

软磁合金及 相关物理专题研究

RUANCI HEJIN JI
XIANGGUAN WULI ZHUANTI YANJIU

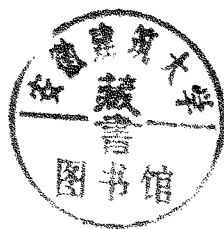
何开元 张雅静 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

软磁合金及相关物理专题研究

何开元 张雅静 著



北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2018

内 容 提 要

本书系统地介绍了软磁合金(包括晶态和非晶态软磁合金以及纳米晶软磁合金)的性能、种类和近年的新进展,并全面总结了作者多年来的科研成果,不仅通过实验研究获得制备高性能软磁合金的有关工艺,更着重研究涉及的有关物理问题,内容具有一定的创新性和实用性。

本书可供从事磁性材料研究的科研人员和从事工程应用的技术人员阅读,也可供大专院校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

软磁合金及相关物理专题研究/何开元,张雅静著. —
北京:冶金工业出版社,2018.6
ISBN 978-7-5024-7753-0

I. ①软… II. ①何… ②张… III. ①软磁合金—研究
IV. ①TG132.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 112930 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcb@cnmp.com.cn

责任编辑 高娜 宋良 美术编辑 杨帆 版式设计 孙跃红

责任校对 郑娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7753-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版,2018 年 6 月第 1 次印刷

169mm×239mm;18 印张;348 千字;273 页

79.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

本书名为《软磁合金及相关物理专题研究》，可见是一本讨论金属软材料的著作。软磁合金主要是在交流磁化条件下应用，因此要求有很低的功率损耗。此类合金可作为各种电磁铁的级头，磁导体、磁屏蔽、电机和变压器的铁心，在各种通讯、传感工程中应用。

为了满足不同应用的需要，人们已开发出多种软磁合金，如工业纯铁、Fe-Si 合金、Fe-Al 合金、Fe-Co 合金、Fe-Ni 合金、多元 Fe-Ni 合金以及 Fe-Si-Al 合金等。以上都属晶态合金，它们都是由很多小晶粒组成。到了 1960 年，科学工作者们发现了非晶态金属，即在它们的结构中没有晶粒，原子在固体中的排列是无序的。以后的大量研究又发现，某些成分非晶态合金，如含有 Fe、Co、Si、B 或含有 Fe、Nb、Zr、B 的合金，可以形成具有铁磁性的非晶合金，它们也有低的矫顽力和高的磁导率。因此出现了非晶态软磁合金。到 1988 年，人们在研究非晶态软磁合金的晶化过程中，发现了纳米晶软磁合金。这种合金是由纳米尺寸的无规取向的微小晶粒及剩余非晶相所组成的，它的软磁特性可超过晶态及非晶态软磁合金。

作者多年来在北京钢铁研究院和东北大学从事软磁合金的研究工作，由于国家的规划、自然科学基金委的任务以及个人的兴趣，要求进行科学发展前沿的研究，因此，按上述软磁合金发展步伐，也先后进行了晶态、非晶态及纳米晶软磁合金的科研工作。

对晶态软磁合金的科研，作者是从1956年开始的，当时是在戴礼智先生指导下进行的。到1980年，作者开始研究非晶态合金，1993年开始进行纳米晶软磁合金的研究，先后在国内期刊上发表多篇学术论文。在2012年，将这些论文编成论文集，即《软磁合金论文选集》（东北大学出版社，2012），在编写此选集时，作者就希望能另写成一本书，书中主要采用我已发表的论文内容。时隔六年，在这些论文的基础上编写成本书，实现了多年来的愿望，深感欣慰。

