

1.2 铁碳合金

金属的晶体结构

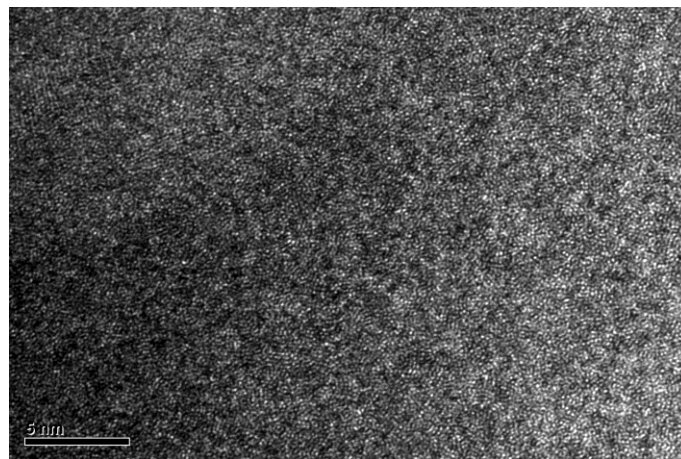
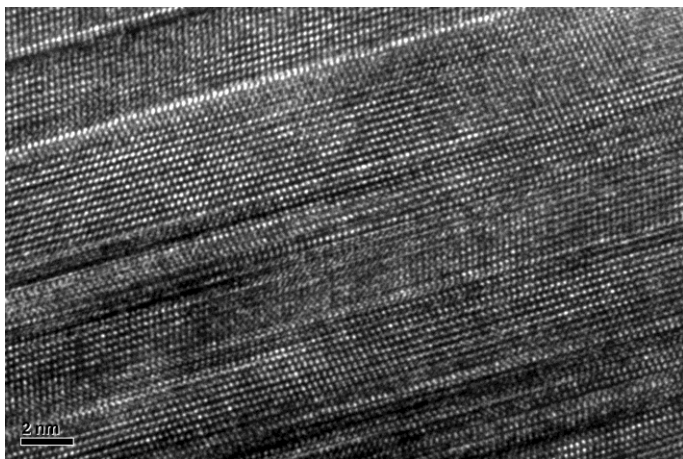
一、晶体学基本知识

◆ 晶体 原子呈有序排列

特点：有固定熔点、各向异性

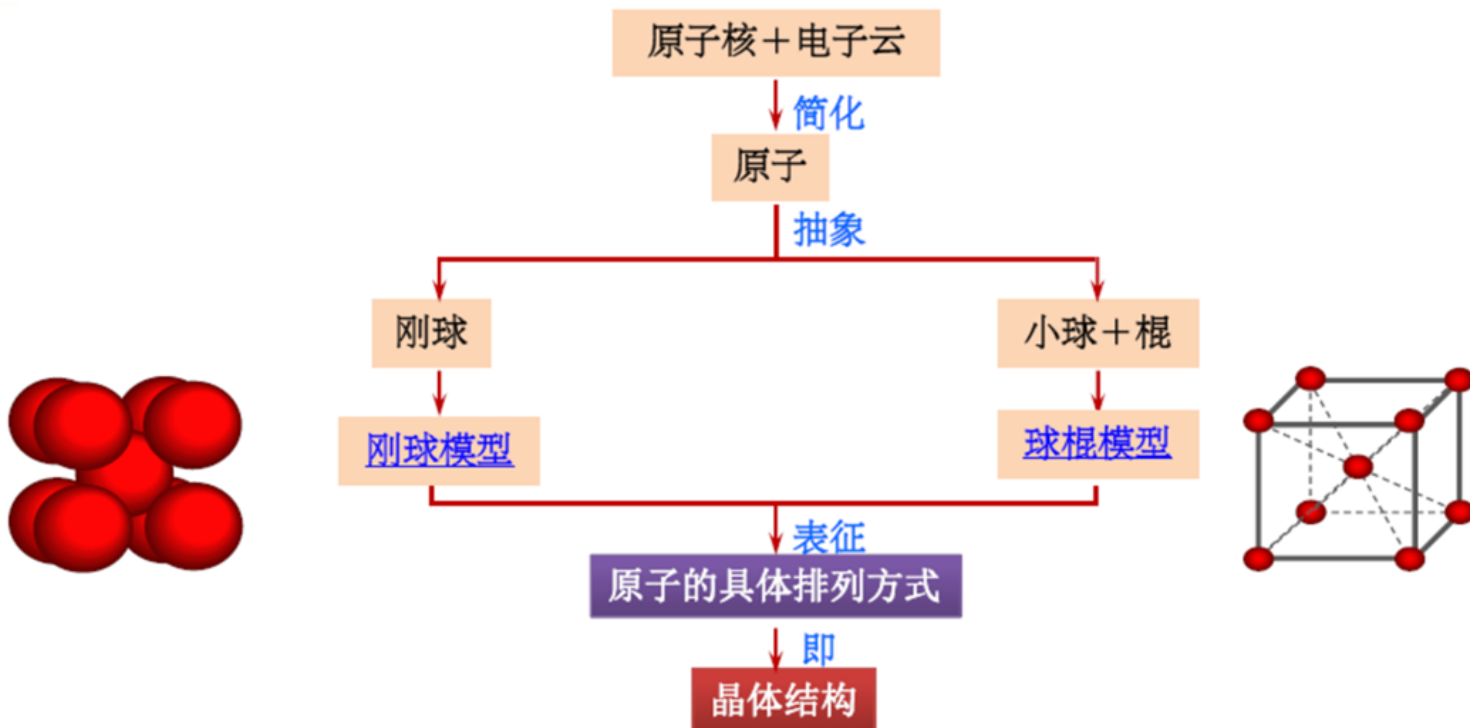
◆ 非晶体 原子呈无序排列

特点：无熔点、各向同性



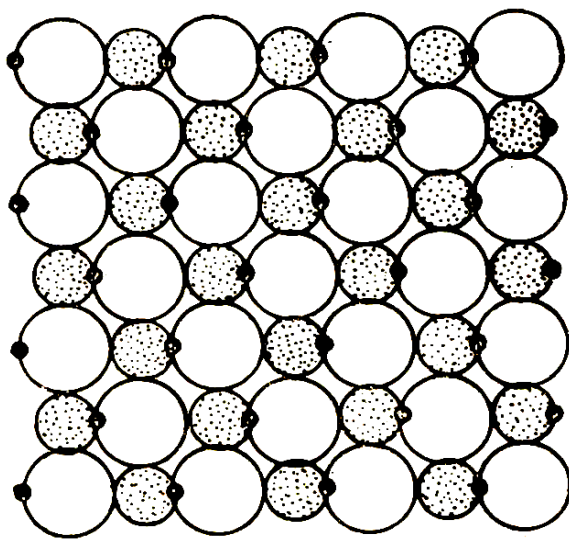
金属的晶体结构

◆ 晶格 描述原子排列规律的空间格子

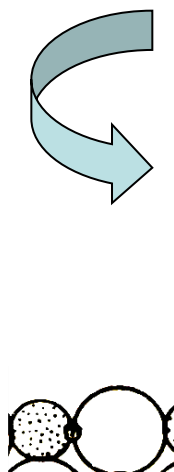


金属的晶体结构

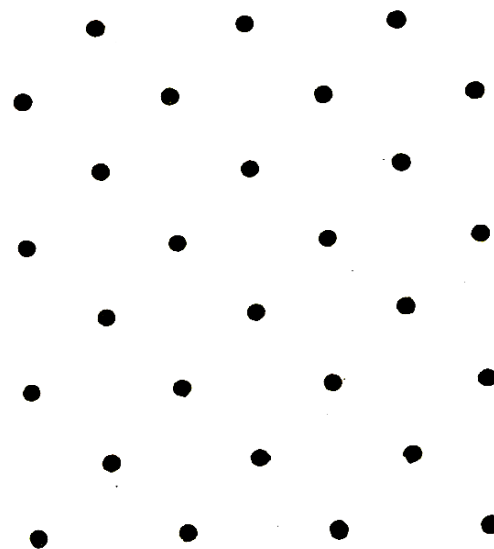
结构基元、排列规则、周期性→实际晶体结构繁多



晶体



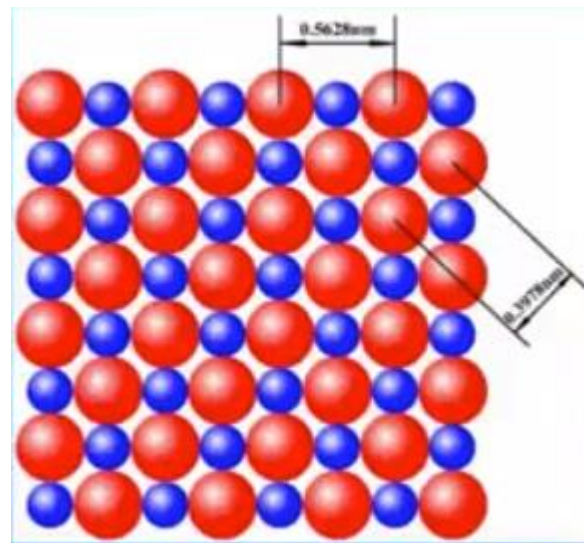
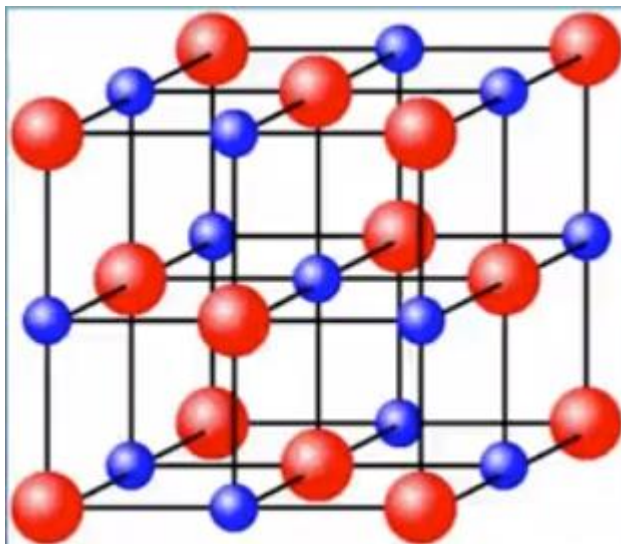
基元



