

# 金属学原理复习提纲

——概念汇总：HNU 材料院 赵政

## 一，晶体学

掌握晶体结构、空间点阵、晶胞、晶系、点阵常数、晶面、晶向、晶面族、晶向族和晶面间距等基本概念；

了解晶体结构与空间点阵的联系与区别；

了解晶体的宏观特性；

熟练掌握晶面指数和晶向指数特别是六角晶系指数的的标定；

了解面间距和晶面夹角的计算以及晶带定理；

了解晶体对称性和晶体投影的相关概念以及理解晶体投影的意义。

- 晶体结构：实际原子在三维空间的规则排列。
- 空间点阵：阵点在三维空间的规则排列。
- 晶胞：表达空间点阵几何规律的基本空间单元。
- 晶向晶面：原子列表示的方向和原子组成的平面。
- 晶面晶向族：由于点阵对称性，某些非平行的晶面晶向经对称操作后会完全重合，在几何上表现为等价的系列晶面晶向。
- 晶体结构与空间点阵的联系与区别：都是不随时间变化的三维空间的规则排列，但空间点阵是晶体结构的几何抽象，空间点阵加上结构基元为晶体结构。
- 晶体宏观特性：
- 自限性：自发长成规则外形。
- 均匀性：任一部分的性质相同，课看做连续物体。
- 各向异性：晶体的不同方向上表现出不同性质。
- 对称性：对称操作可以让晶体重合的性质。
- 晶体投影意义：用二维平面图的方式清晰表达点阵中的方向和晶面间关系，利于晶面夹角测量，晶带轴的确定等。

## 二，晶体结构

熟悉三种典型金属晶胞中原子的排列形式，包括晶格常数与原子半径的关系、晶胞内原子数、配位数、致密度、四面体间隙和八面体间隙数目。

了解相、组织、固溶体、金属间化合物、固溶强化、置换固溶体、间隙固溶体、有序固溶体、电子化合物、间隙相和间隙化合物等基本概念；

掌握固溶体与金属间化合物的区别；

掌握间隙固溶体与间隙相及间隙化合物的联系和区别；

熟悉影响置换固溶体和间隙固溶体固溶度的因素；

了解金属间化合物的分类及形成控制因素。

结构	原子数	CN	致密度	四面体	八面体	滑移面	滑移系
BCC	2	8	0.68	12	6	{110}6	6*2
FCC	4	12	0.74	8	4	{111}4	4*3
HCP	6	12	0.74	12	6	(0001)	

- 相：材料中结构相同、成分和性能均一的组成部分。
- 组织：指用显微镜观察到的材料微观形貌的总称。
- 固溶体：晶体结构与其某一组元相同的相。元素间在固态下相互溶解相。置换，为溶质原子取代溶剂原子位置。间隙，占据溶剂原子间隙而非结点。两大特点：晶格畸变和微观不均匀性（溶质原子偏聚）。
- 固溶强化：固溶体的硬度、强度往往高于组成它的各组元，而塑性则较低，这种现象就称为固溶强化。
- 金属间化合物（或者称为“合金相”）：金属与金属，或金属与非金属(氮、碳、氢、硼、硅)之间形成的化合物总称为金属间化合物。一般硬而脆。
- 固溶体与合金相的区别：晶体结构是否和至少和某一组元结构相同。相同的为固溶体。
- 有序固溶体：在 X 射线衍射图上会有附加线条，也称为超点阵。短程有序固溶体在低于一定临界温度  $T_c$  的时候可能转变为长程有序，称为有序固溶体。

- 间隙化合物：属于原子尺寸因素化合物。晶体结构复杂。典型的结构有钢中的渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}$ 。

