



NANJING  
UNIVERSITY  
OF AERONAUTICS  
AND ASTRONAUTICS

# 金属工艺学

第一分册 金属学

509教研室编

南京航空学院

## 编写说明

本教材大纲是在下述基础上制定的：参照 1980 年金属工艺学教材编审小组制定的《金属工艺学教学大纲(草案)》，考虑了与我院金工实习教材内容的衔接，并征求了各系的意见。所编写的教材体系和内容，基本上能适应我院各专业类对设置《金属工艺学》课程的要求。

本书共分四个分册。

第一分册《金属学》。内容包括：金属的结构与性能、热处理、常用工程材料以及金属表面的保护方法、粉末冶金和金属基复合材料。

第二分册《铸造、锻压和焊接》。介绍铸、锻压、焊各种加工方法的原理、特点及其应用，有色金属的成型特点以及塑料的一般成型方法。内容侧重于航空工业有关的工艺和技术。

第三分册《切削加工工艺》。内容分为两部分：一、切削加工技术基础，其中包括基本类型表面、型面、光整加工的各种工艺方法、成组技术，数控加工、物理-化学加工及结构工艺性。二、切削加工工艺原理，其中包括工艺过程概念、精度及表面质量分析、基准及尺寸换算、工艺过程设计。

第四分册《互换性原理》。主要介绍光滑圆柱体的公差与配合（1979年制定）、形状和位置公差（1980年制定）以及表面光洁度的基本原理及其应用。

全书按最高限 80 学时左右编写，一、二、三、四分册分别为 16 学时、20 学时、28 学时及 16 学时。各专业类根据教学计划确定选用其中 2~3 的个分册，均以 50 学时安排教学。讲授的内容按不同专业类的具体要求有所侧重。

参加本书编写的有陈一心、阮宝华、石崇刚、林森林、夏金昌、周根然、丁红昇等同志。朱凤英同志协助了本书部分插图的绘制工作。

南京航空学院

航空制造工程系 509 教研室

1982 年 10 月

# 金属学目录

## 1. 金属的晶体结构及其结晶过程

1.1	金属的晶体结构	(1)
1.1.1	晶体概念	(1)
1.1.1.1	晶体与非晶体	(1)
1.1.1.2	金属的金属键结合	(1)
1.1.1.3	晶格、晶胞和晶格常数	(2)
1.1.2	金属的常见晶格类型	(2)
1.1.3	晶面与晶向	(4)
1.1.4	金属的实际晶体结构及其不完整性	(4)
1.1.4.1	多晶体	(4)
1.1.4.2	金属晶体的内部缺陷	(5)
1.2	金属的结晶过程	(7)
1.2.1	金属结晶的一般过程	(7)
1.2.2	金属结晶的过冷现象	(7)
1.2.3	金属结晶晶粒大小及其影响因素	(8)
1.2.4	同素异构转变	(9)
1.2.5	金属的组织结构分析	(10)

## 2. 金属性质

2.1	金属的物理性能	(11)
2.1.1	电学性质	(11)
2.1.2	磁性	(12)
2.1.3	热学性质	(13)
2.2	金属的化学性能	(14)
2.3	金属的机械性能	(15)
2.3.1	弹性	(16)
2.3.2	塑性	(17)
2.3.3	强度	(17)
2.3.4	硬度	(19)
2.3.5	冲击韧性	(20)
2.3.6	断裂韧性	(20)

## 3. 合金的结构与性能

3.1	合金的结构与性能特征	(21)
3.1.1	固溶体	(21)
3.1.2	金属化合物	(22)

3.2	合金的状态与组织的概念	(23)
3.3	固溶体合金	(24)
3.4	共晶合金	(27)
3.5	铁—碳合金状态图及其分析	(32)
3.5.1	铁—碳合金状态图	(32)
3.5.2	铁—碳合金状态图分析	(32)
3.5.3	典型铁—碳合金的结晶过程	(34)
4.	金属的塑性变形与再结晶	(38)
4.1	金属的塑性变形	(38)
4.1.1	单晶体的塑性变形	(38)
4.1.2	多晶体的塑性变形	(41)
4.1.3	合金的塑性变形	(42)
4.2	金属在塑性变形中的组织、性能变化	(42)
4.3	回恢、再结晶和晶粒长大	(47)
5.	钢的热处理与表面保护	(49)
5.1	钢的热处理原理	(49)
5.1.1	钢在加热时的组织转变	(50)
5.1.2	钢在冷却时的组织转变	(50)
5.1.2.1	奥氏体的等温转变	(51)
5.1.2.2	奥氏体连续冷却时的转变	(53)
5.1.3	回火转变	(55)
5.2	热处理工艺	(58)
5.3	钢的表面保护	(61)
6.	工程金属材料	(64)
6.1	碳钢	(64)
6.2	铸铁	(65)
6.3	合金钢	(58)
6.3.1	合金元素的作用	(68)
6.3.2	合金钢的分类、编号与应用	(69)
6.4	有色金属及其合金	(71)
6.4.1	铜及其合金	(71)
6.4.1	铝及其合金	(72)
6.4.3	镁及其合金	(72)
6.4.4	钛及其合金	(73)
6.5	粉末冶金材料	(73)
6.6	复合材料	(73)

金属材料是工业上应用最广的材料。金属的晶体结构使金属具有良好的机械性能、物理性能与化学性能。

金属学是研究金属的晶体结构与其结晶过程、金属成分、组织结构与性能之间的关系。掌握了这些知识，才能正确的选用金属材料及其加工方法，为社会主义建设服务。

## 1 金属的晶体结构及其结晶过程

### 1.1 金属的晶体结构

#### 1.1.1 晶体概念

##### 1.1.1.1 晶体与非晶体

一切固态物质按其内部结构可分为晶体和非晶体。晶体的原子是按一定次序在空间作有规则的排列，它具有固定的熔点，恒温下结晶，如金属。非晶体的原子排列则是不规则的，无明显的熔点，如玻璃。

