• 高等学校教学用书 •

精密合金材料学

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU

冶金工业出版社

高 等 学 校 教 学 用 书

精密合金材料学

东北工学院　何开元　主编

冶 金 工 业 出 版 社

高等学校教学用书

精密合金材料学

东北工学院　何开元　主编

•

冶金工业出版社出版

（北京北河沿大街嵩祝院北巷39号）

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

•

787×1092　1/16　印张 16　字数 377 千字

1991年5月第一版　　1991年5月第一次印刷

印数00,001～2,000册

ISBN 7-5024-0832-0

TG·120（课）定价4.15元

前　言

精密合金是具有特殊物理性能的一类合金，这类合金主要不是用作结构件，而是依据其物理性能的特点广泛地用在仪器仪表、电子技术等工业中作为能量及信息转换、传输等的元器件。由于此类合金具有力学特性以外的其它功能，因此称之为金属功能材料，以和金属结构材料相区别。

根据冶金工业部1969年部颁标准规定，精密合金产品牌号的表示方法为：用“J”表示精密合金，其前的数字表示类别，如1J表示软磁，2J表示可变形永磁，3J表示弹性合金，4J表示热膨胀合金，5J表示热双金属，6J表示电阻合金，7J表示热电偶材料，J后的数字表示该类合金的序号，如1J1表示一号软磁合金FeSiAl等。有些合金，如硅钢片、超导合金、铸造或烧结永磁合金以及非晶态软磁合金等，原来并未列入精密合金的牌号内，但因它们也属于金属功能材料，故也收入本书中。

铁磁学是精密合金的重要理论基础，本书将它单列在第一章，介绍必要的磁学知识。对于已具备金属学基础的读者来说，学完第一章后再去学习其后各章，便不会遇到多少困难。

本书从第二章开始，分别介绍各类合金材料。编写的特点是以材料所属合金系来分类的，这样便于系统介绍各合金系的相结构以及性能和成分的关系；并且，除了注意说明材料的应用特性以外，对材料的内禀特性也予以必要的重视。编者希望这本教材不仅能够向读者介绍现有的金属功能材料，而且能够启发读者去开发新的功能材料，这仅仅是编者的愿望，但未必能达到这一要求。如书中有一些章节能够体现这一愿望的痕迹就算得到一点安慰了。

书中采用米、千克、秒、安培单位制（MKSA），也就是国际单位制（SI），同时也介绍厘米、克、秒、电磁单位制（C G S emu），并举例说明以上两单位制中的量值和公式的转换方法，以供查对和转换之用。

本书共分六章，第一章扼要介绍铁磁学内容，它是精密合金的重要理论基础，其余五章分别介绍磁性、弹性、热膨胀及电性合金材料。

本书的第一、二章由东北工学院何开元编写，第三章由艾录编写，第四章由谭延昌编写，第五章由刘庆国编写，第六章由陈世林编写，何开元担任主编，北京科技大学王润审阅。

编　者

1989年12月

目　　录

第一章 铁磁学基础

第一节 概　　述

精密合金是指那些具有特殊物理性能的一类合金，其中磁性合金占有较大比例．同时对于弹性合金中的磁弹性效应，膨胀合金中的因瓦效应以及导电合金中的超导现象等皆涉及到和磁学有关的知识。可以认为铁磁学是各种精密合金的共同理论基础，因此本书把它单列成一章以便较系统地介绍。由于篇幅所限，本章只能对和材料有关的最基础的磁学知识和结论进行扼要的介绍，这些内容将会对理解各种精密合金中有关磁学问题提供方便。关于磁性材料中涉及的较深入的磁学问题，读者可去查阅有关专门书籍。

对于磁性材料的性能参数，多年来采用两种单位制：一种是CGS电磁单位；另一种是MKSA单位，亦即国际单位制（SI）。本书按规定采用国际单位制，但目前在磁学界仍是两制并存，读者应熟悉两者的换算。由于这两种单位制间的复杂关系，常使初学者感到困惑，故本章将用较多篇幅予以介绍，希望能对读者有较多的帮助。在本章中如用到CGS制的公式，都加以注明。

第二节 磁学量的定义及单位

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。

一、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，指北极（N极）和指南极（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之磁极间的作用力为

$$F=k\frac{P_1P_2}{d^2} \tag{1-1}$$

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$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$H/m（亨利/米)，是一常数，其值等于MKSA制中的真空磁导率。