- 间隙相：属于原子尺寸因素化合物。晶体结构简单。等间隙相的金属原子  $M$  具有 FCC 结构。

- 间隙相及间隙化合物的联系和区别：

二者都是原子尺寸因素化合物。都是由过渡族元素( $M$ )与原子半径较小的元素( $X$ )，如  $C$ 、 $N$ 、 $B$ 、 $H$ 、 $O$  等所形成。二者都具有明显的金属特性，具有极高的熔点和硬度，是工业材料中常用的强化相。当非金属原子半径  $r_x$  与金属原子半径  $r_M$  之比  $\Delta r > 41\%$  时，形成结构简单的间隙相。当  $\Delta r < 41\%$  时，形成具有复杂结构的间隙化合物。因而二者在结构复杂性上有差别。间隙相  $\text{MX}$ 、 $\text{M}_4\text{X}$ 、 $\text{MX}_2$  等分子式类型，间隙化合物一般  $\text{M}_3\text{C}$ 、 $\text{M}_7\text{C}_3$ 、 $\text{M}_6\text{C}$  等类型。

- 影响置换固溶体固溶度的因素：

- 1、组元晶体结构。结构相同。
- 2、原子尺寸。 $\Delta r > 15\%$  时候溶解度很小。
- 3、电子浓度。最大溶解度与一定的极限电子浓度关联，超值形成合金相。
- 4、电化学因素。 $\Delta X$  电负性差值越大，形成化合物倾向越大，固溶度减小。

- 影响间隙固溶体固溶度的因素：溶质原子半径和溶剂晶体结构间隙大小。

- 金属间化合物（中间相）的分类及形成控制因素：

- 1、正常价化合物：服从原子价规律。具有较高的脆性和硬度。
- 2、电子化合物：电子浓度决定化合物晶体结构。不遵守化合价规律，形成以化合物为基的二次固溶体或者缺位固溶体。各组元以金属键结合。因而具有较强金属特性。
- 3、原子尺寸因素化合物。组元的结合受到原子尺寸因素的支配。当组元之间的原子半径差别很大时形成间隙相和间隙化合物。

### 三，相图

了解相、相平衡、组织、组织组成物、相律和杠杆定律等基本概念；

熟悉匀晶、共晶、共析和包晶等相图并能利用相图分析相应合金的结晶过程；

熟悉铁碳合金的平衡结晶过程及室温下所得到的组织，并能够应用杠杆定律进行相组成物和组织组成物相对含量计算；熟悉铁素体、奥氏体、珠光体、莱氏体和渗碳体等基本概念；

熟悉浓度三角形、直线法则、重心法则、单变量线、投影图、垂直截面和等温截面等基本概念；

能够运用三元相图投影图、垂直截面和等温截面分析三元合金随温度变化发生的相平衡转变及形成的组织组成物。

#### 四，固体中的扩散（不作重点考查）

熟悉自扩散、互扩散、柯肯达尔效应、上坡扩散、反应扩散、稳态扩散、非稳态扩散、扩散通量、空位扩散、间隙扩散、扩散常数、扩散系数、扩散激活能等基本概念；

了解扩散的真正驱动力；

运用菲克定律解决一些简单的扩散问题如渗碳等；

熟悉各种因素对扩散的影响。

- 固态扩散：在晶体中，原子快速热振动失稳后，跳跃到近邻的位置上去，导致物质的传输（传质过程），这种过程就是固态扩散。
- 柯肯达尔效应：在置换式固溶体中，由于两种原子以不同的速度相对扩散而造成标记面漂移的现象。
- 上坡扩散：溶质原子朝浓度梯度相反的方向迁移，即从低浓度区向高浓度区进行所谓“逆扩散”，使合金发生区域性的不均匀。例：晶界偏聚、沉淀相析出等。
- 稳态扩散：是指在扩散系统中，任一体积元在任一时刻，流入的物质质量与流出的物质质量相等，即任一点的浓度不随时间变化。
- 扩散激活能：杂质原子或者母体原子在固体（包括半导体）中扩散的激活能。固体中原子的扩散与温度有很大的关系，即扩散系数  $D$  与温度  $T$  之间存在：
- $D = D_0 \exp(-E_a/kT)$ ，其中  $E_a$  就是原子扩散的激活能。

扩散驱动力：化学位梯度。从搞化学位扩散的到低化学位。

#### ● 影响扩散因素：

- 1、温度和压力。温度升高空位浓度增大，高能原子增多。
- 2、组元特性。例如，原子尺寸差异大则扩散容易。原子间亲和力大则扩散难。
- 3、组元浓度。通过  $Q$  和  $D_0$  两个参数起作用的。
- 4、第三组元。与扩散物质的相互作用影响扩散。
- 5、晶体结构：
- 6、晶体缺陷。缺陷处空位密度高，激活能低。一般表面扩散激活能约为点阵扩散的 0.5 倍以下，晶界扩散、核位错扩散激活能是点阵扩散的 0.6~0.7。