本书共5章，第1~4章依次是：铁磁学基础，晶态软磁合金，非晶软磁合金和纳米晶软磁合金，第5章为软磁合金的物理问题专题。第1~4章的内容是在我原来编写的《精密合金材料学》（冶金工业出版社，1991）的基础上，增加了新内容写成的：在第1章的“磁学量的单位”中将示范例题从2个增加到8个；在合金材料方面，增加了非晶态软磁合金和纳米晶软磁合金，即本书第3章和第4章。第5章主要是从《软磁合金研究论文选集》中取材写成，其中共分为12个专题，都是遴选软磁合金中有物理探索价值的问题进行论述的。这些专题，主要取材于我发表过的论文，都有创新的内容或见解：例如在专题5.2中，求出了软磁合金的初始磁导率上限公式，用此公式可以预测Fe-Ni、Fe-Al及Fe-Co系软磁合金的初始磁导率的上限值，并且求出了能定量计算这些合金磁导率的经验公式。在5.3专题中，其内容包括3篇在JAP上发表的论文，发现了非晶态软磁合金中的、由磁场退火产生的感生磁各向异性的生成和再取向的规律，具有理论和实用价值，用于解释旋转磁场退火的实验结果是很成功的。在5.4专题中，全面地论述了非晶态合金的稳定性问题，回答了Fe-Ni基

合金的稳定性优于 Fe-Co 基合金的原因。在 5.5 专题中, 用实验说明, 通过电解充氢可以使 Fe 基非晶合金的比磁化强度增大约 40%, 这是一个新的发现。在 5.11 专题中, 根据对纳米晶软磁合金的实验研究, 提出了一个新思想: 对于传统的软磁材料 (它们都是单相的), 为获得最佳导磁性的条件是各向异性常数 K 和磁致伸缩系数 λ_s 同时趋近于零, 这已被磁学工作者所公认。但对于含有两个铁磁相的软磁合金, 为了获得最佳的导磁特性, 必须考虑磁化强度差值效应 (ΔM_s 效应或 $\Delta \sigma_s$ 效应), 即该材料必须同时满足三个条件: (1) 非常低的有效磁各向异性常数 $\langle K \rangle$; (2) 非常小的磁致伸缩数 λ_s ; (3) 两相的磁化强度之差 (ΔM_s 或 $\Delta \sigma_s$) 必须很小。并用理论证明这种 ΔM_s 效应的存在。上面简要说明了 6 个专题的特点, 其余 5 个专题都各有特色, 不再逐一介绍。

本书共 5 章, 但可分为两部分, 第一部分是叙述软磁合金材料的基本知识, 第二部分是和此合金材料相关的物理问题专题, 这种把书分为基本知识和专题两部分的写法的优点是: 易于将某些专门问题论述得更深入而且易于在书中安插所论述问题的章节, 这些优点希望能得到读者的认同。

本书在写作过程中, 得到张雅静博士的合作, 并得到我女儿何芸华的帮助, 她帮我打字、描图等。本书的出版得到东北大学的资助, 特此致谢。

何开元

2018 年 2 月

于东北大学

目 录

1 铁磁学基础	1
1.1 磁学量的定义和单位	1
1.1.1 磁极	1
1.1.2 磁场	1
1.1.3 磁矩和磁偶极矩	2
1.1.4 磁化强度和磁极化强度	2
1.1.5 磁感应强度	3
1.1.6 磁化率和磁导率	4
1.1.7 磁化曲线和磁滞回线	4
1.1.8 磁学量的单位	6
1.2 物质的磁性	18
1.2.1 原子的磁性	18
1.2.2 抗磁性	19
1.2.3 物质的顺磁性	20
1.2.4 物质的铁磁性	21
1.2.5 反铁磁性	23
1.2.6 亚铁磁性	25
1.2.7 磁性分类总结	25
1.3 磁体的能量和有关的基本现象	26
1.3.1 磁体在外磁场中的能量	26
1.3.2 退磁场和退磁场能量	27
1.3.3 磁各向异性和各向异性能	29
1.3.4 磁致伸缩和磁弹性能	32
1.4 铁磁畴	33
1.4.1 磁畴和畴壁的形成	33
1.4.2 畴壁类型和畴壁结构	34
1.4.3 畴壁能量与厚度	34
1.4.4 磁畴观察和磁壁结构	35
1.4.5 单畴粒子	36

