

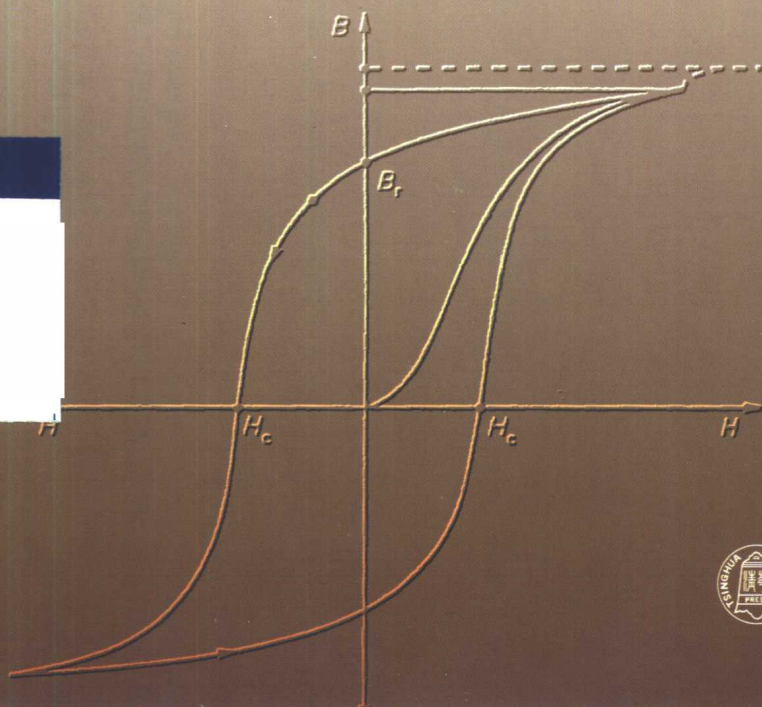
High  
New

新材料及在高技术中的应用丛书

Magnetic Materials

# 磁性材料

田民波 编著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

新材料及在高技术中的应用丛书

# 磁性材料

田民波 编著

清华大学出版社

**(京)新登字 158 号**

### 内 容 简 介

本书是《新材料及在高技术中的应用丛书》的第一本,主要涉及磁性材料原理,高磁导率材料、高矫顽力材料、磁性材料的各种效应,磁记录材料、光磁记录材料、粘结磁体、超导磁性及引人注目的新磁性材料等内容。

本书力求从材料电子结构及晶体结构两个层次上探讨材料磁性的本质,同时涉及制备工艺、性能及检测,特别强调磁性材料在高技术中的应用。

本书内容广泛,论述深入浅出,图文并茂,可作为大学材料、物理、电机、自动化、信息等专业本科生、研究生的教材,亦可作为理工科大学各专业师生及工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

磁性材料/田民波编著. —北京:清华大学出版社,2000

(新材料及在高技术中的应用丛书/田民波主编)

ISBN 7-302-04084-2

I. 磁… II. 田… III. 磁性材料-研究 IV. TM271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 75431 号

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 清华大学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×960 1/16 印张: 23.75 字数: 449 千字

版 次: 2001 年 4 月第 1 版 2001 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04084-2/TB·29

印 数: 0001~5000

定 价: 34.00 元



# 《新材料及在高技术中的应用丛书》序言

材料、信息技术与能源称为现代人类文明的三大支柱。国民经济的各部门和高技术领域的发展都不可避免地受到材料发展的制约或推动。材料科学技术为建设现代工业和现代农业提供基础物质,为传统产业的更新改造和高技术产业的兴起提供共性关键技术,也为国防建设提供重要的物资保证。实际上,新材料的发展水平已经成为衡量一个国家高技术水平高低和综合国力强弱的重要标志。

与此同时,人类已进入蓬勃发展的高技术时代。计算机、多媒体、移动电话、因特网、核能、航天和太空探索、激光、基因工程、克隆技术、电动汽车和高速火车等等,其中不少已经或即将涉及到我们的日常生活。