二、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

$$F=PH \tag{1-2}$$

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1 dyne（达因）时，此磁极所在之处的磁场为1 Oe（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米的单匝环形线圈，当通以电流i A（安培）时，在其中心点处的磁场为

$$H=\frac{i}{D} \tag{1-3}$$

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$1\ \text{A/m}=4\pi\times10^{-3}\text{Oe}$。

三、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：

$$L=\left(F\cdot\frac{l}{2}\sin\theta\right)\times2=Pl\cdot H\sin\theta \tag{1-4}$$

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。

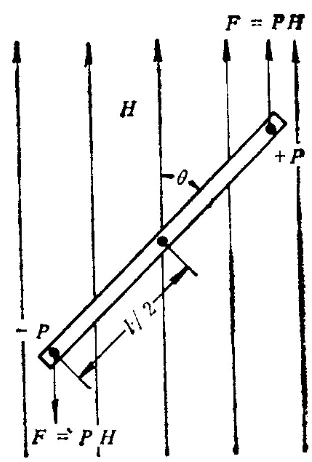

图 1-1 磁棒在均匀磁场中受力矩示意

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Wb·m（韦伯·米）；而以iS表示的磁矩，其单位为$\text{A}\cdot\text{m}^2$，两者是不同的。为了有所区分，我们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。

四、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最高；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

$$M=\frac{\Sigma M_m}{V} \tag{1-5}$$

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A·m^2/m^3=A/m。

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

$$\sigma=\frac{M}{d} \tag{1-6}$$

此处d为物质的密度。

在CGS制中，σ的单位为emu/g；在MKSA制中为A·m^2/kg。

有时也用σ_A表示磁化强度，它称为原子磁化强度，定义为

$$\sigma_A=A\sigma \tag{1-7}$$

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Am^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。

$$J=\frac{\Sigma j_m}{V}=\mu_0\frac{\Sigma M_m}{V}=\mu_0 M \tag{1-8}$$

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的程度的量。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，不要引起误解（见五)。

五、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

$$B=H+4\pi M \tag{1-9}$$

由此式可见，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，马克斯威尔/厘米^2)，H——Oe（奥斯特)，M——emu/cm^3。

在MKSA制中，B、H和M之关系为

$$B=\mu_0 H+\mu_0 M=\mu_0 H+J \tag{1-10}$$

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（1-10）式写成$B=\mu_0 H+M$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。

六、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)， $$\chi=\frac{M}{H} \tag{1-11}$$

质量磁化率（又称比磁化率），$\chi_\sigma=\dfrac{\sigma}{H}=\dfrac{\chi}{d}$ (1-12)

原子磁化率，$\chi_A=A\chi_\sigma=\dfrac{A}{d}\chi$ (1-13)

上式中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

$$\mu=\frac{B}{H} \tag{1-14}$$

在CGS制中，因为$B=H+4\pi M$，故

$$\mu=1+4\pi\chi \tag{1-15}$$

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

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

是有量纲的量，而磁导率对真空磁导率的相对值为

$$\mu_r=\frac{\mu}{\mu_0}=1+\chi \tag{1-16}$$

是没有量纲的，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（1-15）和（1-16）式进行比较，可看出MKSA制中的磁化率χ的数值比CGS制中的大4π倍。

按外加磁场的大小和方式不同，磁导率可以分为很多种，其中属于静态磁化部分的将在第七小节中进行介绍，属于动态磁化部分的将在本章第六节中说明。

七、磁化曲线和磁滞回线

本小节中我们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．M-H曲线和J-H曲线　在图1-2中示出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，可见此三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所需之磁化场称为饱和磁场，以H_s表示，如图中曲线（c）表示。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。

