

下

磁性体手册

〔日〕近角聪信 等编 韩俊德 杨膺善 译 冶金工业出版社

磁性体手册

下 册

〔日〕近角聡信 等编

韩俊德 杨膺善 译

陈 易 之 校

冶金工业出版社

内 容 提 要

《磁性体手册》下册为手册的“物质特性篇和应用篇”部分。书中全面地阐述了金属与合金的基本特性——磁各向异性，磁致伸缩，磁畴结构，动态、静态磁化过程，磁电效应，磁光效应，热磁效应；各类软磁、永磁、薄膜、微粉、铁氧化物、磁致伸缩材料、磁记录技术用材料和磁泡材料的特性、制造技术和应用情况。

本书适合于关心物质磁性的在科研部门及工厂工作的各类科技工作者、大学及中专教师与学生阅读。

磁性体ハンドブック

近角聡信 等 編集

磁性体手册

下 册

〔日〕近角聡信 等編

韩俊德 杨膺善 译

陈 易 之 校

★

冶金工业出版社出版

（北京北隅沿大街属祝院北巷39号）

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

•

850×1168 1/32 印张22 7/8 字数604千字

1985年11月第一版 1985年11月第一次印刷

印数00,001~3,450册

统一书号：15062·4161 定价6.15元

中译本前言

本书是根据日本近角聪信教授等编的朝仓书店1975年出版的《磁性体ハンドブック》一书翻译的。全书包括磁性物理概论、基础理论和基础实验、各种磁性体的磁性、磁化过程及磁化伴随现象、磁性体的应用等，共四篇二十六章。内容全面，是一部磁学百科全书。因篇幅甚大，本书中译本分上、中、下三册出版。

近年来，磁学研究和磁性材料的科研与生产不断发展，在理论和应用方面都取得了很多成果。我国磁学的研究和磁性材料的生产在实现四个现代化中发挥了巨大的作用。各种磁性材料和器件广泛用于科学研究、工农业生产、国防、医疗卫生和人民生活各个方面。随着科学技术的发展，磁性材料和器件的应用将不断地扩大。

我国磁学研究和磁性材料的科研与生产已具备了相当大的规模。广大科学工作者和工程技术人员在发展磁学的基础理论，探索新的磁性材料，发展磁性材料新应用的科学研究和生产活动中，迫切希望得到一本适用的参考书，以便能从中迅速地找到所需要的迄今为止人们已经知道的详细资料和数据，这样可以少走弯路，加快工作的进展。该书的作者们正是根据这种实际需要而编辑的。参加撰写的人大都是日本在各个领域中从事研究工作多年、享有一定威望的专家。我们翻译此书的目的是希望将这样一本有价值的工具书提供给我国磁学及磁性材料工作者，满足他们工作中的实际需要。

作为一本手册，本书提纲挈领地介绍了磁学中的各种基本概念和这个领域中的最新研究成果，并载有必要的图、表，列举了大量的数据。为使不大熟悉磁学这一专门学问的人也能了解这些数据的意义，各章节中用通俗的语言阐述了有关的基础知识。本书可供从事磁学和磁性材料科研人员，生产、使用部门的工程技

术人员以及大专院校的有关师生参考。

本书第12至20章由杨膺善译，第21至26章由韩俊德译。在翻译本书时，我们力图保持原文的风格，但是由于我们水平所限，译文中错误和不妥之处，请读者批评指正。

译 者

一九八二年五月

序

近年来，固体物理获得了惊人的发展，特别是磁性物理研究的进展尤为显著，有关这方面的论文每年都在1000篇以上。磁性材料及其应用在广度和数量上也逐年增加，除软磁、硬磁材料外，关于磁录音、磁存储方面的应用，完全改变了过去关于磁的应用的概念。

二十年前，如果想编写一部关于磁性体的教科书，必须留意收集全部资料，留心是否有遗漏，而现在做这项工作时，费心思的却是从堆积如山的资料中如何选择的问题。因此，在今后的磁性体的教科书中，期望包罗全部资料是办不到的。