1.5 技术磁化	37
1.5.1 两种磁化方式	37
1.5.2 在弱磁场中的磁化	38
1.5.3 中等磁场中的磁化	41
1.5.4 高磁场中的磁化	41
1.5.5 剩余磁化	42
1.5.6 矫顽力	44
1.5.7 在交变磁场中的磁化	49
本章参考文献	55
 2 晶态软磁合金	 56
2.1 概述	56
2.2 影响软磁合金性能的冶金和物理因素	56
2.2.1 杂质 (纯净度)	56
2.2.2 合金化	57
2.2.3 晶体织构	57
2.2.4 有序转变	58
2.2.5 磁退火	58
2.2.6 弹性应力	61
2.2.7 塑性变形	61
2.3 电工纯铁	62
2.3.1 纯铁的物理性质	62
2.3.2 纯铁的磁性	64
2.3.3 工业纯铁中的杂质及其对磁性的影响	65
2.3.4 电工纯铁及低碳电工钢的制备	67
2.4 Fe-Si 合金	69
2.4.1 Fe-Si 合金的相图	69
2.4.2 Fe-Si 合金的物理性质	70
2.4.3 硅钢片的发展	73
2.4.4 无取向硅钢片	73
2.4.5 取向硅钢片	75
2.5 Fe-Ni 软磁合金	78
2.5.1 概况	78
2.5.2 二元 Fe-Ni 合金	79
2.5.3 多元 Fe-Ni 合金	84

2.6 Fe-Al 合金	90
2.6.1 概况	90
2.6.2 结构	90
2.6.3 物理性能和磁性	90
2.6.4 铁铝软磁合金材料	92
2.7 Fe-Co 合金	95
2.7.1 二元 Fe-Co 合金的结构和磁性	95
2.7.2 第三合金元素在 Fe-Co 软磁材料中所起的作用	97
2.7.3 Fe-Co 合金材料	100
本章参考文献	102
3 非晶软磁合金	104
3.1 概述	104
本节参考文献	104
3.2 非晶态合金的结构、形成和制备	105
3.2.1 非晶态合金的结构	105
3.2.2 非晶态合金的形成和制备	107
3.2.3 非晶态合金的晶化、结构弛豫、短程有序和磁性稳定性	109
本节参考文献	111
3.3 非晶态合金的磁性	112
3.3.1 原子磁矩	112
3.3.2 磁性和温度关系	115
3.3.3 磁致伸缩	117
3.3.4 磁各向异性	118
3.3.5 非晶态软磁合金材料	119
本节参考文献	122
3.4 非晶态合金在工业中的应用	123
3.4.1 非晶态合金特性的利用	124
3.4.2 应用	125
3.4.3 展望	128
本节参考文献	129
4 纳米晶软磁材料	131
4.1 概述	131
4.1.1 少量微晶析出对非晶合金磁性的影响	132

4.1.2 纳米晶软磁合金的发现及其磁特性	133
4.1.3 纳米晶软磁材料的结构和磁相互作用	135
本节参考文献	137
4.2 Fe-Cu-M-Si-B 纳米晶软磁合金的基础研究	138
4.2.1 显微组织和化学组成	138
4.2.2 晶化和元素的作用	140
4.2.3 磁畴结构	143
4.2.4 磁各向异性	145
4.2.5 磁致伸缩	147
4.2.6 磁性优化的新条件	147
4.2.7 小结	149
本节参考文献	149
4.3 Fe-M-B 纳米晶软磁合金	151
4.3.1 概述	151
4.3.2 Fe-M-B 合金的结构和磁性	151
4.3.3 Fe-Zr-B-Cu 及 Fe-Nb-Zr-B-Cu 合金	153
本节参考文献	155
4.4 铁基纳米晶合金中晶间非晶相的研究	155
4.4.1 化学组成	155
4.4.2 磁化强度	158
4.4.3 居里温度	158
本节参考文献	162
4.5 纳米晶软磁材料的应用及新材料的发展	162
4.5.1 应用简述	162
4.5.2 Fe-Cu-M-Si-B 纳米软磁材料的改进	163
4.5.3 非晶及纳米晶薄膜材料	164
本节参考文献	164
5 软磁合金的物理问题专题	165
5.1 Fe-Ni 基高磁导合金的最佳成分计算	165
5.1.1 Enoch 和 Fudge 关于 Fe-Ni 高磁导合金的磁性原子比理论	165
5.1.2 铁磁性原子比理论所计算的最佳成分和实验结果的比较	166
5.1.3 讨论	169
本节参考文献	170
5.2 初始磁导率的上限和计算磁导率的经验公式	171