##### 1.1.1.2 金属的金属键结合

金属与一切物质一样都是由原子组成的。金属原子的构造特点是围绕原子核运动的最外层电子数很少，绝大多数金属原子最外层只有1~2个价电子，这些价电子与原子核的结合较弱，很容易摆脱原子核的束缚。当金属原子结合成晶体时，它们将失去价电子而成为正离子。正离子按一定的几何规则排列，并且在各自的一定位置上振动。脱离了原子核束缚的价电子成为自由电子，在各正离子之间不停地作高速运动。这些自由电子属于整个金属所有，形成了所谓的“电子云”，亦称“电子气”。金属原子的这种结合方式，通常称为金属键结合，如图1—1。

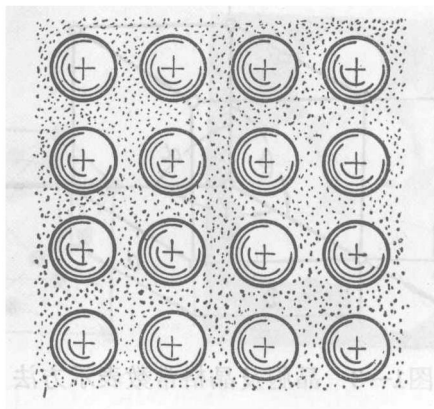


图1—1 金属键示意图

### 1.1.1.3 晶格、晶胞和晶格常数

金属的晶体结构就是指晶体的原子排列方式。通常将一个不停地热振动的金属原子视作一个刚性小球固定在平衡位置上，图1—2。一种晶体的原子有其一定的排列方式。用一些假想的几何线条在几个方向上把各个原子的中心连接起来，并把一个原子视为一个几何质点，这样，就抽象地构成了一个几何空间格架。原子处于几何线条的交点，即空间格架的结点上。这种描述晶体原子排列规律的空间格架简称为晶格。

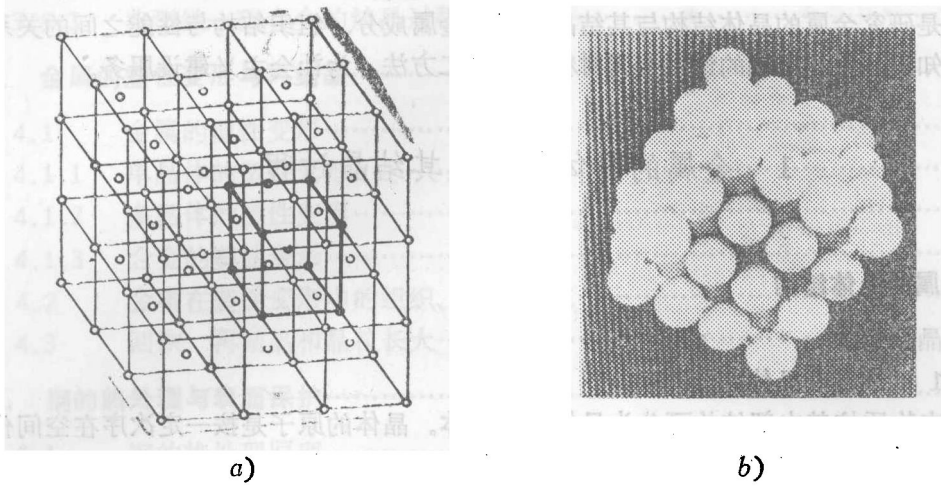


图1—2  $\alpha$ -Fe晶体中铁原子排列示意图

a 晶格

b 原子堆砌模型

为了研究方便，在晶格中选取一个能代表晶体原子排列规律的最小几何单位，把它称作晶胞，如图1—3。为了表示晶胞的形状与大小，晶格的三条棱边长分别用  $a$ 、 $b$ 、 $c$  表示，棱轴间的夹角用  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  表示，如图1—3所示。这些参数称为晶格常数。棱边长度以埃为度量单位， $1\text{\AA} = 10^{-8}\text{cm}$ 。

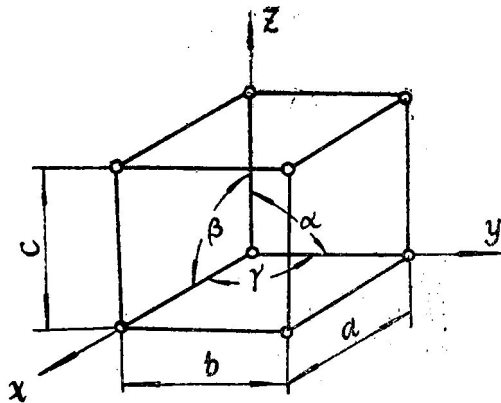


图1—3 晶胞及晶格常数表示方法

### 1.1.2 金属的常见晶格类型

金属的种类虽多，但从元素周期表中已测定金属的晶体结构看，绝大多数属于下列三种

类型，详见表 1。

表 1 金属的晶格类型

晶 格 类 型	金	属
体心立方(bcc)	$\alpha$ -Fe、 $\delta$ -Fe、Cr、Mo、V、 $\beta$ -Ti、Nb、 $\beta$ -Zr、Ta。	
面心立方(fcc)	$\gamma$ -Fe、Al、Cu、Ni、Au、Ag、Pt、 $\beta$ -Co、Pa、Ca	
密排六方(cph)	Mg、Zn、Cd、 $\alpha$ -Ti、 $\alpha$ -Co、 $\alpha$ -Zr、Be。	