然而，不论是继续进行磁性物理的研究，或是进行磁性材料的研究，还是仅仅作为用户使用磁性材料，以及进而探索发展新的磁性应用装置的可能性，都希望能够很容易地得到迄今为止人们已经知道的关于磁性体的详细资料。如果有一部介绍有关磁性体的重要资料的手册，应该说是非常有益的。可是，这样的手册在世界上尚未见到。因此，试编一本这样的《手册》就是我们着手编辑本《手册》的动机。

不过，如果只是堆砌一些数据，那将是一部难以使用的书。这是因为磁性领域是一个比较特殊的领域，磁性物理和应用技术，除专家之外，许多人不大了解，如果不对这些问题进行说明，就难于理解各种数据的意义。

为了使初学者也能理解，同时又能作为教科书使用，本书各章均载有各有关现象的简单说明，以表或图的形式给出专门数据，与此同时，努力介绍当前研究的最尖端的成果。执笔者求助了各领域的专家对各部分均做了精湛的概括。资料是从1968年以前的主要文献中收录的，但由于执笔者写作进度的不同，有的也包括了1969年的文献。

本手册的内容包括 I、基础篇；II、物质篇；III、物性篇；IV、应用篇等四篇构成。基础篇叙述了磁性物理的概论、基础理论和基础实验；物质篇详细地叙述了从金属、合金到化合物、氧化物的各种磁性体的磁性；物性篇叙述了磁各向异性、磁致伸缩、磁畴、磁化过程、磁共振、磁光等磁性诸现象；应用篇叙述了软磁、硬磁以外，还记述了磁录音、磁存储以及磁泡存储器等。全书是一部由四篇二十六章构成的著作。

如果本《手册》能对初学者学习磁性体有所帮助，对磁性研究者能成为一本常用的工具书，在他们研究新的磁性时有所裨益，对磁性材料的使用者能成为一本实用的数据手册的话，则全体编辑者将感到由衷地高兴。

读者发现本书的叙述上有不妥之处，或者得到了更新的数据，请告知编者，以便修订本书时予以考虑。谨在这里表示我们衷心的希望。

近角聡信 太田惠造 安達健五

津屋昇 石川義和

一九七五年五月

目 录

第3篇 物 性 篇

第12章 磁各向异性	1
12.1 概论	1
12.1.1 唯象理论	1
12.1.2 产生磁各向异性的原因	8
12.2 磁晶各向异性	19
12.2.1 金属与合金的磁晶各向异性	19
12.2.2 化合物的磁各向异性	30
12.2.3 氧化物(铁磁性及亚铁磁性物质)	42
12.3 感生磁各向异性	58
12.3.1 磁退火效应	58
12.3.2 轧制磁各向异性	67
12.3.3 交换各向异性	70
12.4 反铁磁性物质的磁各向异性(测定法)	72
12.4.1 磁化率法	74
12.4.2 转矩法	78
12.4.3 远红外线反铁磁性共振法	80
12.4.4 绝热磁化法	80
12.4.5 超声波衰减法	81
12.4.6 其他	88
第13章 磁致伸缩	89
13.1 磁致伸缩概述	89
13.2 方向性磁致伸缩	91
13.2.1 磁致伸缩的形状效应	91
13.2.2 磁弹性耦合能和磁致伸缩系数	92
13.2.3 磁化过程与磁致伸缩	94

13.2.4	方向性磁致伸缩的起因	96
13.2.5	关于磁致伸缩系数与温度关系的理论	100
13.2.6	方向性磁致伸缩系数的测定法	100
13.2.7	磁致伸缩的实验数据	101
13.3	体积磁致伸缩	129
13.3.1	热膨胀反常	131
13.3.2	强制磁致伸缩	133
13.3.3	形状效应	139
13.4	磁机械效应	141
13.4.1	威德曼效应和逆威德曼效应	141
13.4.2	ΔE 效应	142
13.4.3	自发磁化强度的压力效应	143
13.4.4	磁转变点的压力效应	145
13.4.5	交换相互作用的压力效应	147
13.4.6	磁晶各向异性的压力效应	148
第14章	畴壁	150
14.1	观察方法	150
14.1.1	粉纹法	150
14.1.2	使用电子显微镜的罗伦兹法	155
14.1.3	磁光方法	155
14.1.4	X射线形貌学方法	155
14.2	畴壁的结构	157
14.2.1	畴壁的概念	157
14.2.2	用变分法求得的正确的自旋分布	160
14.2.3	90°畴壁	163
14.3	实际的畴壁	167
14.3.1	均匀磁性体的畴壁	167
14.3.2	泡畴	170
14.3.3	不均匀磁性物体的畴壁	173
14.4	反铁磁性物质NiO, CoO的畴壁	176
第15章	静态磁化过程	180
15.1	内禀磁化过程	180

