

金属软磁材料 及其热处理

陈国钧 李茂昌 周元龙 编著

52.2

机械工业出版社

金属软磁材料及其热处理

陈国钧 李茂昌 周元龙 编著

机械工业出版社

本书系统全面地介绍了金属软磁材料及其热处理的基础、发展现状以及获得不同磁特性的基本原理和控制性能的各种热处理工艺、技术与设备。书末附有各类常用软磁合金新旧牌号和各国牌号对照表、软磁材料选用曲线、常用软磁合金物理常数表和常用单位换算等实用数据。

本书可供机械、冶金、电子、仪器仪表、广播通讯、国防等工业部门从事软磁材料生产、使用和科研设计的工人、技术人员阅读，也可供高校师生参考。

金属软磁材料及其热处理

陈国钧 李茂昌 周元龙 编著

责任编辑 程淑华

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）

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32 · 印张 9 3/4 · 字数 216 千字

1986年7月北京第一版·1986年7月北京第一次印刷

印数 0,001—2,910 · 定价 2.35 元

科技新书目：124-93

统一书号：15033·8265

目 录

第一章 软磁合金的基础知识	1
第一节 金属学基本知识	1
一、金属的特征和结构	1
二、合金的特征和结构	8
三、合金的塑性变形和再结晶	10
四、金属和合金的非晶态结构	16
第二节 金属铁磁性基本知识	17
一、物质的磁性	17
二、铁磁性物质原子结构特点	18
三、铁磁性物质的特性	20
四、磁畴及畴壁	24
五、磁化过程中磁畴的运动	25
六、交变磁场中的磁化	26
第三节 磁性材料的分类	29
第二章 各种软磁合金及其热处理	31
第一节 铁镍系软磁合金及其热处理工艺	31
一、铁镍系坡莫合金的基本特点和分类	31
二、72~84%Ni-Fe合金	36
三、45~68%Ni-Fe合金	80
第二节 硅钢及其热处理工艺	111
一、概论	112
二、相图和物理性能	114
三、无取向硅钢及其热处理	116
四、冷轧取向硅钢及其热处理	123
五、取向薄硅钢及其热处理	133
六、高硅钢及其热处理	134

七、消除应力退火	139
第三节 铁铝系合金及其热处理工艺	141
一、概论	141
二、高导磁1J12和1J16合金及其热处理	144
三、磁致伸缩型1J13合金及其热处理	153
四、低铁铝合金1J6及其热处理	156
第四节 铁硅铝系高导磁合金及其热处理工艺	158
第五节 铁钴系合金及其热处理工艺	165
第六节 电工纯铁及其热处理工艺	172
第七节 非晶态软磁合金及其热处理工艺	178
一、概论	178
二、生成条件及制备方法	181
三、非晶态合金的磁性 with 晶态合金的对比	186
四、非晶态软磁合金及其热处理工艺	194
五、应用与前景	204
第三章 软磁合金热处理技术和设备	209
第一节 热处理作用与涂层	211
一、冷加工前的热处理	211
二、冷加工中间的热处理	212
三、最终热处理的目的与作用	214
四、其它特殊热处理	219
五、软磁合金的涂层	219
第二节 氢气热处理原理与技术	223
一、氢气热处理原理	223
二、获得高纯氢的方法	237
三、影响氢气热处理效果的因素	251
四、氢气热处理炉及操作注意事项	253
第三节 真空热处理原理及技术	262
一、真空热处理的作用	263
二、影响真空热处理效果的因素	266

三、真空的概念	267
四、真空热处理炉	268
第四节 真空热处理与氢气热处理对比	276
一、真空热处理与氢气热处理的优缺点比较	276
二、真空与氢气联合热处理	279
第五节 磁场热处理	282
一、软磁合金的磁场热处理技术	282
二、影响磁场热处理效果的各种因素	288
三、应力热处理	289
附录	291
一、金属软磁合金国内新旧牌号及国外牌号对照	291
二、我国及各国主要硅钢牌号对照	294
三、软磁合金的一些物理常数	298
四、各类软磁合金的磁性选择	300
五、各类应用对软磁材料的要求	304
六、金属软磁材料的带厚、截止频率、磁导率和 电阻率关系	305
七、软磁材料的使用频率和工作温度范围	306
八、常用单位换算	308