## 五，凝固

熟悉过冷度、动态过冷度、结晶潜热、均匀形核、非均匀形核、形核功、临界晶核、临界形核功、能量起伏和结构起伏等基本概念；

掌握金属凝固的热力学条件、能量条件和结构条件；

了解均匀形核、非均匀形核时临界晶核半径和形核功的计算；

掌握及形核率和晶体长大速率与过冷度的关系；

了解成分起伏、平衡凝固、不平衡凝固、平衡分配系数、有效分配系数、枝晶偏析、伪共晶、离异共晶、非平衡共晶等基本概念；

了解单相固溶体合金凝固时固液界面前沿的溶质原子分布特点；

了解纯金属和合金界面生长稳定性与界面前沿液相中温度梯度和溶质分布关系；

理解成分过冷的形成及影响成分过冷的因素、成分过冷对组织形态的影响；

结合凝固理论说明生产实际问题如细化晶粒工艺。

- 过冷度： $\Delta T = T_m - T$ ，纯金属结晶温度  $T$  总低于平衡结晶温度  $T_m$ ，称为过冷。
- 动态过冷度： $T_k$ ，晶核要长大必须在界面有一定过冷度， $T_m - T_i = \Delta T_k > 0$ 。
- 结晶潜热：温度保持不变的情况下，单位质量的物质从液态转变到固态时所释放出的热量。
- 均匀形核：液态金属中靠自身的结构、能量起伏自发均匀地形成新相核心。  
非均匀形核：新相附于母相中某些现成固态表面（外来杂质或容器壁）形核。
- 形核功：形成半径为  $r_c$  的临界晶核时系统自由能的增加。
- 临界晶核：具有  $r_c$  尺寸的晶胚，长大时导致吉布斯自由能下降而成为实际的晶核，该晶胚称为临界晶核。
- 临界形核功：过冷度大于一定值时，才可能形核，这个过冷度称为形核临界过冷度。均匀形核的临界过冷度约为  $0.2T_m$ ，非均匀的为  $0.02T_m$ 。
- 能量起伏和结构起伏：在瞬时各微观体积的能量 or 结构不同，或某一微观体积不同瞬间的能量分布 or 结构不同。
- 金属凝固的热力学条件：过冷，即  $G_s < G_l$ 。
- 动态回复与结晶：提高金属变形温度在热变形的同时也发生回复与再结晶。

- 形核率和晶体长大速率与过冷度的关系：（I 为总形核率）

$$N_1 \propto \exp\left[-\frac{\Delta G_c}{kT}\right]$$

$$N_2 \propto \exp\left[-\frac{Q}{kT}\right]$$

$$I = K \exp\left[-\frac{\Delta G_c}{kT}\right] \exp\left[-\frac{Q}{kT}\right]$$

- 结合凝固理论说明生产实际问题如细化晶粒工艺

1. 冷速：冷速高，则过冷度大，形核率增加。
2. 变质处理：促进非均匀形核。
3. 加热温度（过热度）：过热导致非均匀形核速率下降，但可以提高过冷度使形核率增加，两者竞争。
4. 熔体振动：机械搅拌、电场、磁场、对流和超声波作用等。
5. 利用成分过冷效应，制造形核带，产生大量的等轴晶粒。

- 成分过冷：合金熔体的固液界面前沿中存在溶质偏聚 ( $K_0 < 1$ )，导致熔体熔点  $T_m$  的变化 (由相图的液相线决定，熔点随与界面距离变化)。当熔体中的实际温度低于  $T_m$  时产生的并且与界面前沿液体溶质浓度的分布有关的过冷称之为成分过冷。