5.2.1 磁导率的上限	171
5.2.2 同时计及掺杂和应力作用时磁导率公式的组合方式	175
5.2.3 初始导磁率的经验公式	178
5.2.4 小结	184
本节参考文献	184
5.3 磁场退火感生磁各向异性动力学	185
5.3.1 引言	185
5.3.2 Luborsky 和 Chambron 等工作	185
5.3.3 感生磁各向异性弛豫过程的数学描述	187
5.3.4 感生磁各向异性再取向动力学的实验规律	190
5.3.5 旋转磁场退火	197
本节参考文献	207
5.4 非晶态合金的磁性稳定性	208
5.4.1 磁性稳定性	208
5.4.2 总结	214
本节参考文献	215
5.5 电化学充氢对非晶态合金磁性能的影响	216
5.5.1 引言	216
5.5.2 实验和结果分析	218
5.5.3 结论	222
本节参考文献	222
5.6 纳米晶软磁合金中有效磁各向异性的测定和讨论	223
5.6.1 引言	223
5.6.2 实验原理	224
5.6.3 实验方法	226
5.6.4 实验结果	227
5.6.5 讨论	228
本节参考文献	229
5.7 纳米晶软磁合金中晶间非晶相的化学组成研究	230
5.7.1 前言	230
5.7.2 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 纳米晶合金晶间非晶相的化学组成计算 ...	231
5.7.3 $\text{Fe}_{89}\text{Zr}_7\text{B}_4$ 纳米晶软磁合金中晶间非晶相的化学成分计算	234
本节附注	235
本节参考文献	236
5.8 纳米晶软磁合金 Fe-Cu-Nb-Si-B 及 Fe-Zr-B 的磁分析	236

5.8.1 引言	236
5.8.2 从示意图说明求合金中两相的质量分数方法	237
5.8.3 小结	245
本节参考文献	246
5.9 纳米晶软磁合金中的磁致伸缩问题	246
5.9.1 $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$ 纳米晶软磁合金的 λ_s 趋近于零问题	246
5.9.2 Fe-M-B 纳米晶软磁合金的 λ_s 趋近于零问题	247
5.9.3 小结	248
本节参考文献	248
5.10 纳米晶软磁合金的磁导率与温度关系、霍普金生 (Hopkinson) 效应和晶间非晶相的 T_c 增强效应	248
5.10.1 磁性材料的磁导率随温度的变化	248
5.10.2 Fe-Si、Ni-Fe 及非晶合金的 μ_i - T 曲线	249
5.10.3 纳米晶合金的 μ_i - T 曲线	250
5.10.4 晶间非晶相的 T_c 增高效应	252
本节参考文献	254
5.11 双相软磁合金的最佳导磁条件	255
5.11.1 引言	255
5.11.2 实验过程	256
5.11.3 实验结果	256
5.11.4 结论	263
本节参考文献	263
5.12 Ni-Fe 基及 Co 基纳米晶软磁合金研究进展	264
5.12.1 引言	264
5.12.2 Ni-Fe 基纳米晶合金	264
5.12.3 Co 基纳米晶合金	268
5.12.4 小结和评述	272
本节参考文献	272

1 铁磁学基础

1.1 磁学量的定义和单位

在两个磁极间存在库仑相互作用力是最基本的磁性现象，本节将从这个基本现象开始来说明磁学量，它们对于描述磁性材料的有关问题是头等重要的。

1.1.1 磁极

可以唯象地认为在一个磁棒的两端附近存在两个磁极，北极（N 极）和南极（S 极）。令 P 为磁极强度， $+P$ 代表 N 极强度， $-P$ 代表 S 极强度，则两个相距为 d 、强度为 P_1 和 P_2 的磁极间的作用力为

$$F = k \frac{P_1 P_2}{d^2} \quad (1-1)$$

式中， k 为比例系数。若 P_1 、 P_2 同号，则 $F > 0$ ，为斥力；若 P_1 、 P_2 异号，则 $F < 0$ ，为引力。

在 CGS 单位制中， $k=1$ ， P 的单位无专有名称，以 emu 表示。在 MKSA（国际单位）制中， $k=1/4\pi\mu_0$ ， P 的单位为 Wb（韦伯），此处 $\mu_0=4\pi\times 10^{-7}$ H/m（亨利/米），是一常数，其值等于 MKSA 制中的真空磁导率。

