

高等学校试用教材

精密合金及粉末冶金材料

清华大学马菡生 主编



机械工业出版社

精密合金及粉末冶金材料

清华大学马莒生 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/16 · 印张 34 3/4 · 字数 356 千字

1982年1月重庆第一版、1982年1月重庆第一次印刷

印数 0,001—4,500 · 定价 1.55元

*

统一书号: 15093·5086

前 言

本书是根据《高等学校一机部对口专业座谈会纪要》的精神及 1978 年 6 月召开的金属材料及热处理专业教材编审会议所制订的教学大纲编写的。

全书共分两篇十二章。第一篇精密合金共七章，第二篇粉末冶金材料共五章。重点阐明了精密合金的理论基础——铁磁学及粉末冶金材料的烧结机理；并讨论了这两类材料中的典型合金的成分、组织和性能之间的关系，以及获取所需性能的理论依据及工艺途径。对材料发展概况及趋向也作了简略介绍。

本书编写中力求注意几点：

1. 给予必要的理论基础，使学生了解两类材料性能的物理本质，从而掌握获取所需性能的理论依据。

2. 通过介绍典型材料，有重点地阐明材料的成分、组织结构和性能的关系。运用与工艺有关的理论（如方向有序、Spinodal 分解等）对参数的影响因素加以分析，力求理论联系实际。

3. 反映当前理论及材料的发展新水平，如介绍了非晶态精密合金及钢结硬质合金等新内容。

本书为金属材料专业及热处理专业的学生学习金属材料课程的教材，也可供从事精密合金及粉末冶金工作的技术人员参考。

本书由清华大学马莒生同志主编，并负责编写精密合金部分第一、二、三、七章；合肥工业大学王成福同志编写了粉末冶金材料部分，清华大学唐祥云同志编写了精密合金第四、五、六章。本书经浙江大学徐纪楠教授审阅后定稿。

在编辑和审稿过程中，浙江大学肖宜雍、李志章等同志参加了部分审稿工作；北京钢铁学院、北京冶金试验厂、东北工学院为本书提供了重要的参考材料，在此一并致以衷心谢意。

由于编者水平有限及编写时间紧迫，对资料收集及分析恐有许多不当之处，希读者给以批评指正。

1980, 1.

