

现代化学功能材料 及其应用研究

XIANDAI HUAXUE GONGNENG CAILIAO
JIQI YINGYONG YANJIU

马毅龙 沈倩 金香 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

现代化学功能材料 及其应用研究

马毅龙 沈倩 金香 编著 书



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

功能材料是材料化学的一个重要分支,它的重要性在于包含的每一类材料都具有特殊的功能。全书主要内容包括绪论、磁性材料、超导材料、新型合金材料、光学材料、功能高分子材料、隐身材料与智能材料、膜材料与梯度功能材料、纳米功能材料、新型功能材料等。本书可供应用化学、材料化学、化工、冶金等相关领域的研究人员参考和学习。

图书在版编目(CIP)数据

现代化学功能材料及其应用研究 / 马毅龙, 沈倩, 金香编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 11
ISBN 978-7-5170-2657-0

I. ①现… II. ①马… ②沈… ③金… III. ①化工材料—功能材料—研究 IV. ①TB34

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第257342号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:杨元泓 封面设计:崔 蕾

书 名	现代化学功能材料及其应用研究
作 者	马毅龙 沈倩 金香 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn 电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京鑫海胜蓝数码科技有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17印张 413千字
版 次	2015年5月第1版 2015年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	59.50元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

材料按其性能特征和用途可分为两大类:结构材料和功能材料。功能材料是指具有优良的物理(电、磁、光、热、声)、化学、生物学功能及其相互转化的功能,被用于非结构目的的高新技术材料。随着科学技术尤其是信息、能源和生物等现代高新技术的快速发展,功能材料越来越显示出它的重要性,并逐渐成为材料学科中最活跃的前沿学科之一。

功能材料品种繁多,用途十分广泛,是由机械化走向信息化社会的关键的基础材料技术。主要涉及半导体材料、导电高分子材料、导磁材料、隐身材料、透波材料、压电材料、光学材料、光纤材料、激光材料、红外材料等,是当前材料科学研究发展极为重要的关键材料技术之一。世界各国均投巨资开发此材料,并取得了显著成果,有的功能材料已成功应用,在国民经济建设、国防建设和人们的日常生活中发挥了巨大作用,还有的功能材料正处于研究阶段,未走出实验室,但也初显光明的应用前景。可以预测未来几十年将是功能材料大发展、大应用的时代,随着高新技术在功能材料开发与应用研究中的应用,将会使这类材料得到长足进步。

近年来,功能材料迅速发展,已有几十大类,10万多品种,且每年都有大量新品种问世。有关新材料特别是新功能材料的书籍也不断涌现,进一步丰富和拓宽了材料科学与工程学科的内容。许多高校设置了功能材料的研究方向,并将功能材料作为材料及其相关专业的一门重要的专业基础课程。本书是在作者多年教学和科研经验的基础上编撰而成的。

本书从系统性、权威性、新颖性、实用性和可操作性规律出发,按由浅入深、循序渐进的规律编撰。编撰过程中遵循如下原则:以各类化学功能材料的性能和应用为主,介绍了化学功能材料的性质和各方面的应用;在内容选取上,既注重特性的介绍,又能叙述新型材料的制备方法,突出化学功能材料的应用,本书对功能材料的基础知识也做了相应的阐述。另外,本书对功能材料的研究与应用成果有一定的宣传作用。全书共分10章,主要内容包括绪论、磁性材料、超导材料、新型合金材料、光学材料、功能高分子材料、隐身材料与智能材料、膜材料与梯度功能材料、纳米功能材料、新型功能材料等。

本书在编撰的过程中,参考了大量有价值的文献与资料,吸取了许多人的宝贵经验,在此向这些文献的作者表示敬意。由于作者自身水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,敬请广大读者和专家给予批评指正。

作 者

2014年8月

目 录

前 言	1
第1章 绪论	1
1.1 功能材料的发展概况	1
1.2 功能材料的特点与分类	2
1.3 功能材料的现状与展望	3
第2章 磁性材料	5
2.1 磁性的基本知识	5
2.2 软磁材料	9
2.3 硬磁材料	13
2.4 磁记录材料	20
2.5 其他磁性材料	27
第3章 超导材料	38
3.1 超导现象及超导材料的微观结构	38
3.2 超导体的临界参数	42
3.3 超导材料的分类	44
3.4 超导材料的应用	57
第4章 新型合金材料	64
4.1 贮氢合金	64
4.2 非晶态合金	75
4.3 形状记忆合金	85
第5章 光学材料	97
5.1 激光材料	97
5.2 光纤材料	103
5.3 发光材料	108
5.4 红外材料	116
5.5 光存储材料	117
第6章 功能高分子材料	124
6.1 概述	124
6.2 光功能高分子材料	124

