

[英] R. S. 特贝尔 D. J. 克雷克 著

磁性材料

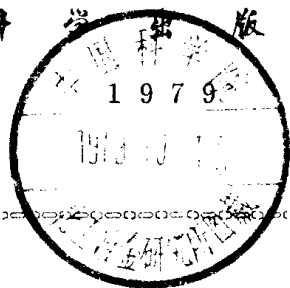
51634
科学出版社

磁性材料

[英] R. S. 特貝尔 D. J. 克雷克 著

北京冶金研究所《磁性材料》翻譯組 譯

科學出版社



内 容 简 介

本书对磁性材料的基础研究提供了基本数据,具有手册性特点,又可作为入门性读物。

全书共分15章,前10章为有关磁性材料的内禀性能,11章以后涉及在技术上很值得重视的对结构敏感的性能。书中首先阐述磁学基本概念,并详细介绍了铬、锰、铁、钴、镍等过渡族金属、合金及其化合物的磁性;然后以较大篇幅介绍了有实用意义的永磁材料、软磁金属与合金、铁氧体以及矩形迴线开关和记忆元件。大部份磁性材料是按铁磁性、亚铁磁性或反铁磁性顺序排列的。

本书可供从事磁性材料生产、科研和使用部门的科技人员和工人参考,也可作为高等院校有关专业师生的教学参考书。

R. S. Tebble & D. J. Craik

MAGNETIC MATERIALS

Wiley-Interscience London, 1969

磁 性 材 料

[英] R.S. 特贝尔 D.J. 克雷克 著

北京冶金研究所《磁性材料》翻译组 译

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

西安新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1979 年 1 月第一次印刷 印张: 25 1/4

印数: 0001—17,500 字数: 579,000

统一书号: 15031·211

本社书号: 1297·15—2

定 价: 2.60 元

译 者 的 话

在毛主席无产阶级革命路线指引下，我国国民经济正在日新月异地向前发展。随着我国电力、电子、机械制造等工业和尖端技术的迅速发展，对磁性材料的需要量将不断增加，而且对材料性能提出了新的更高的要求。

为了促进我国磁性材料的发展，我们翻译出版了本书。书中大部份材料都是按磁性顺序排列的，也就是说，它们是按铁磁性、亚铁磁性或反铁磁性排列的。前十章涉及内禀性能，后五章涉及对结构敏感的性能，这些性能在技术上很值得重视。上述两部分的编排方法大不一样。本书扼要提供有关内禀性能的资料，并在进行必要的介绍之后，酌量加以评述。在本书的第二部分，涉及到一些参数，如导磁率，矫顽力，共振线宽和开关速度，它们与内禀性能，样品尺寸，样品形状，纯度，热处理和微观结构这些因素的结合情况有关。书中作了较充分的说明。

本书涉及领域较广，收集资料较全，可供从事磁性材料生产、研究和使用部门的科学技术人员和工人参考。但应当指出，本书成书较早（1968年），由于近年来这一领域科学技术发展极为迅速，许多新型材料（例如稀土钴永磁体，铁钴铬系可加工永磁材料，半硬磁材料等）未能详细总结进来，某些基础研究阐述不够深入。此外，书中除作者自己作的那部份工作外，引用的大部份资料来源不同，因此发现有图文不符和其它错误之处经译者用译注的方式作了更正，同时也望读者阅读时注意。

参加本书翻译的有戴问民(1)、刘佑华(2)、陈其安(3)、史凤志(4)、李新立(5、8)、康振川(6)、曾令俊(7)、孟宪英(9、10)、李伯臧(11)、万永(12)、肖慧(13)、陈笃行(14、15)等同志。由于我们专业知识和外文水平都有限,错误之处必然不少,敬希读者批评指正。

