

第一章 材料中的原子排列

第一节 原子的结合方式

1 原子结构

2 原子结合键

(1) 离子键与离子晶体

原子结合：电子转移，结合力大，无方向性和饱和性；

离子晶体：硬度高，脆性大，熔点高、导电性差。如氧化物陶瓷。

(2) 共价键与原子晶体

原子结合：电子共用，结合力大，有方向性和饱和性；

原子晶体：强度高、硬度高（金刚石）、熔点高、脆性大、导电性差。如高分子材料。

(3) 金属键与金属晶体

原子结合：电子逸出共有，结合力较大，无方向性和饱和性；

金属晶体：导电性、导热性、延展性好，熔点较高。如金属。

金属键：依靠正离子与构成电子气的自由电子之间的静电引力而使诸原子结合到一起的方式。

(3) 分子键与分子晶体

原子结合：电子云偏移，结合力很小，无方向性和饱和性。

分子晶体：熔点低，硬度低。如高分子材料。

氢键：（离子结合） $X-H\cdots Y$ （氢键结合），有方向性，如 $O-H\cdots O$

(4) 混合键。如复合材料。

3 结合键分类

(1) 一次键（化学键）：金属键、共价键、离子键。

(2) 二次键（物理键）：分子键和氢键。

4 原子的排列方式

(1) 晶体：原子在三维空间内的周期性规则排列。长程有序，各向异性。

(2) 非晶体：不规则排列。长程无序，各向同性。

第二节 原子的规则排列

一 晶体学基础

1 空间点阵与晶体结构

(1) 空间点阵：由几何点做周期性的规则排列所形成的三维阵列。图 1-5

特征：a 原子的理想排列； b 有 14 种。

其中：

空间点阵中的点 - 阵点。它是纯粹的几何点，各点周围环境相同。

描述晶体中原子排列规律的空间格架称之为晶格。

空间点阵中最小的几何单元称之为晶胞。

(2) 晶体结构：原子、离子或原子团按照空间点阵的实际排列。

特征：a 可能存在局部缺陷； b 可有无限多种。

2 晶胞

图 1 - 6

(1) -：构成空间点阵的最基本单元。

(2) 选取原则：

a 能够充分反映空间点阵的对称性；

b 相等的棱和角的数目最多；

c 具有尽可能多的直角；

d 体积最小。

(3) 形状和大小

有三个棱边的长度 a, b, c 及其夹角 α, β, γ 表示。

(4) 晶胞中点的位置表示（坐标法）。

3 布拉菲点阵

图 1 - 7

14 种点阵分属 7 个晶系。

4 晶向指数与晶面指数

晶向：空间点阵中各阵点列的方向。

晶面：通过空间点阵中任意一组阵点的平面。

国际上通用米勒指数标定晶向和晶面。

（1）晶向指数的标定

- 建立坐标系。确定原点（阵点）、坐标轴和度量单位（棱边）。
- 求坐标。 u', v', w'
- 化整数。 u, v, w 。
- 加[]。 $[uvw]$ 。

说明：

- 指数意义：代表相互平行、方向一致的所有晶向。
- 负值：标于数字上方，表示同一晶向的相反方向。
- 晶向族：晶体中原子排列情况相同但空间位向不同的一组晶向。用 $\langle uvw \rangle$ 表示，数字相同，但排列顺序不同或正负号不同的晶向属于同一晶向族。

（2）晶面指数的标定

- 建立坐标系：确定原点（非阵点）、坐标轴和度量单位。
- 量截距： x, y, z 。
- 取倒数： h', k', l'
- 化整数： h, k, l 。
- 加圆括号： (hkl) 。

说明：

- 指数意义：代表一组平行的晶面；
- 0 的意义：面与对应的轴平行；
- 平行晶面：指数相同，或数字相同但正负号相反；
- 晶面族：晶体中具有相同条件（原子排列和晶面间距完全相同），空间位向不同的各组晶面。用 $\{hkl\}$ 表示。
- 若晶面与晶向同面，则 $hu + kv + lw = 0$ ；
- 若晶面与晶向垂直，则 $u = h, k = v, w = l$ 。

（3）六方系晶向指数和晶面指数

- 六方系指数标定的特殊性：四轴坐标系（等价晶面不具有等价指数）。
- 晶面指数的标定
标法与立方系相同（四个截距）；用四个数字 $(hkil)$ 表示； $i = -(h+k)$ 。
- 晶向指数的标定
标法与立方系相同（四个坐标）；用四个数字 $(uvtw)$ 表示； $t = -(u+v)$ 。
依次平移法：适合于已知指数画晶向（末点）。
坐标换算法： $[UVW] \sim [uvtw]$
 $u = (2U - V)/3, v = (2V - U)/3, t = -(U + V)/3, w = W$ 。

（4）晶带

- ：平行于某一晶向直线所有晶面的组合。

晶带轴

晶带面

- 性质：晶带用晶带轴的晶向指数表示；晶带面 $//$ 晶带轴；
 $hu + kv + lw = 0$

c 晶带定律

凡满足上式的晶面都属于以 $[uvw]$ 为晶带轴的晶带。推论：

- 由两晶面 $(h_1 k_1 l_1)$ $(h_2 k_2 l_2)$ 求其晶带轴 $[uvw]$ ：
 $u = k_1 l_2 - k_2 l_1; v = l_1 h_2 - l_2 h_1; w = h_1 k_2 - h_2 k_1$ 。
- 由两晶向 $[u_1 v_1 w_1]$ $[u_2 v_2 w_2]$ 求其决定的晶面 (hkl) 。
 $H = v_1 w_2 - v_2 w_1; k = w_1 u_2 - w_2 u_1; l = u_1 v_2 - u_2 v_1$ 。

（5）晶面间距

- ：一组平行晶面中，相邻两个平行晶面之间的距离。
- 计算公式（简单立方）：
 $d = a / (h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}$
注意：只适用于简单晶胞；对于面心立方 hkl 不全为偶、奇数、体心立方 $h+k+l =$ 奇数时， $d_{(hkl)} = d/2$ 。

二 典型晶体结构及其几何特征

1 三种常见晶体结构

面心立方 (A1, FCC) 体心立方 (A1, BCC) 密排六方 (A3, HCP)

晶胞原子数	4		2		6	
点阵常数	$a=2\sqrt{2}r$		$a=4\sqrt{3}/3r$		$a=2r$	
配位数	12		8 (8 + 6)		12	
致密度	0.74		0.68		0.74	
堆垛方式	ABCABC..		ABABAB..		ABABAB..	
结构间隙	正四面体正八面体		四面体扁八面体		四面体正八面体	
(个数)	8 4		12 6		12 6	
(r_B/r_A)	0.225 0.414		0.29 0.15		0.225 0.414	

配位数 (CN)：晶体结构中任一原子周围最近且等距离的原子数。

致密度 (K)：晶体结构中原子体积占总体积的百分数。 $K=nv/V$ 。

间隙半径 (r_B)：间隙中所能容纳的最大圆球半径。

2 离子晶体的结构

(1) 鲍林第一规则 (负离子配位多面体规则)：在离子晶体中，正离子周围形成一个负离子配位多面体，正负离子间的平衡距离取决于正负离子半径之和，正离子的配位数取决于正负离子的半径比。

(2) 鲍林第二规则 (电价规则含义)：一个负离子必定同时被一定数量的负离子配位多面体所共有。

(3) 鲍林第三规则 (棱与面规则)：在配位结构中，共用棱特别是共用面的存在，会降低这个结构的稳定性。

3 共价键晶体的结构

(1) 饱和性：一个原子的共价键数为 $8-N$ 。

(2) 方向性：各键之间有确定的方位

(配位数小，结构稳定)

三 多晶型性

元素的晶体结构随外界条件的变化而发生转变的性质。

四 影响原子半径的因素

(1) 温度与应力

(2) 结合键的影响

(3) 配位数的影响 (高配位结构向低配位结构转变时，体积膨胀，原子半径减小减缓体积变化。

(4) 核外电子分布的影响 (一周期内，随核外电子数增加至填满，原子半径减小至一最小值。

第三节 原子的不规则排列

原子的不规则排列产生晶体缺陷。晶体缺陷在材料组织控制 (如扩散、相变) 和性能控制 (如材料强化) 中具有重要作用。

晶体缺陷：实际晶体中与理想点阵结构发生偏差的区域。

(晶体缺陷可分为以下三类。)

点缺陷：在三维空间各方向上尺寸都很小的缺陷。如空位、间隙原子、异类原子等。

线缺陷：在两个方向上尺寸很小，而另一个方向上尺寸较大的缺陷。主要是位错。

面缺陷：在一个方向上尺寸很小，在另外两个方向上尺寸较大的缺陷。如晶界、相界、表面等。

一 点缺陷

1 点缺陷的类型

(1) 空位：

肖脱基空位 - 离位原子进入其它空位或迁移至晶界或表面。

弗兰克尔空位 - 离位原子进入晶体间隙。

(2) 间隙原子：位于晶体点阵间隙的原子。

(3) 置换原子：位于晶体点阵位置的异类原子。

图 1 - 31

2 点缺陷的平衡浓度

（1）点缺陷是热力学平衡的缺陷 - 在一定温度下，晶体中总是存在着一定数量的点缺陷（空位），这时体系的能量最低 - 具有平衡点缺陷的晶体比理想晶体在热力学上更为稳定。（原因：晶体中形成点缺陷时，体系内能的增加将使自由能升高，但体系熵值也增加了，这一因素又使自由能降低。其结果是在 $G-n$ 曲线上出现了最低值，对应的 n 值即为平衡空位数。）

（2）点缺陷的平衡浓度

$$C=A\exp(-E_v/kT)$$

3 点缺陷的产生及其运动

（1）点缺陷的产生

平衡点缺陷：热振动中的能力起伏。

过饱和点缺陷：外来作用，如高温淬火、辐照、冷加工等。

（2）点缺陷的运动

（迁移、复合 - 浓度降低；聚集 - 浓度升高 - 塌陷）

4 点缺陷与材料行为

（1）结构变化：晶格畸变（如空位引起晶格收缩，间隙原子引起晶格膨胀，置换原子可引起收缩或膨胀。）

（2）性能变化：物理性能（如电阻率增大，密度减小。）

力学性能（屈服强度提高。）

二 线缺陷（位错）

位错：晶体中某处一系列或若干列原子有规律的错排。

意义：（对材料的力学行为如塑性变形、强度、断裂等起着决定性的作用，对材料的扩散、相变过程有较大影响。）

位错的提出：1926年，弗兰克尔发现理论晶体模型刚性切变强度与实测临界切应力的巨大差异（ $2 \sim 4$ 个数量级）。

1934年，泰勒、波朗依、奥罗万几乎同时提出位错的概念。

1939年，柏格斯提出用柏氏矢量表征位错。

1947年，柯垂耳提出溶质原子与位错的交互作用。

1950年，弗兰克和瑞德同时提出位错增殖机制。

之后，用 TEM 直接观察到了晶体中的位错。

1 位错的基本类型

（1）刃型位错

模型：滑移面 / 半原子面 / 位错线（位错线 晶体滑移方向，位错线 位错运动方向，晶体滑移方向 // 位错运动方向。）

分类：正刃型位错（ ）；负刃型位错（ ）。

（2）螺型位错

模型：滑移面 / 位错线。（位错线 // 晶体滑移方向，位错线 位错运动方向，晶体滑移方向 位错运动方向。）

分类：左螺型位错；右螺型位错。

（3）混合位错

模型：滑移面 / 位错线。

2 位错的性质

（1）形状：不一定是直线，位错及其畸变区是一条管道。

（2）是已滑移区和未滑移区的边界。

（3）不能中断于晶体内部。可在表面露头，或终止于晶界和相界，或与其它位错相交，或自行封闭成环。

3 柏氏矢量

（1）确定方法（避开严重畸变区）

a 在位错周围沿着点阵结点形成封闭回路。

b 在理想晶体中按同样顺序作同样大小的回路。

c 在理想晶体中从终点到起点的矢量即为 。

（2）柏氏矢量的物理意义

a 代表位错，并表示其特征（强度、畸变量） 。

b 表示晶体滑移的方向和大小。

c 柏氏矢量的守恒性（唯一性）：一条位错线具有唯一的柏氏矢量。

d 判断位错的类型。

(3) 柏氏矢量的表示方法

a 表示： $b=a/n[uvw]$ （可以用矢量加法进行运算）。

b 求模： $|b|=a/n[u^2+v^2+w^2]^{1/2}$ 。

4 位错密度

(1) 表示方法： $\rho = K/V$

$$= n/A$$

(2) 晶体强度与位错密度的关系（图）。

(3) 位错观察：浸蚀法、电镜法。

5 位错的运动

(1) 位错的易动性。

(2) 位错运动的方式

a 滑移：位错沿着滑移面的移动。

刃型位错的滑移：具有唯一的滑移面

螺型位错的滑移：具有多个滑移面。

位错环的滑移：注重柏氏矢量的应用。

b 攀移：刃型位错在垂直于滑移面方向上的运动。

机制：原子面下端原子的扩散 位错随半原子面的上下移动而上下运动。

分类：正攀移（原子面上移、空位加入）/负攀移（原子面下移、原子加入）。

应力的作用：（半原子面侧）压应力有利于正攀移，拉应力有利于负攀移。

(3) 作用在位错上的力（单位距离上）

滑移： $f = \tau b$ ；

攀移： $f = \sigma b$ 。

6 位错的应变能与线张力

(1) 单位长度位错的应变能： $W = Gb^2$ 。

（ $\alpha = 0.5 \sim 1.0$ ，螺位错取下限，刃位错取上限。）

(2) 位错是不平衡的缺陷。

（熵增不能抵销应变能的增加。）

(3) 位错的线张力： $T = Gb^2$ 。

(4) 保持位错弯曲所需的切应力： $\tau = Gb/2r$ 。

7 位错的应力场及其与其它缺陷的作用

(1) 应力场

螺位错： $\tau = Gb/2r$ 。（只有切应力分量。）

刃位错：表达式（式 1-9）

晶体中：滑移面以上受压应力，滑移面以下受拉应力。

滑移面：只有切应力。

(2) 位错与位错的交互作用

$f = \tau b$ ， $f = -\sigma b$ （刃位错）。

同号相互排斥，异号相互吸引。（达到能量最低状态。）

(3) 位错与溶质原子的相互作用

间隙原子聚集于位错中心，使体系处于低能态。

柯氏气团：溶质原子在位错线附近偏聚的现象。

(4) 位错与空位的交互作用

导致位错攀移。

8 位错的增殖、塞积与交割

(1) 位错的增殖：F-R 源。

(2) 位错的塞积

分布：逐步分散。

位错受力：切应力作用在位错上的力、位错间的排斥力、障碍物的阻力。

(3) 位错的交割

位错交割后结果：按照对方位错柏氏矢量（变化方向和大小）。

割阶：位错交割后的台阶不位于它原来的滑移面上。

扭折：位于。

对性能影响：增加位错长度，产生固定割阶。

9 位错反应

(1) 位错反应：位错的分解与合并。

(2) 反应条件

几何条件： $b_{前} = b_{后}$ ；反应前后位错的柏氏矢量之和相等。

能量条件： $b_{前}^2 > b_{后}^2$ ；反应后位错的总能量小于反应前位错的总能量。

10 实际晶体中的位错

(1) 全位错：通常把柏氏矢量等于点阵矢量的位错称为全位错或单位位错。

(实际晶体中的典型全位错如表 1 - 7 所示)

