

工程材料

专业基础必修课

北京化工大学 贾明印

jiamy@mail.buct.edu.cn

13522357136



● 内容回顾

2.2 合金的结晶 ★

2.2.1 二元合金的结晶

- 1、发生匀晶反应的合金的结晶
- 2、发生共晶反应的合金的结晶
- 3、发生包晶反应的合金的结晶
- 4、发生共析反应的合金的结晶
- 5、含有稳定化合物的合金的结晶

2.2.2 合金的性能和相图的关系

2.2.3 铁碳合金的结晶

- 1、铁碳相图
- 2、合金的平衡结晶过程

2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

工业纯铁
 $w(C) \leq 0.0218\%$
亚共析钢
 $0.0218\% < w(C) \leq 0.77\%$
共析钢
 $w(C) = 0.77\%$
过共析钢
 $0.77\% < w(C) \leq 2.11\%$
亚共晶白口铸铁
 $2.11\% < w(C) < 4.3\%$
共晶白口铸铁
 $w(C) = 4.3\%$
过共晶白口铸铁
 $4.3\% < w(C) < 6.69\%$

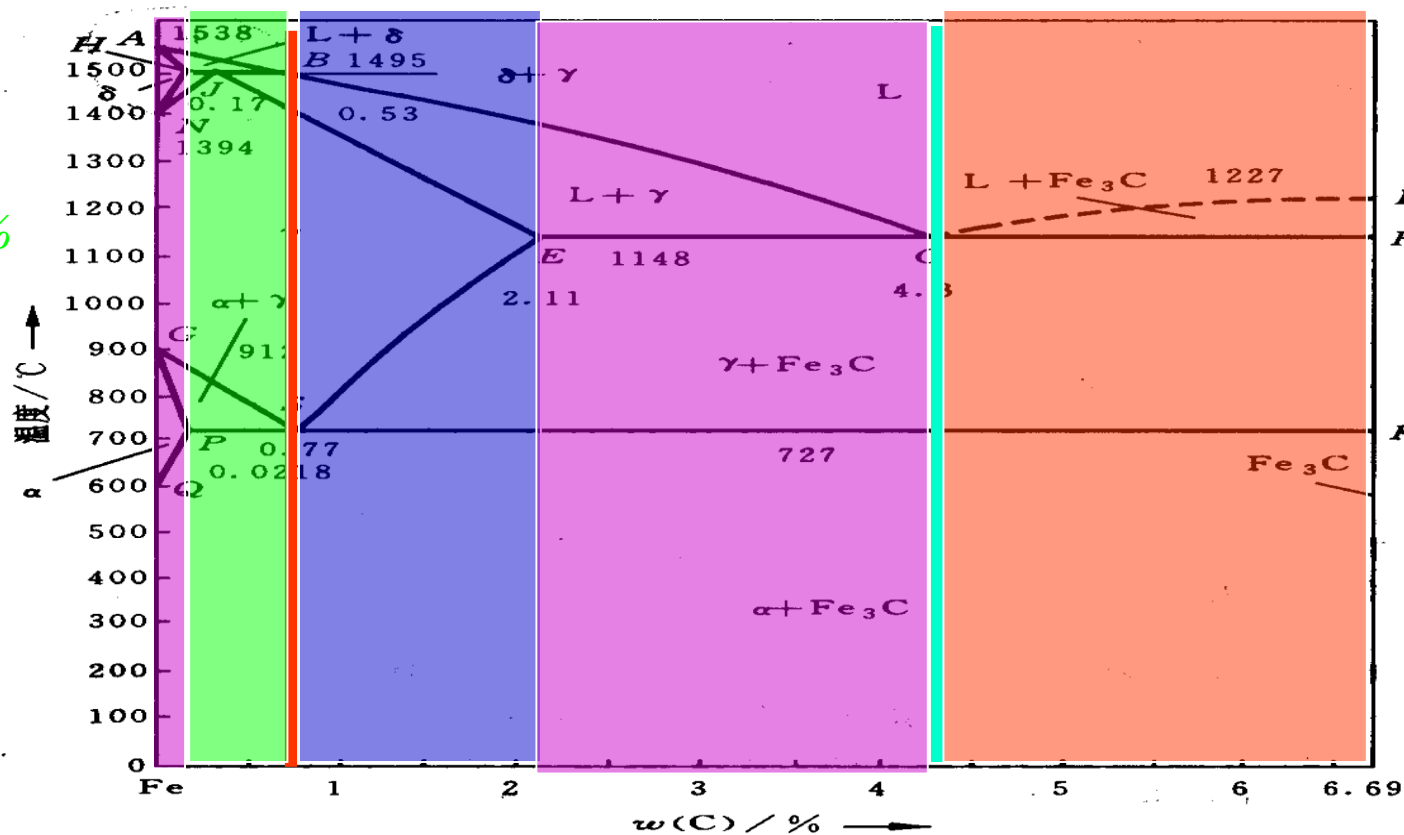


图 2-29 Fe-Fe₃C 相图

2.2 合金的结晶

2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

(3) 亚共析钢(hypoeutectoid ~): 以 $W(C)=0.4\%$ 为例

1~2点 $L+\delta$

2~2'点 $L+\delta \rightarrow A$

反应结束还有L

2'~3点 $L+A$

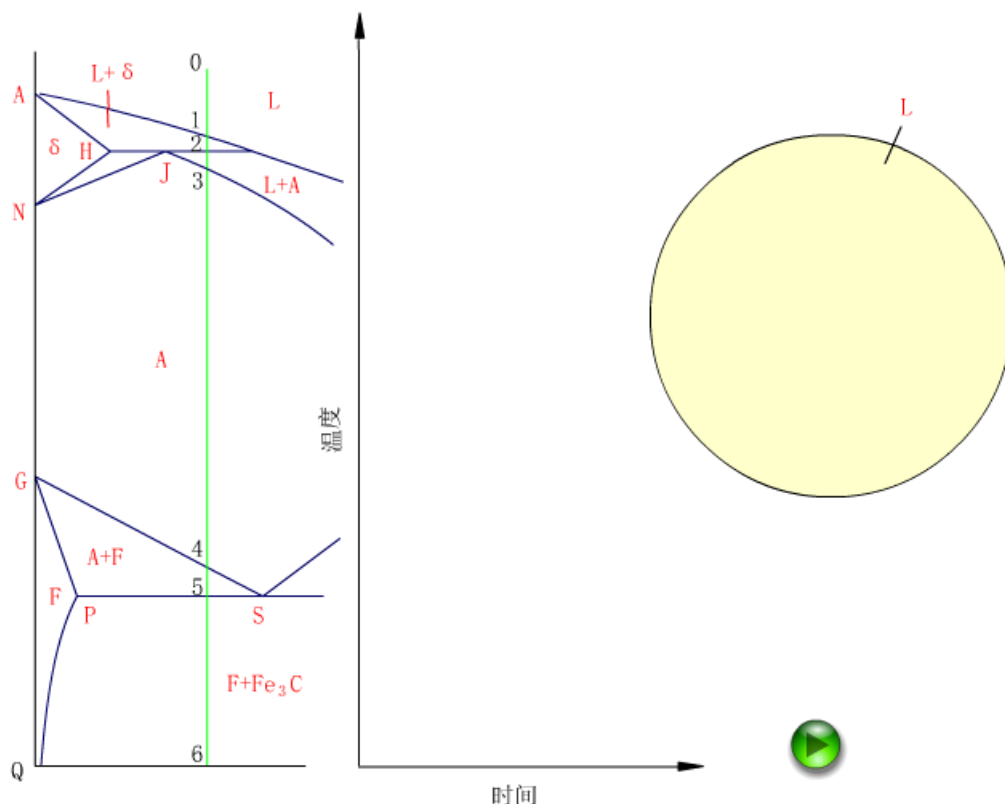
3~4点 A

4~5点 $A+F$

5~5'点 $A \rightarrow P$

F不变化

5'~6点 $P+F$



2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

(3) 亚共析钢(hypoeutectoid ~): 以 $W(C)=0.4\%$ 为例

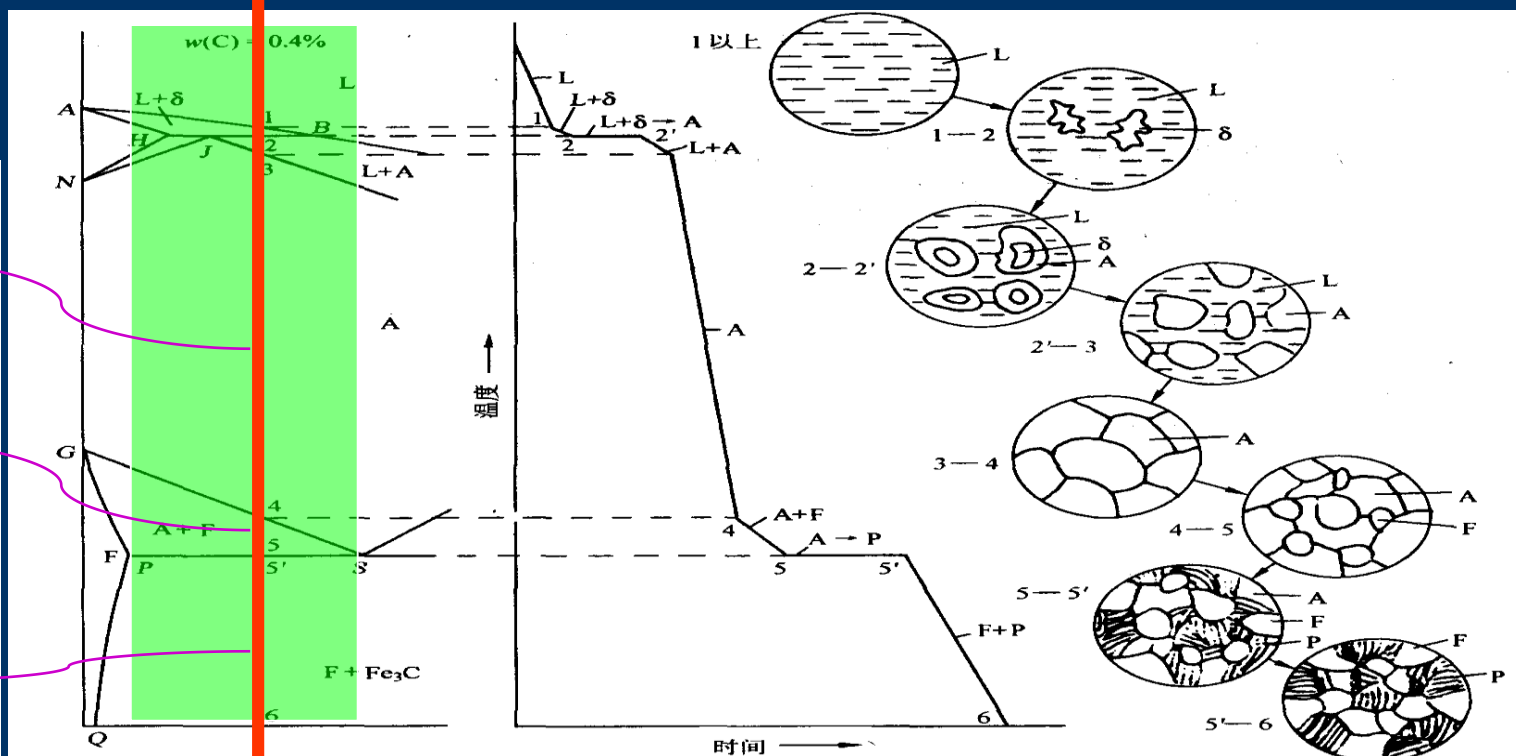
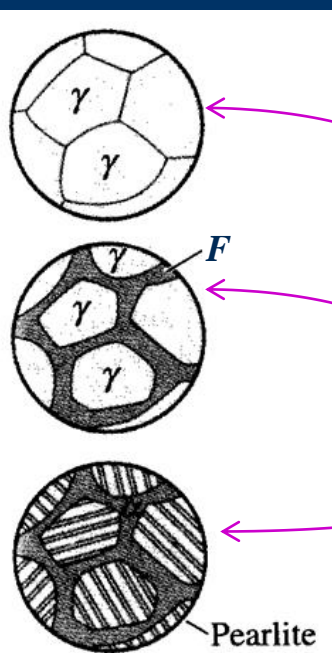


图 2-34 亚共析钢结晶过程示意图

2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

(3) 亚共析钢(hypoeutectoid ~): 以 $W(C)=0.4\%$ 为例

室温下的组成相是什么？组织是什么？

组织组成物？

怎么求两相、组织组成物的质量分数？

室温组织组成相含量: **F, Fe₃C**

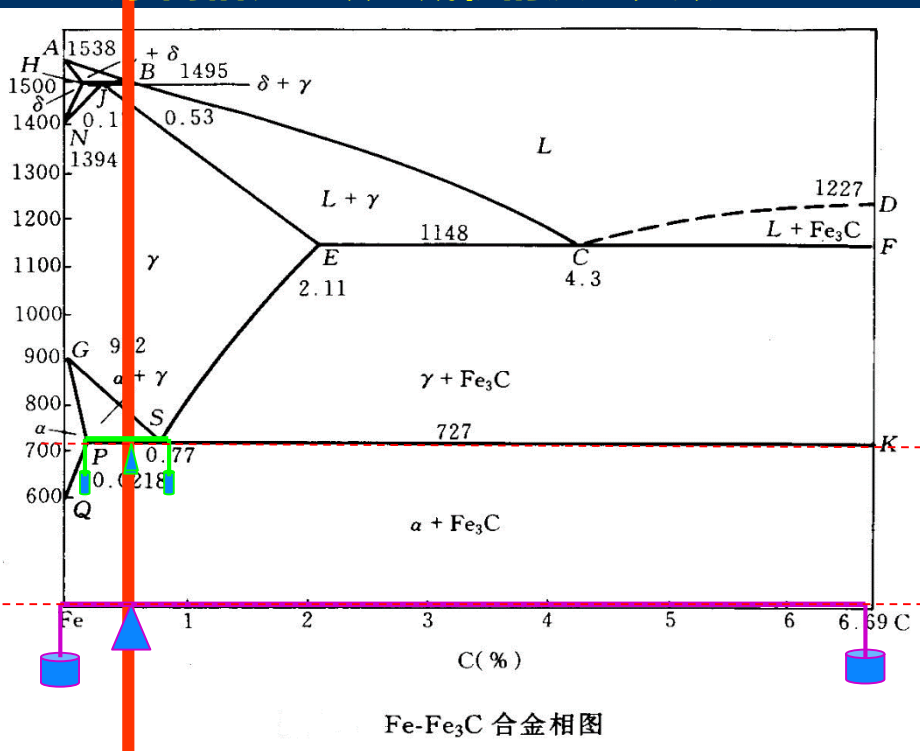
$$w(F) = \frac{6.69 - 0.4}{6.69} \times 100\% = 94\%$$

$$w(Fe_3C) = 1 - 94\% = 6\%$$

组织组成物含量: **P, F**

$$w(P) = \frac{0.4 - 0.02}{0.77 - 0.02} \times 100\% = 51\%$$

$$w(F) = 1 - 51\% = 49\%$$

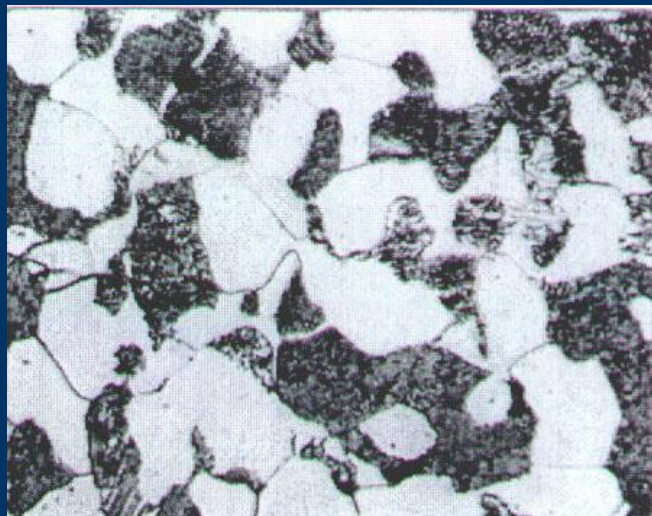
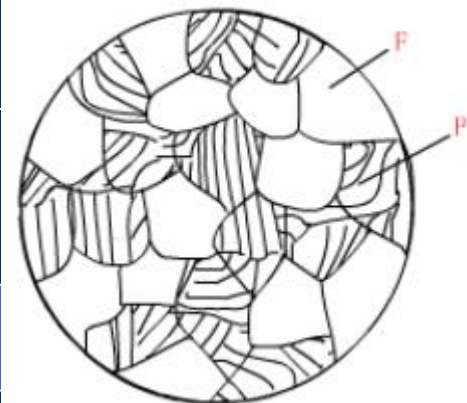


● 2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

(3) 亚共析钢(hypoeutectoid ~): 以 $W(C)=0.4\%$ 为例



40钢的室温平衡组织

室温平衡组织:

F+P

F呈白色块状; P呈层片状, 放大倍数不高时呈黑色块状。

碳质量分数大于0.6%的亚共析钢, 室温平衡组织中的F呈白色网状, 包围在P周围。

2.2 合金的结晶

2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

(4)过共析钢(hypereutectoid ~): 以 $W(C)=1.2\%$ 为例

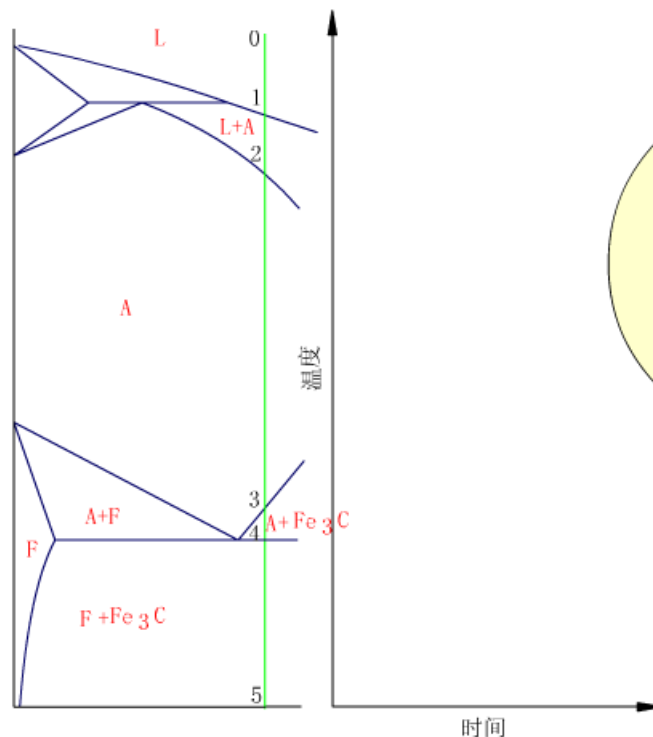
1 ~ 2点 $L+A$

2 ~ 3点 A

3 ~ 4点 $A \rightarrow Fe_3C_{II}$,
 Fe_3C_{II} 呈网状分布在A晶界上。

4 ~ 4' 点 $A \rightarrow P$,
 Fe_3C_{II} 不变化。

4' ~ 5点 $P+Fe_3C_{II}$



2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

(4) 过共析钢(hypereutectoid ~): 以 $W(C)=1.2\%$ 为例

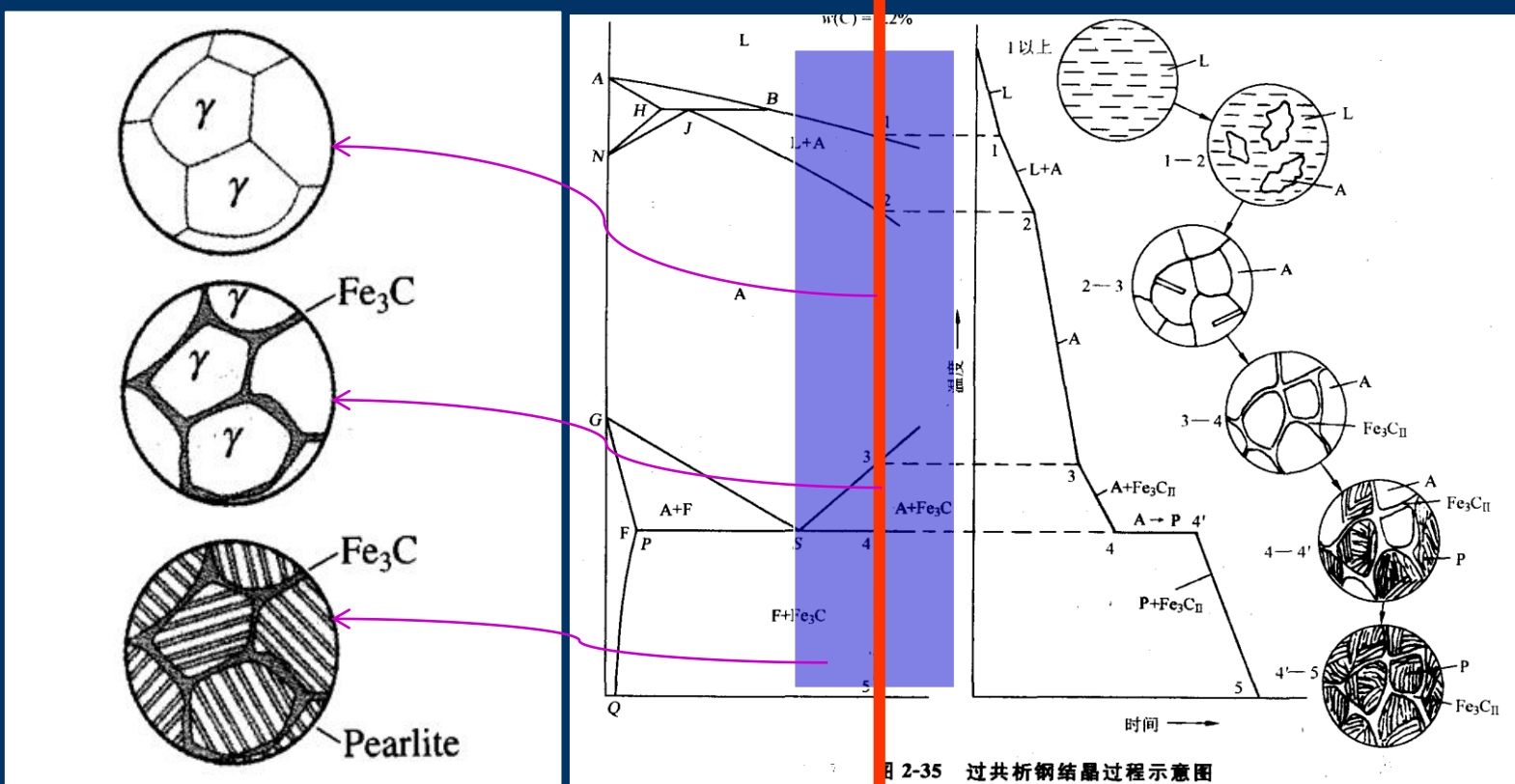


图 2-35 过共析钢结晶过程示意图

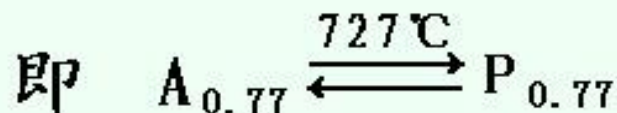
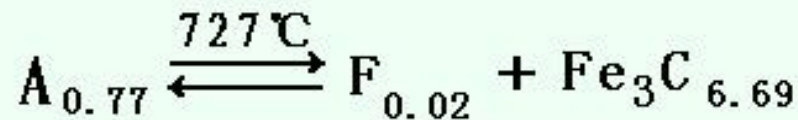
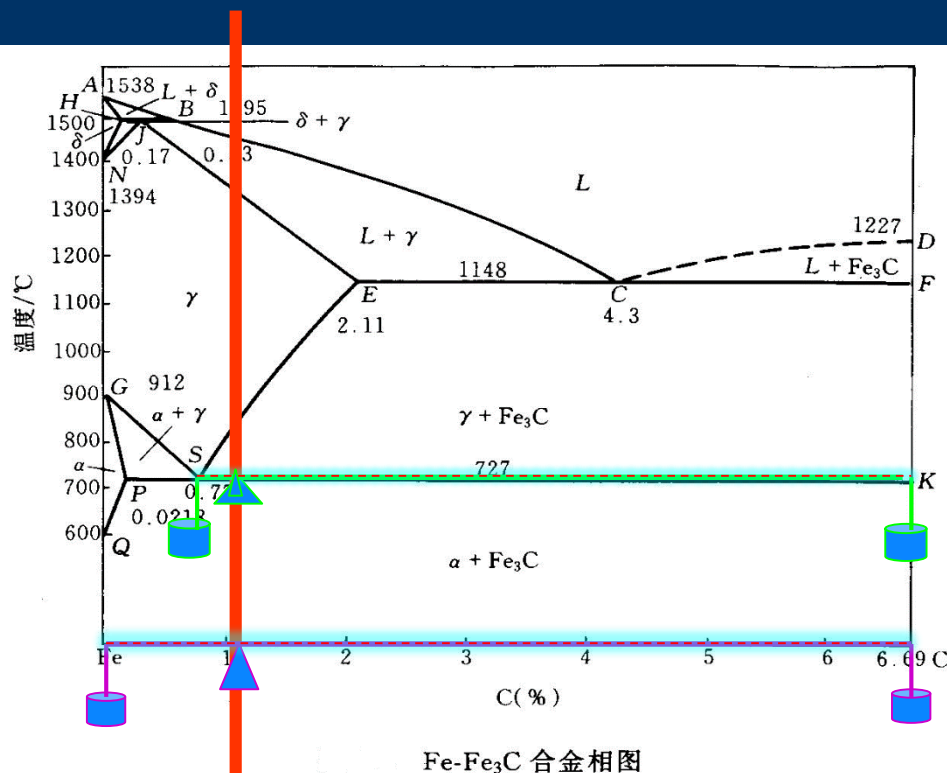
2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

(4) 过共析钢(hypereutectoid ~): 以W(C)=1.2%为例

运用杠杆定律, 求两相、组织组成物的质量分数

室温组织组成相含量: **F, Fe₃C**



$$w(F) = \frac{6.69 - 1.2}{6.69} \times 100\% = 82\%$$

$$w(Fe_3C) = 1 - 82\% = 18\%$$

室温组织组成物含量: **P, Fe₃C_{II}**

$$w(P) = \frac{6.69 - 1.2}{6.69 - 0.77} \times 100\% = 93\%$$

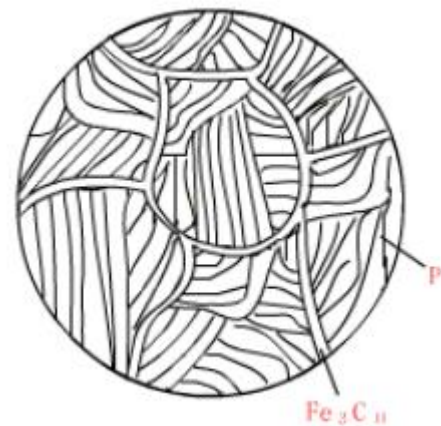
$$w(Fe_3C_{II}) = 1 - 93\% = 7\%$$

● 2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

2、合金的平衡（equilibrium）结晶过程

(4) 过共析钢(hypereutectoid ~): 以 $W(C)=1.2\%$ 为例



T12钢的室温平衡组织:

$P + Fe_3C_{II}$

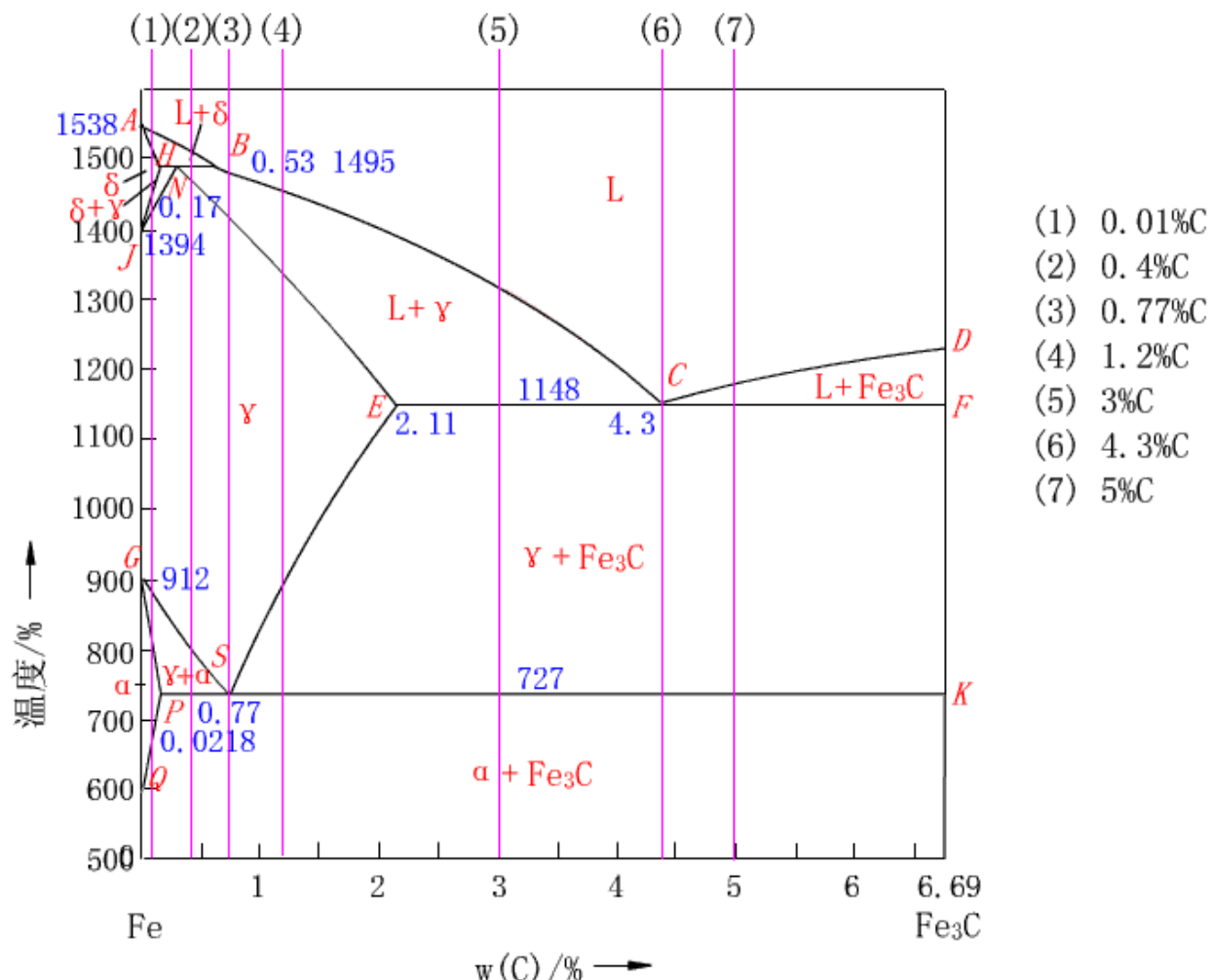
Fe_3C_{II} 呈网状分布在层片状P周围。



2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

典型铁碳合金在Fe-Fe₃C相图中的位置



合金1（工业纯铁）室温平衡组织为



合金2（亚共析钢）室温平衡组织为



合金3（共析钢）室温平衡组织为



合金4（过共析钢）室温平衡组织为



● 课堂小测试

1、判断题：过共析钢由液态缓冷至室温时析出的二次渗碳体，在组织形态与晶体结构方面均与一次渗碳体不同。（**x**）

2、选择题：珠光体是一种（**C**）。

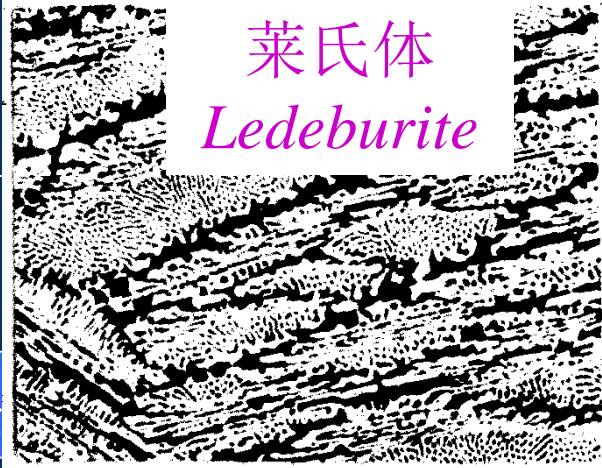
A、固溶体 B金属化合物 C机械混合物

2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

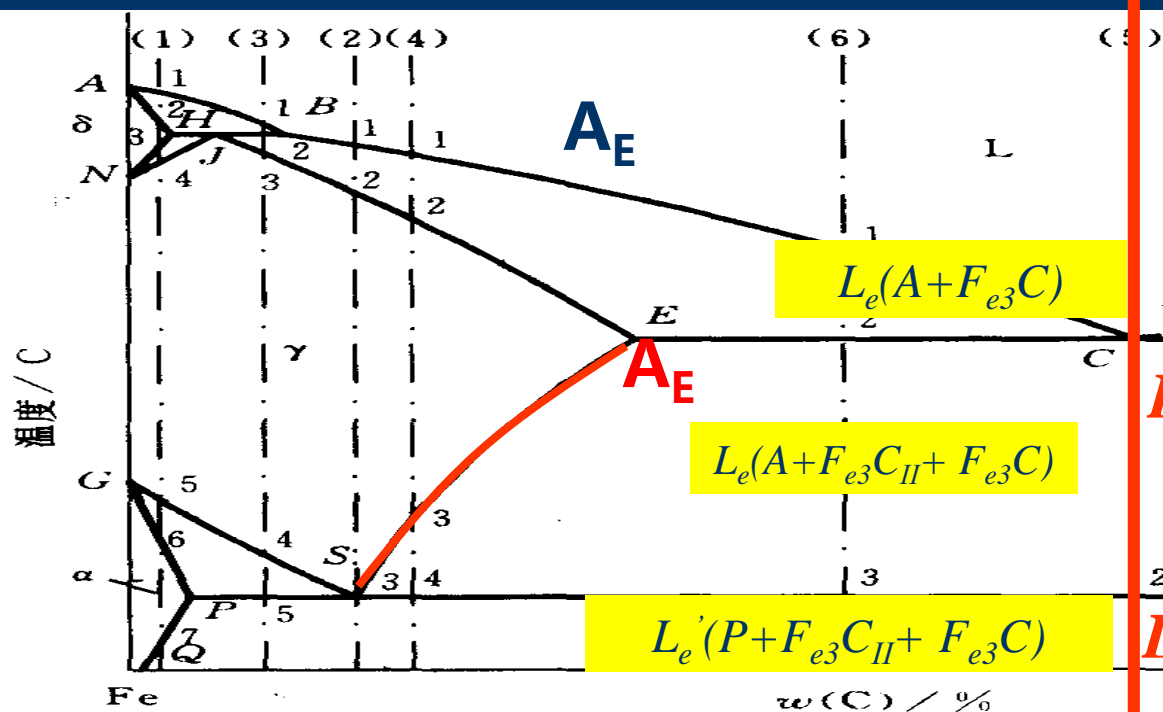
黑色条状和粒状
P, 白色 Fe_3C

莱氏体
Ledeburite



2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶

(5) 共晶白口铸铁(eutectic white cast iron): $W(\text{C})=4.3\%$



0~1点 L

1~1'点 $L \rightarrow \text{Le}$
即 $L \rightarrow (A + \text{Fe}_3\text{C})$ 。

1'~2点 Le中的A析出
 Fe_3C_{II} 此时的莱氏体由
 $\text{Le} (A + \text{Fe}_3\text{C}_{II} + \text{Fe}_3\text{C})$ 。

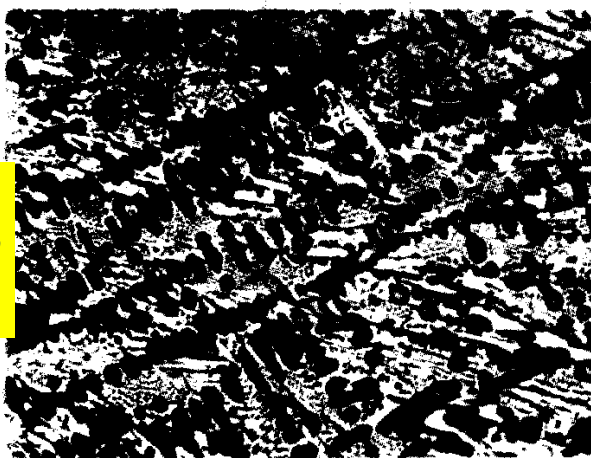
2~2'点 $A \rightarrow P$, 高温莱氏
体Le转变成低温莱氏体
 $\text{Le}' (P + \text{Fe}_3\text{C}_{II} + \text{Fe}_3\text{C})$ 。
2'~3点 Le'

图 2-30 典型铁碳合金在 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图

2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

网状 Fe_3C_{II} 分布在粗大块状P的周围, Le' 由条状或粒状P和 Fe_3C 基体组成。



2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

(6) 亚共晶白口铸铁(hypoeutectic ~)：如 $W(C)=3\%$

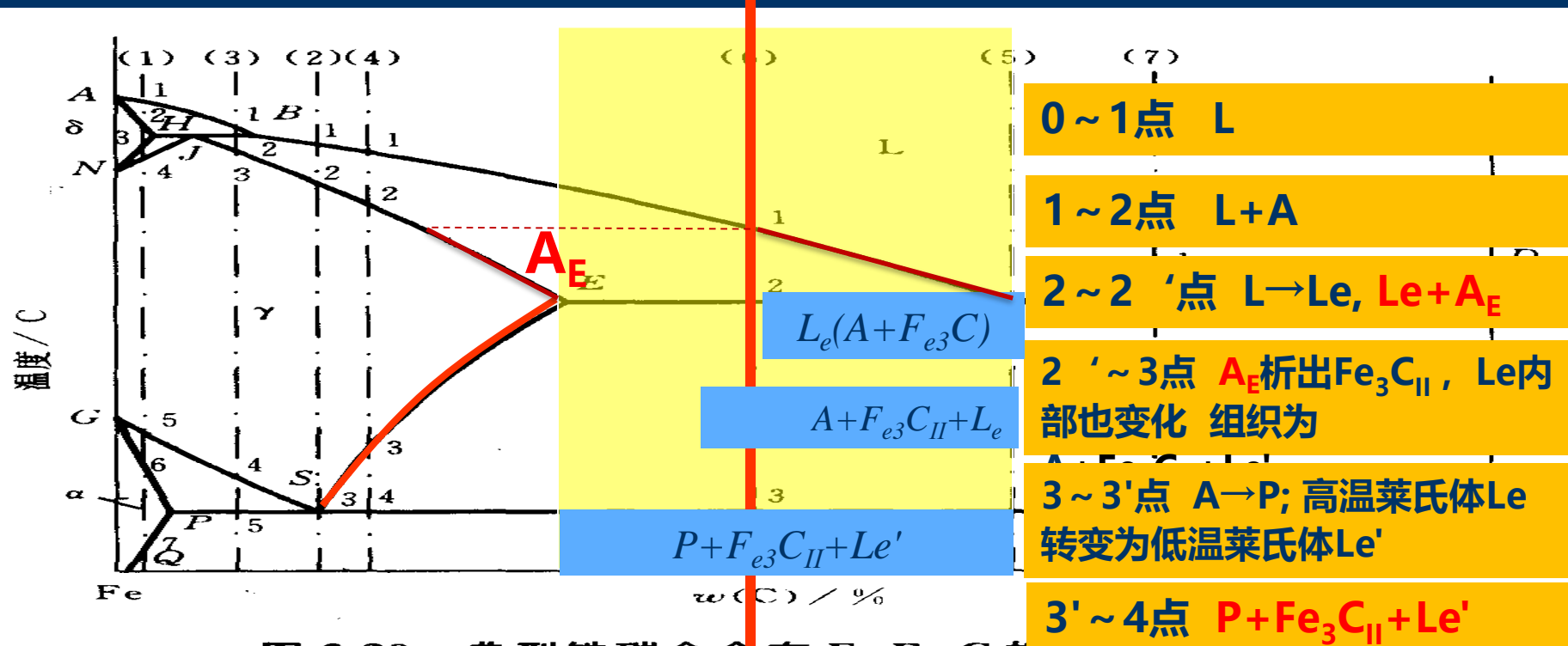
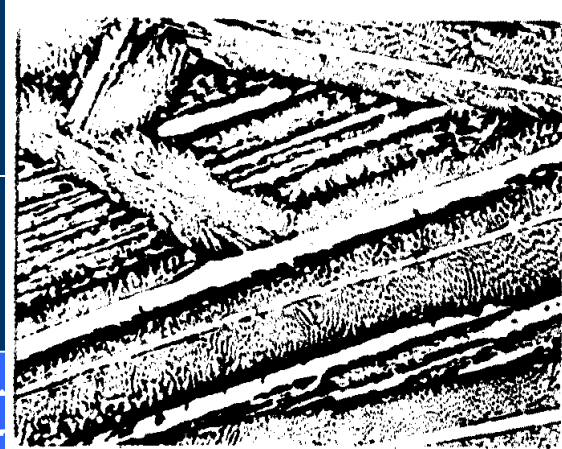


