



# 铁碳合金

- 金属的晶体结构与结晶
- 合金的晶体结构
- 铁碳合金相图

# 金属的晶体结构与结晶

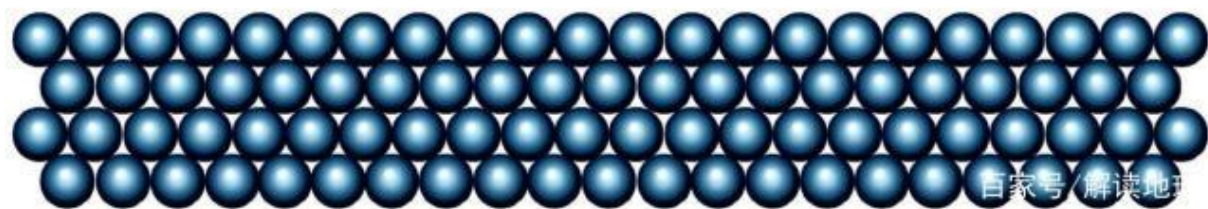
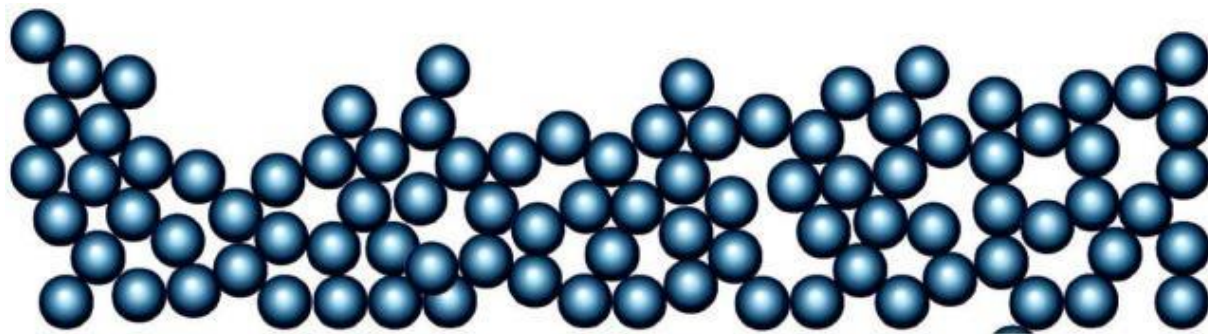
## 一、晶体结构的基本概念

◆ **晶体** 原子按一定次序有规则排列的物质

特点：固定熔点、各向异性

◆ **非晶体** 原子杂乱无章地堆积在一起的物质

特点：无固定熔点、各向同性

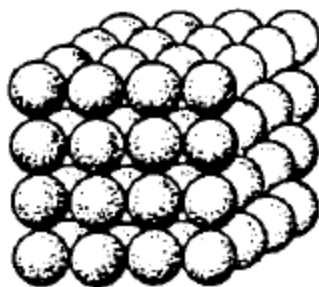


# 金属的晶体结构与结晶

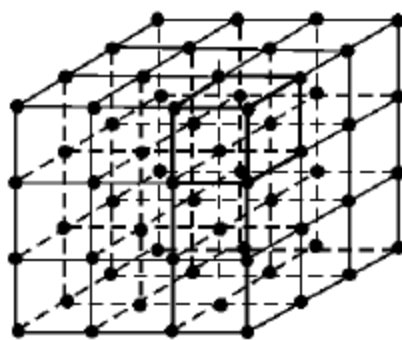
## 晶格与晶胞

- 晶格：表示晶体中原子排列形成的空间格子；
- 晶胞：能够代表原子排列的最小单元；

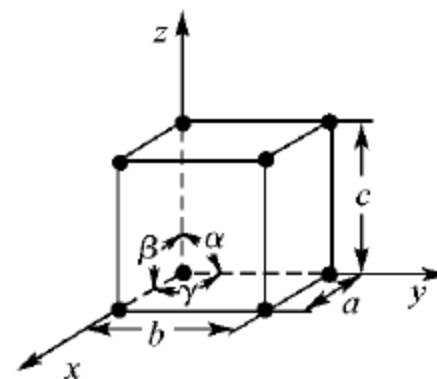
晶胞的大小形状可由晶胞的**棱边长度**和**棱边间的夹角**表示。



(a) 原子堆垛模型



(b) 晶格



(c) 晶胞



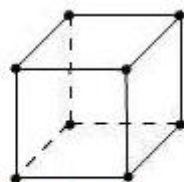
# 金属的晶体结构与结晶

## 七大晶系

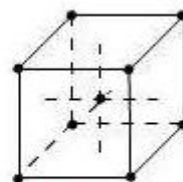
类型	轴晶	轴间夹角
立方 Cubic	$a=b=c$	所有夹角等于 $90^\circ$
正方 Tetragonal	$a=b \neq c$	所有夹角等于 $90^\circ$
正交 Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	所有夹角等于 $90^\circ$
六方 Hexagonal	$a=b \neq c$	二个夹角等于 $90^\circ$ ，一个夹角等于 $120^\circ$
菱形 Rhombohedral	$a=b=c$	所有夹角相等，但没有一个角等于 $90^\circ$
单斜 Monoclinic	$a \neq b \neq c$	二个夹角等于 $90^\circ$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

# 金属的晶体结构与结晶

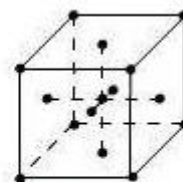
## 十四种布拉维格子



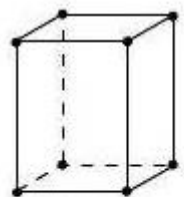
简单立方



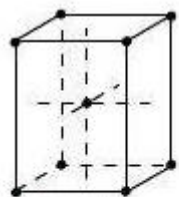
立方体心



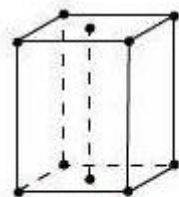
立方面心



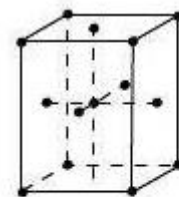
正交



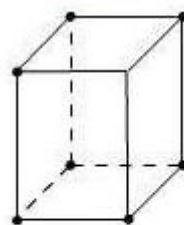
正交体心



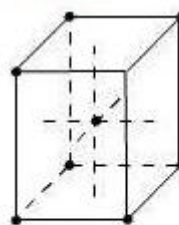
正交底心



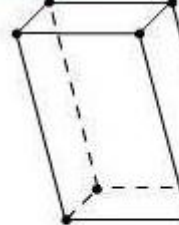
正交面心



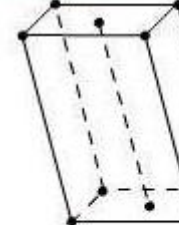
四方



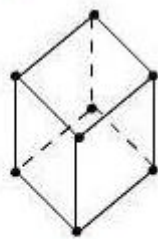
四方体心



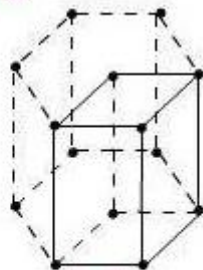
单斜



单斜底心



三方



六方



三斜

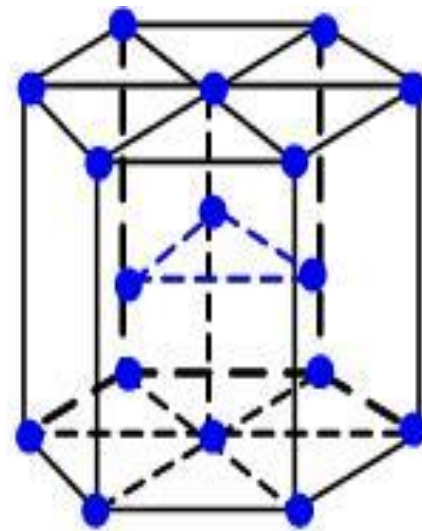
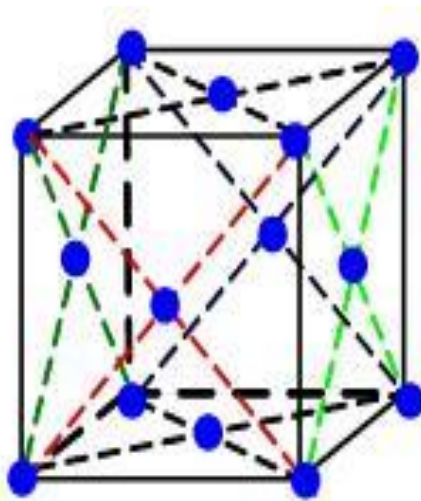
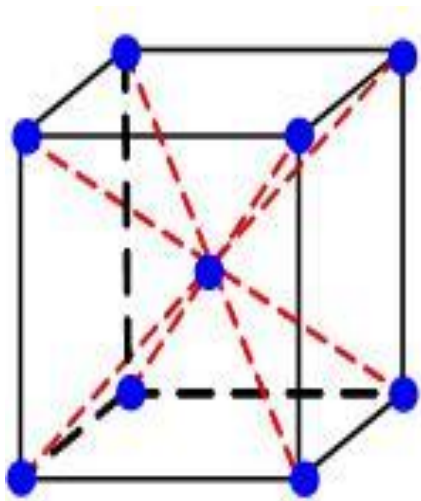
# 金属的晶体结构与结晶

## 二、常见的晶格类型

体心立方晶格 Mn、Mo、V、 $\alpha$ -Fe、 $\delta$ -Fe

面心立方晶格 Cu、Ag、Pb、Ni、 $\gamma$ -Fe

密排六方晶格 Mg、Zn

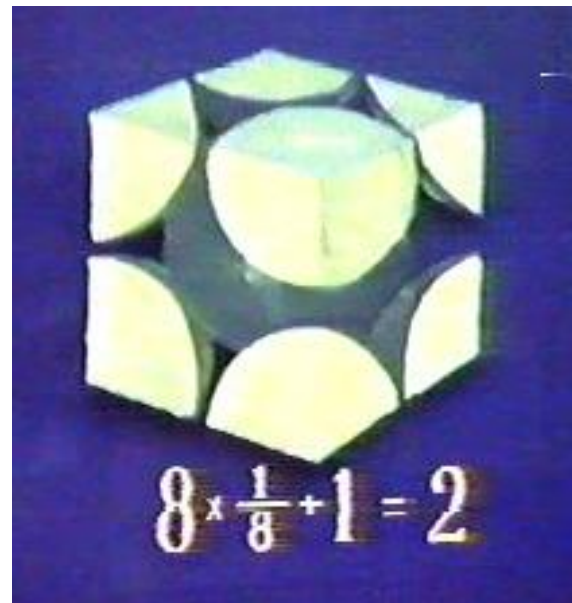
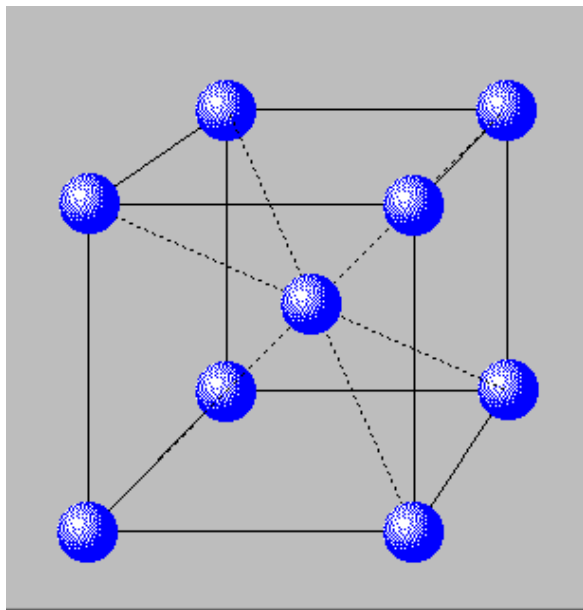


