电流，而分子电流相当于一个基元磁体。当物质在宏观上不存在磁性时，这些分子电流做的取向是无规则的，它们对外界所产生的磁效应互相抵消，故使整个物体不显磁性。

在外磁场作用下，等效于基元磁体的各个分子电流将倾向于沿外磁场方向取向，而使物体显示磁性。这说明，磁性源于电流，而物质的磁性源于原子中电子的运动。

人们常用磁矩来描述磁性。运动的电子具有磁矩，电子磁矩由电子的轨道磁矩和自旋磁矩组成。在晶体中，电子的轨道磁矩受晶格的作用，其方向是变化的，不能形成一个联合磁矩，对外没有磁性作用。因此，物质的磁性不是由电子的轨道磁矩引起，而是主要由自旋磁矩引起。每个电子自旋磁矩的近似值等于一个波尔磁子。波尔磁子是原子磁矩的单位。图 1-3 表示物质磁性与原子磁矩的关系。

因为原子核比电子约重 1840 倍，其运动速度仅为电子速度的几千分之一，故原子核的磁矩仅为电子的千分之几，可以忽略不计。孤立原子的磁矩决定于原子的结构。原子中如果有未被填满的电子壳层，其电子的自旋磁矩未被抵消，原子就具有“永久磁矩”。

按物质对磁场的反应对其可分为图 1-3 及图 1-4 所示的四类：①强烈吸引的物质：铁磁性（包括亚铁磁性）；②轻微吸引的物质：顺磁性，反铁磁性（弱磁性）；③轻微排斥的物质：抗磁性；④强烈排斥的物质：完全抗磁性（超导体）。

本节重点

- (1) 物质磁性及磁现象的根源是什么？
- (2) 物质的磁性主要由电子的轨道磁矩还是自旋磁矩决定？
- (3) 说说你对抗磁性、顺磁性、反铁磁性、铁磁性、亚铁磁性的认识。