体心立方晶格 体心立方晶格的晶胞如图1—4。在晶胞的八个角上各有一个原子，晶胞的中心有一个原子。

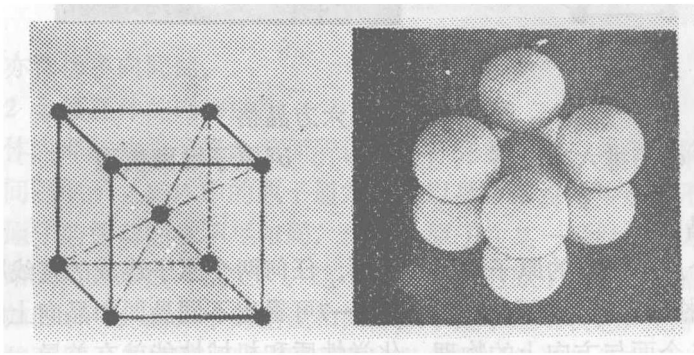


图1—4 体心立方晶格

a 体心立方晶格      b 原子堆砌模型

面心立方晶格 面心立方晶格的晶胞如图 1—5。除在晶胞的八个角上各有一个原子外，在立方体六个面的中心还各有一个原子。

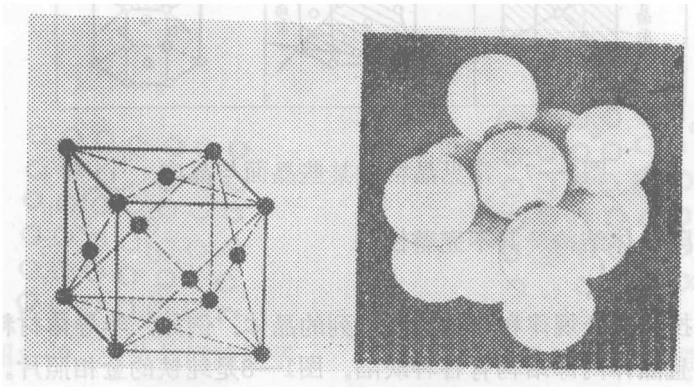


图1—5 面心立方晶格

a 面心立方晶格      b 原子堆砌模型

**密排六方晶格** 密排六方晶格的晶胞如图1—6。在晶胞六方柱体十二个角和上、下六角形的面中心各有一个原子。晶胞的中间还另有三个原子。

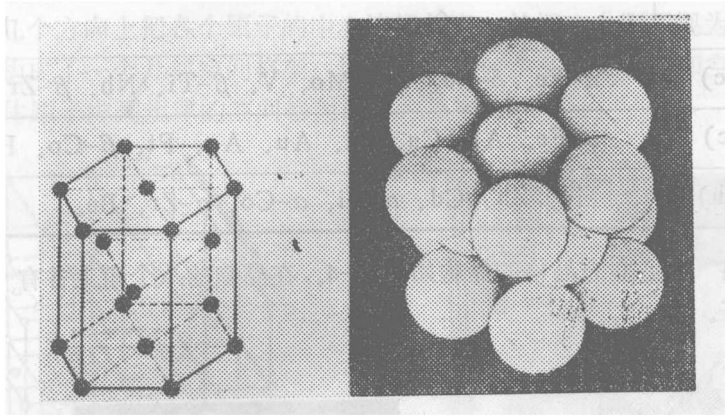


图1—6 密排六方晶格  
 a 密排六方晶格                      b 原子堆砌模型

### 1.1.3 晶面与晶向

晶体中任何三个原子组成的原子平面叫晶面。任何两个原子连成的直线所指的方向叫晶向。图1—7为常见晶格的某些晶面和晶向。从图1—7可看出不同晶面和晶向上的原子排列密度是不同的。因而在各个面与方向上的物理、化学性质和机械性能就有差异。例如， $\alpha$ -Fe 单晶体的弹性模数  $E$ ，在立方体的对角线方向是  $290,000\text{N/mm}^2$ ，而沿棱边方向只有  $135,000\text{N/mm}^2$ ，晶体的这种特性称为各向异性。它是单晶体的特有性质。

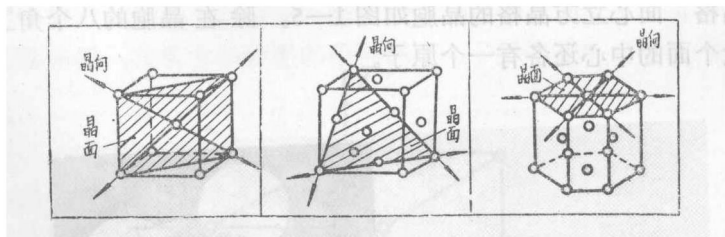


图1—7 常见晶格的某些晶面与晶向

### 1.1.4 金属的实际晶体结构及其不完整性

#### 1.1.4.1 多晶体

单晶体是指原子按照一个规律和一致方向排列的晶体。例如，半导体材料—单晶硅。普通金属是多晶体，并且晶体内部结构有各种缺陷。图1—8是纯铁的金相照片。金相显微镜下观察到的蜂窝状颗粒称为晶粒。金属内部的一颗晶粒相当于一个单晶体。金属中各个晶粒的原子排列规律虽然相同，但是各个晶粒的原子排列位向各不相同。这样，各个晶粒的各向异性现象在各晶粒之间便互相抵消与补充，所以实际金属显示出各向同性。为了区别非晶体物