6.3	电功能高分子材料	134
6.4	高分子液晶材料	141
6.5	医用高分子材料	150
第7章	隐身材料与智能材料	159
7.1	隐身材料	159
7.2	智能材料	175
第8章	膜材料与梯度功能材料	192
8.1	膜材料	192
8.2	梯度功能材料	204
第9章	纳米功能材料	218
9.1	概述	218
9.2	纳米材料的特性	221
9.3	纳米材料的制备	223
9.4	纳米材料的应用及展望	232
第10章	新型功能材料	237
10.1	功能转换材料	237
10.2	功能复合材料	248
10.3	新型能源材料	258
参考文献	266

第 1 章 绪论

1.1 功能材料的发展概况

功能材料是指那些具有优良的电学、磁学、光学、热学、声学、力学、化学、生物医学功能,特殊的物理、化学、生物学效应,能完成功能相互转化,主要用来制造各种功能元器件而被广泛应用于各类高科技领域的高新技术材料。功能材料是新材料领域的核心,是国民经济、社会发展及国防建设的基础和先导。它涉及信息技术、生物工程技术、能源技术、纳米技术、环保技术、空间技术、计算机技术、海洋工程技术等现代高新技术及其产业。功能材料不仅对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用,还对我国相关传统产业的改造和升级,实现跨越式发展起着重要的促进作用。

功能材料种类繁多,用途广泛,正在形成一个规模宏大的高技术产业群,有着十分广阔的市场前景和极为重要的战略意义。世界各国均十分重视功能材料的研发与应用,它已成为世界各国新材料研究发展的热点和重点,也是世界各国高技术发展中战略竞争的热点。功能材料是新材料领域的核心,对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用,在全球新材料研究领域中,功能材料约占 85%。随着信息社会的到来,特种功能材料对高新技术的发展起着重要的推动和支撑作用,是 21 世纪信息、生物、能源、环保、空间等关键技术领域的关键材料,成为世界各国新材料领域研究发展的重点,也是世界各国高技术发展中战略竞争的热点。

功能材料的发展历史与结构材料一样悠久,它也是在工业技术和人类历史的发展过程中不断发展起来的。特别是近 30 多年以来,由于电子技术、激光技术、能源技术、信息技术以及空间技术等现代高技术的高速发展,强烈刺激现代材料向功能材料方向发展,使得新型功能材料异军突起,促进了各种高技术的发展和应用的实现,而功能材料本身也在各种高技术发展的同时得到了快速的发展。从 20 世纪 50 年代开始,随着微电子技术的发展和应用,半导体材料迅速发展;60 年代出现激光技术,光学材料面貌为之一新;70 年代光电子材料,80 年代形状记忆合金等智能材料得到迅速发展。随后,包括原子反应堆材料、太阳能材料、高效电池等能源材料和生物医用材料等迅速崛起,形成了现今较为完善的功能材料体系。

由此可见,功能材料已经成为材料大家族中非常重要的成员,特别是自 20 世纪 70 年代开始,人们更是有意识地开发具有各种“特殊功能”的功能材料,并将以前对材料“量”的追求,即大量生产高质量结构材料,转变为对材料“质”的追求,即大力发展功能材料。换句话说,研究和开发材料的重点已从结构材料转向功能材料。可以说,在今天,功能材料虽然在量上尚远不及结构材料,但它与结构材料一样重要,而且今后将互相促进,并驾齐驱发展。

1.2 功能材料的特点与分类

1.2.1 功能材料的特点

功能高分子材料具有的特点之一是具有与常规聚合物明显不同的物理化学性能,并具有某些特殊功能。一般来说,“性能”是指材料对外部作用或外部刺激(外力、热、光、电、磁、化学药品等)的抵抗特性。对外力抵抗的宏观性能表现为强度、模量等;对热抵抗的宏观性能表现为耐热性;对光、电、磁及化学药品抵抗的宏观性能表现为耐光性、绝缘性、抗磁性及防腐性等。具有这些特有性能之一的高分子是特种高分子,如耐热高分子、高强度高分子、绝缘件高分子。“功能”是指从外部向材料输入信号时,材料内部发生质和量的变化或其中任何一种变化而产生的输出特性。如材料受到外部光的输入,材料可以输出电能,称为光电功能,材料的压电、防震、热电、药物缓释、分离及吸附等均属于“功能”范畴。