目 录

第一篇 精密合金

引言

第一章 金属铁磁性的基础知识..... 3

§ 1-1 物质的磁性..... 3

一、磁矩..... 3

二、物质按磁性的分类..... 7

§ 1-2 铁磁物质的自发磁化..... 14

一、自发磁化区——磁畴的存在..... 14

二、铁磁畴形成的条件(原子结构特点与交换能)..... 15

三、自发磁化强度与居里温度的控制..... 20

§ 1-3 铁磁物质中的能量——易磁化方向的确定..... 24

一、磁晶各向异性..... 24

二、磁弹性能(磁应力各向异性)..... 27

三、静磁能(外磁场能、退磁场能)..... 31

§ 1-4 磁畴壁与磁畴结构..... 34

一、畴的数目及畴壁..... 34

二、畴的结构..... 35

三、单畴形成的条件..... 37

§ 1-5 铁磁物质的技术磁化..... 38

一、磁化曲线按磁化机构的分段..... 38

二、畴壁位移及其阻力..... 39

三、磁化强度矢量转动的阻力..... 43

§ 1-6 反磁化过程——磁滞现象..... 43

一、对畴壁位移的阻滞..... 43

二、对反向磁化核成长的阻滞..... 45

三、对不可逆畴转过程的阻滞..... 46

§ 1-7 交变磁场中的磁化..... 48

一、铁磁物质的动态磁滞回线及时间效应..... 48

二、交变磁场中磁导率的频散与吸收..... 50

三、品质因数 Q 及损耗因子 $\tan\delta$ 51

四、磁损耗分析..... 51

第二章 软磁合金..... 54

§ 2-1 概述..... 54

§ 2-2 工业纯铁..... 55

一、工业纯铁的性能及应用..... 55

二、纯铁中的杂质及其排除..... 55

三、影响纯铁磁性的其他因素..... 58

§ 2-3 铁-硅合金(硅钢片)..... 59

一、概述..... 59

二、成份对合金性能的影响..... 62

三、单取向硅钢片..... 66

四、双取向硅钢片(立方织构硅钢薄带)..... 69

§ 2-4 铁-镍合金..... 71

一、分类和获取所需性能的考虑原则..... 71

二、高导磁铁-镍合金..... 75

三、各向异性的铁-镍合金..... 79

§ 2-5 其他软磁材料..... 81

第三章 永磁合金..... 86

§ 3-1 概述..... 86

一、永磁合金的应用..... 86

二、性能要求..... 86

三、提高永磁材料性能的途径..... 89

四、永磁合金的发展与分类..... 90

§ 3-2 铁基和铁-钴基永磁合金..... 91

一、马氏体磁钢..... 91

二、 α -Fe 基永磁合金..... 93

三、 α/γ 相变型铁基永磁合金..... 93

四、铁-铬-钴永磁合金..... 94

五、单畴微粉永磁合金..... 95

§ 3-3 铁-镍-铝系铸造永磁合金..... 97

一、铝-镍型永磁合金..... 98

二、铝-镍-钴型永磁合金..... 102

§ 3-4 稀土钴永磁合金..... 105

一、概述..... 105

二、稀土金属和 $3d$ 过渡族金属间化合物及其磁性..... 105

三、 RCO_5 型永磁合金的制备工艺..... 107

四、稀土钴永磁合金高矫顽力原理的探讨..... 108

§ 3-5 其他永磁合金简述..... 110

第四章 膨胀合金111	二、精密电阻合金154
§ 4-1 热膨胀的物理本质及影响因素.....111	三、电热合金157
一、影响金属与合金热膨胀系数的一般规律.....111	四、热电偶材料159
二、正常热膨胀的双原子模型.....114	五、电触头材料161
三、关于反常热膨胀.....115	第七章 非晶态精密合金162
§ 4-2 低膨胀合金.....116	§ 7-1 概述.....162
一、因瓦合金 Ni ₃₆116	§ 7-2 非晶态合金的特性.....162
二、超因瓦合金 Ni ₃₁ Co ₅118	一、合金的成分配比.....162
三、其他因瓦型合金.....119	二、合金的结构.....163
§ 4-3 定膨胀合金.....119	三、力学、电学和化学性质.....170
一、定膨胀合金的分类和应用.....120	四、基本磁性能.....171
二、可伐合金 Ni ₂₉ Co ₁₈120	五、非晶态合金的膨胀及弹性性能.....174
三、低钴封接合金.....123	§ 7-3 非晶态合金的制造工艺.....176
§ 4-4 热双金属.....123	一、内圆淬火法(离心铸造法).....176
一、对热双金属的性能要求及影响性能的因素.....124	二、轧辊淬火法(双辊法或液体轧制法).....177
二、热双金属片生产工艺简述.....126	§ 7-4 非晶态精密合金的应用前景.....177
第五章 弹性合金127	第二篇 粉末冶金材料
§ 5-1 金属与合金的弹性.....127	第八章 粉末冶金法的基本原理与基本过程180
一、弹性极限与弹性模量.....127	§ 8-1 引言.....180
二、弹性不完整性.....132	§ 8-2 粉末冶金法的基本工艺过程.....180
§ 5-2 高弹性合金.....134	一、粉末特性与粉末制备.....181
一、概述.....134	二、压制成型.....183
二、铁基高弹性合金.....135	三、粉末压坯的烧结.....184
(一) Ni ₃₆ CrTiAl 合金的特点及应用.....135	四、再加工.....186
(二) Ni ₃₆ CrTiAl 合金的工艺简介.....135	五、其他后处理.....187
(三) 合金元素的作用.....136	§ 8-3 烧结机理与烧结体的组织及性能.....187
(四) 热处理及冷变形对合金组织性能的影响.....136	一、烧结机理.....187
三、其它高弹性合金简介.....138	二、粉末烧结体的组织与机械性能.....191
§ 5-3 恒弹性合金.....140	第九章 结构材料195
一、概述.....140	§ 9-1 机械零件用的粉末冶金材料.....195
二、Ni ₄₂ CrTi 合金.....141	一、烧结铁与碳素钢.....195
第六章 电性合金144	二、合金钢.....197
§ 6-1 金属与合金的导电性.....144	§ 9-2 其他结构件用粉末材料.....201
一、金属与合金导电性的物理本质.....144	一、减磨材料.....201
二、影响金属与合金导电性的因素.....148	二、多孔性材料.....203
§ 6-2 电性合金.....152	三、摩擦材料.....204
一、导电材料.....152	第十章 工具材料205
	§ 10-1 硬质合金.....205

一、硬质合金的成分、相与组织.....	205	§ 11-1 难熔与耐热金属材料.....	217
二、硬质合金的机械性能.....	206	一、难熔金属耐热材料.....	217
三、钨钴型、钨钴钛型硬质合金.....	208	二、耐热合金.....	219
§ 10-2 粉末冶金高速钢.....	209	§ 11-2 弥散强化型材料.....	220
一、粉末冶金高速钢的特点.....	209	一、耐热金属陶瓷材料.....	220
二、粉末冶金高速钢的成分、热处理 与机械性能.....	210	二、弥散型合金材料.....	223
§ 10-3 钢结硬质合金.....	211	第十二章 原子能工程材料.....	226
一、钢结硬质合金的成分与组织.....	211	§ 12-1 核燃料材料.....	226
二、钢结硬质合金的热处理.....	213	§ 12-2 其他材料.....	226
三、钢结硬质合金的机械性能.....	215	一、结构材料.....	226
第十一章 耐热材料.....	217	二、控制材料与屏蔽材料.....	227
		三、包套材料.....	228

第一篇 精密合金

引言

精密合金是具有特殊物理性能金属材料，主要包括软磁合金、硬磁合金、膨胀合金、弹性合金、电性合金及新发展起来的非晶态精密合金等。精密合金主要用来制作仪器仪表的关键元件，在电真空工业、电讯及国防工业中有着广泛的用途。

精密合金品种很多，而且尚在不断发展之中，目前国际上没有统一的分类，本书根据材料特性及用途将其分为六大类，简述如下：

（一）软磁合金

软磁合金是电力工业、通讯技术、自动控制、计算技术、雷达技术及磁记录方面不可缺少的关键材料，广泛用做各种器件的铁芯及录音录像的磁头等。其应用面虽广，但仍可归纳为用于能量转换及信息处理两大方面，主要是作为导磁体使用。

软磁合金的磁性特点是，在外磁场作用下才显示出磁性，去掉外磁场后就显示不出磁性。

（二）永磁合金（又称硬磁合金）

永磁合金的特点是经磁场磁化后，去掉外磁场仍保留磁性。利用此特性，在需要恒定磁场而又不能加能源的情况下，可把它作为产生磁场的磁源。如常见的指南针及仪表中的磁铁等。在微型电机及医疗方面（磁疗）也有广泛的用途。

（三）弹性合金

弹性合金包括高弹性及恒弹性合金两类。

高弹性合金的特点主要是弹性大、强度高，故广泛用于航空、无线电、精密机械和精密仪表中，如航空仪表中的波纹膜盒、继电器装置中的接触点弹簧片、钟表和仪表中的发条等。

恒弹性合金特点是，在一定的温度范围（一般为 $-60\sim+100^{\circ}\text{C}$ ）内其弹性模量或共振频率不随温度而变化（或变化很小）。由于此独特性能，使它在精密仪器仪表、测量技术、通讯技术及计算技术中获得广泛应用。

（四）膨胀合金

膨胀合金包括低膨胀合金、定膨胀合金及热双金属片。

低膨胀合金（因瓦型合金）的特点是，在温度变化时其长度变化很小，能保持尺寸的稳定性，故可用来制造标准量尺、精密天平、标准电容及标准频率计的谐振腔等，也是制造双金属片的重要材料。

定膨胀合金的特点是，在规定的温度范围内具有一定的膨胀系数，主要用于和陶瓷、玻璃封接而构成电真空器件的结构材料，如大功率管的阴极、阳极引出线等。

热双金属片是由热膨胀系数差别很大的两种合金组成的。高膨胀系数的合金层称主动层，低膨胀系数的合金层称被动层。当加热时，由于两层合金膨胀系数不同，主动层伸长的

多、被动层伸长的少，而使双金属片向被动层弯曲，这样就把热能简单地转换成机械能，产生一定的力或位移，因而可用做测量或控制仪表的传感元件。即利用其在温度变化时弯曲的特点达到自动控制的目的。