北京冶金研究所《磁性材料》翻译组

1976年1月

目 录

1. 磁学	1
1.1 引言	1
1.2 单位	3
1.3 磁场和静磁能	5
1.4 物质的分类	7
1.5 顺磁性	10
1.6 朗之万顺磁性	10
1.7 金属中的顺磁 性[泡利(Pauli) 顺磁性].....	14
1.8 铁磁性	17
1.9 相互作用场	21
1.10 反铁磁性.....	23
1.11 磁有序.....	24
1.12 亚铁磁性.....	26
1.13 磁晶各向异性.....	28
1.14 感生各向异性.....	30
1.15 磁致伸缩.....	30
1.16 磁滞迴线.....	32
1.17 磁畴.....	34
1.18 畴壁能.....	35
1.19 畴宽.....	37
1.20 单畴粒子.....	39
1.21 g 因子	41
1.22 磁性材料中的 磁光效应.....	42
1.23 霍耳效应.....	43
2. 过渡族金属	51
2.1 铬	56
2.2 锰	64
2.3 铁	68
2.4 钴	75
2.5 镍	78
3. 铁、镍、钴合金	88
3.1 铁-铝.....	88
3.2 铁-碳.....	96
3.3 铁-铬.....	98
3.4 铁-钴.....	99
3.5 铁-镍.....	99
3.6 氮化铁 Fe_3N	109
3.7 磷化铁	112
3.8 铁-硅.....	112
3.9 铁-钒.....	121
3.10 镍-钴	121
3.11 镍-铜	124
3.12 其它合金.....	127

4. 锰的合金	133		
4.1 Mn-Al	133	化合物 MnS	155
4.2 Mn-Bi MnAs		4.7 Mn-Sb Mn ₂ Sb	
MnSb MnTe			159
.....	134	4.8 Mn-Sn MnSn ₂	
4.3 Mn-Cu	141		160
4.4 Mn-Au	145	4.9 Mn-Zn	162
4.5 Mn-Ni	152	4.10 郝斯勒 (Heusler)	
4.6 Mn-S 和相应的		合金	165
5. 其它化合物和铁族合金	171		
5.1 铁族氧化物	171	5.4 铁族元素的硫	
5.2 铁族元素的卤		化物	180
化物	172	5.5 铂和钯铁族合	
5.3 过渡族元素的硼		金	193
化物	180	5.6 铬化合物	193
6. 稀土和钢族金属	200		
6.1 一般特性	200		248
6.2 轻稀土金属		6.5 稀土金属的	
La到Eu	205	霍耳效应	256
6.3 重稀土金属		6.6 稀土金属的合	
钆(Gd)到镨(Lu)		金和化合物	256
.....	215	6.7 钢族金属和化	
6.4 钇(Yt)和铈(Sa)		合物	263
7. 尖晶石铁氧体	279		
7.1 晶体学与磁结		7.3 复合铁氧体	292
构	279	7.4 硫属化合物	324
7.2 简单铁氧体	282		
8. 稀土石榴石	332		
8.1 晶体结构	332	8.3 磁性能	333
8.2 制备	332	8.4 替代的 Y-Fe石榴	

石	351	8.6 磁-光性能	357
8.5 替代的Gd石榴		8.7 g的共振值	367
石	355		
9. 正铁淦氧和钛铁矿	371		
9.1 正铁淦氧	371	9.3 钛铁矿	386
9.2 稀土正铁淦氧	382		
10. 六方铁氧体	394		
10.1 钡铁氧体及		10.2 W,Y,Z,X 和 U	
“M”化合物	394	化合物	399
11. 磁滞迴线及其派生性能	405		
11.1 引言	405	11.6 临界场: 形核	
11.2 控制磁化率的		和剩余磁畴	428
原则	408	11.7 大范围内的退	
11.2 a 转动过程		磁场	433
.....	408	11.8 退磁场的进一	
11.2 b 畴壁移动		步效应	437
.....	412	11.9 损耗	442
11.2 c 能量变化		11.9 a 磁化强度	
的原因	415	的小幅度	
11.2 d “一般”磁		变化	447
化曲线及		11.9 b 共振损耗	
I-H 迴线			449
.....	419	11.9 c 弛豫损耗	
11.3 趋近饱和——			449
转动过程	422	11.9 d 畴壁共振	
11.4 磁化循环的进		损耗	450
一步分析	424	11.9 e 尺寸共振	
11.5 取向材料的迴			450
线	425		