(2) 不全位错：柏氏矢量小于点阵矢量的位错。

(实际晶体中的典型不全位错如表 1 - 7 所示)

(3) 肖克莱和弗兰克不全位错。

肖克莱不全位错的形成：原子运动导致局部错排，错排区与完整晶格区的边界线即为肖克莱不全位错。(结合位错反应理解。可为刃型、螺型或混合型位错。)

弗兰克不全位错的形成：在完整晶体中局部抽出或插入一层原子所形成。(只能攀移，不能滑移。)

(4) 堆垛层错与扩展位错

堆垛层错：晶体中原子堆垛次序中出现的层状错排。

扩展位错：一对不全位错及中间夹的层错称之。

三 面缺陷

面缺陷主要包括晶界、相界和表面，它们对材料的力学和物理化学性能具有重要影响。

1 晶界

(1) 晶界：两个空间位向不同的相邻晶粒之间的界面。

(2) 分类

大角度晶界：晶粒位向差大于 10° 的晶界。其结构为几个原子范围内的原子的混乱排列，可视为一个过渡区。

小角度晶界：晶粒位向差小于 10° 的晶界。其结构为位错列，又分为对称倾侧晶界和扭转晶界。

亚晶界：位向差小于 1° 的亚晶粒之间的边界。为位错结构。

孪晶界：两块相邻孪晶的共晶面。分为共格孪晶界和非共格孪晶界。

2 相界

(1) 相界：相邻两个相之间的界面。

(2) 分类：共格、半共格和非共格相界。

3 表面

(1) 表面吸附：外来原子或气体分子在表面上富集的现象。

(2) 分类

物理吸附：由分子键力引起，无选择性，吸附热小，结合力小。

化学吸附：由化学键力引起，有选择性，吸附热大，结合力大。

4 界面特性

(1) 界面能会引起界面吸附。

(2) 界面上原子扩散速度较快。

(3) 对位错运动有阻碍作用。

(4) 易被氧化和腐蚀。

(5) 原子的混乱排列利于固态相变的形核。

第二章 固体中的相结构

合金与相

1 合金

(1) 合金：两种或两种以上的金属，或金属与非金属经一定方法合成的具有金属特性的物质。

(2) 组元：组成合金最基本的物质。(如一元、二元、三元合金)

(3) 合金系：给定合金以不同的比例而合成的一系列不同成分合金的总称。

2 相

(1) 相：材料中结构相同、成分和性能均一的组成部分。(如单相、两相、多相合金。)

(2) 相的分类

固溶体：晶体结构与其某一组元相同的相。含溶剂和溶质。

中间相（金属化合物）：组成原子有固定比例，其结构与组成组元均不相同的相。

第一节 固溶体

按溶质原子位置不同，可分为置换固溶体和间隙固溶体。

按固溶度不同，可分为有限固溶体和无限固溶体。

按溶质原子分布不同，可分为无序固溶体和有序固溶体。

1 置换固溶体

(1) 置换固溶体：溶质原子位于晶格点阵位置的固溶体。

(2) 影响置换固溶体溶解度的因素

a 原子尺寸因素

原子尺寸差越小，越易形成置换固溶体，且溶解度越大。

$$r = (r_A - r_B) / r_A$$

当 $r < 15\%$ 时，有利于大量互溶。

b 晶体结构因素

结构相同，溶解度大，有可能形成无限固溶体。

c 电负性因素

电负性差越小，越易形成固溶体，溶解度越大。

d 电子浓度因素

电子浓度 e/a 越大，溶解度越小。 e/a 有一极限值，与溶剂晶体结构有关。一价面心立方金属为 1.36，一价体心立方金属为 1.48。

(上述四个因素并非相互独立，其统一的理论的是金属与合金的电子理论。)

2 间隙固溶体

(1) 影响因素：原子半径和溶剂结构。

(2) 溶解度：一般都很小，只能形成有限固溶体。

3 固溶体的结构

(1) 晶格畸变。

(2) 偏聚与有序：完全无序、偏聚、部分有序、完全有序。

4 固溶体的性能

固溶体的强度和硬度高于纯组元，塑性则较低。

(1) 固溶强化：由于溶质原子的溶入而引起的强化效应。

(2) 柯氏气团

(3) 有序强化

第二节 金属间化合物

中间相是由金属与金属，或金属与类金属元素之间形成的化合物，也称为金属间化合物。

1 正常价化合物

(1) 形成：电负性差起主要作用，符合原子价规则。

(2) 键型：随电负性差的减小，分别形成离子键、共价键、金属键。

(3) 组成：AB 或 AB_{2n} 。

2 电子化合物（电子相）

(1) 形成：电子浓度起主要作用，不符合原子价规则。

(2) 键型：金属键（金属 - 金属）。

(3) 组成：电子浓度对应晶体结构，可用化学式表示，可形成以化合物为基的固溶体。

3 间隙化合物

(1) 形成：尺寸因素起主要作用。

(2) 结构

简单间隙化合物（间隙相）：金属原子呈现新结构，非金属原子位于其间隙，结构简单。

复杂间隙化合物：主要是铁、钴、铬、锰的化合物，结构复杂。

(3) 组成：可用化学式表示，可形成固溶体，复杂间隙化合物的金属元素可被置换。

4 拓扑密堆相

(1) 形成：由大小原子的适当配合而形成的高密排结构。

(2) 组成： AB_2 。

5 金属化合物的特性

(1) 力学性能：高硬度、高硬度、低塑性。

(2) 物化性能：具有电学、磁学、声学性质等，可用于半导体材料、形状记忆材料、储氢材料等。

第三节 陶瓷晶体相

1 陶瓷材料简介

(1) 分类：结构陶瓷（利用其力学性能）：强度（叶片、活塞）、韧性（切削刀具）、硬度（研磨材料）。

功能陶瓷（利用其物理性能）

精细功能陶瓷：导电、气敏、湿敏、生物、超导陶瓷等。

功能转换陶瓷：压电、光电、热电、磁光、声光陶瓷等。

结合键：离子键、共价键。

硅酸盐陶瓷：主要是离子键结合，含一定比例的共价键。可用分子式表示其组成。

2 硅酸盐陶瓷的结构特点与分类

(1) 结构特点

a 结合键与结构：主要是离子键结合，含一定比例的共价键。硅位于氧四面体的间隙。

b 每个氧最多被两个四面体共有。氧在两个四面体之间充当桥梁作用，称为氧桥。

(2) 结构分类

a 含有限 Si-O 团的硅酸盐，包括含孤立 Si-O 团和含成对或环状 Si-O 团两类。

b 链状硅酸盐：Si-O 团共顶连接成一维结构，又含单链和双链两类。

c 层状硅酸盐：Si-O 团底面共顶连接成二维结构。

d 骨架状硅酸盐：Si-O 团共顶连接成三维结构。

第四节 分子相

1 基本概念

(1) 高分子化合物：由一种或多种化合物聚合而成的相对分子质量很大的化合物。又称聚合物或高聚物。

(2) 分类

按相对分子质量：分为低分子聚合物（ <5000 ）和高分子聚合物（ >5000 ）。

按组成物质：分为有机聚合物和无机聚合物。

2 化学组成

（以氯乙烯聚合成聚氯乙烯为例）

(1) 单体：组成高分子化合物的低分子化合物。

(2) 链节：组成大分子的结构单元。

(3) 聚合度 n ：大分子链中链节的重复次数。

3 高分子化合物的合成

(1) 加聚反应

a 概念：由一种或多种单体相互加成而连接成聚合物的反应。（其产物为聚合物）

b 组成：与单体相同。反应过程中没有副产物。

c 分类

均聚反应：由一种单体参与的加聚反应。

共聚反应：由两种或两种以上单体参与的加聚反应。

(2) 缩聚反应

a 概念：由一种或多种单体相互混合而连接成聚合物，同时析出某种低分子化合物的反应。

b 分类

均缩聚反应：由一种单体参加的缩聚反应。

共缩聚反应：由两种或两种以上单体参加的缩聚反应。

4 高分子化合物的分类

(1) 按性能与用途：塑料、橡胶、纤维、胶黏剂、涂料等。

- (2) 按生成反应类型：加聚物、缩聚物。
- (3) 按物质的热行为：热塑性塑料和热固性塑料。

5 高分子化合物的结构

(1) 高分子链结构（链内结构，分子内结构）

a 化学组成

b 单体的连接方式

均聚物中单体的连接方式：头 - 尾连接、头 - 头或尾 - 尾相连、无轨连接。

共聚物中单体的连接方式：

无轨共聚：ABBABBABA

交替共聚：ABABABAB

嵌段共聚：AAAABBAAAABB

接枝共聚：AAAAAAAAAAAA

B B
B B
B B

c 高分子链的构型（按取代基的位置与排列规律）

全同立构：取代基 R 全部处于主链一侧。

间同立构：取代基 R 相间分布在主链两侧。

无规立构：取代基 R 在主链两侧不规则分布。

d 高分子链的几何形状：线型、支化型、体型。

(2) 高分子的聚集态结构（链间结构、分子间结构）

无定形结构、部分结晶结构、结晶型结构（示意图）

6 高分子材料的结构与性能特点

- (1) 易呈非晶态。
- (2) 弹性模量和强度低。
- (3) 容易老化。
- (4) 密度小。
- (5) 化学稳定性好。

第五节 玻璃相

1 结构：长程无序、短程有序

- (1) 连续无规网络模型。
- (2) 无规密堆模型。
- (3) 无规线团模型。

2 性能

- (1) 各向同性。
- (2) 无固定熔点。
- (3) 高强度、高耐蚀性、高导电率（金属）。

第三章 凝固与结晶

凝固：物质从液态到固态的转变过程。若凝固后的物质为晶体，则称之为结晶。

凝固过程影响后续工艺性能、使用性能和寿命。

凝固是相变过程，可为其它相变的研究提供基础。

第一节 材料结晶的基本规律

1 液态材料的结构

结构：长程有序而短程有序。

特点（与固态相比）：原子间距较大、原子配位数较小、原子排列较混乱。

2 过冷现象

(1) 过冷：液态材料在理论结晶温度以下仍保持液态的现象。（见热分析实验图）

(2) 过冷度：液体材料的理论结晶温度（ T_m ）与其实际温度之差。

$$T = T_m - T \quad (\text{见冷却曲线})$$

注：过冷是凝固的必要条件（凝固过程总是在一定的过冷度下进行）。

3 结晶过程

(1) 结晶的基本过程：形核 - 长大。 (见示意图)

(2) 描述结晶进程的两个参数

形核率：单位时间、单位体积液体中形成的晶核数量。用 N 表示。

长大速度：晶核生长过程中，液固界面在垂直界面方向上单位时间内迁移的距离。用 G 表示。

第二节 材料结晶的基本条件

1 热力学条件

(1) G-T 曲线 (图 3-4)

a 是下降曲线：由 $G-T$ 函数的一次导数 (负) 确定。

$$dG/dT = -S$$

b 是上凸曲线：由二次导数 (负) 确定。

$$d^2G/dT^2 = -C_p/T$$

c 液相曲线斜率大于固相：由一次导数大小确定。

二曲线相交于一点，即材料的熔点。

(2) 热力学条件

$$G_v = -L_m \quad T/T_m$$

a $T > 0$, $G_v < 0$ - 过冷是结晶的必要条件 (之一)。

b T 越大, G_v 越小 - 过冷度越大, 越有利于结晶。

c G_v 的绝对值为凝固过程的驱动力。

2 结构条件

结构起伏 (相起伏)：液态材料中出现的短程有序原子集团的时隐时现现象。是结晶的必要条件 (之二)。

第三节 晶核的形成

均匀形核：新相晶核在遍及母相的整个体积内无规则均匀形成。

非均匀形核：新相晶核依附于其它物质择优形成。

1 均匀形核

(1) 晶胚形成时的能量变化

$$G = V \quad G_v + S \\ = (4/3) \pi r^3 \quad G_v + 4 \pi r^2 \quad S \quad (\text{图 3-8})$$

(2) 临界晶核

$$dG/dr = 0 \\ r_k = -2 \quad / \quad G_v$$

临界晶核：半径为 r_k 的晶胚。

(3) 临界过冷度

$$r_k = -2 \quad T_m/L_m \quad T$$

临界过冷度：形成临界晶核时的过冷度。 T_k 。

$T < T_k$ 是结晶的必要条件。

(4) 形核功与能量起伏

$$G_k = S_k / 3$$

临界形核功：形成临界晶核时需额外对形核所做的功。

能量起伏：系统中微小区域的能量偏离平均能量水平而高低不一的现象。

(是结晶的必要条件之三)。

(5) 形核率与过冷度的关系

$$N = N_1 \cdot N_2 \quad (\text{图 3-11, 12})$$

由于 N 受 N_1, N_2 两个因素控制，形核率与过冷度之间是呈抛物线的关系。

2 非均匀形核

(1) 模型：外来物质为一平面，固相晶胚为一球冠。

(2) 自由能变化：表达式与均匀形核相同。

(3) 临界形核功

计算时利用球冠体积、表面积表达式，结合平衡关系
变化和临界形核功。

$W = \pi r^2 \Delta T \cos \theta$ 计算能量

$$G_k = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta T - \pi r^2 \Delta T \cos \theta$$

a $\theta = 0$ 时， $G_k = 0$ ，杂质本身即为晶核；

b $180^\circ > \theta > 0$ 时， $G_k < G_k^*$ ，杂质促进形核；

c $\theta = 180^\circ$ 时， $G_k = G_k^*$ ，杂质不起作用。

(4) 影响非均匀形核的因素

a 过冷度：(N-T 曲线有一下降过程)。(图 3-16)

b 外来物质表面结构：越小越有利。点阵匹配原理：结构相似，点阵常数相近。

c 外来物质表面形貌：表面下凹有利。(图 3-17)

第四节 晶核的长大

1 晶核长大的条件

(1) 动态过冷

动态过冷度：晶核长大所需的界面过冷度。(是材料凝固的必要条件)

(2) 足够的温度

(3) 合适的晶核表面结构。

2 液固界面微结构与晶体长大机制

粗糙界面(微观粗糙、宏观平整 - 金属或合金从来可的界面)：垂直长大。

光滑界面(微观光滑、宏观粗糙 - 无机化合物或亚金属材料的界面)：二维晶核长大、依靠缺陷长大。

3 液体中温度梯度与晶体的长大形态

(1) 正温度梯度(液体中距液固界面越远，温度越高)