空间点阵

金属的晶体结构

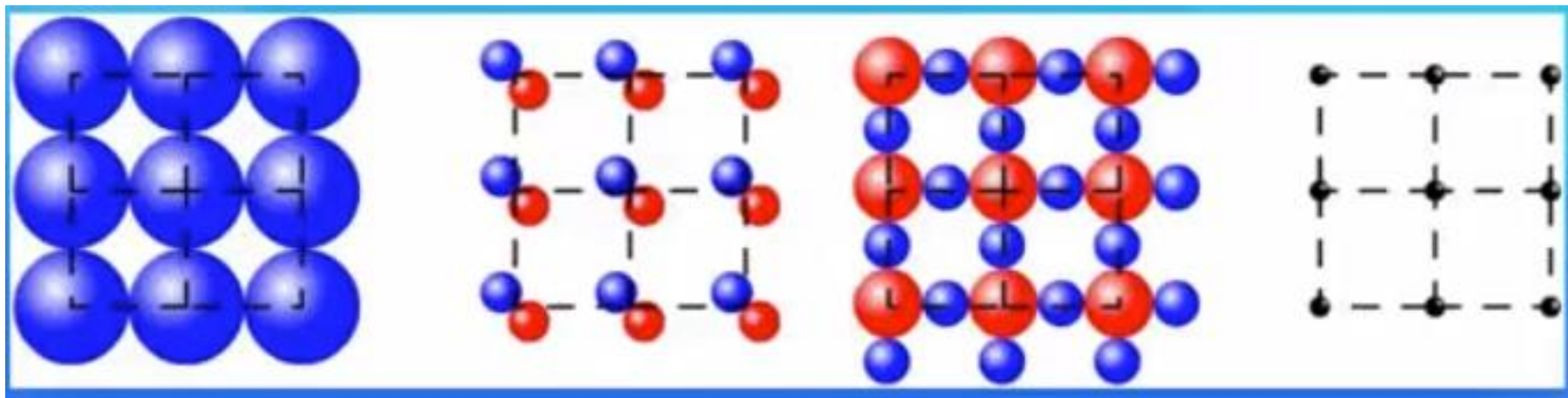
为了便于描述晶体中原子的排列规则，可以把原子看成是一个几何质点，用假想的线将这些点用线连接起来，构成有明显规律性的空间构架。这种表示晶体中原子排列形成的空间格子称为**晶格**。



NaCl 结构

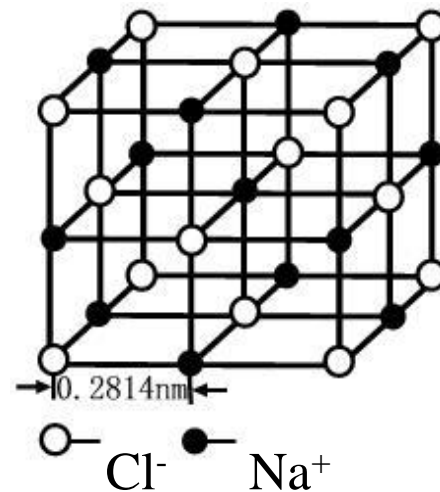
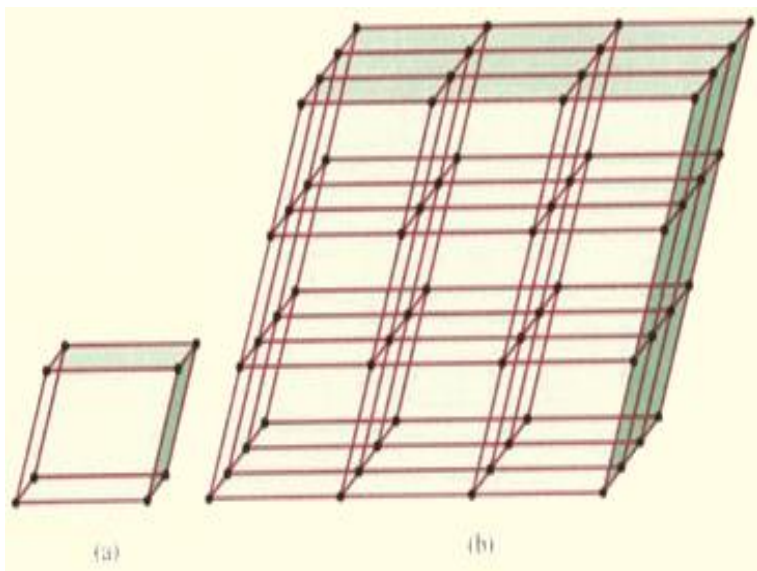
金属的晶体结构

晶体结构=空间点阵+结构基元



金属的晶体结构

◆ **晶胞**----晶格中能够完全反映晶格特征的最小几何单元



● **晶胞**：是指晶体结构中的平行六面体单位，其形状大小与对应的 空间格子中的平行六面体一致。

● **晶格常数**：晶胞的棱边长度



金属的晶体结构

七大晶系

类型	轴晶	轴间夹角
立方 Cubic	$a=b=c$	所有夹角等于 90°
正方 Tetragonal	$a=b \neq c$	所有夹角等于 90°
正交 Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	所有夹角等于 90°
六方 Hexagonal	$a=b \neq c$	二个夹角等于 90° ，一个夹角等于 120°
菱形 Rhombohedral	$a=b=c$	所有夹角相等，但没有一个角等于 90°
单斜 Monoclinic	$a \neq b \neq c$	二个夹角等于 90° ，一个夹角不等于 90°
三斜 Triclinic	$a \neq b \neq c$	所有夹角不相等，且没有一个角等于 90°

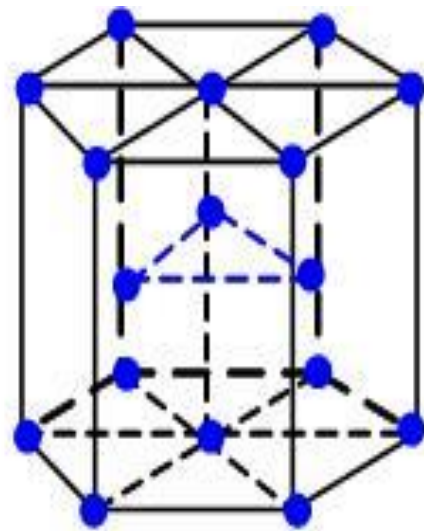
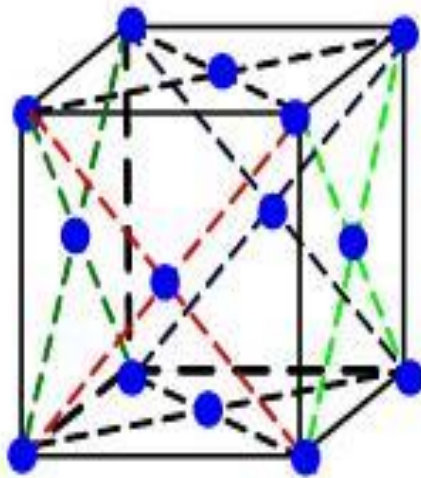
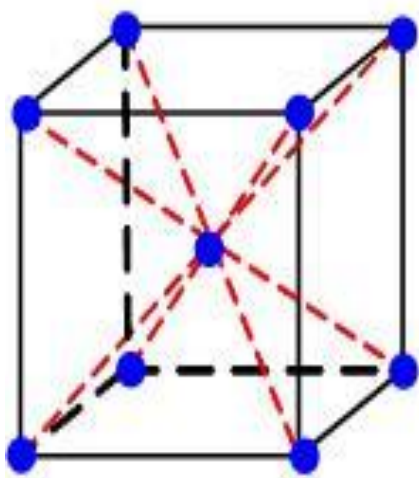
金属的晶体结构

二、三种典型的金属晶体结构

体心立方晶格 Mn、Mo、V、 α -Fe、 δ -Fe

面心立方晶格 Cu、Ag、Pb、Ni、 γ -Fe

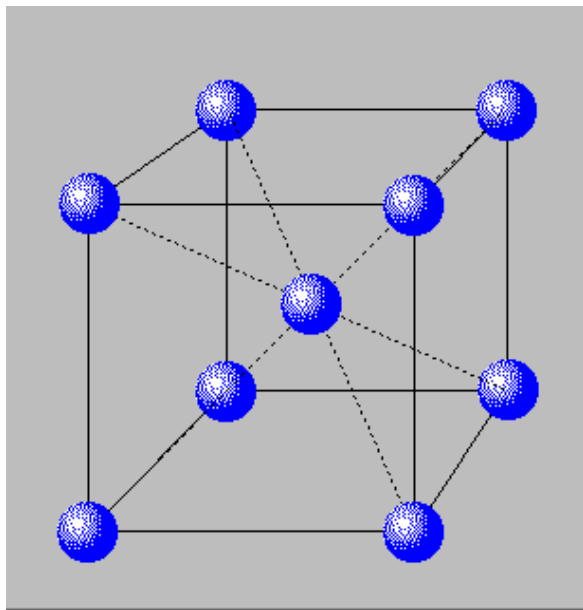
密排六方晶格 Mg、Zn



- 原子数、原子半径、致密度

金属的晶体结构

体心立方晶格



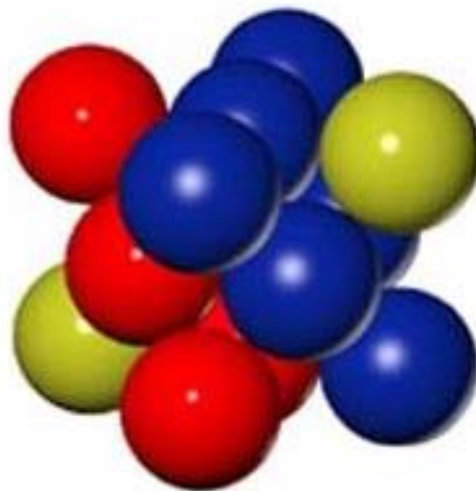
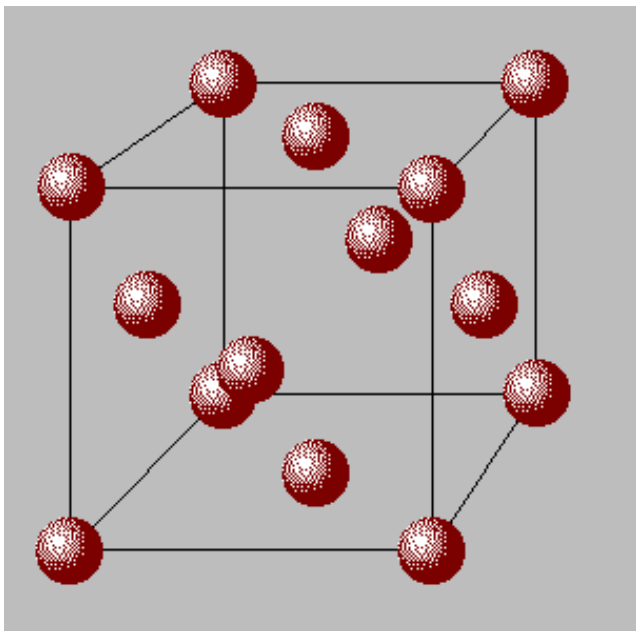
原子半径

$$r = \frac{\sqrt{3}}{4} a$$

$$\text{致密度} = \frac{2 \text{个原子的体积}}{\text{晶胞体积}} = \frac{\sqrt{3}}{8} \pi = 0.68$$