1.1.2 磁场

磁场 H 可由永磁铁产生，也可由通电流的导线产生。一个极强为 P 的磁极在场 H 中所受之力为

$$F = PH \quad (1-2)$$

若 P 为正值（N 极）， F 的方向与 H 的方向相同；若 P 为负值， F 的方向与 H 的方向相反。上式在 CGS 及 MKSA 制中有同一形式。

在 CGS 制中，上式可作为磁场 H 的定义：当单位极强所受之力为 1dyne（达因）时，此磁极所在之处的磁场为 10e（奥斯特）。

在 MKSA 制中，磁场的大小是依据通电流的线圈所产生的磁场来标定的：对于一个直径为 D_m （米）的单匝环形线圈，当通以电流 iA （安培）时，在其中心点处的磁场为

$$H = \frac{i}{D} \quad (1-3)$$

若 $D=1\text{m}$, $i=1\text{A}$, 则 $H=1\text{A/m}$ 。故在 MKSA 制中, 磁场之单位为 A/m , 而 $1\text{A/m}=4\pi\times 10^{-3}\text{Oe}$ 。

1.1.3 磁矩和磁偶极矩

将一小磁棒置于均匀磁场 H 中, 则此磁棒必受一力矩的作用 (见图 1-1), 此力矩为

$$L = \left(F \cdot \frac{1}{2} \sin\theta \right) \times 2 = Pl \cdot H \sin\theta \quad (1-4)$$

可见此力矩之大小除了和外场 H 及方向 θ 有关外, 主要取决于棒本身的参量 P 和 l 的乘积。因此称 Pl 为磁棒之磁矩, 它是一个能描述磁棒磁性强弱的基本量。

除了永磁棒以外, 一个通有电流 i 的线圈也会形成 N 极和 S 极, 它在磁场中也受到一个力矩的作用, 所对应的磁矩和 iS 成正比, 此处 S 为线圈的面积。

在 CGS 制中, Pl 和 iS 的量纲相同, 它们都表示磁矩, 其单位通常以 emu 表示。因此, 用 Pl 表示之磁矩和用 iS 表示的是一样的。

在 MKSA 制中, 用 Pl 表示的磁矩, 其单位为 $\text{Wb} \cdot \text{m}$ (韦伯·米); 而以 iS 表示的磁矩, 其单位为 $\text{A} \cdot \text{m}^2$ (安培·米²), 两者是不同的。为了有所区分, 今后称前者为磁偶极矩, 以 j_m 表示; 后者为磁矩, 以 M_m 表示。而 $\mu_0 iS$ 之量纲与 Pl 的相同, 故它也表示磁偶极矩。

1.1.4 磁化强度和磁极化强度

一个宏观的磁体可看作是由很多个小磁棒或环形电流组成, 它们各自有自己的磁矩。当每个小磁矩皆作平行排列时, 表示此宏观磁体磁化强度高; 当它们完全紊乱排列时, 磁化强度为零。因此磁化强度定义为单位体积中的磁矩, 也就是单位体积中磁矩的向量和, 通常以 M 表示:

$$M = \frac{\sum M_m}{V} \quad (1-5)$$

在 CGS 制中, M 的单位为 emu/cm^3 或 Gs (高斯); 在 MKSA 制中, M 的单位为 $\text{A} \cdot \text{m}^2/\text{m}^3 = \text{A/m}$ 。