(五) 电性合金

电性合金主要包括电热合金、精密电阻合金、热电偶材料及电触头材料。

电热合金主要性能特点是，电阻率高及高温抗氧化性好。广泛用做电加热元件，如加热炉的电热丝等，当电流通过时将电能转换成热能。电阻率越高，效率越高。

精密电阻合金的性能特点是具有几乎是恒定的电阻率，其电阻率很高而随温度却变化很小(即电阻温度系数很小)，而且随时间的变化也小。例如其电阻温度系数为 $\alpha_{20}=1\times 10^{-6}1/^{\circ}\text{C}$ ，而铜的 $\alpha_{20}=4300\times 10^{-6}1/^{\circ}\text{C}$ ，Ni80Cr20电热合金的 $\alpha=140\times 10^{-6}1/^{\circ}\text{C}$ (20~100℃)，说明其电阻温度系数比纯金属铜小几千倍，比电热合金 Ni80Cr20 小百余倍。可用来做标准电阻器，广泛应用于精密仪表及测量仪器(如电桥、电位差计、控制电流用的电阻及各种电阻应变仪用的敏感元件等)。

热电偶材料的特点是热电势大且能抗高温氧化。主要用做热电偶测温计及其他测温计(如电阻温度计、辐射高温计)中的热电偶。

(六) 非晶态精密合金

非晶态精密合金是新发展起来的呈非晶体状态的具有特殊物理性能金属材料。由于它内部没有晶粒边界，因而具有异乎寻常的机械、耐蚀、电气、磁学等性能。目前多为磁性材料(又称磁性玻璃)，尚处于科研及少量使用阶段。

精密合金的表示方法：

根据冶金工业部 1969 年部颁标准规定，精密合金产品牌号表示方法，用“精”字拼音的字头“J”表示精密合金，其类别用数字加“J”表示之，如：1J——软磁；2J——变形永磁；3J——弹性；4J——膨胀；5J——双金属；6J——电阻；7J——热电偶材料等。J 以后数字表示该类合金代号的序号。如 1J1 表示一号软磁合金 FeSiAl；2J3 为三号变形永磁 FeCoV 合金 (Co48V3.5)；3J1 为一号弹性合金 Ni36CrTiAl，即苏联牌号 ЭИ702；4J5 即膨胀合金 Ni31Co5(余Fe)；4J29 为 Ni29Co18 (余Fe)；7J10 为热电偶材料 Pt-PtRh10 等。

我国精密合金发展很快，品种不断增加，以上仅是根据冶金部部颁标准的粗略分类。

第一章 金属铁磁性的基础知识

铁磁性的知识（又称铁磁学）是精密合金的重要理论基础，这不仅因为磁性合金是精密合金中很重要的一类材料，要认识磁性合金的性质，就必须具有铁磁性的知识；而且也因为其他类精密合金的特性也都与磁性有关，如恒弹性合金之具有不随温度变化的弹性模量（艾林瓦效应），低膨胀合金（因瓦合金）具有低膨胀系数（因瓦反常效应）、精密电阻合金具有低的电阻温度系数等都与磁性有关。超导体中表现的现象也涉及到磁性的问题。因此要了解精密合金，必须具有物质磁性的基础知识。

本章仅从物理概念上阐明物质铁磁性的来源——自发磁化理论及铁磁性在外磁场中的变化情况——技术磁化理论（或铁磁畴理论），并以金属材料为主，由宏观现象入手，了解产生磁性参数的微观本质，再将理论用到宏观上去分析影响物理参数的因素，以探讨达到所需参数的途径。本章所涉及的铁磁性的基本原则可用于一切铁磁性物质。

§ 1-1 物质的磁性

所有物质都具有磁性，但磁性的强弱有很大的不同。一般磁性的强弱是指物质本身固有磁矩的大小。可用单位体积的磁矩——磁化强度 M 来表示物质固有磁矩的大小。

一、磁 矩

如果将一块磁铁棒放入铁屑中，再取出时可发现，靠近两端吸引的铁屑特别多，即磁性特别强（图1-1a）。磁铁两端磁性强的区域称为磁极。如把磁铁棒或细长的磁针中心支持或悬挂起来，它将在地球磁场中转动，使其两磁极总是分别指南、北方向。指北的一端称为北极（用N表示），指南的一端称为南极（用S表示）（图1-1b）。

磁铁所以能吸引铁屑，是因磁铁在它周围产生磁场。可以用磁力线表示磁场的强弱及方

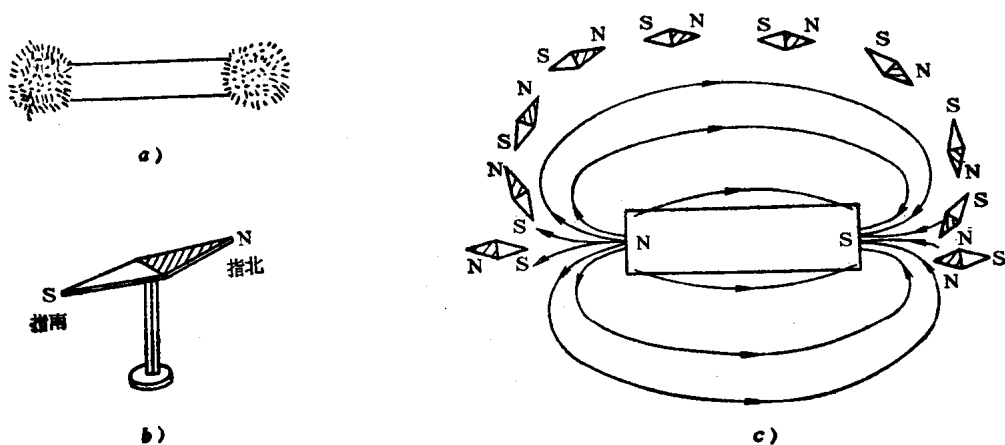


图 1-1 磁铁产生的磁场及其方向示意图
a)磁铁棒 b)磁针 c)磁棒周围磁场的显示

向。磁力线密表示磁场强（两极处）；棒周围磁力线上各点的切线方向代表了磁棒所产生的磁场方向。磁力线由 N 到 S。可利用小磁针在磁场中的取向来描绘磁力线，如（图 1-1c）所示。可以看到，棒周围磁场方向处处不同。