金属的晶体结构

面心立方晶格



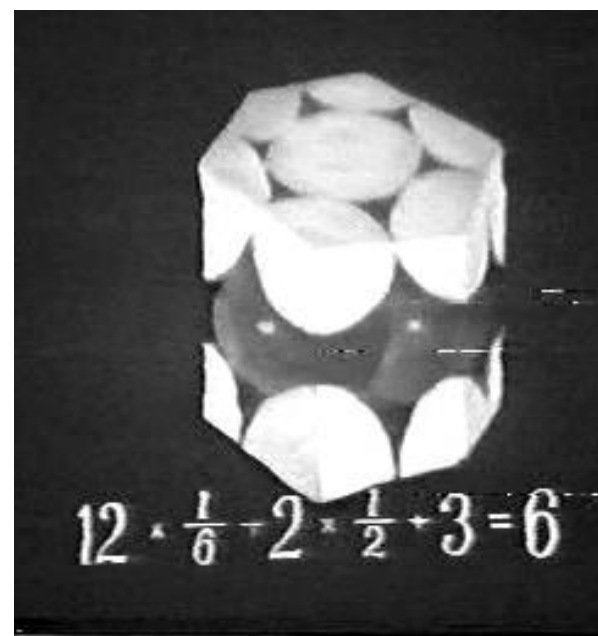
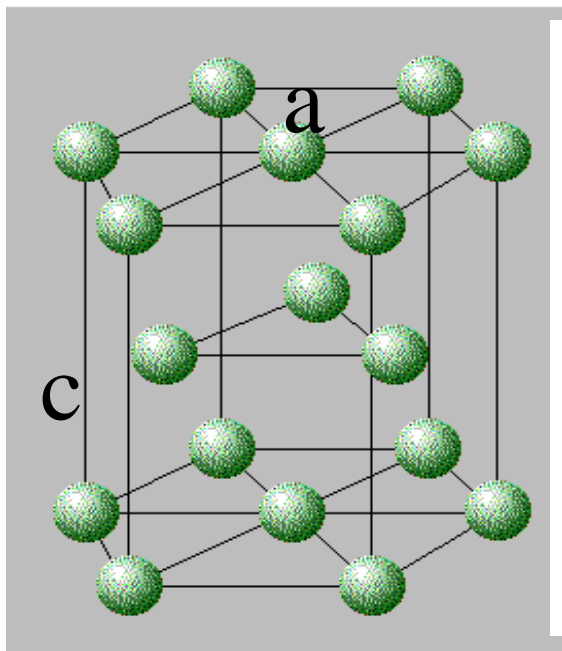
原子半径

$$r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$$

$$\text{致密度} = \frac{4 \text{个原子的体积}}{\text{晶胞体积}} = \frac{\sqrt{2}}{6} \pi = 0.74$$

金属的晶体结构

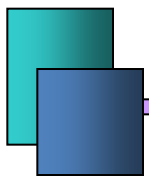
密排六方晶格



$$\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1.633$$

$$r = \frac{1}{2} a$$

$$\text{致密度} = \frac{6 \text{个原子的体积}}{\text{晶胞体积}} = \frac{\sqrt{2}}{6} \pi = 0.74$$



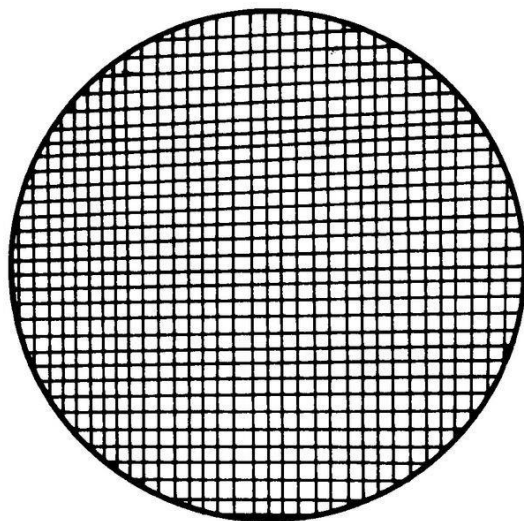
金属的晶体结构

三、金属的实际晶体结构

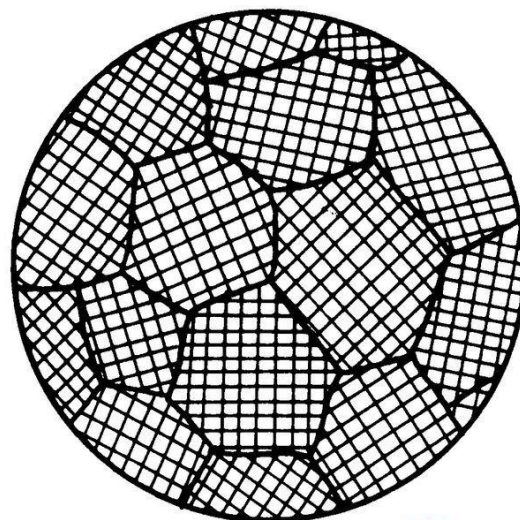
1) 单晶体和多晶体结构

单晶体：晶体内部的晶格位向是完全一致的；

多晶体：由多个晶粒所组成的晶体结构；



a)



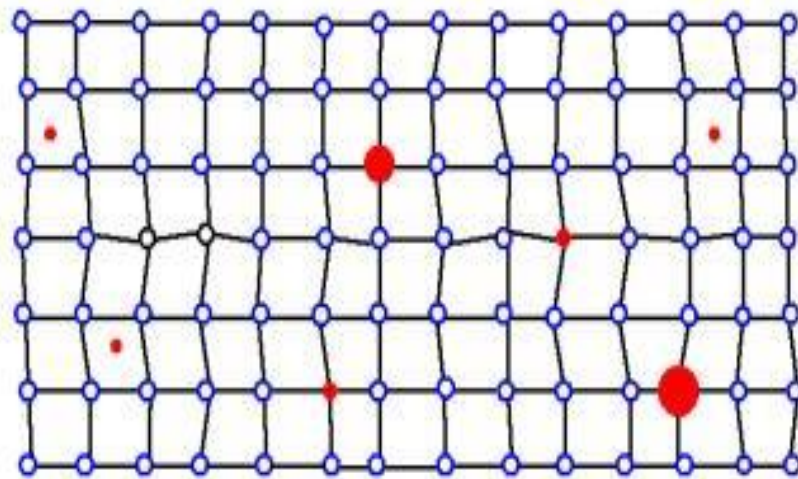
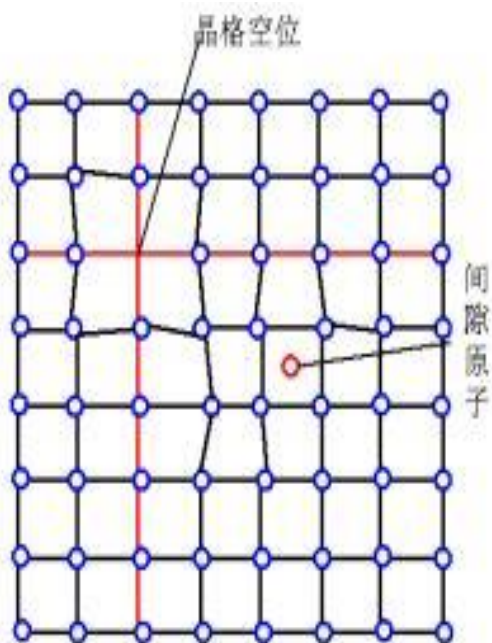
b)



金属的晶体结构

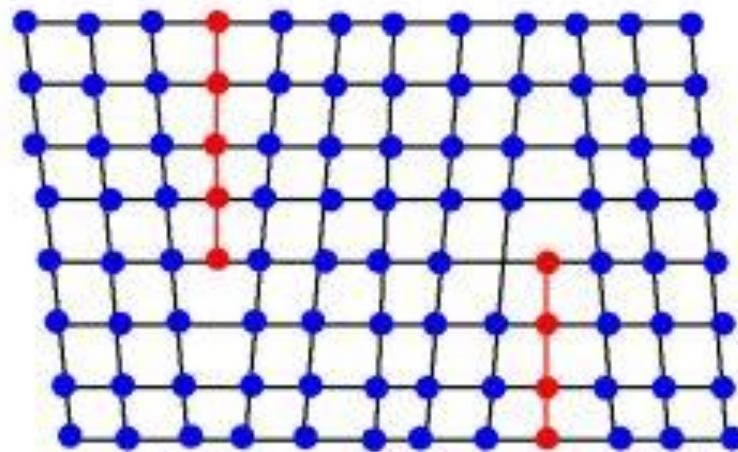
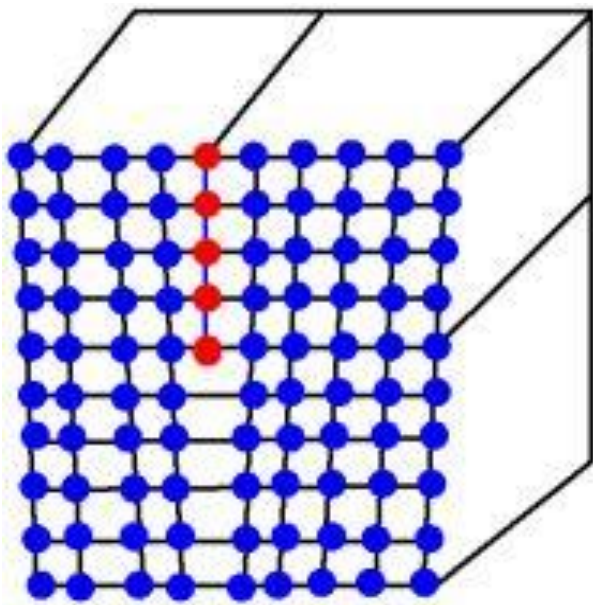
2) 晶体缺陷