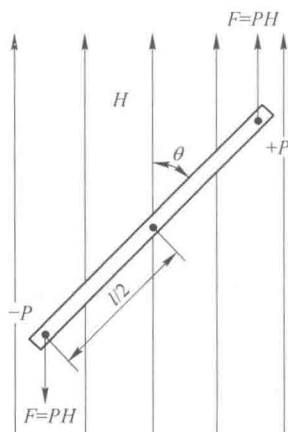


图 1-1 磁棒在均匀磁场中受力矩示意图

也可用单位质量物质的磁矩来表示磁化的强度,称为比磁化强度,通常以 σ 表示:

$$\sigma = \frac{M}{d} \quad (1-6)$$

式中, d 为物质的密度。

在 CGS 制中, σ 的单位为 emu/g; 在 MKSA 制中为 $A \cdot m^2/kg$ 。

有时也用 σ_A 表示原子磁化强度, 定义为

$$\sigma_A = A\sigma \quad (1-7)$$

式中, A 为物质的原子量。可见 σ_A 实际是一摩尔物质的磁化强度。在 CGS 制中, 其单位为 emu/mol; 在 MKSA 制中, 其单位为 $A \cdot m^2/mol$ 。

在 MKSA 制中, 磁极化强度 J 定义为单位体积中的磁偶极矩。

$$J = \frac{\sum j_m}{V} = \mu_0 \frac{\sum M_m}{V} = \mu_0 M \quad (1-8)$$

可见磁极化强度等于真空磁导率 μ_0 与磁化强度 M 的乘积, 其单位为 Wb/m^2 (韦伯/米²), 它也是表示磁体磁化程度的量。在 CGS 制中, 由于真空磁导率的值为 1, 磁极化强度和磁化强度相等, 故无须引入此量。

应当指出的是, 在有些书中, 将 J 称为磁化强度并以 M 表示之, 读者不要引起误解。

1.1.5 磁感应强度

磁感应强度也称磁通密度, 是磁体中单位面积中通过的磁力线数, 以 B 表示。而 B 、 H 和 M 存在下列关系。

在 CGS 制中,

$$B = H + 4\pi M \quad (1-9)$$

由此可见, B 和 H 及 M 之量纲应是一样的。但习惯上它们的单位采用不同的名称, 即 B ——Gs (高斯, 麦克斯韦/厘米²), H ——Oe (奥斯特), M ——emu/cm³。

在 MKSA 制中, B 、 H 和 M 之关系为

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + J \quad (1-10)$$

可见 B 和 H 或 M 之量纲都不相同, 而和 J 的量纲一致。上式中各量的单位为 B —— Wb/m^2 , H —— A/m , M —— A/m , J —— Wb/m^2 。

应当说明, 在 MKSA 制中, 在有些国外的书中将式 (1-10) 写成 $B = \mu_0 H + M$ 的形式, 并且称此式中的 M 为磁化强度, 读者应当理解, 它实际代表的是磁极化强度。

1.1.6 磁化率和磁导率

磁化率有以下数种，定义如下：

磁化率（指体积磁化率），

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (1-11)$$

质量磁化率（又称比磁化率），

$$\chi_{\sigma} = \frac{\sigma}{H} = \frac{\chi}{d} \quad (1-12)$$

原子磁化率，

$$\chi_A = A\chi_{\sigma} = \frac{A}{d}\chi \quad (1-13)$$

式中， A 为物质之原子（分子）量，因此原子磁化率实际是摩尔磁化率。在金属及合金中，常用的磁化率是体积磁化率。

磁导率定义为

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (1-14)$$

在 CGS 制中，因为 $B = H + 4\pi M$ ，故

$$\mu = 1 + 4\pi\chi \quad (1-15)$$

由于 B 和 H 的量纲相同，故磁导率及磁化率都是无量纲的量，但通常以 Gs/Oe（高斯/奥斯特）为单位。

在 MKSA 制中，因为 $B = \mu_0 H + \mu_0 \chi H$ ，因此磁导率（绝对值）为

$$\mu = \mu_0(1 + \chi)$$

μ 是有量纲的量，而磁导率对真空磁导率的相对值为

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi \quad (1-16)$$

μ_r 是无量纲的，其数值正好和 CGS 制的磁导率相等。因此在 MKSA 制中的磁导率的数值一般都用相对磁导率表示，并且常简写成 μ 。将式（1-15）和式（1-16）进行比较，可看出 MKSA 制中的磁化率 χ 的数值比 CGS 制中的大 4π 倍。

