

磁性材料及其应用

王会宗 等编著

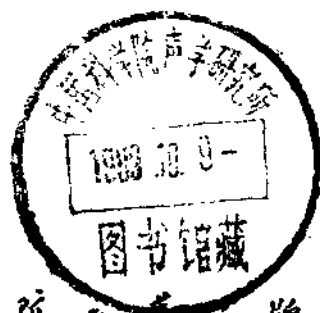
国防工业出版社

73.175
125

Doc 30/11

磁性材料及其应用

王会宗 等编著



国防工业出版社

2014013

内 容 简 介

本书详细地叙述了各种金属磁性材料、铁氧体材料、特殊用途的磁性材料、叠记录材料、非晶态合金、磁泡、微波吸收材料和磁性液体（磁流体）等磁性材料的基本物理性能、特点、有关工艺及应用，同时论述了环境对磁性材料性能的影响和解决途径。本书可供从事磁性元器件设计，电力、电子、无线电线路和结构设计、磁性材料研究等科技人员及高等院校有关专业师生参考。

磁性材料及其应用

王会宗 等编著

责任编辑 杨其厚

*

国防工业出版社出版、发行

（北京市车公庄西路老虎庙七号）

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张13¹/₈ 341千字

1989年7月第一版 1989年7月第一次印刷 印数：0,001—2,700册

ISBN 7-118-00135-X/TN·26 定价：8.00元

序

磁和电是密切联系着的。随着电的应用日益扩大，磁性材料也迅速发展起来。目前，在工业、农业、运输工具、攻防武器、科研设备、医疗仪器、家庭用物、办公室自动化等等方面，往往需用一种或多种磁性材料。为了满足不同的使用要求，这些材料不但要具有不同的性能，而且要在规定的使用环境下能稳定、可靠地发挥作用。并且，这些材料还要易于加工、价格便宜。目前，国内外已发展和生产出不少种类繁多，性能各异的磁性材料。使用者和设计者如何针对具体要求，选用最合适的磁性材料来制成最适用而又价廉物美的磁性元器件就成为他们的一个重要课题。

另外，已研究过的磁性材料的配方，试验数据，生产工艺等资料对磁性材料研究者是非常宝贵的。这些资料过去虽积累了不少，但很分散。为了便于研究人员的参考，以期迅速探索到新的途径，开发出新的磁性材料，这些资料也有择其可靠者加以集中整理的必要。因此，迫切需要有一本磁性材料的专著来作为使用人员、设计人员和研究人员之间的桥梁。

王会宗同志长期从事磁性材料和磁性元器件的研究开发工作，搜集了不少资料，学识经验都很丰富。他费了很多宝贵时间编著了这本书。他从磁性材料和磁性元器件应用的角度，对磁性材料的要求、各种磁性材料的特点、性能、选择材料的原则、有关工艺、应用，以及环境对磁性材料的影响和其解决的技术途径等问题进行了论述。书中除叙述我国已研究和生产的磁性材料外，还论述了世界上新发展和国内正在研究的非晶态合金、磁泡、微波吸收材料和磁性液体（磁流体）等。除此而外，还结合对磁性材料的要求扼要地介绍了元器件的工作原理，以加深对所提要求

的理解。这本书对研究者、设计者、使用者肯定会起到上述的桥梁作用，对于实际工作大有裨益。谨祝作者取得预期的成功。

蔡金涛

前 言

随着磁性材料迅速发展，目前我国研制和生产的金属、非金属磁性材料种类和规格繁多，并且在电子工业、仪表工业、宇航工业、农业和医疗方面都得到广泛应用。它已成为收音机、电视机、医疗设备、电工仪表、电子计算机、导弹、人造卫星和遥感技术设备的不可缺少的材料和元件。由于它可从直流到极高频率情况下使用，频率适应范围很宽。因此，磁性材料及其应用是一门受到人们极为重视的科学，是国计民生不可缺少的组成部分。

本书是从磁性材料和磁性元件应用的角度，对磁性材料的要求，各种磁性材料的特点、性能，选择材料的原则，有关工艺、应用，以及环境对磁性材料的影响和解决的技术途径等问题进行论述。书中除叙述我国已研制和生产的磁性材料外，还论述了世界上新发展和国内正在研制的非晶态合金、磁泡、微波吸收材料和磁性液体（磁流体）等。作者希望通过本书，使读者对各种磁性材料有所了解，并能掌握各种磁性材料的特性和使用范围，以便使设计者更加合理地选用磁性材料或磁性元件，充分发挥磁性材料的作用。作者还试图使本书在磁性材料研究者和使用者之间起桥梁作用。