功能高分子材料具有的特点之二是产量小、产值高、制造工艺复杂。而这些特点也是精细高分子的特点,因而人们常常又将功能高分子和精细高分子混为一谈。实际上,精细高分子是相对于通用高分子而言的一类高分子,而功能高分子则是这个范畴中的重要部分。

功能高分子材料具有的特点之三是既可以单独使用,如导电高分子、高分子试剂或高分子分离膜,也可以与其他材料复合制作成结构件,实现结构/功能一体化,如将具有吸波功能的树脂材料作为飞机和导弹的结构件。

功能高分子材料至少应具有下列功能之一。

①物理功能。主要指导电、热电、压电、焦电、电磁波透过吸收、热电子放射、超导、形状记忆、超塑性、低温韧性、磁化、透磁、电磁屏蔽、磁记录、光致变色、偏光性、光传导、光磁效应、光弹性、耐放射线、X射线透过、X射线吸收等。

②化学功能。主要指离子交换、催化、氧化还原、光聚合、光交联、光分解、降解、固体电解质、微生物分解等。

③介于化学和物理之间的功能。主要指吸附、膜分离、高吸水、表面活性等。

④生物或生理功能。主要指组织适应性、血液适应性、生物体内分解非抽出性、非吸附性等。

正是功能高分子材料这些独特的功能引起了人们的广泛重视,成为当前材料科学界研究的热点之一,通过精心的分子设计及材料设计的方法,通过合成加上制备、加工等手段所取得的、具有期望性能的材料能满足某些特殊需要,因而在材料科学领域占有越来越重要的地位。

1.2.2 功能材料的分类

功能材料种类繁多,涉及面广,迄今还没有一个公认的分类方法。目前主要是根据材料的物质性或功能性、应用性进行分类。

1. 基于材料的物质性的分类

按材料的化学键、化学成分分类,功能材料有:①无机非金属功能材料;②金属功能材料;

③有机功能材料；④复合功能材料。有时按照化学成分、晶体结构、显微组织的不同还可以进一步细分小类和品种。例如，无机非金属材料可以分为玻璃、陶瓷和其他品种。

2. 基于材料的功能性分类

按材料的物理性质、功能来分类。例如，按材料的主要使用性能大致可分为九大类：①电学功能材料；②磁学功能材料；③光学功能材料；④热学功能材料；⑤声学和振动相关功能材料；⑥力学功能材料；⑦化学功能材料及分离功能材料；⑧放射性相关功能材料；⑨生物技术和生物医学工程材料。

3. 基于材料的应用性分类

按功能材料应用的技术领域进行分类，主要可分为信息材料、电子材料、电工材料、电讯材料、计算机材料、传感材料、仪器仪表材料、能源材料、航空航天材料、生物医用材料等。根据应用领域的层次和效能还可以进一步细分。例如，信息材料可分为：信息检测和传感（获取）材料、信息传输材料、信息存储材料、信息运算和处理材料等。

1.3 功能材料的现状与展望

功能材料对科学技术尤其是高技术的发展及新产业的形成具有决定性的作用。美国《高技术》杂志在评价高技术在21世纪的作用时指出：超导将产生巨大的经济效益，光电子技术变革信息社会，人体科学向未来提出挑战。而新型材料的出现和发展往往使科学技术的进步，乃至整个社会和经济的发展产生重大的影响，将人类支配自然的能力提高到一个新的水平。

当前，功能材料发展迅速，其研究和开发的热点集中在光电子信息材料、超导材料、功能高分子材料、功能复合材料、功能陶瓷材料、能源材料、生物医用材料、智能材料等领域。

现已开发的以物理功能材料最多，主要有：

(1) 单功能材料

单功能材料，如导电材料、介电材料、铁电材料、磁性材料、磁信息材料、发热材料、储热材料、隔热材料、热控材料、隔声材料、发声材料、光学材料、发光材料、激光材料、红外材料、光信息材料等。