通过一给定曲面 S 的总磁力线数，称为通过该曲面的磁通量，用 Φ 表示，其单位在 CGS 制中为麦克斯韦 (Mx)，在 SI 制中为韦伯 (Wb)。1 Mx = 10^{-8} Wb。与磁力线垂直的单位面积上的磁力线数称为磁感应强度（磁通量密度），用 B 表示，其单位在 CGS 制中为高斯 (G)，在 SI 制中为特斯拉 (T)。1 T = 10^4 G，1 T = 1 Wb/m²。

磁棒的 N、S 两极是同时产生的，不可能单独存在某一极。如把一根磁棒切成两块，则每一块小磁棒都是具有南北两极的小磁铁（图 1-2），一般把这种磁性大小相等，符号相反，紧密连在一起的两个磁极叫做磁偶极子。磁性原子就是一个磁偶极子。可见磁偶极子就是一块具有两个磁极的磁棒，其主要特性是具有磁偶极矩 p 及不可分割性。

（一）磁偶极子的磁偶极矩及磁极化强度 J

磁偶极子的总磁偶极矩 p 定义为（图 1-3）

$$p = ml \quad (\text{韦} \cdot \text{米}) \quad (1-1)$$

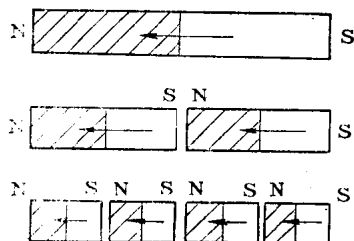


图 1-2 磁极的不可分割性示意图

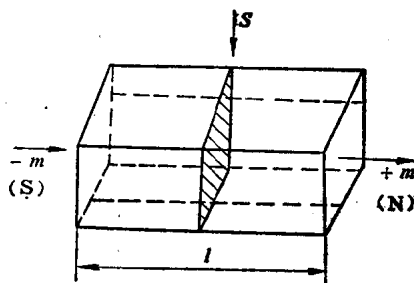


图 1-3 磁偶极子磁矩示意图

式中 m ——磁棒每端的磁极强度，代表磁极在单位磁场强度作用下受力的大小（韦），
 l ——磁棒或磁偶极子的长度，矢量 l 指向由 $-m$ 到 $+m$ ，或由 S 到 N（米）。

如磁偶极子的横截面积用 S 表示，则单位面积的磁极强度（称磁极面密度） $\sigma = \frac{m}{S}$

（见图 1-3）。根据式（1-1），磁偶极矩 p 的值为：

$$p = \sigma Sl \quad (1-2)$$

可见 p 的大小和其体积 Sl 有关。为了便于比较不同磁体的磁性及描述磁体的磁化状态（磁化方向及磁化程度），而用单位体积的原子磁偶极矩 p_i 的矢量和——磁极化强度 J 来表示磁性的强弱，根据式（1-1）、（1-2）可得：

$$J = \frac{p}{V} = \frac{\sigma Sl}{Sl} = \sum_{\text{单位体积}} p_i \quad (1-3)$$

故 J 也就是单位面积上的磁极强度，即偶极子端面上的磁极密度。 J 的值可由零（原子磁偶极矩 p_i 取向杂乱无章，相互抵消， $\sum p_i = 0$ ，处于未磁化状态，见图 1-4a）到最大值 J 。（在磁场作用下， p_i 沿磁场方向排列，见图 1-4b，此时在磁体内部 N、S 极首尾衔接，相互抵消，宏观效果在整个磁棒端面上出现 N、S 极（图 1-4c），磁体处于磁化状态）。可见 J 是表现磁体磁化状态的物理量，其方向就是 p 的方向。

(二) 原子磁矩与磁化强度 M

1822年安培提出了关于物质磁性本质的假说,认为一切磁现象的根源是电流,即在物质中存在着称为分子电流的回路电流,它相当于元磁铁,故图 1-4 所示棒形磁铁的磁化现象可以不看作是由短小磁棒或磁偶极子产生的,而可以理解为由许多微小环电流产生的,见图

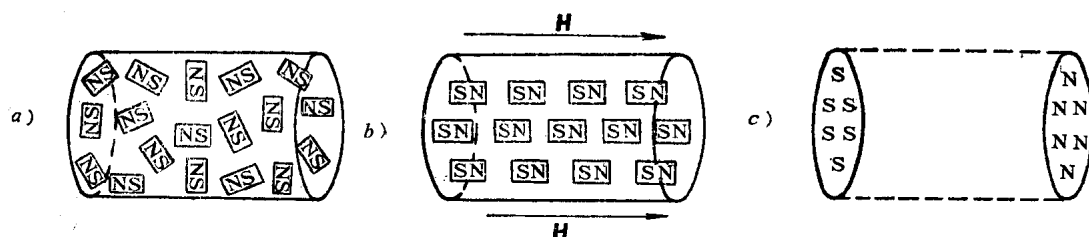


图 1-4 由原子磁偶极矩组成的磁棒磁化状态示意图
a) $H=0, J=0$ b) $J=J_s$ c) 宏观效果($J=J_s$ 时)

1-5b、c)。载有电流 I (安)、面积为 A (米²)的环电流的磁矩 $p_A = IA$, 矢量 p_A 的方向垂直于环电流的平面, 由右手定则确定(图 1-5a)。一个磁矩为 p_A 的环电流(磁原子就可看成是一个磁偶极矩为 $p_A = \mu_0 p_A$ 的磁偶极子(其中 μ_0 是真空磁导率), 这就是环电流与磁偶极子的等效原理。物质的磁性就取决于物质中分子电流(即环电流)对外界磁效应的总和。

物质的磁性来源于构成物质的原子的磁性, 而原子的磁性则是由电子运动所构成的微观环电流产生的(安培的假说与现代对物质磁性的理解是相当符合的, 即分子电流就相当于分子中电子绕原子核的转动和电子本身的自旋运动)。原子中每个电子带有负电荷, 电子按一定轨道绕原子核作循环运动, 便产生了一个与运动方向相反的等效环电流, 由此电流产生的磁矩称电子轨道磁矩; 同时电子还绕本身轴自转(自旋), 由电子自旋形成的环电流产生的磁矩称电子自旋磁矩。