15.1.1 变磁性	180
15.1.2 超顺磁性	183
15.1.3 强磁场磁化率	188
15.2 技术磁化	191
15.2.1 磁化曲线	191
15.2.2 磁化率	198
15.2.3 瑞利回线	203
15.2.4 矫顽力	205
15.2.5 趋近饱和律	207
第16章 动态磁化过程	209
16.1 交流磁化	209
16.2 涡流	210
16.3 磁后效	214
16.3.1 扩散磁后效	216
16.3.2 减落现象	217
16.3.3 热波动磁后效	218
16.3.4 其他	219
16.4 高频损耗	220
16.4.1 磁滞损耗	220
16.4.2 涡流损耗	220
16.4.3 剩余损耗	221
16.5 开关特性	224
第17章 电子自旋共振	228
17.1 顺磁性共振	228
17.1.1 顺磁性盐的谱	228
17.1.2 顺磁性金属	229
17.2 铁磁性共振	229
第18章 电磁特性	236
18.1 磁阻效应	236
18.1.1 正常磁阻效应	237
18.1.2 反常磁阻效应	237
18.2 磁场电效应 霍尔效应	242

18.2.1 霍尔效应的唯象论说明	244
18.2.2 磁性物质霍尔效应的理论概要	248
18.2.3 霍尔效应的实际实验	259
18.3 磁电效应	305
18.3.1 磁电效应和压磁效应	305
18.3.2 ME效应和磁畴结构	308
18.3.3 ME效应和PM效应的测定	308
18.3.4 典型磁性物质的ME效应及PM效应	310
第19章 磁与光	318
19.1 磁光学	318
19.1.1 磁光效应	318
19.1.2 关于磁光效应的实验	330
19.1.3 磁光效应常数表	331
19.1.4 磁光效应的应用	346
19.2 磁性物质分光学	348
19.2.1 在顺磁性状态下的光谱	349
19.2.2 磁性离子对的光谱	352
19.2.3 在磁有序状态下的光谱	354
19.2.4 起因于磁振子的光散射	364
第20章 热与磁	367
20.1 电子比热	368
20.2 反常磁比热	372
20.3 来自核磁性的反常比热	374
20.4 磁致热效应	376
20.4.1 热力学探讨	376
20.4.2 铁磁性物质的磁致热效应	378
20.4.3 磁致热效应的应用	385
20.5 磁热效应	389
第 4 篇 应 用 篇	
第21章 高导磁材料	390
21.1 金属高导磁材料	390

21.1.1	纯铁、电磁软铁	390
21.1.2	电工钢板	393
21.1.3	Fe-Al合金	402
21.1.4	铁硅铝合金 ⁽⁴²⁾	405
21.1.5	坡莫合金	407
21.1.6	恒磁导率材料	421
21.1.7	磁粉芯	424
21.2	软磁铁氧体	426
21.2.1	软磁铁氧体的概况	426
21.2.2	铁氧体的制造工艺	429
21.2.3	铁氧体的不稳定性	430
21.2.4	铁氧体的种类和用途	431
21.2.5	微波用铁氧体	432
21.2.6	其它材料	439
第22章	永久磁铁	441
22.1	单畴理论	442
22.2	铝镍钴系磁铁 (CGS)	445
22.2.1	铝镍钴系磁铁的历史	445
22.2.2	铝镍钴系磁铁的生产工艺	447
22.2.3	目前通用的铝镍钴系磁铁	448
22.3	ESD磁铁	449
22.4	铜和锆铁氧体磁铁	450
22.5	可加工磁铁	457
22.6	稀土-钴磁铁	462
第23章	矩形磁滞回线材料	469
23.1	各向异性50Ni坡莫合金	472
23.2	其他矩形磁滞回线坡莫合金	473
23.3	记忆磁芯	475
23.4	半硬磁材料	479
第24章	薄膜和微粉	483
24.1	薄膜的磁性	483