第一章 软磁合金的基础知识

第一节 金属学基本知识

一、金属的特征和结构

(一) 金属特性

1. 金属—晶体

自然界中的一切固态物质，按其内部结构可分为晶体和非晶体两大类。所谓“晶体”就是指其原子（更确切些说是离子）具有规则排列的物体。晶体之所以具有这种规则的排列，主要是由于各原子间相互吸引与排斥相平衡的结果。而非晶体的原子排列是无规律的。在一般情况下，金属在固态下都是晶体。

2. 金属原子的结构特点—金属键

金属从微观结构上讲，是由许多原子组成，而原子又是由带正电荷的原子核和一定数目的带负电荷的电子所组成。电子分布在原子核外的各电子层中，并围绕原子核运动，如同行星围绕太阳旋转一样。而金属原子最外层的价电子数较少（少于四个），受核的束缚力较弱，因此极易失去这些价电子，变成正离子。这些价电子不属于某一个原子，它们在原子（或离子）间自由地运动着，形成所谓电子气（电子云）。实际上是正离子浸没在电子气中，依靠正离子与带负电的电子气相互吸引而连结在一起，使金属具有完整性、不显电性，这种结合方式叫金属键。

金属原子的这种结合方式决定了金属一系列的特性及其

结构特点。

(1) 金属的良好导电性，是由于自由电子在一定的电位差作用下作定向运动的结果。正离子对自由电子运动的阻碍就形成金属的电阻，当温度升高时，正离子的热振动加剧，阻碍了自由电子的运动，使电阻随温度升高而增加。

(2) 金属的导热性，是通过正离子的振动和自由电子的运动来完成的，所以金属的导热性比非金属要强。但金属的导热性又不象导电性那样单独由自由电子来实现，因此它与非金属在这方面的差别也就如导电性那样明显。

(3) 金属的良好塑性，是由于金属在外力作用下，原子层间作相对位移时，正离子仍和自由电子保持着金属结合而形成的。它不象其它键合方式，受到外力作用时，会破坏结合，因此具有高的塑性。

(4) 金属具有光泽。由于自由电子吸收可见光的能量，使金属具有不透明性，因吸收能量而激发的电子，当回到原有的低能级时发生辐射，这就使金属有光泽。

3. 原子堆积方式

由于金属是晶体，它内部的原子是按一定规律排列的。为了简化讨论，通常把原子看作一个个小球，把这些相同的小球按一定的几何形状排列起来如图 1-1 所示。又由于金属键的特性，使原子的堆积趋向于最紧密，从而形成总体积为最小的结构。

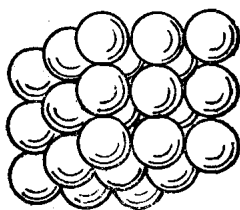


图1-1 晶体原子排列示意图

(二) 金属的晶体结构

1. 基本概念

(1) 晶格（晶体点阵） 为了清楚地表明原子在空间堆

积的规律性，加以抽象化，即将每个原子看做一个点。这个点代表原子的振动中心，把这些点连接起来，形成一个空间格子，这称为晶格（或晶体点阵）。

（2）晶胞 晶体中原子排列具有周期性特点，为了便于研究，从中取出一个几何单元，它代表整个晶体原子排列的规律。这个基本单元（几何单元）称为晶胞。参看图1-2。

（3）晶格常数 一般晶胞三个坐标（ x 、 y 、 z ）的边长，用字母（ a 、 b 、 c ）表示，如图1-3，这个边长叫晶格常数，它表示晶胞的外形及几何尺寸，常用单位埃（ $\text{\AA}$ ）。