1.1.7 磁化曲线和磁滞回线

本小节中仅涉及静态磁化曲线和磁滞回线，同时说明有关的技术磁化的参量。物质的磁化曲线和磁滞回线可以通过实验测定出来。一般说来，只有铁磁及亚铁磁性的物质才可以测定出磁滞回线，而抗磁性及顺磁性物质则无磁滞现象。

磁化曲线可以分为 $M-H$ 曲线或 $J-H$ 曲线和 $B-H$ 曲线。前者称为内禀磁化曲

线，它反映材料的内禀特性；而 $B-H$ 曲线则表示应用性能。

1.1.7.1 $M-H$ 曲线和 $J-H$ 曲线

图 1-2 为几种磁性物质的磁化曲线的示意图。图中曲线 (a)、(b) 及 (c) 分别表示抗磁、顺磁（或反铁磁）及铁磁（或亚铁磁）物质的磁化曲线，可见此类物质的磁化曲线有明显不同的特征。铁磁性物质磁化曲线的特征是易于磁化和达到饱和，并且有磁滞现象。该曲线在磁场较弱时上升很快，而在较强磁场中逐渐趋于饱和，即曲线成为水平线，磁化强度之饱和值称为饱和磁化强度，以 M_s 表示。达到 M_s 所需磁化场称为饱和磁场，以 H_s 表示，如图中曲线 (c) 所示。当外场 H 再下降到零时， M_s 下降到 M_r 点， M_r 称为剩余磁化强度。当磁场反向并逐渐增加到 MH_c 值时，磁化强度下降为零， MH_c 称为内禀矫顽力。如果反向磁场继续增大，则磁化强度将在反方向逐步增大，最后达到饱和。

在 MKSA 制中，由于 $B = \mu_0 H + J$ ，而 $J = \mu_0 M$ ，故 $J-H$ 曲线和 $M-H$ 曲线是成比例变化的，它们都代表材料的内禀磁性，但 J 的数值和 B 的数值较接近，且量纲相同，故 $J-H$ 曲线便于和 $B-H$ 曲线比较和转换。

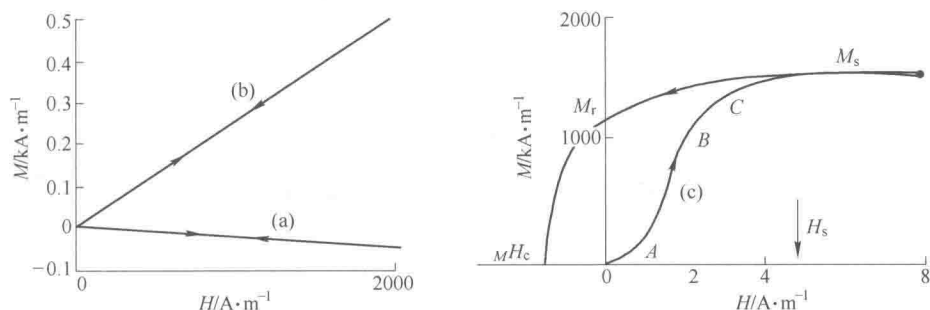


图 1-2 几种典型材料的磁化曲线

(a) 抗磁；(b) 顺磁或反铁磁；(c) 铁磁

1.1.7.2 $B-H$ 曲线

强磁性（铁磁、亚铁磁）材料的 $B-H$ 磁化曲线及磁滞回线如图 1-3 所示。图中箭头表示磁化的进程， $OABB_s$ 曲线为磁化曲线，从 B_s （饱和磁感应强度）经 B_r （剩余磁化强度）、 H_c （矫顽力）到 $-B_s$ 再到 B_s 的回线称为磁滞回线。若磁化不到饱和而作成的回线称为小回线，只有在饱和回线上定出的参数才能作为材料特性的标准数据，以下再就 $B-H$ 曲线所涉及的几个技术磁性参数加以说明。

(1) 饱和磁感应强度 B_s 。对于 $B-H$ 的磁化曲线，即使在强磁场中，也不可能成为水平线，因此 B_s 的饱和值由下式确定：

$$B_s = \mu_0 H_s + \mu_0 M_s \text{ (MKSA)} \quad (1-17)$$

$$B_s = H_s + 4\pi M_s \text{ (CGS)} \quad (1-18)$$