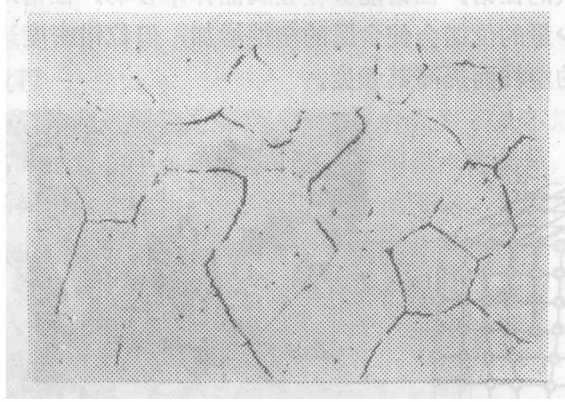


图1—8 纯铁的显微组织 250×

质的各向同性，亦称伪各向同性。

#### 1.1.4.2 金属晶体的内部缺陷

实际金属晶体内部结构并不是象前面所说的那样完整排列。常见缺陷有以下几种：

a. 空位与间隙原子 晶体中的原子通常是在以晶格结点为中心作不停的热振动。在一定温度下，各个原子的振动能量不尽相同，当某个原子在某一瞬时具有足够高的振动能量，它就可能脱离原结点位置形成“空位”。这个脱离结点的原子可能处于晶格的间隙中，从而形成间隙原子，如图1—9。晶体中的空位和间隙原子处于运动状态，它们的运动就使原子可能从某个位置转移到另一个位置，形成原子的扩散作用。化学热处理就是基于这种原子扩散作用，将另一元素的原子渗到金属中。

b. 杂质原子 事实上，即使是超高纯度的金属晶体也不可避免地存在杂质，杂质原子有可能占据晶格结点，称之为置换原子。杂质原子也可能处于晶体间隙中，称之为间隙原子，如图1—10。

由于有空位、间隙以及杂质原子的大小、性质与晶体本身的原子不同，都将导致晶格变形，从而引起金属晶体的性能变化。

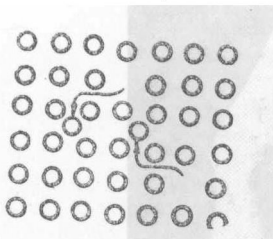


图1—9 空位与间隙原子

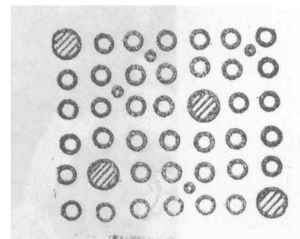


图1—10 杂质原子

c. 位错 晶体中某处有一行或几行原子错排了位置而形成的一种缺陷，称为位错。位错的形式有刃型位错，螺旋型位错，混合型位错等多种。图1—11a是最简单的刃型位错的模

型。图1—11b为纯铁的位错。位错能够在金属晶体中移动。位错对金属的机械性能与塑性变形有重要的影响。少量的位错会使金属的塑性增加，但位错密度达到一定程度后，位错继续增加又会降低金属的塑性而提高其强度。

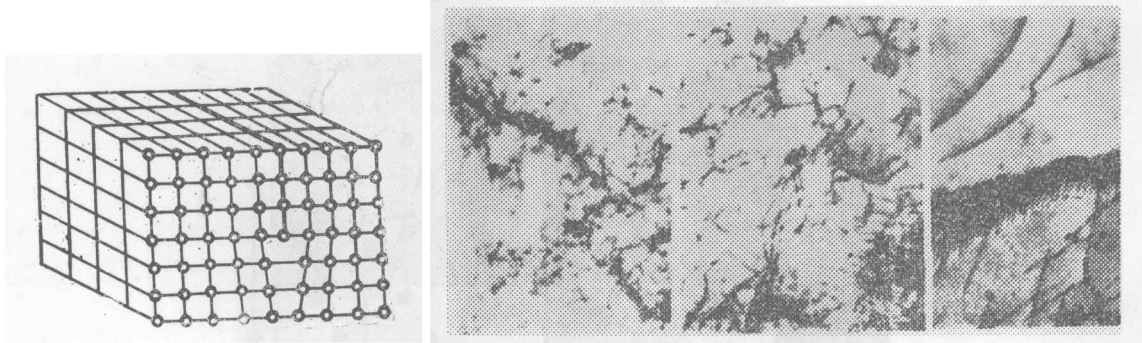


图1—11 位 错

a 刃型位错

b 冷变形纯铁中位错

d. 晶界与亚晶界 晶界是指晶粒与晶粒的交界处。由于相邻晶粒的原子排列位向不同，晶界处的原子为了适应相邻晶粒的不同位向，就处于一种不规则的过渡状态，如图1—12。晶界原子处于不稳定状态，晶界比晶粒内部具有较高的能量，因而具有一些不同于晶粒内部的特性，对金属的物理、化学性能和机械性能有很大的影响。

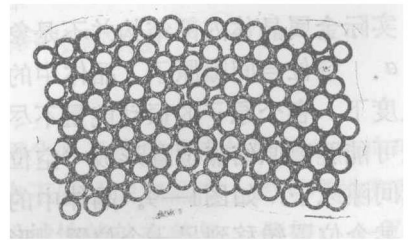


图1—12 晶界

电镜与X射线分析证明，实际金属的晶粒内部，晶格位向也不是完全一致的，而是由位向差很小的，尺寸也很小的许多小晶块组成，这些小晶块称为亚晶粒，亦称亚结构或嵌镶块。亚晶粒之间的边界叫亚晶界，它与晶界有相似的特性。图1—13为电镜拍摄的亚晶粒与亚晶界，图中D为亚晶粒。



图1—13 亚晶粒与亚晶界的透射电子显微镜照片 25,000X

## 1.2 金属的结晶过程

### 1.2.1 金属结晶一般过程

金属从液态转变为固态晶体的过程称为结晶。也就是金属原子从不规则排列过渡到规则排列的过程。液态金属结晶时，总是先在金属液中形成一些微小的晶体，以其为核心而不断长大。这种作为结晶核心的微小晶体称为晶核。晶核长大的同时、金属液中继续产生新的晶核并长大，直到结晶完毕为止。晶核可以是金属本身的原子称为自发晶核。也可能是外来的其它物质，称非自发晶核。金属结晶的过程就是不断地形成晶核与晶核长大的过程，如图1—14。