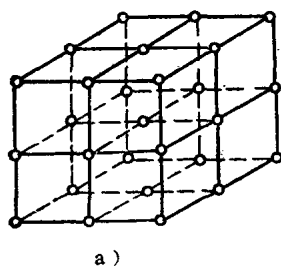


图1-2 晶格和晶胞
a) 晶格 b) 晶胞

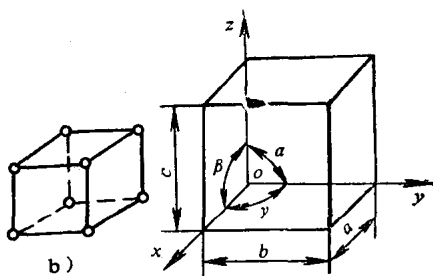


图1-3 晶格常数的表示方法

$$1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{cm}.$$

2. 金属晶格的基本类型

金属中常见的有三种基本晶格类型。即体心立方晶格、面心立方晶格、密排六方晶格，如图1-4所示。

体心立方晶格的晶胞是由8个原子构成的立方体，在其立方体的体积中心还有一个原子。晶格常数 $a = b = c$ ，故常用 a 表示。在这种晶胞中，因每个顶点上的原子是同时属于周围几个晶胞所公有，故实际上每个体心立方晶胞中仅包

含有 $\frac{1}{8} \times 8 + 1 = 2$ 个原子。

面心立方晶格的晶胞也是由 8 个原子构成的立方体，但

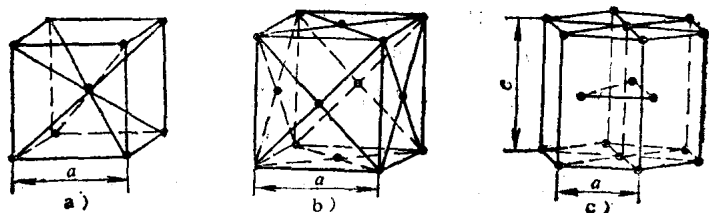


图1-4 三种晶格的示意图

a) 体心 b) 面心 c) 密排六方

在立方体的每一面的中心还各有一个原子。它属于两个晶胞所公有，故每个面心立方晶胞中包含有 $\frac{1}{8} \times 8 + \frac{1}{2} \times 6 = 4$ 个原子。

密排六方晶格的晶胞形状是一个六方柱体。晶格常数用六方柱底面的边长 a 和两个底面的距离 c 表示，每个密排六方晶胞中包含有 12 个原子。

(三) 晶格（晶体点阵）的表示方法

1. 原子坐标

在晶格（晶体点阵）中，每一个原子并不是独立存在的，它的位置必须和相邻原子比较才能确定。因此要想确定一个原子的位置，必须先选定参考点。在一个晶胞中，可以任选一个原子为坐标原点 $(0, 0, 0)$ ，以晶胞的棱边为坐标轴如图1-5。坐标轴的长度是以晶胞的边长（点阵常数）作为度量单位。例，图1-5中A点 $(1, 0, 0)$ 、E点 $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$ 。

D点 $\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)$ 等。

2. 晶面指数

在晶格中由晶胞的结点组成的任一平面，代表晶体的原子平面，叫晶面。晶面指数是根据晶面与三个坐标轴的截距值得出来的。图 1-6 示出立方晶体的几个重要晶面(010),(110),(111)。晶面指数的一般形式用 (hkl) 表示， hkl 表示截距值。

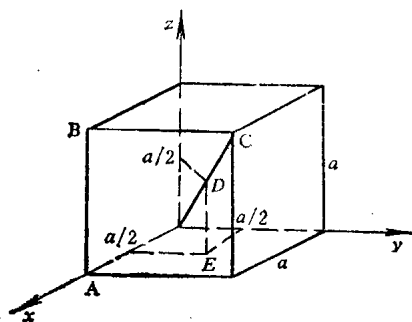


图1-5 原子坐标表示方法

3. 晶向指数

晶格中任何穿过晶胞结点的直线方向称晶向。图 1-7 示出面心立方晶体的晶向指数。晶向指数的一般形式用 $[u, v, w]$ 表示， u, v, w 表示晶向指数的数值。其数值的求法类似晶面指数。