(2) 多功能材料

多功能材料，如降噪材料、三防（防热、防激光和防核）材料、耐热密封材料、电磁材料等。

(3) 功能转换材料

功能转换材料，如压电材料、光电材料、热电材料、磁光材料、声光材料、电光材料、电（磁）流变材料、磁致伸缩材料等。

(4) 复合和综合功能材料

复合和综合功能材料，如形状记忆材料、传感材料、智能材料、显示材料、分离功能材料等。

(5) 新形态和新概念功能材料

新形态和新概念功能材料，如液晶材料、非晶态材料、梯度材料、纳米材料、非平衡材料等。

目前,化学和生物功能材料的种类虽较少,但发展速度很快,功能也更多样化。其中的储氢材料、锂离子电池材料、太阳电池材料、燃料电池材料和生物医学工程材料已在一些领域得到了应用。同时,功能材料的应用范围也迅速扩大,虽然在产量和产值上还不如结构材料,但其应用范围实际上已超过了结构材料,对各行业的发展产生了很大的影响。

高新技术的迅猛发展对功能材料的需求日益迫切,也对功能材料的发展产生了极大的推动作用。目前从国内外功能材料的研究动态看,功能材料的发展趋势可归纳为如下几个方面:

①功能材料的功能由单功能向多功能和复合或综合功能发展,从低级功能(如单一的物理功能)向高级功能(如人工智能、生物功能和生命功能等)发展。

②功能材料和结构材料兼容,即功能材料结构化,结构材料功能化。

③功能材料和器件的一体化、高集成化、超微型化、高密积化和超分子化。

④开发高技术所需的新型功能材料,特别是尖端领域(如航空航天、分子电子学、高速信息、新能源、海洋技术和生命科学等)所需和在极端条件(如超高压、超高温、超低温、高烧蚀、高热冲击、强腐蚀、高真空、强激光、高辐射、粒子云、原子氧和核爆炸等)下工作的高性能功能材料。

⑤完善和发展功能材料检测和评价的方法。

⑥进一步研究和发展功能材料的新概念、新设计和新工艺。已提出的新概念有梯度化、低维化、智能化、非平衡态、分子组装、杂化、超分子化和生物分子化等;已提出的新设计有化学模式识别设计、分子设计、非平衡态设计、量子化学和统计力学计算法等,这些新设计方法都要采用计算机辅助设计(CAD),这就要求建立数据库和计算机专家系统;已提出的新工艺有激光加工、离子注入、等离子技术、分子束外延、电子和离子束沉积、固相外延、精细刻蚀、生物技术在特定条件下(如高温、高压、低温、高真空、微重力、强电磁场、强辐射、急冷和超净等)的工艺技术。

⑦加强功能材料的应用研究,扩展功能材料的应用领域,特别是尖端领域和民用高技术领域,并将成熟的研究成果迅速推广,以形成生产力。

第 2 章 磁性材料

2.1 磁性的基本知识

2.1.1 原子的磁性

物质的磁性来源于原子的磁性,原子的磁性来源于电子的轨道运动及自旋运动,它们都可以产生磁矩。

1. 电子轨道磁矩

电子绕轨道运动,相当于一个环形电流。若电子的电荷为 $-e$,绕轨道运行之周期为 T ,则相应的电流 $i = -\frac{e}{T}$,所形成的磁矩为 iS ,此处 S 为环形电流所包围的面积。原子中各电子轨道的磁矩的方向是空间量子化的,磁矩的最小单位为 μ_B ,称为玻尔磁子,它是一个常数,其数值为

$$\mu_B = 9.27 \times 10^{-24} \text{ A/m}^{-2}$$

在 SI 制中,也可以用磁偶极矩表示一个玻尔磁子,其值为

$$\mu_0 \times 9.27 \times 10^{-24} \text{ A/m}^{-2} = 1.165 \times 10^{-29} \text{ Wb/m}^{-1}$$

电子循轨运动之磁矩大小和轨道角动量的大小有关,因此它是角量子数 l 的函数。从量子力学计算可知,角量子数为 l 的轨道电子的磁矩为

$$\mu_l = \sqrt{l(l+1)}\mu_B$$

式中, $l=0,1,2,\dots,n-1$ 。

若一原子中有很多电子,则由各个电子形成的轨道总磁矩是各个电子轨道磁矩的向量和。因此,在原子壳层完全充满电子的情况下,由于电子轨道在空间的对称分布,原子的总磁矩为零。

2. 电子的自旋磁矩

电子具有自旋,也是一种电荷的运动形式,因此也产生磁矩。实验证明,一个电子自旋磁矩在外磁场方向(z)的大小正好是一个玻尔磁子,但其方向可能和外磁场的方向平行或反平行,即

$$\mu_s z = \pm \mu_B$$

因此如果一个原子中有多个电子,则它们在 z 方向的自旋磁矩可能是平行的,也可能是反平行的。总的自旋磁矩是各个自旋磁矩的向量和。对于充满了电子的壳层,其总的自旋磁矩也为零。