12. 永磁材料.....	453
12.1 结构和成分.....	453
12.2 要求.....	453 ✓
12.3 磁能积.....	455 ✓
12.4 磁导和载荷	
线的结构.....	457
12.5 剩磁.....	459 ✓
12.6 矫顽力和结构 ✓	
.....	459
12.6 a 钇正铁氧	
体的形核	
.....	460
12.6 b 微粒子.....	461
12.6 c 粒子的相	
互作用.....	466
12.7 微粒子磁铁.....	468
12.7 a 伸长微粒子	
磁铁.....	469
12.8 析出硬化合金	
.....	473
12.8 a 各向同性	
合金.....	479
12.8 b 各向异性	
“等轴”合	
金.....	479
12.8 c 具有取向	
(柱状晶)的	
各向异性	
合金.....	481
12.9 钢.....	486
12.10 铂合金	487
12.11 钕铁氧体	491
12.12 具有高晶	
体各向异性	
的其它材料	
.....	495
12.13 矫顽力与温	
度的关系	496
12.14 磁铁的稳定	
性	497
12.15 非磁的性能.....	500
12.16 进一步发展	
的可能性	500
13. 软磁金属与合金	505
13.1 引言.....	505
13.2 分类.....	506
13.3 铁镍合金.....	507
13.3 a 以 Fe-Ni	
为基的三	
元和四元	
合金.....	512
13.3 b 各向异性	
Fe-Ni 合	
金.....	522
13.3 c 立方结构	
合金.....	525
13.3 d 高Ni含量	
的立方织	

	构合金.....	533		硅钢.....	571
13.3 e	磁场退火 的Fe-Ni 合金.....	535	13.4 d	磁性.....	574
13.3 f	轧制感生 各向异性	542	13.4 c	晶粒取向 硅钢片的 应用.....	580
13.3 g	小迴线和 增量导磁 率.....	547	13.4 f	立方织构 硅钢.....	581
13.3 h	Ni-Fe 合金 中的损耗	550	13.4 g	取向铁硅 合金性能 的比较	588
13.3 i	Ni-Fe 合 金和 Per- minvar 合金中的 颈缩迴线	558	13.4 b	铁硅合金 的磁场退 火.....	593
13.4	铁和铁硅.....	563	13.4 i	高硅钢.....	594
13.4 a	纯铁.....	563	13.4 j	铁铝.....	595
13.4 b	铁硅.....	567	13.4 k	织构铁铝 合金.....	598
13.4 c	晶粒取向		13.4 l	铁硅铝.....	600
			13.5	粉末.....	602
			13.5a.	对粉末性 能的讨论	607
14.	铁氧体	618			
14.1	引言.....	618	14.2 b	杂质对导 磁率的作 用.....	632
14.1 a	铁氧体的制 备.....	621	14.2 c	晶粒尺寸 和气孔率 的作用.....	635
14.2	低频导磁率.....	625			
14.2 a	内禀性质 的作用.....	625			