- 原子数、原子半径、致密度



# 金属的晶体结构与结晶

## 体心立方晶格



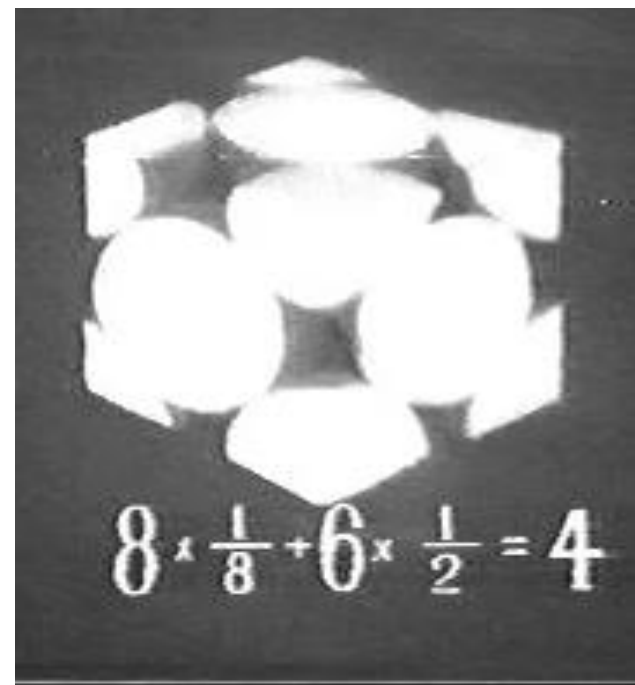
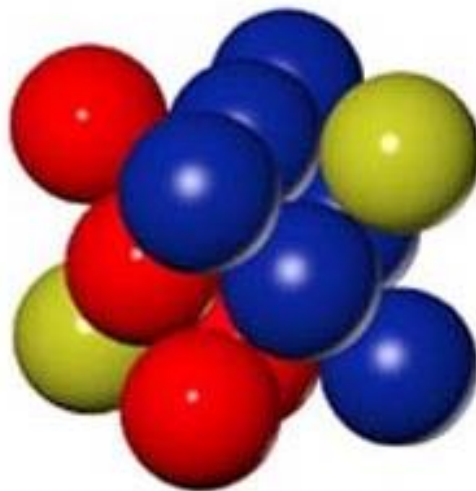
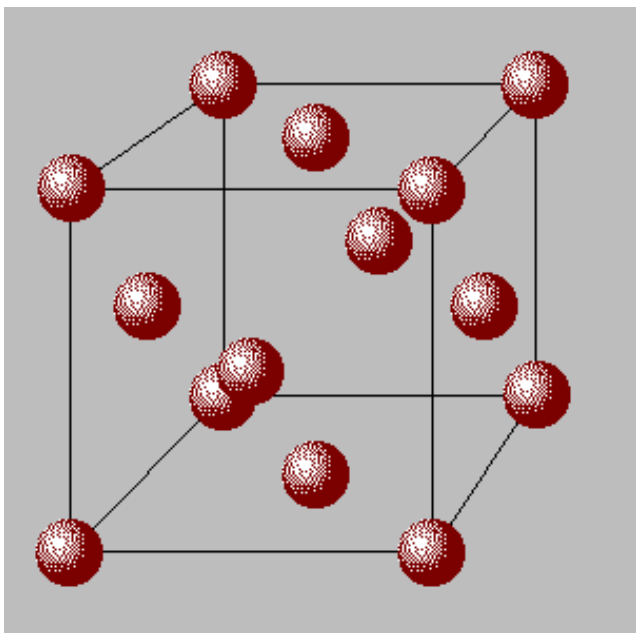
原子半径

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

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

# 金属的晶体结构与结晶

## 面心立方晶格



原子半径

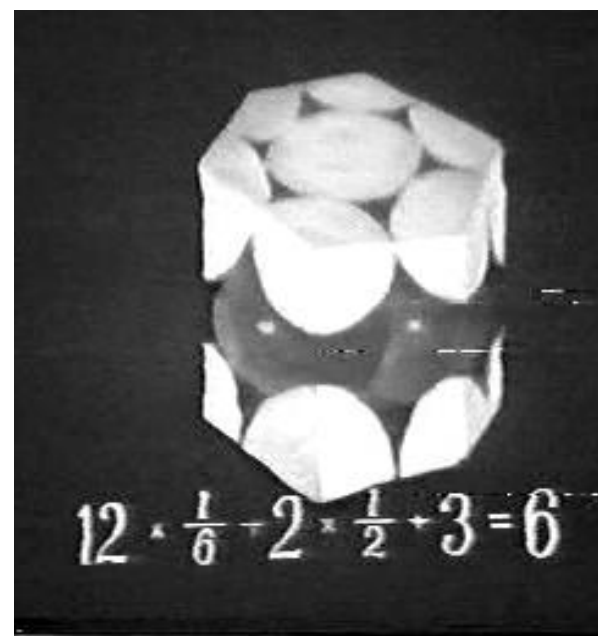
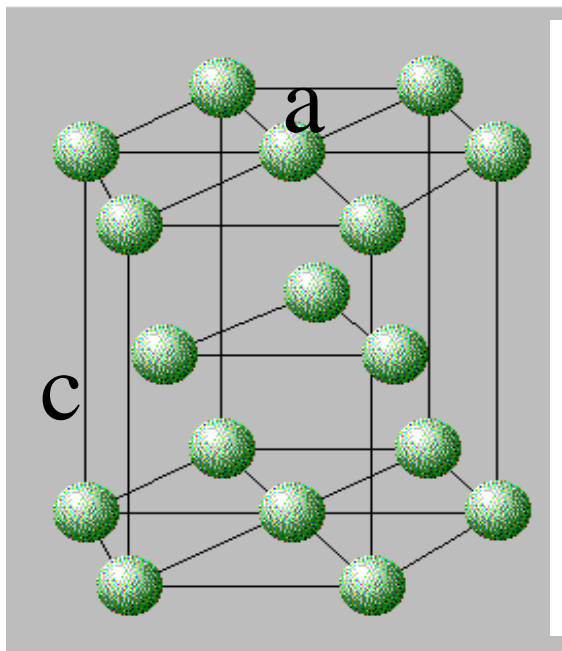
$$r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$$

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



# 金属的晶体结构与结晶

## 密排六方晶格



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

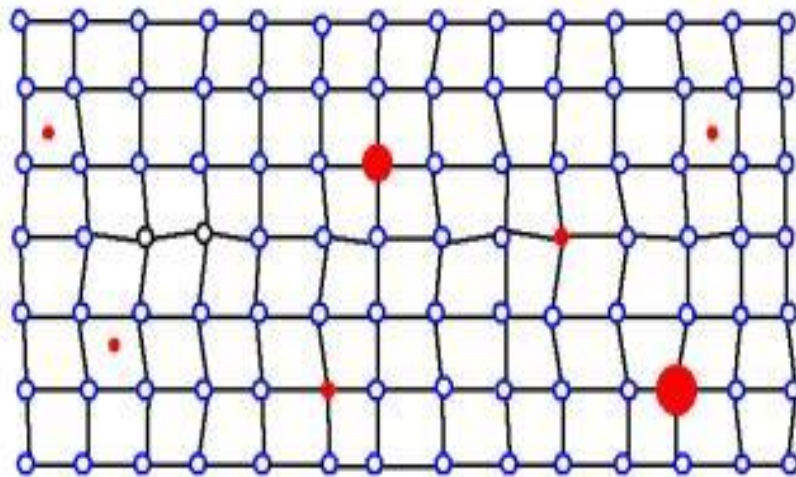
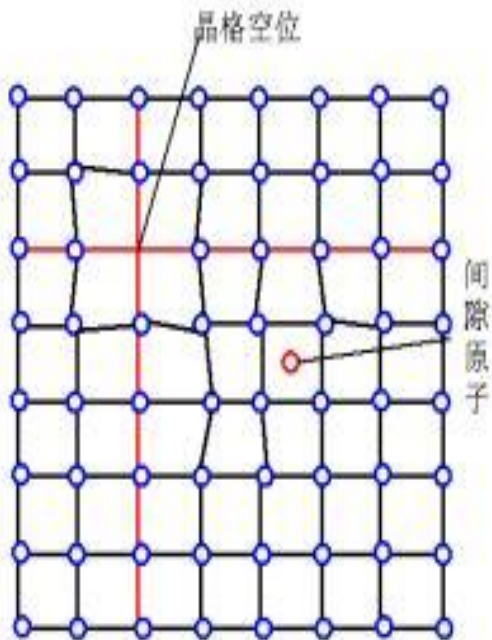
$$r = \frac{1}{2} a$$

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

# 金属的晶体结构与结晶

## 三、实际晶体结构

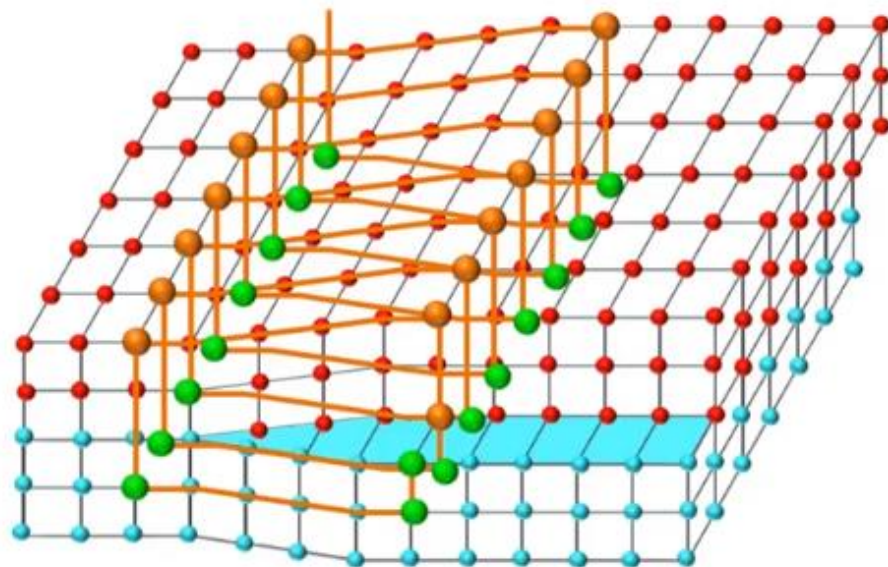
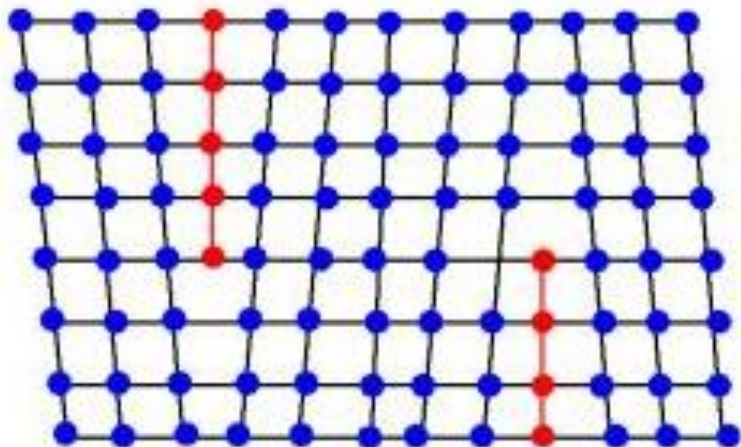
- 晶体的缺陷：实际晶体中偏离理想结构的区域
- 点缺陷
- 是指晶格中三维尺寸都较小的点状缺陷，主要包括晶格空位、间隙原子和异质原子。



# 金属的晶体结构与结晶

## ■ 晶体的缺陷：线缺陷

- 线缺陷：晶体内沿某一条线，附件原子的排列偏离了完整晶格形成的线性缺陷区，主要表现形式是各种位错。
- 位错：在晶体中某处有一列或若干列原子发生了某种有规律的错排现象。
- 分为刃型位错和螺型位错