当前一些发达国家正集中人力、物力,寻求在新材料方面的突破。美国、欧共体、日本和韩国等在他们的最新国家计划中,都把新材料及其制备技术列为国家关键技术之一加以重点支持。例如,美国国家研究理事会(National Research Council, NRC)确定的“未来30年十大研究方向”中与材料直接和间接相关的就有8项;美国国家关键技术委员会把新材料列为影响经济繁荣和国家安全的6大类关键技术的首位。20世纪90年代初确定的22项关键技术中,材料占了5项。

最近,我国已确定“十五”期间八个对增强综合国力最具战略影响的高技术领域,分别是信息技术、生物技术、新材料技术、先进制造与自动化技术、资源环境技术、航天航空技术、能源技术、先进防御技术等领域。其中重点是信息、生物和新材料三个领域。

《新材料及在高技术中的应用丛书》正是在这种背景下出版的。

何谓“新材料”? 简单地讲,就是那些新出现或已在发展中的,在

成分、组织、结构、形态等方面不同于普通材料,具有传统材料所不具备的优异性能和特殊功能的材料。目前比较活跃的领域包括:电子信息、光电、超导材料;生物功能材料;能源材料和生态环境材料;高性能陶瓷材料及新型工程塑料;粉体、纳米、微孔材料和高纯金属及高纯材料;表面技术与涂层和薄膜材料;复合材料;智能材料;新结构功能助剂材料、优异性能的新型结构材料等。

何谓“高技术”?简单地说,就是采用新材料、新工艺,产生更高效益,能促进人类物质文明和精神文明更快进步的技术。有人认为,高技术就是“尖端技术”、“先导技术”、“未踏技术”等。以这类技术形成的产业具有高成长率、高利润、高风险率、高变化率、高知识水平等特点,也有人把知识密集型产业称为高技术产业。

新材料、高技术的发展具有下述特征:

(1) 新材料与高技术相互促进,二者相结合可转化为巨大的生产力

从科技发展史看,重大的技术革新往往起始于材料的革新。例如,20世纪50年代镍基超级合金的出现,将材料使用温度由原来的700℃提高到900℃,从而导致超音速飞机问世;而高温陶瓷的出现则促进了表面温度高达1000℃的航天飞机的发展。半导体材料及大规模集成电路技术的不断突破,使电子计算机的体积越来越小、能力却成千上万倍地提高:晶体管(1947年)、集成电路(1959年)和微处理器(1970年)的发明提高了数据运行速度;硬盘(1956年)、调制解调器(1980年)和鼠标(1983年)的发明又大大提高了获取数据的能力;因特网(1989年)的广泛应用打破了传统的信息堡垒,使人们廉价地获取各种知识成为可能;未来还会出现一些“智能”型装置:例如手表型对话器、“智能”冰箱、“智能”居室等等。

(2) 高风险、高投入、高效益、高速度

在信息社会飞速发展的今天,作为人机对话窗口的显示器已成为世界电子信息工业的又一大支柱产业。阴极射线管显示器(CRT)由于其体积大、电压高、易受干扰,在便携式电子产品和大屏幕显示方面的应用受到限制,目前平板显示器(FPD)已经发展成为可以与CRT抗衡的新兴显示技术。据预测,到2002年,CRT和FPD器件的产值都将达到300亿美元,各占50%,后者的年增长率为16.2%,远远高于前者6.3%的水平。

其中等离子体显示板(PDP)以其显示面积大、画质优异、视角大、薄型等特点,在40~70英寸大屏幕显示范围内占有绝对优势,作为高清晰度电视(HDTV)、家庭影院进入家庭,使人们盼望多年的壁挂电视梦想成为现实。