原子磁矩是指一个孤立原子中所有电子自旋磁矩和电子轨道磁矩的矢量和(原子核带正电, 可产生核自旋磁矩, 但因其质量是电子质量的 1836.5 倍, 所以其磁矩是电子自旋磁矩的 $1/1836.5$, 故可以忽略不计)。若把图 1-5 中每个环电流看成是由一个原子形成的, 则环电流的磁矩 p_A 为一个原子磁矩。原子磁矩的单位为玻尔磁子 μ_B 。实验指出, 一个电子自旋磁矩在磁场方向的投影为一玻尔磁子 μ_B 。人们以 μ_B 做为磁矩的单位。由于自旋磁矩在外磁场中只能有两个取向, 故它在磁场方向投影也只有两个值 $\pm \mu_B$ 。一个 μ_B 的大小为:

$$\mu_B = \frac{eh}{2m} = \frac{eh}{4\pi m} = 9.273 \times 10^{-24} (\text{安} \cdot \text{米}^2) \quad (1-4)$$

式中 e ——电子的电荷(库);

m ——电子的质量(千克);

h ——普朗克常数(焦·秒)。

注意, 真正测得的物质(原子集合体)的每个原子真正磁矩值(称有效玻尔磁子数)一般比孤立原子的原子磁矩值小, 且不是整数。这是由于原子间相互作用所致。

物质的磁性不仅和单个原子磁矩大小有关, 更主要的是与物质中各个原子磁矩的取向有关, 即取决于各个原子磁矩的矢量和。为了描述宏观磁体的磁化状态, 用单位体积内原子磁矩 p_A 的矢量和(称做磁化强度 M)来表示磁性的方向和强弱, 可用下式表示:

$$M = \frac{\sum p_A}{V} \quad (\text{安/米}) \quad (1-5)$$

式中 V ——磁体体积 (米³)。

磁化强度 M 的值可取从零 (图1-5b 中原子磁矩 p_i 的取向杂乱分布, 其矢量和等于零, 故磁棒的 $M=0$) 到最大值 M_s (原子磁矩沿磁化方向同向排列, 矢量和最大, 见图1-5c) 间的任意值。原子磁矩定向排列程度越高, 其矢量和数值愈大, 则磁化强度的数值越大。当

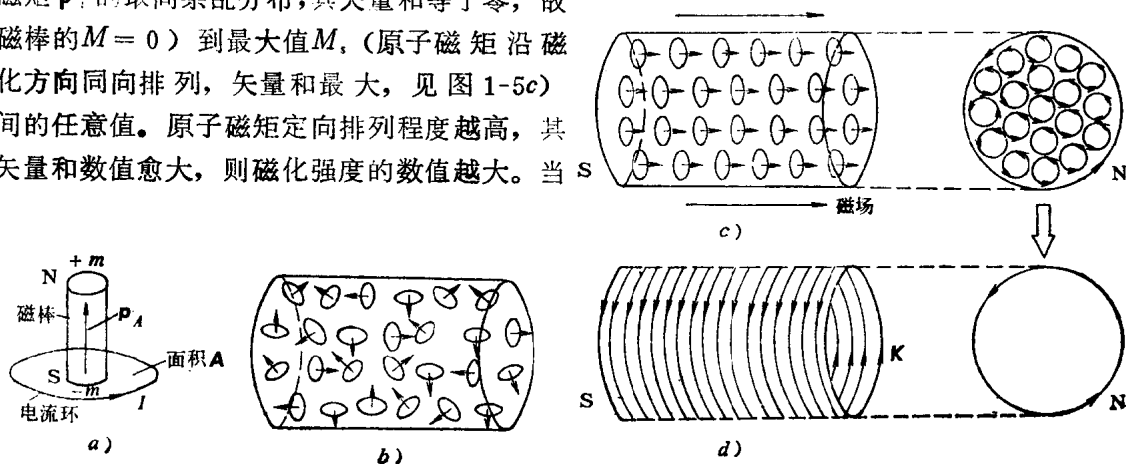


图1-5 由环电流产生的原子磁矩组成的均匀磁化棒的磁化状态示意图
(每个环电流产生的磁矩是一个原子磁矩 p_A)

a) 环电流产生的磁矩与其等效磁棒 b) $M=0$, 未磁化
c) $M=M_s$ 达磁饱和 d) 宏观效果 (磁体的等效螺旋管)

$M=M_s$ 时, 由图1-5c) 可看出, 由于磁体内环电流方向一致, 任何相邻电流环邻边电流大小相等, 而方向相反, 所以, 除了棒周线上的电流外, 它们的效果互相抵消。结果就相当于有一层电流沿磁棒表面流动 (宏观上称这种电流为束缚电流)。故磁化强度 M 可代表磁棒外表面上的等效电流层密度 K 。这类环形电流在效果上就象一个通以电流 I 、电流层密度为 K 的等效螺旋管 (图1-5d)。若螺旋管是由 N 匝细导线绕成, 若螺旋管长度为 l , 则实际电流层密度的数值 $K = \frac{NI}{l}$, 效果相当于螺旋管在轴线上中心处所产生的磁场强度 Θ 。

据环电流与磁偶极子等效原理, 则体积为 V 磁体的磁偶极矩 $J = \frac{\sum p_i}{V}$ 和其磁化强度

$M = \frac{\sum p_i}{V}$ 间的关系为:

$$J = \mu_0 M = \sum_{\text{单位体积}} p_i = \mu_0 \sum_{\text{单位体积}} p_A \quad (\text{韦伯/米}^2) \quad (1-6)$$

⊖ 据安培环路定律 $\oint H \cdot dl = \Sigma I$, 即磁场强度沿任何闭合回路的线积分等于被这回路围着的电流的代数和, 可推导出长螺旋管中心处轴线上的磁场强度值 $H = nI$ (或 $H = \frac{NI}{l}$), $n = \frac{N}{l}$ 是单位长度上的匝数 (此式同样适用于螺旋环中的磁场, 只是 l 是环形螺旋管的平均直径, 环状磁体性能检验中常用到此式)。而螺旋管端处的 $H = \frac{1}{2} nI$ 。载流 I 、半径为 R 的电流环中心点处的磁场强度值 $H = \frac{I}{2R}$ 。