粗糙界面：平面状。

光滑界面：台阶状。

(2) 负温度梯度(液体中距液固界面越远，温度越低)

粗糙界面：树枝状。

光滑界面：树枝状 - 台阶状。

第五节 凝固理论的应用

1 材料铸态晶粒度的控制

$$Z_v = 0.9(N/G)^{3/4}$$

(1) 提高过冷度。降低浇铸温度，提高散热导热能力，适用于小件。

(2) 化学变质处理。促进异质形核，阻碍晶粒长大。

(3) 振动和搅拌。输入能力，破碎枝晶。

2 单晶体到额制备

(1) 基本原理：保证一个晶核形成并长大。

(2) 制备方法：尖端形核法和垂直提拉法。

3 定向凝固技术

(1) 原理：单一方向散热获得柱状晶。

(2) 制备方法。

4 急冷凝固技术

(1) 非晶金属与合金

(2) 微晶合金。

(3) 准晶合金。

第四章 二元相图

相：(概念回顾)

相图：描述系统的状态、温度、压力及成分之间关系的图解。

二元相图：

第一节 相图的基本知识

1 相律

(1) 相律：热力学平衡条件下，系统的组元数、相数和自由度数之间的关系。

(2) 表达式： $f = c - p + 2$ ；压力一定时， $f = c - p + 1$ 。

- (3) 应用
可确定系统中可能存在的最大平衡相数。如单元系 2 个，二元系 3 个。
可以解释纯金属与二元合金的结晶差别。纯金属结晶恒温进行，二元合金变温进行。
- 2 相图的表示与建立
 - (1) 状态与成分表示法
状态表示：温度 - 成分坐标系。坐标系中的点 - 表象点。
成分表示：质量分数或摩尔分数。
 - (2) 相图的建立
方法：实验法和计算法。
过程：配制合金 - 测冷却曲线 - 确定转变温度 - 填入坐标 - 绘出曲线。
相图结构：两点、两线、三区。
- 3 杠杆定律
 - (1) 平衡相成分的确定 (根据相率，若温度一定，则自由度为 0，平衡相成分随之确定。)
 - (2) 数值确定：直接测量计算或投影到成分轴测量计算。
 - (3) 注意：只适用于两相区；三点 (支点和端点) 要选准。

第二节 二元匀晶相图

- 1 匀晶相同及其分析
 - (1) 匀晶转变：由液相直接结晶出单相固溶体的转变。
 - (2) 匀晶相图：具有匀晶转变特征的相图。
 - (3) 相图分析 (以 Cu-Ni 相图为例)
两点：纯组元的熔点；
两线：L, S 相线；
三区：L, , L+ 。
- 2 固溶体合金的平衡结晶
 - (1) 平衡结晶：每个时刻都能达到平衡的结晶过程。
 - (2) 平衡结晶过程分析
冷却曲线：温度 - 时间曲线；
相 (组织) 与相变 (各温区相的类型、相变反应式，杠杆定律应用。)；
组织示意图；
成分均匀化：每时刻结晶出的固溶体的成分不同。
 - (3) 与纯金属结晶的比较
相同点：基本过程：形核 - 长大；
热力学条件： $T > 0$ ；
能量条件：能量起伏；
结构条件：结构起伏。
不同点：合金在一个温度范围内结晶 (可能性：相率分析，必要性：成分均匀化。)
合金结晶是选分结晶：需成分起伏。
- 3 固溶体的不平衡结晶
 - (1) 原因：冷速快 (假设液相成分均匀、固相成分不均匀) 。
 - (2) 结晶过程特点：固相成分按平均成分线变化 (但每一时刻符合相图) ；
结晶的温度范围增大；
组织多为树枝状。
 - (3) 成分偏析：晶内偏析：一个晶粒内部化学成分不均匀现象。
枝晶偏析：树枝晶的枝干和枝间化学成分不均匀的现象。
(消除：扩散退火，在低于固相线温度长时间保温。)
- 4 稳态凝固时的溶质分布
 - (1) 稳态凝固：从液固界面输出溶质速度等于溶质从边界层扩散出去速度的凝固过程。
 - (2) 平衡分配系数：在一定温度下，固、液两平衡相中溶质浓度的比值。
$$k_0 = C_s / C_l$$
 - (3) 溶质分布：液、固相内溶质完全混合 (平衡凝固) - a;

- 固相不混合、液相完全混合 - b;
- 固相不混合、液相完全不混合 - c ;
- 固相不混合、液相部分混合 - d。

(4) 区域熔炼 (上述溶质分布规律的应用)

5 成分过冷及其对晶体生长形态的影响

(1) 成分过冷：由成分变化与实际温度分布共同决定的过冷。

(2) 形成：界面溶质浓度从高到低 - 液相线温度从低到高。

(图示：溶质分布曲线 - 匀晶相图 - 液相线温度分布曲线 - 实际温度分布曲线 - 成分过冷区。)

(3) 成分过冷形成的条件和影响因素

条件： $G/R < mC_0(1-k_0)/Dk_0$

合金固有参数： m, k_0 ;

实验可控参数： G, R 。

(4) 成分过冷对生长形态的影响

(正温度梯度下) G 越大，成分过冷越大 - 生长形态：平面状 - 胞状 - 树枝状。

第三节 二元共晶相图及合金凝固

共晶转变：由一定成分的液相同时结晶出两个一定成分固相的转变。

共晶相图：具有共晶转变特征的相图。

(液态无限互溶、固态有限互溶或完全不溶，且发生共晶反应。

共晶组织：共晶转变产物。(是两相混合物)

1 相图分析 (相图三要素)

(1) 点：纯组元熔点；最大溶解度点；共晶点 (是亚共晶、过共晶成分分界点) 等。

(2) 线：结晶开始、结束线；溶解度曲线；共晶线等。

(3) 区：3 个单相区；3 个两相区；1 个三相区。

2 合金的平衡结晶及其组织 (以 Pb-Sn 相图为例)

(1) $W_{Sn} < 19\%$ 的合金

凝固过程 (冷却曲线、相变、组织示意图) 。

二次相 (次生相) 的生成：脱溶转变 (二次析出或二次再结晶) 。

室温组织 (+) 及其相对量计算。

(2) 共晶合金

凝固过程 (冷却曲线、相变、组织示意图) 。

共晶线上两相的相对量计算。

室温组织 (+ +) 及其相对量计算。

(3) 亚共晶合金

凝固过程 (冷却曲线、相变、组织示意图) 。

共晶线上两相的相对量计算。

室温组织 (+ + (+)) 及其相对量计算。

组织组成物与组织图

组织组成物：组成材料显微组织的各个不同本质和形态的部分。

组织图：用组织组成物填写的相图。

3 不平衡结晶及其组织

(1) 伪共晶

伪共晶：由非共晶成分的合金所得到的完全共晶组织。

形成原因：不平衡结晶。成分位于共晶点附近。

不平衡组织

由非共晶成分的合金得到的完全共晶组织。

共晶成分的合金得到的亚、过共晶组织。(伪共晶区偏移)

(2) 不平衡共晶

不平衡共晶：位于共晶线以外成分的合金发生共晶反应而形成的组织。

原因：不平衡结晶。成分位于共晶线以外端点附件。

(3) 离异共晶

离异共晶：两相分离的共晶组织。

形成原因

平衡条件下，成分位于共晶线上两端点附近。

不平衡条件下，成分位于共晶线外两端点附近。

消除：扩散退火。

4 共晶组织的形成

(1) 共晶体的形成

成分互惠 - 交替形核

片间搭桥 - 促进生长

两相交替分布

共晶组织

(2) 共晶体的形态

粗糙 - 粗糙界面：层片状（一般情况）、棒状、纤维状（一相数量明显少于另一相）

粗糙 - 平滑界面：具有不规则或复杂组织形态（由于两相微观结构不同）

所需动态过冷度不同，金属相任意长大，另一相在其间隙长大。可得到球状、针状、花朵状、树枝状共晶体。

非金属相与液相成分差别大。形成较大成分过冷，率先长大，形成针状、骨骼状、螺旋状、蜘蛛网状的共晶体。

(3) 初生晶的形态：

金属固溶体：粗糙界面 - 树枝状；非金属相：平滑界面 - 规则多面体。

第四节 二元包晶相图

包晶转变：由一个特定成分的固相和液相生成另一个特定成分固相的转变。

包晶相图：具有包晶转变特征的相图。

1 相图分析

点、线、区。

2 平衡结晶过程及其组织

(1) 包晶合金的结晶

结晶过程：包晶线以下，L，对过饱和 - 界面生成 - 三相间存在浓度梯度 - 扩散 - 长大 - 全部转变为。

室温组织：或 +。

(2) 成分在 C-D 之间合金的结晶

结晶过程：剩余；

室温组织：+ + +。

3 不平衡结晶及其组织

异常相导致包晶偏析〔包晶转变要经扩散。包晶偏析：因包晶转变不能充分进行而导致的成分不均匀现象。〕

异常相由不平衡包晶转变引起。成分在靠近固相、包晶线以外端点附件。

4 包晶转变的应用

(1) 组织设计：如轴承合金需要的软基体上分布硬质点的组织。

(2) 晶粒细化。

第五节 其它类型的二元相图

自学内容

第六节 铁碳合金相图

一 二元相图的分析和使用

(1) 二元相图中的几何规律

相邻相区的相数差 1（点接触除外） - 相区接触法则；

三相区的形状是一条水平线，其上三点是平衡相的成分点。

若两个三相区中有 2 个相同的相，则两水平线之间必是由这两相组成的两相区。

单相区边界线的延长线应进入相邻的两相区。

(2) 相图分析步骤

以稳定的化合物分割相图；
确定各点、线、区的意义；
分析具体合金的结晶过程及其组织变化

注：虚线、点划线的意义 - 尚未准确确定的数据、磁学转变线、有序 - 无序转变线。

(3) 相图与合金性能的关系

根据相图判断材料的力学和物理性能

根据相图判断材料的工艺性能

铸造性能：根据液固相线之间的距离 X

X 越大，成分偏析越严重（因为液固相成分差别大）；

X 越大，流动性越差（因为枝晶发达）；

X 越大，热裂倾向越大（因为液固两相共存的温区大）。

塑性加工性能：选择具有单相固溶体区的合金。

热处理性能：选择具有固态相变或固溶度变化的合金。

二 铁 - 碳合金相图

1 组元和相

(1) 组元：铁 - 石墨相图： Fe, C ;

铁 - 渗碳体相图： $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 。

相：L, $\text{A}(\delta)$, $\text{F}(\alpha)$, $\text{Fe}_3\text{C}(\text{K})$ 。(其定义)

2 相图分析

点：16个。

线：两条磁性转变线；三条等温转变线；其余三条线：

GS, ES, PQ。

区：5个单相区，7个两相区，3个三相区。

相图标注：相组成物标注的相图。

组织组成物标注的相图。

3 合金分类：工业纯铁 ($\text{C}\% < 0.0218\%$)、碳钢 ($0.0218\% < \text{C}\% < 2.11\%$)、铸铁 ($\text{C}\% > 2.11\%$)

4 平衡结晶过程及其组织

(1) 典型合金 (7种) 的平衡结晶过程、组织变化、室温组织及其相对量计算。

(2) 重要问题： Fe_3C , Fe_3C , Fe_3C 的意义及其最大含量计算。

$\text{L}_d-\text{L}_d'$ 转变。

二次杠杆的应用。

5 含碳量对平衡组织和性能的影响

(1) 对平衡组织的影响 (随 $\text{C}\%$ 提高)

组织： $\text{L} + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{L}_d' + \text{Fe}_3\text{C}$ ；

相：减少， Fe_3C 增多；

Fe_3C 形态： Fe_3C (薄网状、点状) $\xrightarrow{\text{共析}}$ Fe_3C (层片状) $\xrightarrow{\text{共晶}}$ Fe_3C (网状) $\xrightarrow{\text{共晶}}$ Fe_3C (基体) $\xrightarrow{\text{共晶}}$ Fe_3C (粗大片状)。

(2) 对力学性能的影响

强度、硬度升高，塑韧性下降。

(3) 对工艺性能的影响

适合锻造： $\text{C}\% < 2.11\%$ ，可得到单相组织。

适合铸造： $\text{C}\% \sim 4.3\%$ ，流动性好。

适合冷塑变： $\text{C}\% < 0.25\%$ ，变形阻力小。

适合热处理： $0.0218 \sim 2.11$ ，有固态相变。

第七节 相图的热力学解释

图示讲解

第八节 铸锭组织及其控制

1 铸锭组织

(1) 铸锭三区：表层细晶区、柱状晶区、中心等轴晶区。

(2) 组织控制：受浇铸温度、冷却速度、化学成分、变质处理、机械振动与搅拌等因素影响。

2 铸锭缺陷

(1) 微观偏析

- (2) 宏观偏析
 - 正偏析
 - 反偏析
 - 比重偏析
- (3) 夹杂与气孔
 - 夹杂：外来夹杂和内生夹杂。
 - 气孔：析出型和反应型。
- (4) 缩孔和疏松
 - 形成：凝固时体积缩小 - 补缩不足 - 形成缩孔。
 - 分类：集中缩孔（缩孔、缩管）和分散缩孔（疏松，枝晶骨架相遇，封闭液体，造成补缩困难形成。）

第五章 三元相图

第一节 总论

- 1 三元相图的主要特点
 - (1) 是立体图形，主要由曲面构成；
 - (2) 可发生四相平衡转变；
 - (3) 一、二、三相区为一空间。
- 2 成分表示法 - 成分三角形（等边、等腰、直角三角形）
 - (1) 已知点确定成分；
 - (2) 已知成分确定点。
- 3 成分三角形中特殊的点和线
 - (1) 三个顶点：代表三个纯组元；
 - (2) 三个边上的点：二元系合金的成分点；
 - (3) 平行于某条边的直线：其上合金所含由此边对应顶点所代表的组元的含量一定。
 - (4) 通过某一顶点的直线：其上合金所含由另两个顶点所代表的两组元的比值恒定。
- 4 平衡转变的类型
 - (1) 共晶转变： $L_0 \xrightarrow{T} a + b + c$;
 - (2) 包晶转变： $L_0 + a \xrightarrow{T} b + c$;
 - (3) 包共晶转变： $L_0 + a \xrightarrow{T} b + c$;
 还有偏共晶、共析、包析、包共析转变等。
- 5 共线法则与杠杆定律
 - (1) 共线法则：在一定温度下，三元合金两相平衡时，合金的成分点和两个平衡相的成分点必然位于成分三角形的同一条直线上。（由相率可知，此时系统有一个自由度，表示一个相的成分可以独立改变，另一相的成分随之改变。）
 - (2) 杠杆定律：用法与二元相同。
 两条推论
 - (1) 给定合金在一定温度下处于两相平衡时，若其中一个相的成分给定，另一个相的成分点必然位于已知成分点连线的延长线上。
 - (2) 若两个平衡相的成分点已知，合金的成分点必然位于两个已知成分点的连线上。
- 6 重心定律