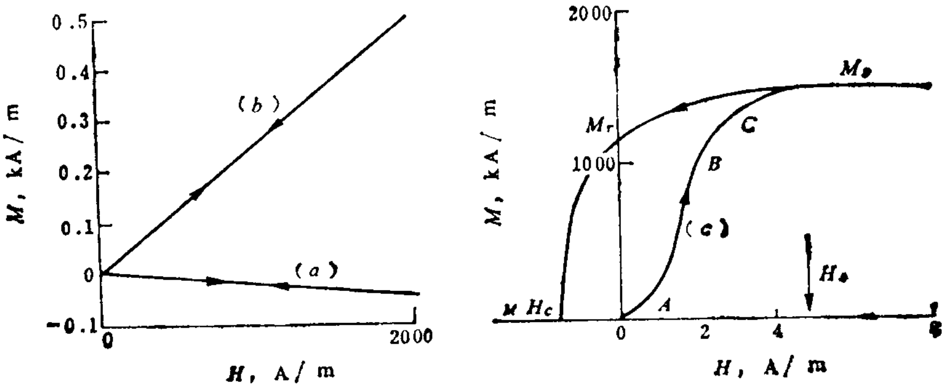

图 1-2 几种典型材料的磁化曲线

(a)抗磁；(b) 顺磁或反铁磁；(c) 铁磁

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。图中矢号表示磁化的进程。$OABB_s$ 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 曲线所涉及到的几个技术磁性参数加以说明。

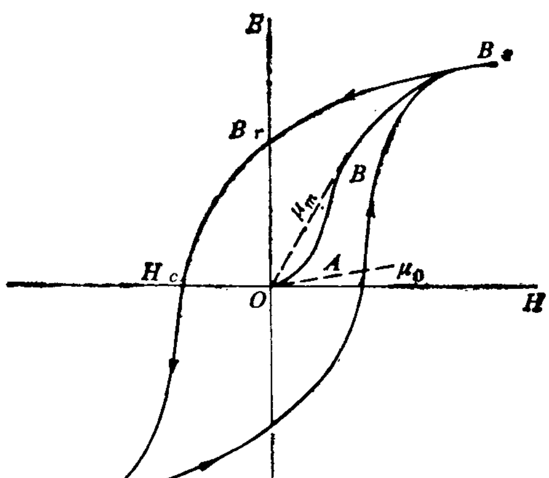

图 1-3　B-H 磁化曲线及磁滞回线

3．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

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

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

式中 H_s 为使磁（极）化强度达到饱和值时所需的最小磁场。在一些高导磁的软磁材料

中，由于$H_s \ll 4\pi M_s$，因此也可以用$4\pi M_s$代替B_s。

4. 起始磁导率μ_i和最大磁导率μ_m　起始磁导率定义为在B-H磁化曲线起始处的斜率，（见图1-3中的虚线）。

$$\mu_i = \lim_{H \to 0} \frac{B}{H} \tag{1-19}$$

因此，确定μ_i（或μ_0）比较严格的方法是先作出弱场中的μ-H曲线，然后将H外推到零而将它定出。但在工业应用中，为了简便起见，常常规定在某一弱场下之磁导率为μ_i。在多数情况下，规定弱场的值为1 mOe和5mOe，而将这种起始磁导率分别记作μ_1和μ_5。若改用MKSA制，则上述磁场对应为0.8mA/cm（0.08A/m）和4 mA/cm（0.4A/m），因此相应的起始磁导率可记作$\mu_{0.8}$和μ_4。

沿一条磁化曲线上，磁导率之最大值称为最大磁导率，以μ_m表示；它可以从磁化曲线的原点作磁化曲线的切线来确定。

在MKSA制中，列出的磁导率的数值一般皆以相对磁导率表示。

5. 矫顽力H_c　H_c是指在B-H饱和磁滞回线上使B变为零时所需之反磁化场，它和内禀矫顽力${}_MH_c$或${}_JH_c$是不同的。对于软磁材料来说，它们相差不大；但对于高矫顽力的材料来说，有明显差别。${}_MH_c$的值可以很大，例如对于稀土永磁材料，可以达到10^7 A/m（$4\pi \times 10^4$Oe）；但H_c值则受到材料的饱和磁化强度的限制，不能超过一定限数。今以MKSA制中之B、H和M之关系式加以说明：因为$B = \mu_0 H + \mu_0 M$，当$-H = H_c$时，$B = 0$，此时有$H_c = M$，因此H_c之最大值为M_s，同样可以说明在CGS制中，H_c之值不能超过$4\pi M_s$。

八、磁学量的单位

在磁学及磁性材料领域中，多年来采用两种单位制，一种是CGS电磁单位，另一种是MKSA单位，亦即国际单位（SI）。近年来，虽然大力推广采用MKSA单位制，但在磁学领域中，CGS单位在国内外的学术会议中仍允许采用，而在国外的著名刊物中仍然两制并存，这一方面是因为历史原因，另一方面也因为在磁学领域中采用CGS制有其方便之处。例如，在CGS制中，由于真空磁导率为1，不需要引入μ_0这个常数而使表达式简化。