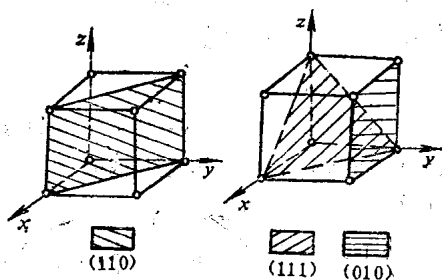


图1-6 立方晶体中的重要晶面

(四) 金属的实际晶体结构

1. 不完整晶体结构

在实际金属晶体中，原子的规则排列并不象理想的那样绝对完整，而是在晶体中的某些部位原子的规则排列受到干

扰，原子排列的重复周期性被破坏。这种排列规则的破坏，可以不同形式表现出来，这就形成了晶体中的不完整结构。

当经过一定表面处理后的金属表面，在高于 100 倍以上的光学显微镜下观察其金相显微组织，可看出金属是由许多外形不规则的多边形晶体组成。每个外形不规则的晶体称为晶粒。晶粒与晶粒之间相互接

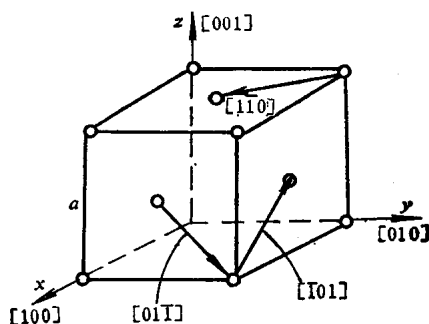


图1-7 面心立方晶体的晶向指数

触的界面称为晶界。这就是说，金属的显微组织，是由许多尺寸很小、方位不同的晶粒组成，它们称为多晶体。这是金属实际晶体结构的特点。

2. 不完整晶体结构类型

不完整结构对晶体中发生的许多变化过程以及对性能都有重大的影响。不完整结构有三类，即点缺陷、线缺陷和面缺陷。

(1) 点缺陷 指晶体内的很小缺陷，最基本形式为晶格空位和脱位原子，这是由原子的热运动而形成的。在实际晶体结构中，原子（或离子）并不是静止的，而是以晶格结点为中心而振动，某瞬间，个别原子在振动过程中获得足够大能量后，便离开原来的位置，跑到晶格的间隙中成为脱位原子，原来的位置便成为空位（见图1-8）。

(2) 线缺陷 是指在晶体中呈线性分布的缺陷，这种缺陷的具体形式是位错。所谓位错，是指晶体中某处有一列

或若干原子发生了有规律的错排现象。图 1-9 a 示出晶体 E 层晶面的上下两层晶面原子排列数目不相等，AB 排的原子排面在 E 层晶面上中断了。

就好像沿某个晶面有一个额外的原子平面 ABCD 象刀刃似的插入晶体中，但又没有插到底 (图 1-9 b)，这就是晶粒内部原子排列发生差错出现了位错，BD 叫位错线，其周围原子发生畸变。

