

# 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](mailto:jiamy@mail.buct.edu.cn)

13522357136



## ● 内容回顾

### ● 纯金属的结晶

**金属结晶条件：**要有一定的过冷度（必要条件）；

**金属结晶推动力：**固态金属和液态金属之间的自由能差；

**金属结晶过程：**形核、长大；

**细化铸态金属晶粒措施：**增大过冷度、变质处理、振动、电磁搅拌

### ● 二元合金的结晶

**1、发生匀晶反应的合金的结晶：**相图、五大特点、杠杆定律

## ● 本次课内容

### 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

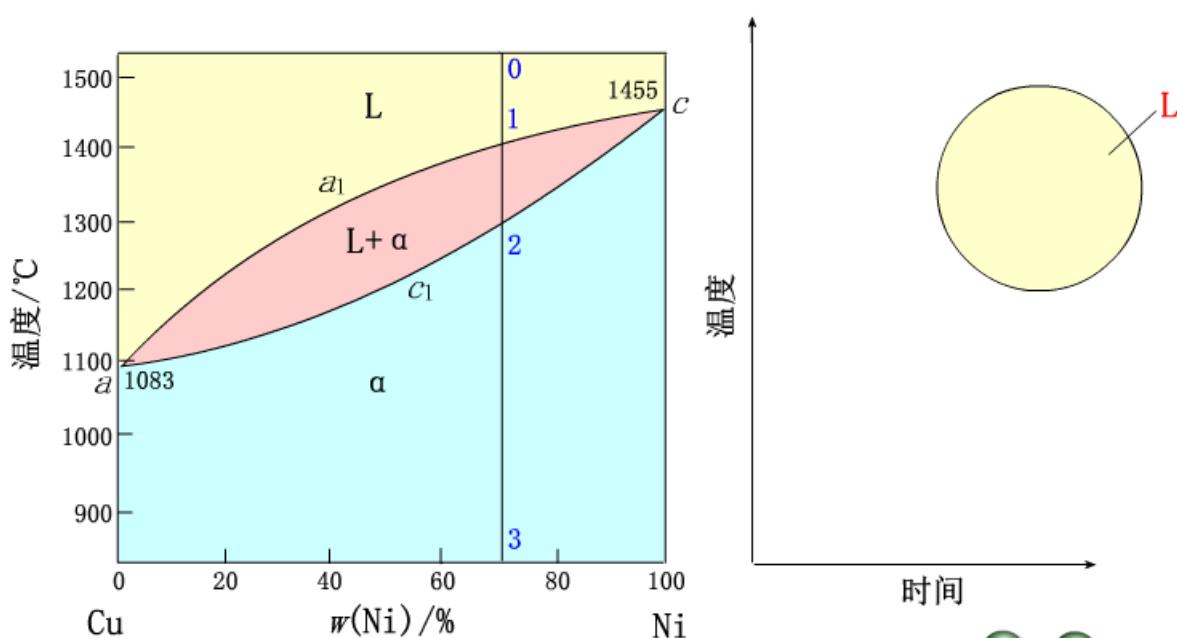
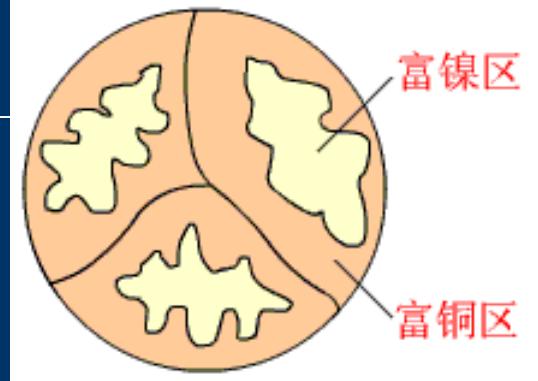
#### 2.2.3 铁碳合金的结晶 ★★

- 1、铁碳相图
- 2、合金的平衡结晶过程
- 3、铁碳合金的成分-组织-性能关系
- 4、 $F_e$ - $F_{e3}C$ 合金相图的应用

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 1、发生匀晶反应的合金的结晶★



结晶过程五个特点：

- ① 生核与长大两过程
- ② 变温结晶过程
- ③ 在两相区内，每个温度下两相成分确定。
- ④ 在两相区内，每个温度下两相质量确定。
- ⑤ 枝晶偏析

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

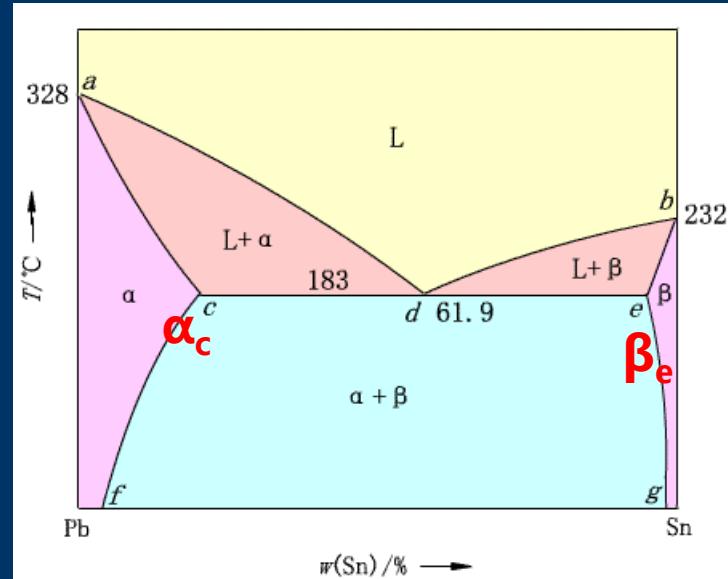
### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

**共晶反应：**一种液相在恒温下同时结晶出两种固相的反应，生成的两相混合物叫**共晶体**。

d点为**共晶点**, 表示d点成分(共晶成分)的液相合金冷却到d点温度(共晶温度)时,共同结晶出c点成分的 $\alpha$ 相和e点成分的 $\beta$ 相。  $L_d \rightarrow (\alpha_c + \beta_e)$

反应时三相共存, 三相各自成分确定, 恒温进行。



Pb-Sn 合金相图

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

7区

3个单相区、3个双相区、  
1个三相区；

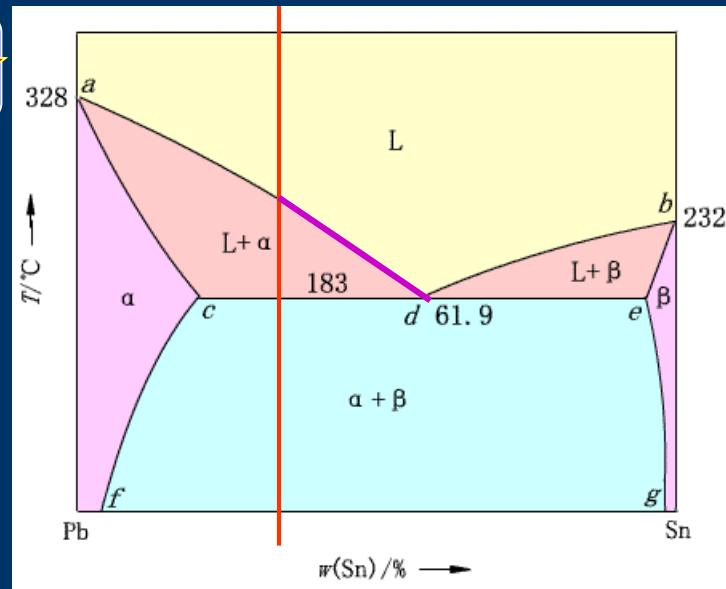
3点

c: Sn在Pb中的最大溶解度  
e: Pb在Sn中的最大溶解度  
d: 共晶点

7线

液相线、固相线

Pb-Sn 合金相图



- ◆ 水平线cde为共晶反应线, 成分在ce之间的合金平衡结晶时都会发生共晶反应。
- ◆ cf 线为Sn在Pb中的溶解度线( $\alpha$ 相的固溶线)。Sn含量大于f点的合金从高温冷却到室温时, 从 $\alpha$ 相中析出 $\beta$ 相, 叫二次 $\beta$ :  $\alpha \rightarrow \beta_{\parallel}$ 。 **二次结晶**
- ◆ eg线为Pb在Sn中溶解度线。Sn含量小g点的合金, 冷却过程中同样发生二次结晶, 析出二次 $\alpha$ 。  $\beta \rightarrow \alpha_{\parallel}$ 。

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

例如：班 学生

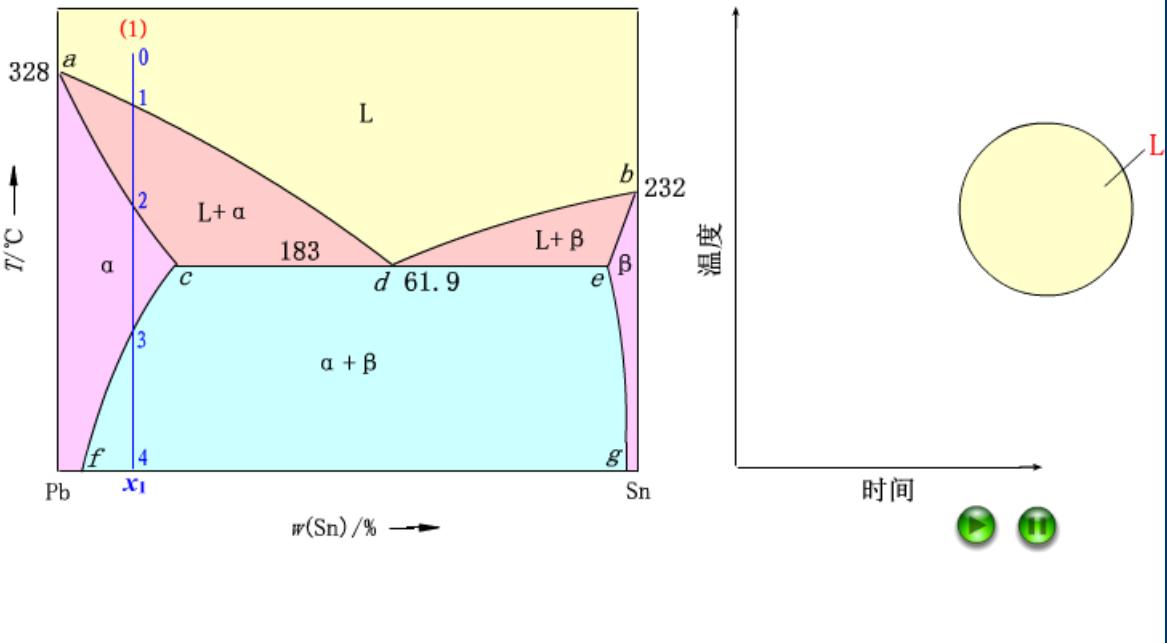
### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

##### (2) 结晶过程

##### ① 合金 I

为什么没发生共晶反应？



组织 (微观形貌)

显微镜下观察到的合金各相在空间的配置情况。  
由一种或多种相构成；

组织:  $\alpha + \beta_{\text{II}}$

组织组成物

显微镜下观察到的合金中那些具有确定本质、一定形成机制和特殊形状的组成部分。

组织组成物:  $\alpha$ 、 $\beta_{\text{II}}$

组成相

合金中的成分、结构及性能相同的组成部分。

组织组成相:  $\alpha_f$ 、 $\beta_g$

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

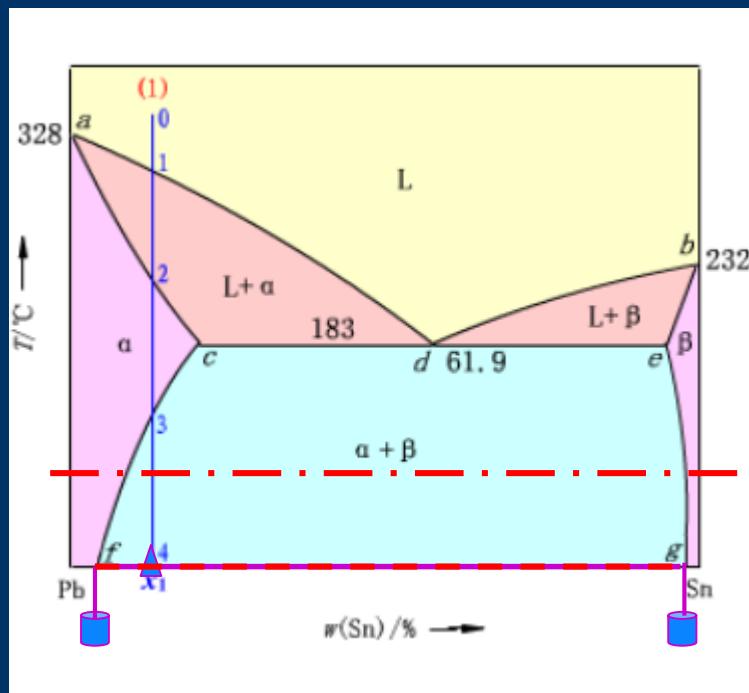
### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

##### (2) 结晶过程

##### ① 合金 I

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:  $\alpha_f$ 、 $\beta_g$

- 以合金平均成分点为支点;
- 以两相区宽度为杆长;
- 以两相成分点为端点; 还有条件吗?

$$w(\alpha) = \frac{X_1 g}{f g} \times 100\%$$

$$w(\beta) = \frac{f X_1}{f g} \times 100\% \quad (\text{或 } \beta \% = 1 - \alpha \% )$$

组织组成物含量:  $\alpha$ 、 $\beta_{II}$

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

##### (2) 结晶过程

##### ① 合金 I

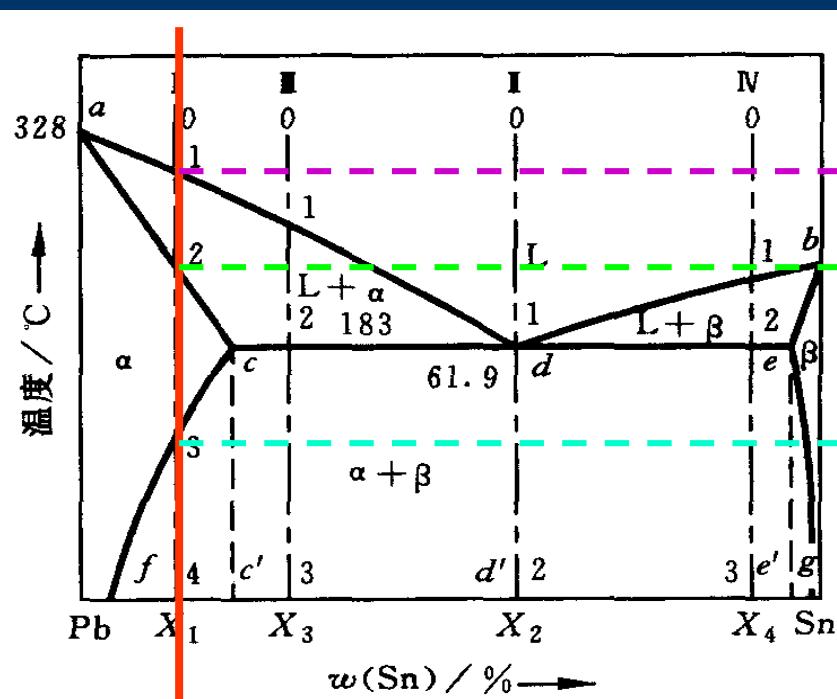


图 2-15 Pb-Sn 合金相图

要求:

- 1、会用冷却曲线图画出平衡结晶过程，标上各组织组成物，画出各平衡组织示意图；
- 2、会用杠杆定律求组织组成物、组成相的含量；

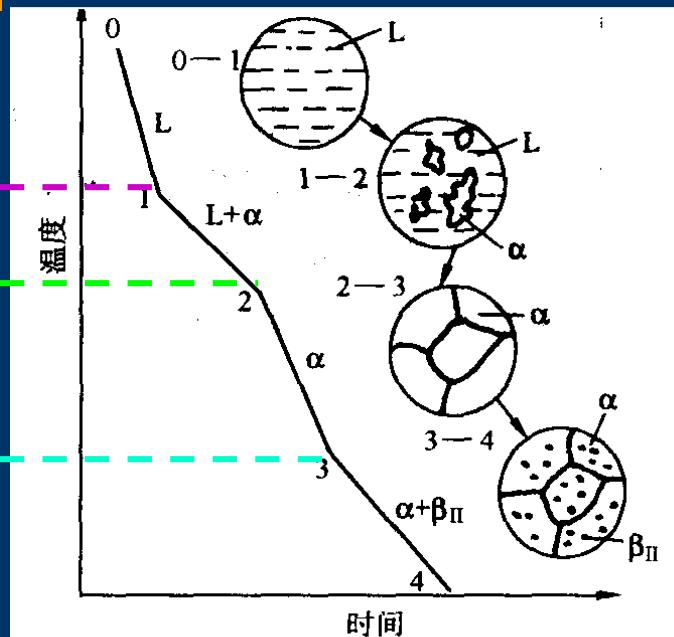


图 2-16 合金 I 的结晶过程

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

##### (2) 结晶过程

###### ② 合金II (共晶合金)

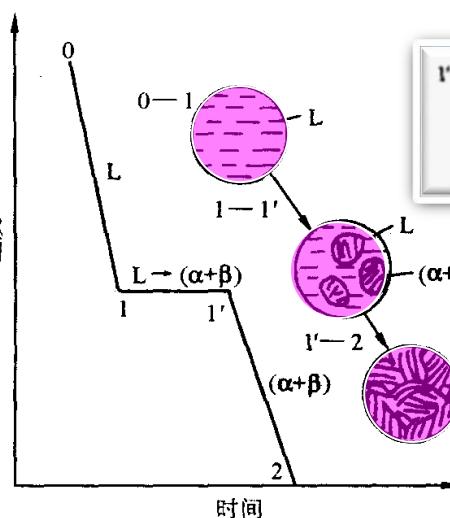
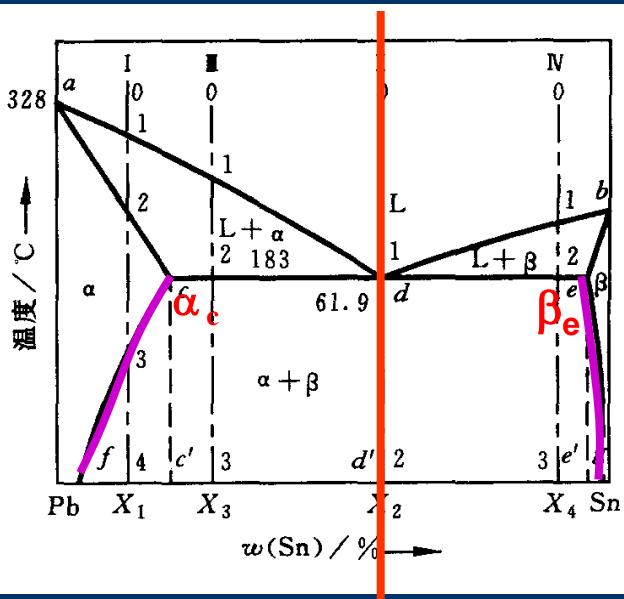
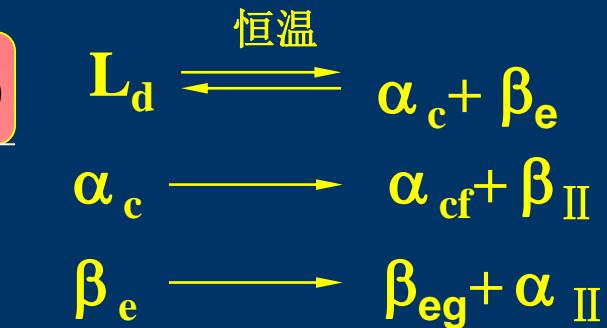


图 2-17 共晶合金的结晶过程示意图



组织:  $\alpha + \beta_{II} + \beta + \alpha_{II}$   
很难区分, 可以认为是共晶体 ( $\alpha + \beta$ )

组织成物:  $\alpha$ 、 $\beta_{II}$ 、 $\beta$ 、 $\alpha_{II}$   
可以认为是共晶体 ( $\alpha + \beta$ )

组成相:  $\alpha_f$ 、 $\beta_g$

## ● 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

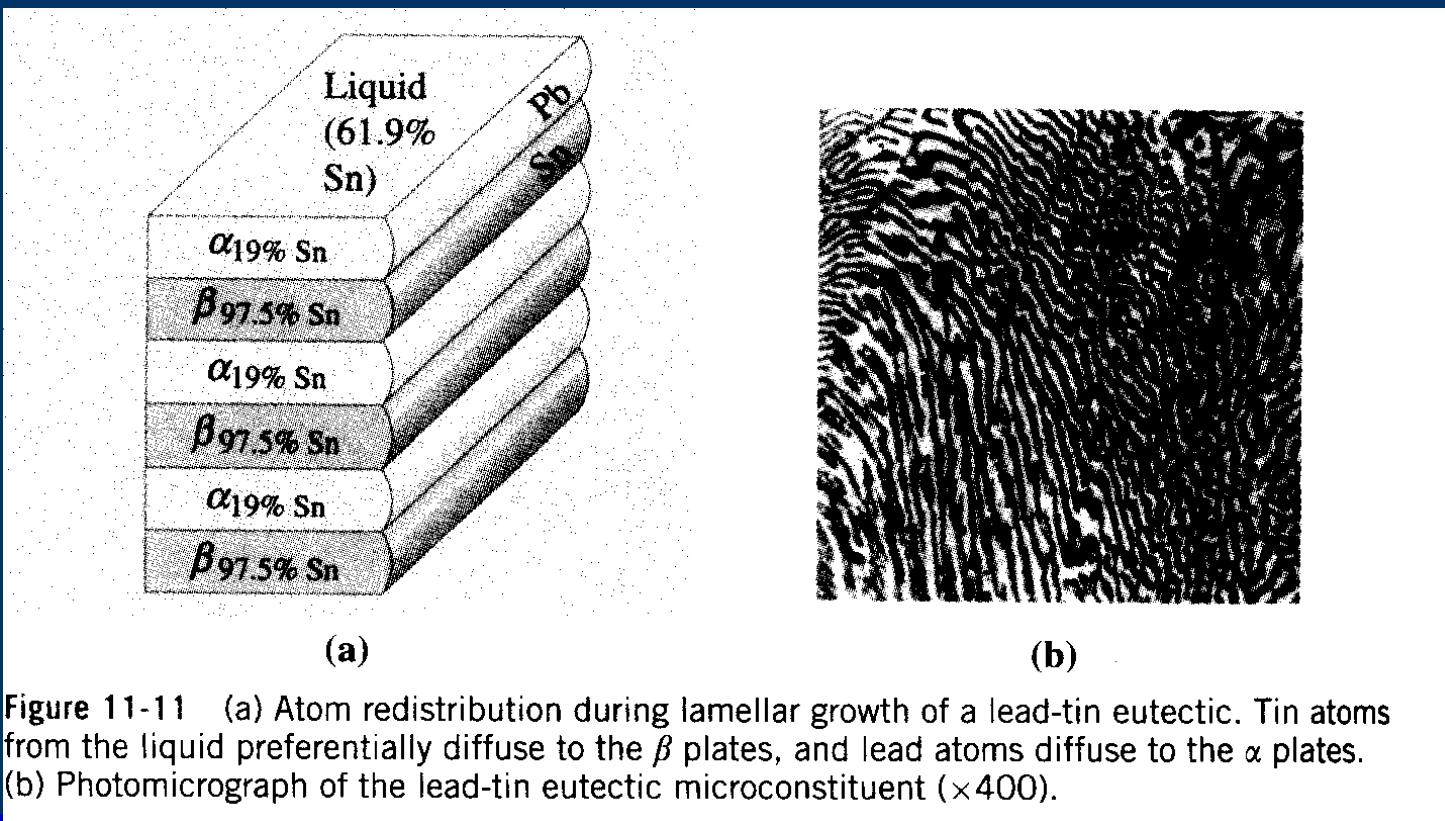
### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

(2) 结晶过程

② 合金Ⅱ (共晶合金)

共晶体



## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

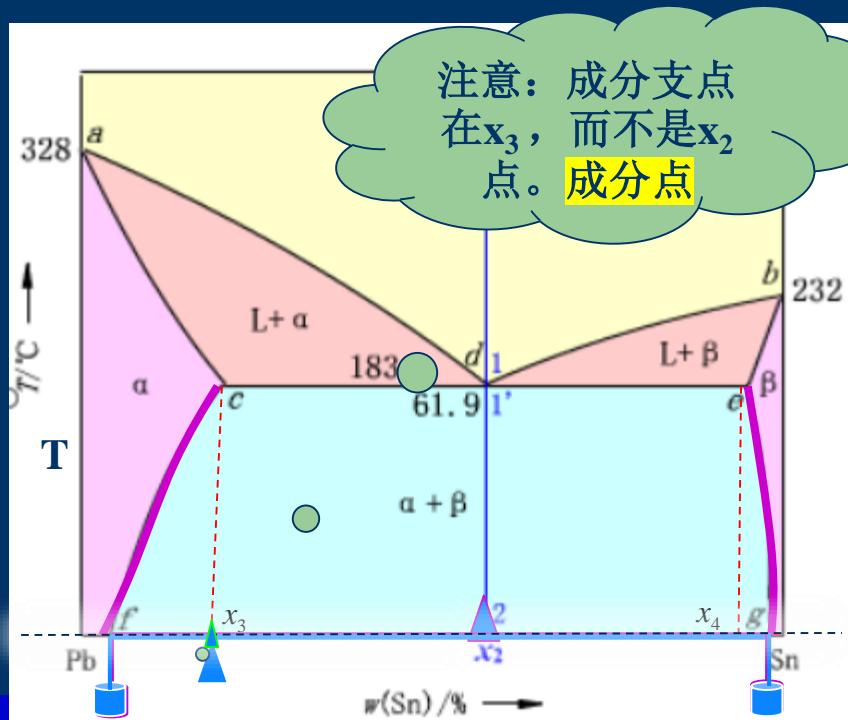
### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

##### (2) 结晶过程

##### ② 合金 II

运用杠杆定律, 求两相、组织组成物的质量分数



组织:  $\alpha + \beta_{II} + \alpha_{II} + \beta$

可以认为是共晶体 ( $\alpha + \beta$ )

组织成物:  $\alpha$ 、 $\beta_{II}$ 、 $\alpha_{II}$ 、 $\beta$

可以认为是共晶体 ( $\alpha + \beta$ )

组成相:  $\alpha_f$ 、 $\beta_g$

室温下两相的质量

$$w(\alpha) = \frac{x_2 g}{f g} \times 100\%$$

$$w(\beta) = \frac{f x_2}{f g} \times 100\%$$

室温下组织组成物 $\alpha$  和析出 $\beta_{II}$ 质量比

$$\frac{w(\alpha)}{w(\beta_{II})} = \frac{x_3 g}{f x_3}$$

室温下组织组成物 $\beta$ 和析出 $\alpha_{II}$ 质量比

$$\frac{w(\beta)}{w(\alpha_{II})} = \frac{f x_4}{x_4 g}$$

## ● 课间小测试

判断题：

1. 杠杆定律只适合两相区。 ( )
2. 在发生 $L \rightarrow \alpha + \beta$ 共晶反应时，三相的成分不确实。 ( )

## ● 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

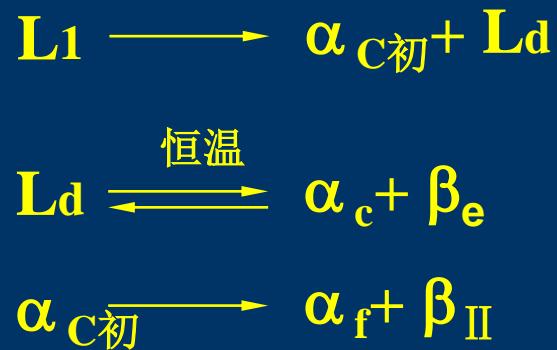
### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

##### (2) 结晶过程

没直接过共晶点为什么发生共晶反应?