- 影响成分过冷的因素：

- 1、合金性质，如液相线斜率，合金浓度， $K_0$  值等。
- 2、外界条件：实际温度梯度  $G$  越小，凝固速度越大，成分过冷倾向越大。

- 成分过冷对组织形态的影响

- 成分起伏：在熔融状态的合金中，在某一微区某一瞬时内浓度呈现不同于平均浓度的周期性变化的现象。亦可称为浓度起伏，成分涨落，浓度涨落等。成分起伏，结构起伏，能量起伏为金属形核的三个必备条件。

- 平衡凝固：固相和液相始终保持平衡成分，成分沿固相线和液相线变化。

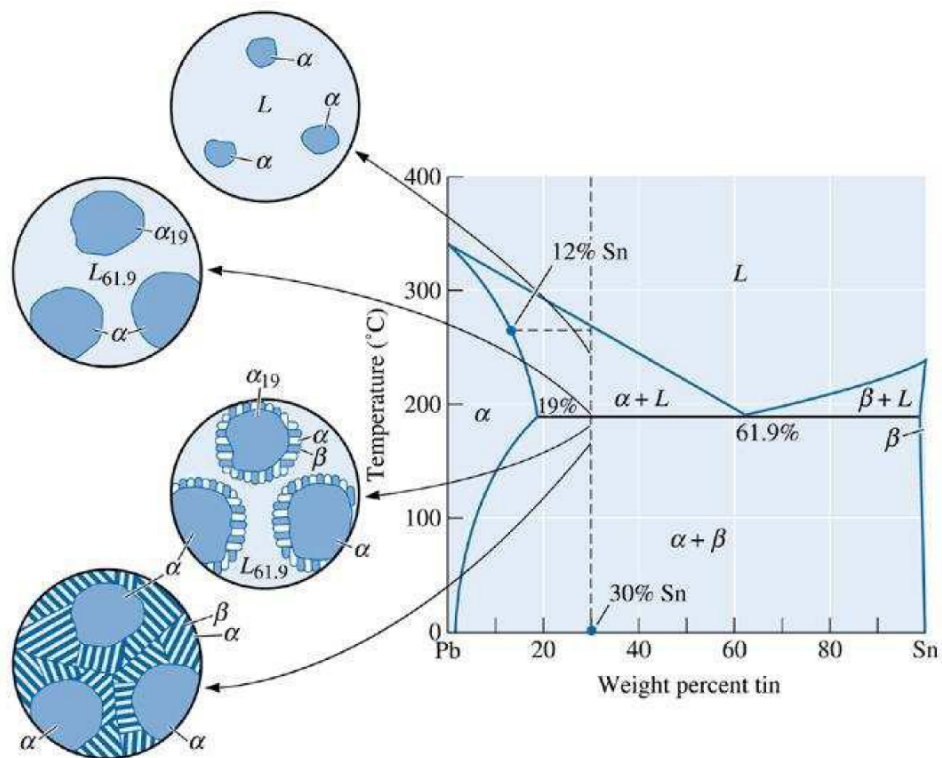
- 非平衡凝固：冷却速度较快，组元原子的扩散过程不能充分进行。

- 平衡分配系数、有效分配系数、枝晶偏析、

- 伪共晶：在不平衡的凝固条件下，成分在共晶点附近的亚共晶或过共晶凝固后可能形成的共晶组织。

- 离异共晶：成分接近相图上端际固溶体成分极限的亚共晶或过共晶合金，共晶中与先共晶相相同的一相依附在先共晶相上长大，丧失共晶形貌，容易得到离异共晶组织。
- 非平衡共晶：成分小于最大饱和溶解度的合金在非平衡凝固时容易得到少量的共晶组织，主要分布于  $\alpha$  相晶界或枝晶之间，称为非平衡共晶。可以通过长时间的均匀化扩散退火消除。