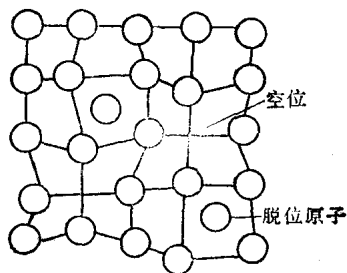


图 1-8 点缺陷示意图

(3) 面缺陷 是指晶体中呈面状分布的缺陷。如晶界，它的原子排列与晶粒内部不同，且又受相邻晶粒不同位向的影响，所以晶界处的原子

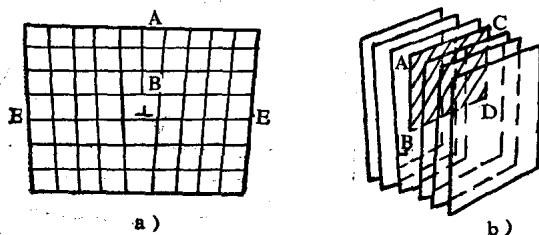


图 1-9 线缺陷示意图

排列无规则 (图 1-10)。

3. 金属的同素异晶转变

每种金属的晶格都有一定的类型，但某些金属在不同温度下却具有不同类型的晶格，如铁在 1394℃ 前为体心立方晶格 (δ -Fe)，以后为面心立方晶格 (γ -Fe)，到 912℃ 时，又转变为体心立方晶格 (α -Fe)。这就称金属的同素异晶转变 (见

图1-11)。金属在固态下的转变，除同素异构转变外，还有磁转变，在这种转变过程中，晶格类型不发生变化。

二、合金的特征和结构

构

(一) 合金的基本概念

念

1. 合金

合金是由两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素所组成。它具有金属的一些通性，但也具有它独特的性能，因而称为合金。

2. 基本概念

(1) 组元 构成合金的独立的、最基本的物质称组元。

(2) 合金系 由两种或两种以上组元，在不同浓度下构成一系列合金，称合金系。

(3) 相 在合金中具有同一化学成分、相同的结晶结构和性能，并以界面互相分开的各个均匀的组成部分叫相。

(二) 合金的状态图

合金的状态图又称相图或平衡图，表示在平衡条件下合

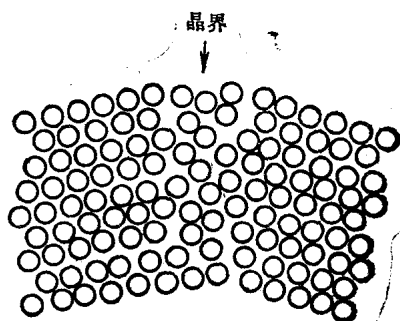


图1-10 面缺陷示意图

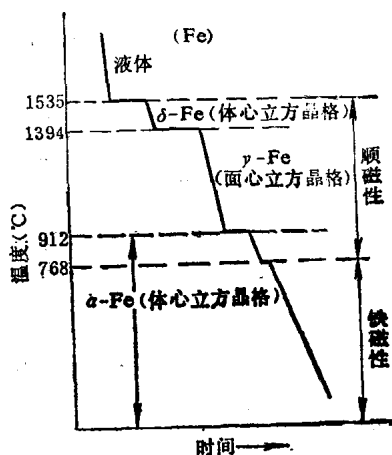


图1-11 铁的冷却曲线

金的组成相与温度及成分之间的关系。利用状态图可以知道不同成分的合金在不同温度下有哪些相，它们的相对含量、相成分及温度改变时，可能发生的变化。

状态图是很重要的，它是制定某合金生产工艺的依据，也是研制新合金的基础。因此，要想了解某合金，首先必须了解该合金的状态图。

(三) 合金固溶体

所谓固溶体与溶液的含意很相似，由一种组元在固态下溶解于另一组元的晶格中，形成均匀的固相，保持某一组元的晶格。这类相称固溶体。在固溶体中，把基础元素称溶剂，把溶入的元素称溶质（或第二元素）。第二种元素对基础元素来说有以下三种情况：①两种元素的原子几乎没有差别；②两种不同的原子互相吸引；③两种原子互相排斥。当两种元素的原子几乎没有差别时，在点阵中的结点上为基础元素还是第二种元素完全是任意的，这时，两种原子将完全均匀地混合起来，形成无序固溶体如图1-12 a所示。若相异原子之间的吸引超过了

同种原子之间的吸引，那么就会出现一种趋势：各个原子尽量以相异原子为近邻。随着这个因素以及热运动干扰的因素的强弱不同，所得到的合金相在结构上将在一个相应范围内变化，从而形成相异原子在点阵中呈现有规则