面对这种形势,许多跨国公司都投入巨资,建立新的生产线,加速扩展其生产能力,力争抢先占领彩色PDP市场。仅亚洲,已经投产的PDP生产线就不下10条。

(3) 高技术的迅猛发展对新材料提出更高的要求

小型、轻量、薄型、高性能是数字网络时代电子设备的发展趋势。便携式信息机器正以迅猛之势发展,这种新机器将个人电脑的信息处理能力、因特网的通信网

络、电视栩栩如生的图像和电话的便利性融为一体。人们预想这种便携式信息机器将成为电话、电子邮件、因特网和录像机的替代品,2003年左右被广泛使用,从而迎来“后PC时代”。目前,质量仅有50g的移动电话已经小批量面市。据估计,到2006年,在所有电子设备中,便携型的比例将超过60%。

随着电子元器件向轻、薄、短、小、高性能方向发展,芯片向高集成度、高频率、超多I/O端子数方向发展,迫切需提高封装密度,其中包括:封装的针脚(引线)数越来越多;针腿(引线)节距越来越小;封装厚度越来越薄;封装体在基板上所占的面积越来越大。为满足这些要求,一是不断采用新的封装形式,二是采用三维立体布线的多层基板。电子封装工程的这种发展趋势对其四大基础技术,即薄厚膜技术、微互联技术、基板技术、封接与封装技术等提出许多新的要求。因此,许多新结构、新工艺、新材料将应运而生。

#### (4) 人才是新材料、高技术发展的关键

新材料的“新”主要体现在其特殊性能及功能上。作为结构材料,有超高强度、超高硬度、超塑性等;作为功能材料,主要涉及到电、磁、半导、超导、压电、声、光等特性。新材料更新换代快、式样多变;其制备和生产往往与新技术、新工艺紧密相连;其研制与应用需要更综合的知识和能力。

例如,为了制得用纤维或晶须增强的新型复合材料,需要制备高强度、高热稳定性、无(或很少)缺陷的陶瓷晶须或纤维,并解决它们与基体间的复合工艺问题;为了获得具有特殊性质的薄膜或表层,需要应用各种成膜技术(如真空蒸镀、磁控溅射、分子束外延等)、激光技术、高能粒子轰击或离子注入技术。为了不断提高磁记录和光磁记录的记录密度、可靠性和再生灵敏度,除了要在记录介质材料系统、垂直磁记录膜的制作工艺、多层膜等方面进行系统的研究开发外,还要对磁头(包括感应磁头、磁致电阻和巨磁电阻效应磁头等)、激光记录再生系统、光强和频率调制系统等深入进行研究。要能胜任这些工作,并能取得开创性的成果,没有高水平的人才是不可想象的。

#### (5) 科学决策极为重要

新材料应用于高技术领域,有先后、难易、周期长短、所需基础及投入资金多少的不同。国民经济发展对其要求应有轻重缓急之分,因此科学决策极为重要。在新材料、高技术等新经济中不是大鱼吃小鱼,而是快的吃慢的,反应最快的总是占据最佳位置,速度是新经济的自然淘汰方式。

目前我国从事新材料及高技术研究、开发和生产的单位是很多的。根据20世纪90年代初的统计,从事新材料研究开发的部门所属的研究机构就有125个,全国有170所高校设有与材料相关的系和专业,还有1000家以上的企业从事新材料的生产。而从事高技术的单位和部门更是数不胜数。