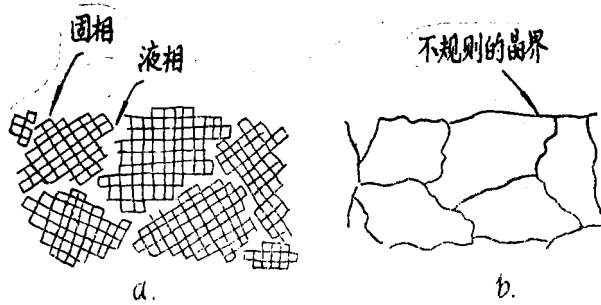


图1—14 结晶过程 a)晶体生长, b)晶粒

### 1.2.2 金属结晶的过冷现象

图1—15是用热分析法测定纯金属结晶时的冷却曲线。金属液冷却时，起初温度均匀下降，当冷却到 $T_s$ 时，液态金属开始结晶，温度不再下降，曲线上出现一段水平线 $ab$ 。这是因为金属在结晶过程放出的结晶潜热正好与散失到周围环境中的热量互相平衡。从 $\tau_a$ 时开始结晶，到 $\tau_b$ 时结晶完毕，金属液全部变成固态晶体。随后，温度又继续下降。 $T_s$ 称为平衡结晶温度，亦称理论结晶温度。然而，实际上金属液结晶时冷却速度较快，金属液冷却到 $T_s$ 温度时并没有开始结晶，而要冷却到低于 $T_s$ 的某一温度时才开始结晶。并出现水平线段，结晶完毕后温度再继续下降。这种现象称为过冷现象。 $T_s$ 和 $T_n$ 之间的温度差 $\Delta T$ 叫做过冷度。过冷度的大小与金属的种类、金属液的纯度以及冷却速度有关。冷却速度越大，过冷度越大。过冷是金属结晶的必要条件。

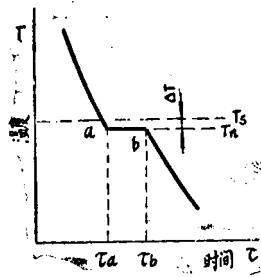


图1—15 纯金属的冷却曲线

### 1.2.3 金属结晶晶粒大小及其影响因素

金属结晶晶粒大小与液态金属结晶时单位体积中所形成的晶核数目和晶核长大的速度有关。实验证明结晶晶粒大小主要取决于过冷度的大小。过冷度愈大，结晶时形成的晶核数目愈多、晶粒愈细。反之，过冷度愈小，结晶时晶核数愈少，则晶粒愈粗。图 1—16 表明过冷度对形核率  $N$  和晶核生长线速率  $G$  的影响。

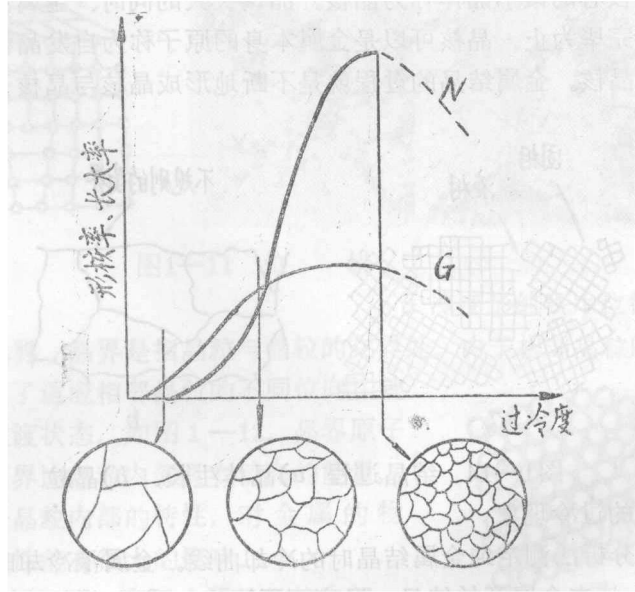


图 1—16 过冷度对形核率  $N$  和晶核生长线速率  $G$  的影响

金属结晶情况还与散热的快慢及方向有关。铸锭结晶是从模壁开始。由于模壁散热快，过冷度大，形成了大量的晶核。又因模壁不平，相邻晶核生长时，就会很快彼此接触而不能继续长大，形成细晶粒层 1。其中有一部分晶粒，因为位向有利、继续向内，朝散热相反的方向长大，形成垂直于模壁的柱状晶粒层 2。在铸锭中心，由于散热很慢，过冷度小，形成的晶核较少，晶核可以自由地向各个方向长大，结果形成了粗大的等轴晶粒层 3，如图 1—17。铸锭的柱状晶实物金相照片见图 1—18。

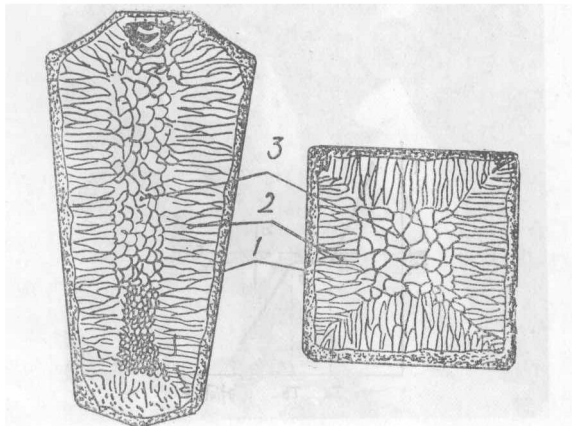


图 1—17 铸锭结晶构造示意图 1, 细晶层 2, 柱状晶层 3, 等轴晶层

除了提高冷却速度细化晶粒外，生产上还采用变质处理。即在金属液中加入某些物质，它在金属液中起非自发晶核的作用。以细化晶粒和改变金属的组织。这种加入物称为变质剂，亦称孕育剂。例如在铁水中加入少量镁。在 Al-Si 合金中加入少量钠，均可起到这种作用。此外，采用机械振动、超声波振动或电磁搅拌等措施，也可细化晶粒。