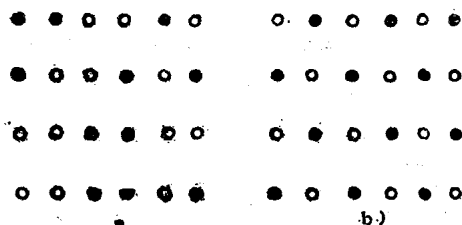


图1-12 固溶体中溶质原子的分布

a) 无序固溶体 b) 有序固溶体

●—溶质元素原子 ○—溶剂元素原子

一个相应范围内变化，从而形成相异原子在点阵中呈现有规则

的间隔排列，称为有序固溶体（图1-12 b）。

（四）合金的有序化

从上节的介绍可知，有些合金的原子排列总是趋于相异原子在点阵中呈现有规则的间隔排列，即形成有序固溶体，而这种趋于规则排列的现象称为合金的有序化。所形成的点阵称为超结构。

合金有序化的程度用长程有序和短程有序来表示。所谓长程有序，即从合金整体来看，原子排列都是有规则的。如把合金任意分成若干小区域，则每一区域与任何另一区域内的原子排列情况完全相同，但是每一小区域内部每个原子的最近邻不一定是相异的原子。而短程有序则只注意于每个原子的最近邻必须是相异原子，但是每一小块合金中，原子排列情况和另一块的排列情况就可能不一样。

当合金从无序转到有序或反之，是一个突变的过程，存在着转变发生的临界温度 T_d ，被称为有序-无序转变点。合金经过转变点 T_d 时，它的一些物理性质，如比热、电阻率、磁性等等都将发生突变。

三、合金的塑性变形和再结晶

（一）合金的塑性变形

金属或合金在外力作用下所发生形状或尺寸的改变称为变形或形变。变形一般可分三个阶段，即弹性变形阶段，塑性变形阶段，断裂阶段。在弹性变形阶段，变形是可以恢复的，外力消除后变形即消失。如果外力继续加大，超过了金属或合金的弹性极限，则变形进入塑性阶段，外力消除时，有一部分变形被保留下来，这部分变形即为塑性变形。外力再继续增加，则塑性变形量也不断增加，最后发生断裂。在这三个阶段中，对金属或合金的组织及性能影响最大的是塑

性变形。因此,了解和掌握金属或合金的塑性变形十分重要。

1. 单晶体的塑性变形

为了便于讨论实际金属或合金的塑性变形过程,首先要了解单晶体的塑性变形过程。单晶体的塑性变形方式为滑移。

所谓滑移,是指当外力超过其单晶体的弹性极限后,晶体中就会产生层片之间的相对位移。这种位移在外力去除后是不能恢复的,大量的层片间滑动的积累,就构成宏观的塑性变形。滑移通常沿着一定的晶面发生,这种晶面叫滑移面。滑移还沿着一定的晶向进行,这方向叫滑移方向。滑移面和滑移方向是与晶体结构类型有关的。通常滑移面总是原子排列最密集的晶面,因该晶面上的原子间结合力最强,但面与面间距离却最大,所以面间的结合力最弱,当在外力作用下这类面间极容易进行相对位移。将一个滑移面和此面上的一个滑移方向结合起来,称为一个滑移系。每一个滑移系表示晶体在产生滑移时所处的空间位向。当晶体中的滑移系越多,则供给滑移的空间位向就越多,该晶体的塑性变形越容易。

常见的体心立方、面心立方和密排六方晶格的滑移系见图1-13。

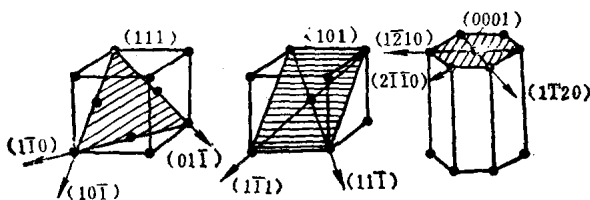


图1-13 三类晶格滑移示意图

a) 体心立方 b) 面心立方 c) 密排六方

单晶体的塑性变形过程: 当它受到外力作用并达到一定