图 2-30 典型铁碳合金在 Fe-Fe₃C 相图中的位置

2.2 合金的结晶

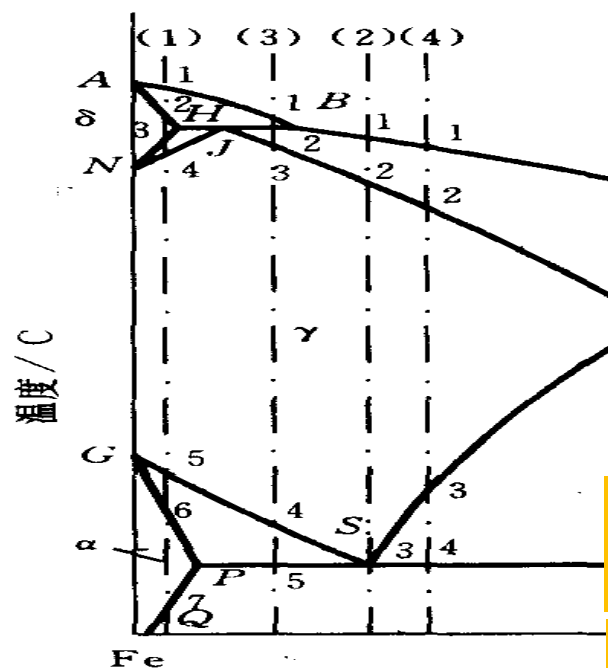
2.2.3 铁碳合金的结晶

Fe_3C_I 呈长条状
 Le' 由黑色条状或粒状P和
 白色 Fe_3C 基体组成。



2、合金的平衡（equilibrium）结晶过程

(7) 过共晶白口铸铁(hypereutectic ~)：如 $\text{W}(\text{C})=5\%$



0~1点 L

1~2合金先从L中结晶
 出 Fe_3C_I

2~2'L发生共晶反应转变为
 Le 。 Fe_3C_I 不变

2'~3 Le 内部发生变化

3~3'共析温度时高温莱氏
 体 Le 转变为低温莱氏体 Le' 。

3'~4得到 $\text{Fe}_3\text{C}_I + \text{Le}'$

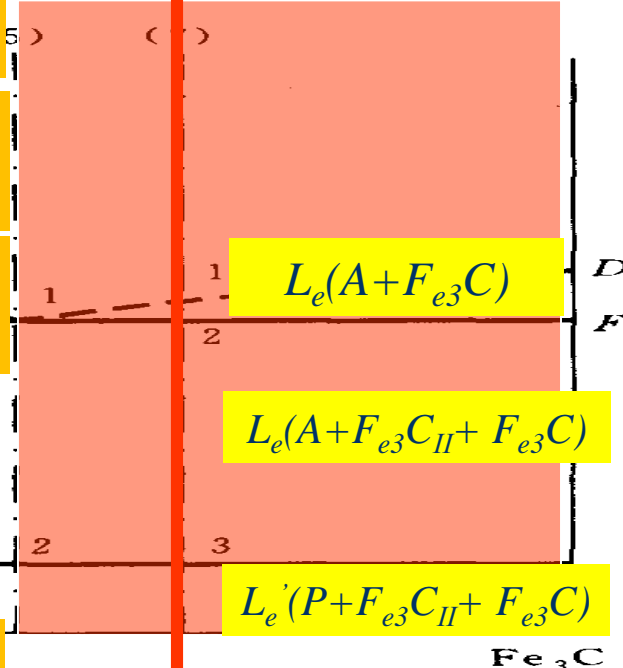
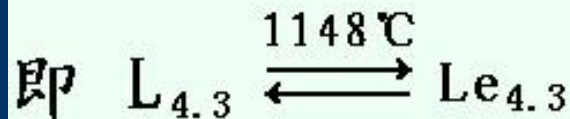
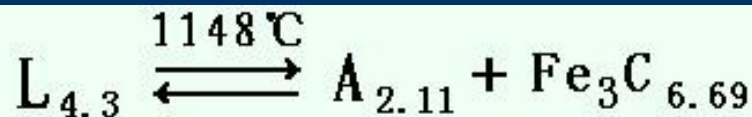


图 2-30 典型铁碳合金在 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中的位置

2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶



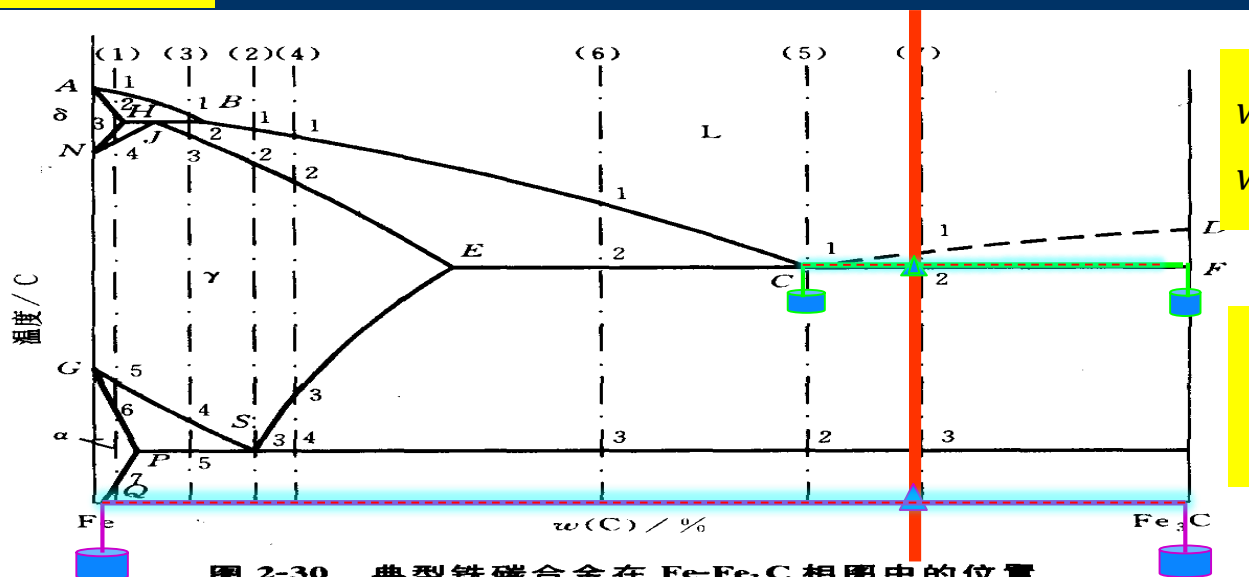
练习

成分点:

5.2%

2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

(7) 过共晶白口铸铁(hypereutectic ~) : 如 $w(C)=5.2\%$



$$w(F) = \frac{6.69 - 5.2}{6.69} \times 100\% = 22.3\%$$

$$w(Fe_3C) = 1 - 22.3\% = 77.7\%$$

$$w(Fe_3C_1) = \frac{5.2 - 4.3}{6.69 - 4.3} \times 100\% = 37.7\%$$

$$w(Le') = 1 - 37.7\% = 63.3\%$$

室温组织组成相含量: F, Fe_3C

室温组织组成物含量: Fe_3C_1, Le'

● 课堂小测试

判断正误

3、在铁碳合金平衡结晶过程中，只有成分为4.3%的铁碳合金液体才能发生共晶反应。（ ）

4、在铁碳合金中，只有过共析钢的平衡组织中才有二次渗碳体存在。（ ）

亚共晶白口铸铁室温组织 $P + F_{e3}C_{II} + Le'$

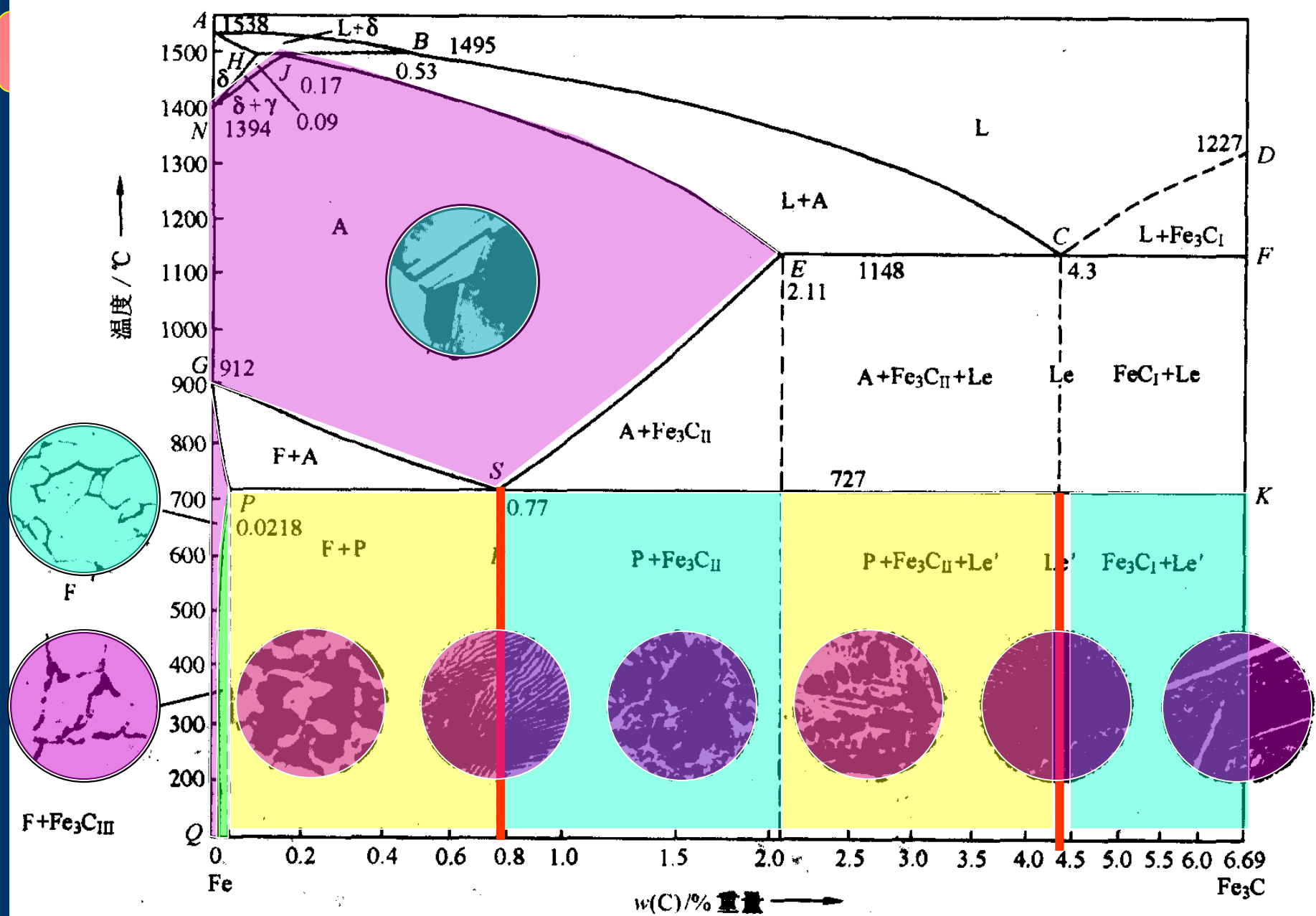


图 2-39 标注组织的 Fe-Fe₃C 相图

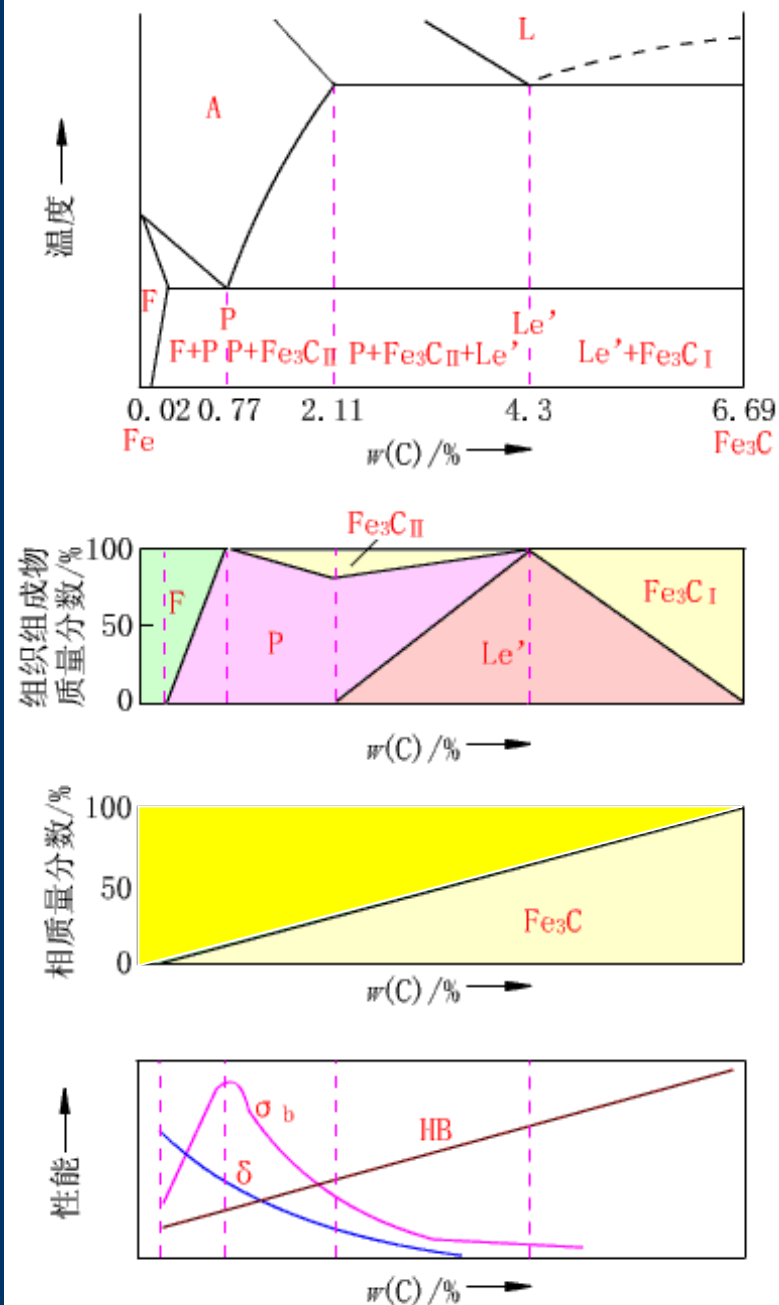
3、铁碳合金的成分-组织-性能关系

1). 碳含量与组织组成物的质量分数之间的关系

2). 碳含量与组成相的质量分数之间的关系

铁碳合金（除纯铁）在室温下的组织都由F和 Fe_3C 两相组成，两相的质量分数由杠杆定律确定。

随碳含量的增加，F的量逐渐变少， Fe_3C 的量则逐渐增多。



3、铁碳合金的成分-组织-性能关系

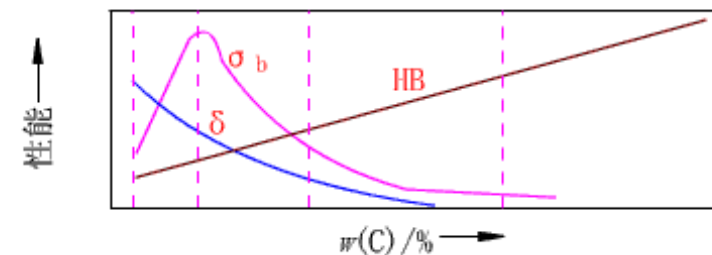
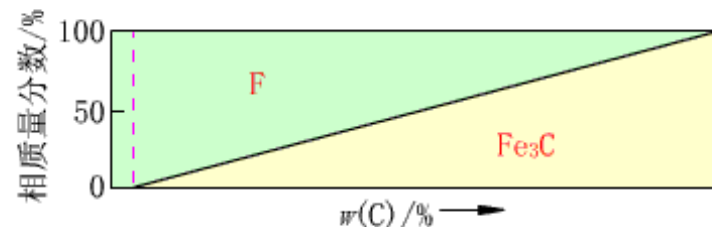
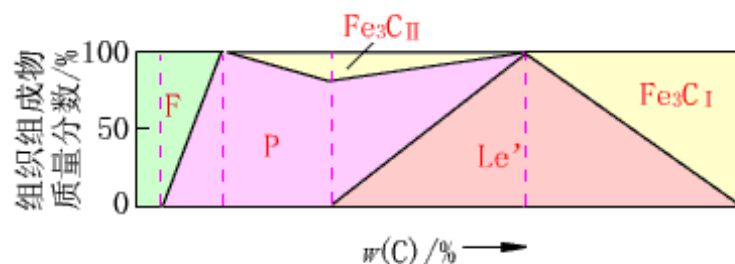
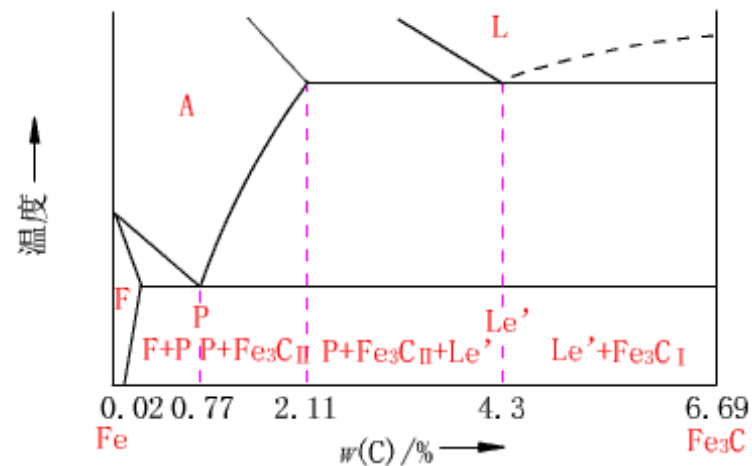
3).铁碳合金的性能与碳含量之间关系