我国磁性材料研究和生产部门很多，如金属磁性材料大多数是冶金工业部门研制和生产，非金属磁性材料是电子工业部门研制和生产。各部标准不一，有的符号也不统一。为了统一标准，本书有关的计量单位、符号基本按1982年国家标准局批准的国标，但考虑到各部门的习惯用法，所以在书中仍保留一些习惯用法符号，其单位一律按国家标准。为了便于对照，在各种图表中保留过去CGS单位制的数据。同时，各图表括号中也均标明换算成国际单位制（SI）的数值的系数。

本书在编写过程中，得到蔡金涛教授、张志英研究员的指导和帮助，特别是蔡教授在百忙中为全书最后审稿和写序。在定稿过程中，得到了李国栋、尹景林、王世顺、韩宝善、杨国本、彭因初、蔡竹荪等同志对有关章节审稿和帮助。尤其郑宗瑜同志，除了编写第一章外，还为全书定稿做了大量的工作，对此，谨表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，作者水平有限，书中必有错误和缺点，望请读者批评、指正，谨预致谢忱。

王会宗

目 录

第一章 磁性材料的物理基础	1
1.1 物质的磁性	1
1.1.1 弱磁性物体	1
1.1.2 铁磁体、反铁磁体和亚铁磁体	3
1.2 铁磁体中的能量及磁化过程	15
1.2.1 磁晶各向异性能	16
1.2.2 磁致伸缩	19
1.2.3 退磁场、退磁因子和退磁能	22
1.2.4 磁畴的基本理论	27
1.2.5 畴壁能、畴壁类型及单畴尺寸	29
1.2.6 磁化曲线、磁滞回线	35
1.3 铁磁体实际应用中的特性	37
1.3.1 铁磁体在交变磁场中的磁化过程	38
1.3.2 磁导率与频率的关系	41
参考文献	42
第二章 永磁材料	43
2.1 永磁材料的特性	43
2.2 磁路设计的基本原理	46
2.3 永磁材料的种类	48
2.3.1 淬火硬化型磁钢	48
2.3.2 析出(沉淀)硬化型磁钢	48
2.3.3 时效硬化型磁钢	57
2.3.4 有序硬化型永磁合金	59
2.3.5 单畴微粉永磁合金	62
2.3.6 稀土钴永磁合金	63
2.3.7 永磁铁氧体材料	66
2.3.8 塑料永磁材料	72
2.4 永磁材料的磁性能稳定性	76
2.5 永磁材料的稳定化处理	76
2.5.1 人工时效处理	76
2.5.2 交流退磁处理	78
2.5.3 磁接触稳定处理	78

2.5.4 温度循环稳定处理	78
2.6 永磁材料的应用	79
2.6.1 在电机中的应用	80
2.6.2 在电真空器件中的应用	83
2.6.3 在微波铁氧体器件中的应用	84
2.6.4 永磁铁氧体耦合器	85
2.6.5 在几种设备中应用	85
2.6.6 磁性书写板	87
2.6.7 在节约能源方面应用	88
2.6.8 在医疗上应用	88
2.6.9 在农业上的应用	90
参考文献	90
第三章 软磁铁氧体和磁介质	92
3.1 概况	92
3.1.1 对软磁铁氧体材料的要求	93
3.1.2 锰锌铁氧体	95
3.1.3 镍锌铁氧体	100
3.1.4 平面型六角晶系铁氧体	105
3.1.5 锂锌铁氧体	105
3.1.6 镁锌铁氧体	105
3.2 生产软磁铁氧体的有关工艺	108
3.2.1 粉料制备	108
3.2.2 坯料制备	109
3.2.3 成型工艺	109
3.2.4 烧结工艺	110
3.3 应用和选择材料的原则	110
3.4 磁芯形状	112
3.4.1 E形和U形磁芯	112
3.4.2 罐形磁芯	114
3.5 功率变压器用的铁氧体材料	117
3.5.1 材料的制备	121
3.5.2 磁芯	122
3.6 磁介质	123
3.6.1 磁介质磁芯的结构	123
3.6.2 磁介质用的原料	125
3.6.3 羰基铁粉芯	127
参考文献	128