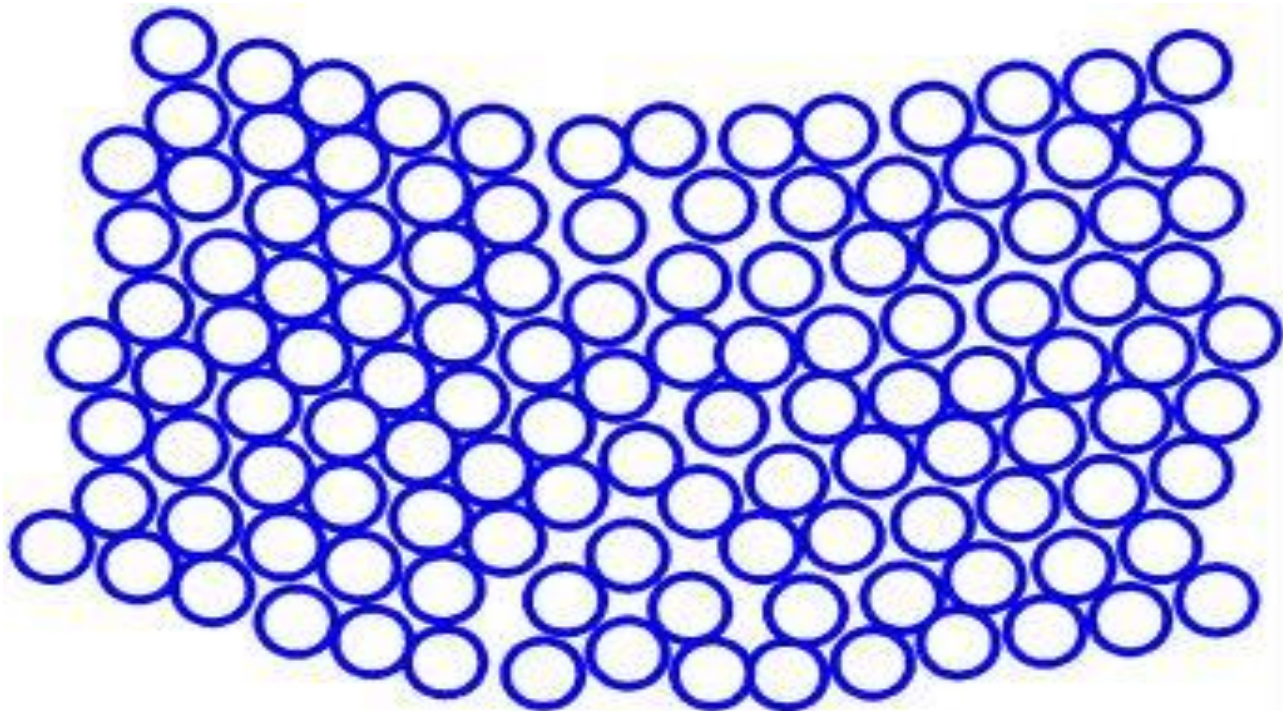




# 金属的晶体结构与结晶

- 晶体的缺陷：面缺陷

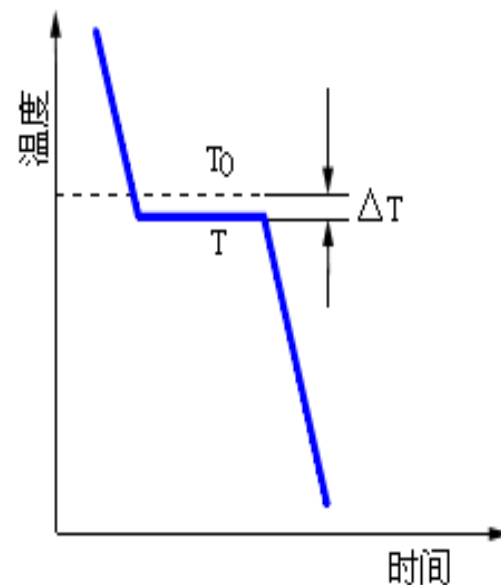
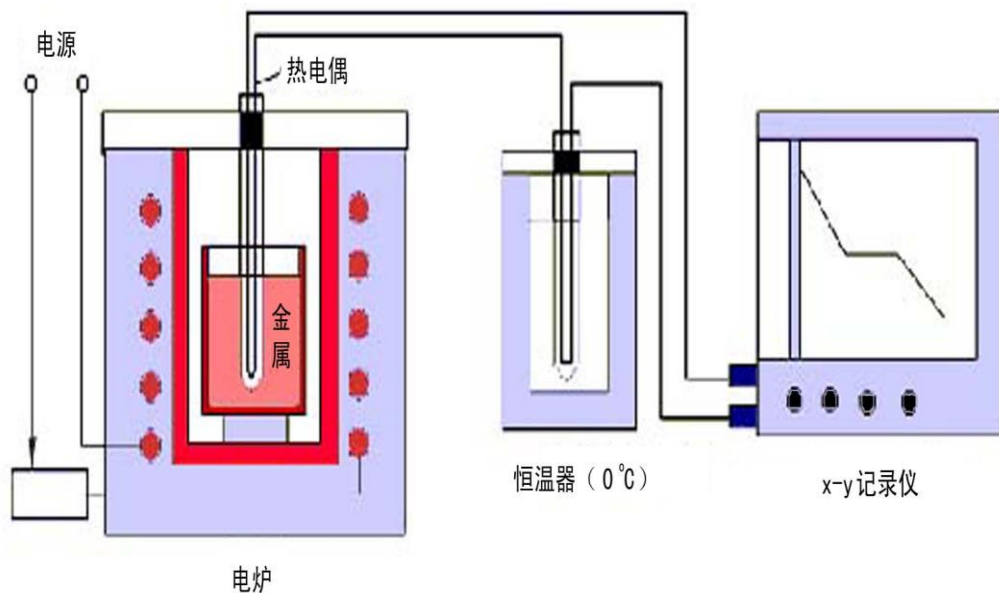
- 面缺陷是晶体中二维尺寸较大，一维尺寸较小的呈面状分布的缺陷，如晶界、亚晶界等。金属晶粒的大小对金属的性能有很大影响。



# 金属的晶体结构与结晶

## 四、纯金属的结晶

——液态金属转变为具有晶体结构的固态的过程。



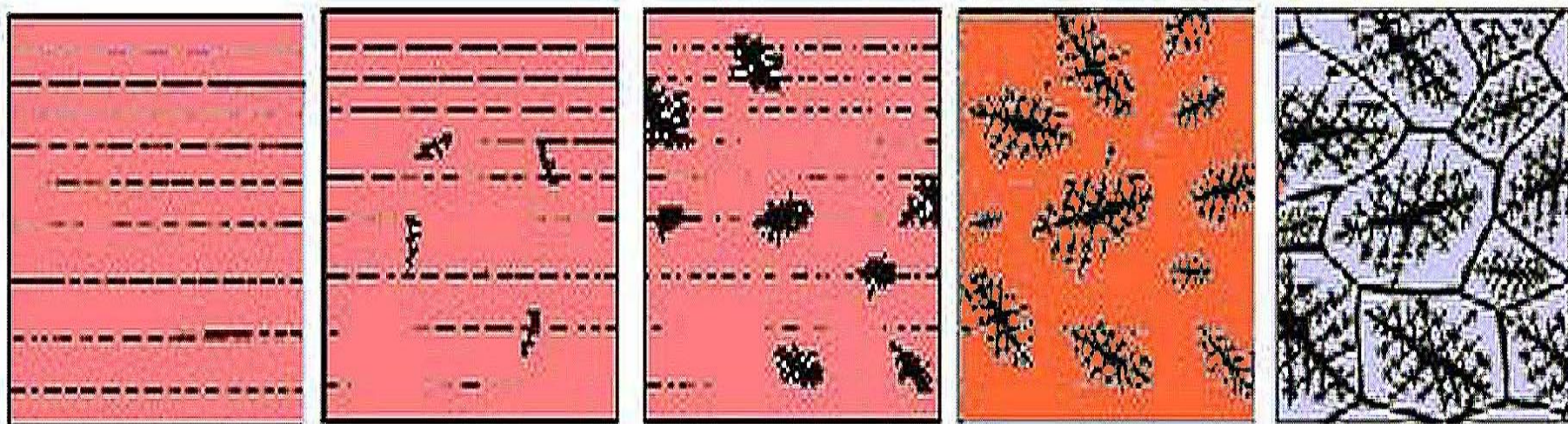
纯金属的冷却曲线

### 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

# 金属的晶体结构与结晶

## 纯金属结晶过程

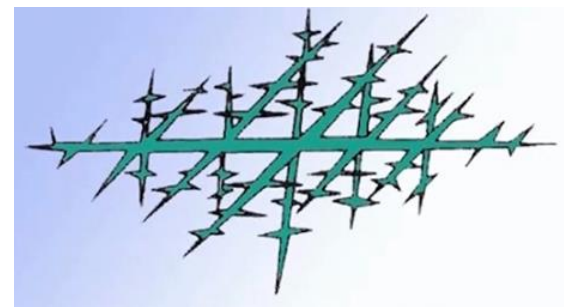


特点：在一定时间内完成  
过程：局部→整体  
实质：形核+长大

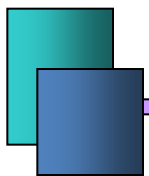
呈树枝状

均匀形核

非均匀形核







# 金属的晶体结构与结晶

## ◆ 晶粒大小与力学性能的关系

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

## 细晶强化的方法

—增大过冷度 $\Delta T$ (中、小型零件),  $\uparrow$ 形核率,  $\downarrow V_{\text{长大}}$

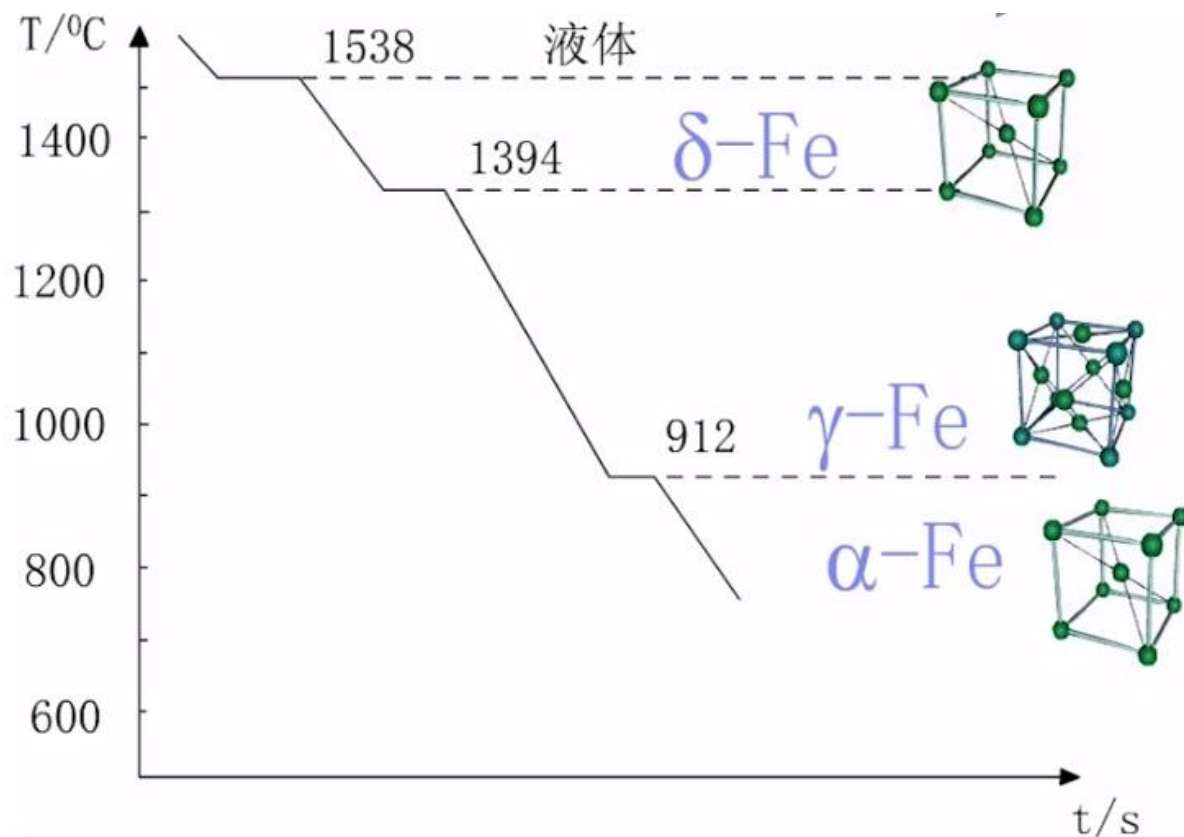
—变质处理  $\uparrow$ 形核率

—震动、搅拌结晶  $\downarrow V_{\text{长大}}, \uparrow$ 形核率

# 金属的晶体结构与结晶

## 五、金属的同素异构转变

金属在固态下随温度不同而发生晶格类型的转变

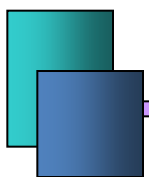


特点:

转变发生于固态

在一定温度下进行

晶格类型发生变化



# 合金的晶体结构

---

## 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**——金属或合金中具有相同化学成分、相同结构并以界面分开的各个均匀的组成部分。

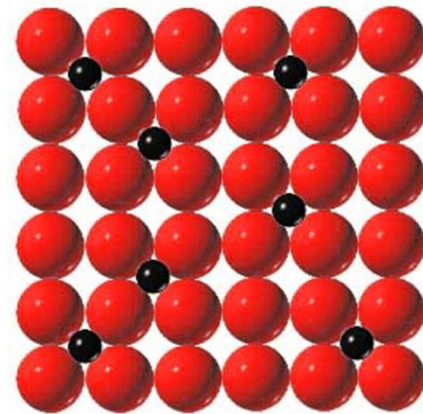
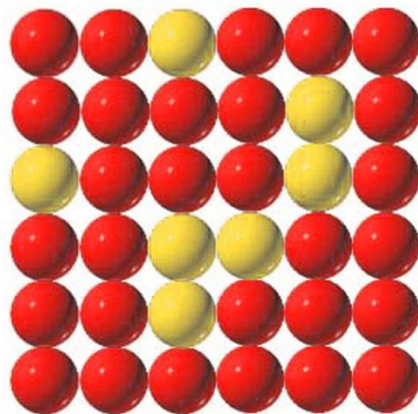
**组织**——金肉眼或显微镜所观察到的不同相或相的形状、分布及各相之间的组合状态。

# 合金的晶体结构

## ◆ 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。
- 溶质原子分布于溶剂晶格间隙而形成的固溶体



特点 晶格：与溶剂相同

性能：产生固溶强化：强度、硬度↑；塑性，韧性↓

# 合金的晶体结构

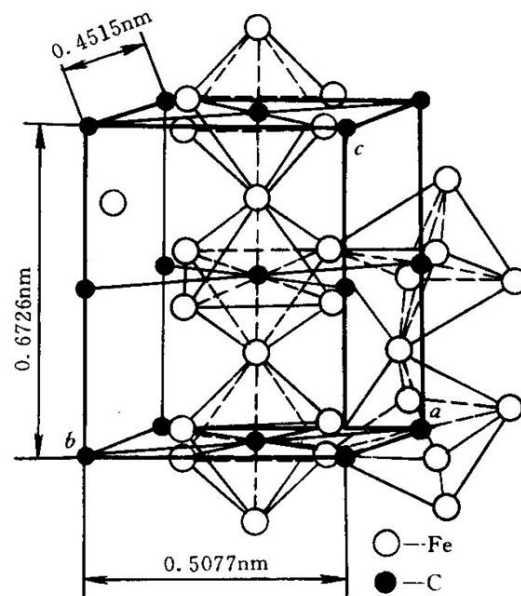
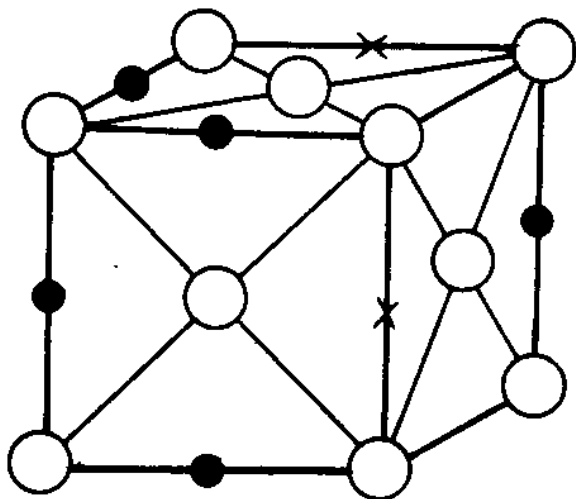
## ◆ 金属化合物（中间相）

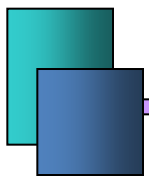
合金各组元按一定整数比化合而成的固体物质

特点：晶格：与各组元不同

性能：硬而脆（不同于组元）：**T<sub>熔</sub>↑**，**HB↑**，脆性↑，塑性↓

金属化合物的类型：正常价化合物、电子化合物、间隙化合物





# 铁碳合金相图

## ◆ 相图的基本概念

### ■ 相图的概念

合金相图又称平衡图或平衡状态图，表示同一合金系平衡状态下不同成分的合金在不同温度下由哪些相组成，以及相间平衡关系。

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、磁性分析法、x射线分析法等。



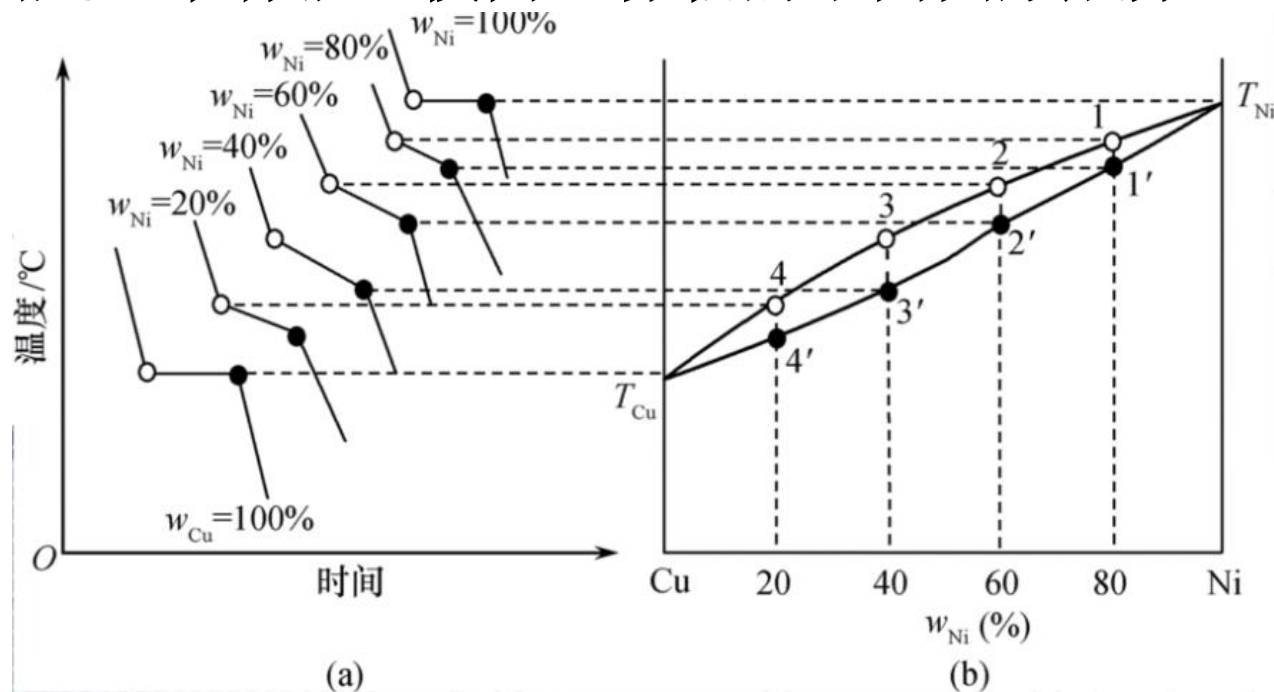
# 铁碳合金相图

## 相图的表示方法

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成分下所处的组织状态。

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



# 铁碳合金相图

Fe和C

液态：无限互溶

固态：  
固溶体  
化合物

C的存在形式

$\text{Fe}_3\text{C}$

石墨

## ◆Fe-C合金的基本组织

1. 铁素体F——碳溶于 $\alpha$ -铁形成的间隙固溶体称为铁素体

溶解度： 600 °C： 0.0057%

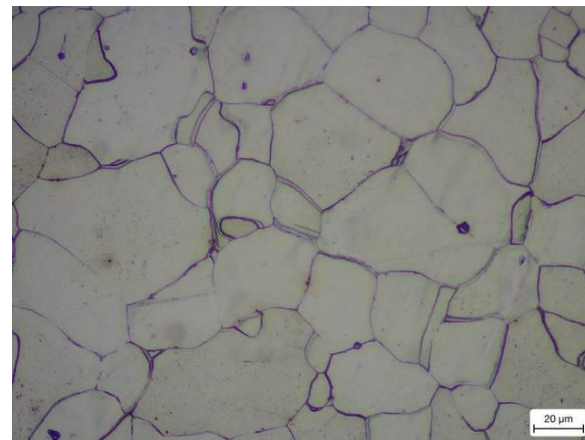
727 °C： 0.0218%

机械性能：  $\sigma_b$  : 180~280MPa  $\sigma_{0.2}$  : 100~170MPa

$\delta$  : 30~50%  $\psi$  : 70~80%  $\alpha_k$  : 160~200Nm/cm<sup>2</sup>

HB : 50~80;

强度、硬度低，塑性、韧性好

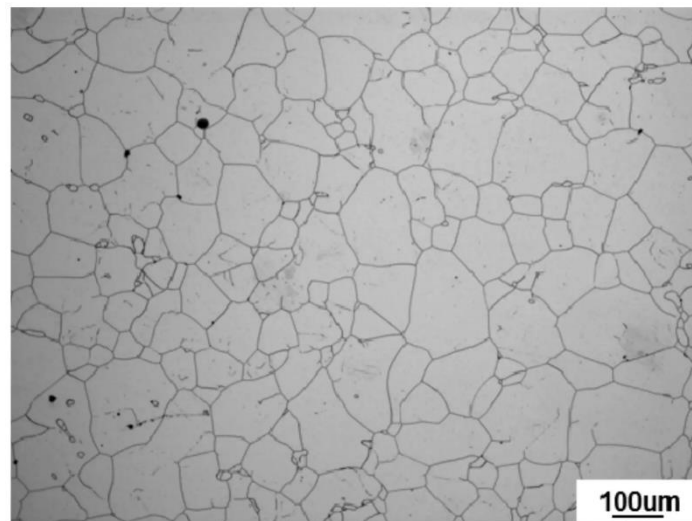


# 铁碳合金相图

## 2. 奥氏体A——碳溶于 $\gamma$ -铁形成的间隙固溶体称为奥氏体

溶解度: 727 °C: 0.77%  
1148 °C: 2.11%

机械性能:  $\sigma_b$  :  $\sim 400\text{MPa}$   
 $\delta$  : 40 $\sim$ 50%  
HB : 160 $\sim$ 200



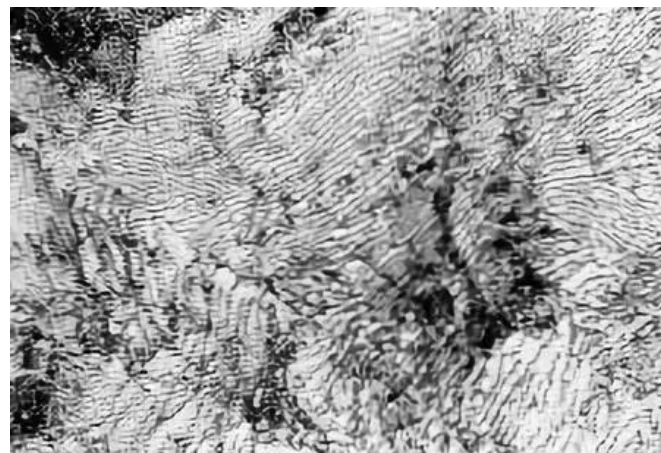
## 3. 渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}$ ——碳与铁形成的具有复杂晶格的间隙化合物