3. 原子的磁矩

孤立的原子的磁矩是原子中所有电子的轨道磁矩向量和。在已知原子中电子排布的条件下,是可以进行计算的。但是物质是由原子组成,因此物质的磁性来源于各个原子的磁矩。但应当说明,在固体中,由于各个原子间电子之相互作用,情况变得复杂。因此除了特殊情况以外,一般说来,物质中各个原子的磁矩大小不能简单地按计算孤立原子磁矩的方法去作定量计算。

2.1.2 物质的磁性

宏观物质的性质是由组成该物质原子的性质和组织结构决定的,宏观物质有许多分类的方法,根据磁化率大小和符号,可以将宏观物质分成五类。

1. 抗磁性

在原子系统中,在外磁场作用下,感生出与磁场方向相反的磁矩现象称为抗磁性。抗磁性起源于原子中运动着的电子相当于闭合的回路,在受到外磁场作用时,回路的磁通发生变化,回路中将产生感应电流,感应电流产生的磁通反抗原来磁通的变化。闭合感应电流产生的磁矩作用使外磁场磁化作用减弱,呈抗磁性现象。所以,抗磁性现象存在于一切物质中,是所有物质在外磁场作用下所具有的属性。抗磁性物质的特征是原子为满壳层,无原子固有磁矩,磁化率 $\chi_d = -M\chi_p = \frac{C}{H} < 0$,其大小在 10^{-5} 数量级,如图 2-1 所示,正常情况 χ_d 与温度、磁场无关。但当物质熔化凝固、范性形变、晶粗细化和同素异构转变时,将使抗磁性磁化率发生变化。

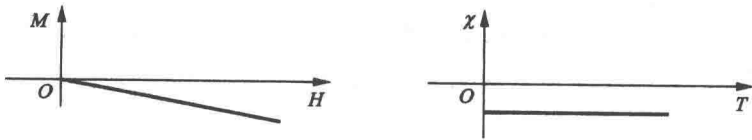


图 2-1 抗磁性物质的磁化率及其与温度的关系

2. 顺磁性

原子系统在外磁场作用下,物质感生出与磁化场相同方向的磁化强度现象称为顺磁性,顺磁性物质特征是原子具有固有磁矩,在无外磁场时,受热扰动影响原子磁矩杂乱分布,总磁矩为零,即 $\sum \mu_{ji} = 0$ 。

当施加外磁场时,这些磁矩趋于向外磁场方向,引起顺磁性,其磁化率 $\chi_p = \frac{M}{H} > 0$,但在常温下,受热运动的影响, χ_p 大小在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 数量级,仅显示微弱的磁性。多数顺磁性物质服从居里定律 $\chi_p = \frac{C}{T}$,另一些顺磁性物质服从居里-外斯定律 $\chi_p = \frac{C}{T - T_p}$,如图 2-2 所示,C 是居里常数, T_p 是顺磁性居里点。室温下使顺磁性物质磁化到饱和,在技术上是难以达到的。若将温度降低到接近绝对零度,则容易多了。具有顺磁性的物质很多,典型的有稀土金属和Ⅷ

B族元素(铁族元素)的盐类。

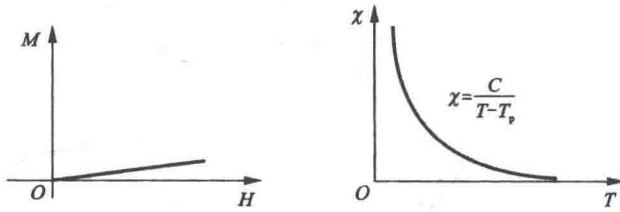


图 2-2 顺磁性物质的磁化率及其温度的关系

3. 反磁性

反铁磁性物质原子具有固有磁矩,自发磁化呈反平行排列,磁矩为零,只有在很强的外磁场作用下才能显现出来。在温度 T 高于某一温度 T_N 时,其磁化率 χ 服从居里—外斯定律 $\chi = \frac{C}{T - T_p}$ 。当 $T < T_N$ 时,随温度 T 的降低 χ 降低,并趋于定值;所以在 $T = T_N$ 处, χ 值极大,这一现象称为反铁磁性现象。 T_N 是反铁磁性与顺磁性转变的临界温度,称奈耳温度。 $T < T_N$ 时,物质呈反铁磁性; $T > T_N$ 时,物质呈顺磁性,如图 2-3 所示。