但是,目前不少新材料及高技术部门往往从事同样的研究开发工作,特别是一

些热门课题,大家一哄而上,由于经费不足和研究条件落后,很多项目仍是低水平重复,成果不能很快地转化为生产力,浪费了国家有限的人力和资金。

追其原因,有体制问题、决策问题、选题及目标问题,还有政策问题等。

这些问题不解决,很难在新材料及高新技术的激烈竞争中立于世界之林。

应特别指出的是,在信息、能源、材料三大基础产业中,材料最为基础。以目前快速发展的电子材料为例,日本在金属超细粉、表面活性剂、有机粘结剂、有机溶剂、电子浆料、液晶材料、光学玻璃、偏光板、玻璃粉料、陶瓷粉料、封接玻璃、电子陶瓷、各类薄膜、各类基板、光刻制板、精细印刷、焊料焊剂、PCB基板、多层基板、微细连接、封接封装技术及各类相关设备等方面的中小型企业遍布全国,都有其独特的技术和很强的生产能力,且科研力量、开发能力都很强。许多重大科研及攻关项目都在公司间进行,厂家、用户之间联系密切、技术交流频繁,所涉及的都是新的、活的、尖端的内容。这些中小型企业作为产业基础是必不可少的。日本、韩国微电子产业的腾飞正是得益于此。目前,新加坡以及中国台湾、香港正在奋起直追,中国内地亟待在这些方面迅速发展。

本丛书力求全方位地反映新材料及高新技术应用的各个方面,包括涉及的范围、水平、目前状况及发展趋势等。重点是讨论新材料与高技术应用之间的关系。以此奉献给该领域的决策者、参与者、相关者、关心者以及在校的大学生、研究生等。内容齐全、涉及面广,力求做到通俗易懂、深入浅出。丛书中的每一部又自成体系,可作为相关专业的教材及教学参考书。

最先献给读者的是本丛书的前六部:《磁性材料》、《电子显示》、《电子封装工程》、《IC技术》、《高密度封装基板》、《高密度电子封装——MCM、BGA、CSP》。已经动笔和正在组织的还有《粉体与烧结》、《新型玻璃材料》、《薄膜技术与材料》、《电池——材料、工艺及应用》、《结构材料科学》、《功能材料科学》、《实验材料科学》、《气体放电及应用》、《表面与界面》、《固体电子材料》、《纳米技术》等,若能获得同行认可,将陆续出版。

当代材料科学技术正面临新的突破,诸如高温超导体、纳米材料、先进复合材料、生物医用材料、先进电子材料、智能材料、生态环境材料、光电信息材料、C60,以及分子、原子尺度设计材料等领域正处于日新月异的发展之中,充满了挑战和机遇。新材料的出现总是连带着高新技术的突破,由此必将带来巨大的技术经济效益和社会效益。《新材料及在高新技术中的应用丛书》若能对读者在“眼观六路、耳听八方”方面有所裨益,将不胜荣幸。

作者水平有限,不妥或谬误之处在所难免,恳请读者批评指正。

田民波

2000年10月18日

# 序言



确切地讲,磁性材料应该是指具有可利用的磁学性质的材料,目前普遍被称为“磁性材料”,但应该将“磁性”理解为“可利用的物质的磁学性质”,因为后者包括的范围比一般意义上的磁性要宽得多。

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 可发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。磁性材料的功能是多种多样的。

利用上述功能,人们在很早以前就开始制作变压器、马达、扬声器、磁致伸缩振子、记录介质、各类传感器、阻尼器、打印器、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、微机、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,应用机器多得令人吃惊。

近年来的磁性材料,在非晶态、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,由于组织的微细化、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作出了重大贡献,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。

本书将从两个方面论述磁性材料,第1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2~9章将分别针对具体的磁性材料进行讨论。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,本书将涉及到原材料、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,对原有磁性材料性能的提高,对新型磁性材料的研究、开发,有所启发与帮助。

# 目录



《新材料及在高技术中的应用丛书》序言 .....	I
序言 .....	V

## 第 1 章 磁学现象与磁性

1.1 磁学现象 .....	2
1.1.1 两个基本命题 .....	2
1.1.2 磁极与磁力线 .....	4
1.1.3 电流与磁场 .....	4
1.1.4 磁通量与磁通密度, 罗仑兹力 .....	5
1.1.5 磁化强度与磁矩, 磁学参量 .....	8
1.2 物质的磁性 .....	11
1.2.1 铁磁性(铁磁性与亚铁磁性) .....	11
1.2.2 平行磁矩、反平行磁矩以及磁畴的构成 .....	23
1.2.3 弱磁性(反铁磁性及顺磁性) .....	30
1.2.4 反磁性 .....	32
1.2.5 完全反磁性 .....	33
1.2.6 人体的磁性 .....	33
1.3 铁磁性材料概述 .....	34
1.4 磁性及磁性材料研究开发的进展 .....	40