##### ③ 合金III (亚共晶~)

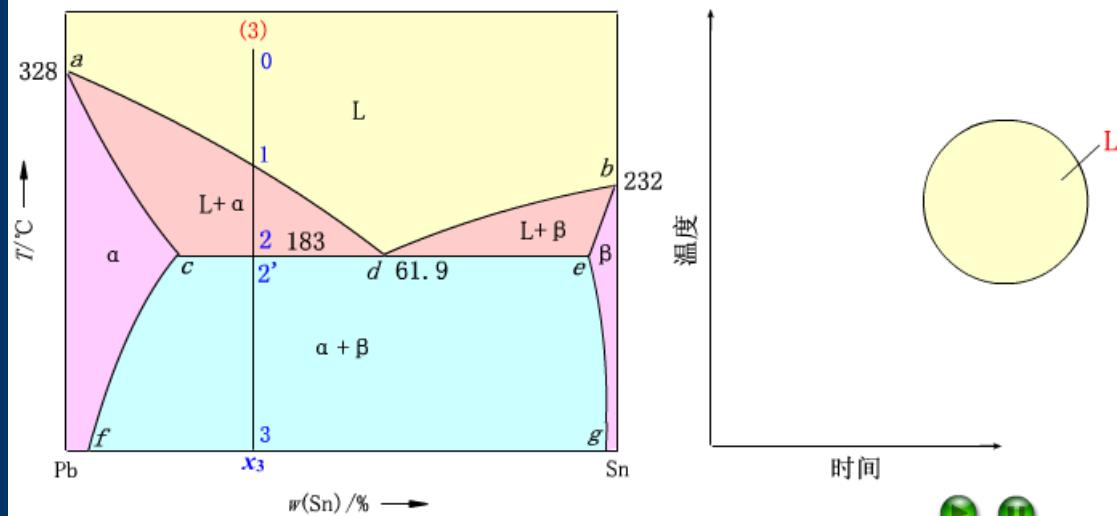


室温组织:  $\alpha + \beta_{II} + (\alpha + \beta)$

室温组织组成物:

$\alpha$ 、 $\beta_{II}$ 、 $(\alpha + \beta)$

组成相:  $\alpha_f$ 、 $\beta_g$



## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

(2) 结晶过程

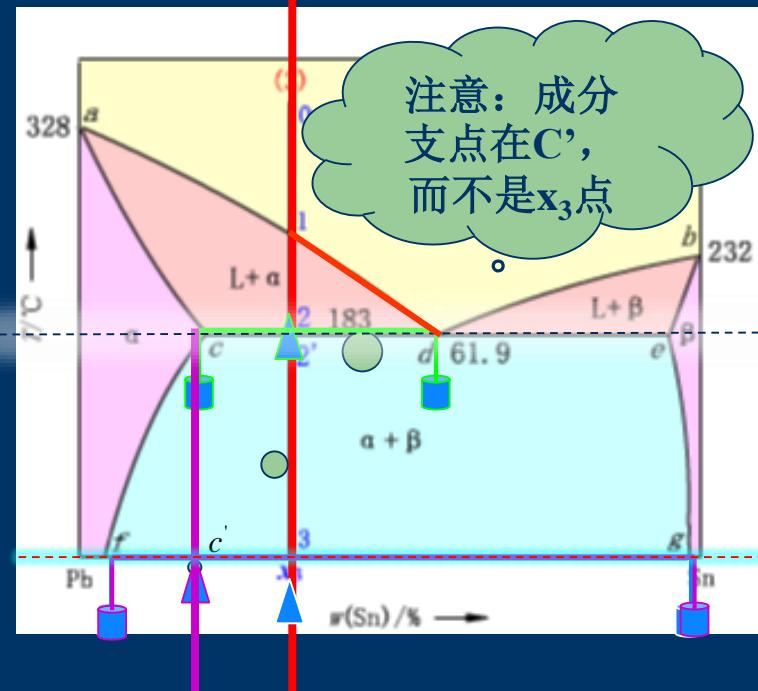
③ 合金III

$$w(\alpha) = \frac{x_3 g}{fg} \times 100\%$$

$$w(\beta) = \frac{fx_3}{fg} \times 100\%$$



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:  $\alpha_f$ 、 $\beta_g$

室温组织组成物含量:  $\alpha$ 、 $\beta_{II}$ 、 $(\alpha + \beta)$

$$w(\alpha_c) = \frac{2d}{cd} \times 100\%; \quad w(\alpha + \beta) = \frac{c2}{cd} \times 100\%$$

$$w(\alpha) = \frac{c'g}{fg} \times \frac{2d}{cd} \times 100\%; \quad w(\beta_{II}) = \frac{fc'}{fg} \times \frac{2d}{cd} \times 100\%$$

两次运用杠杆  
定律。

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

##### (2) 结晶过程

##### ③ 合金III (亚共晶~)

要求:

- 1、会用冷却曲线图画出平衡结晶过程，标上各组织组成物，画出各平衡组织示意图；
- 2、会用杠杆定律求组织组成物、组成相的含量；

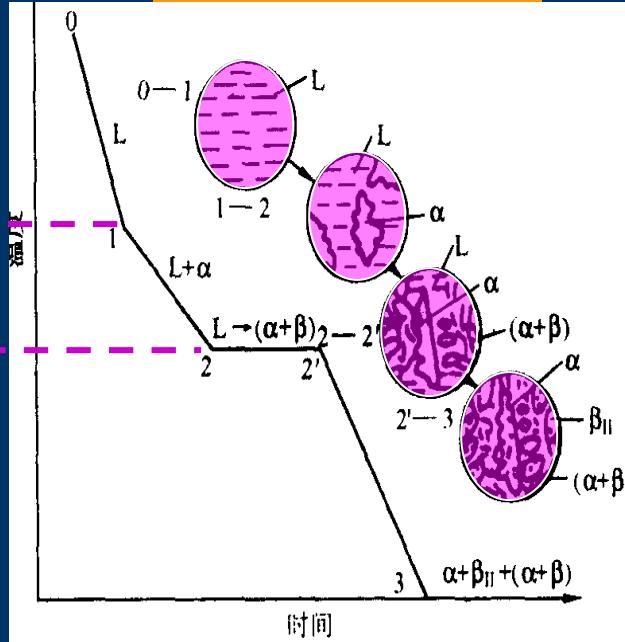
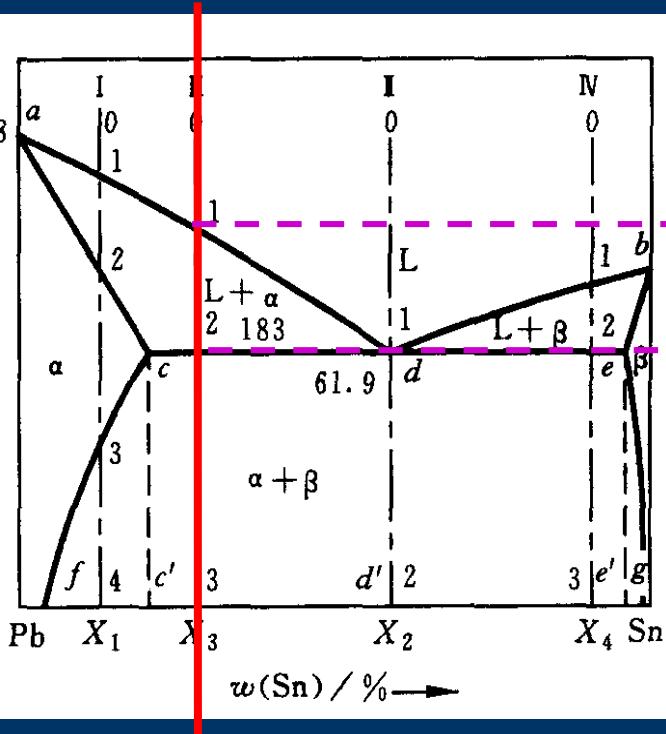


图 2-19 亚共晶合金的结晶过程示意图



图 2-20 亚共晶合金组织

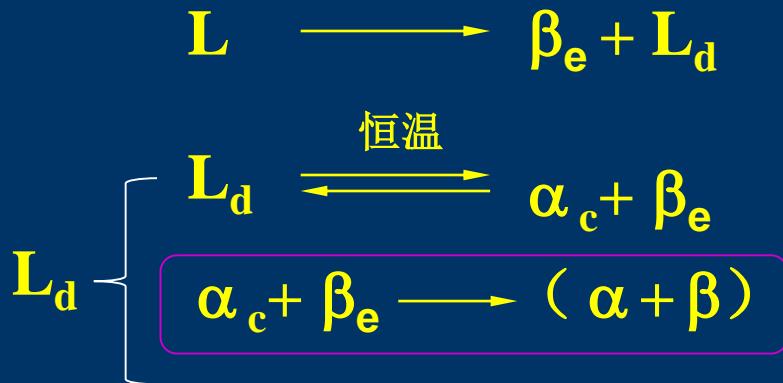
## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

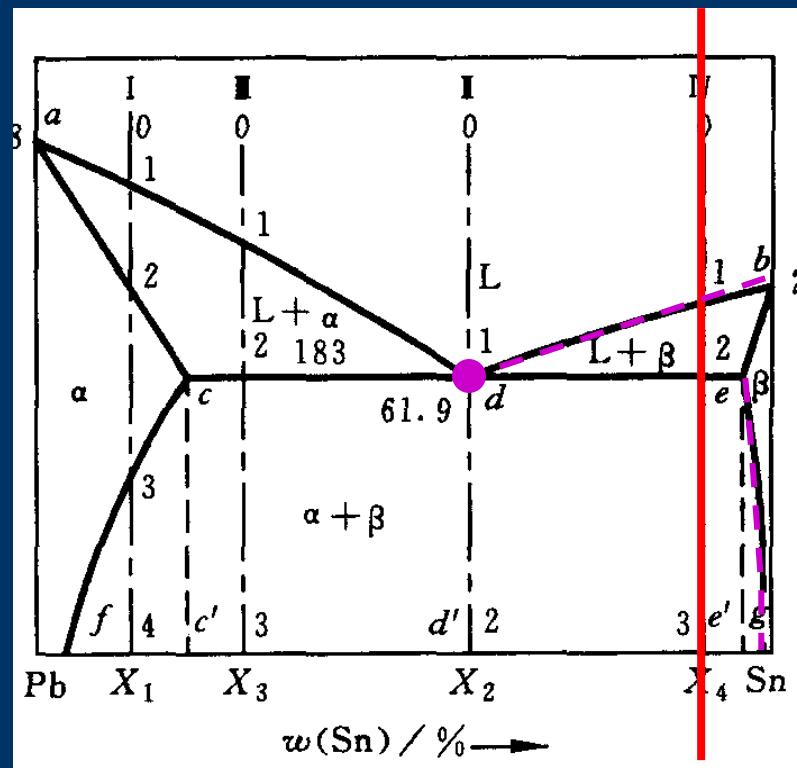
##### (2) 结晶过程

##### ④ 合金IV (过共晶~)



室温组织:  $\beta + \alpha_{II} + (\alpha + \beta)$

室温组织组成相:  $\alpha_f, \beta_g$

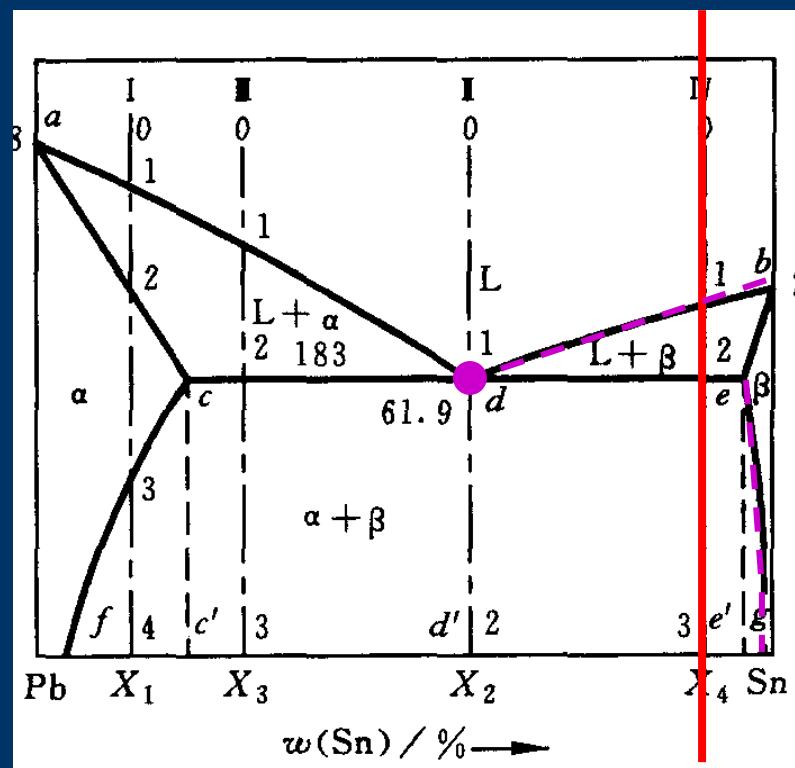


## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2、发生共晶反应的合金的结晶★

#### (2) 结晶过程

#### ④ 合金IV (过共晶~)



作业:

- 1) 用冷却曲线图画出过共晶合金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： $\alpha$ ， $\beta$ 的含量
- 3) 求室温组织组成物： $\beta$ 、 $\alpha_{\text{II}}$ 、 $(\alpha + \beta)$ 的含量

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

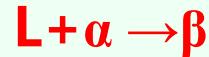
### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 3、发生包晶反应的合金的结晶

**包晶反应：**一种液相与一种固相在恒温下相互作用而转变为另一种固相的反应。

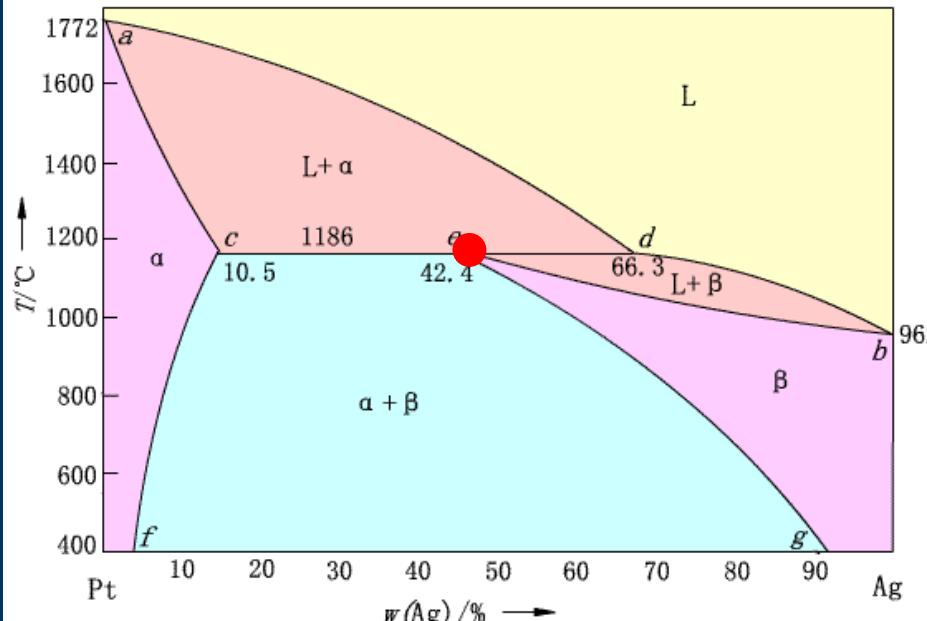
e点为包晶点。

e点成分的合金冷却到 e点温度(包晶温度)时发生包晶反应：



水平线ced 为包晶反应线。

发生包晶反应时三相共存, 三相各自成分确定, 恒温进行。



Pt-Ag (铂-银) 合金相图

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 3、发生包晶反应的合金的结晶

##### (2) 结晶过程

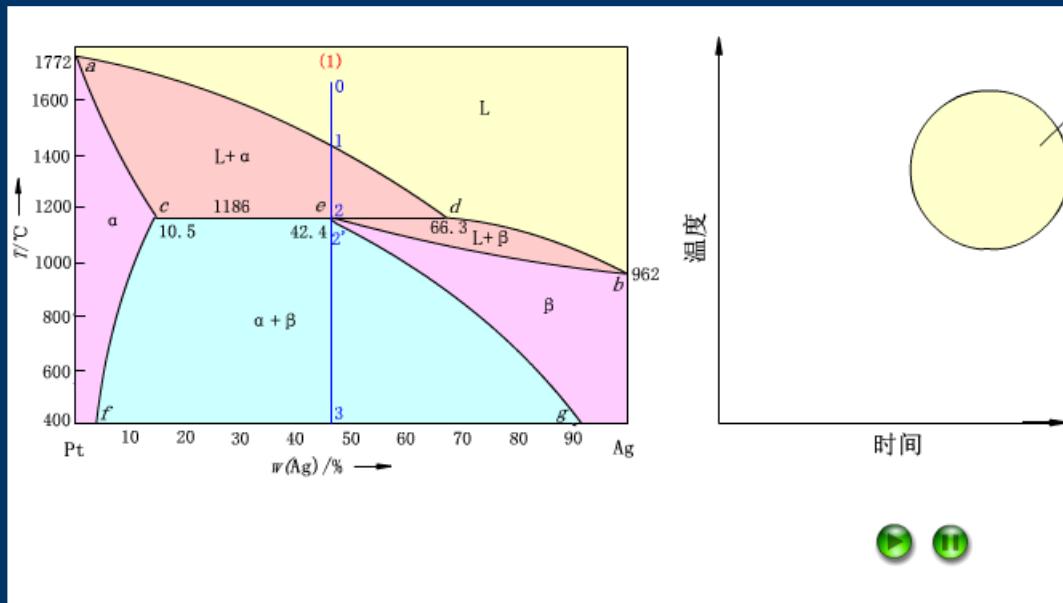
包晶偏析 (peritectic segregation)  
在冷却速度快时，包晶反应生成物 $\beta$ 中，原 $\alpha$ 相中的铂 $P_t$ 偏多，原 $L$ 相中铂 $P_t$ 的偏少，这种现象叫~。