24.1.1	薄膜的自发磁化	483
24.1.2	感生磁各向异性	488
24.1.3	畴畴结构和畴壁	499
24.1.4	磁化反转	509
24.2	单畴微粒子	518
24.2.1	斯托纳-沃尔法思模型	519
24.2.2	粒子填充率的影响	520
24.2.3	单畴粒子的临界尺寸和卷曲、翘曲与扇动	520
24.2.4	转动磁滞	522
24.2.5	超顺磁性	523
24.2.6	普赖扎赫图	524
24.2.7	相互作用磁场	524
第25章	用于超声波发生的磁致伸缩材料	525
25.1	磁致伸缩振子	525
25.2	物质动态磁致伸缩各种常数	526
25.2.1	各常数同偏置磁化的关系	529
25.2.2	关于剪切效应	530
25.3	磁致伸缩振子材料所要求的特性	531
25.3.1	振子的转换效率	531
25.3.2	容许声输出	533
25.3.3	温度特性	533
25.4	磁致伸缩振子材料	533
第26章	磁录音和磁存储	536
26.1	磁芯存储和逻辑元件	536
26.1.1	磁芯存储	536
26.1.2	逻辑元件	542
26.2	磁性薄膜存储	544
26.2.1	基本结构	544
26.2.2	工作方式	546
26.2.3	闭磁路结构和衔铁	548
26.2.4	可靠性	549
26.3	磁记录	550

26.3.1 磁记录机构和记录损耗	550
26.3.2 记录磁介质和磁头材料	556
26.4 磁泡技术	559
26.4.1 磁泡及其结构	559
26.4.2 磁泡畴材料及其特性	568
26.4.3 单晶和单晶膜的生长方法及晶体评定方法	588
26.4.4 磁泡畴传输方法和畴壁速度的测定	596
26.4.5 磁泡畴的观察方法和检测方法	622
26.4.6 应用	626
附录	628
1. 磁性材料的各种标准	628
1.1 日本工业标准 (JIS)	628
1.2 日本电机工业会标准规格 (JEM)	629
1.3 通信机械工业会技术标准 (CESM)	629
1.4 日本电子机械工业会规格 (EIAJ)	629
1.5 电子材料工业会标准规格 (EMAS)	629
1.6 标准的内容概要	630
2. 公式和数表	637
2.1 总角动量的矩阵元	637
2.2 布里渊函数表	641
2.3 由分子场近似求得的 $\langle S \rangle$ 、 $\langle S \rangle / S$ 、 $\langle S^2 \rangle$ 、 $\langle S^4 \rangle$	656
2.4 自旋算符的积的热平均及其绝对零度的值	662
3. MKSA单位和CGS单位的换算表	664
参考文献	666

第3篇 物 性 篇

第12章 磁各向异性

12.1 概 论

12.1.1 唯象理论

(1) 宏观表现

所谓磁各向异性是指在形成铁磁体的晶体中, 铁磁体的自发磁化方向改变时内能发生变化的现象。其结果为当不存在外磁场时, 自发磁化指向内能最低的晶体学方向。由于在这个方向最容易磁化, 称其为易磁化轴。与此相反, 把内能最大的方向称为难磁化方向。将这一与自发磁化的方向有关的内能称为磁各向异性能。

磁各向异性能反映着晶体的对称性。例如, 在六角晶系的场合, 如令磁化矢量与 c 轴 (三次对称轴) 的夹角为 θ , 自 c 面内的 a 轴测得的磁化矢量的方位角为 φ , 则单位体积的磁各向异性能 E_s 可用下式表示:

$$E_s = K_{u1} \sin^2 \theta + K_{u2} \sin^4 \theta + K_{u3} \sin^6 \theta + K_{u4} \sin^6 \theta \cos 6\varphi + \dots \quad (12.1)$$

式中 K_{u1} 、 K_{u2} 、 K_{u3} 、 K_{u4} 为磁各向异性常数, 其值因物质及温度不同而异。如果第二项以后忽略不计, 则当 $K_{u1} > 0$ 时, c 轴为易磁化轴; 当 $K_{u1} < 0$ 时, c 面为易磁化面; 当 $K_{u4} \geq 0$ 时, b 轴或 a 轴的方向为易磁化方向。 $K_{u1} \sim K_{u4}$ 的数值大致取 $10^5 \sim 10^6$ 焦耳/米³ (当然, 比这小的情况也有)。