(1) 硬度

(2) 强度

(3) 塑性

铁碳合金中 Fe_3C 是极脆的相。随碳含量的增大, 合金的塑性连续下降。到合金成为白口铸铁时, 塑性近于零值。

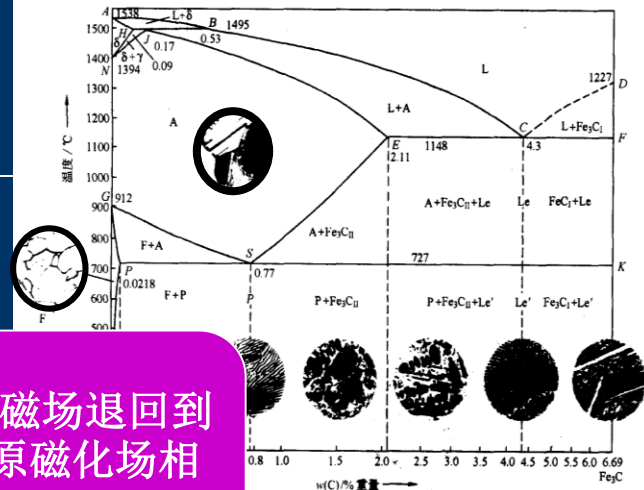


2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

4、F

矫顽力是指磁性材料在饱和磁化后，当外磁场退回到零时其磁感应强度 B 并不退到零，只有在原磁化场相反方向加上一定大小的磁场才能使磁感应强度退回到零，该磁场称为矫顽磁场，又称矫顽力；（任性）



●纯铁

强度低, 不宜用做结构材料, 但由于其导磁率高, 矫顽力低, 可作软磁材料使用, 例如做电磁铁的铁芯等。

●钢

●白口铸铁

硬度高、脆性大, 不能切削加工, 不能锻造, 但耐磨性好, 铸造性能优良, 适用于作要求耐磨、不受冲击、形状复杂的铸件。

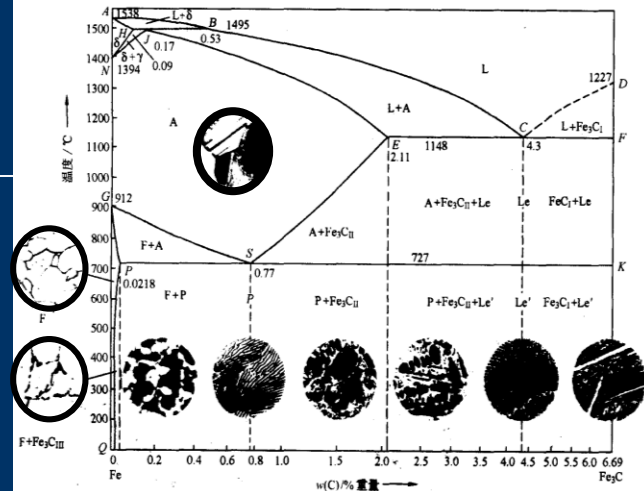
如拔丝模、冷轧辊、货车轮、犁铧、球磨机的磨球等。

2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

4、 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 合金相图的应用

(2) 在铸造工艺方面的应用



根据Fe- Fe_3C 相图确定合金浇注温度。浇注温度一般在液相线以上50 °C ~ 100 °C。

纯铁和共晶白口铸铁的铸造性能最好, 凝固温度区间最小, 流动性好, 分散缩孔少, 可以获得致密的铸件。

铸铁在生产上总是选在共晶成分附近。

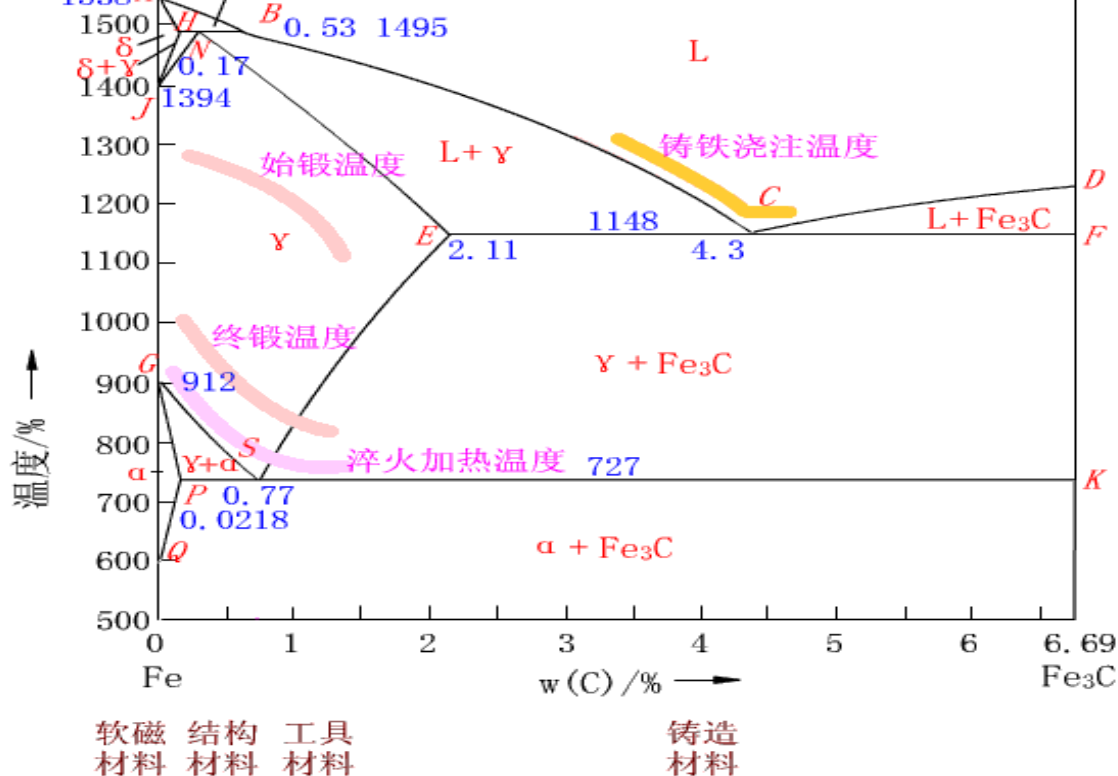
铸钢的碳质量分数在0.15-0.6%之间, 钢的结晶温度区间较小, 铸造性能较好。

2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

4、Fe-Fe₃C合金

(3) 在热轧



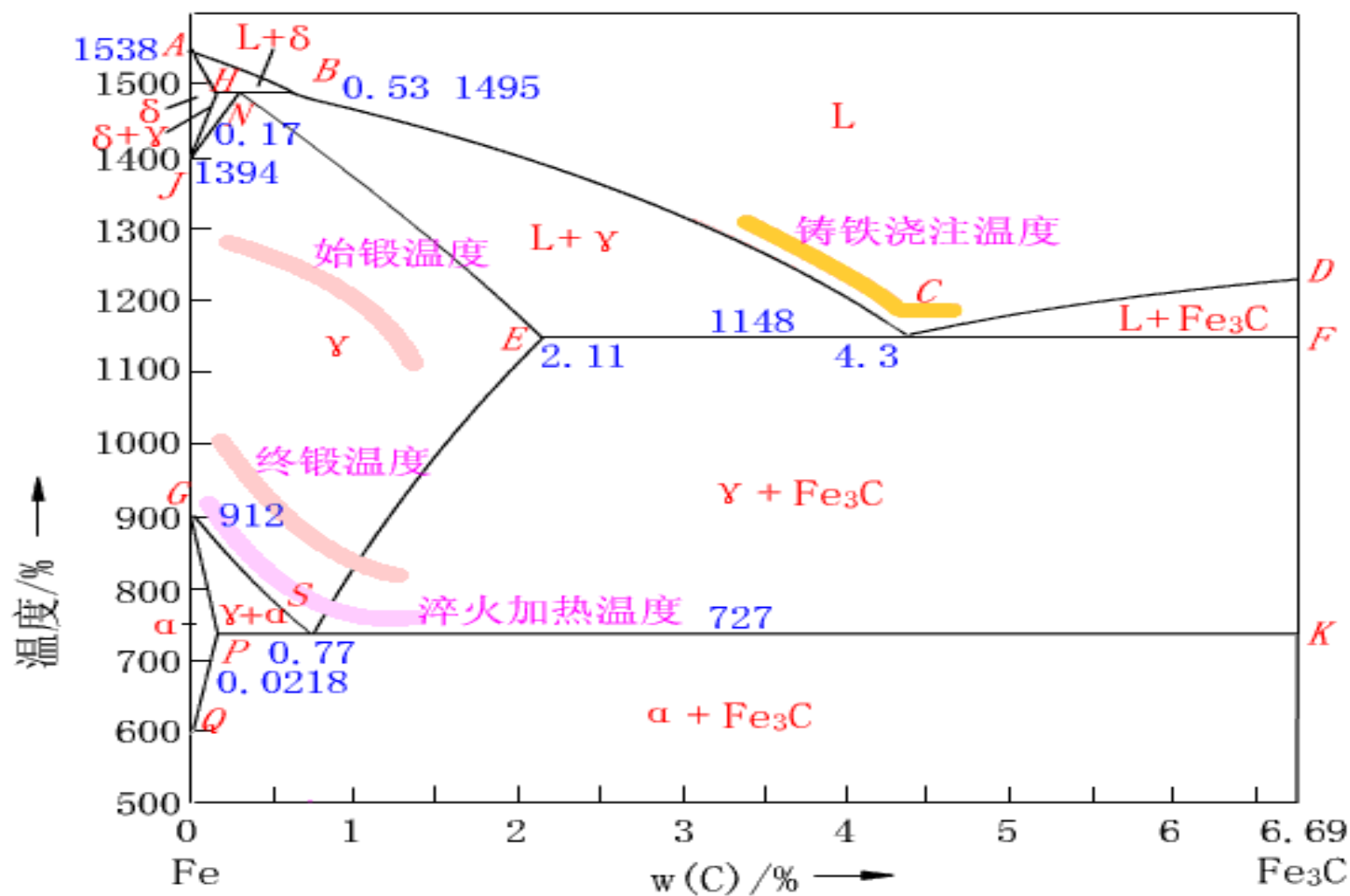
钢处于奥氏体状态时强度较低, 塑性较好, 因此锻造或轧制选在单相奥氏体区进行。

一般始锻、始轧温度控制在固相线以下100 °C ~ 200 °C范围内。

一般始锻温度为1150 °C ~ 1250 °C。

终锻温度为750 °C ~ 850 °C。

2.2 合金的结晶



软磁材料 结构材料 工具材料

铸造材料

● 2.2 合金的结晶

2.2.3 铁碳合金的结晶

4、 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 合金相图的应用

提示

① $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图只反映铁碳二元合金中相的平衡状态, 如含有其它元素, 相图将发生变化。

② $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图反映的是平衡条件下铁碳合金中相的状态, 若冷却或加热速度较快时, 其组织转变就不能只用相图来分析。

● 2.2 合金的结晶小结

合金相图

匀晶相图、共晶相图、包晶相图、
共析相图、含有稳定化合物的相图

二元合金二相区结晶规律

变温结晶

两相的成分确定

温度一定时, 两相的质量符合杠杆定律。

铁碳合金的结晶

铁碳相图中的相: L 、 δ 、 α 、 γ 、 Fe_3C

铁碳合金的组织: F 、 $P+F$ 、 P 、 $P+Fe_3C_{II}$ 、
 $P+Fe_3C_{II}+Le'$ 、 Le' 、 Fe_3C_I+Le'

要求：

- 1、会画铁碳合金相图，理解各点、线的意义；
- 2、牢记A1线、A3线、Acm线、E点、S点、C点；
- 3、理解珠光体P、莱氏体Le、低温莱氏体Le'；
- 4、会用冷却曲线图画出碳合金相图中工业纯铁、亚共析钢、共析钢、过共析钢的平衡结晶过程，标上各组织组成物，画出各平衡组织示意图；
- 5、会用杠杆定律求工业纯铁、亚共析钢、共析钢、过共析钢的组织组成物、组成相的含量；
- 6、牢记铁碳合金相图中7种合金的室温组织组成物。

视频：铁碳合金中的基本组织

YOUKU

铁碳合金中的基本组织



2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形

- 1、单晶体的塑性变形
- 2、多晶体的塑性变形
- 3、合金的塑性变形
- 4、塑性变形对金属组织和性能的影响

2.3.2 金属的再结晶

回复/再结晶/晶粒长大

2.3.3 塑性变形和再结晶的工程应用

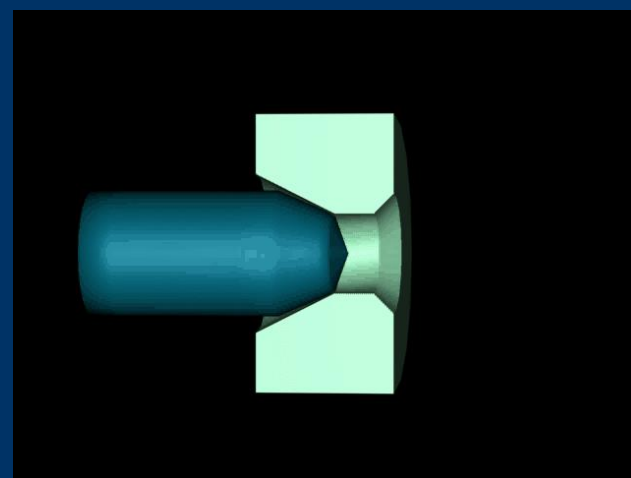
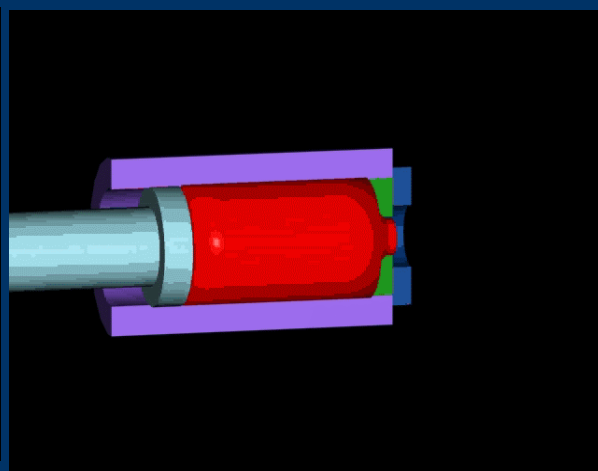
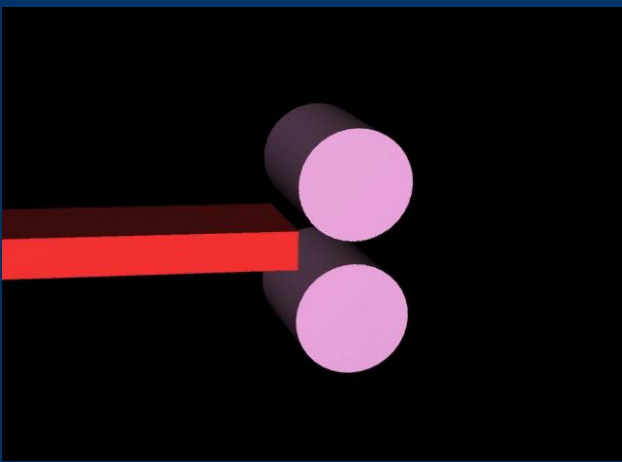
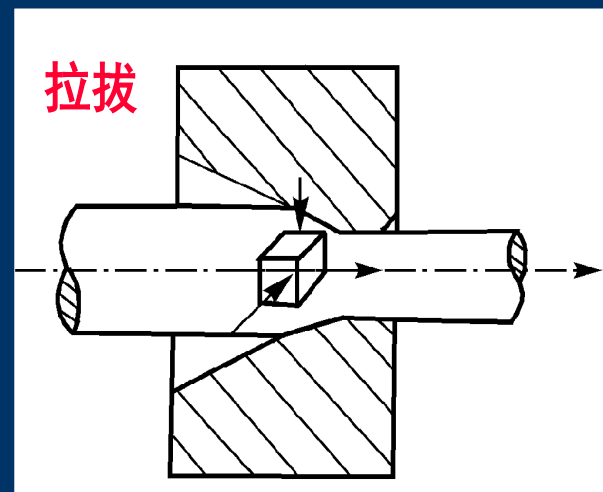
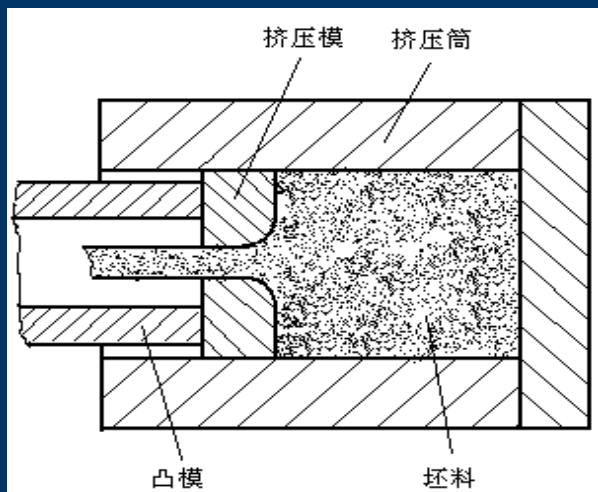
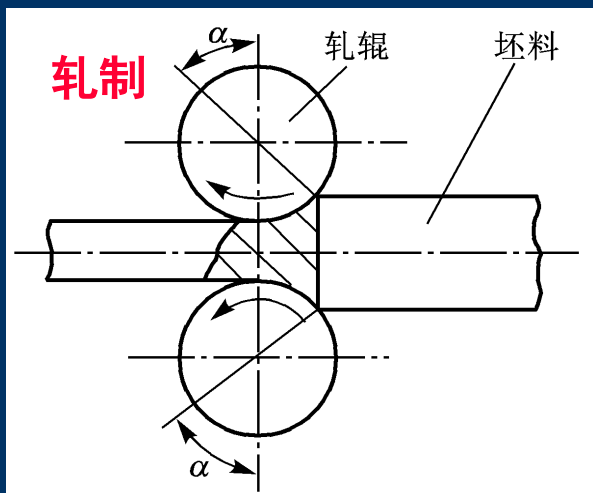
金属的热加工/冷加工/喷丸强化/再结晶退火

● 2.3 金属的塑性加工

- ◆ 塑性加工是使金属在外力（通常是压力）作用下，产生**塑性变形（不可恢复）**，获得所需形状、尺寸和组织、性能的制品的一种基本的金属加工技术，以往常称**压力加工**。
- ◆ 金属材料通过冶炼、铸造，获得铸锭后，可通过塑性加工获得型材、板材、管材或线材，以及零件毛坯或零件。
- ◆ **塑性加工分类**：轧制、挤压、拉拔、锻造和冲压等