MKSA制和CGS制比较，不仅是数值上不同，而且对磁学量的定义的方法也不一样。在CGS制中，通过磁极间的相互作用力先定义磁场H，然后再给磁感应B下定义；但在MKSA制中，则先从两根电流导线间之力去定义B，然后再定义H，在真空中B和H也不一样，$B = \mu_0 H$，$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$亨利/米（H/m）。这样，使许多基本方程之形式和在CGS制中的也不一样。

为了能掌握运用此两单位制，希望读者应先掌握磁性材料最基本的量在两制中的关系。这些关系在前文中已作过一些说明，在本小节中再作一扼要总结，列在下表中。

在CGS制中

$$B = H + 4\pi M$$

$$\chi = \frac{M}{H}$$

$$\mu = 1 + 4\pi\chi$$

在真空中　$B=H$，$\mu=1$

各量之单位如下：

$$H——\mathrm{Oe},\ B——\mathrm{Gs},\ M——\mathrm{Gs}$$
$$\chi——\mathrm{Gs/Oe},\ \mu——\mathrm{Gs/Oe}$$

在MKSA制中

$$B=\mu_0H+\mu_0M=\mu_0H+J$$
$$J=\mu_0M$$
$$\chi=\frac{M}{H}$$
$$\mu=\frac{B}{H}$$
$$\mu_r=\frac{\mu}{\mu_0}=1+\chi$$

在真空中　$B=\mu_0H$，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$亨利/米

各量之单位如下：

$$H——\mathrm{A/m},\ B——\mathrm{Wb/m^2},\ M——\mathrm{A/m}$$
$$J——\mathrm{Wb/m^2},\ \chi——\text{无量纲},\ \mu——\mathrm{H/m}$$

这些量在两制中有如下数值关系：

H：$1\mathrm{A/m}=4\pi\times10^{-3}\mathrm{Oe}$

B：$1\mathrm{Wb/m^2}=10^4\mathrm{Gs}$

M：$1\mathrm{A/m}=10^{-3}\mathrm{Gs}$

χ：MKSA制中之χ值是CGS制中之χ值之4π倍

μ：MKSA制中之μ_r值与CGS制中之μ值相等

在表1-1中列出在SI及CGS两单位制间磁学量的数值换算表。

为了使读者学会利用这些表去处理有关由于改变单位制而带来的问题，下面举两个例子来说明。

例1　已知在CGS制中，通过直导线电流的磁场公式为

$$H(\mathrm{Oe})=\frac{2i(\mathrm{emu})}{r\ (\mathrm{cm})}$$

试求在MKSA制中的公式（CGS→MKSA）。

解：第一步，先查表列出有关各量在两制中的关系（注意顺序）。

$$H:\ 1\mathrm{A/m}=4\pi\times10^{-3}\mathrm{Oe}$$
$$i:\ 1\mathrm{A}=10^{-1}\mathrm{emu}$$
$$r:\ 1\mathrm{m}=10^2\mathrm{cm}$$

第二步，将原式中有关各量皆以上式中列在右端的因子去除，即得 MKSA 制中 的公式为

$$4\pi\times10^{-3}H(\mathrm{A/m})=\frac{2\times10^{-1}i(\mathrm{A})}{10^2r\ (\mathrm{m})}$$