碳的质量分数: 6.69%

机械性能: HB : 800  
 $\delta$  : 0,  $\alpha_k$  : 0  
熔点: 1227 °C

# 铁碳合金相图

## 4. 珠光体P

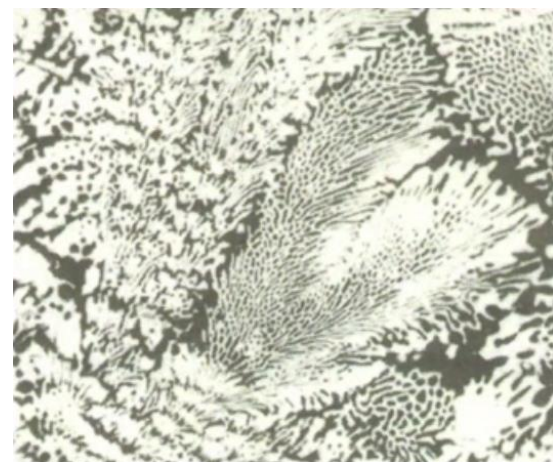


## 5. 莱氏体

高温莱氏体



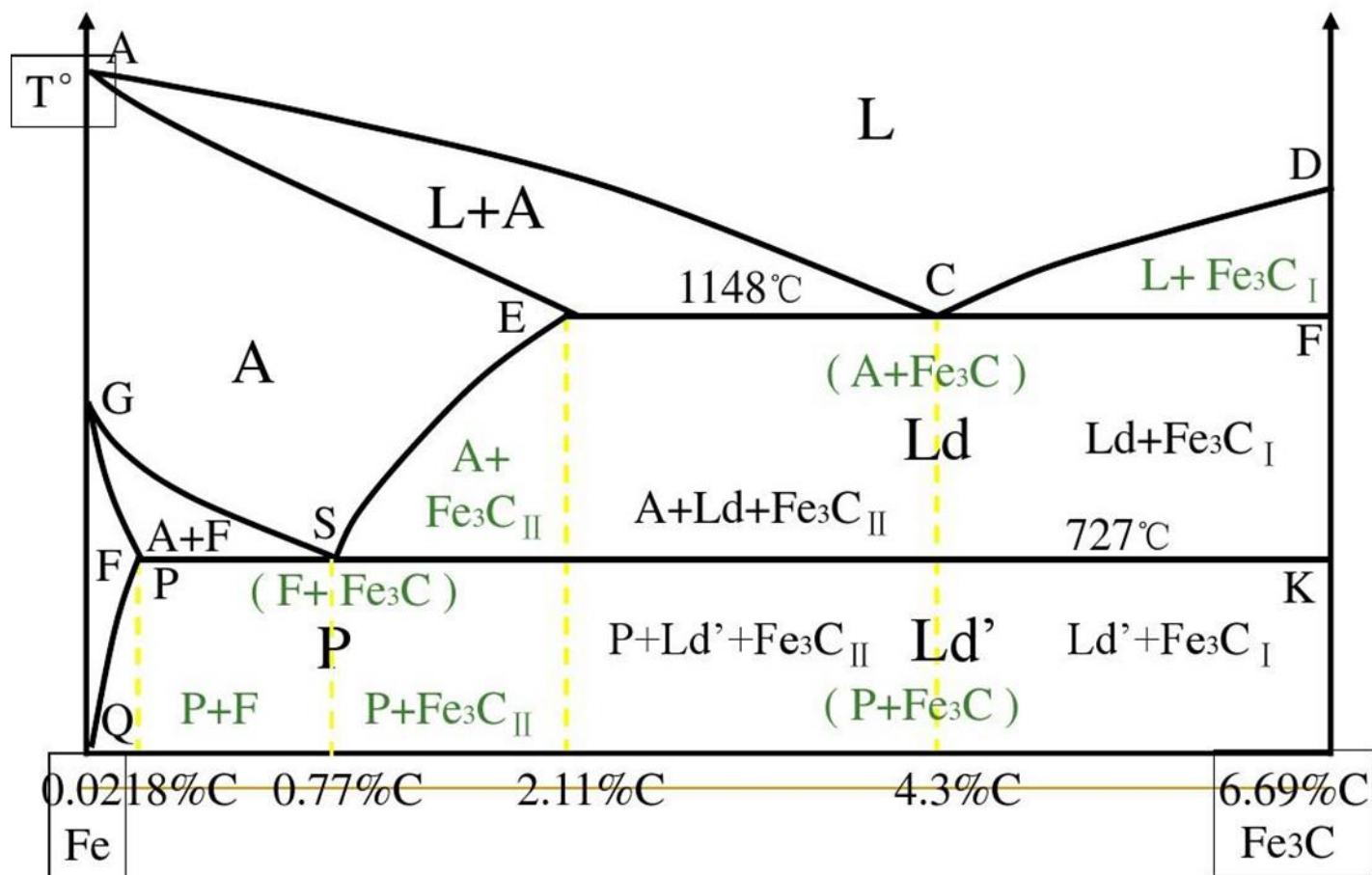
低温莱氏体



组织组成物

# 铁碳合金相图

Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图





# 铁碳合金相图

---

## ✓ 状态图的分析

### ➤ 特性点、临界线、相区

**S点**（共析点 0.77%）： $A \rightarrow P$

共析转变：从一种固体物质中同时析出两种固体物质

**C点**（共晶点 4.3%）： $L \rightarrow L_d$

共晶转变：从一种液体中同时析出两种固体物质

**E点**（2.11%）：**钢和铸铁的分界点**



# 铁碳合金相图

## ✓ 状态图的分析

### ➤ 特性点、临界线、相区

$T_{\text{始晶}}$  连线ACD——液相线

$T_{\text{全晶}}$  连线AECF——固相线

ECF——固相线  $L+A \rightarrow A+Fe_3C+L_d$

$T_{\text{始转}}$  连线GSE

GS线（析铁线）—— $A_3$ 线  $A \rightarrow A+F$

ES线（析碳线）—— $A_{cm}$ 线  $A \rightarrow A+Fe_3C$

$T_{\text{全转}}$  连线PSK—— $A_1$ 线（共析线）  $A \rightarrow P$



# 铁碳合金相图

## ✓ 状态图的分析

### ➤ 特性点、临界线、相区

单相区：F、A、L、 $\text{Fe}_3\text{C}$

双相区： $\text{L}+\text{A}$ 、 $\text{L}+\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{A}+\text{F}$ 、 $\text{A}+\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{F}+\text{Fe}_3\text{C}$



# 铁碳合金相图

---

## Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中铁碳合金的分类

工业纯铁

碳素钢

共析钢

亚共析钢

过共析钢

白口铸铁

共晶白口铸铁

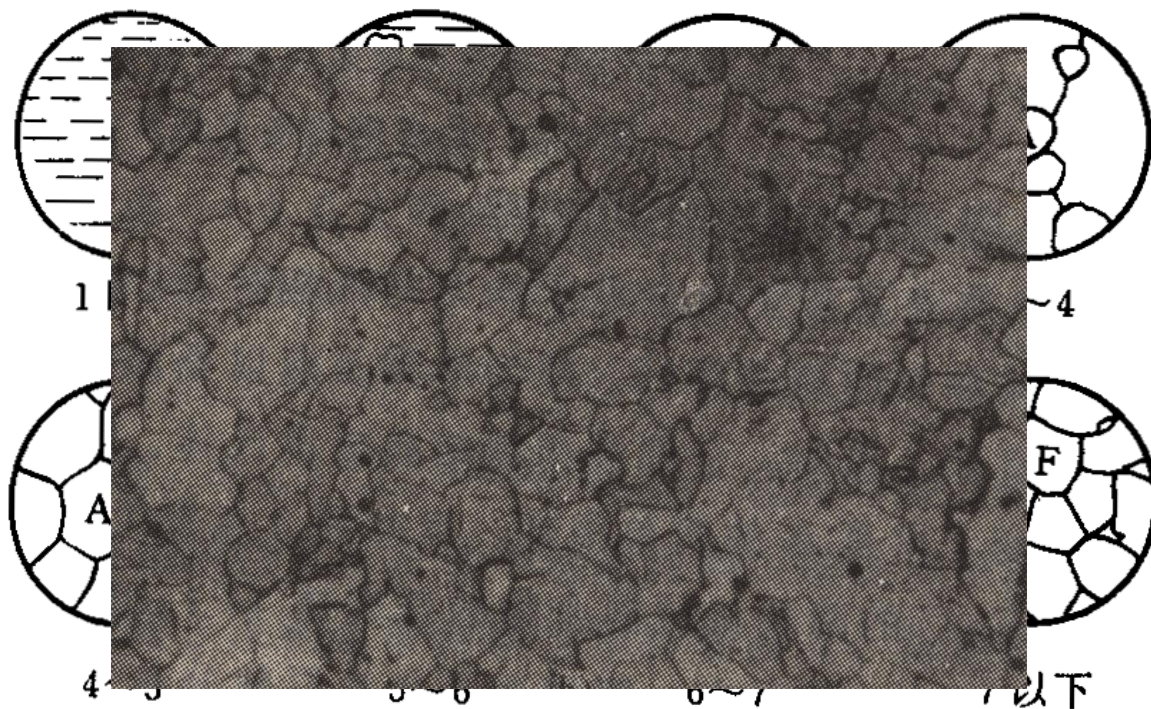
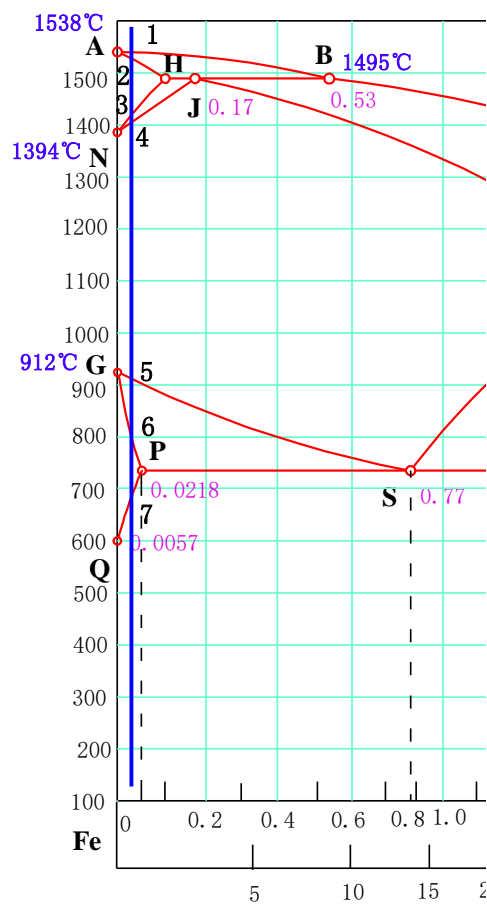
亚共晶白口铸铁