### ● 亚共晶平衡凝固





## ● 六，位错

了解晶体缺陷的基本类型和特征；

掌握位错线（刃型位错、螺型位错）与柏氏矢量、位错运动方向、晶体滑动方向与外加切应力之间的关系；

了解位错的应力场和应变能、位错的增殖以及交割（割阶与弯结）；

了解位错运动的方式（滑移、交滑移、攀移）；

掌握位错与位错、溶质原子和晶界的交互作用，从位错理论角度理解加工硬化、细晶强化、弥散强化和固溶强化等产生的原因；

熟悉单位位错、不全位错、堆垛层错、扩展位错和固定位错等基本概念。

- 交滑移：螺型位错从一个滑移面转到与其滑移面相交的另一滑移面上滑移。
- 攀移：刃型位错在垂直于位错滑动面上的运动称为位错攀移。通过物质迁移即原子或空位的扩散来实现。
- 割阶：位错线上垂直于原位错滑动面的曲折部分。
- 从位错理论角度解释加工硬化、细晶强化、弥散强化和固溶强化：
  - 1、细晶强化：通过细化晶粒而使金属材料力学性能提高的方法。晶粒细化导致晶界增多，而晶界上的原子排列不规则，杂质和缺陷多，能量较高，阻碍位错的通过，即阻碍塑性变形，也就实现了高强度。
  - 2、弥散强化：指一种通过在均匀材料中加入硬质颗粒的一种材料的强化手段。弥散强化的实质是利用弥散的超细微粒阻碍位错的运动，从而提高材料在高温下的力学性能。
  - 3、固溶强化：融入固溶体中的原子造成晶格畸变，晶格畸变增大了位错运动的阻力，使塑性变形更加困难，从而使合金固溶体的强度与硬度增加。这种通过形成固溶体使金属强化的现象称为固溶强化。
- 单位位错：柏氏矢量为单位点阵矢量整数倍的位错称为全位错。
- 不全位错：柏氏矢量不等于单位点阵矢量的位错称为不全(或部分)位错。不全位错必伴随有层错，为层错的边界线。
- 堆垛层错：是广义的层状结构晶格中常见的一种面缺陷。它是晶体结构层正常的周期性重复堆垛顺序在某二层间出现了错误，从而导致的沿该层间平面

（称为层错面）两侧附近原子的错误排布。

- 扩展位错：两个不全位错之间夹有一个层错的位错组态；或者说一个全位错分解为 2 个肖克莱不全位错，中间夹着一片层错的组合就叫做扩展位错。
- 固定位错：也称为洛玛位错，不能产生滑动的刃型位错。即该位错确定的滑移面在所在晶体结构当中不是对应的滑移面。

**1、 七，固态晶体的表面和界面（不作重点考查）**

了解面缺陷的分类；

了解晶界的分类、模型、特征、能量和运动；

了解相界的分类和结构特征；

了解界面形貌以及界面能对界面形貌的影响。

## 八，晶体的塑性形变

了解滑移、滑移系、滑移面、滑移方向、临界分切应力、多滑移、取向因子、形变带、扭折带、纤维组织、亚结构、加工硬化、孪生、变形织构等基本概念；

熟悉金属塑性变形的的基本方式及主要特点；

了解多晶体塑性变形的特点；

了解金属及合金塑性变形后的组织和性能变化以及这些变化的实际意义；

了解形变后残余内应力的存在形式及其影响。

- 滑移：外力作用下晶体沿某些特定的晶面和晶向相对滑开的形变方式。
- 滑移系：滑移方向和滑移面组成的体系。
- 交滑移：两个或多个滑移面共同按一个滑移方向滑移称为交滑移。交滑移形成的滑移带呈折线状。交滑移不是几个滑移系同时启动进行滑动，而是“顺序”滑动。
- 多滑移：当外力使得两个或两个以上滑移系的分切应力均达到临界分切应力值时，这些滑移系可以同时启动而发生多系滑移。
- 孪生：塑性变形的另一种方式，是均匀切变，每一层原子相对下层都产生相同距离切变，在密排六方金属中尤为重要。要求不全位错相继扫过每个层面。
- 形变带：扭折是塑性形变的一种方式，在滑移和孪生困难时发生。局部晶格沿某轴旋转形成扭折。在扭折带中包含大量不均匀堆积的滑移位错，
- 扭折带：晶体局部转动使晶体从单一的取向分裂成两种互补的取向的局部区域称为形变带。
- 加工硬化：金属材料在再结晶温度以下塑性变形时强度和硬度升高，而塑性和韧性降低的现象。作用机制如下：
  - 1、位错滑动和林位错交割产生阻力。
  - 2、林位错使 F-R 源启动产生割阶，带割阶的位错运动阻力更大。
  - 3、生成 L-C 不动位错阻碍位错运动。
  - 4、由局部应力场（短程交互作用）产生硬化。
- 变形织构：金属在冷加工变形过程中位向不同的晶粒发生转动，晶粒取向集中分布在某一个或某些取向附近的现象。