表 1-1 磁学及其有关量单位换算表

物 理 量	MKSA单位	CGS单位	换算因子（以此因子乘MKSA单位制中的量值得CGS制中的量值）
长　度	米（m）	厘米（cm）	10^2
质　量	千克（kg）	克（g）	10^3
力　F	牛顿（N）	达因（dyne）	10^5
力　矩	牛顿·米（N·m）	达因厘米（dyne·cm）	10^7
功	焦耳（J）	尔格（erg）	10^7
功　率	瓦特（W）	尔格/秒（erg/s）	10^7
压 强 P	牛顿/米²，帕斯卡（Pa）	达因/厘米²（dyne/cm²）	10
密 度 D	公斤/米³（kg/m³）	克/厘米³（g/cm³）	10^{-3}
电 流 I	安培（A）	emu	10^{-1}
电 压 V	伏特（V）	emu	10^8
电 感 L	亨利（H）	emu	10^9
电 阻 R	欧姆（Ω）	emu	10^9
磁 场 H	安/米（A/m）	奥斯特（Oe）	$4\pi\times10^{-3}$
磁通量 Φ	韦伯（Wb）	麦克斯韦（Mx）	10^8
磁通量密度（磁感应）B	韦/米²，特斯拉（T）	高斯（Gs）	10^4
磁极化强度 J	韦/米（Wb/m²）	高斯（Gs）	$10^4/4\pi$
磁化强度 M	安/米（A/m）	高斯（Gs）	10^{-3}
磁化强度 σ	Am²/kg	emu/g	1
磁极强度 m	韦伯（Wb）	emu	$10^8/4\pi$
磁偶极矩 j_m	韦·米（Wb·m）	（磁矩）	$10^{10}/4\pi$
磁矩 M_m } 磁势 ϕ_m }	安·米²（A·m²）	（磁矩）	10^3
磁通势 V_m	安·匝（A）	奥·厘米（Oe·cm）	$4\pi\times10^{-1}$
磁化率（相对）χ			$1/4\pi$
磁导率（相对）μ			1
真空磁导率 μ_0	$4\pi\times10^{-7}$亨利/米(H/m)		$10^7/4\pi$
退磁因子（$N=-H/M$）			4π
磁阻 R_m	安匝/韦伯（A/Wb）	奥·厘米/麦克斯韦	$4\pi\times10^{-9}$
磁导 Λ	韦伯/安匝（Wb/A）	麦克斯韦/奥·厘米	$10^9/4\pi$
能量密度 E } 磁各向异性常数 K }	焦耳/米³（J/m³）	尔格/厘米³（erg/cm³）	10
旋磁比 γ	米/(安·秒)(m/A·S)	1/奥·秒	$10^3/4\pi$
磁能积（BH）$_m$	焦耳/米³（J/m³）	高斯·奥（Gs·Oe）	$4\pi\times10$
	千焦耳/米³（kJ/m³）	兆高·奥（MGs·Oe）	$4\pi\times10^{-2}$
绝对磁导率 $\mu_0\mu$	亨利/米(H/m)	高斯/奥（Gs/Oe）	$10^7/4\pi$

即
$$H(\mathrm{A/m})=\frac{i(\mathrm{A})}{2\pi r(\mathrm{m})}$$

读者可以自己去理解这个转变方法的原理。

例2 已知在MKSA制中$B=\mu_0H+\mu_0M$，在CGS制中，$B=H+4\pi M$，且已知$1\mathrm{Wb/m^2}=10^4\mathrm{Gs}$，试求在此两制中$H$和$M$单位的数值转变关系。

解： 对于同样的磁学量在两单位制中表示，可写成下式

$$B_{SI}=\mu_0H_{SI}+\mu_0M_{SI} \tag{01}$$

$$B_{CGS}=H_{CGS}+4\pi M_{CGS} \tag{02}$$

应有$B_{CGS}=10^4B_{SI}$。今将（02）式用10^4去除，得

$$10^{-4}\times B_{CGS}=10^{-4}\times H_{CGS}+10^{-4}\times 4\pi\times M_{CGS} \tag{03}$$

则（03）式之左端与（01）式左端之数值应相等，并可推知右端两项也应各自数值相等，即

$$\mu_0 H_{SI}=10^{-4}H_{CGS} \tag{04}$$

$$\mu_0 M_{SI}=4\pi\times 10^{-4}M_{CGS} \tag{05}$$

从（04）式得

$$H_{CGS}=4\pi\times 10^{-3}H_{SI} \tag{06}$$

从（05）式得

$$M_{CGS}=10^{-3}M_{SI} \tag{07}$$

从（06）和（07）两式可得

$$H：1A/m=4\pi\times 10^{-3}Oe$$

$$M：1A/m=10^{-3}Gs$$

第三节　物质的磁性

一、原子的磁性

物质的磁性来源于原子的磁性，原子的磁性来源于电子的轨道运动及自旋运动，它们都可以产生磁矩，分述如下。

1. 电子轨道磁矩　电子绕轨道运动，相当于一个环形电流。若电子的电荷为$-e$，绕轨道运行之周期为T，则相应的电流$i=-\frac{e}{T}$，所形成的磁矩为iS，此处S为环形电流所包围的面积。原子中各电子轨道的磁矩的方向是空间量子化的，磁矩的最小单位为μ_B，称为玻尔磁子，它是一个常数，其数值为