第四章 金属软磁材料	129
4.1 电工用纯铁	129
4.1.1 用途和选择材料的原则	129
4.1.2 纯铁的性能	131
4.1.3 减少时效的方法	133
4.2 电工用硅钢片	134
4.2.1 对材料的要求	135
4.2.2 硅钢的性能	137
4.2.3 高斯织构硅钢片	146
4.2.4 立方织构硅钢片	149
4.2.5 板材和带材的绝缘	150
4.2.6 退火处理	154
4.3 铁铝合金	155
4.3.1 铁铝合金的特性	157
4.3.2 用途和有关工艺	163
4.3.3 铁铝合金热处理	164
4.4 铁镍合金	166
4.4.1 铁镍合金的基本结构	166
4.4.2 铁镍合金分类和性能	169
4.4.3 铁镍合金在交变场中的性能	174
4.4.4 铁镍合金在加工中的工艺问题	175
4.4.5 热处理工艺	177
4.5 非晶态软磁合金	177
4.5.1 非晶态软磁合金的特性	179
4.5.2 钴基非晶态软磁合金	180
4.5.3 铁基非晶态软磁合金	180
4.5.4 铁镍基非晶态软磁合金	182
4.5.5 热处理工艺对非晶态软磁合金性能的影响	182
4.5.6 非晶态软磁合金的应用	186
参考文献	191
第五章 微波领域用的磁性材料	193
5.1 铁磁共振	193
5.2 张量磁导率	197
5.3 $4\pi M_s$ 的选择原则	198
5.4 微波铁氧体材料	199
5.4.1 钡锰系铁氧体	200

5.4.2	镍系铁氧体	203
5.4.3	锂系铁氧体	208
5.4.4	石榴石型铁氧体	209
5.4.5	钙钒系石榴石	214
5.4.6	石榴石单晶	216
5.4.7	毫米波用的铁氧体材料	217
5.4.8	国内生产的微波铁氧体材料	222
5.4.9	微波多晶铁氧体的制备	224
5.4.10	制备微波铁氧体实例	227
5.5	微波铁氧体器件的种类和应用	230
5.5.1	法拉第旋转效应器件	231
5.5.2	结环行器	233
5.5.3	隔离器	237
5.5.4	差相移式环行器	242
5.5.5	铁氧体相移器	245
5.5.6	铁氧体开关	248
5.5.7	单晶器件	248
5.6	微波吸收材料	252
5.6.1	微波吸收原理	253
5.6.2	微波吸收材料的种类	255
5.6.3	铁氧体吸收材料	257
5.6.4	微波吸收材料的应用	261
5.7	静磁波材料	262
5.7.1	静磁波材料	262
5.7.2	静磁波器件的应用	263
参考文献		265
第六章	磁记录用的磁性材料及磁泡	267
6.1	磁头	267
6.1.1	对铁芯材料的要求	269
6.1.2	磁头用的铁芯材料	272
6.1.3	铁芯的合金材料	273
6.1.4	软磁铁氧体磁芯	275
6.1.5	锰锌单晶	278
6.2	水平记录和垂直记录	279
6.3	磁鼓、磁盘和磁带	281
6.4	磁记录用的磁介质材料	282
6.5	磁芯	234

6.5.1 镍钴铁氧体.....	285
6.5.2 铜钴铁氧体.....	287
6.5.3 镍锌锰铁氧体.....	288
6.5.4 其它铁氧体.....	288
6.5.5 矩磁铁氧体烧结工艺.....	289
6.5.6 我国生产的记忆磁芯的特性.....	290
6.6 磁膜存储器.....	291
6.7 磁光记录.....	295
6.7.1 磁光记录材料.....	295
6.7.2 磁光盘存储器.....	297
6.8 磁泡.....	298
6.8.1 磁泡器件的制作过程.....	299
6.8.2 磁泡材料.....	301
6.8.3 磁泡的应用.....	305
参考文献.....	307
第七章 磁性液体.....	308
7.1 工程上对磁性液体的基本要求.....	308
7.2 磁性液体的特性.....	309
7.3 制备方法.....	310
7.3.1 强磁性微粒的制备.....	311
7.3.2 表面活性剂.....	313
7.3.3 基液.....	314
7.3.4 我国制备的磁性液体的性能.....	315
7.4 磁性液体的应用.....	317
7.4.1 动密封装置.....	317
7.4.2 阻尼和润滑.....	319
7.4.3 沉浮分离.....	320
7.4.4 新型电声元件.....	321
7.4.5 油水分离和废水处理.....	321
7.4.6 失重下的记录笔.....	322
7.4.7 磁性染料.....	322
7.4.8 磁性燃料.....	323
7.4.9 磁性液体陀螺.....	323
7.4.10 水下低频声波发生器.....	324
7.4.11 改进型变压器及电感磁芯.....	325
7.4.12 用于移位寄存器显示.....	327
参考文献.....	328