在一定温度下，三元合金三相平衡时，合金的成分点为三个平衡相的成分点组成的三角形的质量重心。（由相率可知，此时系统有一个自由度，温度一定时，三个平衡相的成分是确定的。）

平衡相含量的计算：所计算相的 成分点、合金成分点 和二者连线的延长线与对边的 交点 组成一个杠杆。合金成分点为支点。计算方法同杠杆定律。

第二节 三元匀晶相图

1 相图分析

- 点： T_a, T_b, T_c -三个纯组元的熔点；
- 面：液相面、固相面；
- 区： L, L_1, L_2 。

2 三元固溶体合金的结晶规律

液相成分沿液相面、固相成分沿固相面，呈蝶形规律变化。

(立体图不实用)

3 等温界面 (水平截面)

(1) 做法：某一温度下的水平面与相图中各面的交线。

(2) 截面图分析

3 个相区：L, , L+ ;
2 条相线：L₁L₂, S₁S₂ (共轭曲线) ;
若干连接线：可作为计算相对量的杠杆 (偏向低熔点组元；可用合金成分点与顶点的连线近似代替) 。

4 变温截面 (垂直截面)

(1) 做法：某一垂直平面与相图中各面的交线。

(2) 二种常用变温截面 { 经平行于某条边的直线做垂直面获得；
经通过某一顶点的直线做垂直面获得。

(3) 结晶过程分析

注意

{ 成分轴的两端不一定是纯组元；
液、固相线不一定相交；
不能运用杠杆定律 (液、固相线不是成分变化线) 。

5 投影图

(1) 等温线投影图：可确定合金结晶开始、结束温度。

(2) 全方位投影图：匀晶相图不必要。

第三节 三元共晶相图

一 组元在固态互不相溶的共晶相图

(1) 相图分析 点：熔点；二元共晶点；三元共晶点。

线：EnE

{ 两相共晶线
液相面交线
两相共晶面交线
液相单变量线
液相区与两相共晶面交线

面：

{ 液相面
固相面

区：

{ 两相共晶面
三元共晶面
两相区：3 个
单相区：4 个
三相区：4 个
四相区：1 个

(2) 等温截面

应用：可确定平衡相及其成分；可运用杠杆定律和重心定律。

三相平衡区

{ 是直边三角形

两相区与之线接 (水平截面与棱柱面交线)

单相区与之点接 (水平截面与棱边的交点，表示三个平衡相成分。)

(3) 变温截面

应用：分析合金结晶过程，确定组织变化

局限性：不能分析成分变化。(成分在单变量线上，不在垂直截面上)

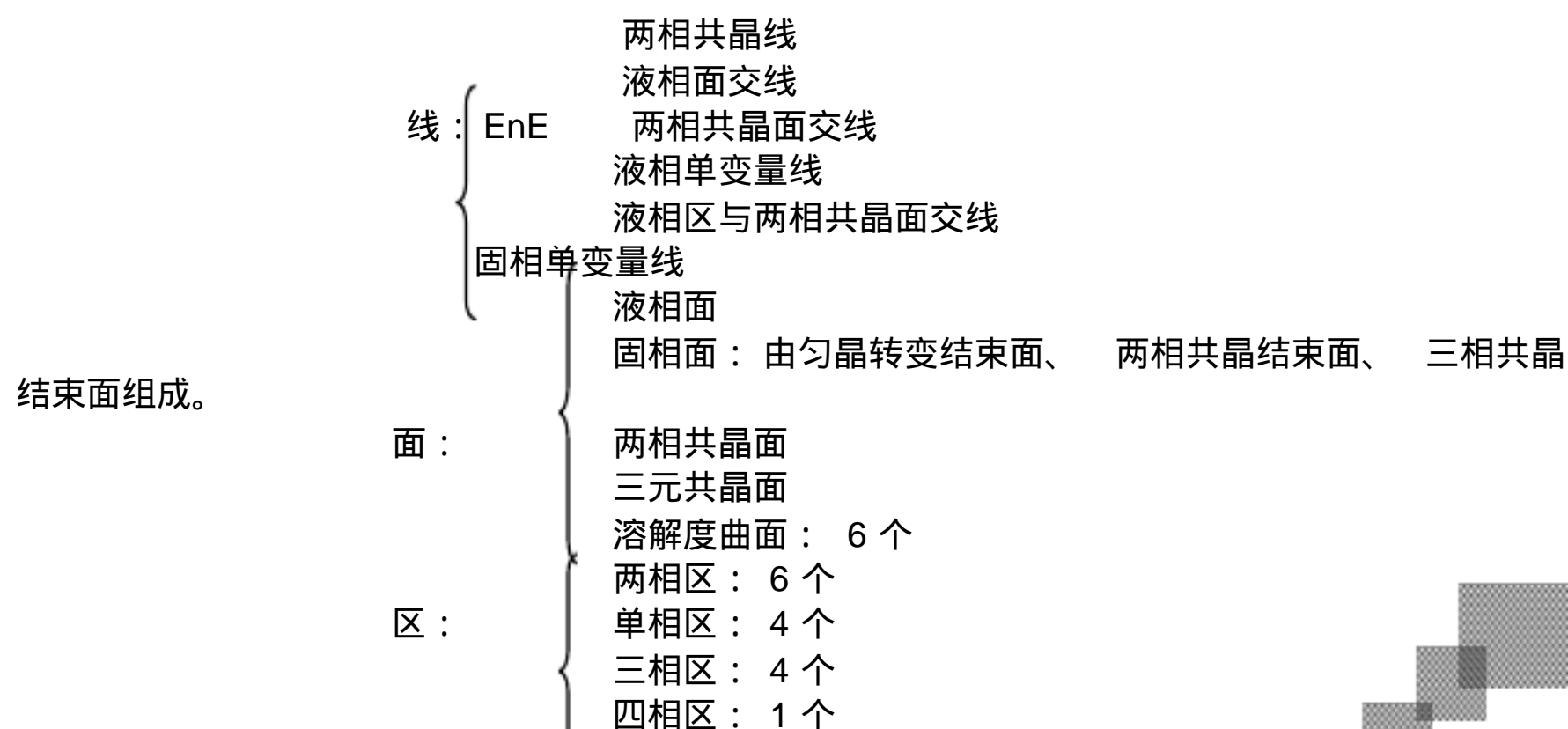
(4) 投影图

{ 合金结晶过程分析；
相组成物相对量计算 (杠杆定律、重心定律)
组织组成物相对量计算 (杠杆定律、重心定律)

二 组元在固态有限溶解的共晶相图

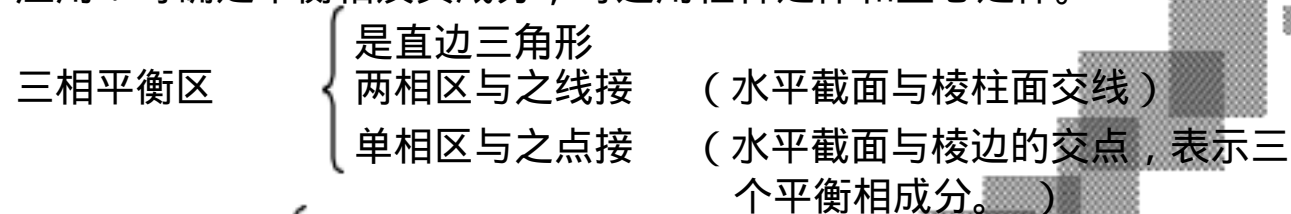
(1) 相图分析

点：熔点；二元共晶点；三元共晶点。



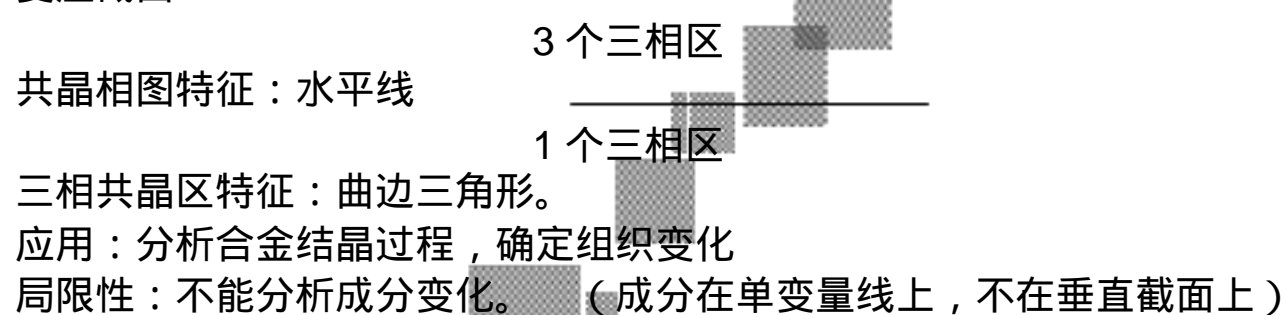
(2) 等温截面

应用：可确定平衡相及其成分；可运用杠杆定律和重心定律。



相区接触法则：单相区 / 两相区曲线相接；
两相区 / 三相区直线相接。

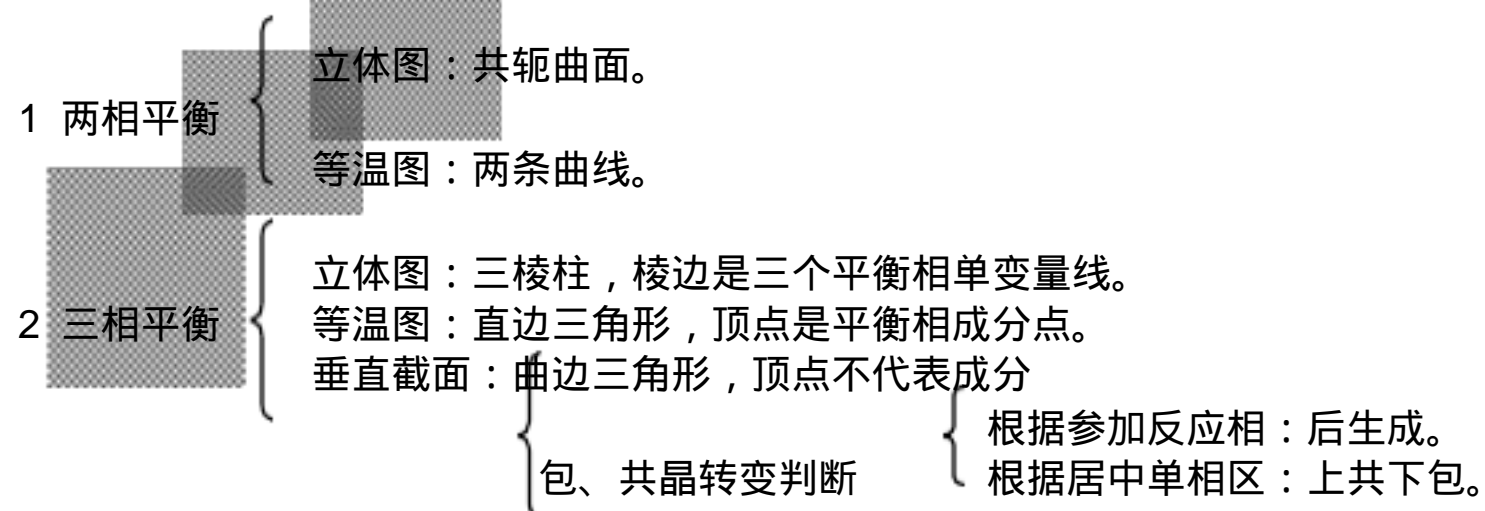
(3) 变温截面



(4) 投影图

合金结晶过程分析；
相组成物相对量计算 (杠杆定律、重心定律)
组织组成物相对量计算 (杠杆定律、重心定律)

第四节 三元相图总结



3 四相平衡

(1) 立体图中的四相平衡

类型：

- 共晶转变
- 包共晶转变
- 包晶转变

相区邻接 (四相平衡面)

与 4 个单相区点接触；
 与 6 个两相区线接触；
 与 4 个三相区面接触。
 共晶转变：上 3 下 1 (三相区)；

反应类型判断（以四相平衡面为界）

包共晶转变：上 2 下 2；
包晶转变：上 1 下 3。

（2）变温截面中的四相平衡

四相平衡区：上下都有三相区邻接。

判断转变类型 { 条件：邻接三相区达 4 时；
类型：共晶、包共晶、包晶。

（3）投影图中的四相平衡

根据 12 根单变量判断；

根据液相单变量判断

共晶转变

包共晶转变

包晶转变

4 相区接触法则

相邻相区的相数差 1（各种截面图适用）。

5 应用举例

第六章 固体中的扩散

第一节 概述

1 扩散的现象与本质

（1）扩散：热激活的原子通过自身的热振动克服束缚而迁移它处的过程。

（2）现象：柯肯达尔效应。

（3）本质：原子无序跃迁的统计结果。（不是原子的定向移动）。

2 扩散的分类

（1）根据有无浓度变化

自扩散：原子经由自己元素的晶体点阵而迁移的扩散。（如纯金属或 固溶体的
晶粒长大。无浓度变化。）

互扩散：原子通过进入对方元素晶体点阵而导致的扩散。（有浓度变化）

（2）根据扩散方向

下坡扩散：原子由高浓度处向低浓度处进行的扩散。

上坡扩散：原子由低浓度处向高浓度处进行的扩散。

（3）根据是否出现新相

原子扩散：扩散过程中不出现新相。

反应扩散：由之导致形成一种新相的扩散。

3 固态扩散的条件

（1）温度足够高；

（2）时间足够长；

（3）扩散原子能固溶；

（4）具有驱动力：化学位梯度。

第二节 扩散定律

1 菲克第一定律

（1）第一定律描述：单位时间内通过垂直于扩散方向的某一单位面积截面的扩散物质
流量（扩散通量 J ）与浓度梯度成正比。

（2）表达式： $J = -D(dc/dx)$ 。（ C - 溶质原子浓度； D - 扩散系数。）

（3）适用条件：稳态扩散， $dc/dt=0$ 。浓度及浓度梯度不随时间改变。

2 菲克第二定律

- (1) 表达式
- $$\begin{cases} \text{一般: } \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \\ \text{二维: } \begin{cases} \text{一般: } \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \\ \text{特殊: } \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \end{cases} \\ \text{三维: } \frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \end{cases}$$
- (2) 适用条件:
- $$\begin{cases} \text{稳态扩散: } \frac{\partial C}{\partial t} = 0, \frac{\partial J}{\partial x} = 0. \\ \text{非稳态扩散: } \frac{\partial C}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial J}{\partial x} \neq 0 \left(\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial J}{\partial x} \right). \end{cases}$$