$$\mu_B=9.27\times 10^{-24}A\cdot m^2\ （MKSA）$$

$$\mu_B=9.27\times 10^{-21}erg/Oe\ （CGS）$$

在MKSA制中，也可以用磁偶极矩表示一个玻尔磁子，其值为

$$\mu_0\times 9.27\times 10^{-24}A\cdot m^2=1.165\times 10^{-29}Wb\cdot m$$

电子循轨运动之磁矩大小和轨道角动量的大小有关，因此它是角量子数l的函数。从量子力学计算可知，角量子数为l的轨道电子的磁矩为

$$\mu_l=\sqrt{l(l+1)}\ \mu_B \tag{1-20}$$

式中$l=0$，1，2，……$n-1$。若一原子中有很多电子，则由各个电子形成的轨道总磁矩是各个电子轨道磁矩的向量和。因此在原子壳层完全充满电子的情况下，由于电子轨道在空间的对称分布，原子的总磁矩为零。

2. 电子的自旋磁矩　电子具有自旋，也是一种电荷的运动形式，因此也产生磁矩。实验证明，一个电子自旋磁矩在外磁场方向（z）的大小正好是一个玻尔磁子，但其方向可能和外磁场的方向平行或反平行，即

$$\mu_{sz}=\pm\mu_B \tag{1-21}$$

因此如果一个原子中有多个电子，则它们在z方向的自旋磁矩可能是平行的，也可能是反平行的。总的自旋磁矩是各个自旋磁矩的向量和。对于充满了电子的壳层，其总的自旋磁

矩也为零。

3．原子的磁矩　孤立的原子的磁矩是原子中所有电子的轨道磁矩向量和。在已知原子中电子排布的条件下，是可以进行计算的。

物质是由原子组成，因此物质的磁性来源于各个原子的磁矩。但应当说明，在固体中，由于各个原子间电子之相互作用，情况变得复杂。因此除了特殊情况以外，一般说来物质中每个原子的磁矩大小不能简单地按计算孤立原子磁矩的方法去作定量计算。

二、抗磁性

有一类物质，其磁化率小于零，并且和温度无关。如果将它悬于有梯度之磁场中，它将向磁场减弱的方向移动，此类物质称为抗磁性物质。

1．抗磁性的来源　用经典的玻尔原子模型可以帮助我们理解抗磁性的来源。考虑一个电子轨道和外磁场方向垂直，如图1-4所示。我们可以将它看作一个面积为A的小电流圈，当外场从零增加H时，由于在电流圈中磁通量HA的变化而产生一个感应电动势ε（法拉第定律）。按楞次定律，此应电动势力图降低磁通的大小，结果降低了轨道中的"电流"（实际降低了电子运动的速度），也就是降低了它的磁矩。因此这种物质在磁场中磁化时，磁矩的增量（$\Delta\mu$）为负值，故磁化率小于零。如果原子中有几个轨道电子，不管每一轨道中电子运动之方向如何，不管各个轨道电子之磁矩是否相互抵消，它们都会对抗磁性有贡献。由于抗磁性的磁化率数值小，因此具有顺磁性的物质（见后），其抗磁性将被掩盖。

2．抗磁性物质　电子壳层完全被填满的原子没有净磁矩，由这些原子所组成之物质（它们不会表现顺磁性，见后）一般为抗磁性的，如惰性气体He、Ne、Ar等。多数双原子气体，如H_2、N_2等也是抗磁性的，因为当原子形成分子时，将使电子外壳层填满，而使一个分子无净磁矩。同样的理由可以说明一些离子固体，如NaCl以及共价晶体如C、Si、Ge也都是抗磁性的。金属多数是顺磁性的，但也有些是抗磁性的，如Bi和Sb就有负值较大的抗磁磁化率。