过共晶白口铸铁

# 铁碳合金相图

## 典型合金的相变过程（平衡状态）

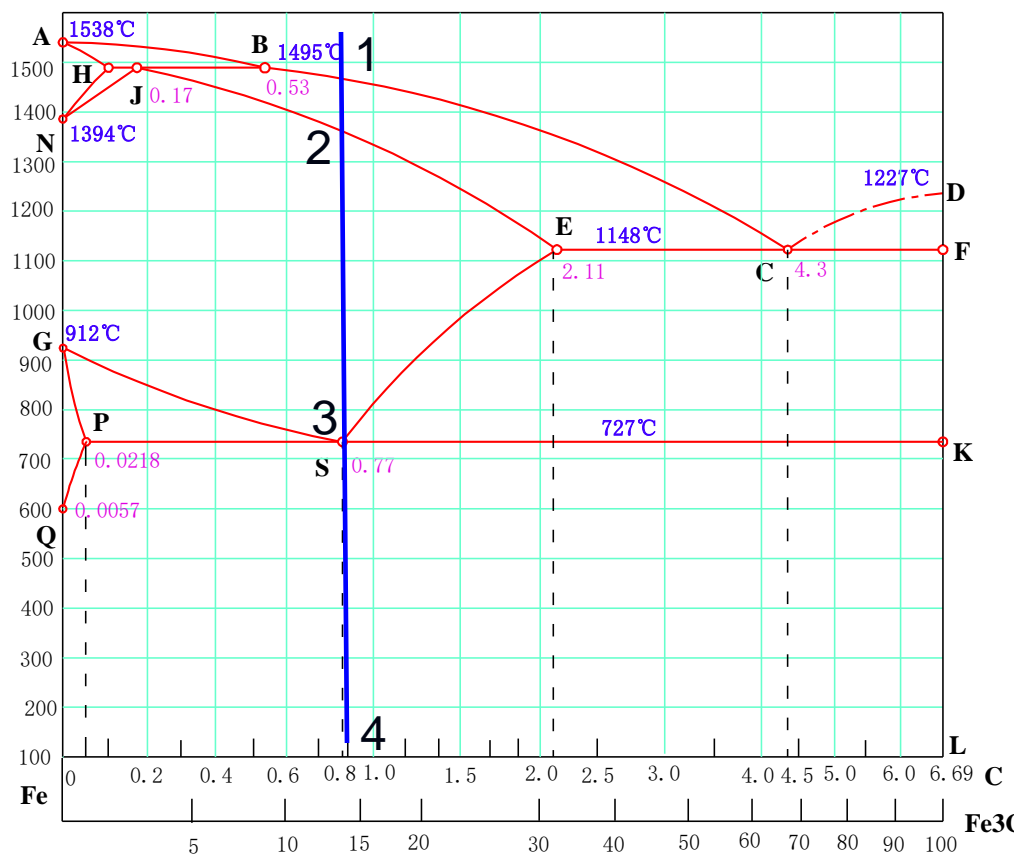
### 工业纯铁



250×

# 铁碳合金相图

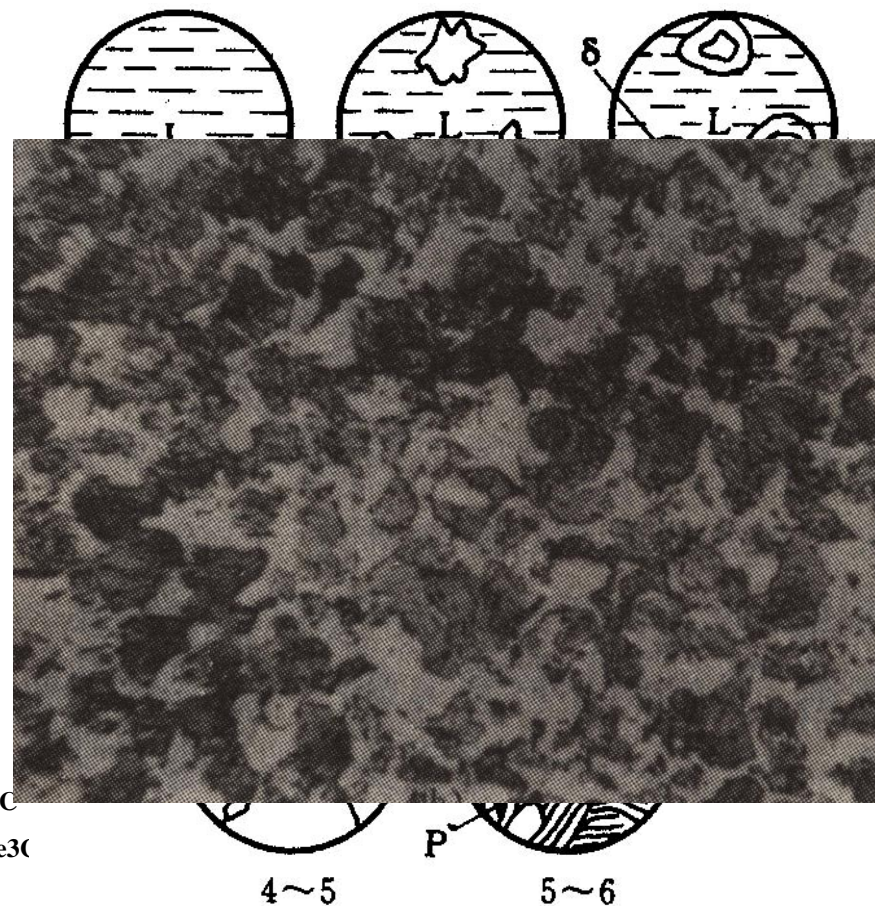
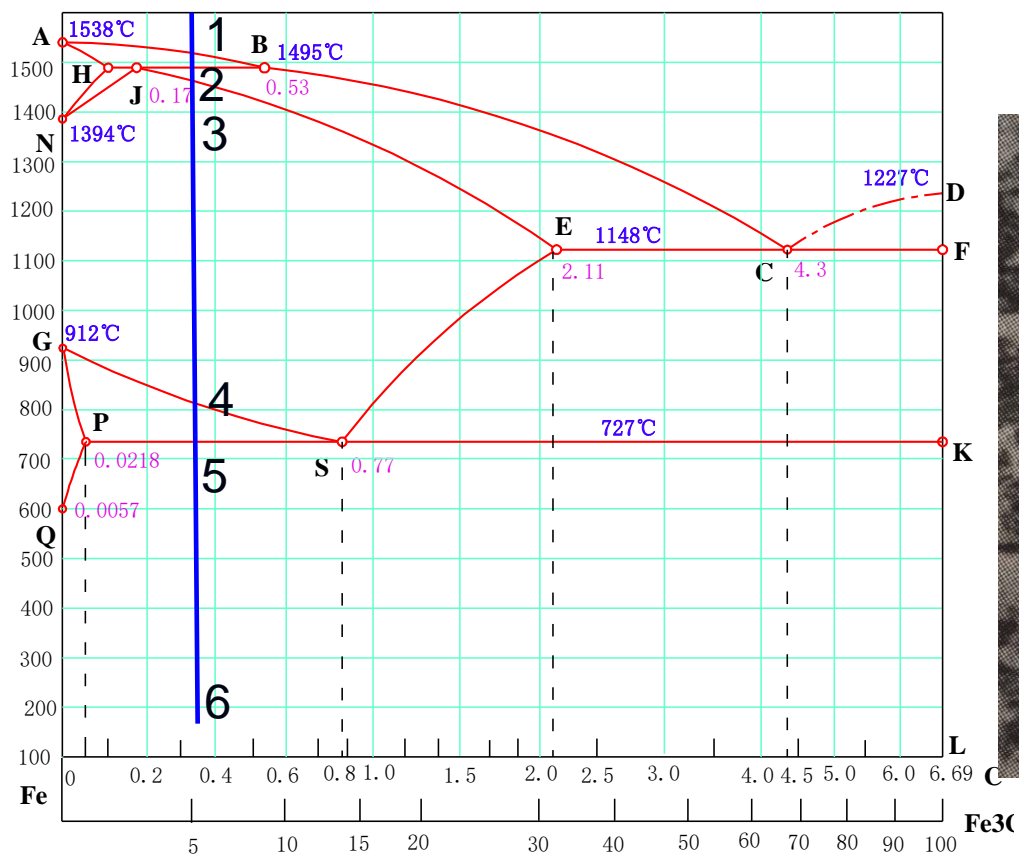
## 共析钢





# 铁碳合金相图

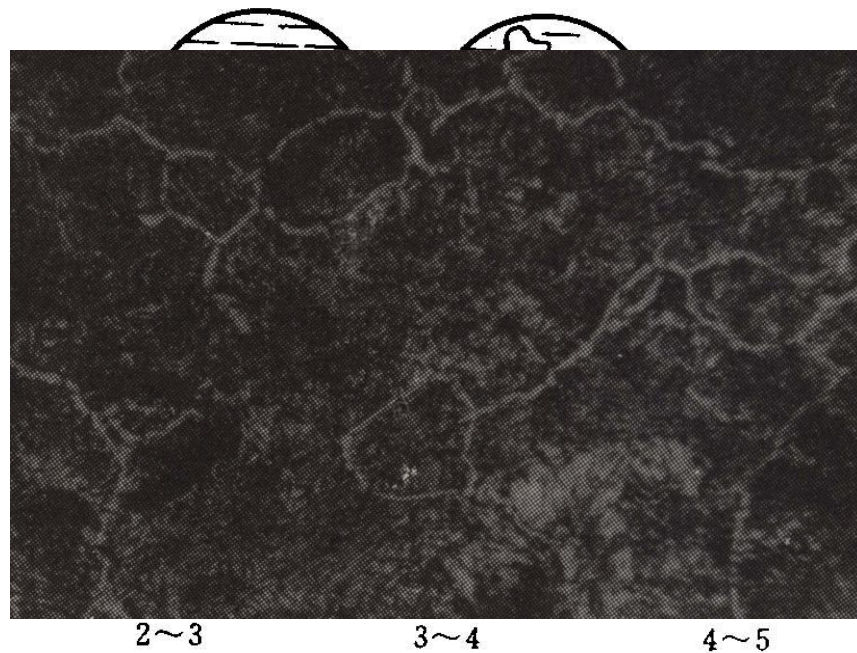
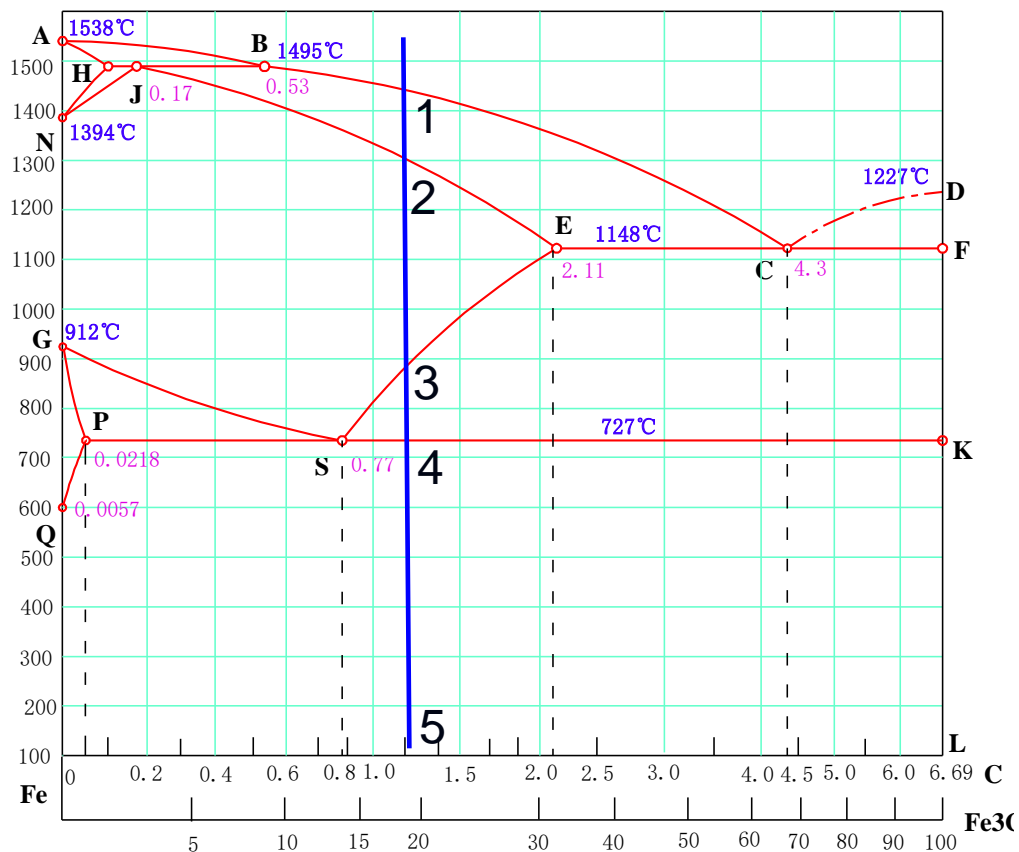
## 亚共析钢