## 第 2 章 高磁导率材料

2.1 纯金属的软磁性与晶体组织结构的关系 .....	49
2.2 软磁性的原子模型 .....	54
2.2.1 晶格缺陷 .....	55

2.2.2	畴壁移动、磁化旋转与位错的关系	60
2.2.3	交流磁场的能量损失	61
2.2.4	磁各向异性	62
<b>2.3</b>	<b>通过合金化可以改良的磁学特性</b>	<b>64</b>
2.3.1	合金	64
2.3.2	硅钢	66
2.3.3	坡莫合金	68
2.3.4	仙台斯特合金	71
<b>2.4</b>	<b>软磁铁氧体(软质铁氧体)</b>	<b>71</b>
<b>2.5</b>	<b>非晶态磁性材料</b>	<b>79</b>
<b>2.6</b>	<b>磁性薄膜</b>	<b>82</b>
2.6.1	薄膜的自发磁化	83
2.6.2	薄膜的磁各向异性	83
2.6.3	薄膜的磁畴结构和磁畴壁	85
2.6.4	通过组织微细化改善薄膜的软磁性	86
2.6.5	金属超晶格与磁性	87

### 第3章 高矫顽力材料

<b>3.1</b>	<b>永磁体的强度</b>	<b>91</b>
3.1.1	永磁体与反磁场	92
3.1.2	决定永磁体强度的指标——最大磁能积 $(BH)_{\max}$	93
3.1.3	$(BH)_{\max}$ 的理论值	95
3.1.4	磁滞回线的矩形性	95
3.1.5	矫顽力	97
<b>3.2</b>	<b>如何提高永磁体的强度</b>	<b>98</b>
3.2.1	单磁畴微粒子的磁化机制及矫顽力	99
3.2.2	畴壁移动与矫顽力	99
3.2.3	残留磁化强度(或残留磁道密度)的提高	100
<b>3.3</b>	<b>合金系永磁体</b>	<b>102</b>
<b>3.4</b>	<b>铁氧体永磁体(氧化物永磁体,硬质铁氧体永磁体)</b>	<b>104</b>
<b>3.5</b>	<b>稀土系永磁体</b>	<b>105</b>
3.5.1	稀土系永磁材料的发展过程	105
3.5.2	第一代和第二代稀土永磁体	107
3.5.3	Nd-Fe-B永磁体的制作方法	116

3.5.4	Nd <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B 硬磁性相的结构和内禀磁性 .....	118
3.5.5	Nd-Fe-B 磁体的宏观磁性和微结构 .....	120
3.5.6	影响 Nd-Fe-B 永磁体性能的因素 .....	122
3.5.7	提高 Nd-Fe-B 磁体性能的展望 .....	129
3.5.8	R(稀土元素)-Fe-N 系永磁体 .....	130
<b>3.6</b>	<b>矩形磁滞回线材料 .....</b>	<b>133</b>