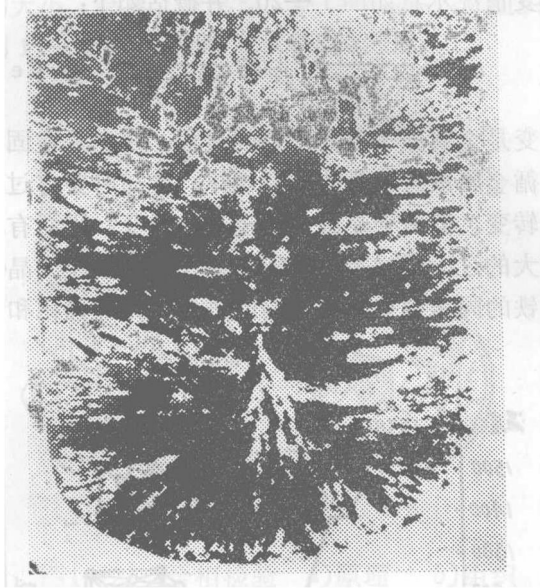


图 1—18 铸锭中粗大的柱状晶

金属的性能与结晶晶粒大小有密切关系。在常温下，一般细晶粒钢的抗拉强度和韧性都较好。所以生产中控制晶粒大小有重要的实际意义。

#### 1.2.4 同素异构转变

有些金属如 Fe、Co、Ti 等，在固态均具有多种晶体结构，即金属在固态下随温度变化发生晶格类型转变，叫同素异构转变。将一段高纯度的铁丝( $\alpha$ -Fe)缓慢加热与缓慢冷却，测量它的长度变化，就可以得到图 1—19 的结果。从室温加热到 912 $^{\circ}$ C，铁丝一直均匀地伸长。到 912 $^{\circ}$ C 时，铁丝突然收缩。待收缩完了，又随温度升高而均匀地伸长。到约 1394 $^{\circ}$ C，

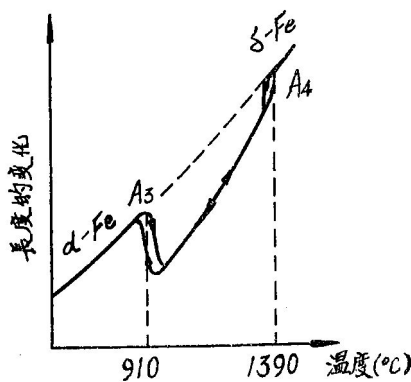
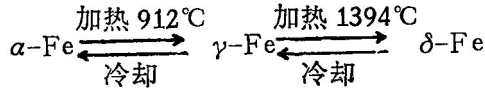


图 1—19 纯铁缓慢加热与冷却时长度的变化

铁丝又急剧地伸长膨胀。冷却时，则相反。即冷到 1394℃ 时，铁丝急剧地收缩，而在 912℃ 以下急剧地伸长。经 X 射线分析知道，纯铁在 912℃ 以下是体心立方晶格，称  $\alpha$ -Fe，912~1394℃ 之间是面心立方晶格，称  $\gamma$ -Fe。超过 1394℃ 直到熔点，也是体心立方晶格，称  $\delta$ -Fe。由于  $\gamma$ -Fe 的比容比  $\alpha$ -Fe 小，因而铁丝在缓慢加热与缓冷时出现上述现象。

纯铁的同素异构转变情况示意如图 1—20。并概括如下：



金属的同素异构转变是金属原子重新排列的过程。由于是在固态下结晶，故又称重结晶。同素异构转变也遵循金属液态结晶的一般规律：冷却时要有过冷度，是生核与核长大过程，也是在恒温下进行转变。但因为是固态下进行的转变，因而有不同于液态结晶的特点。同素异构转变时，有较大的过冷度，新的晶核往往在原来晶粒的晶界或某些特定的晶面上形成，晶体不呈树枝状。铁的同素异构转变是钢能进行热处理强化和细化晶粒的基本依据，具有重大的意义。