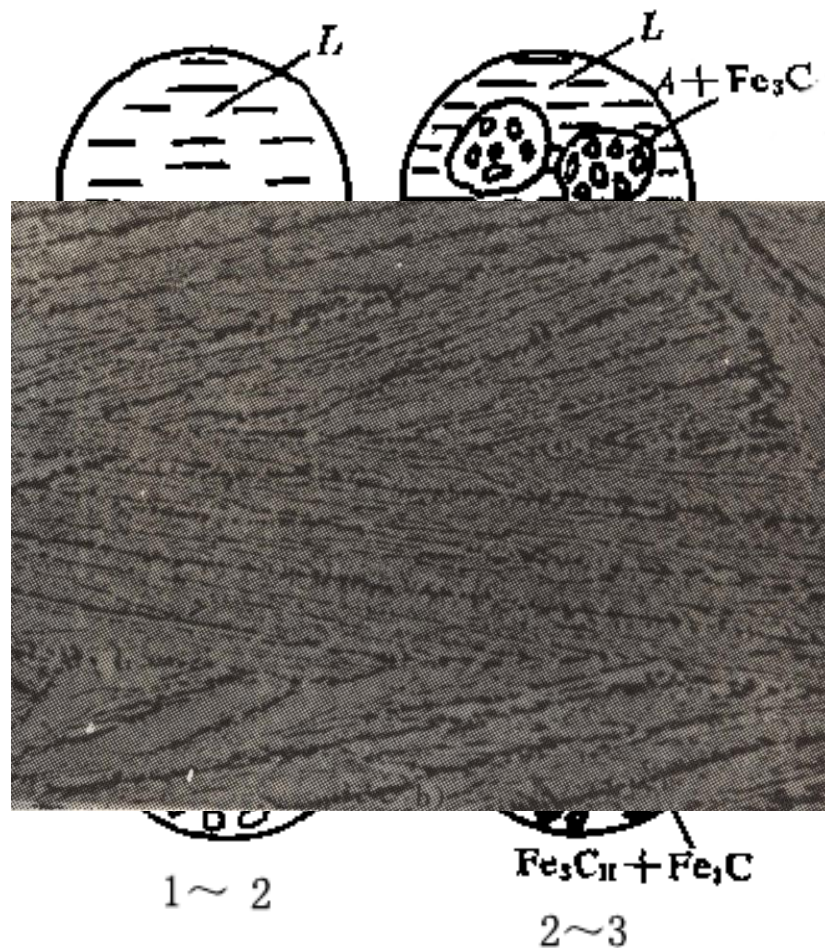
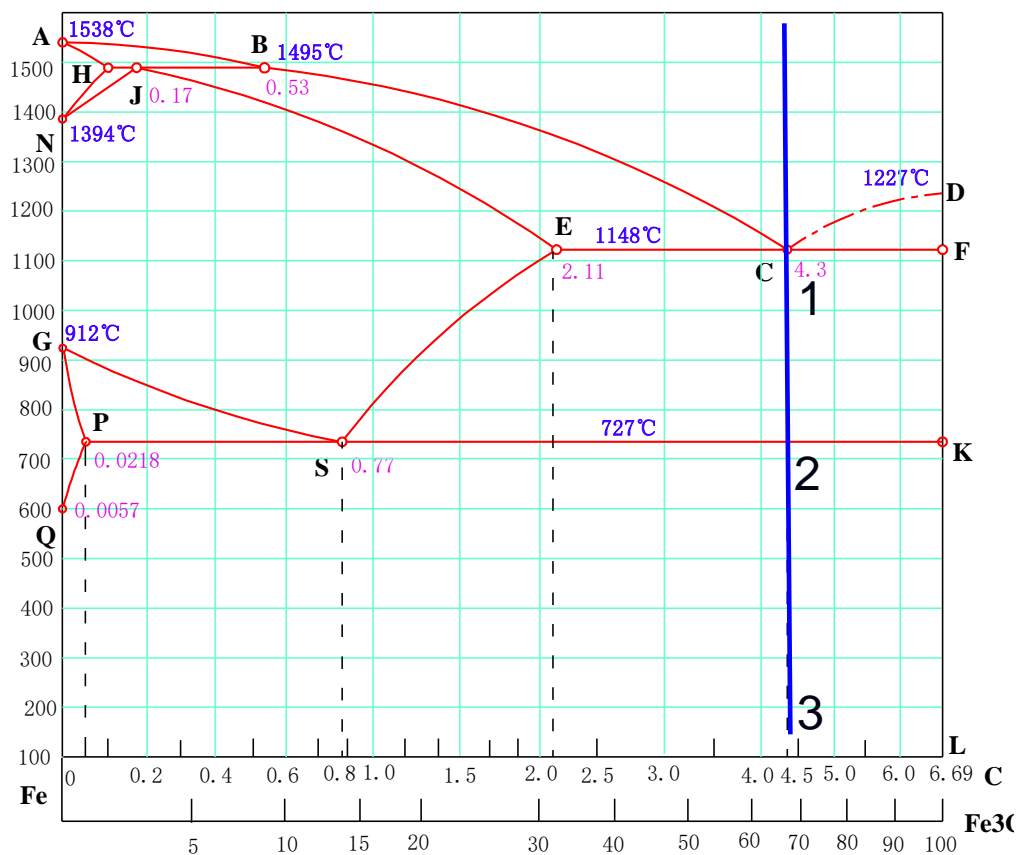
# 铁碳合金相图

## 过共析钢



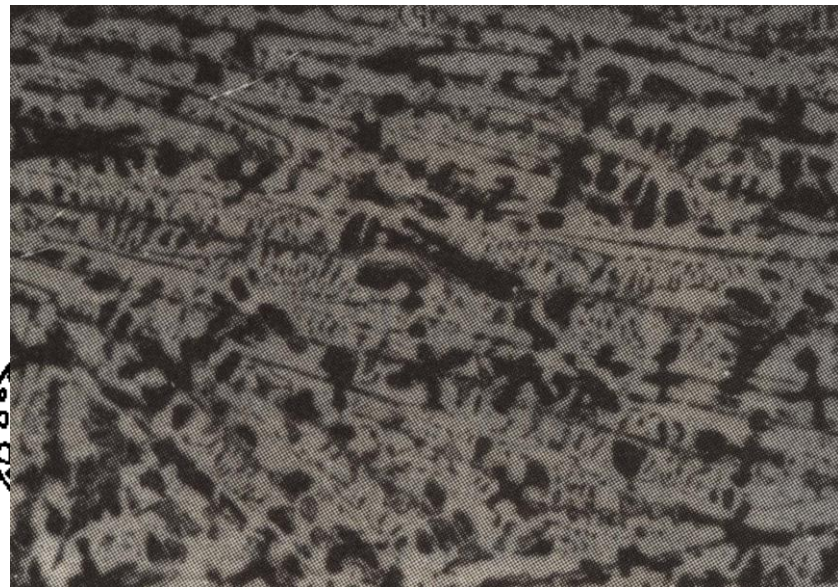
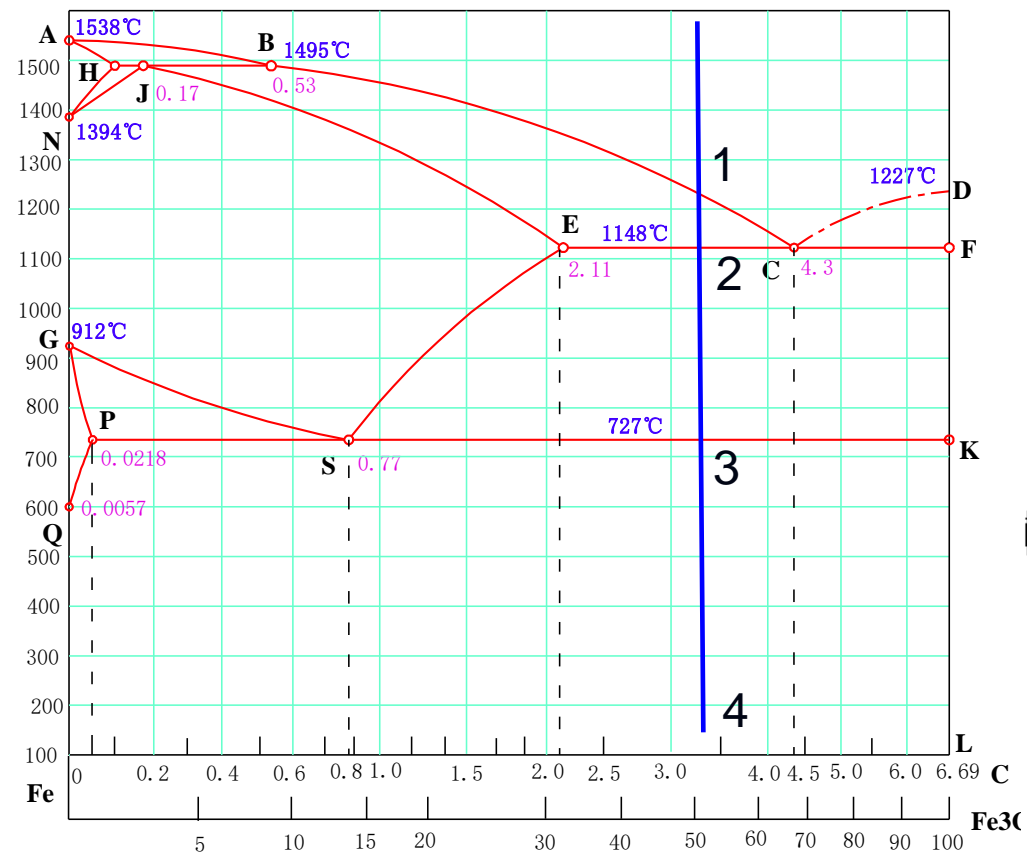
# 铁碳合金相图

## 共晶白口铁



# 铁碳合金相图

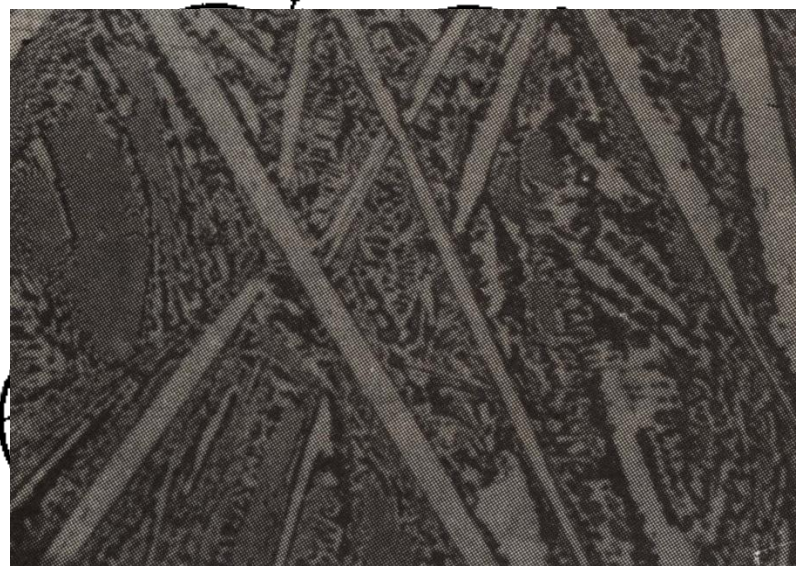
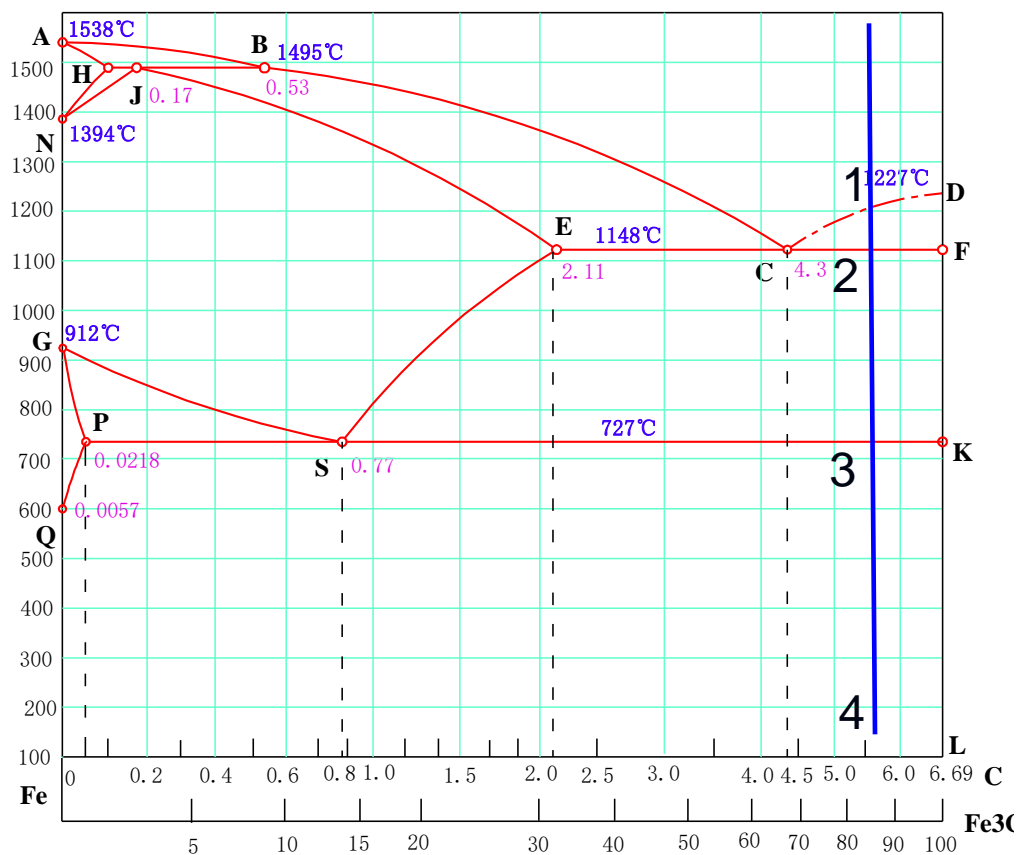
## 亚共晶白口铁





# 铁碳合金相图

## 过共晶白口铁



# 铁碳合金相图

## 铁碳合金相图的应用

### ➤ 含碳量对平衡组织及性能的影响

含碳量  $< 0.9\%$ ,  $C \uparrow \longrightarrow \sigma_b \uparrow$ 、 $HB \uparrow$ 、 $\delta \downarrow$ 、 $\alpha_k \downarrow$