## 第 4 章 磁性材料的各种物理效应

<b>4.1</b>	<b>磁光效应 .....</b>	<b>136</b>
<b>4.2</b>	<b>电流磁气效应 .....</b>	<b>140</b>
<b>4.3</b>	<b>磁各向异性 .....</b>	<b>142</b>
4.3.1	晶体磁各向异性的唯象理论 .....	142
4.3.2	晶体磁各向异性的产生机制 .....	145
4.3.3	代表性物质的晶体磁各向异性 .....	146
4.3.4	晶体磁各向异性与原子排布的关系 .....	148
4.3.5	各种诱导产生的磁各向异性 .....	151
<b>4.4</b>	<b>磁致伸缩效应 .....</b>	<b>152</b>
4.4.1	磁致伸缩的唯象理论 .....	152
4.4.2	磁致伸缩的产生机制 .....	154
4.4.3	代表性物质的磁致伸缩 .....	155
4.4.4	由磁致伸缩产生的磁各向异性 .....	157
<b>4.5</b>	<b>磁畴结构 .....</b>	<b>157</b>
4.5.1	磁畴与磁畴壁 .....	158
4.5.2	磁畴形貌 .....	159
<b>4.6</b>	<b>动态磁化 .....</b>	<b>160</b>
4.6.1	初始磁导率 .....	161
4.6.2	高周波损耗 .....	161
4.6.3	磁导率与温度的关系 .....	163
4.6.4	磁余效 .....	164

## 第 5 章 磁记录与磁性材料

<b>5.1</b>	<b>磁记录概述 .....</b>	<b>167</b>
<b>5.2</b>	<b>磁信号的记录(模拟式记录和数字式记录)与磁化模型 .....</b>	<b>171</b>
5.2.1	模拟式记录 .....	171

5.2.2	数字式记录 .....	172
<b>5.3</b>	<b>磁头及材料 .....</b>	<b>174</b>
5.3.1	磁头的种类 .....	175
5.3.2	铁氧体磁芯材料 .....	178
5.3.3	坡莫合金(Ni-Fe系)磁芯材料 .....	179
5.3.4	仙台斯特合金(Fe-Si-Al系)磁芯材料 .....	179
5.3.5	非晶态磁头材料 .....	179
5.3.6	微晶[Fe-M(Nb, Ta, Zr, Hf, Ti, V等)-(N, C, B)] 薄膜磁头材料 .....	180
5.3.7	多层膜磁头材料 .....	180
5.3.8	磁致电阻效应(MR)磁头及材料 .....	181
<b>5.4</b>	<b>磁记录介质及材料 .....</b>	<b>183</b>
5.4.1	磁记录介质应具备的性质 .....	183
5.4.2	记录媒体的制作工艺 .....	184
5.4.3	涂布型介质 .....	197
5.4.4	薄膜介质 .....	201
5.4.5	垂直磁记录介质 .....	205
5.4.6	各种磁记录介质的特性比较 .....	212
<b>5.5</b>	<b>磁泡及磁性石榴石材料 .....</b>	<b>213</b>

## 第6章 磁光效应材料

<b>6.1</b>	<b>光磁记录的原理 .....</b>	<b>221</b>
6.1.1	激光及光记录 .....	221
6.1.2	记录与再生的原理 .....	225
6.1.3	光磁盘介质的结构 .....	227
6.1.4	光磁记录介质应具备的特性 .....	229
<b>6.2</b>	<b>如何获得性能优良的光磁记录介质 .....</b>	<b>231</b>
6.2.1	采用非晶态膜 .....	231
6.2.2	采用重稀土-过渡族金属非晶态膜 .....	232
6.2.3	光磁记录材料需要制成垂直磁化膜 .....	233
6.2.4	补偿温度( $T_{\text{comp}}$ )应在室温附近 .....	236
6.2.5	影响 R-TM 合金膜磁克尔角的因素 .....	238
6.2.6	采用多层复合膜用以提高 $\theta_k$ .....	240

<b>6.3 直接重写用光记录材料</b> .....	241
6.3.1 磁场调制用重写光磁记录材料 .....	243
6.3.2 光强调制直接重写光磁记录材料 .....	244
<b>6.4 磁超分辨技术和磁畴扩大再生技术</b> .....	250
6.4.1 磁超分辨技术 .....	250
6.4.2 磁畴扩大再生技术 .....	253
<b>6.5 下一代光磁记录材料及相关技术</b> .....	255
6.5.1 NdTb-Fe-Co 系及 PrTb-Fe-Co 系合金膜 .....	255
6.5.2 Bi 置换石榴石膜 .....	256
6.5.3 磁性超晶格 .....	257
6.5.4 超高密度信息记录的新技术 .....	259
6.5.5 光单向波导 .....	260