- **点缺陷**是指晶格中三维尺寸都较小的点状缺陷，主要包括**晶格空位**、**间隙原子**和**异质原子**。



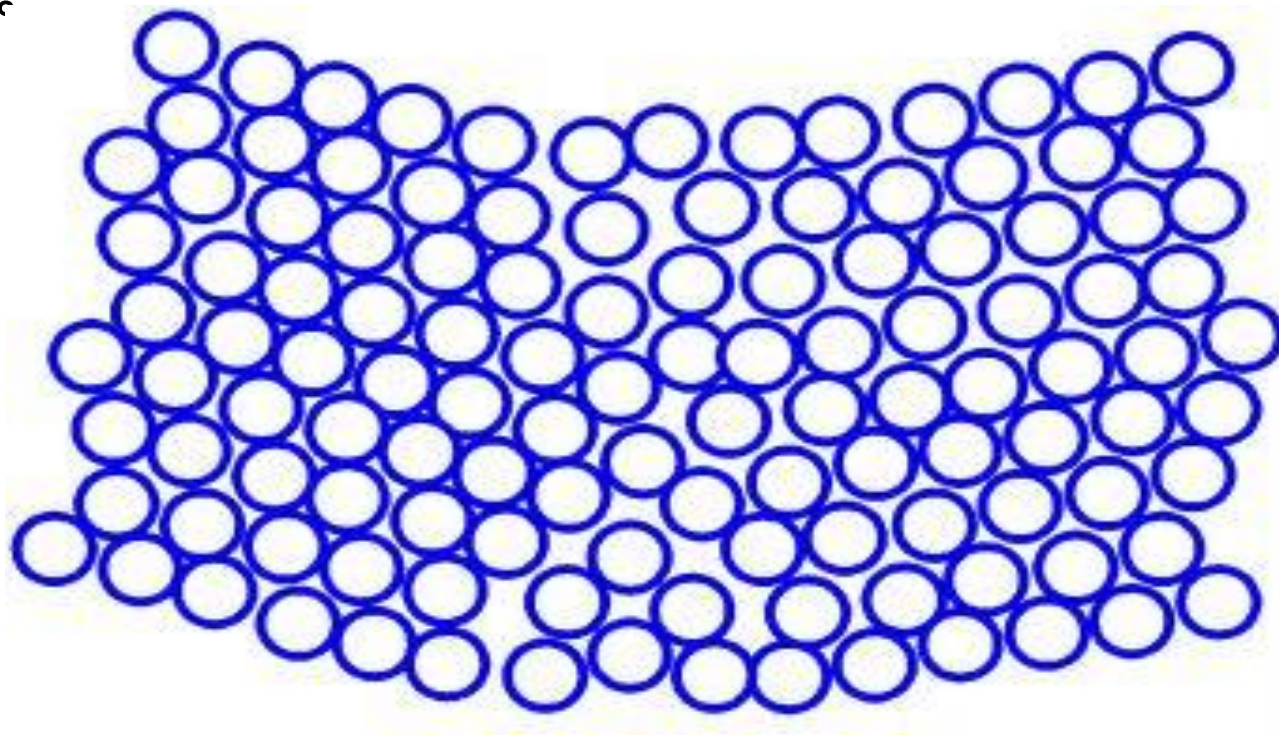
金属的晶体结构

线缺陷又称**位错**，是指晶体中一系列或若干列原子发生有规律的错排现象。不含位错或含有大量位错均能使强度提高。



金属的晶体结构

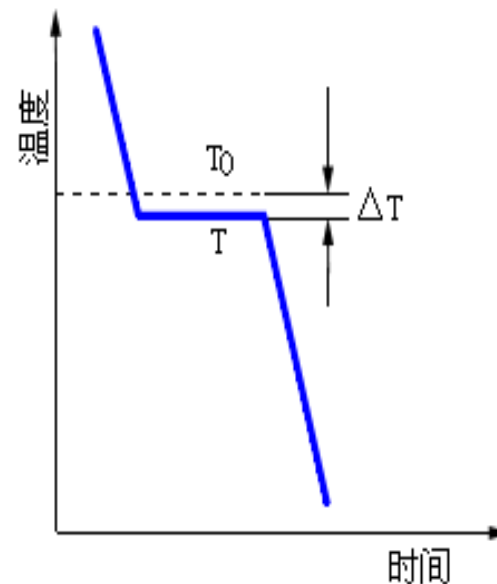
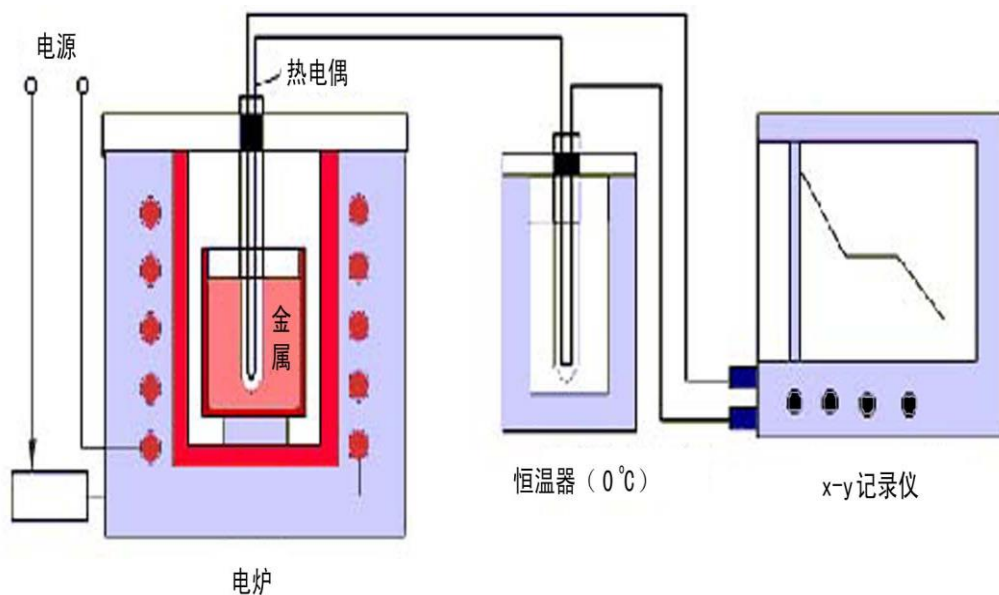
面缺陷是晶体中二维尺寸较大，一维尺寸较小的呈面状分布的缺陷，如**晶界**、**亚晶界**等。金属晶粒的大小对金属的性能有很大影响。



金属的结晶

纯金属的结晶

——液态金属转变为固态金属的过程



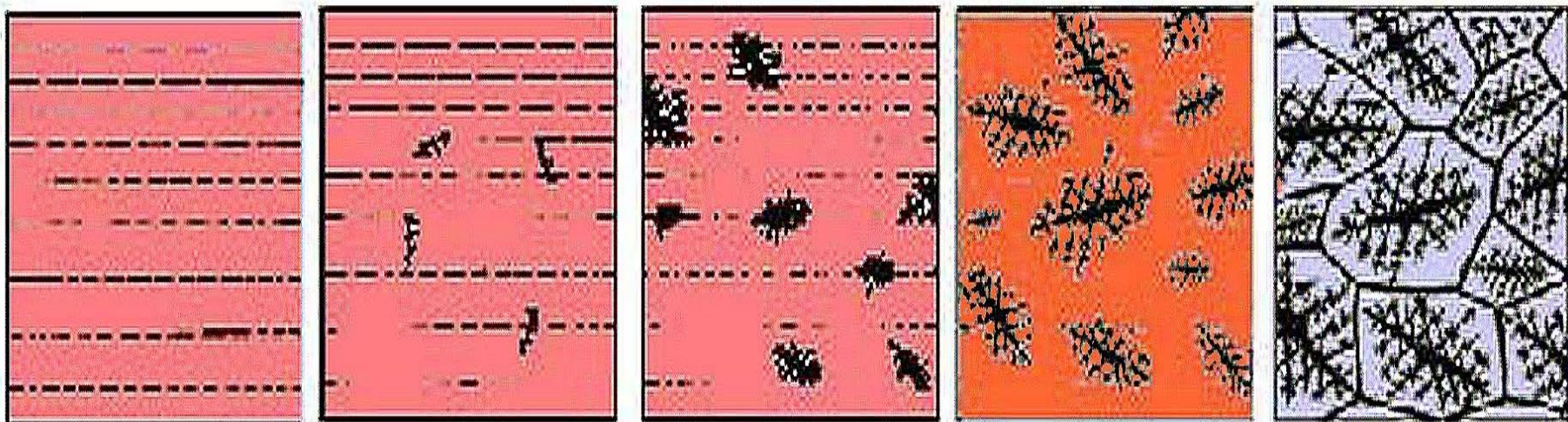
纯金属的冷却曲线

热分析法测冷却曲线

- (1) 过冷：液态材料在理论结晶温度以下仍保持液态的现象。
- (2) 过冷度：液体材料的理论结晶温度(T_m) 与其实实际温度之差。
 $\Delta T = T_m - T$ 冷却速度越大，过冷度越大