在立方晶系的场合，对于四次对称轴 x 、 y 、 z 坐标，如令饱和磁化的方向余弦为 α_1 、 α_2 、 α_3 ，则各向异性能可用下式表示：

$$E_s = K_1(\alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2 + \alpha_1^2\alpha_2^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + \dots \quad (12.2)$$

如果第二项以后忽略不计，则当 $K_1 > 0$ 时， $\langle 100 \rangle$ 方向为易磁化方向；当 $K_1 < 0$ 时， $\langle 111 \rangle$ 方向为易磁化方向。立方晶系各向异性常数数值的大小约为 $10^4 \sim 10^5$ 焦耳/米³ ($10^5 \sim 10^6$ 尔格/厘米³)。一般来说，对称性高的晶体的各向异性常数要比对称性低的为小。其原因为：尽管由于磁性离子具有局域的低对称相互作用，产生了反映这种相互作用的各向异性，但就整个高对称的晶体，平均后就相互抵消了。

上述反映了晶体对称性的磁各向异性称为磁晶各向异性。各种铁磁性物质的磁晶各向异性常数汇集在12.2节中。与此不同，进行方向性处理，例如将晶体在磁场中冷却或者把晶体沿某一个方向进行轧制，会感生出一种单轴各向异性，即所谓感生磁各向异性。有关这些将在12.3节中叙述。

关于磁各向异性的起因将在下一项12.1.2中详述；如果成为其起因的机制本身随温度发生变化，则磁各向异性常数也会随之发生变化；除这种机制外，随着温度的上升将使自发磁化的取向分布越来越紊乱，一般会导致各向异性常数减小。各向异性常数用对应于自发磁化方向的 n 次勒让德 (Legendre) 多项式来表示时，一般有如下形式^[1]：

$$\frac{K_2(T)}{K_2(0)} = \left(\frac{I_s(T)}{I_s(0)} \right)^{n(n+1)/2} \quad (12.3)$$

例如，对于立方晶系各向异性常数 K_1 ， $n=4$ 时，则指数为10。实际上在一级近似时，铁等与这个十次方的公式符合得相当好 (12.1.1(1))。另外，对于六角晶系单轴各向异性， $n=2$ 时，指数为3。这样，各向异性常数的温度变化一般比自发磁化的还要剧烈，在居里点各向异性常数消失。

(2) 测定方法

磁各向异性的测量方法有如下三种。

a. 磁转矩仪法 把铁磁性试样加工成对称性好的圆片或者球形，将其置于电磁铁产生的强磁场中，用弹性丝将试样悬吊并用一个没有摩擦的轴承支撑（图12.1）。若磁场 H 的方向与易磁化轴不一致时，试样晶体将受转矩的作用而回转，使磁化方向与易轴方向靠近。单位体积的转矩值 L 由磁各向异性能 E_s 对角度的微分给出。即：

$$L = -\frac{\partial E_s}{\partial \theta} \quad (12.4)$$

式中 θ 为在水平面内由某一个晶体轴到自发磁化方向的角度。

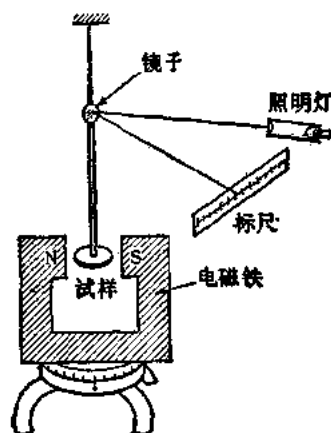


图 12.1 磁转矩仪的原理图

例如，在立方晶系的(001)面内进行测量时，如令自 $[100]$ 轴起测量的角度为 θ ，则 $\alpha_1 = \cos\theta$ ， $\alpha_2 = \sin\theta$ ， $\alpha_3 = 0$ ，因此由式(12.2)：

$$E_s = K_1 \cos^2\theta \sin^2\theta = \frac{K_1}{4} \sin^2 2\theta \quad (12.5)$$

将式(12.5)代入式(12.4)，转矩就成为：