◆ 2~2'点 c点成分的 $\alpha$ 相与d点成分的L相发生包晶反应：



◆ 反应结束，L相与 $\alpha$ 相正好全部反应耗尽，形成e点成分的 $\beta$ 固溶体。

◆ 2'~3点  $\beta$ 中析出二次 $\alpha_{II}$ 。

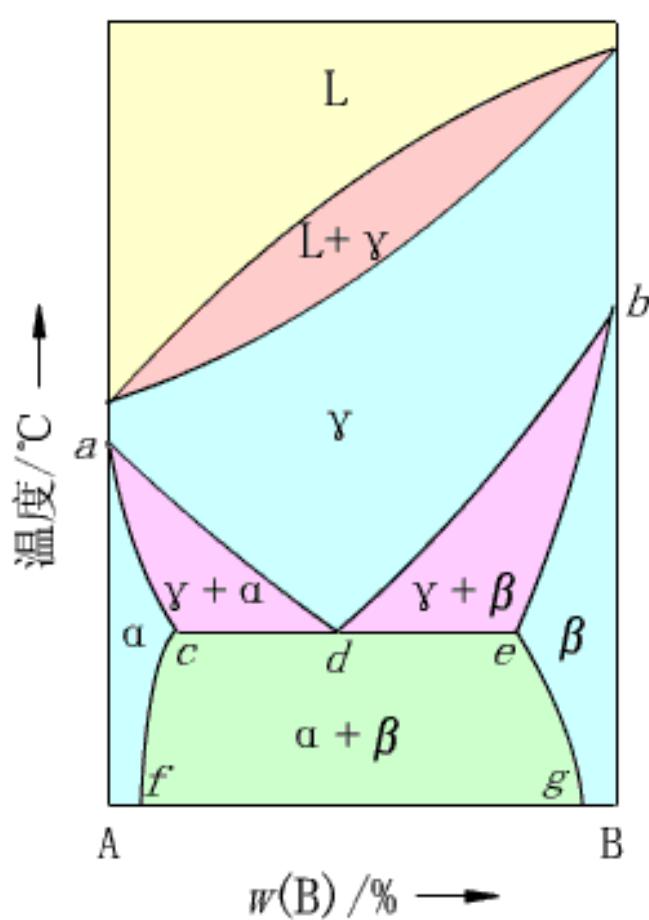


## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 4、发生共析反应的合金的结晶

- ◆ 共析相图中各种成分合金的结晶过程与共晶相图类似。
- ◆ 共析反应在固态下进行, 共析产物比共晶产物要细密。



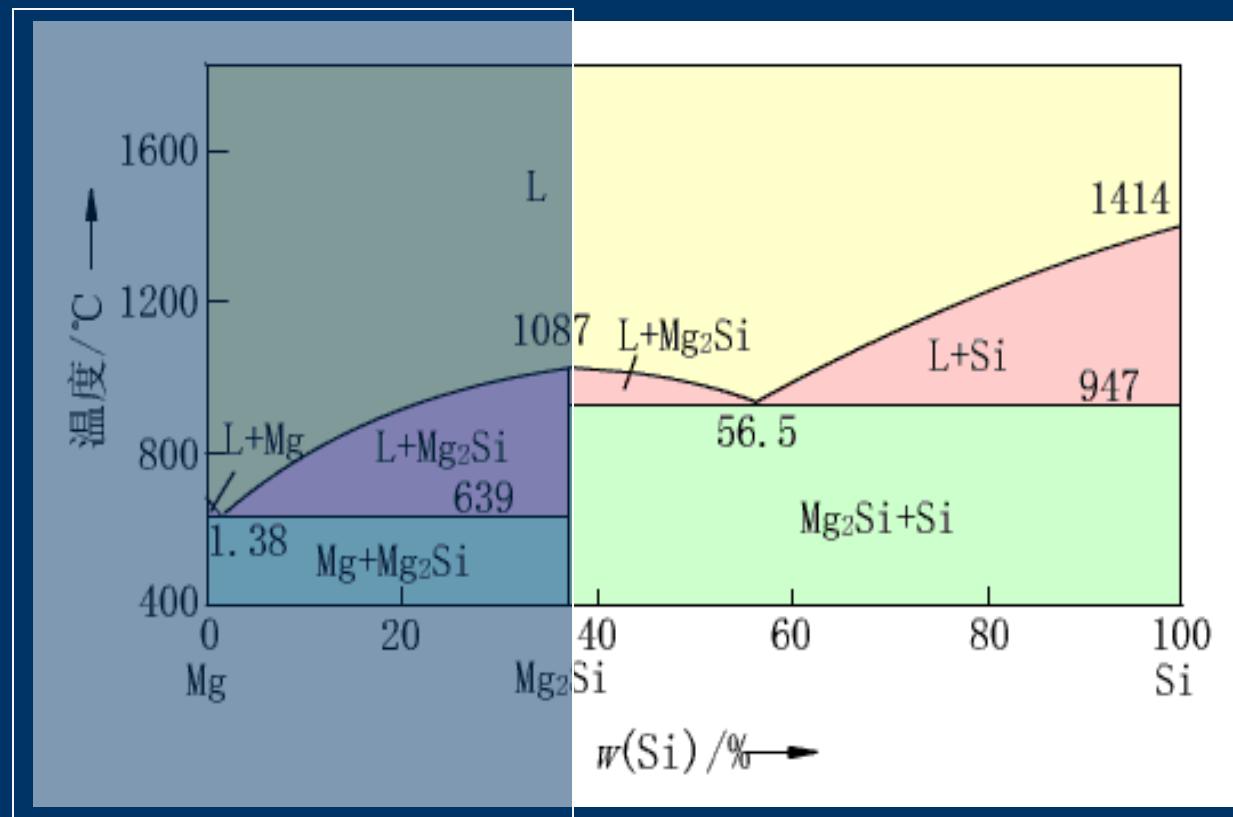
共析相图

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.1 二元合金的结晶(binary alloy~)

#### 5、含有稳定化合物的合金的结晶

在某些组元构成的相图中，常形成一种或几种稳定化合物。这些化合物成分一定，熔点固定，熔化前不分解，也不发生其它反应。可以将稳定的化合物看成独立的组元，并将整个相图分解成几个简单的相图



● 课间小测试

3. 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 (b)，组织为 (c)：
- a.  $\gamma + \alpha + \beta$ ; b.  $\alpha + \beta$ ; c.  $(\alpha + \beta)$

4. 一个合金的组织为  $\alpha + \beta_{II} + (\alpha + \beta)$ ，其组织组成物为 (b)：
- a.  $\alpha$ 、 $\beta$ ; b.  $\alpha$ 、 $\beta_{II}$ 、 $(\alpha + \beta)$ ; c.  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\beta_{II}$

## ● 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.2 合金的性能和相图的关系

合金的性能取决于它的成分和组织。  
相图则可反映不同成分的合金在室温时的平衡组织。

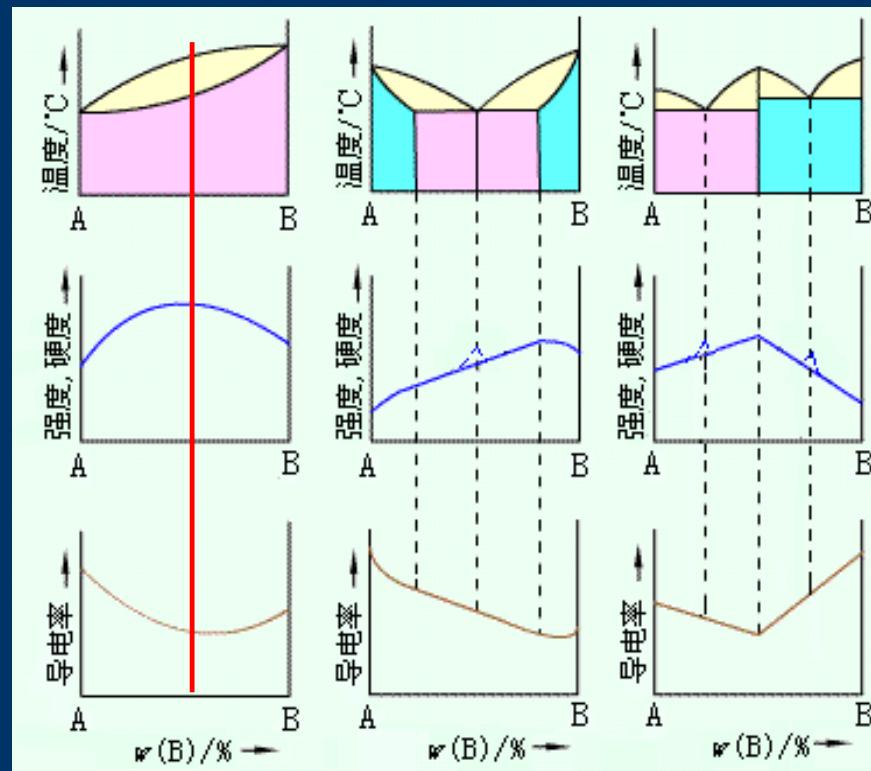
因此，具有平衡组织的合金的性能与相图之间存在着一定的对应关系。

## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

### 2.2.2 合金的性能和相图的关系

**固溶体合金：**固溶体的性能与溶质元素的溶入量有关。由于固溶强化主要受晶格畸变的影响，故约50%溶质含量时，畸变最大，强度、硬度最大，导电率最差。

#### 1、合金的使用性能和相图的关系



## 2.2 合金的结晶 (alloy crystallization)

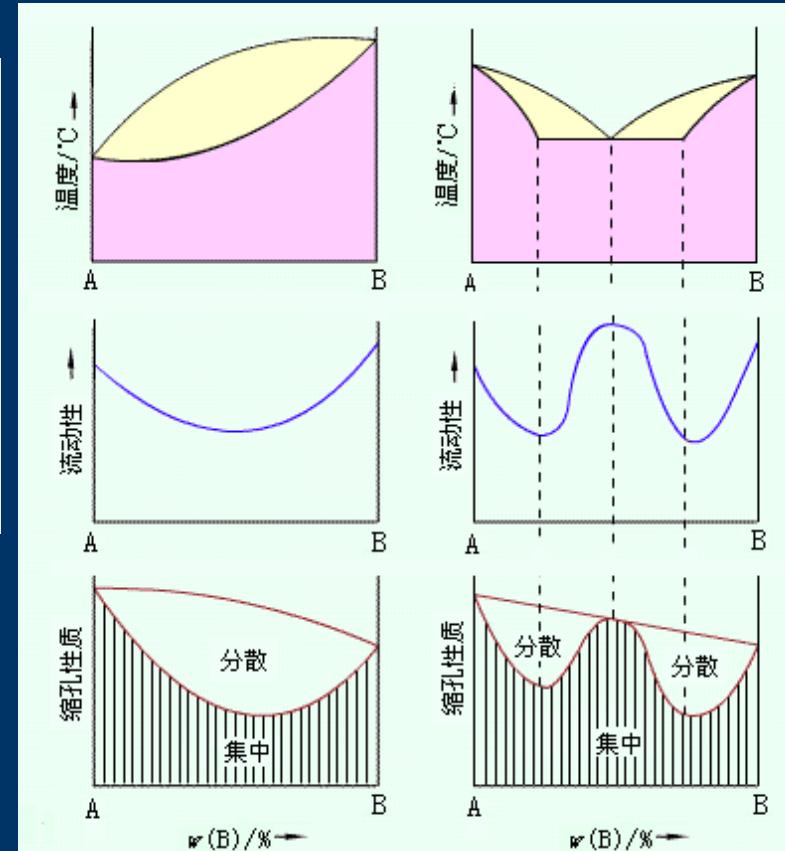
### 2.2.2 合金的性能和相图的关系

#### 2、合金的铸造性能

液、固相线温度间隔大时，形成枝晶偏析的倾向性大，阻碍未结晶液体的流动，增多分散缩孔。

铸造合金常选共晶或接近共晶的成分。

提示：纯金属和共晶成分的合金的流动性最好，缩孔集中，铸造性能好



合金的铸造性能与相图的关系示意图

● 课间小测试

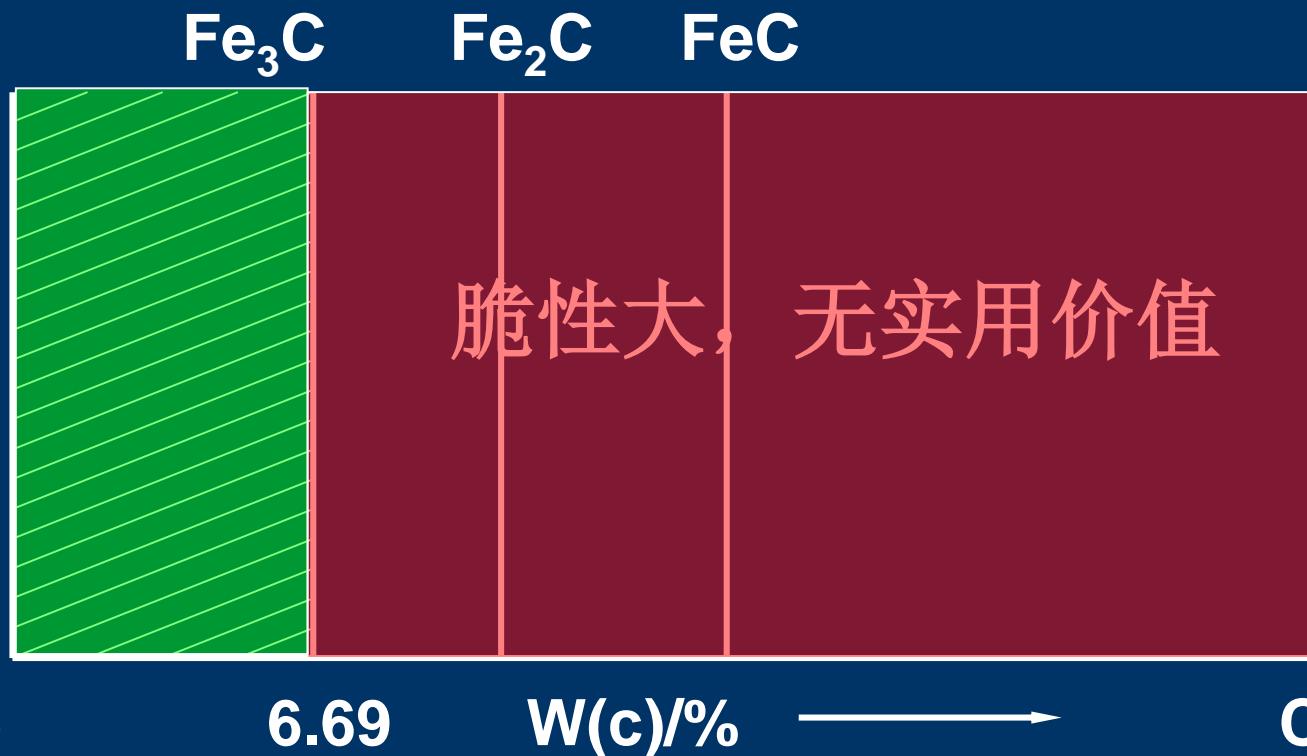
5. (*a*) 合金的流动性最好，缩孔集中，铸造性能好。
- a. 共晶成分； b. 亚共晶成分； c. 过共晶成分；