## 第7章 粘结磁体

<b>7.1 粘结磁体概述</b> .....	264
<b>7.2 粘结磁体制作工艺</b> .....	265
7.2.1 Nd-Fe-B 粘结磁体用磁粉制备方法 .....	265
7.2.2 粘结磁体成形工艺 .....	269
<b>7.3 Nd-Fe-B 粘结磁体的性能</b> .....	274
7.3.1 各向同性 Nd-Fe-B 粘结磁体 .....	274
7.3.2 各向异性 Nd-Fe-B 粘结磁体 .....	276
<b>7.4 Nd-Fe-B 粘结磁体的应用</b> .....	278
<b>7.5 稀土粘结磁体性能的改善</b> .....	280
7.5.1 HDDR 各向异性 Nd-Fe-B 粘结磁体 .....	280
7.5.2 剩磁增强型 Nd-Fe-B 各向同性磁体 .....	281
7.5.3 高温 Nd-Fe-B 粘结磁体 .....	282
7.5.4 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_y$ 粘结磁体 .....	283

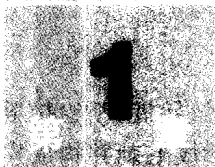
## 第8章 超导材料的磁性及其应用

<b>8.1 超导磁性及其应用的基本技术</b> .....	285
8.1.1 实用超导材料 .....	286
8.1.2 完全反磁性的实用化技术(磁通钉扎) .....	288

8.1.3 提高临界电流密度的技术 .....	291
<b>8.2 超导块体永磁体 .....</b>	<b>292</b>
<b>8.3 磁屏蔽 .....</b>	<b>294</b>
<b>8.4 超导永磁体及超导量子干涉计在生体等方面的应用 .....</b>	<b>296</b>
8.4.1 磁共振成像 .....	297
8.4.2 超导量子干涉计 .....	299
<b>8.5 超导磁能存储 .....</b>	<b>305</b>

## 第9章 引人注目的磁性材料

<b>9.1 超磁致伸缩材料 .....</b>	<b>309</b>
9.1.1 从磁致伸缩到超磁致伸缩 .....	309
9.1.2 超磁致伸缩的机制 .....	311
9.1.3 超磁致伸缩材料及加工工艺 .....	314
9.1.4 超磁致伸缩材料的应用 .....	316
<b>9.2 巨磁电阻(GMR)效应和超巨磁电阻(CMR)效应 .....</b>	<b>319</b>
9.2.1 金属超晶格 GMR 效应 .....	322
9.2.2 纳米颗粒合金中的 GMR 效应 .....	327
9.2.3 隧道型 GMR 效应 .....	331
9.2.4 氧化物磁性体的 GMR 效应 .....	331
9.2.5 超巨磁电阻(CMR)效应 .....	332
9.2.6 巨磁电阻效应在信息存储等领域的应用 .....	335
<b>9.3 巨磁化强度材料 <math>\text{Fe}_{16}\text{N}_2</math> .....</b>	<b>343</b>
9.3.1 $\text{Fe-N}$ 化合物的晶体结构 .....	345
9.3.2 $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$ 的制备方法 .....	346
9.3.3 $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$ 单晶的生长模式 .....	348
<b>9.4 磁性液体 .....</b>	<b>351</b>
9.4.1 何谓磁性液体 .....	351
9.4.2 磁性液体的制作方法及种类 .....	352
9.4.3 磁性液体的特性 .....	355
9.4.4 磁性液体的应用 .....	358
<b>附录 主要磁学量及相关物理量的单位 .....</b>	<b>362</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>363</b>



# 磁学现象与磁性

早在公元前 3 世纪,《吕氏春秋·季秋记》中就有“慈石召铁,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。现今,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(公元前 145~公元前 87)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。