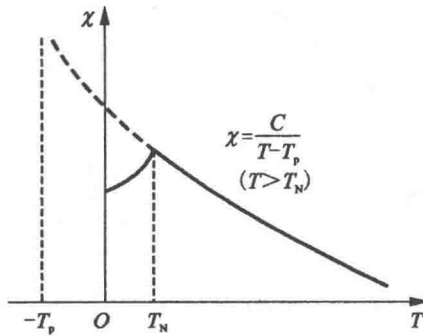


图 2-3 反磁性

4. 铁磁性

铁磁性物质的原子具有固有磁矩,原子磁矩自发磁化按区域呈平行排列,在很小的外磁场作用下,物质就能被磁化到饱和,磁化率 $\chi \gg 0$,在 $10 \sim 10^6$ 数量级。磁化率与磁场呈非线性、复杂的函数关系,如图 2-4 所示。具有磁滞现象、磁晶各向异性、磁致伸缩等性质。 T_c 是铁磁性与顺磁性临界温度,称为居里温度。在温度 $T < T_c$ 时,物质呈现铁磁性; $T > T_c$ 时,物质呈现顺磁性,并服从居里—外斯定律。在孔附近铁磁性物质的许多性质出现反常现象。

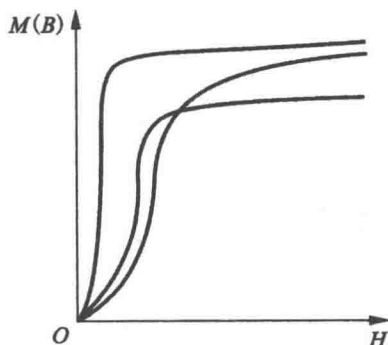


图 2-4 铁磁性物质的磁化曲线

5. 亚铁磁性

亚铁磁性物质宏观磁性上与铁磁性物质相同,只是在磁化率的数量级上低,在 $10 \sim 10^3$ 数量级。区别在于微观自发磁化是反平行排列,但两个相反平行排列的磁矩大小不相等,矢量和不为零。

总之,各类物质的磁性状态是由于不同原子具有不同的电子壳层结构,原子的固有磁矩不同。但是,必须指出原子磁性虽然是物质磁性的基础,却不能完全决定凝聚态物质的磁性,因为原子间的相互作用对物质的磁性常常起重要影响,图 2-5 示出各类物质的磁结构状态。铁磁性、反铁磁性和亚铁磁性为磁有序状态,顺磁性是磁无序状态。

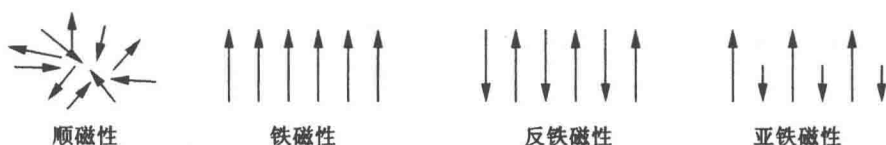


图 2-5 各类物质磁结构示意图

2.1.3 磁性参数

1. 磁化强度 M

指单位体积磁体中原子磁矩矢量和。

$$M = \frac{\sum \mu_m}{V}$$

式中, μ_m 为原子磁矩; M 的单位为 A/m 。在真空中, $M=0$ 。

宏观磁体的磁性是磁体内许多原子固有磁矩的显现,所有的原子固有磁矩均按一个方向取向时的磁化强度称为饱和磁化强度 M_s 。比磁化强度(σ)是指单位质量磁体中原子磁矩矢量和。

$$\sigma = \frac{\sum \mu_m}{V \cdot \rho} = \frac{M}{\rho}$$

式中, ρ 为磁体的密度; V 为磁体的体积; σ 的单位为 $\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 。

2. 磁感应强度 B

磁感应强度也称磁通密度, 指磁体内单位面积中通过的磁力线数。

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + B_1 = \mu_0 H + J_1$$

式中, $J_1 = \mu_0 M$; M 为磁极化强度(也称内禀磁感应强度); H 为磁场强度; μ_0 为真空磁导率; B 的单位为 T 或 Wb/m^2 。