式中 p_j ——原子的磁偶极矩值 (韦伯·米)；

p_A ——原子的磁矩值 (安/米²)；

μ_0 ——真空磁导率 (亨/米)。

(三) 磁化强度 M 与磁感应强度 B

当铁磁体放入通电流的螺旋管中时, 可使螺旋管内的磁场强度增加, 这是由于磁体的磁化强度 M 所引起的。由图1-5d)可知, M 的作用相当于磁体中有等效电流产生了附加磁场 H' , 故在磁棒内真正的磁场强度不是 H , 而是 H 和 H' 的和, 表示为:

$$B = \mu_0(H + M) \quad (\text{特}) \quad (1-7)$$

式中 H ——为线圈所产生的磁场强度 (设铁芯是闭合环) (安/米)；

μ_0 ——真空磁导率, 为 $4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米；

B ——磁感应强度, 是通过磁场中某点垂直于磁力线的单位面积上的磁力线数 (韦/米²或特)。

据式 (1-5) 可知, 磁化强度 M 与物质的本性有关, 而与其形状及大小无关, 且随磁场强弱而变化, 可表示为:

$$M = \chi H \quad (\text{安/米}) \quad (1-8)$$

式中 χ ——磁化率 (相对), 代表磁体磁化的难易程度, 无量纲;

H ——磁场强度 (安/米)；

M ——磁化强度 (安/米)。

把式 (1-8) 代入式 (1-7) 则:

$$B = \mu_0(H + \chi H) = \mu_0 H(1 + \chi) = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (1-9)$$

$$\mu_r = 1 + \chi = \frac{B}{\mu_0 H} = 7.9 \times 10^5 \frac{B}{H} \quad (1-10)$$

式中 μ_r ——相对磁导率, 它取决于材料的本性及磁场强度的大小, 无量纲;

μ ——磁导率, $\mu = \mu_0 \mu_r$ (亨/米)。

一般物质的磁性按磁化率 χ 或磁导率 μ_r 值的大小分类。

二、物质按磁性的分类

按磁化率可将物质分为三类, 抗磁物质、顺磁物质及铁磁物质, 三种物质反映出三种磁性。

(一) 抗磁物质: 呈抗磁性

其特征是磁化率是负的, 即 $\chi < 0$ 。由 $M = \chi H$ 可知, 在这种情况下, M 与 H 方向相反, 使通过该物质的磁力线减少。

若抗磁物质棒挂在磁场中磁化, 则在棒内部产生的附加磁场 H' 与外磁场 H 方向相反, 使棒内的磁场减弱。在靠近外加磁场的 S 极处之棒端也是 S 极, 棒在磁场中受到斥力而转动 (图1-6), 当棒转动到其轴线与外磁场方向垂直时稳定。

抗磁物质的磁化率数值很小, $|\chi|$ 只有 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 数量级, 且与外磁场的强弱及温度无关。其磁化曲线为一条直线 (图1-7)。这类物质的磁性称抗磁性。

惰性气体、非金属硅、磷、硫及在周期表中 (见表1-1) 后面的11~16列的元素 (若干金属如铍、镓、铟、铊、铋、铊、铋) 都是典型的抗磁物质。

朗日万 (P. Langevin) 的理论及实验证明, 抗磁性是电子轨道磁矩 p_L 和磁化磁场相

互作用产生的，故所有物质都应具有抗磁性。其产生的原因解释如下：当电子沿轨道以 ω 角速度运动时，相当于反向的正电荷运动，此电流产生磁矩的方向由右手定则确定。以一对运动方向相反的电子为例，在无外磁场时，两者的轨道磁矩 p_L 方向相反因而互相抵消(图1-8)。

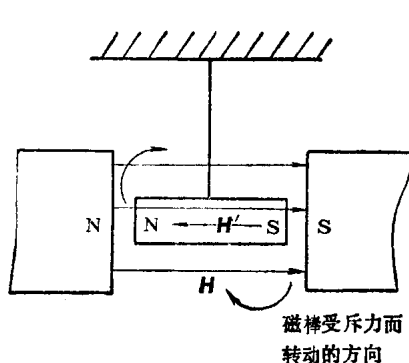


图1-6 抗磁物质磁化示意图

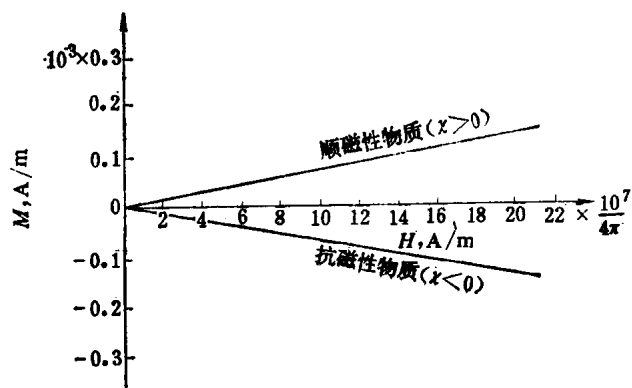


图1-7 抗磁体及顺磁体的磁化曲线

表1-1 18℃时摩尔原子磁化率 $\chi_A \times 10^6$ ①②

	1	2	3														
2	Li +25.2	Be -9.02		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18
3	Na +15.6	Mg +6	Al +16.7														
4	K +21.5	Ca +44	Sc +315	Ti +150	V +230	Cr +160	Mn +527	Fe »	Co »	Ni »	Cu -5.4	Zn -10.26	Ga -16.8	Ge -8.9	As -5.5	Se -26.5	
5	Rb +19.2	Sr +92	Y +191	Zr +120	Nb +120	Mo +54	Tc	Ru +44	Rh +113	Pd +580	Ag -4.56	Cd -19.6	In -12.36	Sn ^③ +4.4	Sb -107	Te -40.8	
6	Cs +29.9	Ba +20	La [★] +140	Hf /	Ta +145	W +40	Re +68.7	Os +7.6	Ir +25	Pt +200	Au -29.6	Hg -33.8	Tl -49.05	Pb -24.86	Bi -265	Po —	
稀 土 族 *	Ce镧 2300	Pr镨 3520 ~5150	Nd钕 5600	Sm钐 1820	Eu铕 30400	Gd钆 75500	Tb铽 115000	Dy镝 102000	Ho铥 68200	Er铒 44500	Tm铥 25600						

①参阅 С. В. Вонсовский, Современное Учение о Магнетизме, ГТТИ, 1952.