金属的结晶

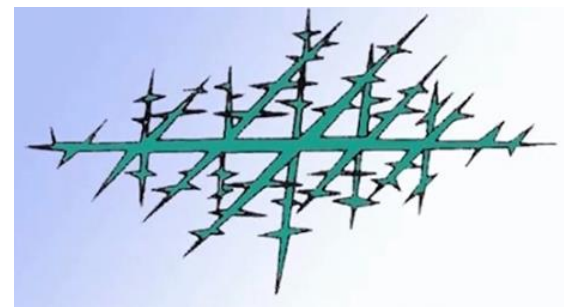
纯金属结晶过程微观现象

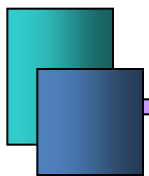


特点：在一定时间内完成
过程：局部→整体
实质：形核+长大

呈树枝状

均匀形核
非均匀形核





金属的结晶

◆ 铸态晶粒的大小与细化

细晶强化的基本原理

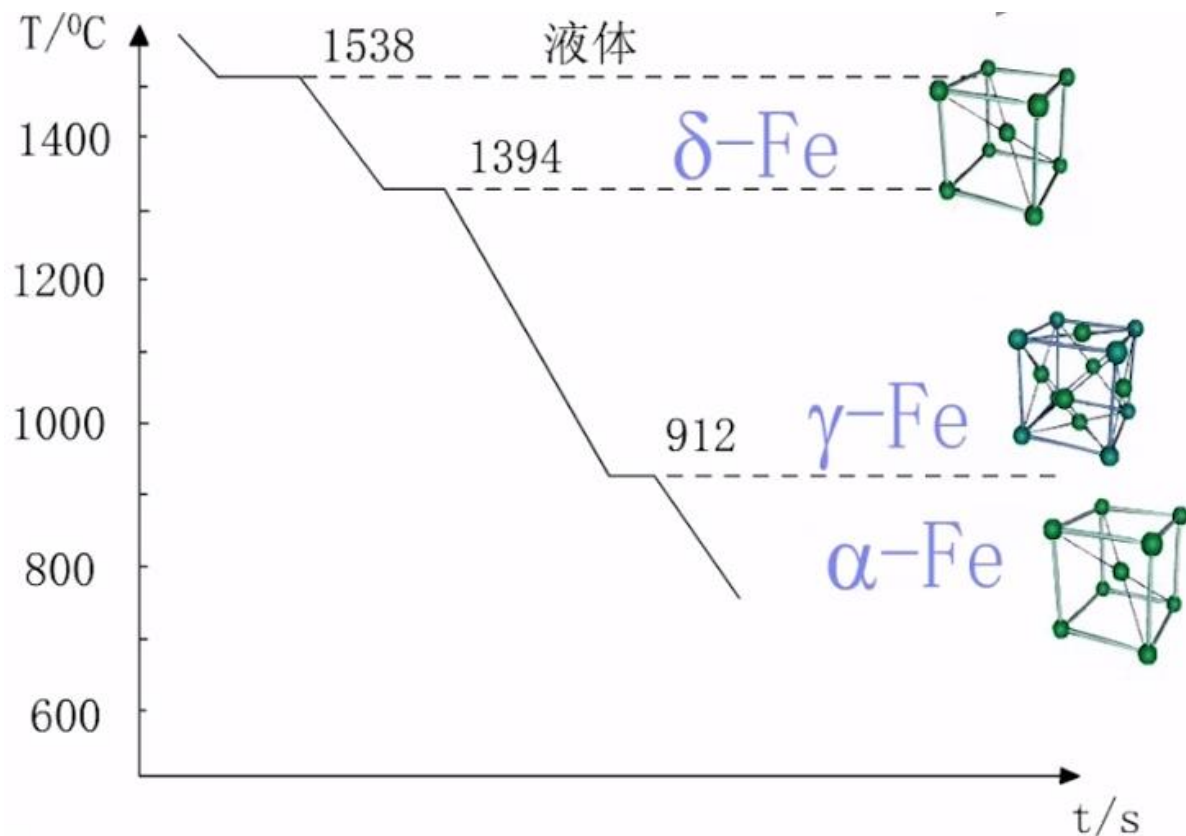
$\uparrow V_{\text{形核}}$, $\downarrow V_{\text{长大}}$

细晶强化的方法

- 增大过冷度 ΔT (中、小型零件), \uparrow 形核率, $\downarrow V_{\text{长大}}$
- 变质处理 \uparrow 形核率
- 振动、搅拌结晶 破碎枝晶, 增加晶核数量

同素异构转变

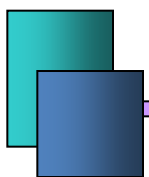
金属在固态下随温度不同而发生晶格类型的转变；



特点：

转变发生于固态

在一定温度下进行
晶格类型发生变化



合金的相结构

一、概述

合金——通过熔化或其他方法使两种或两种以上的金属元素结合在一起所形成的具有金属特性的物质，如Fe-C合金。

组元——组成合金的基本的独立的物质，组元可以是纯金属、非金属元素或化合物。

相——金属或合金中具有同一聚集状态、同一化学成分、同一结构并以界面分开的各个均匀的组成部分。

组织——金肉眼或显微镜所观察到的不同相或相的形状、分布及各相之间的组合状态。

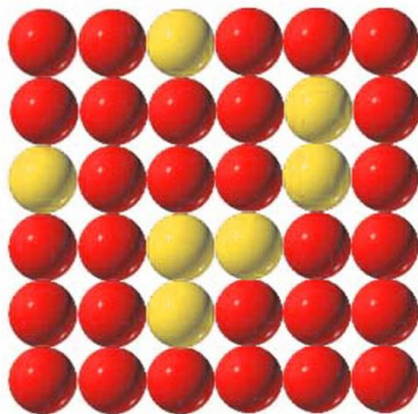
合金的相结构

二、合金的相结构

◆ 固溶体

以某一组元为溶剂，在其晶体点阵中溶入其他组元原子（溶质原子）所形成的与溶剂有相同的晶体结构的均匀混合的固相。

- 置换固溶体：在固溶体中，溶质原子占据溶剂点阵的阵点，所形成的固溶体就称为置换固溶体。



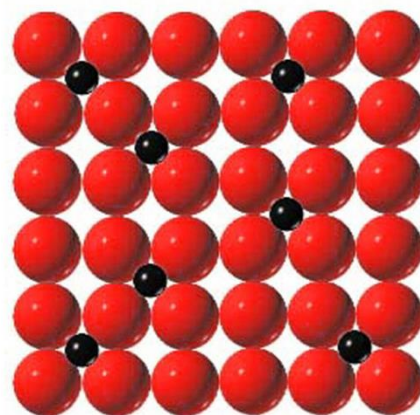
合金的相结构

●间隙固溶体：溶质原子分布于溶剂晶格间隙而形成的固溶体（原子半径小的非金属元素）

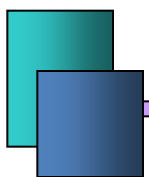
特点：

晶格：较大的晶格畸变，增大位错运动的阻力，滑移困难，较大的强化效果

性能：强度、硬度 \uparrow ；塑性，韧性 \downarrow



由于溶质原子的溶入造成固溶体晶格产生畸变，使合金的强度和硬度提高，而塑性和韧性略有下降。这种通过溶入原子，使合金强度和硬度提高的方法称为**固溶强化**。



合金的相结构

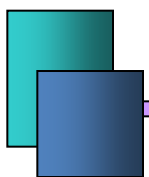
◆ 金属化合物（中间相）

合金组元之间相互作用形成具有金属特征的物质。（金属与金属、金属与非金属化合）

特点：晶格：与各组元不同

性能：硬而脆（强化相）： $T_{\text{熔}} \uparrow$ ， $HB \uparrow$ ，脆性 \uparrow ，塑性 \downarrow

金属化合物的类型：正常价化合物、电子化合物、间隙化合物



合金的相结构

间隙化合物：由原子直径较大的过渡族金属元素为溶剂与原子直径较小的非金属元素为溶质相互作用形成的。

分为：间隙相（简单晶体结构）和间隙化合物（复杂晶体结构）

当金属间化合物呈细小的颗粒均匀地分布在固溶体基体上时，将使合金的强度、硬度及耐磨性明显提高，这一现象称为**弥散强化**。

三、合金的组织

固溶体、金属化合物或固溶体+金属化合物复合组织

影响因素：固溶体中溶质含量；金属化合物的数量、大小、形态、分布；固溶体和金属化合物的比例



二元合金相图

- 合金相图：平衡条件下，合金的成分、温度、合金相之间的关系图解，又叫合金状态图。平衡是指热力学平衡，即一定成分的合金在一定温度下各相的量不再发生变化，处于动态平衡状态。

◆ 二元合金相图的建立

纯金属在不同温度下所处的组织状态可用一条坐标轴(数轴)表示出来。二元合金系的成分是可变的，不能用一条温度坐标轴表示不同温度下所处的组织状态。

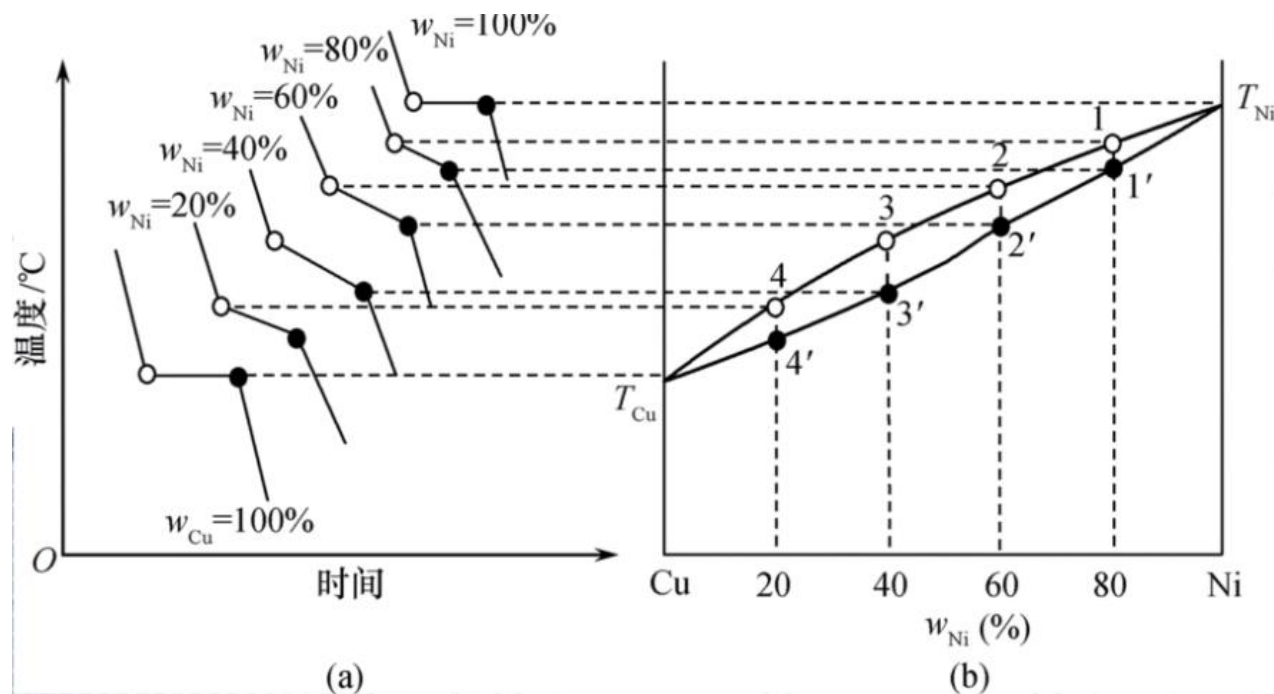
二元合金相图可以通过实验、计算等方法建立。常用的实验方法有热分析法、膨胀法、电阻法、x射线分析法等。

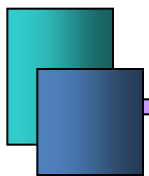
二元合金相图

相图的表示方法

二元合金相图是一个有纵、横两坐标轴的平面图形成分。

Cu—Ni合金系





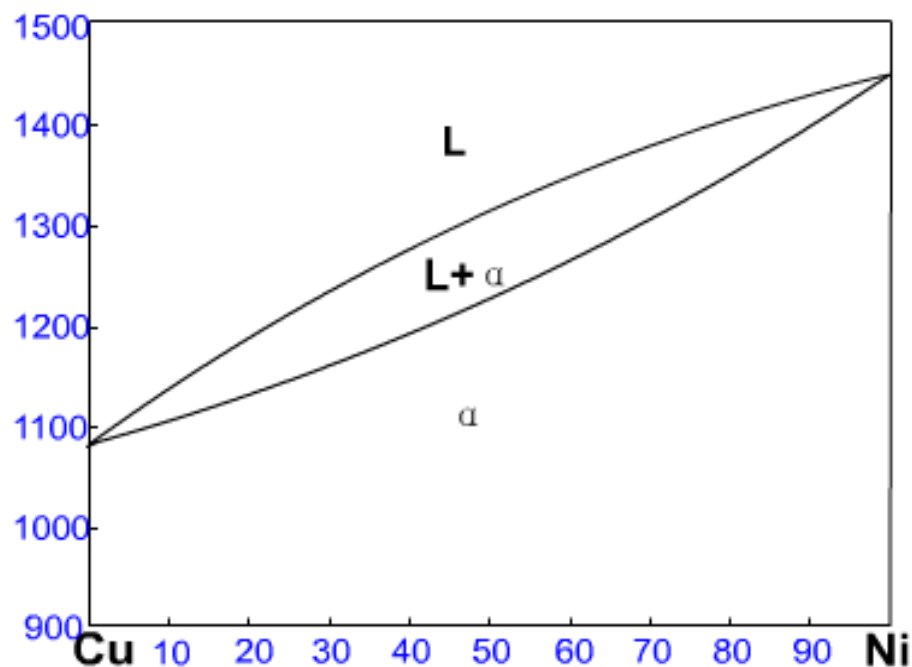
二元合金相图

◆ 匀晶相图

- 定义：两组元在液态、固态下均能以任何比例互溶形成无限固溶体的相图
- 当两个金属组元之间形成无限固溶体时，其条件为：两者的晶体结构相同，原子尺寸接近， $\Delta r < 15\%$ ，两者具有相同的原子价的电负性。