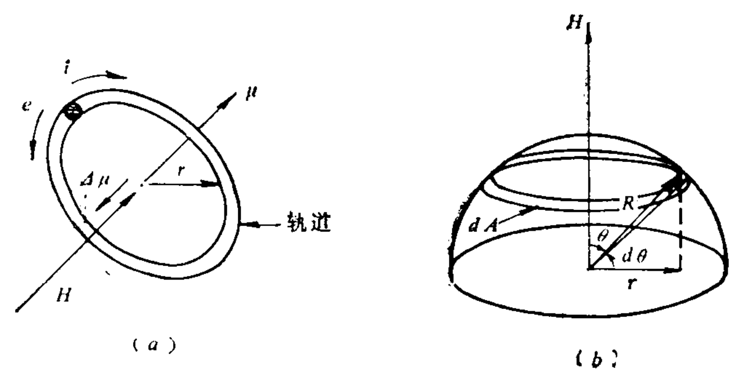

图 1-4　磁场H对电子轨道磁矩的作用

三、物质的顺磁性

顺磁性物质的磁化率大于零，其数值一般比抗磁性的稍大，它在梯度场中将受到一个力的作用，使它顺着磁场增强的方向移动。

1．居里-外斯定律（Curie-Weiss *Law*）　顺磁性物质除了磁化率大于零以外，一个重要的标志是它随温度变化的关系服从居里-外斯定律，即质量磁化率

$$\chi_\sigma=\frac{C}{T-\theta} \tag{1-22}$$

式中C称为居里常数；θ对一定的物质也是常数，它可以大于零，等于零或小于零。当$\theta=0$时，此时有$\chi_\sigma=C/T$，称为居里定律。

2. 顺磁性来源　顺磁性的经典理论首先是由郎之万（Langevin）提出的。他假定顺磁性物质中之每个原子具有一定的磁矩μ，在通常的温度下，由于热扰动这些磁矩的方向是紊乱的。当外加一磁场磁化时，则磁矩μ在外磁场中的能量

$$E_P=-\mu H\cos\theta \tag{1-23}$$

式中θ为μ和H的夹角，此能量改变了众多原子的磁矩按方向的平均分布，使它们在外场方向有较多的统计分量，因此呈现顺磁性。可以证明，在通常的磁场H及温度T下，能量E_P远小于热扰动能量，因此磁化率是很小的。

应当说明，朗之万理论未考虑各个原子磁矩间的相互作用，因此只能导出居里定律。如果考虑了原子磁矩间的相互作用，则可以导出居里-外斯定律。在以后发展的顺磁性理论中，引入了量子理论，考虑了在外场作用下原子磁矩的取向是空间量子化的，而使得顺磁性理论进一步完善。

3. 顺磁性物质　在原子（或离子）的电子壳层中未填满电子的情况下，往往带有净磁矩，由这些原子或离子组成的物质一般为顺磁性的。外电子层不满（如Cu、Na）的情况比较复杂；内电子层不满的，如过渡元素、稀土元素则可以有很大的净磁矩，因此是顺磁性的。主要的顺磁性物质有如下几类，一类是含过渡元素的盐类，另一类是稀土元素，它们都有强的顺磁性。对于一般金属来说，情况较复杂，有些是顺磁性的，有些则是抗磁或铁磁性的。

四、物质的铁磁性

1. 铁磁性的特征　在相同的磁化场下，铁磁性物质比抗磁或顺磁性物质有高得多的磁化强度，并且在不太强的磁场中就可以达到磁化的饱和状态。我们通常将铁磁性物质以及亚铁磁性物质（见后）称为强磁性物质以区别于弱磁性物质，如顺磁，抗磁性物质等。例如在低于50Oe的磁场下，纯铁的M_s值可达1700kA/m（1700emu/cm^3）；但在同一磁场下，一个通常的顺磁性物质之磁化强度仅约1A/m（10^{-3}emu/cm^3），因此铁磁性要比顺磁性效应大10^6倍。铁磁性的其他特点已在本章第二节提过，其磁化率随磁化场作非线性变化，并且当磁化场方向改变时有磁滞现象。另外，铁磁体的饱和磁化强度随温度升高而下降。到达一定温度时，下降为零。即铁磁性在一定温度下消失而转变为顺磁性，这个磁性转变温度称为居里温度T_C（图1-5）。

2. 铁磁性的分子场理论　为了说明物质的铁磁性和抗磁性或顺磁性之间的明显差别，法国物理学家外斯（Weiss）于1907年提出分子场假说。这个假说包括以下两个内容：（1）铁磁性物质内存在一种很强的“分子场”，它可以使各原子磁矩皆同向平行排列，即自发地磁化到饱和，这个过程称为自发磁化。（2）在铁磁体内存在若干个自发磁化的区域，称为磁畴，在每个磁畴内自发磁化到饱和，但各个畴的磁化方向是各不相同的，因此大块铁磁性物质在总体上一般不显示出强的磁性。

外斯的分子场理论假定分子场的大小是和自发磁化强度M成正比，即

$$H_m=\nu M \tag{1-24}$$