3. 磁化率 χ 和磁导率 μ

在 $M-H$ 磁化曲线上 M 与 H 的比值称为磁化率 χ , 在 $B-H$ 磁化曲线上 B 与 H 的比值称为磁导率。

$$\chi = \frac{M}{H}; \mu = \frac{B}{H}$$

式中, $\chi_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{M}{H}$ 为起始磁化率; $\chi_m = \left(\frac{M}{H} \right)_{\max}$ 为最大磁化率; $\mu_i = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}$ 为起始(或初始)磁导率; $\mu_m = \left(\frac{B}{H} \right)_{\max}$ 为最大磁导率。

4. 剩余磁化强度 M_r 与剩余磁感应强度 B_r

磁体磁化到饱和状态后, 去掉外磁场, 磁体中所保留下的磁化强度值称为剩余磁化强度 M_r 。或所保留下的磁感应强度值称为剩余磁感应强度 B_r , $B_r = \mu_0 M_r$ 。

5. 矫顽力 H_c 与内禀矫顽力 $M H_c$

使磁体剩余磁感应强度减小到零时所加反向磁场的磁场强度称为磁感矫顽力 $B H_c$ 或矫顽力 H_c 。使磁体剩余磁化强度减小到零时所加反向磁场的磁场强度称为内禀矫顽力 $M H_c$, 通常大于或等于 H_c , 矫顽力 H_c 的单位是 A/m 。

2.2 软磁材料

1. 电工用纯铁

铁是最早应用的一种经典的软磁材料, 具有高的饱和磁感应强度、高的磁导率和低的矫顽力。直到今天, 纯铁还在一些特殊场合用到。电工用纯铁的含碳量很低, 其纯度(含铁量)在 99.95% 以上。

(1) 电工用纯铁的性能

①磁性能。电工用纯铁在退火状态, 起始磁导率 μ_i 为 $300 \sim 500 \mu_0$, 最大磁导率 μ_m 为 $6000 \sim 12000 \mu_0$, 矫顽力以为 $40 \sim 95 \text{A}/\text{m}$ 。通过仔细控制加工和热处理, 可以使磁性能得到极大的改善。

②力学性能。电工用纯铁的强度和硬度很低,其抗拉强度 σ_b 仅为 $27\text{kg}/\text{mm}^2$,HB为131,但具有良好的塑性,其延伸率 δ 为25%,断面收缩率 ψ 为60%。电性能电工用纯铁的。

③电阻率 ρ 很低,约为 $10 \times 10^{-8} \Omega/\text{m}^{-1}$,因而铁损很大。

(2)影响电工用纯铁性能的因素及改善性能的方法

①晶粒大小的影响。电工用纯铁的组织对其性能有较大的影响。晶粒尺寸大,有利于提高磁导率 μ ,降低矫顽力 H_c 。因此,电工用纯铁在退火时,温度不宜超过 910°C ,以免因重结晶而导致晶粒细化。

②杂质的影响。电工用纯铁中常见杂质有:C、N、O、H、S、P、Mn、Si、Al、Cu等,它们对磁性能有较大影响,其中C的影响最为突出,表现为使 M_s 降低, μ_m 急剧下降,磁滞损耗增加,磁化困难。通过严格控制冶炼与轧制过程,有效地去除气体含量和有害杂质,可以改善电工用纯铁的性能。

③塑性变形(冷加工)的影响。冷加工使纯铁的矫顽力 H_c 增大,磁导率 μ 降低,使磁性能恶化。因此,电工用纯铁冷加工后必须进行退火处理。退火温度的设定应充分考虑避免发生重结晶,不能高于 910°C 。

(3)电工用纯铁的主要用途

电工用纯铁的电阻率很低,若在交变磁场下工作,涡流损耗大,故通常只能在直流磁场下工作。如果在纯铁中加入少量Si形成固溶体,则可提高其电阻率,从而减少涡流损耗。其主要的用途有电磁铁的铁芯和磁极、继电器的磁路和各种零件(如铁芯)、磁电式仪表中的元件,以及磁屏蔽罩等。

2. 电工用硅钢片

电工用硅钢片按材料生产方法,结晶组织和磁性能可分为以下四类:①热轧非织构(无取向)的硅钢片;②冷轧非织构(无取向)的硅钢片;③冷轧高斯织构(单取向)的硅钢片;④冷轧立方织构(双取向)的硅钢片。