二元合金相图

■ 匀晶相图Cu—Ni相图



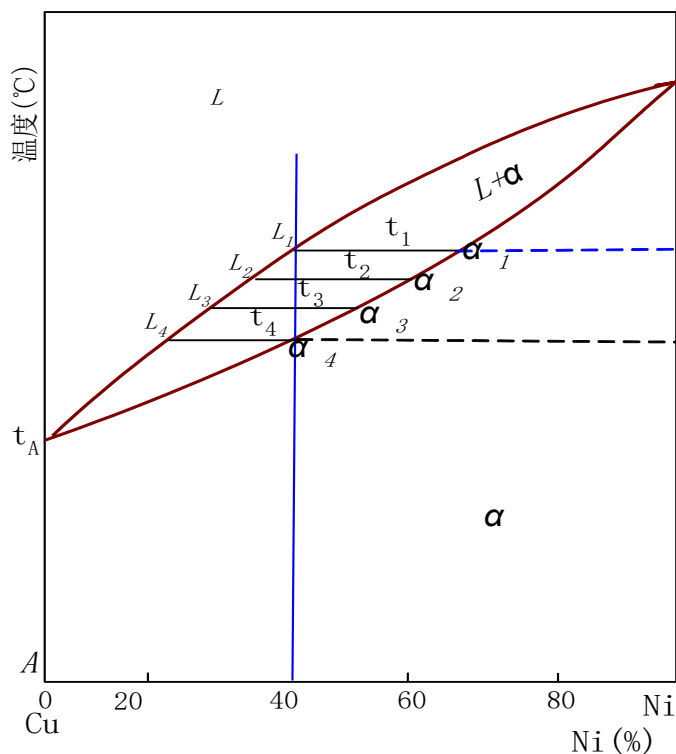
两点：端点分别为纯Cu、Ni的熔点。

两线：相图由一条液相线和一条固相线组成。

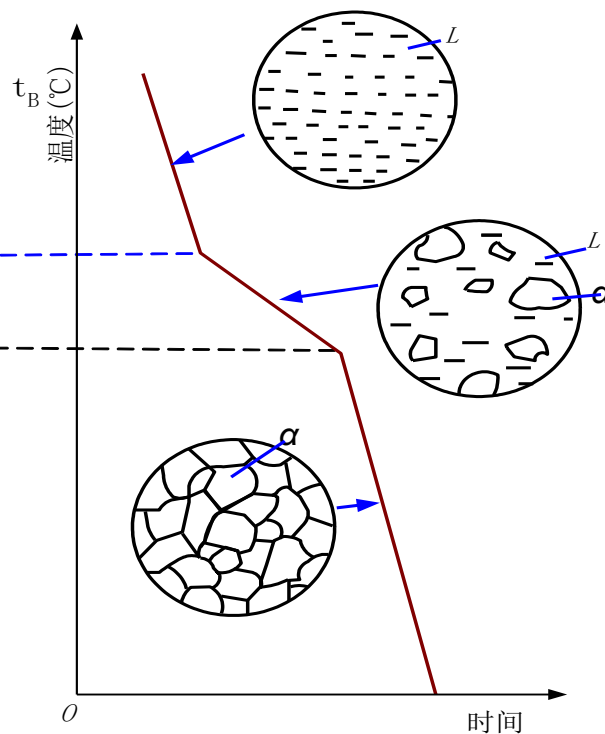
三区：液相区（用 L 表示）、固溶体区（用 α 表示）、结晶区间（用 $L+\alpha$ 表示）。

二元合金相图

- 结晶过程： $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow \alpha$
- 成分均匀化：每时刻结晶出的固溶体的成分不同。