2.3 金属的塑性加工

◆ 塑性加工分类：轧制、挤压、拉拔、锻造和冲压等



● 2.3 金属的塑性加工

塑性加工时，金属产生塑性变形，对金属的组织结构和性能会产生重要的影响。

问题1：

塑性变形对金属的组织结构和性能有什么重要影响？

问题2：

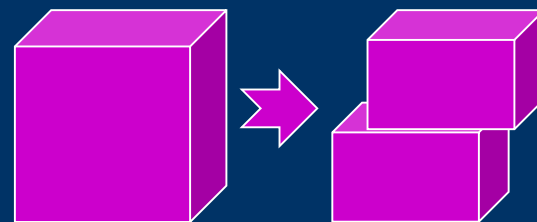
塑性变形后的金属再加热时组织结构和性能又有什么变化？

● 2.3 金属的塑性加工

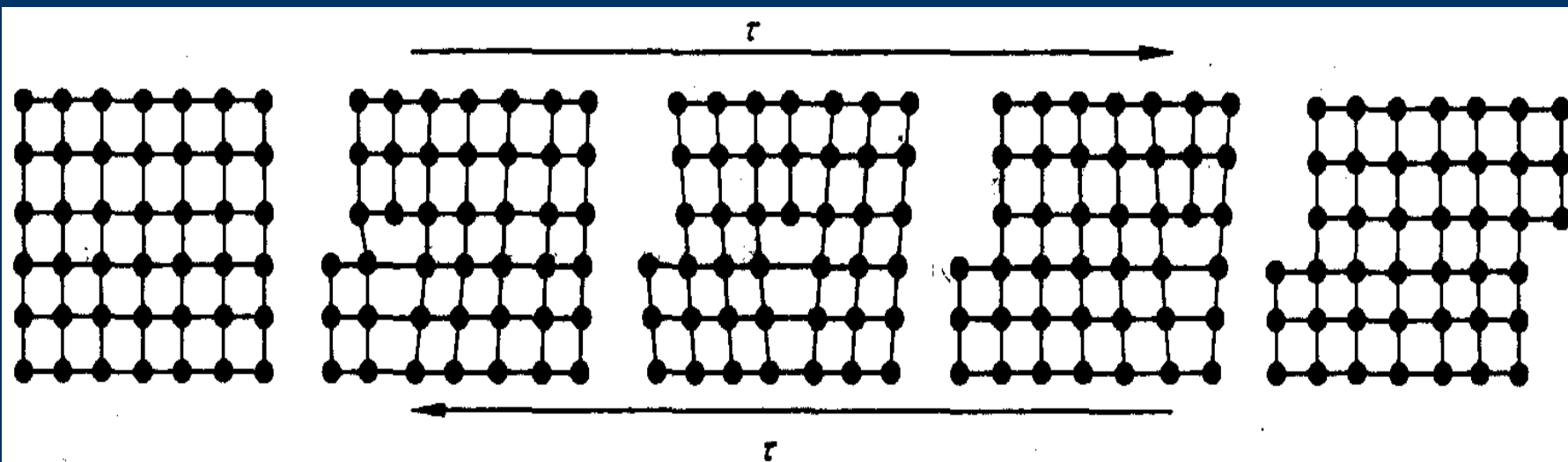
2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

1、单晶体(single crystal)的塑性变形

(1)滑移(slip)——金属变形的主要方式



① 滑移的概念：在切应力的作用下，晶体的一部分原子沿一定晶面上的一定方向相对于另一部分发生滑动。



● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

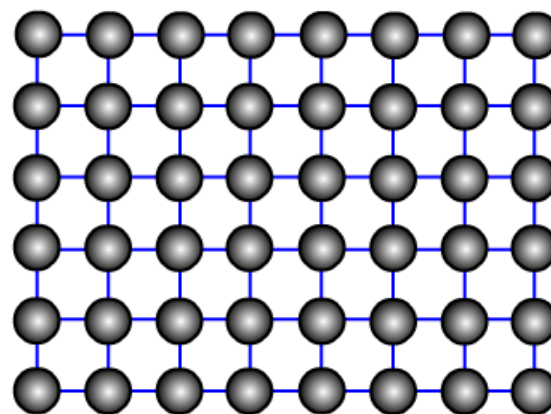
② 滑移的特点:

1) 滑移只能在切应力作用下才会发生。

滑移临界切应力 产生滑移的最小切应力。

钨、钼、铁的滑移临界切应力比铜、铝的要大

2) 滑移是晶体内部**位错运动**的结果



什么是位错？原子平面的错动引起的
包括哪两种典型位错？

● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

② 滑移的特点:

3) 总变形量是滑移方向上的原子间距的整数倍。

滑移在表面形成滑移带。



滑移带观察

2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

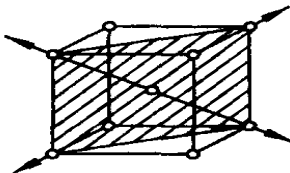
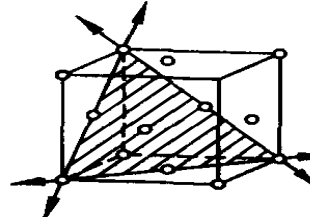
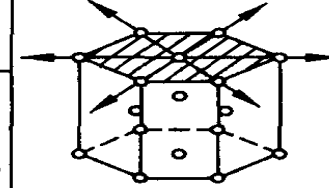
② 滑移的特点:

4) 滑移总是沿着密排面(close-packed plane)和密排方向(close-packed direction)进行。

密排面、密排方向上原子排列紧密，结合力强。密排面是滑移面，密排方向是滑移方向。

滑移系：由一个滑移面与其上的一个滑移方向组成。

表 2-4 金属三种常见晶格的滑移系

晶格	体心立方晶格		面心立方晶格		密排六方晶格	
滑移面	$\{110\} \times 6$		$\{111\} \times 4$		$\{0001\} \times 1$	
滑移方向	$\langle 111 \rangle \times 2$		$\langle 110 \rangle \times 3$		$\langle 11\bar{2}0 \rangle \times 3$	
滑移系	$6 \times 2 = 12$		$4 \times 3 = 12$		$1 \times 3 = 3$	

● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

② 滑移的特点:

提示 滑移系越多，金属发生滑移的可能性越大，塑性就越好。

滑移方向对滑移所起的作用比滑移面作用大。

面心立方晶格金属比体心立方晶格金属的塑性更好。

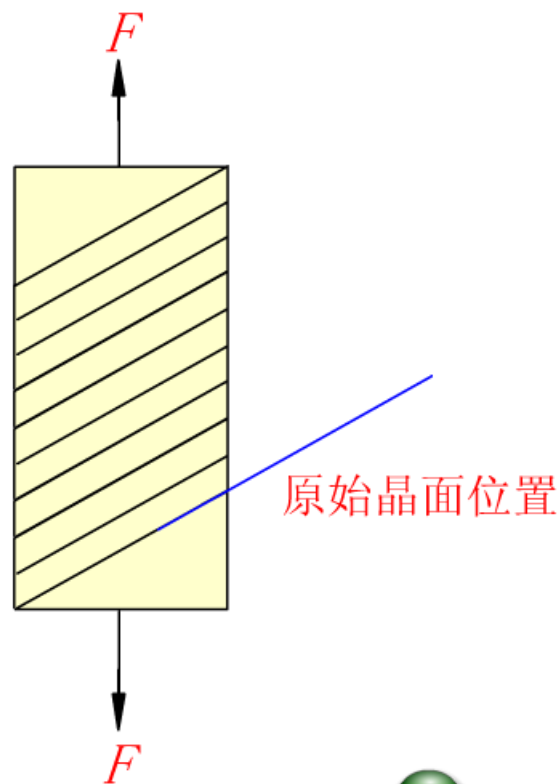
问题：为什么锻造或轧制选在单相奥氏体区进行？

● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

② 滑移的特点:

5) 滑移总量为原子间距的整数倍，且晶体伴随有转动



● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

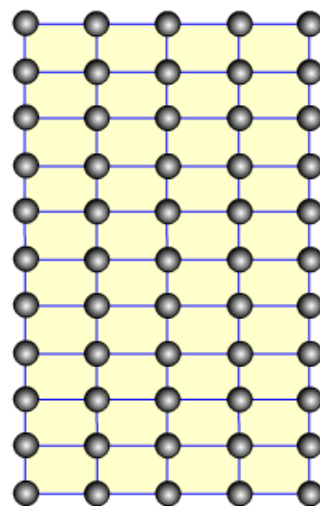
1、单晶体(single crystal)的塑性变形

(2) 孪生 (twin) —— 滑移困难时发生较多

在切应力作用下，晶体的一部分相对于另一部分沿一定晶面和晶向发生切变(shear)的过程。

(3) 滑移与孪生区别

- 原子位移的间距不同。
- 临界切应力不同：滑移小，孪生大
- 变形速度不同：孪生的变形速度快
- 晶格畸变程度不同：滑移小，孪生大
- 塑性变形程度不同：滑移大，孪生小
- 难易程度不同：



● 课堂小测试

判断正误

5、滑移变形不会引起金属晶体结构的变化。(✓)

6、孪生变形所需要的切应力要比滑移变形时所需的小得多。(✗)

● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

2、多晶体(polycrystalline materials)的塑性变形

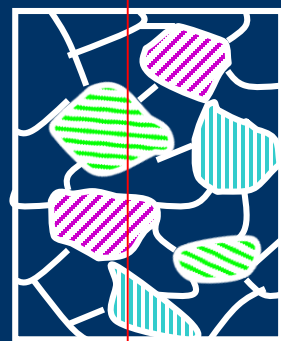
(1) 晶界在变形中的作用

- 晶界上滑移困难，提高了金属的强度。
- 变形分散在各晶粒内，应力不集中，提高了塑性；
- 细晶强化(Fine Grain Strengthening)是金属的一种重要的强韧化手段。

(2) 多晶体的塑性变形

- 多晶体中每个晶粒位向不一致。变形时晶粒分批地逐步地变形，变形分散在材料各处。

工程上使用的金属绝大部分是多晶体，多晶体中每个晶粒的变形基本方式与单晶体相同。多晶体材料中，各个晶粒位向不同，存在许多晶界，变形要复杂得多。



2.3 金属的塑性加工

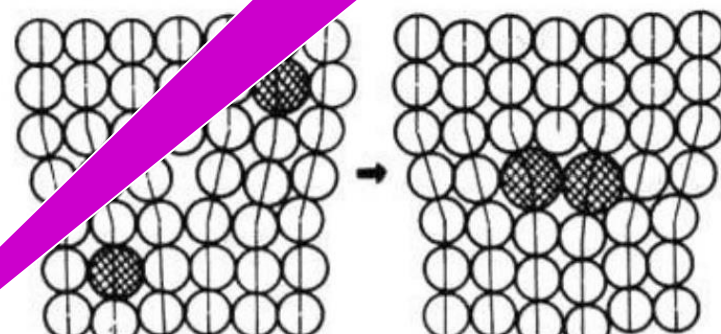
2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

3、合金的塑性变形

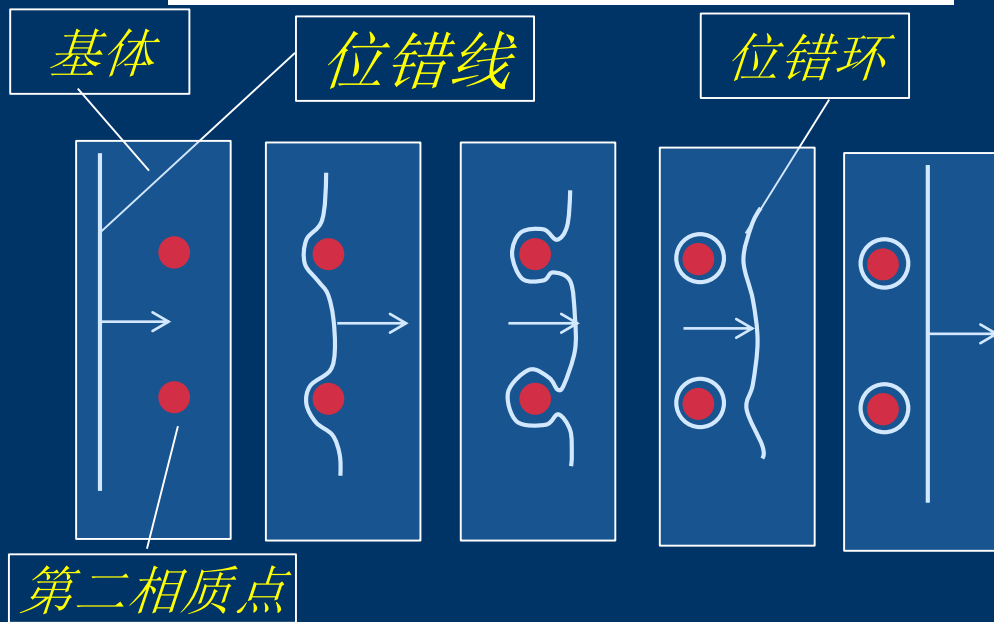
●合金的组成为固溶体时，溶质原子会造成晶格畸变，增加滑移抗力，产生**固溶强化**。

●合金的组成为固溶体和弥散的金属化合物（称第二相）时，第二相硬质点成为位错移动的障碍，增加了位错移动的阻力，使滑移抵抗力增加，提高合金的强度。称为**第二相强化或弥散强化**。

牢记这三种
强化措施



溶质质点易于出现在位错附近，增加其强度



● 2.3 金属的塑性加工

问题1:

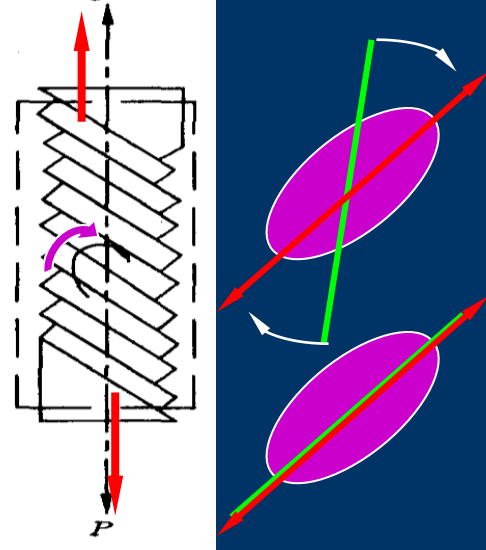
塑性变形对金属的组织结构和性能有什么重要影响?

2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

4、塑性变形对金属组织和性能的影响

(1) 塑性变形对金属组织结构的影响



① 形成纤维组织 (晶粒变形)

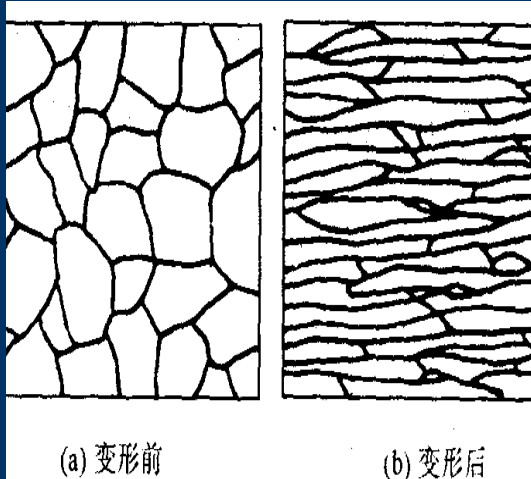


图 2-48 变形前后晶粒形状变化示意图

② 位错增多, 形成亚结构 (晶粒分化)

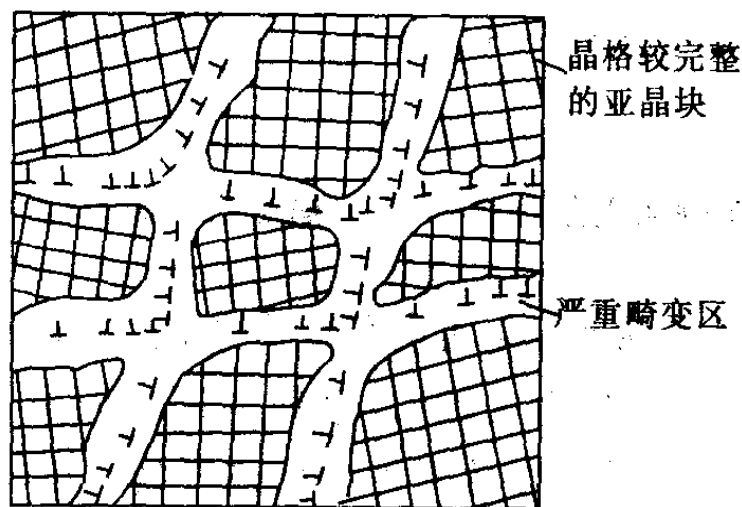
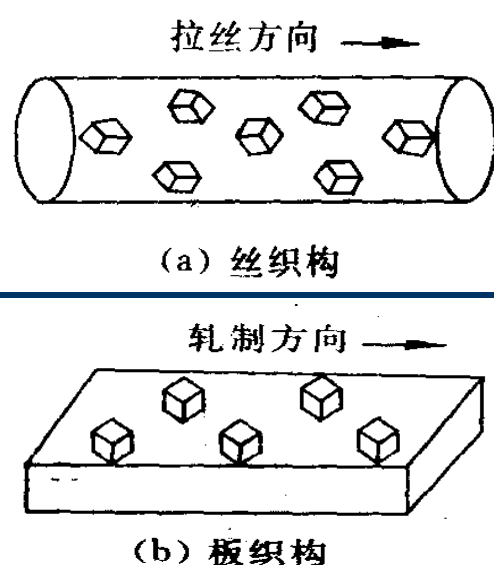


图 2-49 金属经变形后的亚结构

③ 变形很大, 形成变形织构 (晶粒取向)



● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

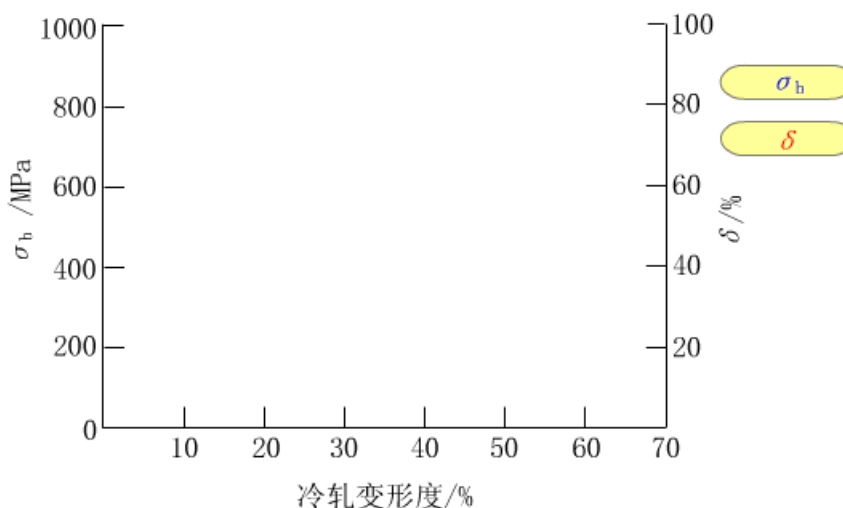
4、塑性变形对金属组织和性能的影响

(2) 塑性变形对金属性能的影响

① 加工硬化 (work hardening)

金属发生塑性变形, 随变形度增大, 金属的强度和硬度显著升高, 塑性和韧性明显下降。这种现象称为**加工硬化**, 也叫**形变强化**。

工程应用: 在生产中可通过冷轧、冷拔提高钢板或钢丝的强度。



● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

4、塑性变形对金属组织和性能的影响

(2) 塑性变形对金属性能的影响

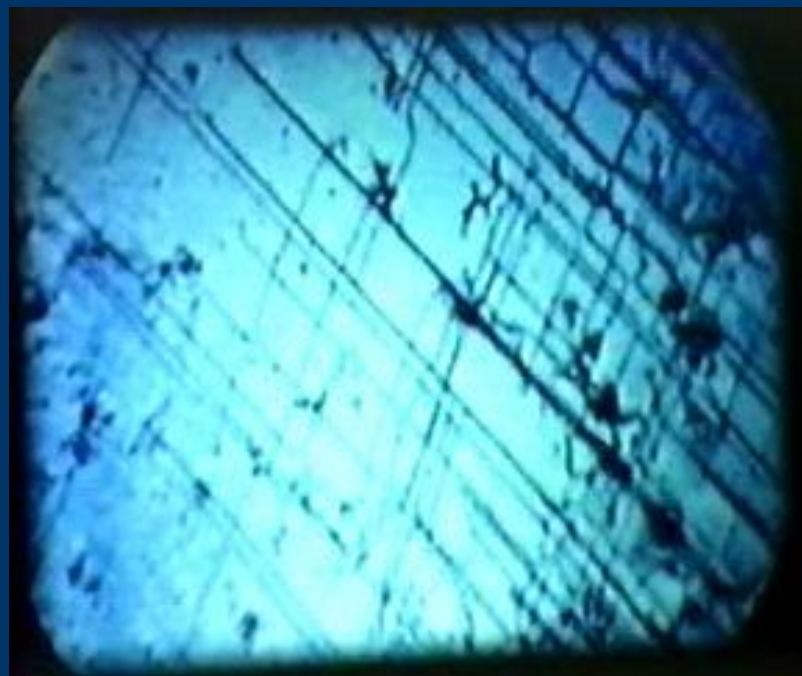
① 加工硬化 (work hardening)