## 2.2 合金的结晶

### 2.2.3 铁碳合金(iron-carbon alloys)的结晶

#### 铁碳相图 ☆ 提示：重点内容

铁碳相图是研究钢和铸铁的基础，对于钢铁材料的应用以及热加工和热处理工艺的制订也具有重要的指导意义。铁和碳可以形成一系列化合物，如 $\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{C}$ 、 $\text{FeC}$ 等。有实用意义的是 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 部分，称为 **Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ 相图**。此时相图的组元为 $\text{Fe}$ 和 $\text{Fe}_3\text{C}$ 。



## 2.2 合金的结晶

### 2.2.3 铁碳合金的结晶

#### 1、铁碳相图

#### (1) 铁碳合金的组元

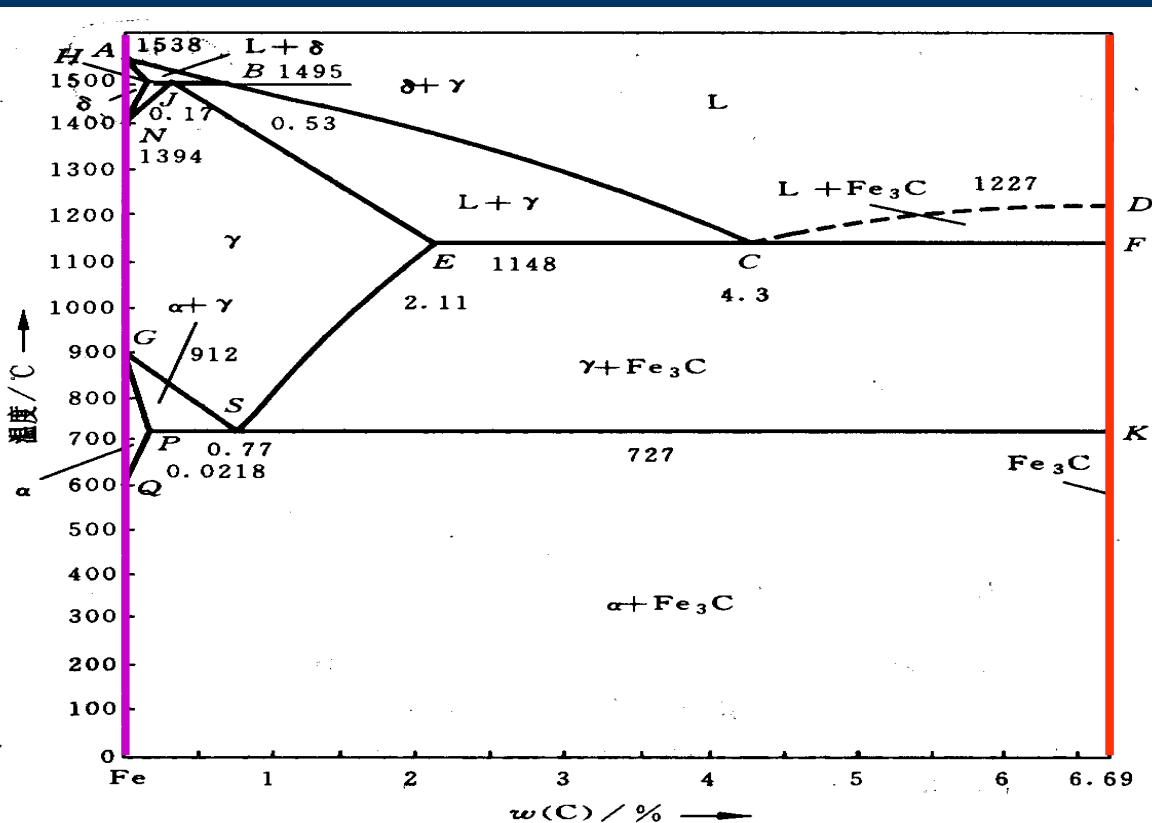


图 2-29 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

① Fe

② Fe<sub>3</sub>C

	Fe (F)	Fe <sub>3</sub> C
抗拉强度	180-230MPa	0
断后伸长率	30-50%	0
断面收缩率	70-80%	0
冲击韧度	1600-2000KJ/m <sup>2</sup>	0
硬度	50-80HB	800HB

## 2.2 合金的结晶

### 2.2.3 铁碳合金的结晶

#### 1、铁碳相图

#### (2) 铁碳合金中的相

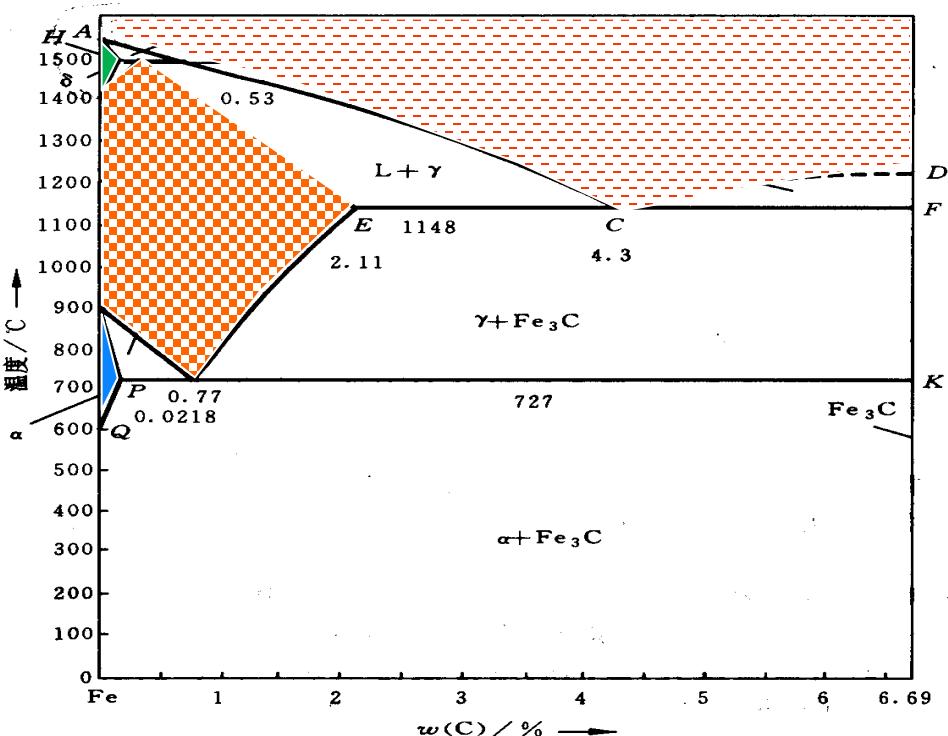


图 2-29 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

① 液相 L

②  $\delta$  相

$\delta$  相又称 **高温铁素体**, 是碳在  $\delta$ -Fe 中的 **间隙固溶体**, 呈体心立方晶格, 在 1394°C 以上存在。

③  $\alpha$  相(F)

$\alpha$  相也称 **铁素体**, 用 F 或  $\alpha$  表示, 是碳在  $\alpha$ -Fe 中的 **间隙固溶体**, 体心立方晶格, 碳的固溶度极小。

④  $\gamma$  相(A)

⑤  $Fe_3C$  相

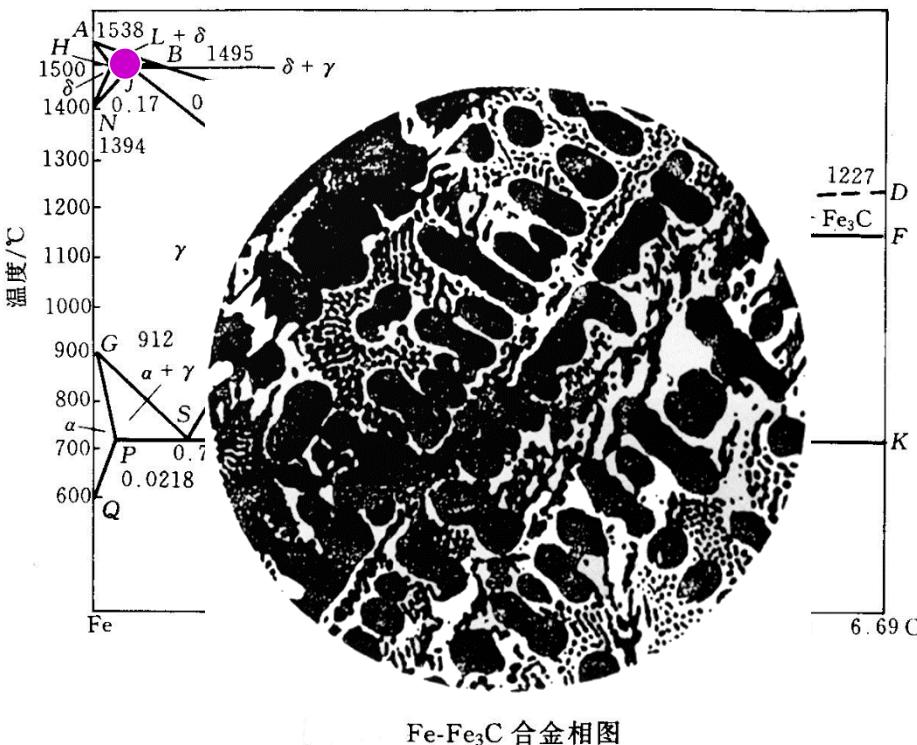
$Fe_3C$  相是 Fe 与 C 的一种具有 **复杂结构的间隙化合物**, 性能特点是硬而脆。称 **渗碳体**。渗碳体根据生成条件不同有条状、网状、片状、粒状等形态, 对铁碳合金的机械性能有很大影响。

## 2.2 合金的结晶

### 2.2.3 铁碳合金的结晶

#### 1、铁碳相图

##### (3) 相图中重要的点

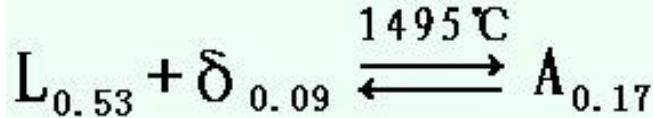


共晶反应产物是奥氏体与渗碳体的  
机械混和物, 称莱氏体 (Le) 。

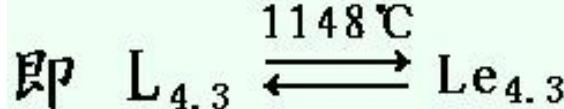
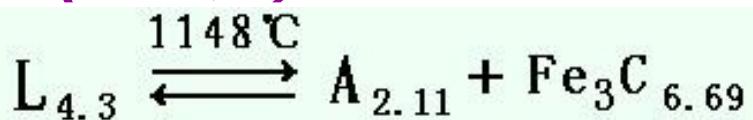
其中的渗碳体称共晶渗碳体。  
显微镜下莱氏体形态:

块状或粒状A(727°C时转变成珠光体)分  
布在渗碳体基体上。

##### • J点 (包晶点)



##### • C点 (共晶点)

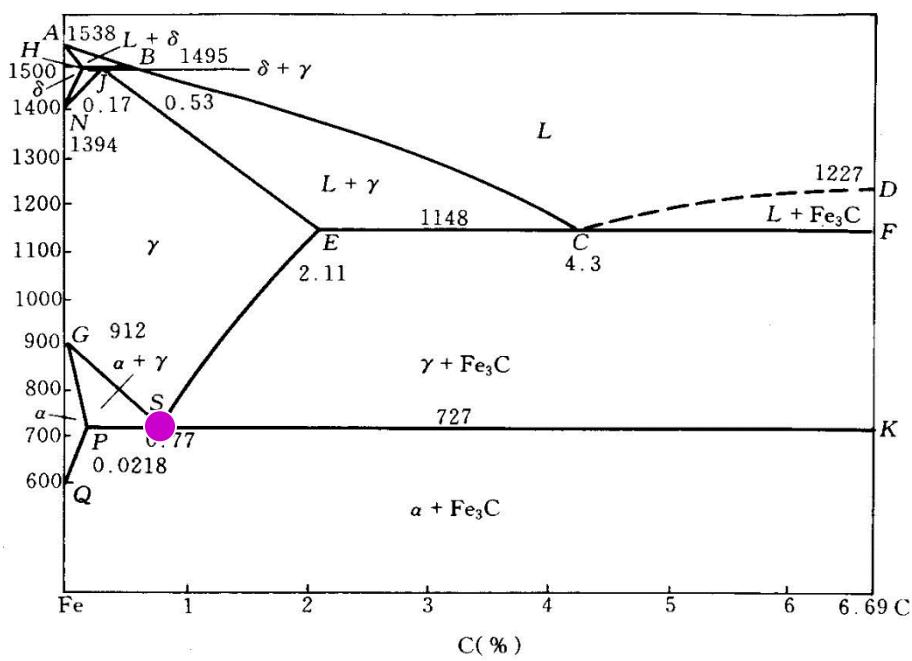


## 2.2 合金的结晶

### 2.2.3 铁碳合金的结晶

#### 1、铁碳相图

##### (3) 相图中重要的点

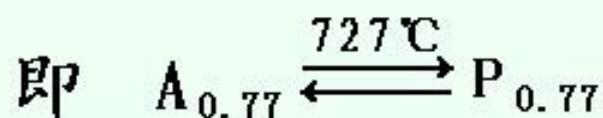
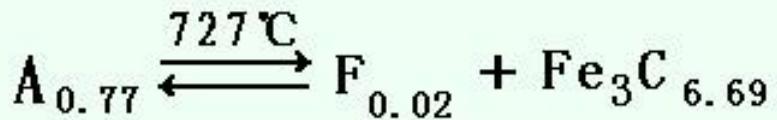