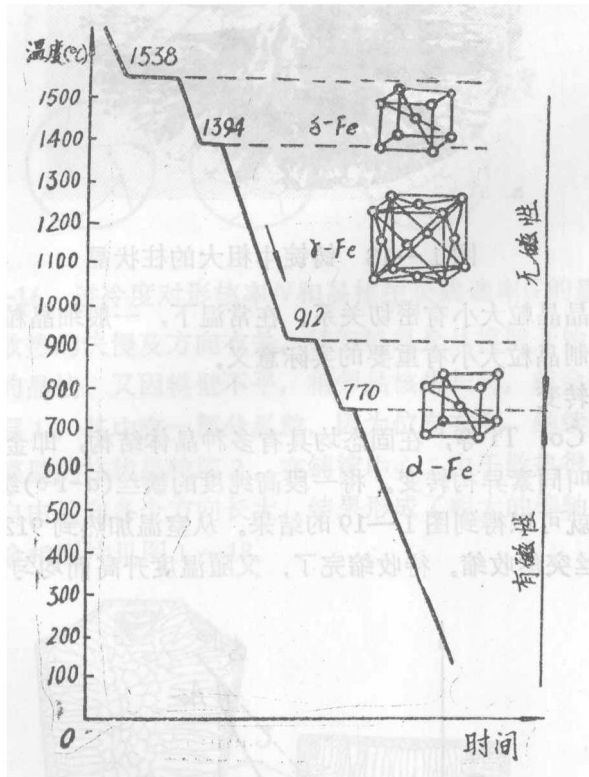


图1—20 铁的同素异构转变

### 1.2.5 金属的组织结构分析

观察金属的内部组织是研究金属的重要手段之一。人们最早以肉眼观察，现在已用精密仪器来分析金属的组织与结构了。常用方法如下：

**断口分析** 是最古老简易而广泛应用的方法。它是用肉眼或低倍放大镜来观察金属断口，研究金属晶粒的粗细、断裂性质或缺陷等。现在已用扫描电子显微镜来研究金属断口、寻

找断裂源、裂纹的发生与扩展，从微观分析断裂的原因。

**宏观分析** 是将金属截面磨光、抛光再经化学浸蚀、用肉眼或低倍放大镜来分析金属的内部情况，诸如气孔、裂纹、偏析和缩孔等缺陷。或采用印痕法来观察金属的夹杂物等。

**显微分析** 是指用专门技术将金属制成显微分析试样，籍助于光学显微镜、电子显微镜等仪器来研究金属晶粒的大小、晶界、亚晶界、断口形貌及内部组织等。图 1—21 为光学显微镜下观察金属组织。图 1—13 为金属的亚结构电镜照片。

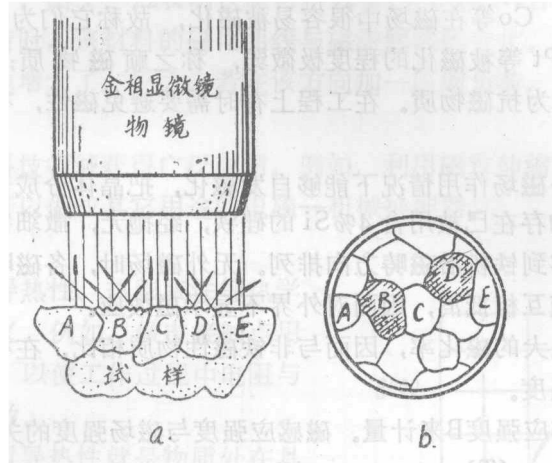


图1—21 金相检验 a)原理 b)组织

**X射线分析** 是一种间接地观测原子范围内金属结构的重要手段。它能测定金属的晶格类型、晶格常数等。X射线是一门专门学科，还可以用于无损探伤，检测金属中的裂纹、孔洞等缺陷。

此外，还有物理性能分析法、电子衍射法等。

## 2 金属性质

金属内部结构组织及特定的环境条件，决定各种金属有不同的物理、化学性能，机械性能与工艺性能。只有掌握金属的性能，才能根据机件的性能要求恰当而经济地选材，合理地确定其加工方法。

### 2.1 金属的物理性能

物理性能包括导电性、导热性，热膨胀性、磁性、比重与熔点等等。

#### 2.1.1 电学性质

金属的电学性质包括导电性、电阻、温差电偶中的热电效应，原电池中及金属腐蚀过程的电化学反应等。本节仅简要介绍金属的导电性与电阻。

金属具有良好的导电性与其原子结构以及金属原子以金属键结合有关。金属晶体中存在与原子核结合微弱的自由电子，在没有电场作用时，自由电子在各方向上杂乱地运动，因而金属中不产生宏观的电流现象。但当金属受到电场作用时，自由电子就沿着电场的正极方向加速，产生定向的运动，形成电流。所以金属的导电性好。

既然金属是自由电子直接参与导电，那末不难设想电子在金属晶体中的定向运动会受到离子的阻碍，故金属具有一定的电阻。且随温度增加，随杂质与合金元素增加，电阻增大。

工程上用电阻率  $\rho$  表示导电性，单位  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ 。电阻率  $\rho$  与电阻的关系为  $R = \rho \frac{L}{S}$  ( $\Omega$ )， $L$  为长度  $\text{m}$ ， $S$  为截面积  $\text{mm}^2$ 。

### 2.1.2 磁性。

人们发现 Fe、Ni、Co 等在磁场中很容易被磁化，故称它们为铁磁性物质；Al、Ti、Cr、Mo、W、Mn、Pt 等被磁化的程度极微弱，称之顺磁物质；Cu、Ag、Au、Zn、Cd 等则不被磁化，称为抗磁物质。在工程上有时需要避免磁性，有时则需用利磁性材料，尤其是铁磁物质。

铁磁物质在没有外磁场作用情况下能够自发磁化，把晶体分成许多区域，这种自发磁化区域称为磁畴。磁畴的存在已被用含 4% Si 的硅铁，经抛光，撒细铁粉显示的实验证实了。在显微镜下就可以观察到铁粉沿磁畴方向排列。无外磁场时，各磁畴磁化方向的排列是不规则的，它们产生的磁矩互相抵消，因而对外界不显示磁效应。

铁磁性金属具有很大的磁化率，因而与非铁磁性物质相比，在相同的磁场强度时，铁磁物质就具有高的磁化强度。

在工程上常用磁感应强度  $B$  来计量。磁感应强度与磁场强度的关系为

$$B = \mu H \quad (\text{T})$$

式中  $H$  磁场强度，单位  $\text{A}/\text{m}$

#### $\mu$ 导磁率

$\mu$  表征磁性材料磁化的难易程度。 $\mu$  值与外磁场的大小有关，所以有起始导磁率  $\mu_0$  和最大导磁率  $\mu_{\text{max}}$ 。 $\mu_0$  相当于材料在弱磁场 ( $H \rightarrow 0$ ) 中的导磁率，它对在弱磁场中工作的导磁材料具有重要的意义。同样，在中等或较强磁场中工作的导磁材料，则希望具有较高的  $\mu_{\text{max}}$ ，以便在一定的磁场中获得大的磁感应强度。