在摩尔原子磁化率 χ_A 、每克磁化率 χ_g 和每一立方厘米的磁化率 χ 之间存在如下关系：

$$\chi_g = \frac{\chi_A}{M}, \chi_A = \chi V = \chi_2 A, \text{ 其中: } \delta \text{——比重; } V \text{——1摩尔原子体积; } A \text{——原子量.}$$

②从金属 Cu、Ag、Au 起右边第11~16 列是抗磁物质，是因离子的抗磁性大于传导电子的顺磁性；另外因这些金属由 Ga→Se、从 In→Te、从 Tl→Bi，其当原子价增加时金属键的结合逐渐让位于共价结合，就是逐步向抗磁性的非金属过渡。在这些金属中有反常的抗磁性，如 X_{Gc} 和温度有关，X_{Sb} 有各向异性。

③表中数据为白 Sn 的磁化率，具有顺磁性，而灰 Sn 则是 -4.4，具有抗磁性。

当加入外磁场 H 时，电子受到附加的洛伦兹力 ΔK ， ΔK 的方向由左手定则确定：手心对着磁场方向，四指指向电流方向（和电子运动方向相反），拇指指向即洛伦兹力方向，如图1-8a)所示。当轨道磁矩 p_L 与 H 同向时，附加力 ΔK 与向心力 K 反向，产生的附加角速度 $\Delta\omega$ 使电子运动角速度减小，相应地产生与 p_L 反向的附加磁矩 Δp_L ， Δp_L 与磁场 H 方向相反；当 p_L 和磁

场 H 方向相反时, ΔK 与 K 同向, 使 ω 增加, 产生的附加磁矩 Δp_L 也与 H 反向(图1-8b)。可见, 不管电子磁矩方向如何, 向量 Δp_L 永远与 H 方向相反, 即都产生抗磁的附加项。一对电子可产生 $2\Delta p_L$ 的抗磁性。

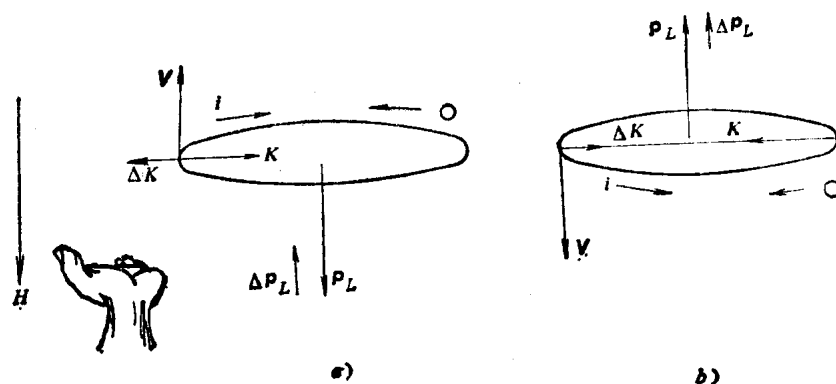


图 1-8 形成抗磁矩 Δp_L 的示意图

(K ——向心力 ΔK ——洛伦兹力)

a) p_L 与 H 同向, H 使 ω 减小, Δp_L 与 H 反向 b) p_L 与 H 反向, H 使 ω 增加, Δp_L 与 H 反向

(二) 顺磁物质: 呈顺磁性

其特征是磁化率为正值, 即 $\chi > 0$, M 与 H 方向相同。当顺磁物质放在磁场中被磁化后, 磁体内的附加磁场 H' 和外加磁场 H 方向一致, 故其在磁场中受到吸力(图1-9)。

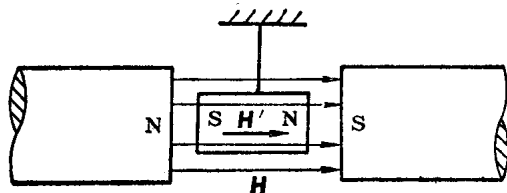


图1-9 顺磁物质磁化示意图

H —外加磁场 H' —顺磁体内附加磁场

顺磁物质在室温下磁化率 χ 的数值很小, 为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 数量级, 且与外磁场 H 的强弱无关, 磁化曲线也是一条直线(见图1-7)。但在极低温 $1K$ 和 10^{11} 安/米的强磁场下除外, 那时趋近磁饱和。温度上升时, 其 χ 值下降(但碱金属的 χ 值与温度无关, 因其 χ 是由自由电子的自旋磁矩产生的, 而自由电子有自己的分布规律, 此规律受热运动的影响极小 $\ominus$), 大多数的顺磁体服从居里-外斯(Curie-Weiss)定律:

$$\chi = \frac{C}{T + \Delta'} \quad (1-11)$$

式中 C ——居里常数;

Δ' ——是个可大于零或小于零的常数, 随给定的物质而异;

T ——绝对温度。

这类物质的磁性称顺磁性。典型的顺磁物质有其原子或分子磁矩没抵消的气体(O_2 , NO)、稀土金属[其顺磁性来源于 $4f$ 层没对消的电子磁矩, 而 $4f$ 电子不受其他外邻电子壳层($5s$, $5p$, $5d$)的影响, 其磁矩很大, 且相应于其离子磁矩的大小, 见表1-1中的稀

$\ominus$ C. B. 冯索夫斯基著, “现代磁学” 123页, 1980年中译本, 科学出版社。

土族Ⅲ、碱金属、铁族元素的盐类及铁族元素的高温态、其他过渡族金属，如钪、钛、钒、铬、锰及表 1-1 所示的 χ 为正的元素。

顺磁性是由于未填满的电子壳层中的电子自旋磁矩、自由电子自旋磁矩在外界磁场的作用下产生的，故顺磁物质的基本特点是在没加外磁场时就有自己的固有的原子磁矩，但由于热骚动使原子磁矩无序分布，因而互相抵消，使总磁矩等于零 (图 1-10a)，因而宏观上不显示磁性。若将顺磁物质放入强磁场中，则原子磁矩转向磁场方向，而使物质沿磁场方向呈现一定的正总磁矩 (图 1-10b)。当温度接近 0K 或磁场极强时，所有原子磁矩都沿磁场方向平行排列，且 $M = M_s$ (M_s 称为饱和磁化强度)，见图 1-10c)，此时 χ 值可很大 ($\sim 10^4$ 数量级)。一般在室温下，为了达到磁饱和，需 $10^8 \sim 10^{11}$ 安/米的强磁场，而这种强磁场很难获得，所以在室温下顺磁物质很难达到 M_s 磁饱和状态。