Fe-Fe<sub>3</sub>C 合金相图

共析反应的产物是铁素体与渗碳体的**共析混合物**, 称**珠光体**, 以**P**表示。  
珠光体中的渗碳体称**共析渗碳体**



##### •S点 (共析点)



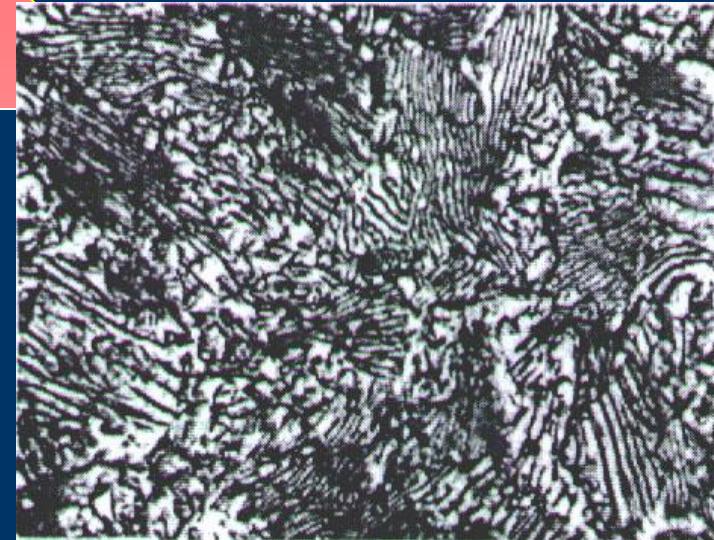
共析反应在恒温下进行, 反应过程中, A、F、Fe<sub>3</sub>C三相共存, 三相成分一定。

## 2.2 合金的结晶

### 2.2.3 铁碳合金的结晶

#### 1、铁碳相图

##### (3) 相图中重要的点



**珠光体 (P) 形态:** 显微镜下珠光体的形态呈层片状。相间分布渗碳体片与铁素体片。

**珠光体 (P) 性能:** 强度较高, 塑性、韧性和硬度介于渗碳体和铁素体之间。

#### 珠光体(P)机械性能

抗拉强度极限 $\sigma_b$	冲击韧性 $a_k$	延伸率 $\delta$	硬度
770 MPa	$3 \times 10^5 \text{ J/m}^2$ ~ $4 \times 10^5 \text{ J/m}^2$	20%~35%	180 HB

## 2.2 合金的结晶

### 2.2.3 铁碳合金的结晶

#### 1、铁碳相图

##### (4) 相图中重要的线

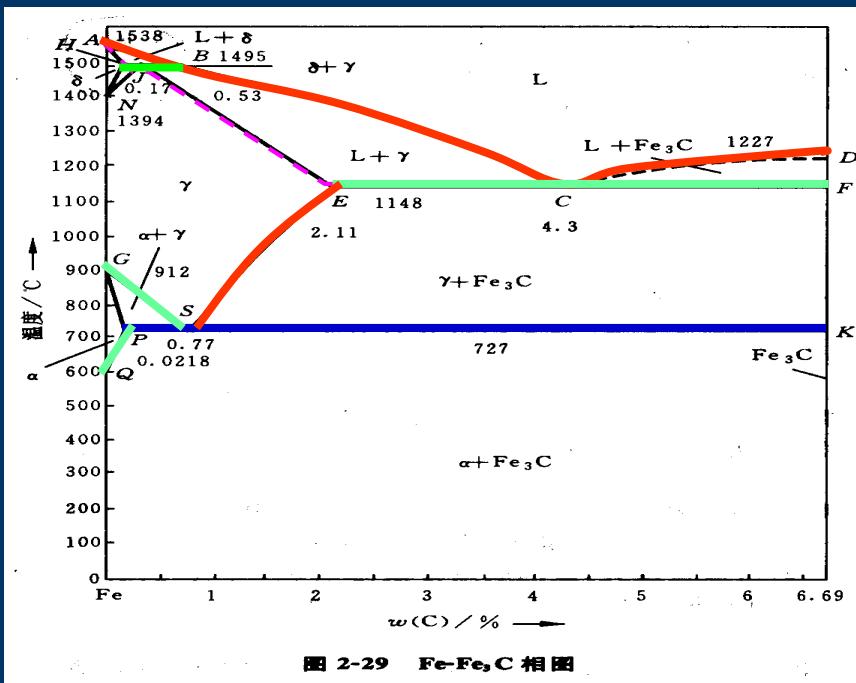
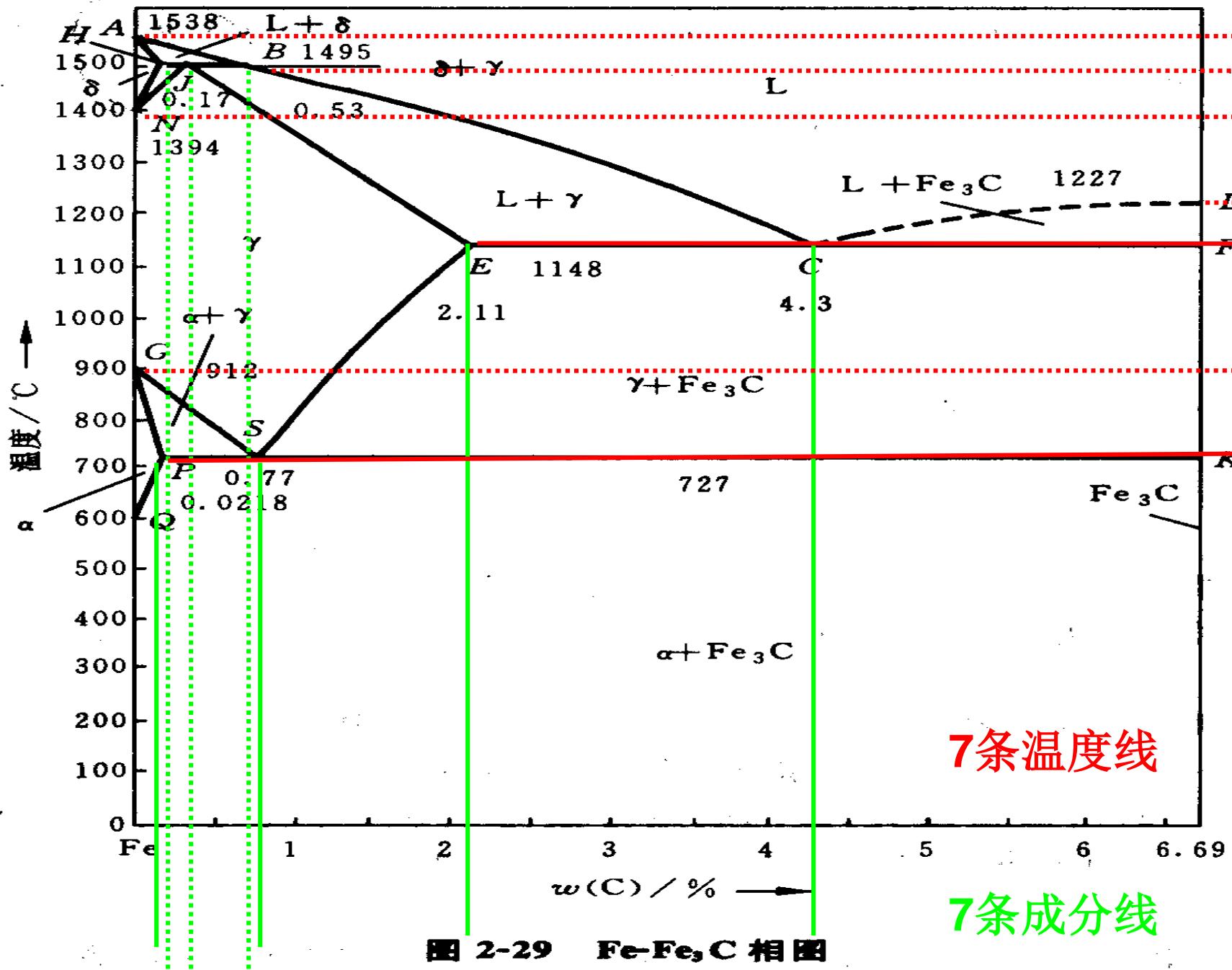


图 2-29 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

- ① ABCD为液相线
- ② AHJECF为固相线
- ③ HJB为包晶反应线
- ④ ECF为共晶反应线
- ⑤ PSK共析反应线, A<sub>1</sub>线
- ⑥ GS线, 通常称A<sub>3</sub>线  
**A中开始析出F临界温度线**
- ⑦ ES线, 称为A<sub>cm</sub>线  
从A中析出Fe<sub>3</sub>C, 叫二次渗碳体(Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>)。亦是A中开始析出Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>的临界温度线。
- ⑧ PQ线是碳在F中固溶线  
是F中开始析出Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub>的临界温度线。  
Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub>数量极少, 往往予以忽略。



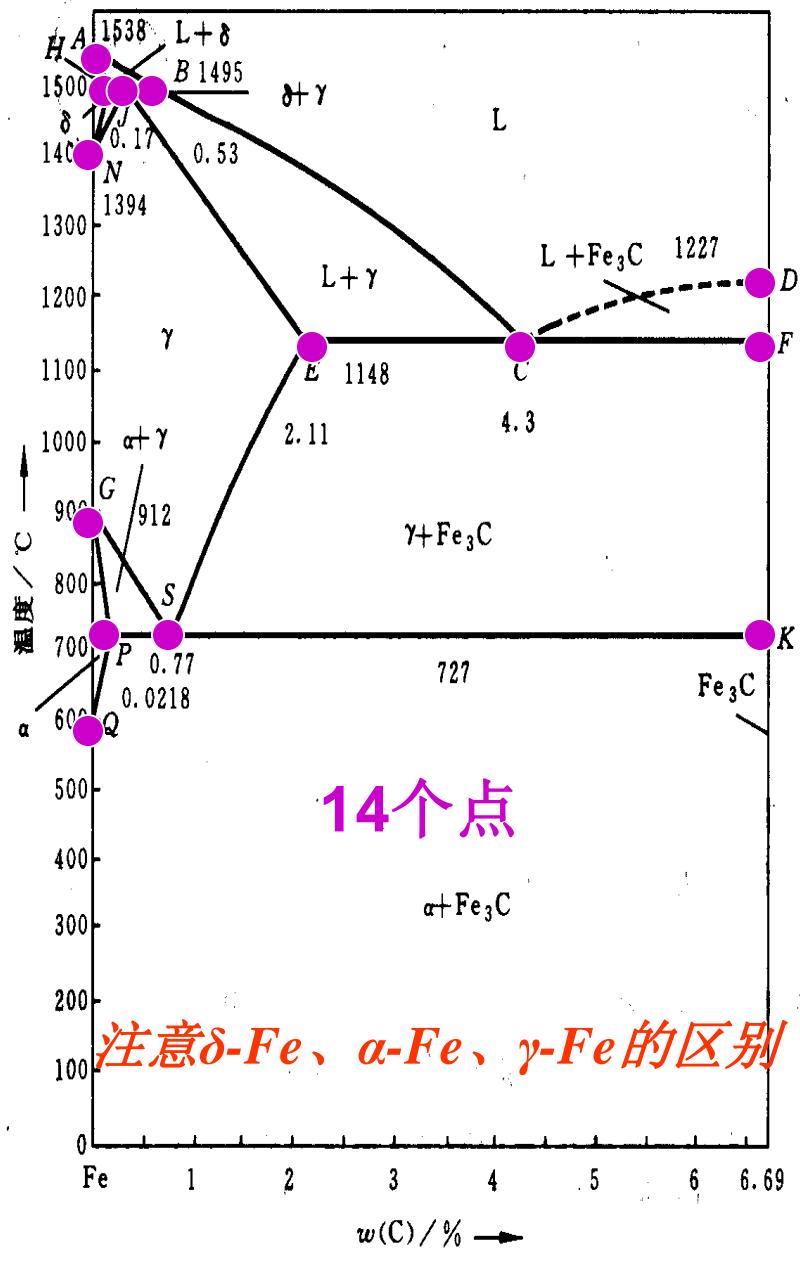


图 2-29 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

表 2-2 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中各点的温度、碳质量分数及含义

符 号	温 度 / °C	碳 质 量 分 数 / %	含 义
A	1538	0	纯铁的熔点
B	1495	0.53	包晶转变时液态合金的成分
C	1148	4.30	共晶点 $L_c \rightleftharpoons A_c + Fe_3C$
D	1227	6.69	$Fe_3C$ 的熔点
E	1148	2.11	碳在 $\gamma$ -Fe 中的最大溶解度
F	1148	6.69	$Fe_3C$ 的成分
G	912	0	$\alpha$ -Fe $\rightleftharpoons \gamma$ -Fe 同素异构转变点 ( $A_3$ )
H	1495	0.09	碳在 $\delta$ -Fe 中的最大溶解度
J	1495	0.17	包晶点 $L_B + \delta_H \rightleftharpoons A_J$
K	727	6.69	$Fe_3C$ 的成分
N	1394	0	$\delta$ -Fe $\rightleftharpoons \gamma$ -Fe 同素异构转变点 ( $A_4$ )
P	727	0.0218	碳在 $\alpha$ -Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点 ( $A_1$ ) $A_1 \rightleftharpoons F_P + Fe_3C$
Q	600	0.0057	600°C(或室温)时碳在 $\alpha$ -Fe 中的溶解度
	(室温)	(0.0008)	



## 课堂小测试

6、奥氏体是 (A) :

- a. 碳在  $\gamma$ -Fe 中的间隙固溶体
- b. 碳在  $\alpha$ -Fe 中的间隙固溶体
- c. 碳在  $\alpha$ -Fe 中的有限固溶体