电工用硅钢片主要用于各种形式的电机、发电机和变压器中,在扼流圈、电磁机构、继电器、测量仪表中也大量使用。不同的工作环境,对硅钢片的性能提出了不同的要求,一般将实用的硅钢片按强磁场、中等磁场($5 \sim 1000\text{A}/\text{m}$)、弱磁场($0.2 \sim 0.8\text{A}/\text{m}$)下工作来分类。硅钢片的机械性能与硅含量、晶粒大小、结晶结构、有害杂质(碳,氧,氢)含量分布状况以及钢板厚度有关;在很大程度上取决于有害杂质含量、冶炼方法、轧制的压下制度、退火温度和介质以及钢板表面状况等。硅钢片的磁性能同样与硅含量、冶炼过程、热处理工艺、晶粒大小有关。一般认为,硅含量在6%~6.5%的钢具有高的磁导率(μ_i, μ_m),硅也使铁的磁各向异性和磁致伸缩降低。考虑到硅钢的机械性能及加工工艺性能,其中硅的含量不宜超过4%。另外,碳、氢、硫、锰等元素均对合金的磁性能有不利影响;增大晶粒可以改善硅钢的磁性能,但使磁滞损耗增加。

为了进一步提高电工钢的磁性能,高斯研制了具有取向结晶结构的硅钢片——高斯织构硅钢片(冷轧取向硅钢片)。这种结构中, α 铁晶格的易磁化方向 $[100]$ 轴与轧制方向吻合,难磁化方向 $[111]$ 轴与轧制方向成 55° 角,中等磁化轴 $[110]$ 与轧制方向成 90° 角,如图2-6所示。这种织构以符号 $(110)[100]$ 表示, (110) 面与轧制面吻合,而 $[100]$ 方向与轧制方向吻合。由于

结构上特点,冷轧取向硅钢片具有磁各向异性,在强磁场内,单位铁损的各向异性最大,在弱磁场中,磁感应强度和磁导率的各向异性最大。因此,用这种硅钢片制铁芯时常采用转绕方式。

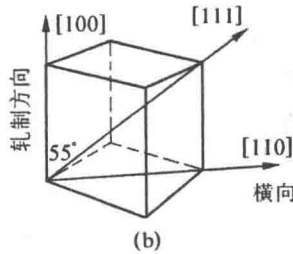


图 2-6 Fe-Si 3.8%合金单晶体磁化方向示意图

立方织构硅钢片是指晶粒按立方体取向,即立方体的(100)面与轧制面相吻合,立方体的棱[100]轴沿轧制方向取向。立方体的棱即易磁化方向是沿着和横着轧制方向取向的,中等难磁化轴[110]则与轧制方向成 45° 角,而最难磁化轴[111]则偏离磁化平面。立方织构硅钢在性能上优于上述高斯织构硅钢,如果两种织构合金的含硅量相同,立方织构极薄带钢的磁导率比高斯织构带钢高;沿轧制和垂直于轧制方向切取的立方织构试样,无论在弱磁场或强磁场内,都具有同样高的磁导率。表 2-1 为两种织构硅钢片性能比较。虽然立方织构硅钢片显示了诸多优势,但限于其制造工艺不过关,故只用于制造个别试验用变压器。电动机和发电机,难以批量生产。

表 2-1 高斯织构和立体织构硅钢片性能比较

	高斯织构		立体织构	
	轧制方向	垂直轧制方向	轧制方向	垂直轧制方向
$\mu_m (\mu_0)$	55000	8000	116000	65000
$H_c / (\times 79.6 \text{ A/m})$	0.08	0.27	0.07	0.08
$B_r / (\times 10^{-4} \text{ T})$	9500	1750	12200	11500
$B_m / (\times 10^{-4} \text{ T})$	16300	11000	16600	16000
$W_{1.5} / (\text{W/kg})$	0.88	2.24	0.85	1.0

3. 铁镍合金

铁镍合金主要是含镍 30%~90%的 Fe-Ni 合金,因其英文名为 Permalloy,又称为坡莫合金,意思是导磁合金。在铁镍合金中,除 Ni、Fe 外,通常还含有少量 Cr、Mo、Cu 等元素。铁镍合金与硅钢片相比,其最大特点是在弱磁场中具有良好的磁性能,因而广泛应用于电信、计算机、控制系统等领域。

根据特性和用途不同,铁镍软磁合金大致可分为以下五类:

① 1J50 类。1J50 类合金含镍量为 36%~50%,具有较低的磁导率和较高的饱和磁感应强度及矫顽力。在热处理中,若能适当提高温度和延长时间,可降低矫顽力,提高磁导率。主