(a) 结晶过程中成分变化



(b) 组织转变示意图

二元合金相图

- 由二元合金相图不仅可以确定任何成分的合金在任何温度下有那些相，还可以借助**杠杆定律**确定**两相区内**平衡相的相对重量。分析相图的重要工具。

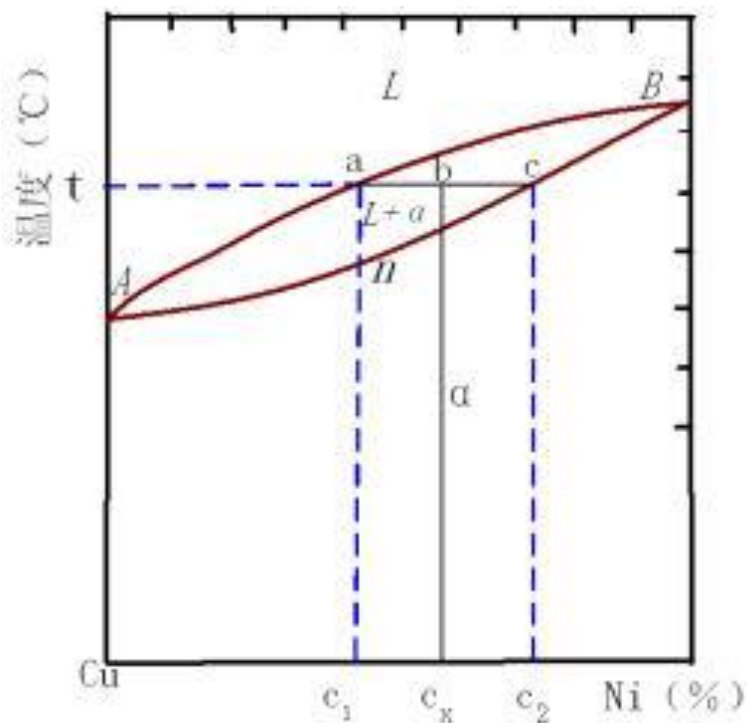


图1-54 杠杆定律的证明

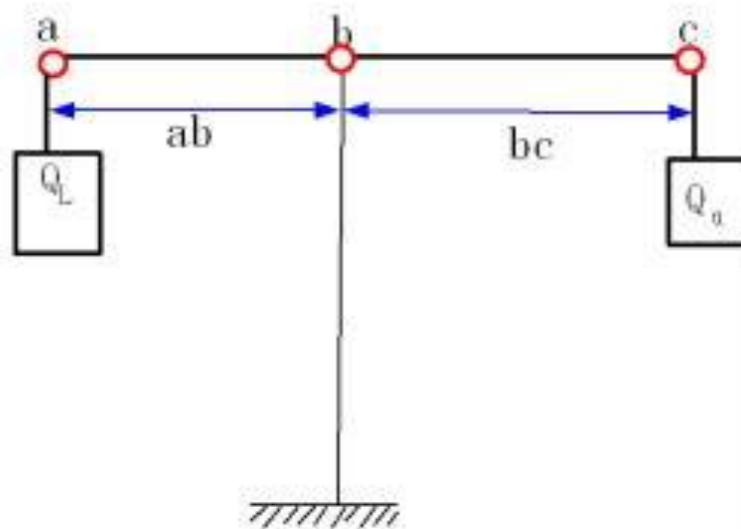


图 1-55 杠杆定律的力学关系

二元合金相图

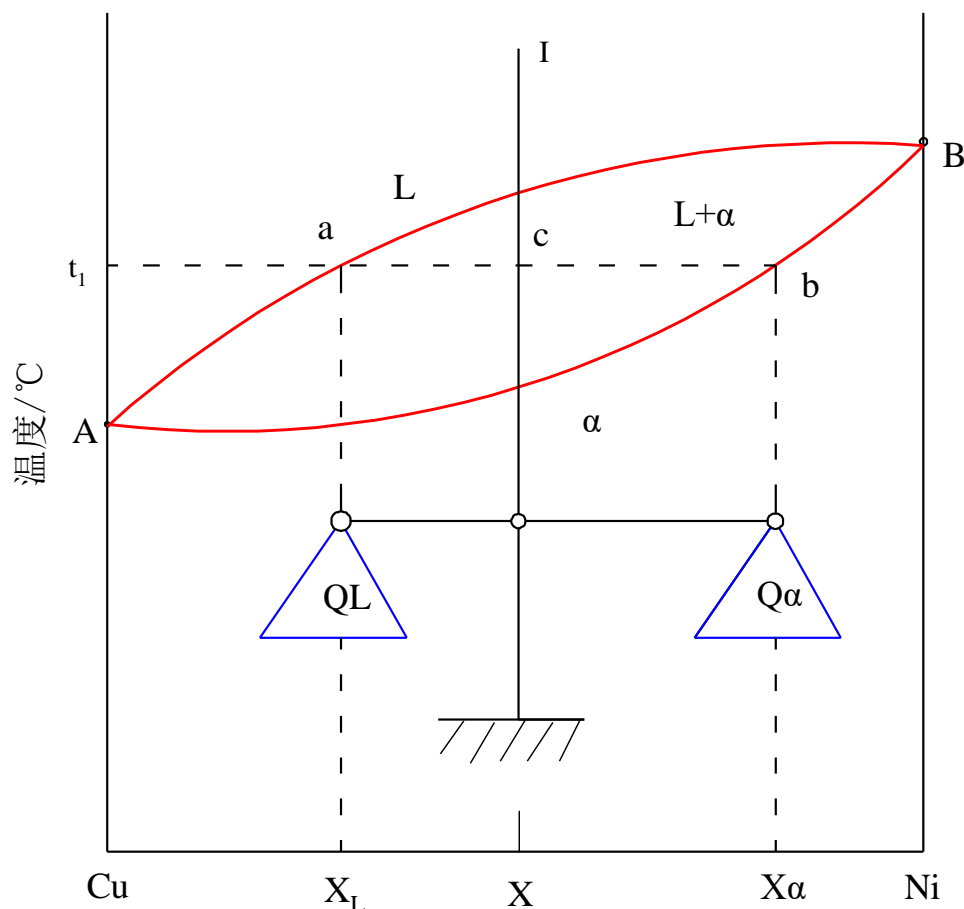
杠杆定律

设：合金I的镍含量为X，在某温度 t_1 时，液相质量为1，液相相对质量百分数为 Q_L ， α 相相对质量百分数为 Q_α

$$Q_L + Q_\alpha = 1$$

$$Q_L \times X_L + Q_\alpha \times X_\alpha = X$$

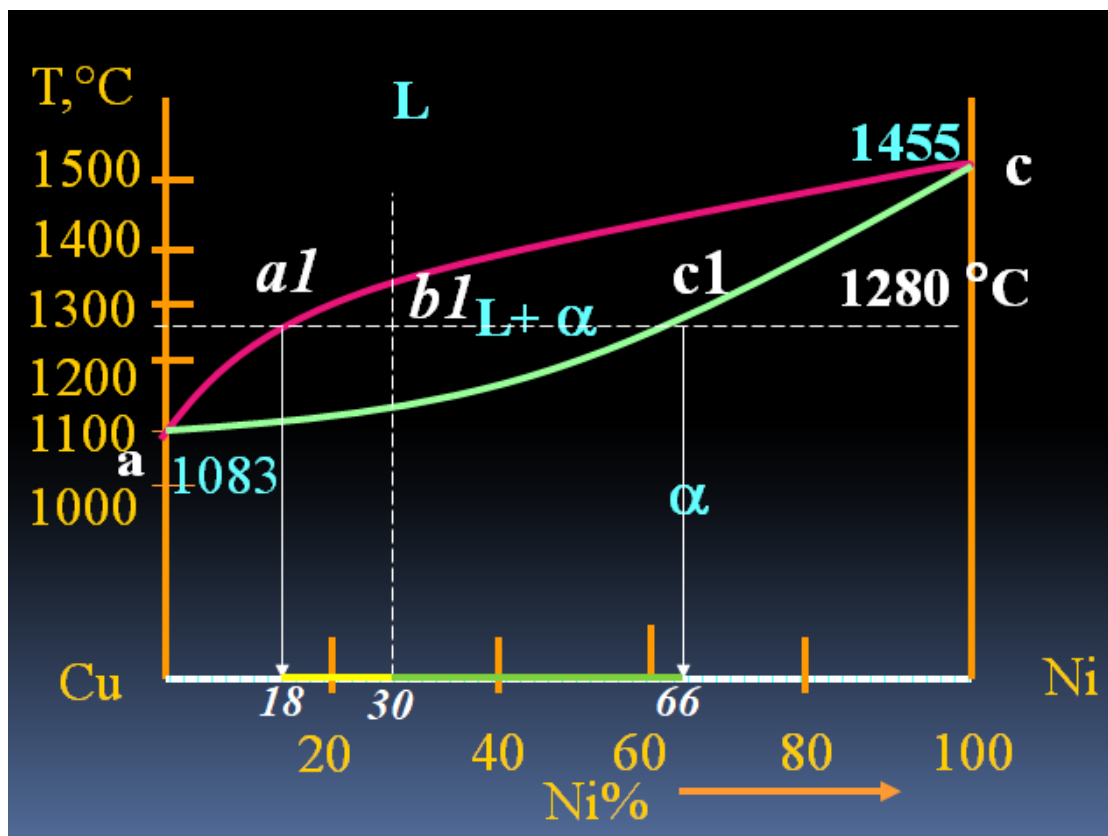
$$Q_L = \frac{X_\alpha - X}{X_\alpha - X_L} \quad Q_\alpha = \frac{X - X_L}{X_\alpha - X_L} \quad \frac{Q_L}{Q_\alpha} = \frac{cb}{ac}$$



还可用于各种**基本组织**的相对质量百分数的计算

二元合金相图

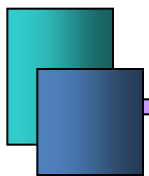
求30%Ni合金在1280 °时 α 相的相对量(已知固相的溶解度为18%，液相的浓度为66%)



解：作成分线和温度线如图。

根据杠杆定律推论， $Q_\alpha / Q_H = a_1b_1 / a_1c_1 = 12/48 = 1/4$

答：所求合金在 1280°C 时 α 相的相对质量为1/4。



二元合金相图

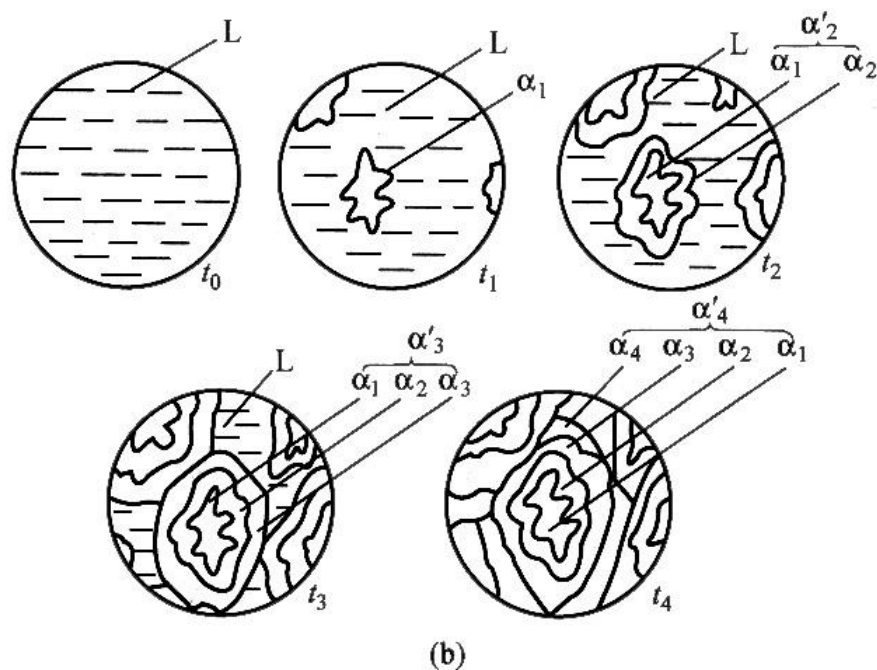
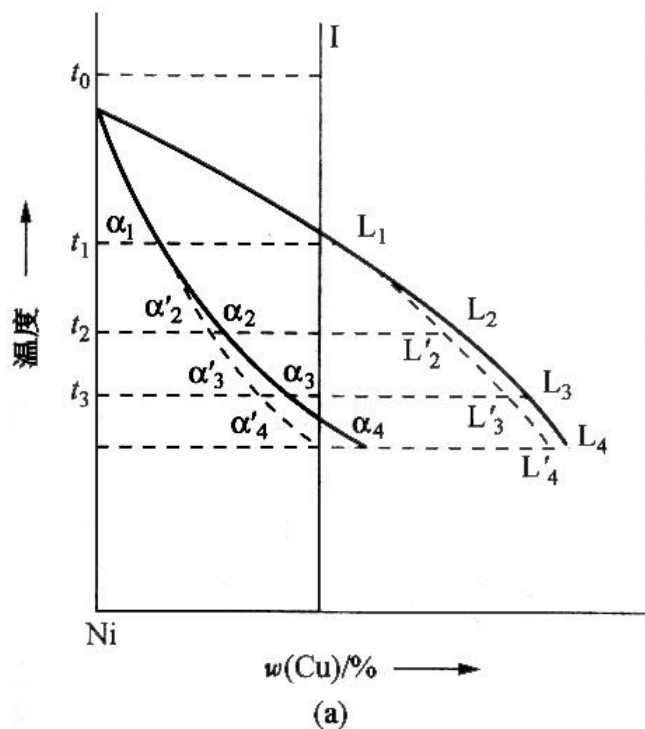
固溶体合金的结晶特点：

- 1) 固溶体合金的结晶不是在恒温下进行的，而是在一个温度范围内进行；
- 2) 在结晶过程中，随着温度的降低，剩余液相不断减少，结晶出的固相不断增多，最后结晶出一个以任何比例互溶的无限固溶体合金；
- 3) 结晶过程中平衡的两个相的成分是不断变化的，液相成分沿液相线变化，固相成分沿固相线变化；
- 4) 结晶过程中，在某一温度下平衡的两个相的相对量可由杠杆定律求出。

二元合金相图

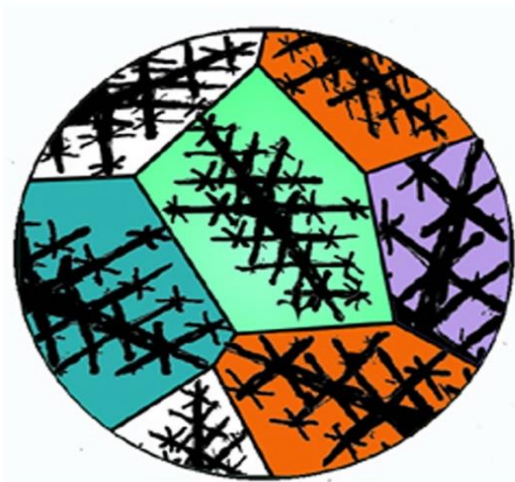
固溶体非平衡凝固

在工业生产中，合金溶液浇铸后的冷却速度较快，使凝固过程偏离平衡条件，称为**非平衡凝固**。若冷速较快，则只有固液界面接近于平衡状态，由于扩散难以充分进行，液相尤其是固相成分不均匀。



二元合金相图

- 固溶体非平衡结晶时，一个晶粒内部化学成分不均匀，称为**晶内偏析**。先结晶的晶粒与后结晶晶粒的成分是不同的，这种成分的不均匀称为**晶间偏析**。
- 由于固溶体一般都以**枝晶状方式结晶**，先结晶的枝晶轴（干）含有高熔点组元多，而后结晶的分枝枝晶间含有低熔点的组元多，导致先结晶的枝干和后结晶的枝间成分不同。在一个枝晶范围内成分不均匀的现象称为**枝晶偏析**



(a) 偏析示意图



(b) 偏析组织

二元合金相图

共晶相图

- 定义：两组元在液态下互溶，但在固态下这两种组元 可以互不溶解或仅能部分溶解形成两种不同固相并发生共晶转变的相图，（具有共晶转变的相图称为**共晶相图**）。
- 具有一定成分的液态合金，在一定温度下，同时结晶出两种不同成分、不同结构的固相的转变称为**共晶转变**。