7. 在 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中，ES 线也称为 (D)。

- A. 共晶线
- B. 共析线
- C. A3 线
- D. Acm 线

## 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	$4.3\% < w(C) < 6.69\%$

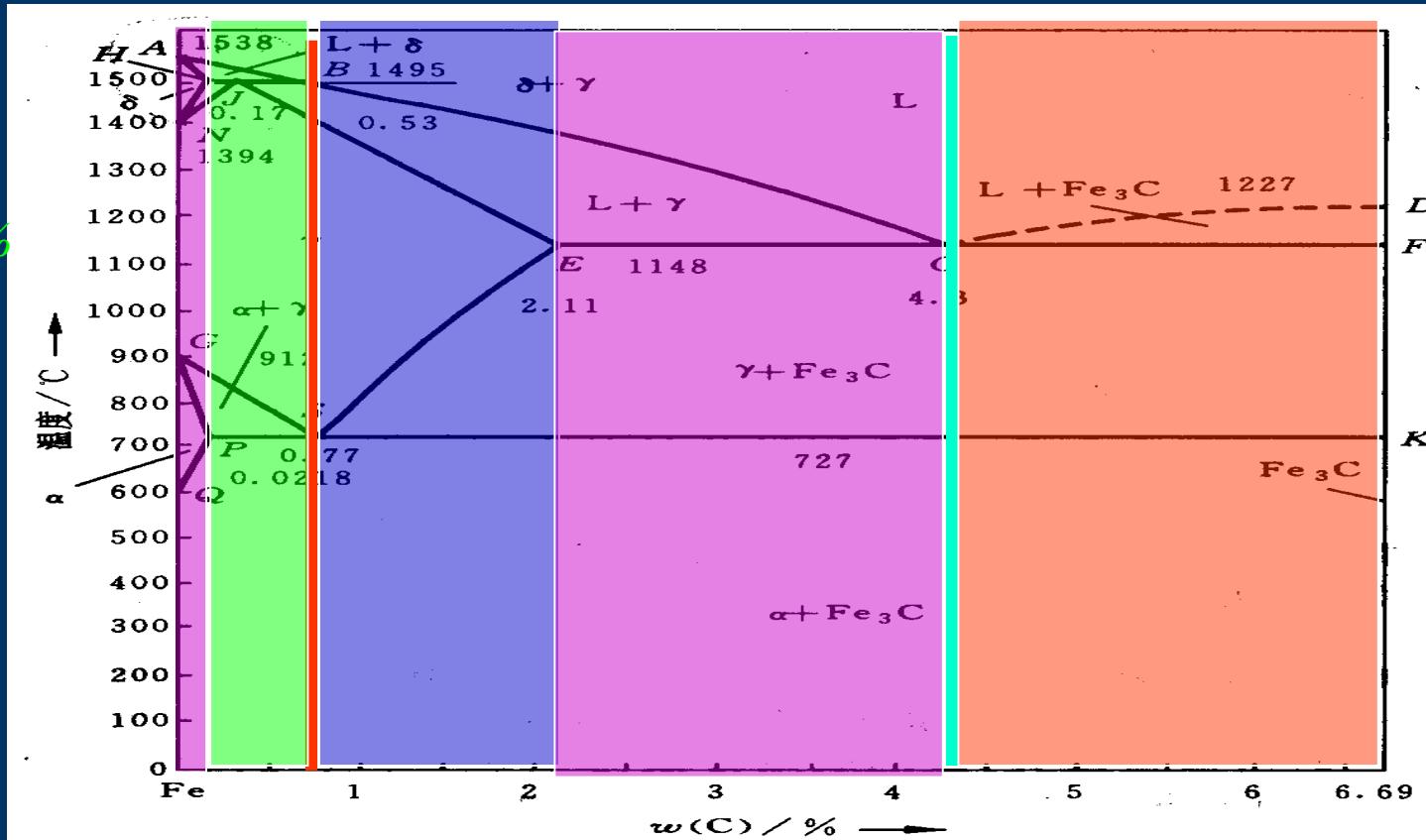
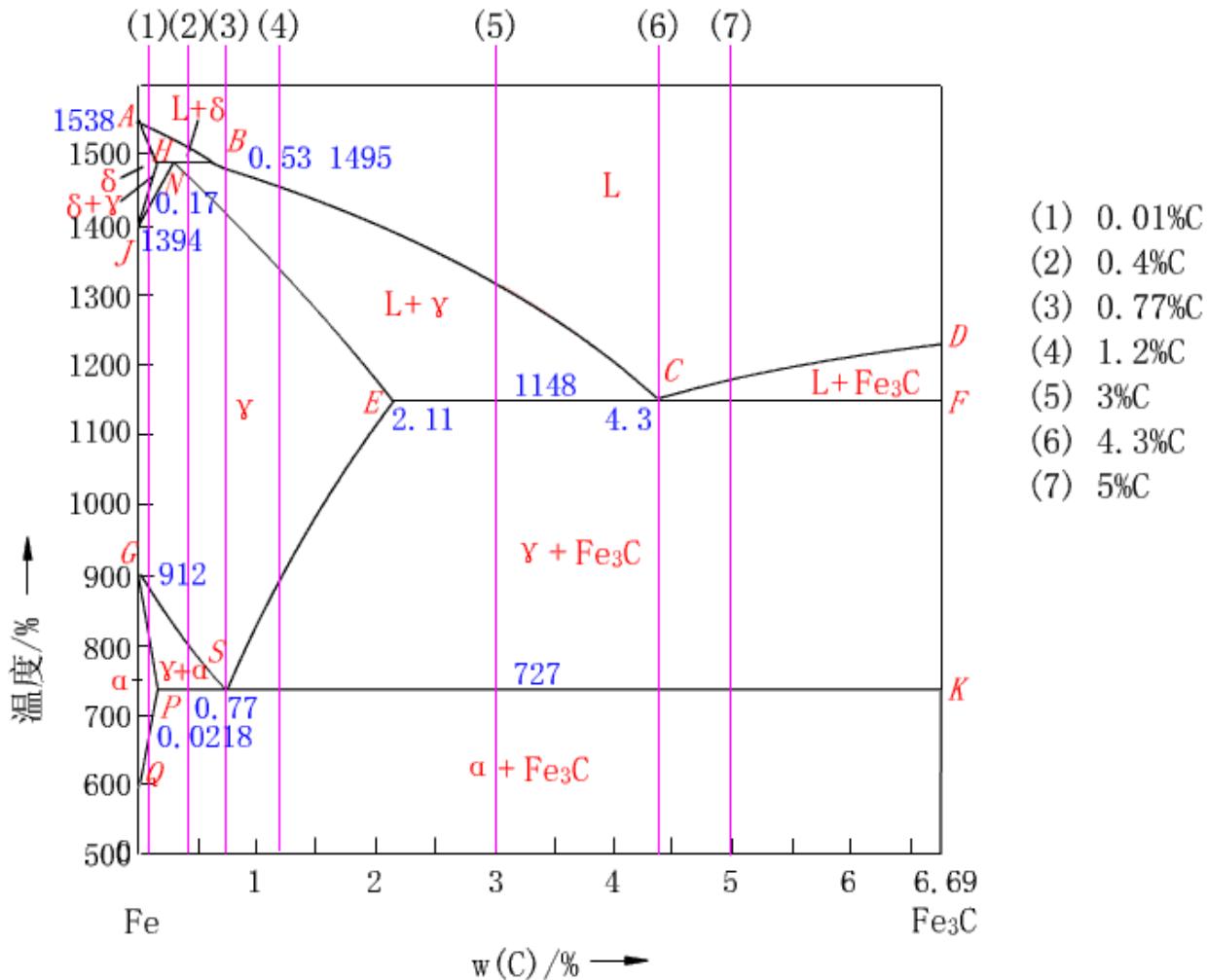


图 2-29 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

## 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-Fe<sub>3</sub>C相图中的位置



## 2.2 合金的结晶

### 2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

(1) 工业纯铁(industrial pure iron): W(C)<0.0218%

1点以上 液相L

1~2点 L+δ

2~3点 δ

3~4点 δ+A (同素异构转变)

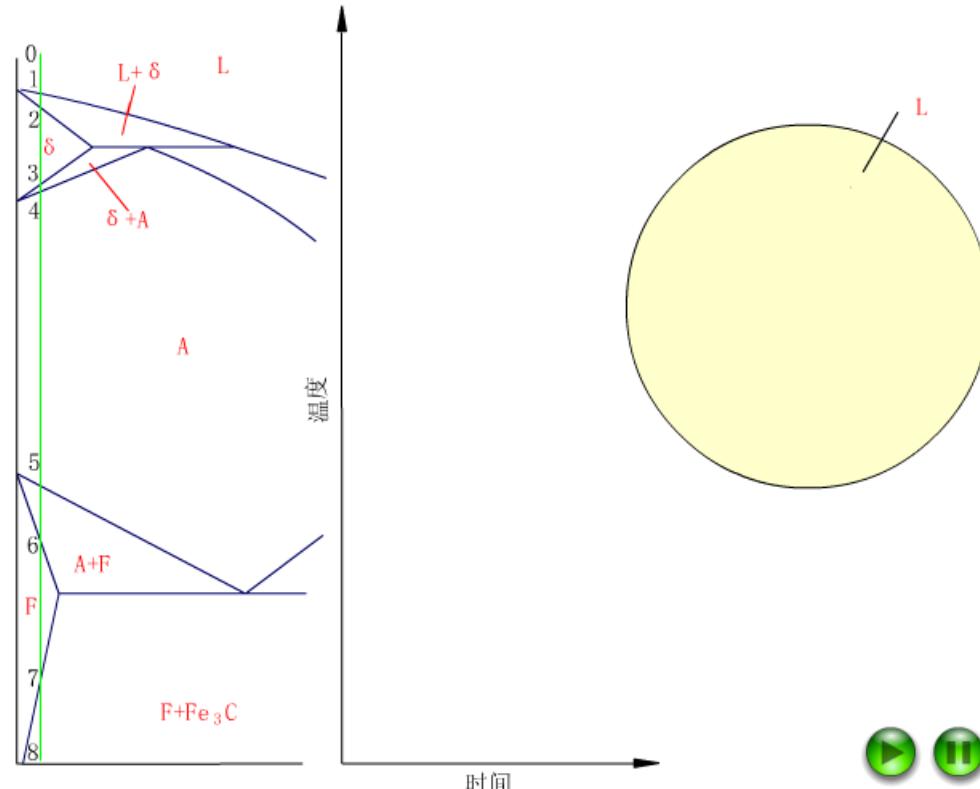
4~5点 A

5~6点 A+F (同素异构转变)

6~7点 F

7~8点 F晶界析出

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



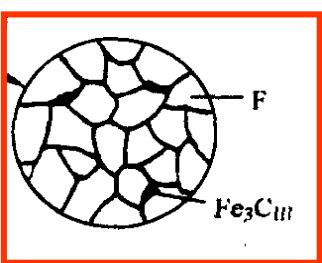
室温平衡组织为 F+ Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub>