第八章 特殊用途的磁性材料	329
8.1 恒磁导率材料	329
8.2 磁致伸缩材料	332
8.2.1 铁钴钕软磁合金	332
8.2.2 1J13合金	332
8.2.3 铁氧体材料	334
8.2.4 Fe-B系非晶态合金	336
8.3 磁温度补偿合金	337
8.3.1 磁温度补偿合金分类和用途	337
8.3.2 我国生产的磁温度补偿合金性能	338
8.4 高饱和磁感应强度材料	345
8.5 超低温电磁合金	346
8.6 高弹性高饱和磁感应强度的软磁合金	347
8.7 热敏铁氧体材料	347
参考文献	349
第九章 环境对磁性材料的影响	350
9.1 温度的影响	350
9.1.1 软磁合金材料	351
9.1.2 软磁铁氧体材料	354
9.1.3 微波铁氧体材料	356
9.1.4 永磁材料	358
9.2 时间的影响	362
9.2.1 永磁材料	363
9.2.2 软磁铁氧体	366
9.2.3 微波铁氧体	368
9.3 应力的影响	368
9.3.1 软磁合金材料	368
9.3.2 软磁铁氧体	372
9.3.3 永磁材料	373
9.4 核辐照的影响	377
9.4.1 “呈软”磁合金材料	379
9.4.2 “较硬”软磁合金材料	380
9.4.3 磁介质和铁氧体材料	381
9.4.4 永磁材料	382
9.4.5 微波铁氧体材料	382

9.5 综合环境的影响	383
参考文献	386
第十章 附录	387
10.1 本书符号说明	387
10.2 名词解释	389
10.3 软磁合金性能图表	393
10.4 主要磁学量和单位及其换算关系	405
主要参考书	406

第一章 磁性材料的物理基础

1.1 物质的磁性

原子的电子结构，是物质磁性的基础。图 1.1 是 M 壳层的电子组态^[1]。从图中可以明显地看到，第三壳层的电子状态有 s 、 p 和 d 三种轨道。如果 18 个位置全部被占满，则轨道磁矩和自旋磁矩都为零，这个壳层就没有净磁矩，如 He、Ar、Kr 等惰性气体原子的各个电子壳层都属于这种情况。如果电子壳层中有空位，它就会呈现出净磁矩，空位数目不同，净磁矩的大小也不同。处在气态、固态或者各种化合态下，原子将具有不同的电子结构，因而表现出不同的磁性。