磁滞回线表征铁磁物质在变化的磁场中所显示出来的磁化行为。从磁滞回线可以得到材料的  $B_s$ 、 $B_r$ 、 $B_c$  等重要磁特性。 $B_s$  表征材料所能达到的最大磁感应。通常希望磁性材料有较高的  $B_s$  值。 $B_r$  表征材料在外磁场完全消失时所保留的磁感应。对于硬磁材料来说，高的  $B_r$  就具有较高的磁能。 $H_c$  表征材料完全消除剩余磁感应所需要外加的反向磁场的大小。亦即退磁或磁化的难易程度。软磁材料如低频用的纯铁、硅钢、坡莫合金及高频用的铁氧体、晶体管收音机中频变压器的铁芯等要求  $H_c$  愈小愈好。而硬磁材料如碳钢、钨钢、铬钢和铝—镍—钴永磁合金作永久磁铁用于磁电式测量仪表，则要求  $H_c$  愈大愈好。材料的磁滞回线面积愈大，它在交变磁场中的磁滞损耗愈大，反之则小。

对软磁材料来说，它在交变磁场中反复磁化时，磁滞损耗就变为热量。这种情况就要求磁滞回线的面积尽可能小，如用硅钢片作变压器铁芯。而在另一些场合，要求有尽可能大的磁能积  $(BH)_{\text{max}}$ ，这就要求用具有较大磁滞回线面积的硬磁材料，如电磁指示仪表的磁极，就用铝镍钴合金制造。

磁致伸缩 铁磁物质磁化时，伴随着发生体积尺寸的改变现象，称为磁致伸缩。铁在磁化方向上要发生尺寸伸长，同时在垂直于磁化方向上发生收缩。镍则相反。通常用磁致伸缩系数  $\lambda$  表示材料磁致伸缩的特性。



$$\lambda = dl/l$$

式中  $l$  为材料的原始长度。

$dl$  为磁致伸缩引起的尺寸改变。

铁的  $\lambda > 0$ ，称铁为正磁致伸缩材料。而镍的  $\lambda < 0$ ，则称镍为负磁致伸缩材料。 $\lambda$  的绝对值较小，量级为  $10^{-6}$  cm。

既然铁磁物质的磁化会引起机械应变，即磁致伸缩。那么反过来，机械应力也必然影响磁化。这已为实验证明了。图 1—22 表明铁磁材料 92% Fe + 8% Ni 合金试样，在平行于磁场方向加足够大的拉伸负荷时，该材料的磁化曲线与磁滞回线的变化。可见在拉伸方向的磁化强度和磁感应强度明显地增大了。反之，若在该方向加一压缩负荷，则它的磁感应强度就要减小。

磁致伸缩现象已在科技领域获得广泛应用。例如，利用磁致伸缩原理制成的换能器，进行机械加工和焊接，也可以做成其它用途的电磁—机械换能器。

### 2.1.3 热学性质

金属材料的比热、导热性、热膨胀性等热学性质在工程中有重要意义。例如，做电接触点用的材料要求高的导热性，以使工作过程中电阻与电弧发生的热量迅速散发。

**金属的导热性** 所谓导热性就是物质处在具有温度差的条件下，通过物质内部传导热量的能力。以热传导率  $\lambda_T$  表示。 $\lambda_T$  的单位是  $w/(m \cdot ^\circ K)$ ，它与温度、热量之间的关系如下：

$$Q = \lambda_T (T_2 - T_1) A / l \quad w$$

式中  $Q$  为热量  $w$

$A$  为截面积  $m^2$

$l$  为长度  $m$

$T$  为  $^\circ K$

固体物质的导热率与物质的内部结构有关。金属除了原子振动传递热量以外，主要是通过自由电子传递热量。所以金属具有良好的导热性。这点是与导电性一致的。

影响金属导热性的主要因素是杂质与合金元素以及温度。随杂质或合金元素的增加，金属的热传导率降低。所以高合金钢的导热性差，应缓慢加热与冷却。金属的热传导率也随温度升高而降低，在接近熔点时急剧降低。

**金属的热膨胀性** 金属随温度改变所引起的尺寸伸长(或缩短)称为金属的热膨胀性。金属的热膨胀性用膨胀系数  $\alpha_T$  来评定。用平均线膨胀系数  $\bar{\alpha}_T$  来表示金属在某一温度范围内的热膨胀性能。

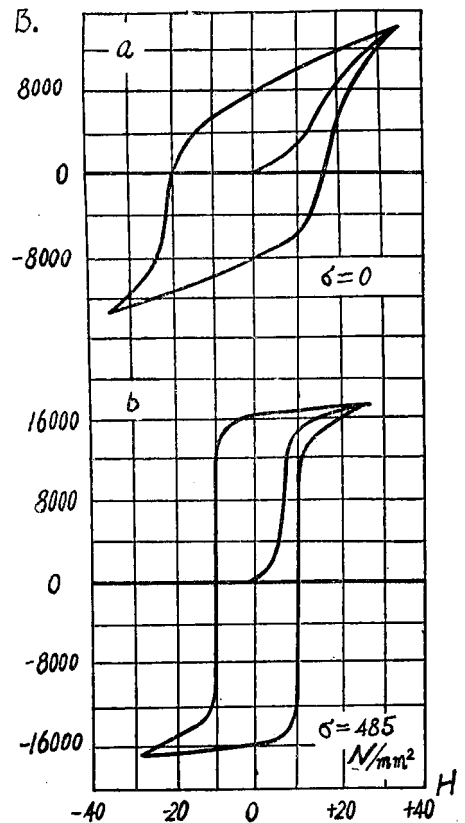


图 1—22 应力对磁化曲线与磁滞回线的影响