14.3 气孔率的其它 作用..... 642	六角材料 686
14.3 a 致密铁氧 体..... 645	14.8 具有稳定化畴 壁的铁氧体..... 687
14.4 具有很高起始 导磁率的铁氧 体..... 650	14.9 导磁率的减落 或时间衰减..... 691
14.5 结构因素和损 耗..... 657	14.10 微波铁氧体697
14.5 a 涡流损耗 658	14.10 a 超高频700
14.5 b 高频下的 损耗..... 664	14.10 b 样品形 状和饱 和磁化 强度对 共振的 影响 702
14.5 c 畴壁共振 和弛豫..... 670	14.10 c 影响共 振磁场 和线宽 的结构 因素 706
14.6 镍锌铁氧体的 最近发展..... 677	
14.7 具有六角结构 的高频铁氧体 682	
14.7 a 晶体取向	
15. 矩形迴线开关和记忆元件..... 729	
15.1 磁性记忆元件 729	 737
15.2 具有矩形迴线 的样品..... 735	15.2 c 各向同性 铁氧体磁 心..... 737
15.2 a 退火合金 环..... 735	15.2 d 矩形迴线 铁氧体磁 芯材料..... 741
15.2 b 磁退火铁 氧体磁心	15.2 e 薄膜..... 744

15.2 f	薄膜的磁 滞迴线.....	745	15.4 c	多晶铁氧 体和金属	761 769
15.2 g	薄膜的应 用.....	748	15.4 d	脉冲形状	770
15.3	开关速率.....	753	15.5	开关系数随所 加磁场的变化	774
15.3 a	引言.....	753	15.6	专论和特殊材 料.....	779
15.3 b	阻尼转动	755	15.6 a	薄膜中的 涡流.....	779
15.3 c	阻尼畴壁 运动.....	757	15.6 b	多层薄膜	781
15.3 d	相应于畴 壁运动的 开关时间	759	15.6 c	两相坡莫 合金.....	782
15.4	畴壁速度的结 果和数据.....	760	15.6 d	两相铁氧 体.....	784
15.4 a	开关时间 和开关系 数.....	760	15.6 e	小型铁氧 体磁心.....	786
15.4 b	单晶中的 畴壁速度				
附录 1	布里渊函数 $B_J(x)$ 和朗之万函数 $L(x) =$ $B_\infty(x)$	792			
附录 2	约化自发磁化强度 σ/σ_0 与约化温度 T/T_c 的关系	794			

1. 磁 学

1.1 引言

还没有一个简单、理想的引进磁学课题的方法,但是可以从一个小的被磁化的物体产生的磁场开始讲述。如果磁体足够小,那么在较远距离 r 处,形式上和电偶极子一样,磁场 H 和 r^3 成反比。物体的磁化强度可用偶极子强度或磁矩表示。其磁场的切向分量 H_θ 和径向分量 H_r 为:

$$H_r = 2 M \cos \theta / r^3 \quad (1.1)$$

$$H_\theta = M \sin \theta / r^3 \quad (1.2)$$

磁化强度 I 是单位体积中的磁矩,即:

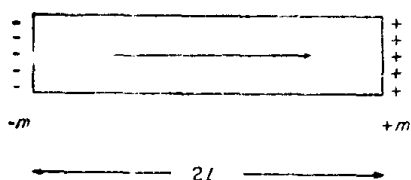
$$I = M / V \quad (1.3)$$

和电偶极子类比,可将磁矩 M 写为 $M = 2 ml$, 其中 m 为磁极强度, $2l$ 为偶极子长度。“自由”磁极可以考虑为是由一个长为 $2l$ 的均匀磁化棒的末端表面引起的,如图1.1 a所示。在表面上,单位面积的自由磁极密度为 $m/A = M/V = I$, 因此和磁化强度相等。应强调指出,这里并没有假设自由磁极的存在;它只不过是一种方便的数学手段,它可使我们根据由一个磁极所施加的力来确定磁场。

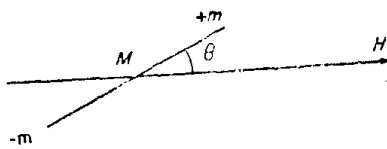
$$H = m / r^2 \quad (1.4)$$

即单位磁极是一个在真空中以 1 达因的力作用于距它 1 厘米的同样磁极的磁极,后面将说明磁场的单位。运用这种手段已经受到很多批评,但是如果运用时谨慎,对磁学的某些领域还是很有帮助的。