11 世纪宋朝沈括(1031~1095)在《梦溪笔谈》中,不但介绍了磁石的南北指向,而且还涉及到偏角及倾角。12 世纪初宋朝朱或在《萍洲可谈》中已有使用罗盘的正式记载。有一种说法认为,马可·波罗(1254?~1324?)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。

指南针作为中国人引以自豪的四大发明之一,其中的关键就是磁性材料。

英语中“magnet”一词源于古希腊马其顿塞萨利亚地区的一个地名“Magnesia”,此地出产天然磁铁矿。

剥去磁现象神秘的面纱,对其以磁科学进行研究的创始者当数吉尔伯特(William Gilbert, 1544~1603, 英),后经安培(André-Marie Ampère, 1775~1836, 法)、奥斯特(Hans Christian Oersted, 1777~1851, 丹麦)、法拉第(Michael Faraday, 1791~1867, 英)等人开创性的发现和发明,初步奠定了磁学科学的基础。

从 1900 年到 1930 年间,先后确立了金属电子论、顺磁性理论、分子磁场、磁畴概念、X 射线衍射分析、原子磁矩、电子自旋、波动力学、铁磁性体理论、金属电子量子论、电子显微镜等相关的理论。与此同时,各种分析手段也先后问世。在此基础上形成了完整的磁学科学体系。在此之后的 20~30 年间,出现了种类繁多的磁性



材料。磁性材料已成为当代社会不可缺少的关键材料。

## 1.1 磁学现象

### 1.1.1 两个基本命题

在学童时代,我们都接触过磁现象:磁铁吸引铁片,同极相斥、异极相吸,接触过磁铁的大头针用细线吊起会自动南北指向,磁铁上的铁屑会形成毛刺并构成连线等等,既新奇又不可思议。初、高中学习物理时,刚接触到磁学,与电学相比,有些现象很难理解:为什么有电荷,而没有“磁荷”?为什么电力线起自正电荷终于负电荷,而磁力线首尾相连构成封闭连线?为什么正负电荷接触会相互抵消,而N极、S极接触则不会?为什么电气材料有导体、绝缘体、半导体之分,而磁气材料有铁磁性、弱磁性和反磁性之分?为什么磁性材料中普遍存在磁滞回线现象等等。这是由于先学电后学磁,有“先入为主”的因素,也反映出磁学较为复杂的一面。

为方便后面的讨论,首先引入关于磁及磁现象的两个基本命题。

**命题一** 磁及磁现象的根源是电流,或者说,磁及磁现象的根源是电荷的运动。

初中物理实验就已经证实,电流周围存在磁场。雷电及电波都伴随有磁场发生。

所有物质都是由原子构成的,而原子由原子核及核外电子构成。带有负电荷的电子在原子核周围作轨道运动和自旋运动。电子运动因原子核不同及电子所处的轨道不同而异。无论轨道运动还是自旋运动都会产生磁矩,即使原子核,由于带电,其运动也会产生磁矩,只是其磁矩很小,例如,氢核质子产生的磁矩仅为电子产生最小磁矩的 $1/658$ 左右。与物质磁矩相关联的各种现象称为磁现象。因此,物质磁性及磁现象的主要根源是电子的运动。尽管不存在与单位电荷量相当的“磁荷”,但存在最基本的单位磁矩。

**命题二** 所有物质都是磁性体。

何谓磁性?一种说法是,由于外加磁场作用,物质中的状态发生变化,产生新的磁场的现象称为磁性;另一种说法是,无论何种物质,置于磁场之中都会或多或少地带磁,或者某种物质,即使没有外部磁场,也会自发地带磁,称这种性质为磁性。这两种说法本质上是相同的,即所有物质的原子都具有磁矩。

既然所有原子都具有磁矩,由原子构成的物质都具有磁性,“所有物质都是磁性体”的命题自然成立。

人们自然会提出这样的问题,为什么铁等少数物质会受永磁体强烈的吸引,而