3 扩散第二定律的应用

(1) 误差函数解

适用条件：无限长棒和半无限长棒。

表达式： $C = C_1 - (C_1 - C_2) \operatorname{erf}(x/2\sqrt{Dt})$ (半无限长棒)。

在渗碳条件下： C : x, t 处的浓度； C_1 : 表面含碳量； C_2 : 钢的原始含碳量。

(2) 正弦解

$$C_x = C_p - A_0 \sin(x/\lambda)$$

C_p : 平均成分； A_0 : 振幅 $C_{\max} - C_p$ ； λ : 枝晶间距的一半。

对于均匀化退火，若要求枝晶中心成分偏析振幅降低到 1/100, 则：

$$[C(x/2, t) - C_p] / (C_{\max} - C_p) = \exp(-\lambda^2 Dt / 4) = 1/100.$$

第三节 扩散的微观机理与现象

1 扩散机制

- (1) 间隙机制
- $$\begin{cases} \text{间隙 - 间隙;} \\ \text{平衡位置 - 间隙 - 间隙: 较困难;} \\ \text{间隙 - 篡位 - 结点位置。} \end{cases}$$
- (间隙固溶体中间隙原子的扩散机制。)

- (2) 空位机制
- $$\begin{cases} \text{方式: 原子跃迁到与之相邻的空位;} \\ \text{条件: 原子近旁存在空位。} \end{cases}$$
- (金属和置换固溶体中原子的扩散。)

- (3) 换位机制
- $$\begin{cases} \text{直接换位} \\ \text{环形换位} \end{cases}$$
- (所需能量较高。)

2 扩散程度的描述

(1) 原子跃迁的距离

$$\bar{R} = \sqrt{tr}$$

\bar{R} : 扩散距离； t : 原子跃迁的频率 (在一定温度下恒定)； r : 原子一次跃迁距离 (如一个原子间距)。

(2) 扩散系数

$$D = \lambda^2 P$$

对于立方结构晶体 $P = 1/6$, 上式可写为

$$D = \lambda^2 / 6$$

P 为跃迁方向几率； λ 是常数，对于简单立方结构 $\lambda = a$ ；对于面心立方结构 $\lambda = a\sqrt{2}/2$ ；对于体心立方结构 $\lambda = a\sqrt{3}/2$ 。

(3) 扩散激活能

扩散激活能 Q : 原子跃迁时所需克服周围原子对其束缚的势垒。

间隙扩散扩散激活能与扩散系数的关系

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

D_0 : 扩散常数。

空位扩散激活能与扩散系数的关系

$$D = D_0 \exp(-E/kT)$$

$E = E_f(\text{空位形成能}) + E_m(\text{空位迁移激活能})$ 。

3 扩散的驱动力与上坡扩散

（1）扩散的驱动力

对于多元体系，设 n_i 为组元 i 的原子数，则在等温等压条件下，组元 i 原子的自由能可用化学位表示：

$$\mu_i = \partial G / \partial n_i$$

扩散的驱动力为化学位梯度，即

$$F_i = - \partial \mu_i / \partial x$$

负号表示扩散驱动力指向化学位降低的方向。

（2）扩散的热力学因子

组元 i 的扩散系数可表示为

$$D_i = K T B_i (1 + \partial \ln \mu_i / \partial \ln x_i)$$

其中， $(1 + \partial \ln \mu_i / \partial \ln x_i)$ 称为热力学因子。当 $(1 + \partial \ln \mu_i / \partial \ln x_i) < 0$ 时， $D_i < 0$ ，发生上坡扩散。

（3）上坡扩散

概念：原子由低浓度处向高浓度处迁移的扩散。

驱动力：化学位梯度。

其它引起上坡扩散的因素：

弹性应力的作用 - 大直径原子跑向点阵的受拉部分，小直径原子跑向点阵的受压部分。

晶界的内吸附：某些原子易富集在晶界上。

电场作用：大电场作用可使原子按一定方向扩散。

4 反应扩散

（1）反应扩散：有新相生成的扩散过程。

（2）相分布规律：二元扩散偶中不存在两相区，只能形成不同的单相区；

三元扩散偶中可以存在两相区，不能形成三相区。

第四节 影响扩散的主要因素

1 温度

$$D = D_0 \exp(-Q/RT)$$

可以看出，温度越高，扩散系数越大。

2 原子键力和晶体结构

原子键力越强，扩散激活能越高；致密度低的结构中扩散系数大（举例：渗碳选择在奥氏体区进行）；在对称性低的结构中，可出现明显的扩散各向异性。

3 固溶体类型和组元浓度的影响

间隙扩散机制的扩散激活能低于置换型扩散；提高组元浓度可提高扩散系数。

4 晶体缺陷的影响

（缺陷能量较高，扩散激活能小）

空位是空位扩散机制的必要条件；

位错是空位管道，低温下对扩散起重要作用；

界面扩散 - （短路扩散）：原子界面处的快速扩散。

如对银： $Q_{\text{表面}} = Q_{\text{晶界}}/2 = Q_{\text{晶内}}/3$

5 第三组元的影响

如在钢中加入合金元素对碳在 γ 中扩散的影响。

强碳化物形成元素，如 W, Mo, Cr, 与碳亲和力大，能显著组织碳的扩散；

弱碳化物形成元素，如 Mn，对碳的扩散影响不大；

固溶元素，如 Co, Ni, 提高碳的扩散系数； Si 降低碳的扩散系数。

第七章 塑性变形

第一节 单晶体的塑性变形

常温下塑性变形的主要方式：滑移和孪生。

一 滑移

1 滑移：在切应力作用下，晶体的一部分相对于另一部分沿着一定的晶面（滑移面）和晶向（滑移方向）产生相对位移，且不破坏晶体内部原子排列规律性的塑变方式。

2 滑移的表象学

- 光镜下：滑移带（无重现性）。
- 电镜下：滑移线。

3 滑移的晶体学

(1) 几何要素

- 滑移面（密排面）
- 滑移方向（密排方向）

(2) 滑移系

滑移系：一个滑移面和该面上一个滑移方向的组合。

滑移系的个数：(滑移面个数) × (每个面上所具有的滑移方向的个数)

典型滑移系

晶体结构	滑移面	滑移方向	滑移系数目	常见金属
面心立方	{111} × 4	$\langle 110 \rangle \times 3$	12	Cu, Al, Ni, Au
体心立方	{110} × 6	× 2	12	Fe, W, Mo
	{121} × 12	$\langle 111 \rangle \times 1$	12	Fe, W
	{123} × 24	× 1	24	Fe
密排六方	{0001} × 1	× 3	3	Mg, Zn, Ti
	{1010}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3	Mg, Zr, Ti
	{1011}		6	Mg, Ti

滑移系数目与材料塑性的关系：

- 一般滑移系越多，塑性越好；
- 与滑移面密排程度和滑移方向个数有关；
- 与同时开动滑移系数目有关 (c)。

(3) 滑移的临界分切应力 (c)

c：在滑移面上沿滑移方向开始滑移的最小分切应力。

外力在滑移方向上的分解。

$c = s \cos \phi \cos \lambda$

- c 取决于金属的本性，不受 ϕ ， λ 的影响；
- s 的取值：
 - ϕ 或 $\lambda = 90^\circ$ 时， $s = 0$ ；
 - ϕ ， $\lambda = 45^\circ$ 时， s 最小，晶体易滑移；
- 取向因子： $\cos \phi \cos \lambda$
 - 软取向：值大；
 - 硬取向：值小。

(4) 位错运动的阻力

派 - 纳力： $P-N = [2 G / (1 - \nu)] \exp \{-2 a / [(1 - \nu) b]\}$

主要取决于位错宽度、结合键本性和晶体结构。

4 滑移时晶体的转动

(1) 位向和晶面的变化
(力轴方向不变)

拉伸时，滑移面和滑移方向趋于平行于力轴方向
压缩时，晶面逐渐趋于垂直于压力轴线。

(2) 取向因子的变化

几何硬化： ϕ ， λ 远离 45° ，滑移变得困难；
几何软化： ϕ ， λ 接近 45° ，滑移变得容易。

5 多滑移

(1) 滑移的分类

多滑移：在多个 (> 2) 滑移系上同时或交替进行的滑移。

双滑移：

单滑移：

(2) 等效滑移系：各滑移系的滑移面和滑移方向与力轴夹角分别相等的一组滑移系。

6 交滑移

(1) 交滑移：晶体在两个或多个不同滑移面上沿同一滑移方向进行的滑移。

螺位错的交滑移：螺位错从一个滑移面转移到与之相交的另一滑移面的过程；

(2) 机制

螺位错的双交滑移：交滑移后的螺位错再转回到原滑移面的过程。

单滑移：单一方向的滑移带；

- (3) 滑移的表面痕迹 多滑移：相互交叉的滑移带；
 交滑移：波纹状的滑移带。

二 孪生

(1) 孪生：在切应力作用下，晶体的一部分相对于另一部分沿一定的晶面和晶向发生均匀切变并形成晶体取向的镜面对称关系。

- (2) 孪生的晶体学
- | | | |
|------|---|---|
| 孪生面 | $A1\{111\}, A2\{112\}, A3\{1012\}$ | — |
| 孪生方向 | $A1\langle 112\rangle, A2\langle 1\bar{1}1\rangle, A3\langle 1011\rangle$ | — |
| 孪晶区 | | |

(3) 孪生变形的特点

		滑移	孪生
相同点 1		均匀切变； 2 沿一定的晶面、晶向进行；不改变结构。	
不同点	晶体位向	不改变（对抛光面观察无重现性）。	改变，形成镜面对称关系（对抛光面观察有重现性）
	位移量	滑移方向上原子间距的整数倍，较大。	小于孪生方向上的原子间距，较小。
	对塑变的贡献	很大，总变形量大。	有限，总变形量小。
	变形应力	有一定的临界分切压力	所需临界分切应力远高于滑移
	变形条件	一般先发生滑移	滑移困难时发生
	变形机制	全位错运动的结果	分位错运动的结果

第二节 多晶体的塑性变形

1 晶粒之间变形的传播

位错在晶界塞积 → 应力集中 → 相邻晶粒位错源开动 → 相邻晶粒变形 → 塑变 →

2 晶粒之间变形的协调性

- (1) 原因：各晶粒之间变形具有非同时性。
 (2) 要求：各晶粒之间变形相互协调。（独立变形会导致晶体分裂）
 (3) 条件：独立滑移系 5 个。（保证晶粒形状的自由变化）

3 晶界对变形的阻碍作用

- (1) 晶界的特点：原子排列不规则；分布有大量缺陷。
 (2) 晶界对变形的影响：滑移、孪生多终止于晶界，极少穿过。
 (3) 晶粒大小与性能的关系

a 晶粒越细，强度越高（细晶强化：由下列霍尔 - 配奇公式可知）

$$\sigma_s = \sigma_0 + k d^{-1/2}$$

原因：晶粒越细，晶界越多，位错运动的阻力越大。（有尺寸限制）

b 晶粒越细，塑韧性提高

晶粒越多，变形均匀性提高由应力集中导致的开裂机会减少，可承受更大的变形量，表现出高塑性。

细晶粒材料中，应力集中小，裂纹不易萌生；晶界多，裂纹不易传播，在断裂过程中可吸收较多能量，表现出高韧性。

第三节 合金的塑性变形

一 固溶体的塑性变形

- 固溶体的结构
- 固溶强化

(1) 固溶强化：固溶体材料随溶质含量提高其强度、硬度提高而塑性、韧性下降的现象。

- (2) 强化机制 { 晶格畸变，阻碍位错运动；
柯氏气团强化。
- (3) 屈服和应变时效
现象：上下屈服点、屈服延伸（吕德斯带扩展）。
预变形和时效的影响：去载后立即加载不出现屈服现象；去载后放置一段时间或
200 加热后再加载出现屈服。
原因：柯氏气团的存在、破坏和重新形成。
- (4) 固溶强化的影响因素
溶质原子含量越多，强化效果越好；
溶剂与溶质原子半径差越大，强化效果越好；
..... 价电子数差越大，强化效果越好；
间隙式溶质原子的强化效果高于置换式溶质原子。

二 多相合金的塑性变形

- 1 结构：基体 + 第二相。
- 2 性能
 - (1) 两相性能接近：按强度分数相加计算。
 - (2) 软基体 + 硬第二相
 - a 结构 { 第二相网状分布于晶界（二次渗碳体）；
两相呈层片状分布（珠光体）；
第二相呈颗粒状分布（三次渗碳体）。
 - b 强化 { 弥散强化：位错绕过第二相粒子（粒子、位错环阻碍位错运动）
沉淀强化：位错切过第二相粒子（表面能、错排能、粒子阻碍位错运动）

第四节 塑性变形对材料组织和性能的影响

一 对组织结构的影响

- 1 形成纤维组织 { 晶粒拉长；
杂质呈细带状或链状分布。
- 2 形成形变组织
 - (1) 形变组织：多晶体材料由塑性变形导致的各晶粒呈择优取向的组织。
 - (2) 常见类型 { 丝织构：某一晶向趋于与拔丝方向平行。（拉拔时形成）
板织构：某晶面趋于平行于轧制面，某晶向趋于平行于主变形方向。（轧制时形成）
 - (3) 对性能的影响：各向异性 { 力学性能：利：深冲板材变形控制；弊：制耳。
物理性能：硅钢片 <100> 织构可减少铁损。
- 3 形成位错胞
变形量 ↑ → 位错缠结 → 位错胞（大量位错缠结在胞壁，胞内位错密度低。）

二 对性能的影响

1 对力学性能的影响（加工硬化）

(1) 加工硬化（形变强化、冷作强化）：随变形量的增加，材料的强度、硬度升高而塑性下降的现象。

- (2) 利弊 { 利 { 强化金属的重要途径；
提高材料使用安全性；
材料加工成型的保证。
弊 { 变形阻力提高，动力消耗增大；
脆断危险性提高。

2 对物理、化学性能的影响

导电率、导磁率下降，比重、热导率下降；
结构缺陷增多，扩散加快；
化学活性提高，腐蚀加快。

三 残余应力 (约占变形功的 10%)

- 1 分类
 - 第一类残余应力 ()：宏观内应力，由整个物体变形不均匀引起。
 - 第二类残余应力 ()：微观内应力，由晶粒变形不均匀引起。
 - 第三类残余应力 ()：点阵畸变，由位错、空位等引起。 80-90%。
- 2 利弊
 - 利：预应力处理，如汽车板簧的生产。
 - 弊：引起变形、开裂，如黄铜弹壳的腐蚀开裂。
- 3 消除：去应力退火。

第八章 回复与再结晶

第一节 冷变形金属在加热时的组织与性能变化

一 回复与再结晶

回复：冷变形金属在低温加热时，其显微组织无可见变化，但其物理、力学性能却部分恢复到冷变形以前的过程。

再结晶：冷变形金属被加热到适当温度时，在变形组织内部新的无畸变的等轴晶粒逐渐取代变形晶粒，而使形变强化效应完全消除的过程。

二 显微组织变化 (示意图)