加工硬化

产生加工硬化的原因:

塑性变形时, 位错密度增加, 位错间的交互作用增强, 相互缠结, 位错运动阻力增大, 塑性变形抗力提高。

同时晶粒破碎细化, 强度提高。



● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

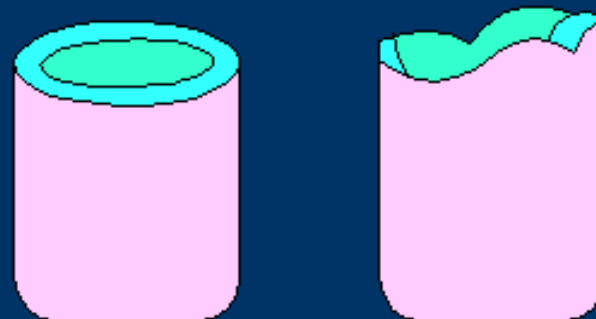
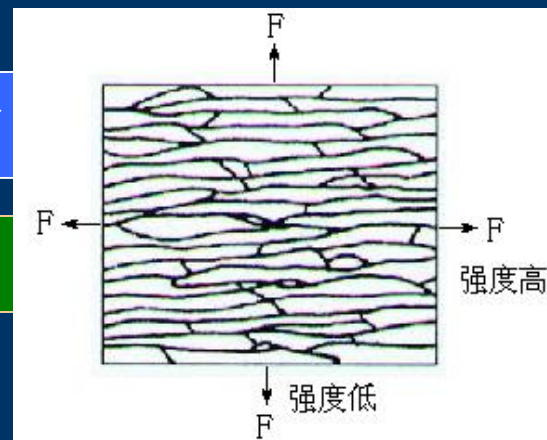
4、塑性变形对金属组织和性能的影响

(2) 塑性变形对金属性能的影响

② 各向异性 (anisotropy)

纤维组织和形变织构的形成，
使金属的性能产生**各向异性**。
沿纤维方向的强度和塑性高于
垂直方向。

有织构的板材冲制筒形零件时，
由于各方向上塑性差别很大，零
件的边缘出现“制耳”。



(a)无织构 (b)有织构

因形变织造成深冲制品
的制耳示意图

● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

4、塑性变形对金属组织和性能的影响

(2) 塑性变形对金属性能的影响

③ 理化性能的变化

**塑性变形可影响金属的物理、化学性能。
电阻增大, 耐腐蚀性降低。**

④ 残余内应力 (residual stresses)

残余内应力 外力去除后, 金属内部残留下来的应力。

塑性变形时, 金属内部变形不均匀, 位错、空位等晶体缺陷增多, 产生残余内应力。**残余内应力使金属的耐蚀性降低, 较大时使零件变形或开裂。**

● 2.3 金属的塑性加工

2.3.1 金属的塑性变形(plastic deformation)

4、塑性变形对金属组织和性能的影响

(2) 塑性变形对金属性能的影响

④ 残余内应力 (residual stresses)

喷丸强化

齿轮表面通过喷丸处理（用铁砂或陶瓷颗粒高速喷射），产生较大的残余压应力，提高疲劳强度。



● 课堂小测试

判断正误

7、产生加工硬化的原因是塑性变形时,位错密度增加,位错间的交互作用增强,相互缠结,位错运动阻力增大,塑性变形抗力提高。同时晶粒破碎细化,强度提高。()

● 2.3 金属的塑性加工

问题1:

塑性变形对金属的组织结构和性能有什么重要影响?

组织影响: 形成纤维组织、亚结构、形变组织;

性能影响: 产生加工硬化、各向异性、残余应力等;

如何消除塑性变形对性能的影响?

问题2:

塑性变形后的金属再加热时组织结构和性能有什么变化?

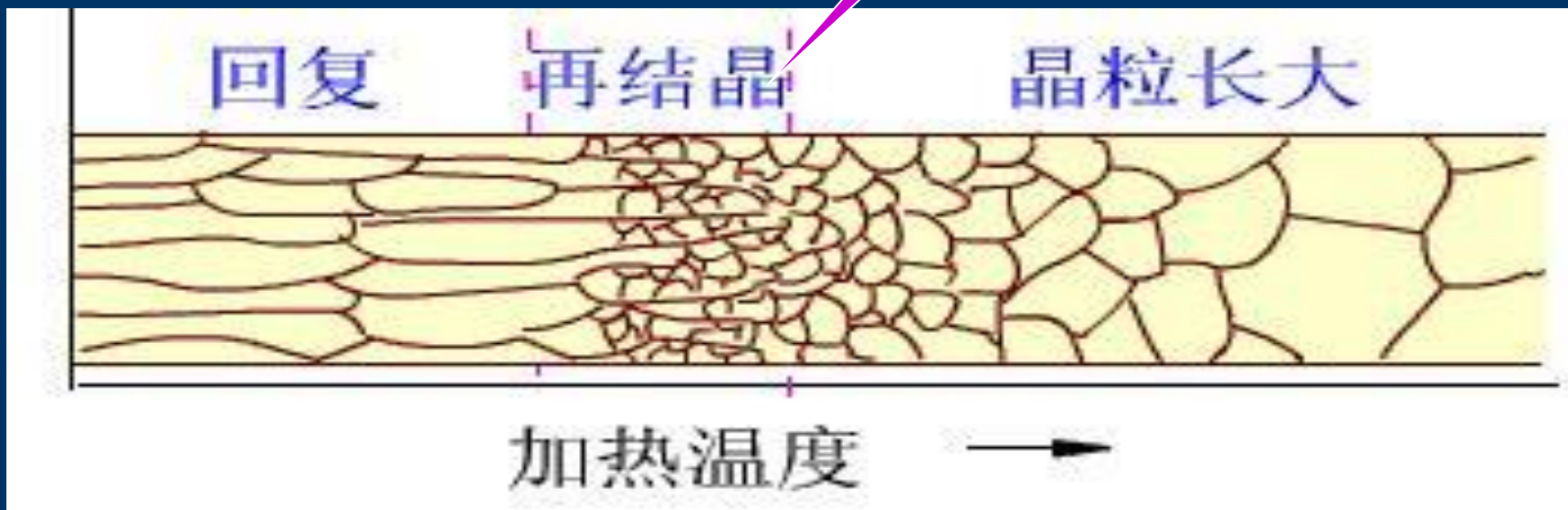
2.3 金属的塑性加工

2.3.2 金属的再结晶(recrystallization)

注意：会画该示意图

金属经塑性变形后，组织结构和性能发生很大的变化。
对变形后的金属进行加热，金属的组织结构和性能又会发生变化。

随着加热温度的提高，变形金属将继续发生回复、再结晶和晶粒长大过程。



2.3 金属的塑性加工

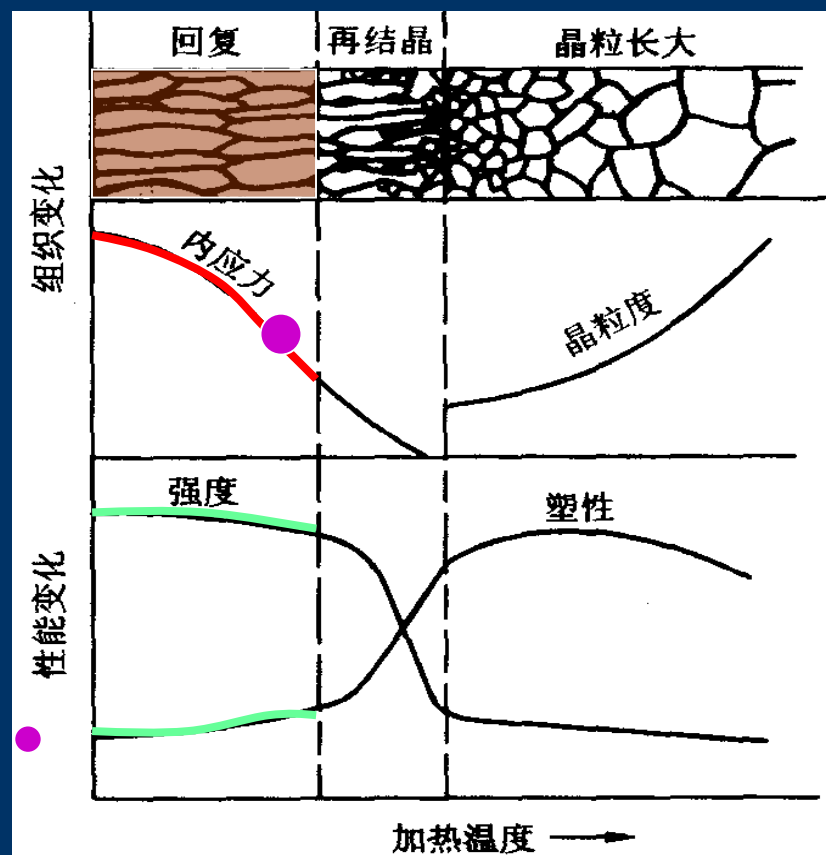
去应力退火
可保留加工硬化效果

2.3.2 金属的再结晶(recrystallization)

1、回复(recovery)

(1) 回复(recovery): 变形后的金属在加热温度不高时, 变形金属的组织、力学性能变化不大; 物理、化学性能部分地恢复到变形前的状态; 残余内应力显著下降, 这一阶段称为~。

(2) 回复退火: 工程应用, 对变形金属进行去应力退火、降低残余内应力, 保留加工硬化效果。



$$T_{\text{回复}} = (0.25 \sim 0.3) T_{\text{熔点}}$$

2.3 金属的塑性加工

2.3.2 金属的再结晶(recrystallization)

2、再结晶(recrystallization)

(1)再结晶：当加热温度提高到一定程度后，金属变形后被拉长、破碎的晶粒通过**重新**生核、长大变成新的均匀、细小的**等轴晶(equiaxed grains)**。

(2) 再结晶后，强度、硬度明显降低，塑性、韧性大大提高，加工硬化现象被消除，内应力全部消失。物理、化学性能基本上恢复到变形以前的水平。

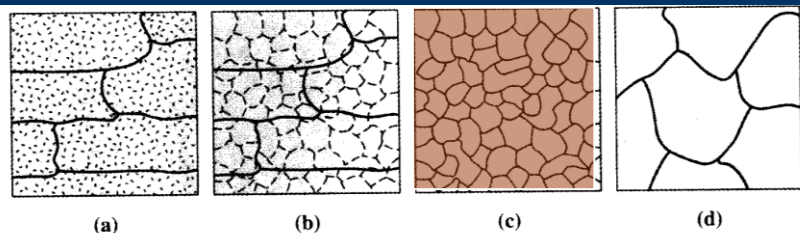
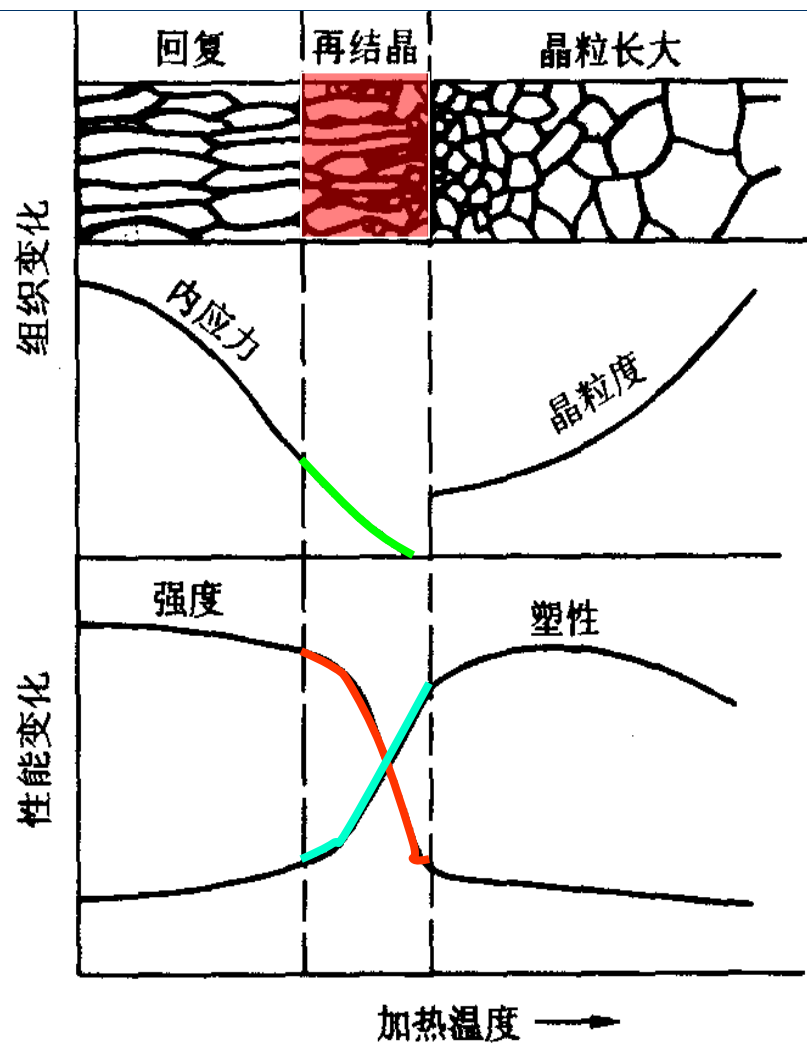


Figure 8-15 The effect of annealing temperature on the microstructure of cold-worked metals. (a) cold-worked, (b) after recovery, (c) after recrystallization, and (d) after grain growth.



● 2.3 金属的塑性加工

2.3.2 金属的再结晶(recrystallization)

2、再结晶(recrystallization)

重要提示 再结晶生成的新的晶粒的晶格类型与变形前、变形后的晶格类型均一样。

问题：与二次结晶或重结晶（同素异构转变）的区别？

2.3 金属的塑性加工

$$T_{\text{回复}} = (0.25 \sim 0.3) T_{\text{熔点}}$$

2.3.2 金属的再结晶(recrystallization)

绝对温度

2、再结晶(recrystallization)

$$T_{\text{再}} = (0.35 \sim 0.4) T_{\text{熔点}}$$

(3) 最低再结晶温度 ($T_{\text{再}}$) :
大变形 (70%以上) 的冷塑性变形金属, 经1小时加热后能完全再结晶的最低温度。

(4)再结晶温度的影响因素:

- ① 预先变形度: 越大, $T_{\text{再}}$ 越低
- ② 金属的熔点: 越大, $T_{\text{再}}$ 越高
- ③ 高熔点杂质和合金元素 $T_{\text{再}}$ 越高
- ④ 加热速度和保温时间 ↗ ↘

材料	$T_{\text{再}}$
无氧铜	200℃
铜锌合金 (95%)	320 ℃
铝 (99.999%)	80℃
铝 (99%)	290℃
镍 (99.99%)	370℃
镍 (99.4%)	600℃

● 2.3 金属的塑性加工

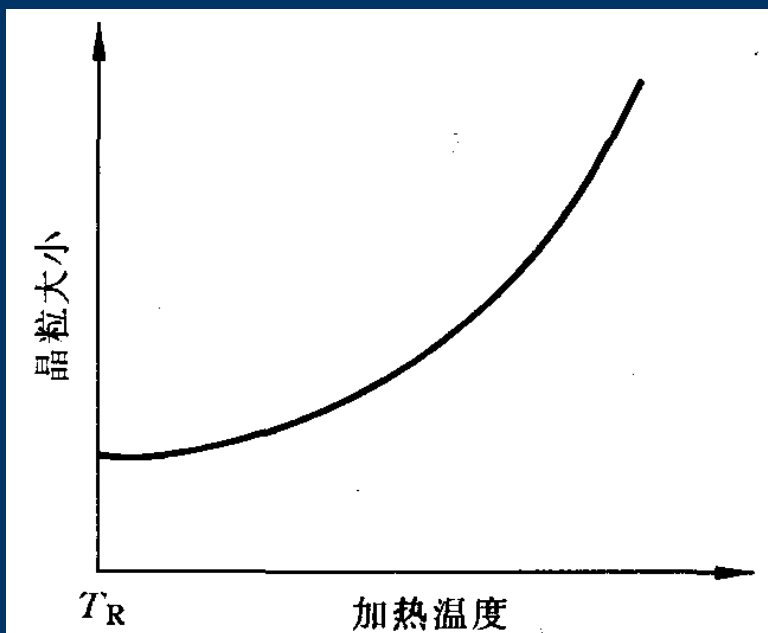
2.3.2 金属的再结晶(recrystallization)

2、再结晶(recrystallization)

(5) 再结晶后晶粒的晶粒度

① 加热温度

加热温度越高, 原子扩散能力越强, 则晶界越易迁移, 晶粒长大也越快。



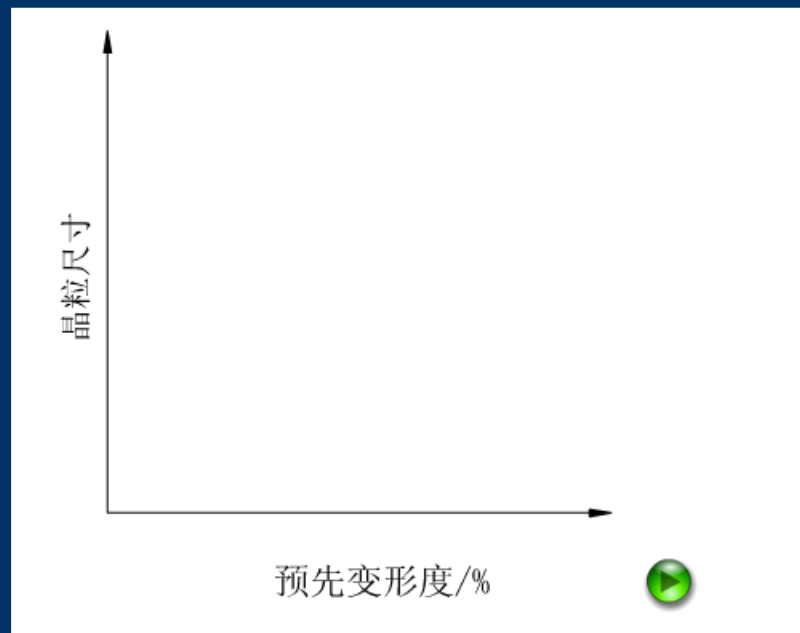
● 2.3 金属的塑性加工

2.3.2 金属的再结晶(recrystallization)

(5) 再结晶后晶粒的晶粒度

② 预先变形度

- 变形度很小时，不足以引起再
- 变形度达到2~10%时，少数
- 变形度继续增大，
- 当变形度过大（约 $\geq 90\%$ ）时，晶粒可能再次出现异常长大，由形变织构造造成。



**预先变形度对再结晶后
晶粒大小的影响**

● 2.3 金属的塑性加工

2.3.2 金属的再结晶(recrystallization)

2、再结晶(recrystallization)

(6) 再结晶的工程应用

再结晶退火 消除塑性变形产生的加工硬化现象，恢复金属塑性变形的能力，以便继续进行形变加工。

如生产铁铬铝电阻丝时，在冷拔到一定的变形度后，要进行氢气保护再结晶退火，以便继续冷拔获得更细的丝材。

为了缩短处理时间，实际采用的再结晶退火温度比该金属的最低再结晶温度要高。

$$\text{再结晶退火温度} = T_{\text{再}} + (100\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C})$$

2.3 金属的塑性加工

2.3.2 金属的再结晶(recrystallization)

3、晶粒长大(grain growth)