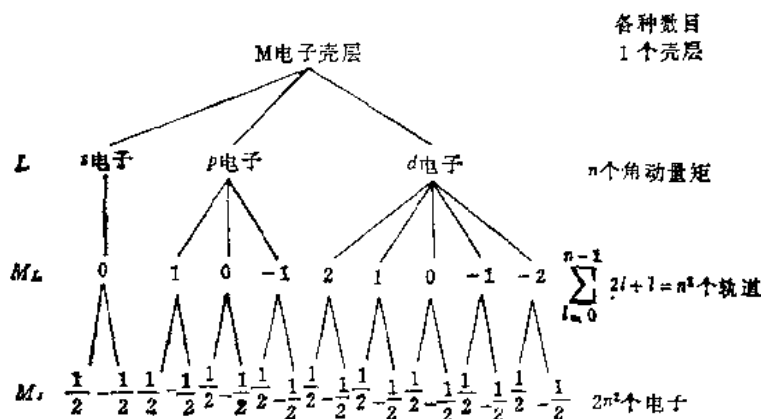


图1.1 M壳层的电子组态

1.1.1 弱磁性物体

按照物质在磁场中的行为，可以比较明晰地划分为三个主要类别，即抗磁体、顺磁体和铁磁体，而这三类的每一类又可以按更精细的磁特性而更细致地分类。

1. 抗磁体

原子的电子轨道运动在磁场 H 中产生电磁感应效应，同时电子壳层就得到拉莫尔旋进附加角速度

$$\Delta\omega = -e\mu_0 H / 2m \quad (1.1)$$

由于这个附加角速度产生的附加磁矩

$$\Delta M = \frac{\mu_0 e \Delta\omega}{2\pi} A$$

由式 (1.1) 可得

$$\Delta M = -\frac{\mu_0^2 e^2 A}{4\pi m} H \quad (1.2)$$

式中 e ——电子电荷，

m ——电子静止质量，

A ——电子轨道面在垂直于磁场平面上的投影面积，

μ_0 ——真空磁导率 ($4\pi \times 10^{-7}$)。

ΔM 的方向与磁场方向相反，这就是抗磁性，式 (1.2) 中的 $\mu_0^2 e^2 A / 4\pi m$ 称为抗磁磁化率。

电子壳层完全填满的惰性气体是典型的抗磁体，由于电子磁矩互相抵消，所以惰性气体本身无磁。任何原子若电离至惰性气体相同的电子壳层，都将是抗磁的。例如，一价 Na 电离一次（到 Na^+ ），二价 Ca 电离二次（到 Ca^{2+} ），虽然金属 Na 和 Ca 是顺磁体，但它们的离子是抗磁体。按理论式计算出来的与对惰性气体和电离金属（在盐、溶液等中）用实验测出的很吻合。这可以认为构成金属点阵的离子与此金属在盐和水溶液中的离子有相同的抗磁磁化率。

2. 顺磁体

顺磁体的特征是组成这些物质的原子具有恒定的与外磁场无关的磁矩，在无外加磁场 ($H = 0$) 时，由于热运动的扰乱作用，这些恒定的原子磁矩没有特定的取向。只有引入和加大磁场时，磁化强度才开始产生并逐渐增长。如果磁场不很强，以致元磁体的磁矩 μ 在磁场中的能量 ($\sim \mu H$) 与它们的平均热能 kT 相比很

小, 即 $\mu H/kT \ll 1$ 时, 顺磁体的磁化强度随外磁场的值成比例地增长:

$$M \propto \chi H \quad (1.3)$$

顺磁磁化率 χ 按照居里定律随温度而变化:

$$\chi = \frac{C}{T} \quad (1.4)$$

此处 C 是居里常数。这个规律最早由朗之万用经典的热力学方法导出。他没有考虑原子之间的相互作用, 只认为每个分子具有固有磁矩 μ , 类似于理想的由磁针组成的经典气体, 他的结论是

$$\chi = \frac{N\mu^2}{3kT} = \frac{C}{T} \quad (1.5)$$

但是只有少数几种顺磁体 (如 O_2 、 NO) 准确符合这个定律, 大多数顺磁体服从于更为复杂的居里-外斯定律:

$$\chi = \frac{C'}{T + \Delta} \quad (1.6)$$

这里, 常数 Δ 可以大于零, 也可以小于零。

大多数包含一个原子以上的分子都是抗磁性的, 因为它们通常含有偶数个电子, 这些电子组成不显示磁性的封闭层。但也有例外, 具有偶数电子的氧分子 (O_2) 便是顺磁性的。非偶数电子的分子比偶数电子分子少得多, 这类分子自然是顺磁性, NO 是典型的代表。

金属与其它固体不同, 其中有导电电子的存在, 包括VIII族三联组之前的所有金属元素及三联组内的一些金属元素如锂、钠、钾、铯等, 都是顺磁体。大多数顺磁金属的特点是其磁化率 χ 不随温度而变化, 这是因为导电电子的贡献是顺磁磁化率的主要来源, 需要用能带理论来解释^[2, 8]。

1.1.2 铁磁体、反铁磁体和亚铁磁体

1. 铁磁体

铁磁体在一定温度以下, 表现出磁化率很大, 随着磁场的增强, 而出现非线性关系, 在磁场强度周期变化的磁化过程中, 由