回复阶段：显微组织仍为纤维状，无可见变化；

再结晶阶段：变形晶粒通过形核长大，逐渐转变为新的无畸变的等轴晶粒。

晶粒长大阶段：晶界移动、晶粒粗化，达到相对稳定的形状和尺寸。

三 性能变化

1 力学性能 (示意图)

回复阶段：强度、硬度略有下降，塑性略有提高。

再结晶阶段：强度、硬度明显下降，塑性明显提高。

晶粒长大阶段：强度、硬度继续下降，塑性继续提高，粗化严重时下降。

2 物理性能

密度：在回复阶段变化不大，在再结晶阶段急剧升高；

电阻：电阻在回复阶段可明显下降。

四 储存能变化 (示意图)

1 储存能：存在于冷变形金属内部的一小部分 (~ 10%) 变形功。

弹性应变能 (3 ~ 12%)

2 存在形式

- 位错 (80 ~ 90%)
- 点缺陷

是回复与再结晶的驱动力

3 储存能的释放：原子活动能力提高，迁移至平衡位置，储存能得以释放。

五 内应力变化

回复阶段：大部分或全部消除第一类内应力，部分消除第二、三类内应力；

再结晶阶段：内应力可完全消除。

第二节 回复

一 回复动力学 (示意图)

1 加工硬化残留率与退火温度和时间的关系

$$\ln(x_0/x) = c_0 \exp(-Q/RT)$$

x_0 - 原始加工硬化残留率；

x - 退火时加工硬化残留率；

c_0 - 比例常数；

t - 加热时间；

T - 加热温度。

2 动力学曲线特点

(1) 没有孕育期；

(2) 开始变化快，随后变慢；

(3) 长时间处理后，性能趋于平衡值。

二 回复机理

- 1 低温回复：点缺陷运动 (0.1~0.2T_m)
 - 移至晶界、位错处
 - 空位 + 间隙原子 消失
 - 空位聚集 (空位群、对)
 缺陷密度降低
- 2 中温回复：位错滑移 (0.2~0.3T_m)
 - 异号位错相遇而抵消
 - 位错缠结重新排列
 - 亚晶粒长大
 位错密度降低
- 3 高温回复：位错攀移 (+ 滑移) (0.3~0.5T_m) 晶粒
 - 位错垂直排列 (亚晶界)
 - 弹性畸变能降低。
 - 多边化 (亚晶)

三 回复退火的应用

去应力退火：降低应力 (保持加工硬化效果)，防止工件变形、开裂，提高耐蚀性。

第三节 再结晶

- 1 形核
 - 亚晶长大形核机制 (变形量较大时)
 - 晶界凸出形核 (晶界弓出形核，凸向亚晶粒小的方向) (变形量较小时)
 - 亚晶合并形核
 - 亚晶界移动形核 (吞并其它亚晶或变形部分)
 - 2 长大
 - 驱动力：畸变能差
 - 方式：晶核向畸变晶粒扩展，直至新晶粒相互接触。
- 注：再结晶不是相变过程。

二 再结晶动力学 (示意图)

(1) 再结晶速度与温度的关系

$$V_{\text{再}} = A \exp(-Q_R/RT)$$

(2) 规律

开始时再结晶速度很小，在体积分数为 0.5 时最大，然后减慢。

三 再结晶温度

1 再结晶温度：经严重冷变形 (变形量 >70%) 的金属或合金，在 1h 内能够完成再结晶的 (再结晶体积分数 >95%) 最低温度。

- 2 经验公式
 - 高纯金属： $T_{\text{再}} = (0.25 \sim 0.35)T_m$ 。
 - 工业纯金属： $T_{\text{再}} = (0.35 \sim 0.45)T_m$ 。
 - 合金： $T_{\text{再}} = (0.4 \sim 0.9)T_m$ 。

注：再结晶退火温度一般比上述温度高 100 ~ 200 。

- 3 影响因素
 - 变形量越大，驱动力越大，再结晶温度越低；
 - 纯度越高，再结晶温度越低；
 - 加热速度太低或太高，再结晶温度提高。

四 影响再结晶的因素

- 1 退火温度。温度越高，再结晶速度越大。
- 2 变形量。变形量越大，再结晶温度越低；随变形量增大，再结晶温度趋于稳定；变形量低于一定值，再结晶不能进行。
- 3 原始晶粒尺寸。晶粒越小，驱动力越大；晶界越多，有利于形核。
- 4 微量溶质元素。阻碍位错和晶界的运动，不利于再结晶。
- 5 第二分散相。间距和直径都较大时，提高畸变能，并可作为形核核心，促进再结晶；直径和间距很小时，提高畸变能，但阻碍晶界迁移，阻碍再结晶。

五 再结晶晶粒大小的控制 (晶粒大小 - 变形量关系图)

再结晶晶粒的平均直径

$$d = k[G/N]^{1/4}$$

- 1 变形量（图）。存在临界变形量，生产中应避免临界变形量。
- 2 原始晶粒尺寸。晶粒越小，驱动力越大，形核位置越多，使晶粒细化。
- 3 合金元素和杂质。增加储存能，阻碍晶界移动，有利于晶粒细化。
- 4 温度。变形温度越高，回复程度越大，储存能减小，晶粒粗化；退火温度越高，临界变形度越小，晶粒粗大。

六 再结晶的应用

再结晶退火 {
恢复变形能力
改善显微组织
消除各向异性
提高组织稳定性
再结晶温度： $T_{再} + 100 \sim 200$ 。

第四节 晶粒长大

驱动力：界面能差；

长大方式：正常长大；异常长大（二次再结晶）

一 晶粒的正常长大

- 1 正常长大：再结晶后的晶粒均匀连续的长大。
- 2 驱动力：界面能差。界面能越大，曲率半径越小，驱动力越大。
- 3 晶粒的稳定形状 {
晶界趋于平直
晶界夹角趋于 120°
二维坐标中晶粒边数趋于 6
- 4 影响晶粒长大的因素
 - (1) 温度。温度越高，晶界易迁移，晶粒易粗化。
 - (2) 分散相粒子。阻碍晶界迁移，降低晶粒长大速率。一般有晶粒稳定尺寸 d 和第二相质点半径 r 、体积分数 V_v 的关系： $d = 4r/3$ ？
 - (3) 杂质与合金元素。降低界面能，不利于晶界移动。
 - (4) 晶粒位向差。小角度晶界的界面能小于大角度晶界，因而前者的移动速率低于后者。

二 晶粒的异常长大

- 1 异常长大：少数再结晶晶粒的急剧长大现象。
钉扎晶界的第二相溶于基体
- 2 机制 再结晶组织中位向一致晶粒的合并
大晶粒吞并小晶粒
- 3 对组织和性能的影响 {
组织明显
晶粒大小不均 { 各向异性
性能不均
晶粒粗大 { 降低强度和塑韧性
提高表面粗糙度

三 再结晶退火的组织

- 1 再结晶图。退火温度、变形量与晶粒大小的关系图。（图）
- 2 再结晶组织。再结晶退火后形成的组织。退火可将形变组织消除，也可形成新组织。
- 3 退火孪晶。再结晶退火后出现的孪晶。是由于再结晶过程中因晶界迁移出现层错形成的。

第五节 金属的热变形

一 动态回复与动态再结晶

- 1 动态回复：在塑变过程中发生的回复。
- 2 动态再结晶：在塑变过程中发生的再结晶。
包含亚晶粒，位错密度较高
特点 反复形核，有限长大，晶粒较细
应用：采用低的变形终止温度、大的最终变形量、快的冷却速度可获得细小晶粒。

二 金属的热加工

- 1 加工的分类 {
冷加工：在再结晶温度以下的加工过程。发生加工硬化。
热加工：在再结晶温度以上的加工过程。硬化、回复、再结晶。
- 2 热加工温度： $T_{再} < T_{热加工} < T_{固} - 100 \sim 200$ 。
- 3 热加工后的组织与性能
 - (1) 改善铸锭组织。 气泡焊合、 破碎碳化物、 细化晶粒、 降低偏析。 提高强度、 塑性、 韧性。

（2）形成纤维组织（流线）。

组织：枝晶、偏析、夹杂物沿变形方向呈纤维状分布。

性能：各向异性。沿流线方向塑性和韧性提高明显。

（3）形成带状组织

形成：两相合金变形或带状偏析被拉长。

影响：各向异性。

消除：避免在两相区变形、减少夹杂元素含量、采用高温扩散退火或正火。

4 热加工的优点

（1）可持续大变形量加工。

（2）动力消耗小。

（3）提高材料质量和性能

三 超塑性

1 超塑性：某些材料在特定变形条件下呈现的特别大的延伸率。

2 条件：晶粒细小、温度范围（ $0.5 \sim 0.65T_m$ ）、应变速率小（ $1 \sim 0.01\%/s$ ）。

3 本质：多数观点认为是由晶界的滑动和晶粒的转动所致。

第九章 固态相变

第一节 概述

一 固态相变的特点

1 相变阻力大 { 界面能增加
额外弹性应变能：比体积差
扩散困难（新、旧相化学成分不同时） } 固态相变困难

2 新相晶核与母相之间存在一定的晶体学位向关系

* 新相的某一晶面和晶向分别与母相的某一晶面、晶向平行。

界面类型 { 共格 ...
半共格 ...
非共格 ... } 为降低界面能，形成共格、半共格界面 位向关系 →

3 惯习现象

* 新相沿特定的晶向在母相特定晶面上形成。

惯习方向 （母相）惯习面

原因：沿应变能最小的方向和界面能最低的界面发展。

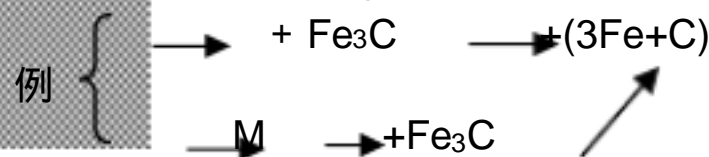
4 母相晶体缺陷促进相变

缺陷类型 { 点 ...
线 ...
面 ... } 晶格畸变、自由能高，促进形核及相变。
(思考：晶粒细化对相变的影响)

5 易出现过渡相

* 固态相变阻力大，直接转变困难

协调性中间产物（过渡相）



二 固态相变的分类

1 按相变过程中原子迁移情况

（1）扩散型：依靠原子的长距离扩散；相界面非共格。

（如珠光体、奥氏体转变，Fe, C 都可扩散。）

（2）非扩散型：旧相原子有规则地、协调一致地通过切变转移到新相中；相界面共格、原子间的相邻关系不变；化学成分不变。

（如马氏体转变，Fe, C 都不扩散。）

（3）半扩散型：既有切变，又有扩散。

（如贝氏体转变，Fe 切变，C 扩散。）

2 按相变方式分类

(1) 有核相变：有形核阶段，新相核心可均匀形成，也可择优形成。大多数固态相变属于此类。

(2) 无核相变：无形核阶段，以成分起伏作为开端，新旧相间无明显界面，如调幅分解。

3 按热力学函数变化分类

(1) 一级相变：相变时两相的化学位相等，而化学位对温度及压力的一阶偏微分 ($-S, V$) 不等的相变。伴随潜热的释放和体积的改变。如蒸发、升华、熔化以及大多数固态晶型转变属于此类。

(2) 二级相变：相变时两相的化学位相等，化学位的一阶偏微分也相等，但二阶偏微分不相等的相变。没有相变潜热和体积改变，有比容、压缩系数、膨胀系数变化，如磁性转变、有序-无序转变、超导转变等属于此类。

三 常见固态相变类型

相变名称	相变特征
同素异构转变	同一种元素通过形核与长大发生晶体结构的变化
多型性转变	合金中晶体结构的变化
脱溶转变	过饱和固溶体脱溶分解出亚稳定或稳定的第二相
共析转变	一个固相转变为两个结构不同的固相
包析转变	两个不同结构的固相转变为一个新的固相，组织中一般有某相残余
马氏体转变	新旧相之间成分不变、切变进行、有严格位向关系、有浮凸效应
贝氏体转变	兼具马氏体和扩散转变的特点，借助铁的切变和碳的扩散进行
调幅分解	非形核转变，固溶体分解成结构相同但成分不同的两相
有序化转变	合金元素原子从无规则排列到有规则排列，但结构不变。

第二节 固态相变的形核与长大

一 均匀形核 (能量条件)

1 形核时的能量变化

(1) 化学自由能 (体积自由能, G_v)

相变驱动力

$G_v \sim T$ 曲线

随成分变化

(2) 界面能 (σ , S)

相变阻力

取决于界面结构

(与过冷度有关)

T 越大, 晶核越小, S 大

T 越小, 晶核越大, S 小

共格/半共格

非共格

(3) 应变能 (ϵ , V)

相变阻力

分类

共格应变能: 共格大, 半共格小, 非共格 0

体积应变能

比体积差

新相几何形状

球状最大

片状最小

针状居中

2 形核的能量条件

$$G = -V \quad G_v + S + V < 0$$

$$r_k = 2 / (G_v -)$$

$$G_k = 16 / 3 (G_v -)^2$$

二 非均匀形核 (能量条件)

(固态相变均匀形核的可能性很小, 非均匀形核 (依靠晶体缺陷) 是主要的形核方式。)

1 不同晶体缺陷对形核的作用

(1) 晶界形核

能量高, 降低 G_k

结构混乱, 降低

易扩散、偏析, 利于扩散相变

新相/母相形成共格、半共格界面降低界面能

母相晶粒 1

非共格界面

母相晶粒 2

共格或半共格界面

- (2) 位错形核 { 新相生成处位错消失，能力释放，提高驱动力
..... 位错不消失，可作为半共格界面的形成部分
易于发生偏聚，有利于成分起伏
易于扩散，有利于发生扩散型相变
- (3) 空位形核 { 促进扩散
新相生成处空位消失，提供能量
空位群可凝结成位错
(在过饱和固溶体的脱溶析出过程中，空位作用更明显。)

2 非均匀形核的能力变化

$$G = -V \quad G_v + S \quad + V \quad - \quad G_D$$

G_D - 晶体缺陷导致系统降低的能量。

三 晶核的长大

- 1 长大机制 { 切变长大
(1) 半共格界面 { 台阶式长大
(2) 非共格界面 { 原子直接迁移
原子迁移至新相台阶端部
- 2 新相长大速度 { 新相生成时无成分变化（有结构、有序度变化）
(1) 界面控制长大 { $u = \exp(-Q/kT)[1 - \exp(-G_v/kT)]$
(2) 扩散控制长大 { 新相生成时有成分变化
 $u = dx/dt = (D/C_0 - C) / (C_0 - C)$
(3) 相变动力学 $f = 1 - \exp(-bt^n)$