即： $L \rightarrow \alpha + \beta$

- 所得到两固相的混合物称为共晶组织，其特点是两相交替细弥混合，其形态与合金的特性及冷却速度有关，通常呈片层状。

二元合金相图

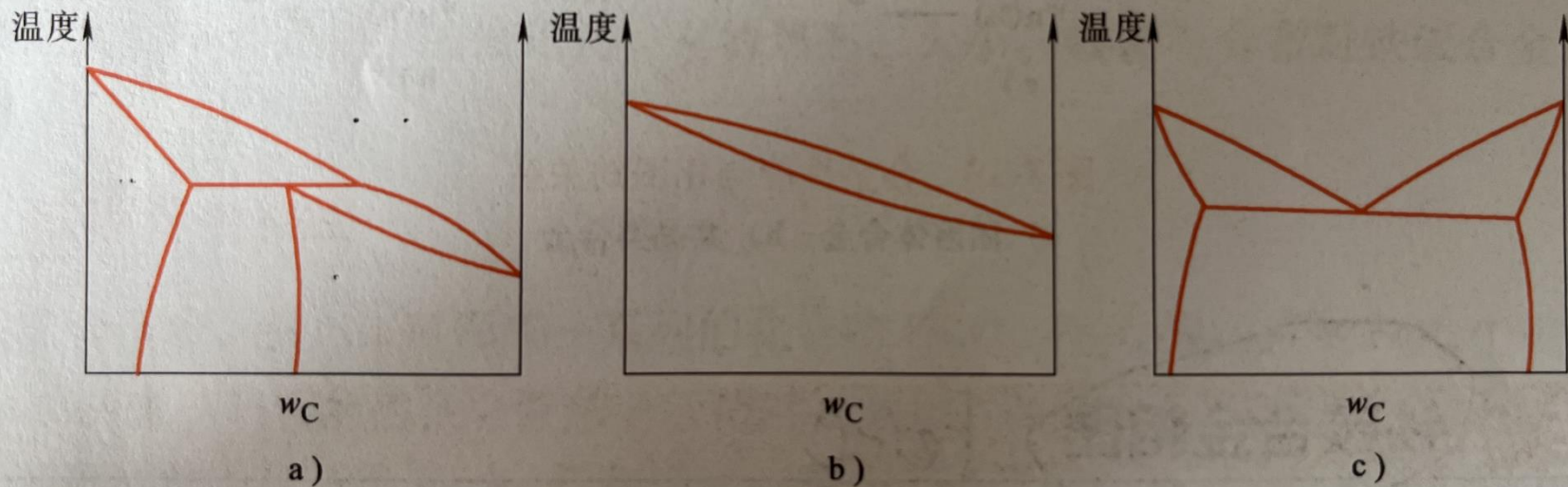


图 2-18 常见的二元合金相图

a) 包晶相图 b) 匀晶相图 c) 共晶相图



合金的性能与相图

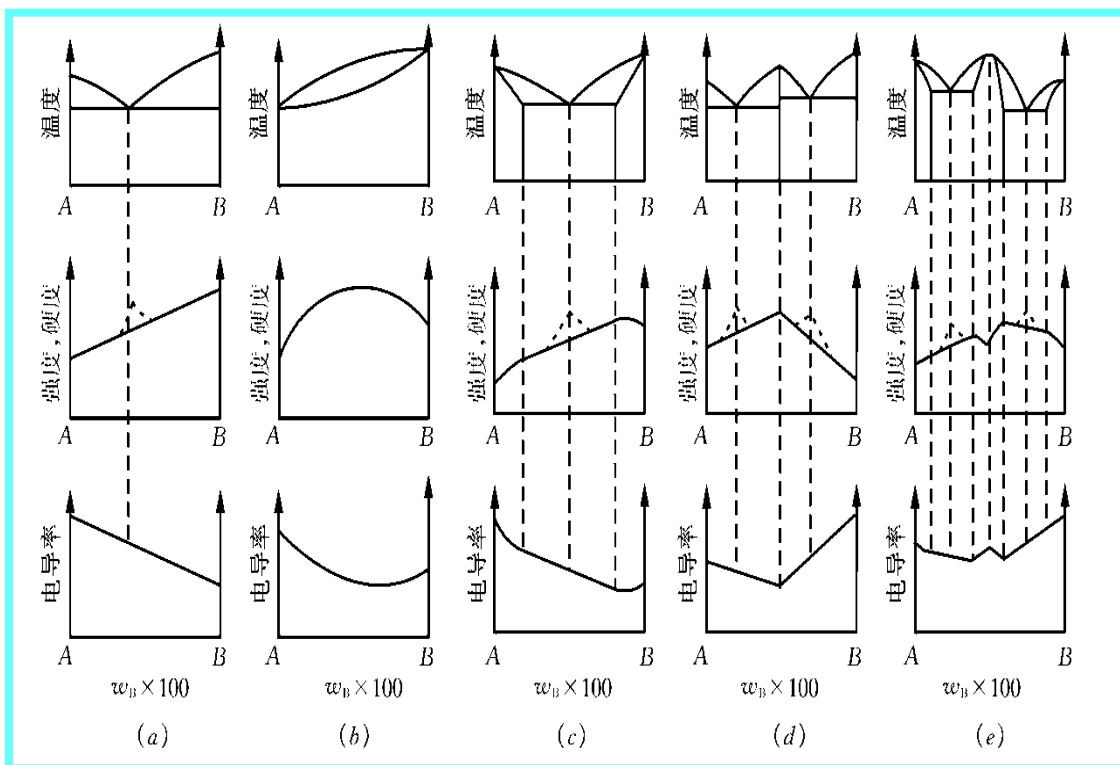
合金的性能取决于合金的组织，而合金组织与相图有关，所以可根据相图预测合金平衡状态下的一些性能。 包括：

- ◆ 使用性能（力学性能、物理性能等）
- ◆ 工艺性能（合金的铸造 、压力加工 、切削加工 、热处理强化性能）

合金的性能与相图

1. 使用性能

一般形成两相机械混合物的合金的性能是各相性能的平均值，即性能与成分呈线性关系；形成固溶体合金时性能与成分呈曲线关系；形成稳定化合物时，其性能在曲线上出现奇点。



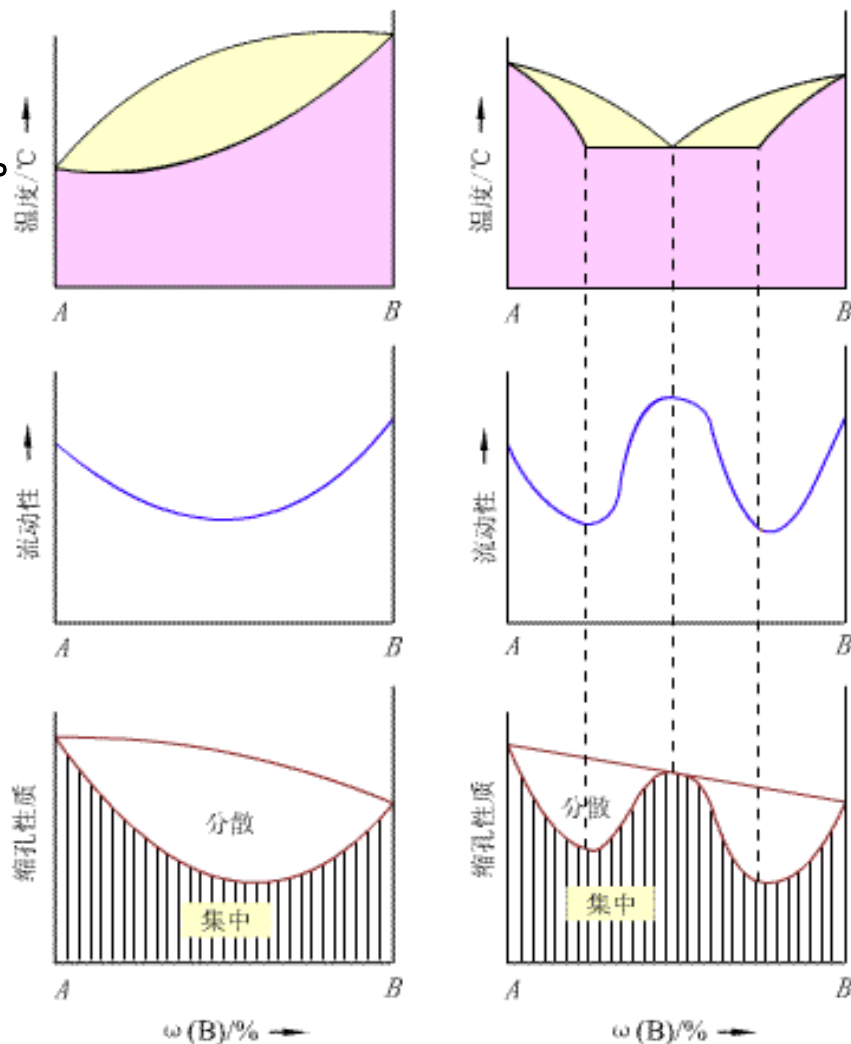
合金的性能与相图

2. 工艺性能

(1) 合金铸造性能

铸造合金宜选择在接近共晶成分的合金。

纯组元和共晶成分的合金的流动性最好，凝固后容易形成集中缩孔，合金较为致密，且共晶合金熔点低且是恒温转变，铸造性能好。相图中液相线和固相线之间距离越小，液体合金结晶的温度范围越窄，对浇注和铸造质量越有利。合金的液、固相线温度间隔大时，形成枝晶偏析的倾向性大；同时先结晶出的树枝晶阻碍未结晶液体的流动，而降低其流动性，增多分散缩孔。所以，铸造合金常选共晶或接近共晶的成分。





合金的性能与相图

(2) 合金压力加工性能

合金的压力加工性能与合金的组织有关。单相固溶体由于其强度低，塑性好，变形均匀，压力加工性能较好。所以需压力加工的合金通常选择单相固溶体或接近单相固溶体(含第二相应尽量少)成分的合金。

单相合金的锻造性能好。合金为单相组织时变形抗力小，变形均匀，不易开裂，因而变形能力大。双相组织的合金变形能力差些，特别是组织中存在有较多的化合物相时，因为它们都很脆。

(3) 合金切削加工性能

合金切削加工性能与合金的组织有关。塑性好的材料进行切削加工时，切削不易断开且缠绕在刀具上，增加零件表面粗糙度，不易进行高速切削，因此单相固溶体型合金切削加工性能不够好。而具有两相组织的合金的切削加工性一般比较好。



合金的性能与相图

(4) 热处理工艺性能

可借助于相图判断合金能否通过热处理强化，并能为热处理提供数据。

- 相图中无固态相变的合金不能进行热处理强化，但能进行消除枝晶偏析的扩散退火。
- 具有多晶型转变的合金，可通过再结晶退火和正火处理使合金晶粒细化，以提高强度、硬度，称为细晶强化。
- 具有溶解度(固溶度)变化的合金，可通过固溶处理以及后来进行的时效处理来提高合金的硬度、强度。
- 具有共析转变的合金，原则上可进行淬火处理。
- 进行化学热处理时，渗入元素必须在被渗金属中具有一定的溶解度或者能形成化合物。