晶粒长大：再结晶后，温度过高、保温时间过长，会导致晶粒的长大。

二次再结晶：再结晶结束后，若金属变形较大（产生织构）且加热温度较高，则加热时只有少量处于优越条件的晶粒优先长大，迅速吞食周围的大量小晶粒，最后获得晶粒异常粗大的组织。

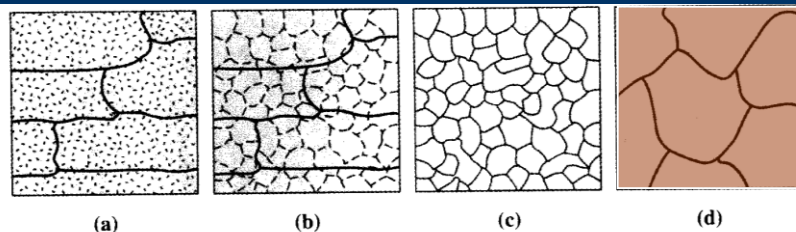
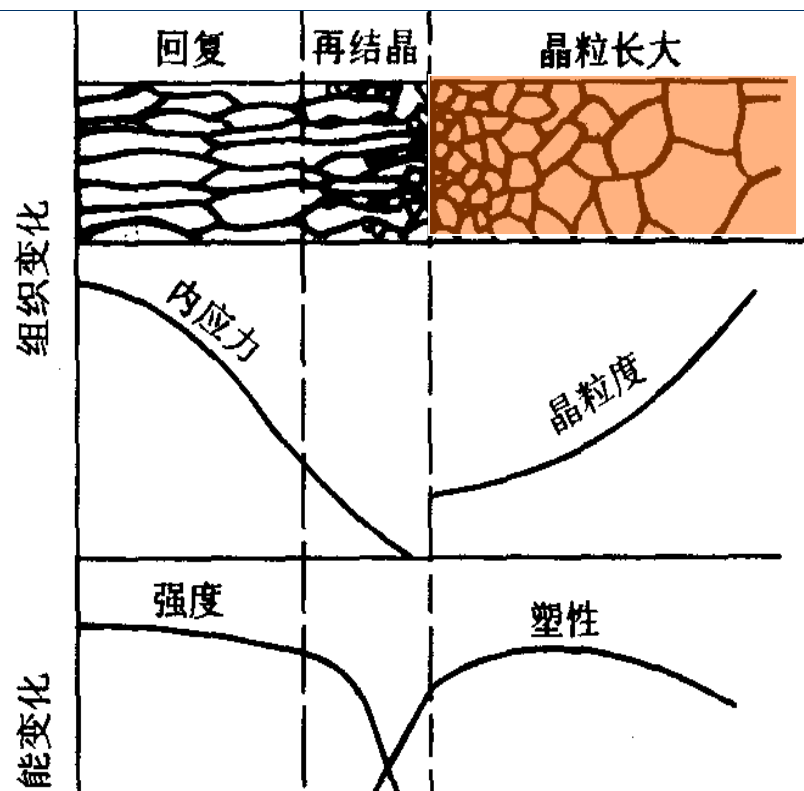


Figure 8-15 The effect of annealing temperature on the microstructure of cold-worked metals. (a) cold-worked, (b) after recovery, (c) after recrystallization, and (d) after grain growth.



重结晶/二次结晶
再结晶

二次再结晶 应当避免

● 课堂小测试

8、变形金属再加热时发生的再结晶过程是一个新晶粒代替旧晶粒的过程，这种新晶粒的晶型是（**a**）：

- a. 与变形前的金属相同；
- b. 与变形后的金属相同；
- c. 形成新的晶型。

● 2.3 金属的塑性加工

2.3.3 塑性变形和再结晶的工程应用

金属塑性变形加工方法：

热加工：热锻、热轧、热挤压、热拔

冷加工：冷锻、冷轧、冷挤压、冷冲、切削

热加工和冷加工不是根据变形时是否加热来区分，而是根据变形时的温度处于金属的再结晶温度以上还是以下来划分的。

热加工：在再结晶温度以上的塑性变形加工。

冷加工：在再结晶温度以下的塑性变形加工。

2.3 金属的塑性加工

2.3.3 塑性变形和再结晶的工程应用

1、金属的热加工(hot working)

① **热加工**：在金属的再结晶温度以上的塑性变形加工称为~。

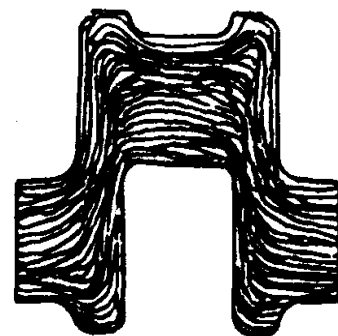
特点：金属发生塑性变形后，随即发生再结晶过程。因此塑性变形引起的加工硬化效应随即被再结晶过程的软化作用消除，使材料保持良好的塑性状态。
加工硬化与再结晶相继进行

② 热加工的特点

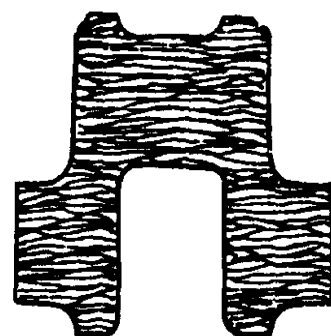
- 使铸态金属中的气孔、疏松、微裂纹压合，提高金属的致密度；减轻或消除树枝晶偏析；改善夹杂物的分布。提高韧性、塑性

- 打碎铸态金属中的树枝晶和柱状晶，经再结晶获得等轴细晶粒。

- 使可变形夹杂物或第二相沿金属流动方向拉长，形成**流线(grain flow)**



(a) 锻造曲轴



(b) 切削加工曲轴

图 2-59 曲轴流线分布

回复和再结晶不能改变流线组织

● 2.3 金属的塑性加工



2.3.3 塑性变形和再结晶的工程应用

2、金属的冷加工(cold working)

- ① 冷加工：在金属的再结晶温度以下的塑性变形加工称为~。
- ② 冷加工的特点

产生加工硬化现象。

加工硬化的实际作用：

- 1、强化金属的手段之一。
- 2、有利于金属进行均匀变形。因为金属已变形部分得到强化时，继续的变形将要在未变形部分中发展。这对深冲件的成型十分有利。

● 2.3 金属的塑性加工

2.3.3 塑性变形和再结晶的工程应用

加工硬化的应用

3、喷丸强化(shot peening strengthening)

零件表面用铁砂或陶瓷颗粒高速喷射,可提高零件表面强度和硬度,同时在表面产生残余压应力,提高零件的疲劳强度。

4、再结晶退火(recrystallization annealing)

再结晶可消除材料加工硬化现象,恢复材料的塑性和韧性。

本节小结

金属的塑性变形

塑性变形机理：滑移、孪生

冷塑性变形对组织、性能影响：金属晶粒变形、位错密度增加、产生残余内应力，大的变形量可产生形变织构。

产生加工硬化。

再结晶

再结晶：形成新的等轴晶，晶格形式不变。

再结晶对性能影响：消除加工硬化

再结晶温度： $T_{\text{再结晶}} = (0.35 \sim 0.4) T_{\text{熔点}}$

● 课后作业

第四次作业 铁碳合金相图

第五次作业 金属的塑性变形与再结晶

发到优慕课（北京化工大学在线综合教育平台）

提交截止日期：2023年3月18日

(一) 填空题

1. 固溶体的强度和硬度比溶剂的强度和硬度 高。
2. Cu-Ni 合金进行塑性变形时，其滑移面为 {111} **面心立方晶格，密排面**
3. 固溶体出现枝晶偏析后，可用 扩散退火 加以消除。
4. 以电子浓度因素起主导作用而生成的化合物称 电子化合物。
5. 共晶反应式为 $L_d \xrightarrow{\text{恒温}} \alpha_c + \beta_e$ ，共晶反应的特点是 ①在恒温下进行； ②反应时三相共存； ③三相的成分是确定的； ④由一种液相同时生成两种固相。

(二) 是非题

1. 间隙固溶体一定是无限固溶体。 (×)
2. 间隙相不是一种固溶体，而是一种金属间化合物。 (√)

间隙固溶体是有限固溶体，而置换固溶体可以是有限固溶体也可以是无限固溶体。在间隙固溶体中，溶质原子的尺寸一般会比溶剂晶格间隙的尺寸大一些，所以溶质原子引起的畸变较大，畸变能也较高。当进入一定量溶质原子后，体系会自发降低能量而阻止溶质原子的进入，所以**间隙固溶体不能是无限固溶体。**

间隙固溶体、间隙相及间隙化合物之间的区别。

- ◆ **溶质原子分布于溶剂晶格间隙而形成固溶体称为间隙固溶体。**形成间隙固溶体的溶质原子通常是原子半径小于0.1nm的非金属元素，如H,B,C,N,O等。**间隙固溶体保持母相(溶剂)的晶体结构；间隙固溶体是非合金元素溶入到母材里，没有析出来，扫描电镜看不到。**
- ◆ 然而**间隙相、间隙化合物的晶格与其组成的任一组元晶格都不相同**，它们的成分可以在一定范围内波动。组成它们的组元都具有一定的原子比，可以用化学分子式表示。**当 $r_B/r_A < 0.59$ ，通常形成间隙相，其结构为简单晶体结构，具有极高的熔点和硬度；当 $r_B/r_A \geq 0.59$ ，则形成间隙化合物，其结构为复杂的晶体结构。间隙相是C.H.O.N.B与合金元素形成的第二相，然后能析出，在母材的表面用扫描电镜能够看到。**

3. 平衡结晶获得的 20%Ni 的 Cu-Ni 合金比 40%Ni 的 Cu-Ni 合金的硬度和强度要高。 (×)
4. 在共晶相图中, 从 L 中结晶出来的 β 晶粒与从 α 中析出的 β_{II} 晶粒具有相同的晶体结构。 (✓)
5. 一个合金的室温组织为 $\alpha + \beta_{II} + (\alpha + \beta)$, 它由三相组成。 (×)

(三) 选择正确答案

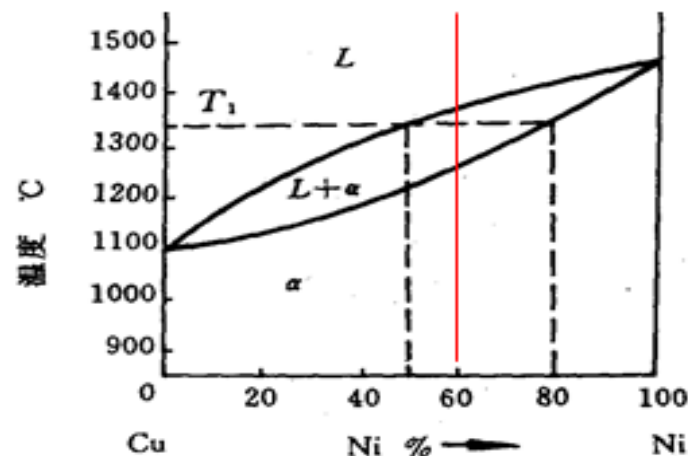
1. 固溶体的晶体结构与 a. 溶剂; b. 溶质; c. 其它晶型 相同。
2. 间隙相的性能特点是: a. 熔点高、硬度低; b. 硬度高、熔点低; c. 硬度高、熔点高。
3. 在发生 $L \rightarrow \alpha + \beta$ 共晶反应时, 三相的成分: a. 相同; b. 确定; c. 不定。
4. 共析成分的合金在共析反应 $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$ 刚结束时, 其组成相为: a. $\gamma + \alpha + \beta$; b. $\alpha + \beta$; c. $(\alpha + \beta)$ 。
5. 一个合金的组织为 $\alpha + \beta_{II} + (\alpha + \beta)$, 其组织组成物为: a. α 、 β ; b. α 、 β_{II} 、 $(\alpha + \beta)$; c. α 、 β 、 β_{II} 。

4. 共析成分的合金在共析反应 $\gamma \rightarrow \alpha + \beta$ 刚结束时, 其组成相为: a. $\gamma + \alpha + \beta$; b. $\alpha + \beta$; c. $(\alpha + \beta)$ 。

(四) 综合题

1. 将 20kg 纯铜与 30kg 纯镍熔化后漫冷至如图 3-1 温度 T_1 , 求此时:

- 1) 两相的成分;
- 2) 两相的重量比;
- 3) 各相的相对重量;
- 4) 各相的重量。



- 1) 在温度 T_1 时, 两相的成分由图知: 液相的镍质量分数为 50%, 固相的镍质量分数为 80%。
- 2) 在温度 T_1 时, 两相的重量比可由杠杆定律求得: 由题意可得, 铜镍合金的镍质量分数为 60%, 因此液相与固相的重量比为:

$$\frac{Q_L}{Q_\alpha} = \frac{0.80 - 0.60}{0.60 - 0.50} = 2$$

- 3) 在温度 T_1 时, 两相的相对重量:

$$L\% = \frac{0.80 - 0.60}{0.80 - 0.50} \times 100\% = 66.7\%; \quad \alpha\% = \frac{0.60 - 0.50}{0.80 - 0.50} \times 100\% = 33.3\%$$

- 4) 在温度 T_1 时, 两相的重量:

$$Q_L = (Q_{Cu} + Q_{Ni}) \times L\% = (20 + 30) \times 66.7\% = 33.3(\text{Kg})$$

$$Q_\alpha = (Q_{Cu} + Q_{Ni}) \times \alpha\% = (20 + 30) \times 33.3\% = 16.7(\text{Kg})$$

1. 将 20kg 纯铜与 30kg 纯镍熔化后漫冷至如图 3-1 温度 T_1 , 求此时:

两相的成分: $L: 50\% \quad \alpha: 80\%$

两相的重量比: $\frac{Q_L}{Q_\alpha} = \frac{b_1 a_2}{a_1 b_2} = 2$

4) 各相的重量: $m(L) = \frac{100}{3} \text{kg} \quad m(\alpha) = \frac{50}{3} \text{kg}$

2. 图 3.2 为 Pb-Sn 相图,

2. 图 3-2 为 Pb-Sn 相图，**铅-锡合金**

1) 用冷却曲线表示 96%Pb 的 Pb-Sn 合金的平衡结晶

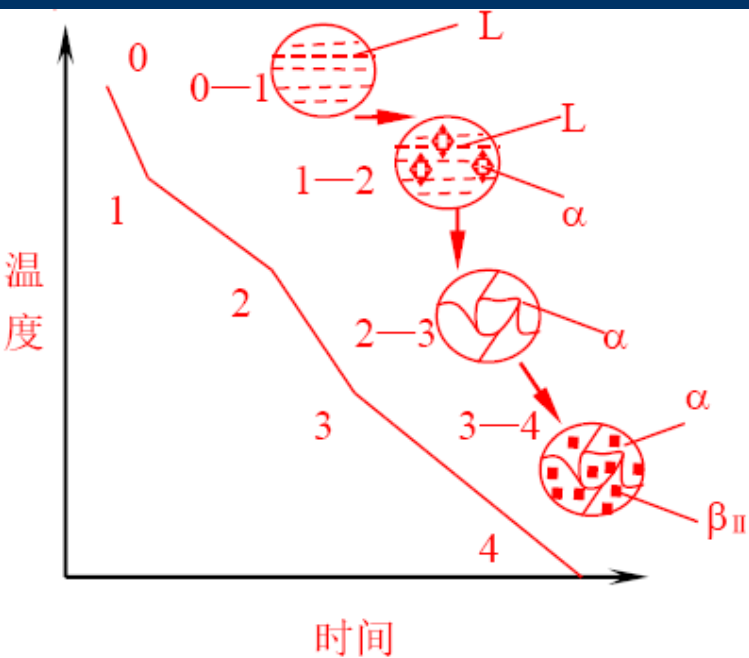
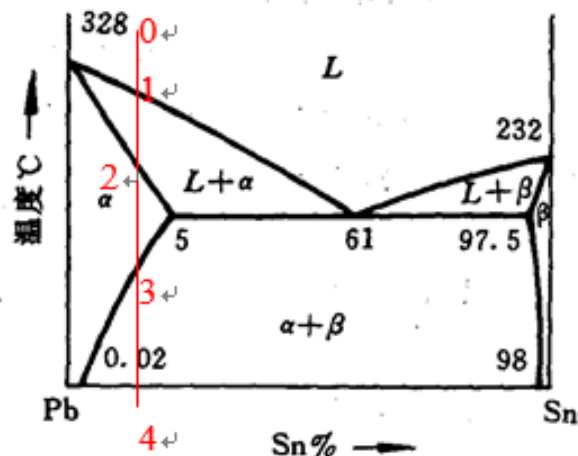
过程，画出室温平衡组织示意图，标上各组织组成物。

2) 计算该合金室温组织中组成相的相对重量。

3) 计算该合金室温组织中组织组成物的相对重量。

4) 指出该合金系室温组织中含 β_{II} 最多的合金成分。

5) 指出该合金系室温组织中共晶体最多和最少的合金的成分或成分范围。



2) 该合金室温组织中组成相为 α 相和 β 相，两相的相对重量用杠杆定律求：

$$w(\alpha)\% = \frac{0.98 - 0.04}{0.98 - 0.0002} \times 100\% = 95.9\% ; w(\beta) = \frac{0.04 - 0.0002}{0.98 - 0.0002} \times 100\% = 4.1\%$$