由此可知，顺磁体磁化到磁饱和的过程，实质上是外磁场克服热骚动的扰乱作用，使各

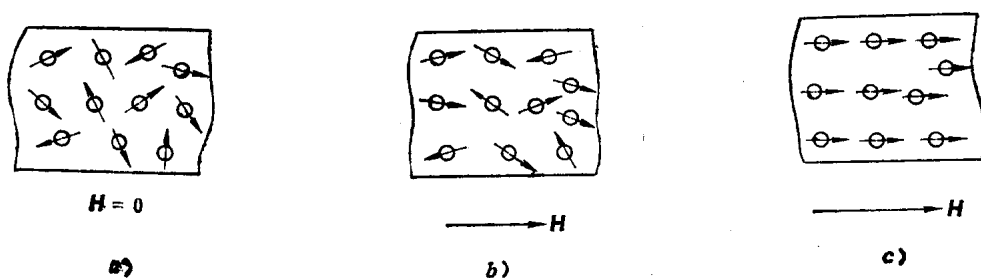


图 1-10 顺磁物质的磁化示意图 (⊗表示原子磁矩 P_A)

a) 高温时 $T \gg 0K$ $H = 0$ $M = 0$ $\chi = 0$	b) 高温、强磁场 (10^4 安/米) 时 $T \gg 0K$ $H > 0$ $M > 0$ $\chi \approx 10^{-6}$	c) 低温、强磁场 (10^{11} 安/米)，材料达饱和 $T \approx 0K$ $H \gg 0$ $M = M_s$ $\chi \approx 10^4$
--	---	---

原子磁矩由杂乱分布转向与外加磁场方向平行排列的过程。在同一磁场下，温度升高，则使磁矩杂乱分布的热骚动作用增大，而沿磁场方向排列的磁矩减少，因而磁化率随之降低。温度降低时的情况则相反。这一温度效应适用一般的顺磁物质。

综上所述，抗磁性是由电子轨道磁矩引起的，因此所有物质都具有抗磁性。但周期表 (表 1-1) 中仅有 10 余种抗磁物质，这是因为原子的电子壳层中电子组态不同之故。原子有自由电子及未填满电子的壳层，这些电子的自旋磁矩组成的固有原子磁矩在外磁场作用下，会沿外磁场方向排列，因而显示出顺磁性 (如稀土族因 4f 层没填满，有大的固有原子磁矩，而显出强顺磁性)，所以只有当物质的抗磁性大于顺磁性时，才显示出抗磁性。而抗磁性与顺磁性都属弱磁性 (和铁磁性相比)，一般称具有这两类磁性的物质为非磁性物质。

(三) 铁磁物质：呈铁磁性

铁磁物质放入磁场中时，将产生与外加磁场 H 方向相同的附加磁场 H' ，也即其 $\chi > 0$ ， M 与 H 同向。但铁磁物质有铁磁性，它具有一系列与顺磁物质不同的磁现象及特点，表现在以下几方面：

1. 易磁化现象 其 $\chi \gg 1$ ，数值很大，可达 10^4 数量级。其磁化强度值 M 随磁场强度值 H 的变化如图 1-11a) 所示，在很小的 H 下 (弱磁场中) 即有很大的 M 值，当达到某一

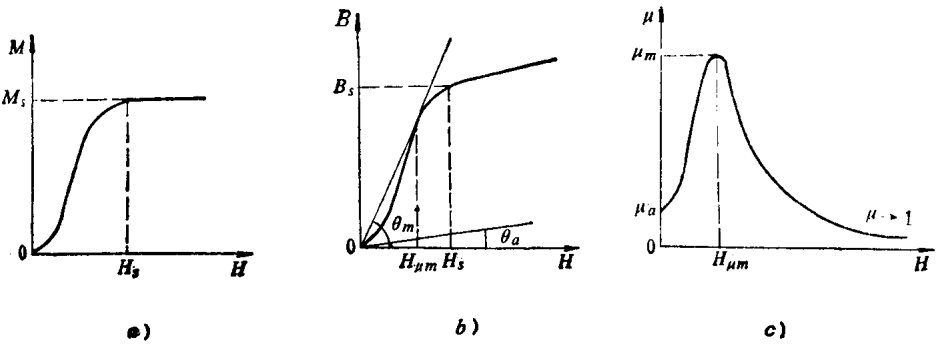


图 1-11 铁磁体的磁化曲线及磁导率曲线
a)磁化曲线 $M-H$ b)磁化曲线 $B-H$ c)磁导率曲线 $\mu-H$

磁场强度值 H_s 时, $M=M_s$ 值, 称为饱和磁化强度, 以后 H 值再增加, M 值也不增加, 磁化曲线为一条平行于 H 轴的直线, 此时称铁磁物质已达到了磁饱和。达到磁饱和时的 B 值 (B_s) 称饱和磁感应强度。当 $H>H_s$ 时, B 值仍随 H 值增加, 呈斜直线 (图 1-11b)。由表 1-2 可见, 与顺磁物质相比, 铁磁物质既易磁化又易达到磁饱和。

表1-2 铁磁体与顺磁体磁性比较

物 质	M		H_s	
	A/m($H=0.8$ A/m)	G($H=0.01$ Oe)	A/m	Oe
顺磁体 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10^{-3}	10^{-6}	8×10^4	10^6
铁磁体 Fe	10^4	10	4~80	0.05~1

当 $H=0$ 时, 如 $\mu_0 M=B=0$ 时, 称为铁磁体处于完全退磁状态。在 H 增加时, 测得的 $\mu_0 M-H$ (或 $M-H$)、 $B-H$ 曲线称为基本磁化曲线。物质由不表现磁性到具有一定的磁性称为磁化, 达到磁饱和前的磁化过程称为技术磁化过程。磁饱和后的磁化与顺磁体相同。确定铁磁物质磁化难易程度的参数磁导率 μ 必须由 $B-H$ 基本磁化曲线上确定 (图 1-11b):

$$\text{初始磁导率 } \mu_a = \frac{B}{\mu_0 H} (H \rightarrow 0) \tag{1-12}$$

式中 μ_0 ——真空磁导率;
 H ——工业上常规定为 0.8 安/米或 0.08 安/米;
 B ——在上述 H 值时所测得的 B 值 (特)。
 μ_a 也可由原点 0 作 $B-H$ 曲线的内切线求得。

$$\text{最大磁导率 } \mu_m = \left(\frac{B}{\mu_0 H} \right)_{\max} \tag{1-13}$$

μ_m 可由 0 点作 $B-H$ 曲线的外切线 (利用此切线的斜率 $\tan \theta_m$) 求得。
 $\mu-H$ 曲线是具有 μ_m 最大值的曲线 (图 1-11c), 当 $H \rightarrow \infty$ 时,

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{\mu_0 H + \mu_0 M}{\mu_0 H} \rightarrow 1。$$