现在再回到被磁化物体上,这样一个置于磁场中的棒将



(a)



(b)

图 1.1a 物体磁化图
磁矩 $M=2ml$ ，在两端表面
上造成 m 的自由磁极

图 1.1b 在磁场 H 中的磁矩 M

产生力偶矩(图 1.1 b)

$$\mathbf{M} \times \mathbf{H} = MH \sin \theta \quad (1.5)$$

这个力偶矩将使磁矩 M 旋转至平行于磁场的方向。(显然，磁场也可以用作用在单位偶极子上的单位力偶来定义。)

偶极子在磁场中的能量是：

$$-\mathbf{M} \cdot \mathbf{H} = -MH \cos \theta \quad (1.6)$$

$\theta = \pi/2$ 时能量为零， $\theta = 0$ 时能量最小。有时在表示式中可以加入一个“常数”项，改写成比较方便的形式：

$$MH(1 - \cos \theta) \quad (1.7)$$

对(1.6)式微分即得出力偶(1.5)的表示式。

方程(1.4)只适用于自由空间即真空，在介质中：

$$H = m/\mu r^2$$

其中 μ 为介质的导磁率。这时，方程(1.1)和(1.2)变为：

$$H_r = 2M \cos \theta / \mu r^3 \quad (1.8)$$

$$\text{和 } H_\theta = M \sin \theta / \mu r^3 \quad (1.9)$$

磁感应定义为 $B = \mu H$ 。因此，通过环绕一个磁极的球面的总法向磁感为 $4\pi r^2 m / r^2 = 4\pi m$ 。对于任何一个环绕磁极 m 的闭合曲面都如此，即：

$$\int B \cos \theta dS = \int \frac{m}{r^2} \cos \theta dS = \int m d\omega = 4\pi m \quad (1.10 a)$$

如果用另一种近似，则可等价地把磁化物体看作为一个安培电流元。一个带电流为 i 的闭合环面 a 在距离 r 处产生的磁场为：

$$H_\theta = ia \sin \theta / r^3 \quad (1.10 b)$$

与导磁率 μ 无关，因此，被代入方程 (1.9) 中的等价磁矩为 $M = \mu ia$ 。当然，方程 (1.10 b) 可以从毕奥-萨伐尔定律的表示式中导出：

$$dH = i dl \sin \alpha / r^2 \quad (1.10 c)$$

磁性球壳是说明这两种近似是等价的一个例子。一个面积为 A 的无限薄板在垂直于板面的方向上均匀磁化，它的磁矩是 IA 。这可用一个面积相同但形状为球壳的电流网络来代替。载流球壳由一系列很小的网眼构成，每一个网眼所带电流为 i ，其磁矩为 $\mu i \delta A$ 。电流网络面内的任何导体上的总电流都为零，只有在周界上才有总电流 i ，于是磁矩为 $\sum \mu i \delta A = \mu i A = IA$ 。

1.2 单位

磁偶极子和电流环路两种表示式的差别在讨论磁学单位时是很重要的。关于这个问题，确实不断进行过广泛的讨论和许多努力。

运用磁极概念，在真空中的磁场可定义为：

$$H = m / r^2 \quad (1.11)$$

由此可导出上述的磁偶极子表示式。

在导磁率为 μ 的介质中， $H = m / \mu r^2$ ，其磁感应为 $B = \mu H = m / r^2$ 。

在真空中，如果两个相距 1 厘米的相同磁极的相互作用

力为 1 达因,则在静磁制中定义这样的一个磁极为单位磁极。这样的一个单位磁极在 1 厘米远处产生的磁场定义为 1 奥斯特*。静磁制的基本单位是质量、长度、时间和导磁率,具有和静电制中关于电荷和电场相类似的定义。