第十章 金属材料

工业用钢、铸铁和有色金属及其合金构成了国民经济建设所必须的全部金属材料。尽管高分子材料、陶瓷材料和复合材料的应用日益广泛，但金属材料仍然是应用最广泛、用量最大的工程材料。随着现代工业的发展和科学技术的进步，对金属材料的性能要求会越来越高，新型金属材料将会不断出现。

10.1 基本要求

10.1.1 工业用钢

1.熟悉钢的分类和编号，能鉴别钢号。

2.熟悉合金元素在钢中的作用和典型钢号中合金元素的作用。

3.掌握常用工业用钢的化学成分、热处理特点（或使用状态）、使用态组织、主要性能特点及应用。

要性能

10.1.2 铸铁

1.熟悉铸铁的分类和铸铁的石墨化。

2.熟悉常用铸铁的牌号、组织、性能特点及应用。

3.了解铸铁的热处理特点及常用热处理工艺。

10.1.3 有色金属及其合金

1.熟悉铝合金的分类和编号、铝合金的时效强化、典型铝合金的组织与性能特点。

2.熟悉铜合金的分类和编号、了解黄铜的组织及性能特点。

10.2 内容提要

10.2.1 重要名词

合金元素	alloying element
结构钢	construction steel
工具钢	tool steel
不锈钢	stainless steel
奥氏体不锈钢	austenitic stainless steel
回火稳定性	temper stability
二次硬化	secondary hardening
调质钢	quenched and tempered steel
渗碳钢	carburized steel
弹簧钢	spring steel
滚动轴承钢	ball-bearing steel
高速钢	high-speed steel
热模具钢	hot die steel
晶间腐蚀	intergranular corrosion
耐热钢	heat-resisting steel
耐磨钢	wear-resisting steel
时效强化	age hardening

10.2.2 工业用钢

1.钢的分类和编号。

2.合金元素在钢中的作用。

（1）合金元素对基本相的影响。

碳钢在室温下的基本相是铁素体和渗碳体。合金元素可溶入铁素体中强化铁素体，若含量适当，仍可保持铁素体较好的韧性。碳化物形成元素与碳相互作用，可形成合金渗碳体、间隙化合物和间隙相等，它们的稳定性、硬度、耐磨性均高于渗碳体，而聚集长大的倾向比渗碳体小。

（2）合金元素对 Fe-Fe₃C 相图的影响。

凡是扩大 δ 区的元素均扩大奥氏体区，使 A_1 、 A_3 降低。当合金元素含量达到一定值时，奥氏体区将扩大到室温，得到奥氏体钢。

凡是缩小 δ 区的元素均缩小奥氏体，使 A_1 、 A_3 升高。当合金元素含量达到一定值时，奥氏体区将消失，得到铁素体钢。

合金元素加入钢中，会使 S 点和 E 点向左移动。S 向左移动意味着共析点的含量下降；E 点向左移动意味着出现莱氏体的含碳量减少。

总之，合金元素改变了平衡条件下的相变规律和平衡组织，从而改变了性能。

（3）合金元素对钢加热转变的影响

除 Mn、Ni 外，大多数合金元素升高临界点，减慢奥氏体的形成速度，因而合金钢要获得较均匀的奥氏体，需更高的加热温度和较长的保温时间。

除 Mn、P、N 外，大多数合金元素都能细化奥氏体晶粒，从而改善强度和韧性。

（4）合金元素对钢冷却转变的影响。

除 Co 外，大多数合金元素溶入奥氏体中后，能增加奥氏体的稳定性，使 C 曲线向右移动，提高钢的淬透性。另外，还会降低 M_s 点，增加残余奥氏体量。

（5）合金元素对回火转变的影响。

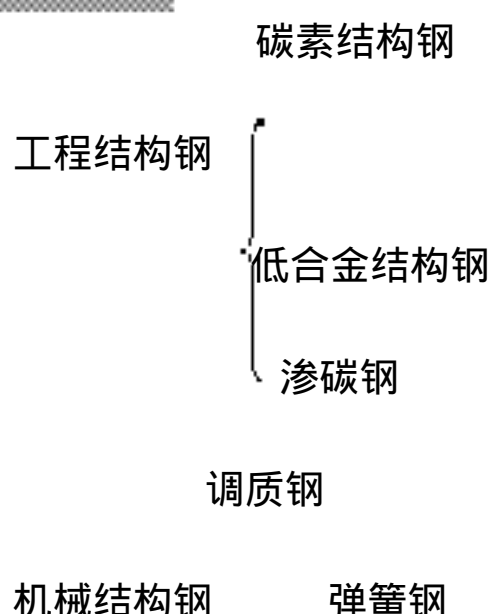
合金元素提高回火稳定性，有利于提高综合力学性能。

含 Cr、Mn、Ni 等元素的合金钢会产生第二类回火脆性，而 Mo 和 W 有抑制和减轻第二类回火脆性的倾向。

某些高合金钢会产生二次硬化现象。

3. 结构钢

按用途，结构钢可分为两大类：工程结构钢和机械结构钢。



滚动轴承钢

常用结构钢的主要性能要求、化学成分、典型牌号、最终热处理或使用状态、组织见表 10-1。

表 10-1 常用结构钢

钢种	工程结构钢		渗碳钢	调质钢	弹簧钢	滚动轴承钢
用途举例	桥梁、船体、容器		汽车、拖拉机变速齿轮	机床主轴 机床齿轮 连杆螺栓	弹簧、各类弹性元件	滚动轴承部件
主要性能要求	较高的刚度、强度，较好的塑性、韧性，良好的工艺性，较小的冷脆倾向，一定的耐腐蚀性		表层硬而耐磨，心部较高的韧性和足够的强度	良好的综合力学性能，足够的淬透性，有时要求表面耐磨	高的弹性极限和屈服比，高的疲劳极限，足够的塑性、韧性	高的接触疲劳强度，高硬度和耐磨性，足够的韧性
含碳量	<0.4%	0.2%~0.25%	0.10~0.25%	0.3~0.5%	0.7~0.9% 0.5~0.7%	0.9~1.1%
合金元素		Mn、V、Ti、Nb	Cr、Mn、Ni、B、Ti、V	Cr、Mn、Ni、Si、B V、Ti、W、Mo	Cr、Mn、Si W、V、	Cr Mn、Si
典型牌号	Q235	Q345 (16Mn)	20Cr 20CrMnTi 18CrZNi4WA	45 40Cr 40CrNiMo 38CrMoAlA	T8A 65Mn 60SiZMn 50CrVA	GCr15 GCr15SiMn
最终热处理	一般为热轧空冷状态		渗碳、淬火，低温回火	调质处理 调质+表面淬火低温回火	一般为淬火中温回火	淬火 低温回火

使用状态组织	一般为铁素体 + 索氏体	表层：回火马氏体 + 碳化物 + 残余 心部：回火马氏体或铁素体 + 珠光体型	回火索氏体 表层：回火马氏体 心部：回火索氏体	回火屈氏体	回火马氏体 + 碳化物 + 残余奥氏体
--------	--------------	--	-------------------------------	-------	---------------------

4. 工具钢

按用途，工具钢可分为三大类：刃具钢、模具钢和量具钢。常用工具钢的化学成分、典型牌号、最终热处理、组织、性能特点和用途举例见表 10-2。

表 10-2 常用工具钢

钢种	刃具钢			冷模具钢	热模具钢
	碳素工具钢	低合金工具钢	高速钢	高碳高铬钢	
含碳量	0.65-1.35%	0.75-1.6%	0.7-1.6%	1.2-2.3%	0.3-0.6%
合金元素		Cr、W、V、Mn、Si	W、Mo、Cr、V	Cr、Mo、W、V	Cr、Mn、Ni、Mo
典型牌号	T7 (A)-12(A)	9SiCr CrWMn	W18Cr4V W6Mo5Cr4V2	Cr12 Cr12MoV	5CrNiMo 5CrMnMo
最终热处理	淬火、低温回火	淬火、低温回火	高温淬火 560 三次回火	一般采用淬火、低温回火	淬火、中温回火或高温回火
组织	回火马氏体 + 或回火马氏体 + 碳化物 +	回火马氏体 + 细小碳化物 + 残余奥氏体	回火马氏体 + 碳化物 + 残余奥氏体	回火马氏体 + 碳化物 + 残余奥氏体	回火屈氏体或回火索氏体
主要性能特点	高硬度和耐磨性，淬透性差，红硬性差，淬火变形开裂倾向大。	硬度、耐磨性、淬透性均比碳工钢好，淬火变形小	良好的红硬性，高的硬度、耐磨性，高的淬透性	很高的耐磨性和淬透性，热处理变形小	高温下有较高的强度和韧性，足够的硬度和耐磨性，良好的耐热疲劳性，高的淬透性
用途举例	简单车刀、手锤、锉刀等	丝锥、板牙、拉刀等	各种高速切削刀具等	冷冲模、冷挤压模等	热锻模等

5. 特殊性能钢

特殊性能钢可分为三大类：不锈钢、耐热钢和耐磨钢。

(1) 不锈钢

提高耐蚀性的途径

- A、加 Cr，提高基体的电极电位。
- B、加 Cr、Al、Si，形成致密的钝化膜。
- C、加 Cr、Ni 等，使其形成单相组织。

典型马氏体不锈钢和奥氏体不锈钢见表 10-3。

（2）耐热钢

耐热性

耐热性是指高温抗氧化性和热强性（高温强度），热强性用蠕变极限（ $\sigma_{700}^{0.1/1000}$ ）和持久强度（ σ_{1000}^{600} ）来表征。

提高耐热性的途径

- A、加 Cr、Si、Al，形成致密的氧化膜，提高高温抗氧化性。
- B、通过加合金元素提高原子间结合力，提高再结晶温度、减慢原子的扩散、增加组织的稳定性来提高热强性。

按组织可分为：铁素体型耐热钢、珠光体型耐热钢、马氏体型耐热钢和奥氏体型耐热钢。

（3）耐磨钢

耐磨钢是指在受到强烈摩擦、冲击或巨大压力时，表现出良好耐磨性的钢种。

典型耐磨钢是高锰钢，牌号为 ZGMn13，其化学成分、热处理、组织、性能特点及用途举例见表 10-3。

表 10-3 特殊性能钢

钢种	马氏体不锈钢		奥氏体不锈钢	耐磨钢
典型牌号	1Cr13 2Cr13	3Cr13 4Cr13	1Cr18Ni9 1Cr18Ni9Ti	ZGMn13
含碳量	0.1-0.2%	0.3-0.4%	0.12% 1.0-1.4%	
合金元素及作用	Cr：提高基体电极电位，形成钝化膜，从而提高耐蚀性		Cr：提高基体电极电位，形成钝化膜。 Ni：使其呈单相奥氏体。 Ti：防止晶间腐蚀	Mn：使其能获得单相奥氏体；增大钢的加工硬化能力和韧性

最终热处理	淬火	淬火	固溶处理	水韧处理
组织	高温回火 回火索氏体	低温回火 回火马氏体	奥氏体	奥氏体
性能特点	较好的耐蚀性，较高的强度和韧性	较好的耐蚀性，较高的硬度和耐磨性	良好的耐蚀性、塑性、韧性，良好的冷成型性的焊接性，加工硬化能力强，不能淬火强化，强度较低，有时产生晶间腐蚀	在受到强烈摩擦、冲击和巨大压力时表现出良好的耐磨性和韧性
用途举例	结构零件，如汽轮机叶片等	医疗器械、刀具等	化工焊接件、耐酸容器、锅炉汽轮机耐热构件等	拖拉机履带、挖掘机铲齿、铁路道叉

11.2.3 铸铁

1. 铸铁的分类

2. 铸铁的石墨化

（1）铸铁的石墨化过程

第一阶段包括从液态铁水中直接析出石墨以及从奥氏体中析出二次石墨；

第二阶段包括共析转变过程中形成的石墨。

（2）铸铁的石墨化程度与组织的关系见表 10-4。

表 10-4 共晶铸铁的石墨化程度与组织的关系

石墨化程度		得到的组织	铸铁名称
第一阶段	第二阶段		
完全石墨化	完全石墨化	铁素体 + 石墨	灰口铸铁
	未石墨化	珠光体 + 石墨	
	部分石墨化	铁素体 + 珠光体 + 石墨	
未石墨化	未石墨化	莱氏体	白口铸铁
部分石墨化	未石墨化	珠光体 + 二次渗碳 + 石墨 + 莱氏体	麻口铸铁

（3）影响石墨化的因素

3. 石墨对铸铁性能的影响

石墨一方面破坏了基体的连续性，减少了实际承载面积；另一方面石墨边缘成应力集中，形成断裂源。因此铸铁的抗拉强度、塑性、韧性都比钢低。

会造

片状石墨对基体削弱作用和应力集中程度最大，而球状石墨对基体的削弱作用应力程度较小。

用和

石墨的数量、大小和分布对铸铁性能也有显著影响。

4. 常用普通铸铁的牌号、组织、性能特点和用途举例见表 10-5。

5. 铸铁的热处理

（1）热处理只改变基体组织，不改变石墨形状，其热处理原理与钢相似。

（2）灰口铸铁常用热处理有：去应力退火，消除白口、改善切削加工性的退火、表面淬火。

（3）球墨铸铁中，石墨呈球状，基体强度利用率高，因而热处理强化效果好，可进行多种热处理来提高性能。常用热处理有：退火、正火、调质处理和等温淬火等。

11.2.4 有色金属及其合金

1. 铝及其合金

（1）铝合金的分类和编号

（2）铝合金的时效强化

表 10-5 常用普通铸铁的牌号、组织、性能特点及用途举例

种类	牌号表示方法	组织	性能特点	用途举例
灰口铸铁	HT × × ×	+片状石墨 +片状石墨 P +P+片状石墨	抗拉强度、塑性韧性低，抗压强度高。 良好的铸造性，切削加工性、减摩性、消震性和低的缺口敏感性	机床床身 底座、工作台等
可锻铸铁	KHT × × × - × × KTZ × × × - × ×	+团絮状石墨 P+团絮状石墨	比灰口铸铁具有较高的抗拉强度、塑性和韧性	汽车后桥外壳、低压阀、管接头、连杆等截面尺寸较小的零部件
球墨铸铁	QT × × × - × ×	+球状石墨 P+球状石墨 + P+球状石墨 S _回 +球状石墨 B _下 +球状石墨	比其它铸铁有更高的抗拉强度、屈服强度、屈强比和更好的塑性、韧性，热处理强化效果好。	可制造负荷较大、受力复杂的机器零件，如柴油机曲轴、连杆、齿轮、缸套等
蠕墨铸铁	RuT × × ×	石墨呈蠕虫状	性能介于基体组织相同的灰铁和球铁之间	柴油机缸盖、气缸套、机床床身、液压阀等

（3）简单硅铝明的成分、组织、性能特点及用途

2. 铜及其合金

（1）铜合金的分类和编号

（2）单相黄铜与双相黄铜的成分、组织、性能特点及用途

3.轴承合金

- (1) 轴承合金的性能要求和组织要求
- (2) ZChSnSb11-6 的组织特点、性能特点及用途
- (3) 20 高锡铝基轴承合金的组织特点、性能特点及用途。