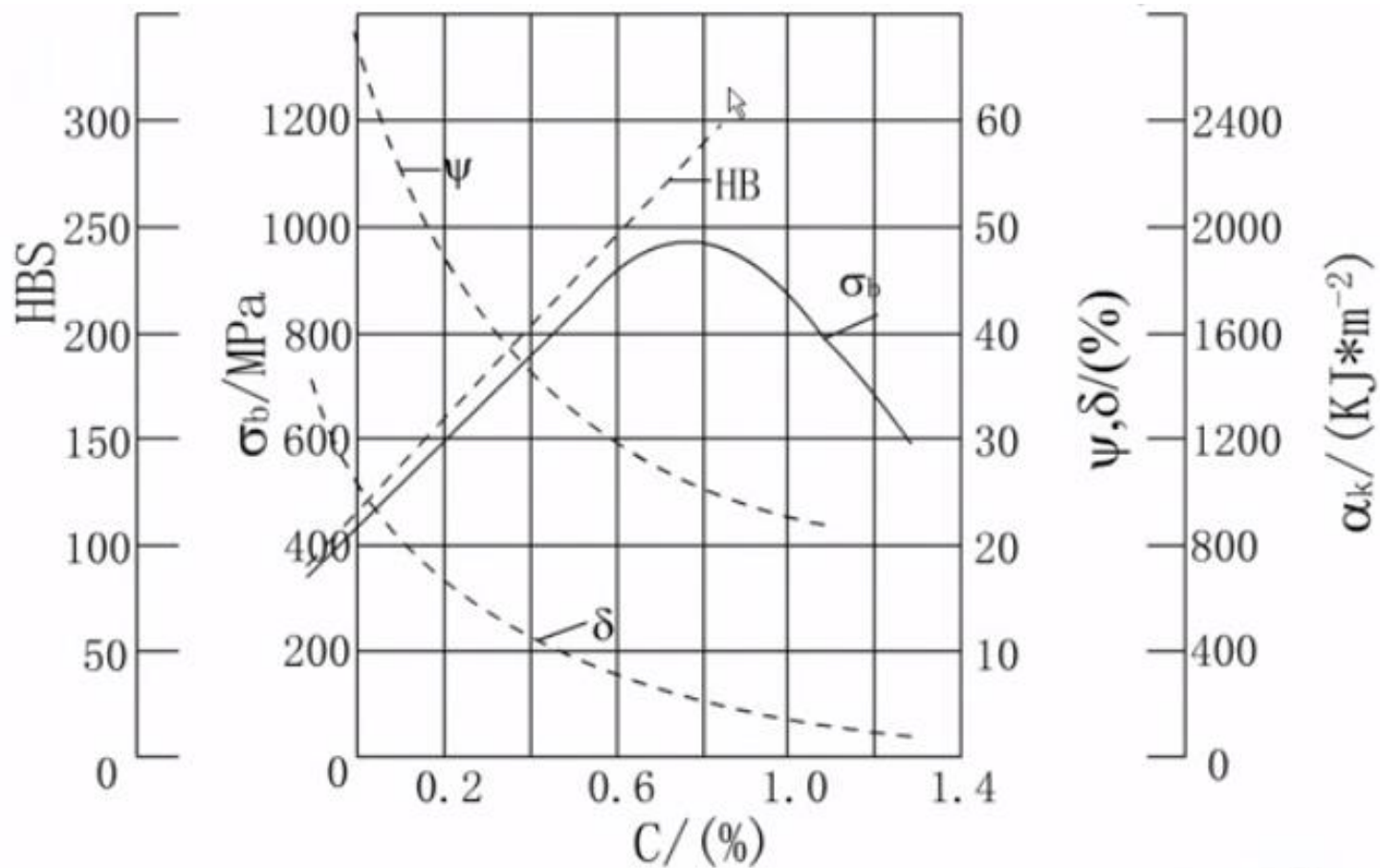
含碳量  $> 0.9\%$ ,  $C \uparrow \longrightarrow HB \uparrow$ 、 $\sigma_b \downarrow$ 、 $\delta \downarrow$ 、 $\alpha_k \downarrow$

原因:

$C\% \uparrow \longrightarrow P \uparrow$ , 综合性能  $\uparrow$

过共析钢,  $C\% \uparrow \longrightarrow Fe_3C \uparrow$ , 脆性  $\uparrow$ ,  $\sigma_b \downarrow$

# 铁碳合金相图





# 铁碳合金相图

---

## ➤ 在选材方面的应用

- 1 ) 结构钢 需要塑性、韧性好的材料, 选用 低碳钢;  
含碳量小于**0.25%**
- 2 ) 各种机械零件 需要强度、塑性及韧性好的材料, 选用中碳钢; 含碳量**0.25~0.55%**
- 3 ) 各种工具 需要硬度高、耐磨性好的材料, 选用高碳钢; 含碳量大于**0.55%**
- 4 ) 软磁材料 选用工业纯铁
- 5 ) 要求耐磨、不受冲击、形状复杂的铸件, 选用白口铁



# 铁碳合金相图

➤ 在铸造工艺方面的应用

## ① 可确定合适的浇注温度

根据Fe-Fe<sub>3</sub>C相图，浇注温度一般在液相线以上50°C~100°C。

## ② 共晶成分的铸铁广泛应用

共晶成分的合金结晶温度最低，结晶区间最小，故流动性好，分散缩孔少，可得到致密的铸件。

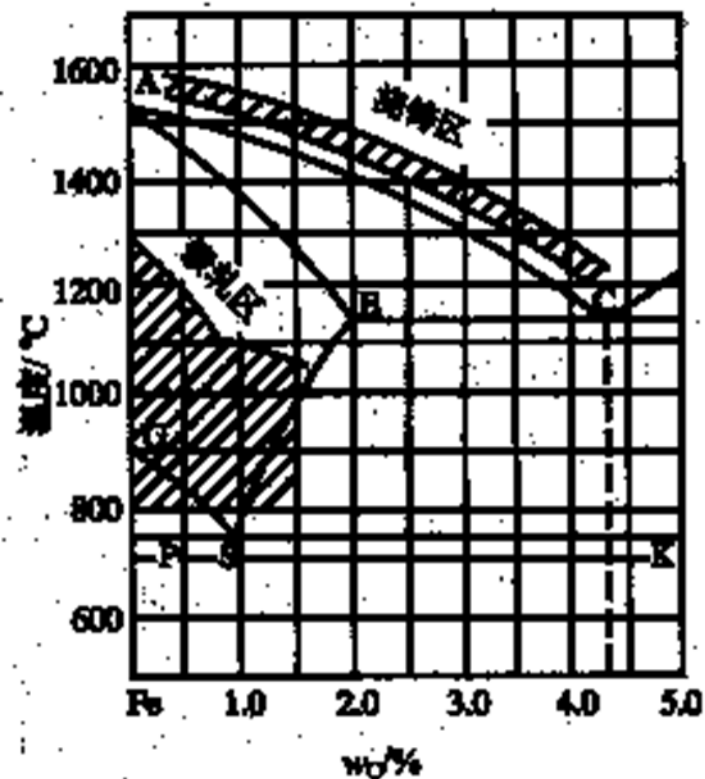
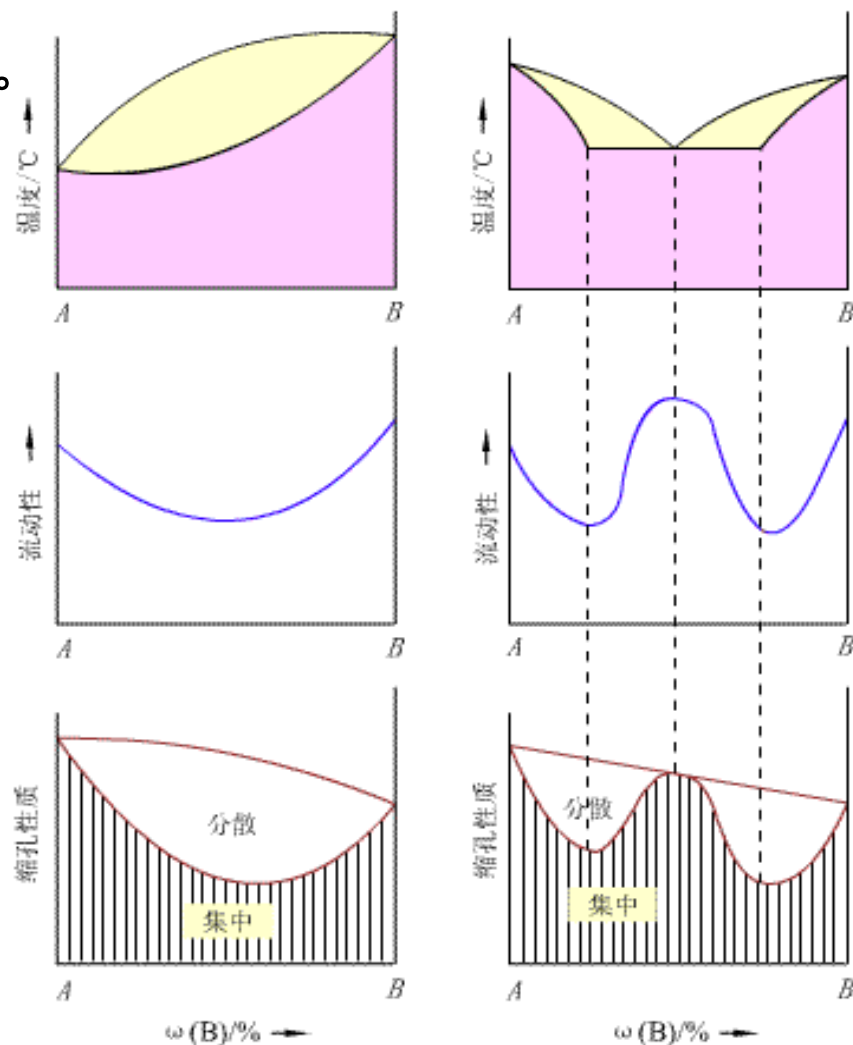


图 1-2-22 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图  
与铸造工艺的关系

# 合金的性能与相图

**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。



# 铁碳合金相图

## ➤ 在锻造方面的应用

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。所以需要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。

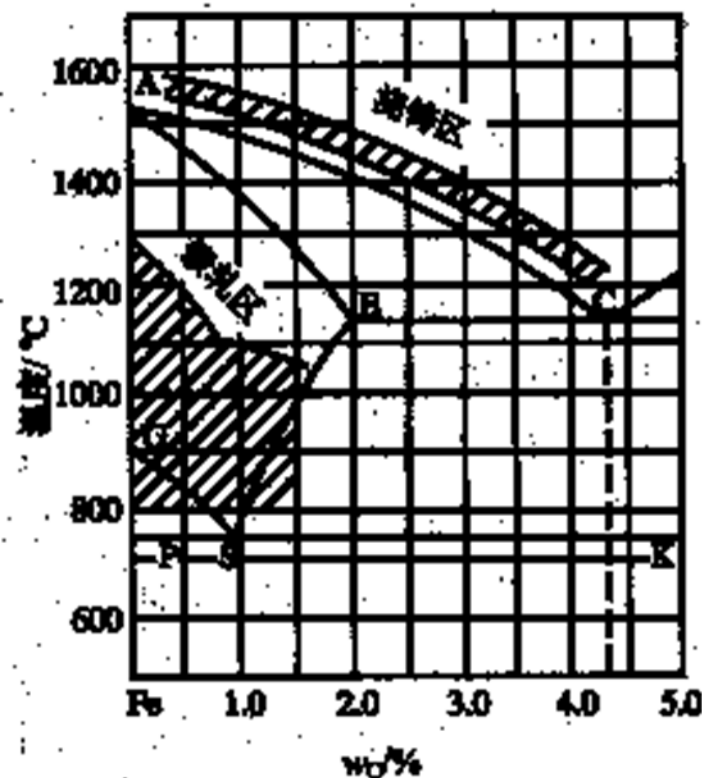


图 1-2-22 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图  
与铸锻工艺的关系



# 合金的性能与相图

## ➤ 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

---

## ➤ 在热处理工艺方面的应用

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 具有共析转变的合金，原则上可进行淬火处理。
- 6) 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。