## 九，回复和再结晶

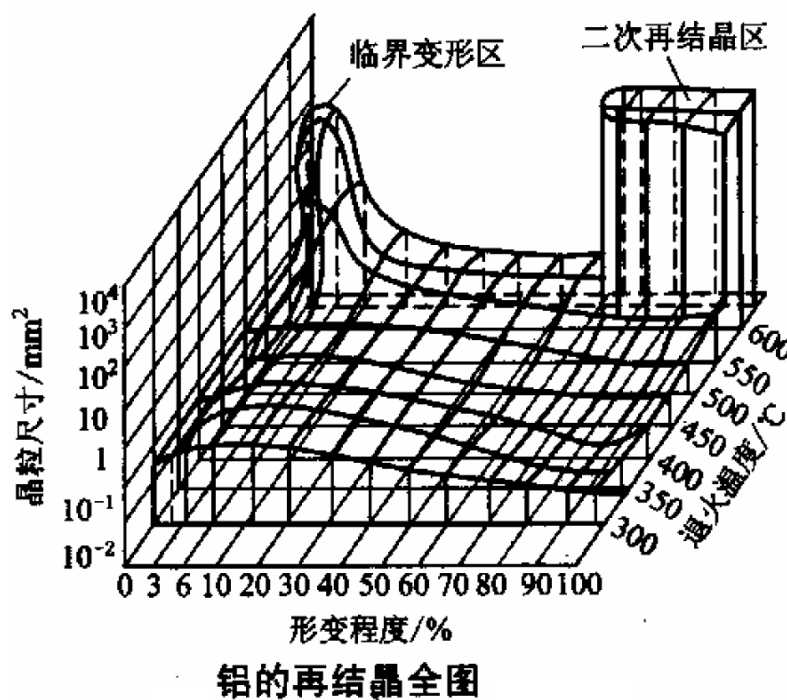
熟悉回复、多边形化、静态回复、动态回复、再结晶、二次再结晶、静态再结晶、动态再结晶、临界变形度、再结晶织构、晶粒正常长大和晶粒非正常长大等基本概念；

理解再结晶全图在生产上的意义；

了解再结晶过程的驱动力以及影响再结晶动力学过程的因素；

了解晶粒正常长大的原因、驱动力和晶粒非正常长大的特点。

- 再结晶：由冷变形的伸长晶粒变为新的等轴晶粒；力学性能发生急剧变化，恢复至变形前状态；变形储能全部释放。



一定温度下，再结晶晶

粒尺寸随变形度的增加而减小；一定变形程度下，随退火温度提高而增大。再结晶的驱动力为形变金属和合金中的储存能。相变的驱动力为新旧两相的摩尔吉布斯自由能之差。

- 二次再结晶：将再结晶完成后的金属继续加热至某一温度以上，或更长时间的保温，会有少数晶粒优先长大，成为特别粗大的晶粒，而其周围较细的晶粒则逐渐被吞食掉，整个金属由少数比再结晶后晶粒要大几十倍甚至几百倍的特大晶粒组成，尺寸可达数个 cm。又称二次再结晶。

- 回复：变形晶粒形态未发生任何变化，使变形引起的宏观残余内应力全部消除，微观残余内应力大部分消除，不涉及大角度晶界的迁移，通过点缺陷的消除、位错对消和重新排列等来实现。
  - 影响再结晶动力学过程的因素：
    - 1、 形变温度和速度——形变温度越高，变形速率越慢，则变形态合金中的储存能较低，再结晶速率下降。
    - 2、 退火条件：一定范围内延长加热时间可降低再结晶温度，提高再结晶速率。
- 晶粒正常长大：再结晶完成后，材料其实仍为到达最稳定状态。组织中含有晶界，为了减少总的界面能，晶粒力求长大。因而驱动力就是总界面能的降低。
- 特点如下：长大速度均匀，晶粒尺寸分布和形状分布几乎不变。