10.3 重点和难点

10.3.1 重点

工业用钢，包括：

- 1. 钢号的鉴别：根据钢的牌号判断钢的类别、碳和合金元素的大致含量。
- 2. 典型钢号中合金元素的作用。
- 3. 各类钢的化学成分、常用热处理或使用状态、使用态组织、主要性能特点和用途举例。
- 4. 根据工件的工作条件和性能要求选用合适的钢种。

10.3.2 难点

- 1. 钢的合金化原理
- 2. 铝合金的时效强化机理
- 3. 内容“零碎”，不易记忆

10.4 学习方法指导

1. 根据钢的牌号判断钢的类别时，可按下列步骤：

- (1) 先看牌号中是否有特殊标志，如 T12 中的“T”、GCr15 中的“G”
- (2) 再判断是否属于特殊性能钢，如 1Cr13、2Cr13、1Cr18Ni9、ZGMn13 等。
- (3) 根据含碳量的表示方法区分是属于结构钢还是工具钢。如果含碳量用两位数字表示，则可确定该钢属于结构钢。如果含碳量用一位数字表示或未标数字，则可确定该钢属于工具钢。
- (4) 结构钢中，可根据含碳量的多少判断是渗碳钢、调质钢还是弹簧钢。有些不易分清的可重点记忆。
- (5) 工具钢中，含碳量若为中碳，则属于热模具钢；否则就是刃具钢或冷模具钢。

2. 工业用钢类别多，内容“零碎”，不易记忆。为解决此问题，可从两个方面：

一方面进行归纳总结，将“零碎”的内容要条理化；另一方面先按下面的思路进行理解，在理解的基础上再加以记忆。

含碳量

化学成分的选择

合金元素

典型件的工作条件 性能要求

组织 最终热处理

10.5 课堂讨论

典型零件的选材与热处理工艺的选用是学习本课程的主要目的之一。通过讨论，不仅使学生对钢的热处理、工业用钢等内容加深理解，而且也使学生在综合运用所学知识去分析解决问题方面得到一次训练。

9.5.1 讨论目的

- 1.熟悉钢的分类和编号，学会根据钢的牌号来判断钢的类别、碳和合金元素的大致含量。
- 2.熟悉典型钢号中合金元素的作用。
- 3.进一步理解和掌握各类钢的工作条件和性能要求、化学成分、最终热处理或使用状态、使用态组织和用途。

9.5.2 讨论题

- 1.试判断下列牌号的钢中碳和合金元素的含量大致是多少？

20 T10 50CrVA 9SiCr
CrWMn Cr12MoV 5CrMnMo 4Cr13

- 2.说明下列钢号中合金元素的主要作用

40Cr 20CrMnTi GCr15SiMn W18Cr4V
1Cr13 1Cr18Ni9 CrWMn 40CrNiMo

- 3.判断下列牌号的钢属于何类钢（按用途分）？指出各类钢常用的最终热处理或使用状态、使用态组织、主要性能特点和用途。

Q235 20Cr 20CrMnTi 45 ZGMn13

40CrNiMo 65 60Si2Mn 65Mn GCr15

GCr15SiMn T12 9SiCr CrWMn W18Cr4V

W6Mo5Cr4V2 5CrNiMo 1Cr13 3Cr13 1Cr18Ni9

- 4.根据下面所列出的化学成分，写出钢的牌号，并指出其常用最终热处理、使用态组织、主要性能特点和用途。

- 5.欲制造车床主轴、机床变速齿轮、汽车变速齿轮、汽车板簧、轴承滚珠、高速车刀、热锻模，试问上述零件或工具各应选用何种材料？写出其牌号。在制造过程中各需经过何种最终热处理？热处理后得到何种组织？

6. 渗碳钢适宜制作何种工作条件下的零件？为什么渗碳钢均为低碳？渗碳后为什么还要淬火、低温回火？
7. 调质钢适宜制作何种工作条件下的零件？为什么调质钢均为中碳？
8. 比较结构钢和工具钢的合金化特点和热处理特点。
9. W18Cr4V 钢中，W、Cr、V 的主要作用是什么？该钢为什么是莱氏体钢？为什么就可获得马氏体组织？其最终热处理为何要采用高温淬火 +560 三次回火？
10. 判断下列说法是否正确，并说明理由。
- (1) GCr15 钢中， $W_{Cr}=15\%$
 - (2) 热模具钢属于工具钢，所以它一定是高碳钢。
 - (3) 奥氏体不锈钢不能通过淬火来强化。
 - (4) 4Cr13 属于过共析钢。
 - (5) ZGMn13 是耐磨钢，在任何条件下都会表现出良好的耐磨性。
 - (6) $\sigma_{0.1/1000}^{600}$ 表示耐热钢的持久强度。
 - (7) 调质钢制造零件过程中，必须要经过调质处理。
 - (8) 可锻铸铁可以锻造。
 - (9) 变形铝合金都能时效强化，而铸造铝合金都不能时效强化。
 - (10) 青铜是指铜和锡的合金。

综合题一：材料的结构

- 1 谈谈你对材料学科和材料科学的认识。
- 2 金属键与其它结合键有何不同，如何解释金属的某些特性？
- 3 说明空间点阵、晶体结构、晶胞三者之间的关系。
- 4 晶向指数和晶面指数的标定有何不同？其中有何须注意的问题？
- 5 画出三种典型晶胞结构示意图，其表示符号、原子数、配位数、致密度各是什么？
- 6 碳原子易进入 γ -Fe，还是 α -Fe，如何解释？
- 7 研究晶体缺陷有何意义？
- 8 点缺陷主要有几种？为何说点缺陷是热力学平衡的缺陷？
- 9 位错概念是在什么背景下提出的？其易动性是如何实现的？
- 10 试述位错的性质。
- 11 试述柏氏矢量的意义。
- 12 与位错有关的三个力的表达式各是什么？简述其求解原理。
- 13 柯氏气团是如何形成的？它对材料行为有何影响？
- 14 晶体中的界面有何共性？它对材料行为有何影响？

综合题二：凝固、相结构与相图

- 1 简述合金相的分类，固溶体与纯金属相比，有何结构、性能特点？
- 2 固溶体与纯金属的结晶有何异同？
- 3 试述匀晶系不平衡结晶的过程（平均成分线的形成、两种偏析）
- 4 分析共晶系合金典型的不平衡结晶组织及其形成原因。

- 5 试述含碳量对平衡组织和性能的影响（相含量、形态的变化）。
- 6 说明 三元相图的水平截面、垂直截面及投影图的应用。
- 7 分析两种合金平衡冷却过程，指出其室温组织。
- 8 指出 Fe-Fe₃C 相图中适合锻造、铸造、冷塑变、热处理加工的成分范围，说明原因。
- 9 什么是过冷？为何说过冷是凝固的必要条件？
- 10 分析界面结构和温度梯度对晶体生长形态的影响。
- 11 根据凝固理论，试述细化晶粒的基本途径。
- 12 判断不同温度下晶核半径与自由能变化关系曲线。
- 13 画图说明成分过冷的形成，成分过冷对晶体生长形状有何影响？
- 14 常见的铸锭缺陷有哪些？
- 15 液态金属凝固时需要过冷，那么固态金属熔化时是否需要过热？为什么？
- 16 谈谈你所了解的凝固新技术及其应用。

综合题三：扩散、塑变与再结晶

- 1 可不可以说扩散定律实际上只有一个，为什么？
- 2 渗碳为什么在奥氏体中而不在铁素体中进行？
- 3 在研究纯铁渗碳时，通常假定渗碳气氛的渗碳能力足以使奥氏体的溶碳量达到饱和，且渗碳开始工件表面可迅速获得一个恒定的表面浓度 C_s ，此浓度在整个过程中维持不变。
 - (1) 结合 Fe-Fe₃C 相图，分别画出纯铁在 930 和 800 渗碳时，渗碳铁棒的成分 - 距离曲线示意图。
 - (2) 选择温度低于 727，能否达到渗碳的目的，为什么？
- 4 试分析材料强化常用的方法、机制及适用条件。
- 5 为何晶粒越细、材料的强度越高，其塑韧性也越好？
- 6 何谓单滑移、多滑移和交滑移？画出三者滑移线的形貌。
- 7 试分析单晶体滑移和孪生变形的异同点。
- 8 某面心立方晶体的可动滑移系为 $(111)[110]$ 。
 - (1) 指出引起滑移的单位位错的柏氏矢量。
 - (2) 若滑移是由纯刃型位错引起的，试指出位错线的方向。
 - (3) 若滑移是由纯螺型位错引起的，试指出位错线的方向。
 - (4) 指出在上述 (2)、(3) 两种情况下滑移时位错线的滑移方向。
- 9 若单晶体铜的表面恰为 (100) ，假设晶体可以在各个滑移系上进行滑移，试分析表面上滑移线形貌。若晶体表面为 (111) 呢？
- 10 钨板在 1100 加工变形，锡板在室温下变形，它们的组织结构有何变化？
- 11 根据形变金属退火后晶粒尺寸与变形量关系示意图，
 - (1) 将一楔形铜片置于间距恒定的两轧辊间轧制，画出此铜片经完全再结晶后晶粒大小沿片长方向变化示意图。
 - (2) 一块纯锡板被子弹击穿，试画出弹孔周围组织变化示意图。
- 12 热加工和冷加工是如何划分的，分析热加工和冷加工过程中的组织与性能变化。
- 13 绘出第六章内容结构框图。
- 14 绘出第七章内容结构框图。
- 15 绘出第八章内容结构框图。

综合题四：固态相变与新型材料

- 1 固态相变与凝固两过程有何异同？
- 2 说明固态相变比液态材料结晶阻力大的原因。
- 3 说明晶体缺陷促进固态相变形核的原因。
- 4 描述脱溶转变的相变过程，并建立它与马氏体回火转变过程的联系。
- 5 再结晶和调幅分解是相变过程吗，为什么？
- 6 分析调幅分解的热力学条件。
- 7 试述马氏体高强度、高硬度的原因。
- 8 列表说明下列内容。

	形成条件	相变类型	组成相	亚结构	性能特点	形貌特征
P						
P		T				
		S				

M	板条 M
	片状 M
B	B _上
	B _下

9 画图说明 A-M 转变。

10 谈谈你对组织结构、加工工艺、化学成分和性能四者之间的关系。

11 简述复合材料增强原理。

12 简述复合材料界面结合类型，如何改善界面结合状态。

13 采用一定的方法（框图法、分枝法等）说明本书各章内容之间的联系。

一、名词解释

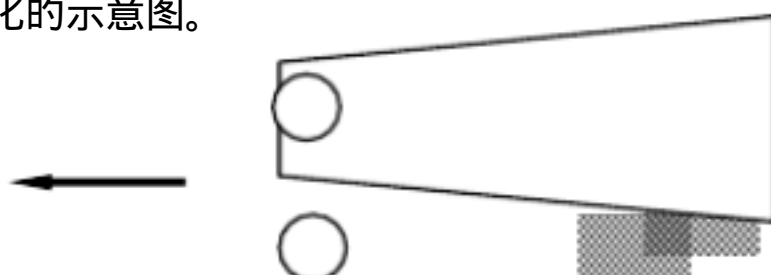
金属键；结构起伏；固溶体；枝晶偏析；奥氏体；加工硬化；离异共晶；成分过冷；热加工；反应扩散

二、画图

1 在简单立方晶胞中绘出 $(\bar{1}01)$ 、 (210) 晶面及 $[\bar{1}01]$ 、 $[210]$ 晶向。

2 结合 Fe-Fe₃C 相图，分别画出纯铁经 930 和 800 渗碳后，试棒的成分-距离曲线示意图。

3 如下图所示，将一楔形铜片置于间距恒定的两轧辊间轧制。试画出轧制后铜片经再结晶后晶粒大小沿片长方向变化的示意图。



4 画出简单立方晶体中 (100) 面上柏氏矢量为 $[010]$ 的刃型位错与 (001) 面上柏氏矢量为 $[010]$ 的刃型位错交割前后的示意图。

5 画图说明成分过冷的形成。

三、Fe-Fe₃C 相图分析

1 用组织组成物填写相图。

2 指出在 ECF 和 PSK 水平线上发生何种反应并写出反应式。

3 计算相图中二次渗碳体和三次渗碳体可能的最大含量。

四、简答题

1 已知某铁碳合金，其组成相为铁素体和渗碳体，铁素体占 82%，试求该合金的含碳量和组织组成物的相对量。

2 什么是单滑移、多滑移、交滑移？三者的滑移线各有什么特征，如何解释？

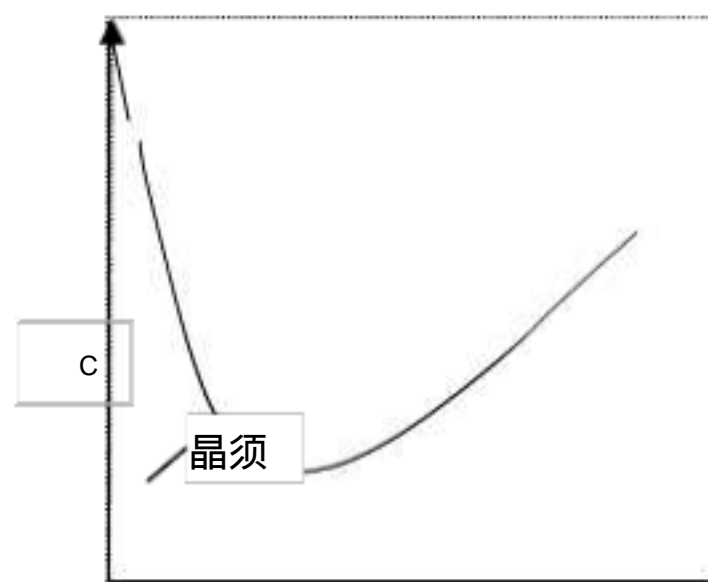
3 设原子为刚球，在原子直径不变的情况下，试计算 γ -Fe 转变为 α -Fe 时的体积膨胀率；如果测得 910 时 γ -Fe 和 α -Fe 的点阵常数分别为 0.3633nm 和 0.2892nm，试计算 γ -Fe 转变为 α -Fe 的真实膨胀率。

4 间隙固溶体与间隙化合物有何异同？

5 可否说扩散定律实际上只有一个？为什么？

五、论述题

结合右图所示的 σ （晶体强度）— ρ （位错密度）关系曲线，分析强化金属材料的方法及其机制。



六、拓展题

1 画出一个刃型位错环及其与柏氏矢量的关系。

2 用金相方法如何鉴别滑移和孪生变形？

3 固态相变为何易于在晶体缺陷处形核？

4 画出面心立方晶体中 (225) 晶面上的原子排列图。

冷塑变