运动电荷的磁效应即电流的磁效应要求一种过渡的单位制,所谓电磁制的基础是方程 (1.10 c)。其中的单位电流是半径 1 厘米的 1 厘米长的弧上流过并在圆中心产生 1 奥斯特磁场的电流。这样,尽管这一单位制整体上叫作电磁制,但其电流单位还是建立在静磁制基础上的。[由于可以从感生电动势和通过面积 A 的磁通量变化之间的关系 $v = -A(dB/dt)$ 导出一单位制,所以必须强调这点。]电流的实用单位安培是绝对电磁单位的十分之一。

在 M.K.S.制中,除用米、千克和秒之外,还用安培作为基本单位,因而磁场单位和其它单位都是用方程(1.8)、(1.9)由此导出的。因此,没有必要引入磁极。于是,基本单位是质量、长度、时间和电流。在有理化的 M.K.S.制中,真空中的导磁率为 μ_0 ,于是方程(1.10 b)变为:

$$ia \sin \theta / 4 \pi \mu_0 r^3 \quad (1.12)$$

在物理学上的命名是困难的,在这方面的争议和讨论比对单位制本身的选择还要多。实际状况是:今天,在物理学的大部分标准教科书和电子工程中普遍使用有理化 M.K.S.制,然而现今发表的相当大部分的磁学研究文献却是使用电磁单位制(e.m.u.制)。Brown 在 1962 年描述了这种状况:

“1960 年,在物理学和电子工程学生所用的所有课本中都坚持使用安培电流,而最近的铁磁学教科书和研究报告及评论中都坚持使用磁

* 有时在磁场单位中用“高斯”会引起混乱:“高斯”是磁通量 B 的单位,“奥斯特”是磁场的单位,但是当 $\mu = 1$ 时, $B = H$ 。这是因为 μ 是无量纲的数,因而 B 和 H 具有同样量纲,这个问题将不在这里讨论。

极。好象是两组作者都不知道另一种单位制存在似的”。

1.3 磁场和静磁能

由于磁体自身磁场和磁矩之间的相互作用，一定大小的磁体即使在外磁场为零时也具有位能。位能可写为：

$$\mathcal{Q} = \int \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{I}}{r} ds - \int \frac{\nabla \cdot \mathbf{I}}{r} dv \quad (1.13)$$

因此，退磁场与表面(内表面或外表面)产生的“自由磁极”效应有关。在表面处，由于磁化不均匀($\text{div} \mathbf{I} \neq 0$)，磁化强度的垂直分量发生变化($\mathbf{n} \cdot \mathbf{I} \neq 0$)。在实际运用中，通常必须假设磁化是均匀的，即 $\text{div} \mathbf{I} = 0$ ，然而实际上这只有在各向同性椭球中才成立。退磁场 H_D 正比于 I ，即 $H_D = -N_D I$ ，其中 N_D 为退磁因子，由于自由磁极和其自身(退磁)场之间的相互作用，“自”能是 $-\frac{1}{2} H_D I = -\frac{1}{2} N_D I^2$ 。

因为在磁荷密度为 σ 的无限大的薄板附近的磁场为 $2\pi\sigma$ ，所以与磁化强度 I 垂直的试样表面附近的磁场为 $2\pi I$ ；对于一个沿与板面垂直方向磁化的无限薄板，由于存在两个表面，造成的内磁场是 $4\pi I$ ，因而退磁因子是 4π ；均匀磁化球壳的退磁因子是 $4\pi/3$ 。只有在各向同性椭球的情况下，才能精确地导出其退磁因子，因为只有在这种形状下磁化才是均匀的。表 1 给出了 Stoner(1945)和 Osborn(1945)对于主半轴 a, b, c 方向上的主退磁因子 N_a, N_b, N_c 的计算值。应当注意：

$$N_a + N_b + N_c = 4\pi \quad (1.14 a)$$

在与 I 方向(方向余弦为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)平行的方向上 N 的有效值为：

$$N = N_a \alpha_1^2 + N_b \alpha_2^2 + N_c \alpha_3^2 \quad (1.14 b)$$