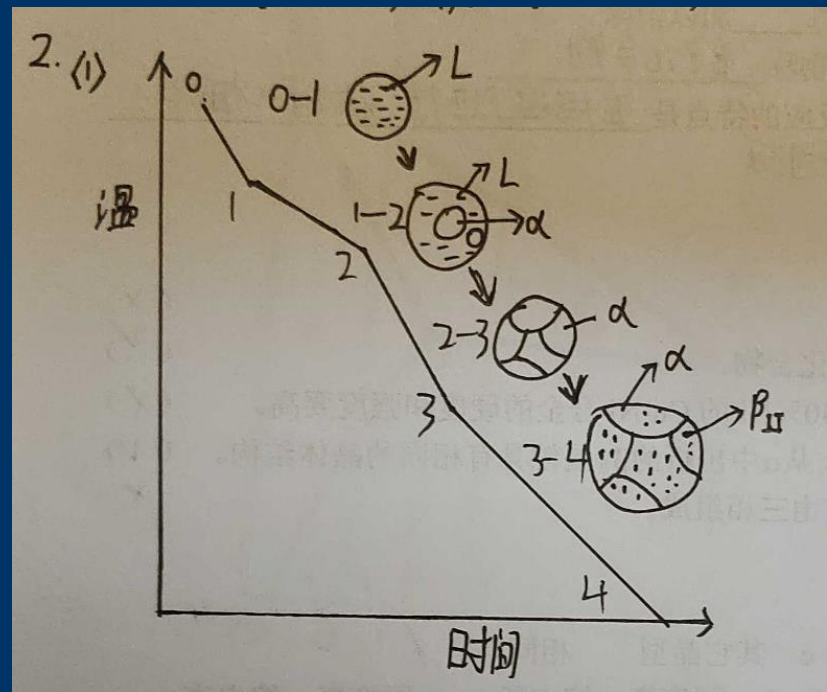
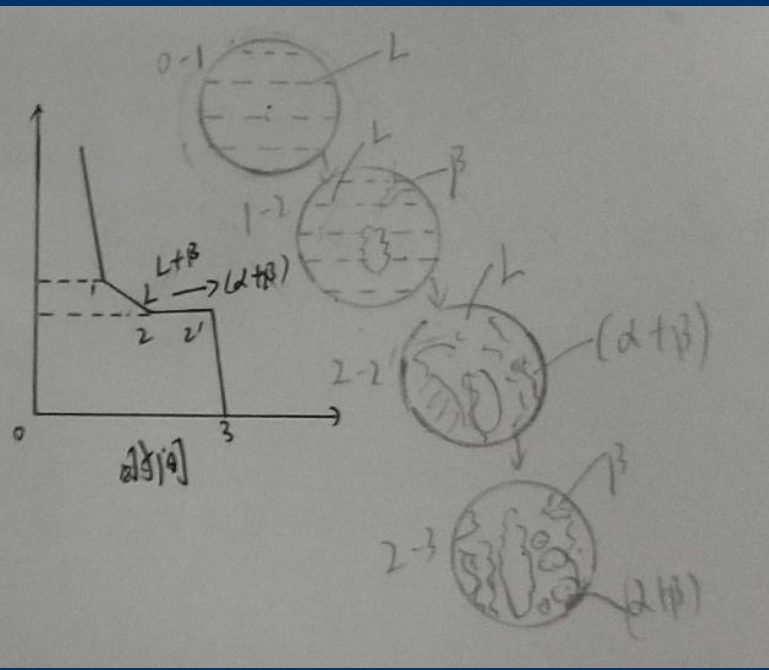
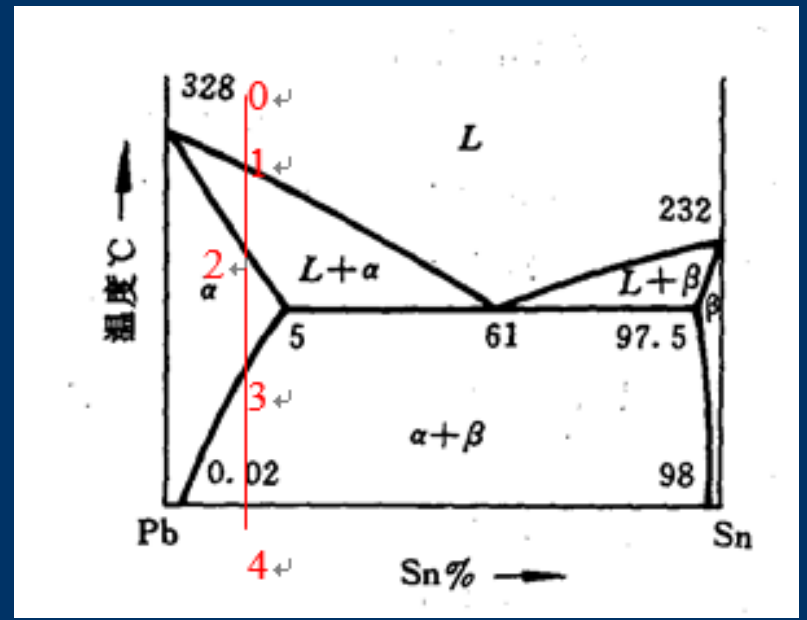
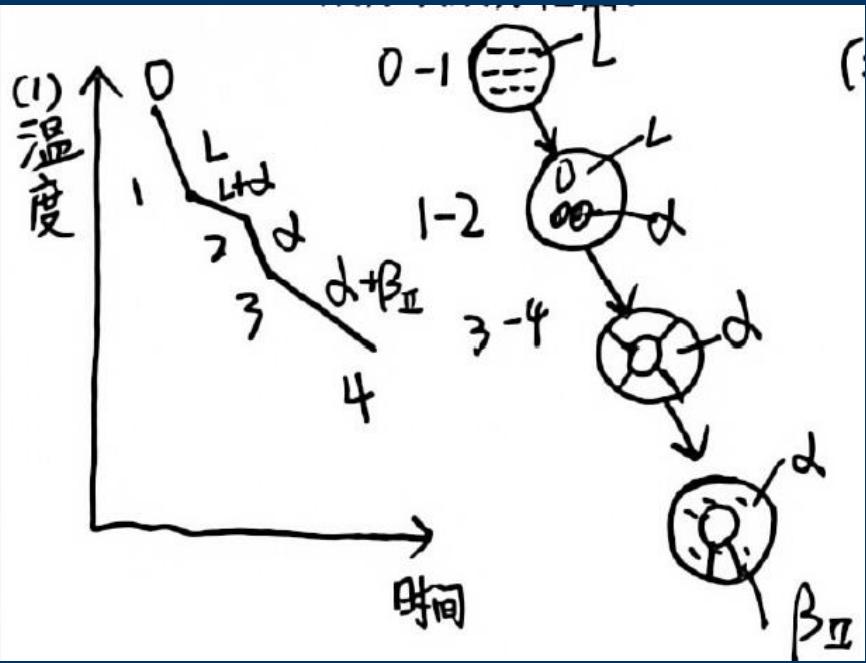
3) 该合金室温组织中组织组成物为 α 和 β_{II} ：两组成物的相对重量用杠杆定律求：

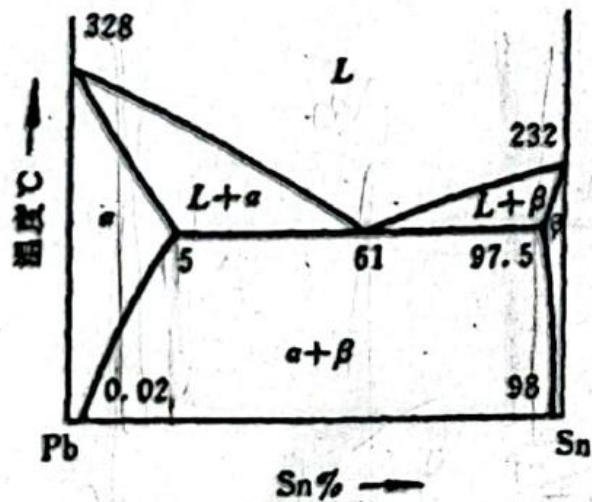
$$w(\alpha)\% = \frac{0.98 - 0.04}{0.98 - 0.0002} \times 100\% = 95.9\% ; w(\beta_{II}) = \frac{0.04 - 0.0002}{0.98 - 0.0002} \times 100\% = 4.1\%$$

4) 该合金系室温组织中含 β_{II} 最多的合金成分为 **95% Pb 的 Pb-Sn 合金**，其室温组织中 β_{II} 的含量为：↵

$$W(\beta_{II})\% = \frac{0.05 - 0.0002}{0.98 - 0.0002} \times 100\% = 5.1\% \quad \leftarrow$$

5) 该合金系室温组织中共晶体最多的成分为 **61% Sn 的 Pb-Sn 合金**，其共晶体含量为 **100%**；室温组织中共晶体最少的合金的成分范围为 **(0~5%) Sn 和 (97.5~100%) Sn 的 Pb-Sn 合金**，其共晶体含量为零。↵





(4) 5% Sn 质量分数为 5% 的 Sn 最多

(5) 61% Sn 质量分数为 61% 的 Sn 共晶 合金最多 (α+β) 为 100%

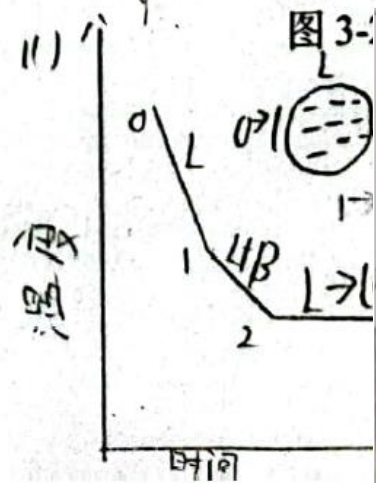


图 3-1

- 2) 计算该合金室温组织中组成相的相对重量。
- 3) 计算该合金室温组织中组织组成物的相对重量。
- 4) 指出该合金系室温组织中含 β_{II} 最多的合金成分。
- 5) 指出该合金系室温组织中共晶体最多和最少的合金的成分或成分范围。

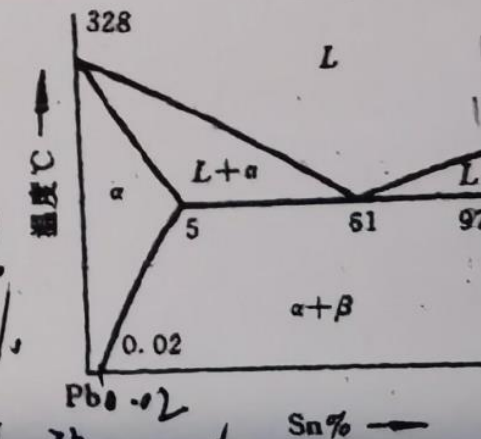
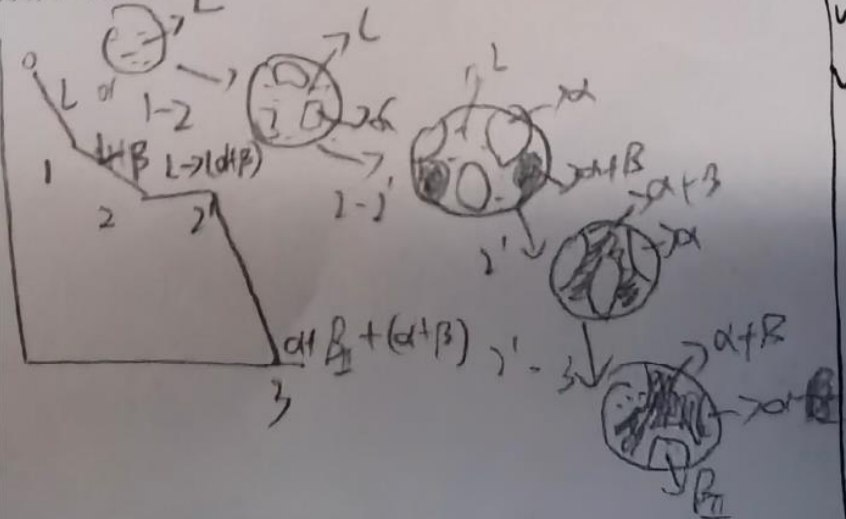


图 3-2

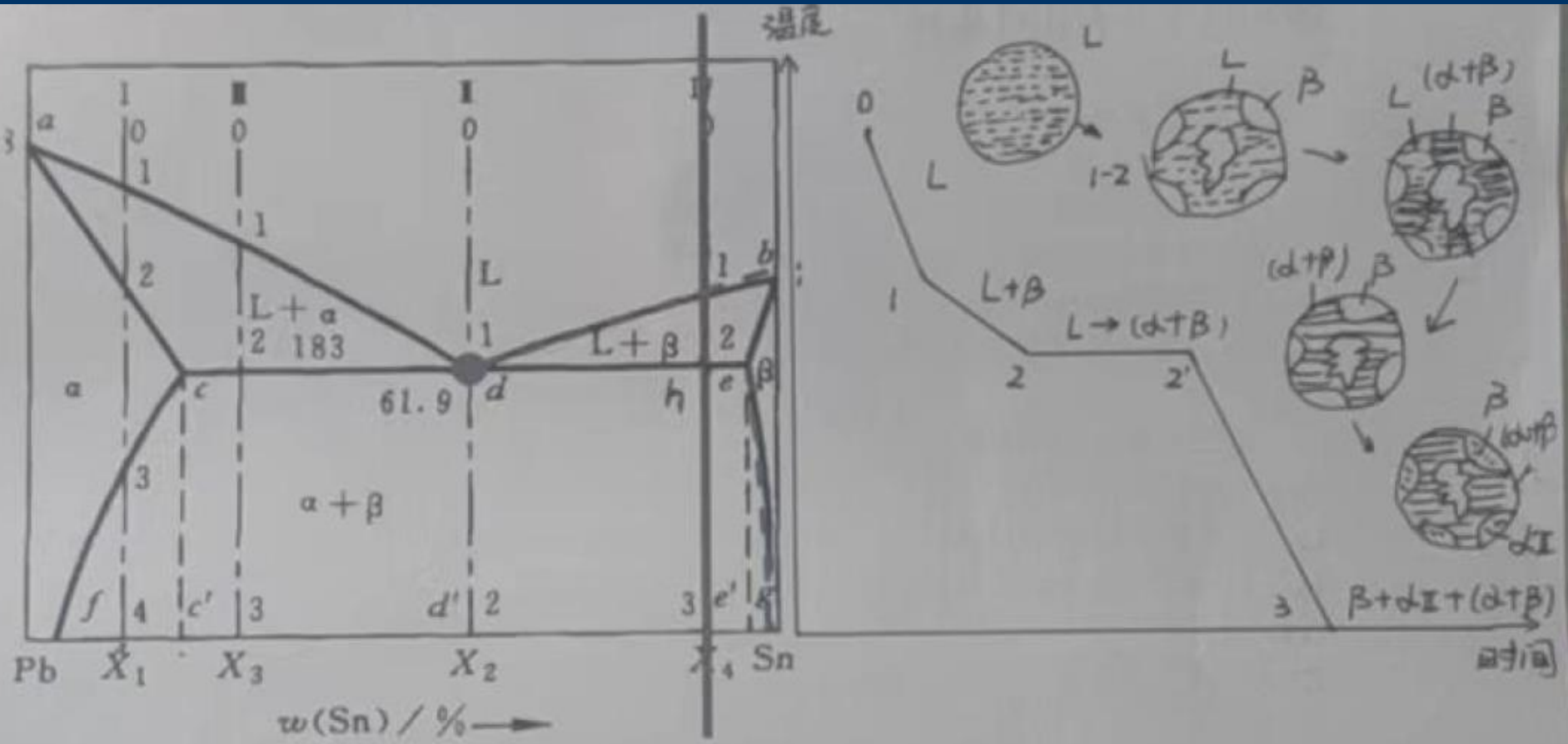
1.2) $w_{\alpha} = 4\%$
 $w_{\beta} = 96\%$

3) $w_{\beta} = \frac{35}{98} \times 100\%$
 $w_{\alpha} = \frac{96}{98} \times 100\%$
 $w_{\alpha+\beta} = \frac{1.5}{36.8} \times 100\%$

3、根据如下 Pb-Sn 合金相图，求解：

- 1) 用冷却曲线图画过共晶合金 IV 的平衡结晶过程，标上各组织组成物，并画出各平衡组织示意图；
- 2) 求室温组织组成相： α ， β 的含量；
- 3) 求室温组织组成物： β 、 α_{II} 、 $(\alpha + \beta)$ 的含量；

$$\begin{aligned} (2) \quad w(\beta) &= \frac{fX_{\psi}}{fg} \times 100\% \\ w(\alpha) &= \frac{X_{\phi}g}{fg} \times 100\% \\ (3) \quad w(\alpha_{II}) &= \frac{0.9}{fg} \cdot \frac{d_2}{de} \times 100\% \\ w(\beta) &= \frac{fe'}{fg} \cdot \frac{d_2}{de} \times 100\% \\ w(\alpha + \beta) &= \frac{2e}{de} \times 100\% \end{aligned}$$



$$(2) w(\beta) = \frac{fx_4}{fg} \times 100\%$$

$$w(\alpha) = \frac{x_4g}{fg} \times 100\%$$

$$(3) w(\alpha_{II}) = \frac{0.9}{fg} \cdot \frac{d_2}{de} \times 100\%$$

$$w(\beta) = \frac{fe'}{fg} \cdot \frac{d_2}{de} \times 100\%$$

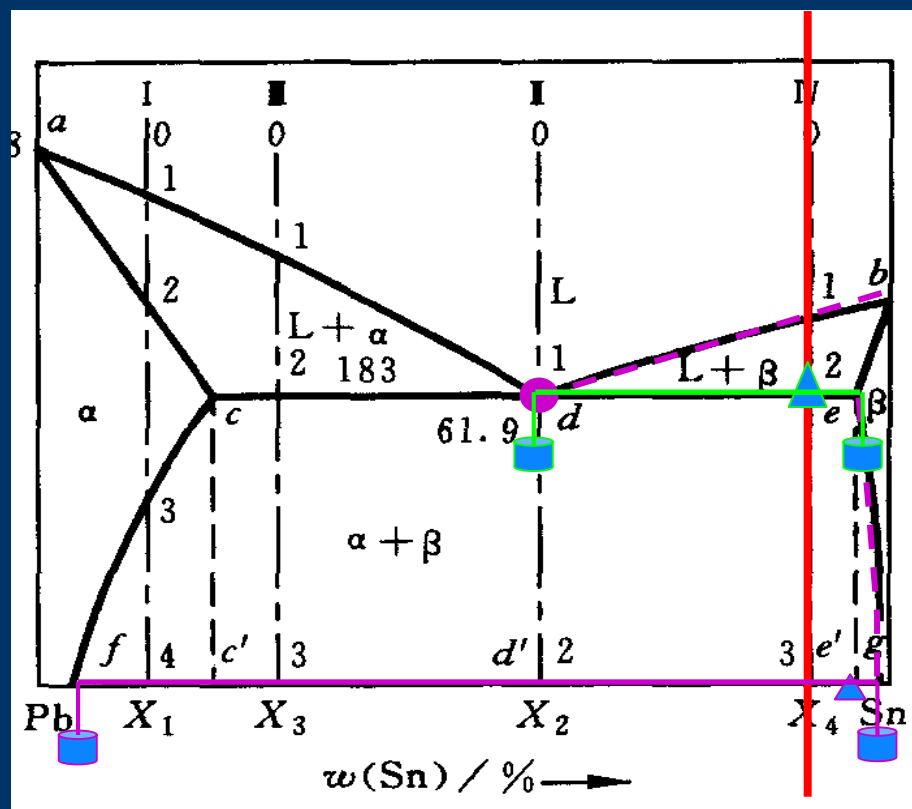
$$w(\alpha + \beta) = \frac{2e}{de} \times 100\%$$

3、根据如下 Pb-Sn 合金相图，求解：

1) 用冷却曲线图画过共晶合金 IV 的平衡结晶过程，标上各组织组成物，并画出各平衡组织示意图；

2) 求室温组织组成相： α ， β 的含量；

3) 求室温组织组成物： β 、 α_{II} 、 $(\alpha + \beta)$ 的含量；



室温组织组成物： β 、 α_{II} 、 $(\alpha + \beta)$



找到析出之前的位置

转化为两相区

第一次杠杆定律



又一个两相区

第二次杠杆定律

$$w(\beta) = \frac{d2}{de}$$

$$w(\alpha + \beta) = \frac{2e}{de}$$

β

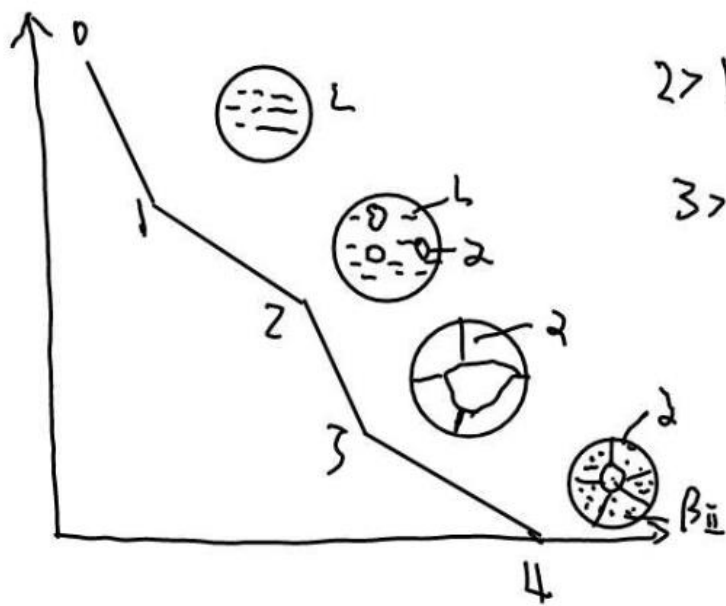
$(\alpha + \beta)$

β

α_{II}

$$w(\beta) = \frac{fe'}{fg}$$

$$w(\alpha_{II}) = \frac{e'g}{fg}$$



$$2 > W(\alpha) = \frac{x_4 g}{f g} \times 100\% \quad W(\beta) = \frac{f x_4}{f g} \times 100\%$$

$$3 > W(\beta) = \frac{f e'}{f g} \times \frac{d z}{d e} \times 100\%$$

$$W(\alpha_{II}) = \frac{e' g}{f g} \times \frac{d z}{d e} \times 100\%$$

$$W(\alpha + \beta) = \frac{z e}{d e} \times 100\%$$

|| 中 〇 ,