## 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

(1) 工业纯铁(industrial pure iron): W(C)<0.0218%



铁素体  
Ferrite

渗碳体  
Cementite

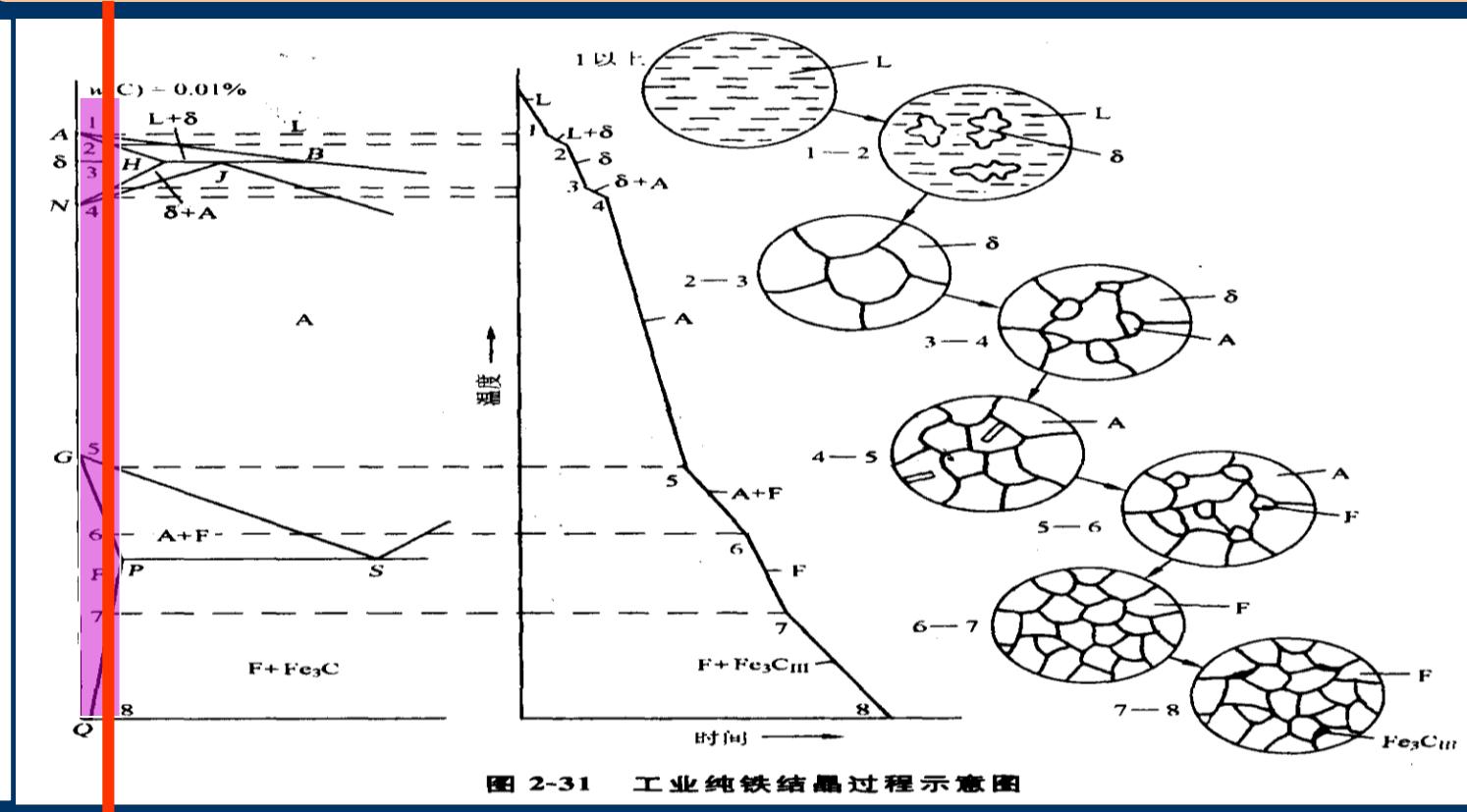


图 2-31 工业纯铁结晶过程示意图

## 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

(2) 共析钢(eutectoid steel): W(C)=0.77%



珠光体  
Pearlite

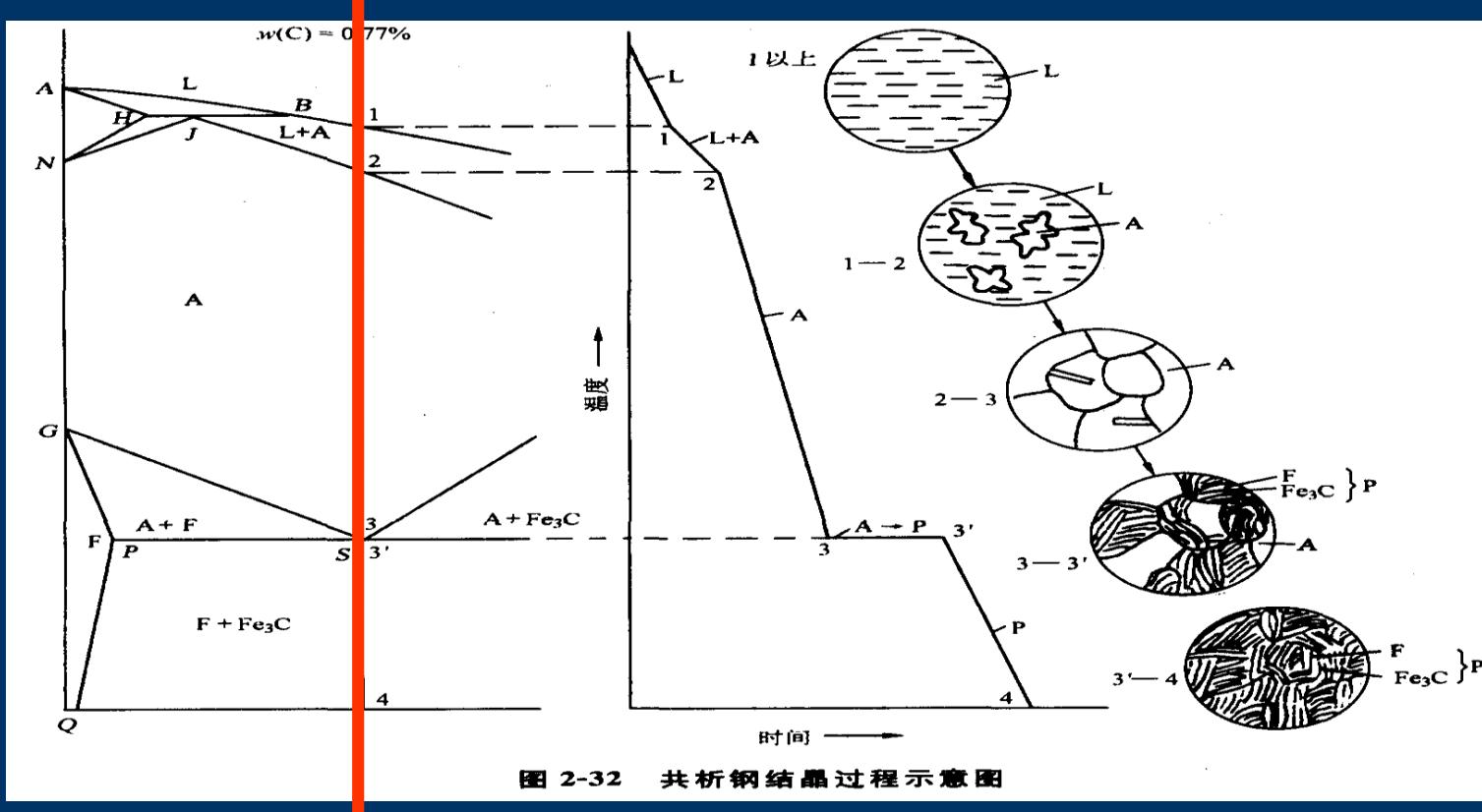


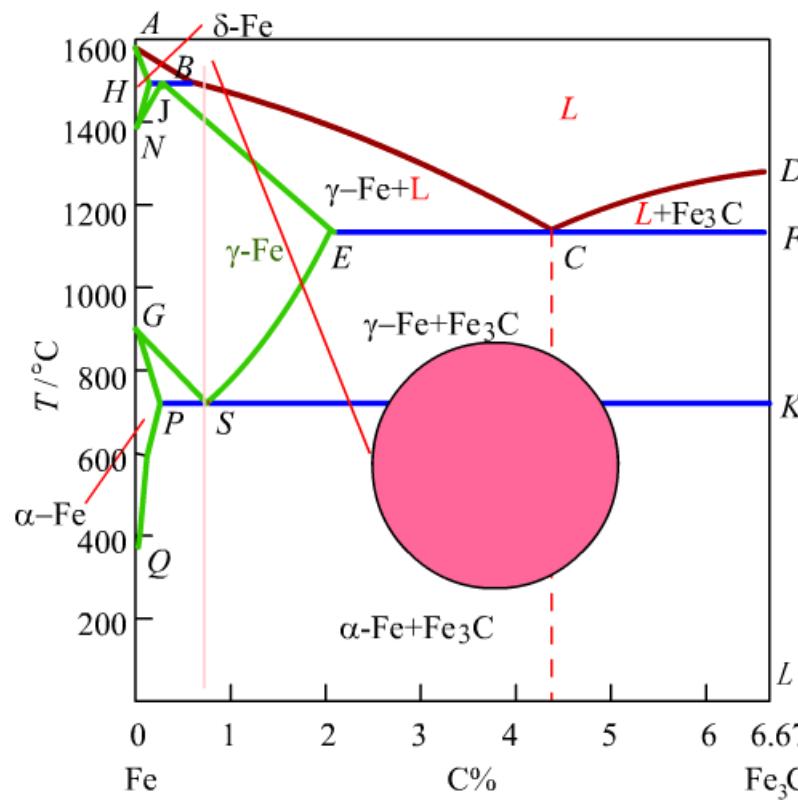
图 2-32 共析钢结晶过程示意图

## 2.2 合金的结晶

### 2.2.3 铁碳合金的结晶

#### 2、合金的平衡 (equilibrium) 结晶过程

(2) 共析钢(eutectoid steel): W(C)=0.77%



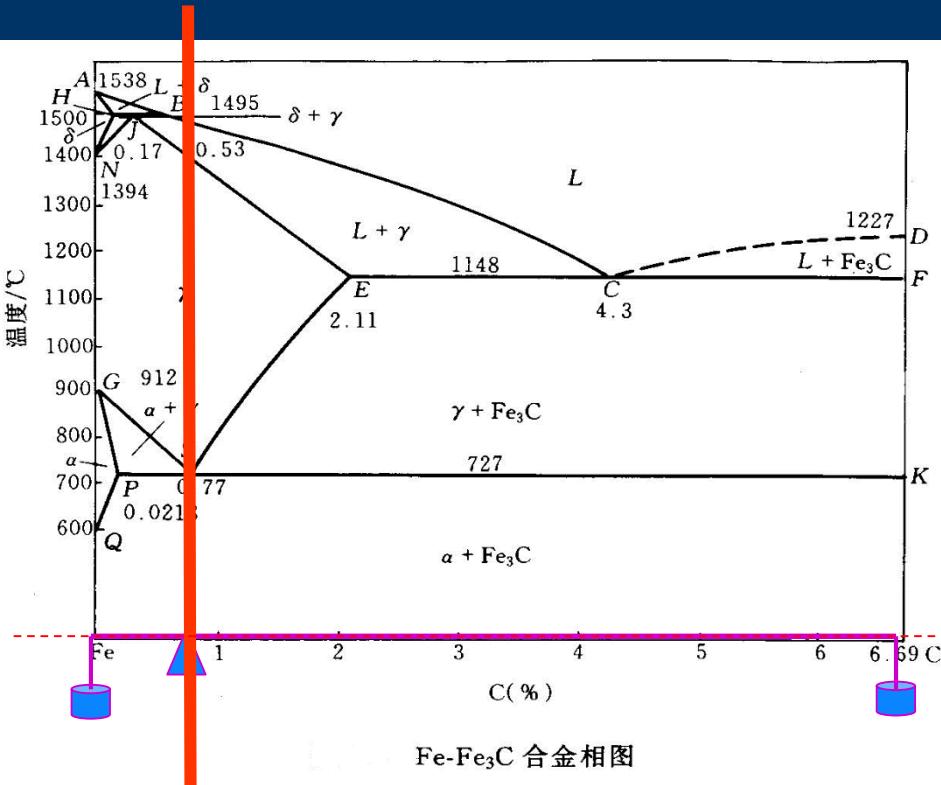
## 2.2 合金的结晶

### 2.2.3 铁碳合金的结晶

(2) 共析钢(eutectoid steel): W(C)=0.77%

室温下的组成相是? 组织是? 组织组成物是? 含量怎么求?

室温组织的组成相含量: F, Fe<sub>3</sub>C



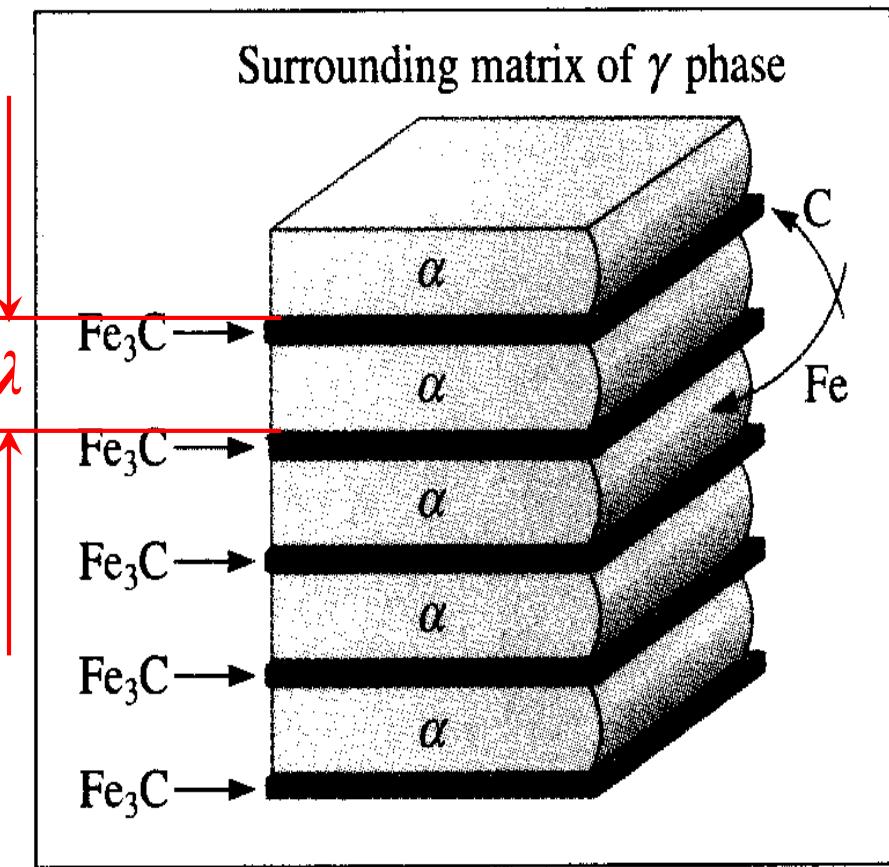
$$w(F) = \frac{6.69 - 0.77}{6.69} \times 100\% = 88\%$$

$$w(Fe_3C) = 1 - 88\% = 12\%$$

组织组成物含量: P (F, Fe<sub>3</sub>C)

	Fe (F)	Fe <sub>3</sub> C	P
抗拉强度	180-230MPa	0	770MPa
断后伸长率	30-50%	0	20-35%
断面收缩率	70-80%	0	/
冲击韧度	1600-200KJ/m <sup>2</sup>	0	300-400KJ/m <sup>2</sup>
硬度	50-80HB	800HB	180HB

## 2.2 合金的结晶



(a)

Figure 12-12 Growth and structure of pearlite  
(b) photomicrograph of the pearlite lamellae ( $\times$   
ASM International, Materials Park, OH 44073.

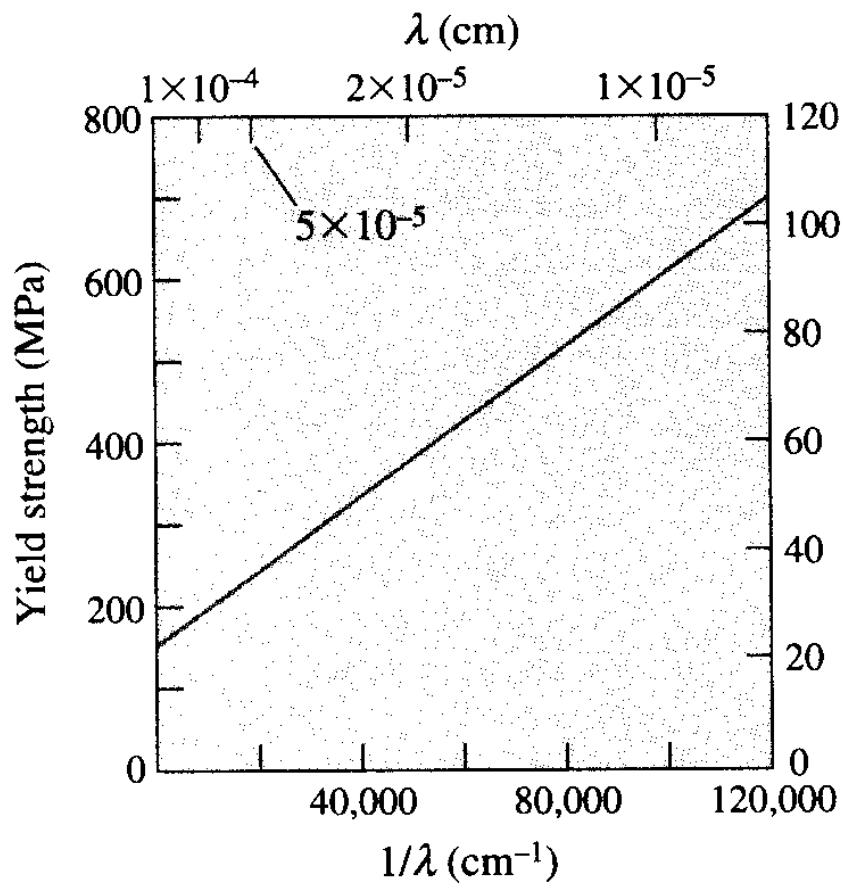


Figure 12-15  
The effect of interlamellar spacing ( $\lambda$ )  
on the yield strength of pearlite.

## ● 课后作业

### 第三次作业 合金的结晶

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10日

# ● 第二次作业解答

图 2-7 成核速率、长大速度

## (一) 填空题

- 结晶过程是依靠两个密切联系的基本过程来实现的，这两个过程是晶核的生成和晶体的长大。
- 在金属学中，通常把金属从液态过渡为固体晶态的转变称为一次结晶；而把金属从一种固态过渡为另一种固体晶态的转变称为二次结晶（重结晶）。
- 当对金属液体进行变质处理时，变质剂的作用是增加晶核的数量或抑制晶核的长大。
- 能起非自发生核作用的杂质，必须符合“结构相似、尺寸相当”的原则。
- 过冷度是指理论结晶温度与开始结晶温度之差，其表示符号为 $\Delta T$ 。
- 过冷是结晶的必要条件。
- 细化晶粒可以通过增大晶核的生成速率和降低晶体的长大速度两种途径实现。
- 典型铸锭结构的三个晶区分别为：细等轴晶区、柱状晶区和粗等轴晶区。

## (二) 是非题

晶粒越细，强度、塑性、韧性越好

- 凡是由液体凝固成固体的过程都是结晶过程。 (×)
- 室温下，金属晶粒越细，则强度越高、塑性越低。 (×)
- 金属由液态转变成固态的结晶过程，就是由短程有序状态向长程有序状态转变的过程。 (✓)
- 在实际金属和合金中，自发生核常常起着优先和主导的作用。 (×)
- 纯金属结晶时，生核率随过冷度的增加而不断增加。 (×)
- 室温下，金属晶粒越细，则强度越高、塑性越低。 (✗)
- 金属由液态转变成固态的结晶过程，就是由短程有序状态向长程有序状态转变的过程。 (✗)
- 纯金属结晶时，生核率随过冷度的增加而不断增加。 (✓)

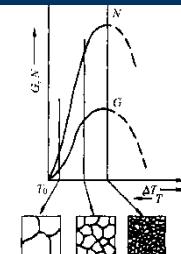


图 2-7 成核速率、长大速度与过冷度的关系

## ● 第二次作业解答

6. 当晶核长大时，随过冷度增大，晶核的长大速度增大。但当过冷度很大时，晶核长大的速度很快减小。 ( ✓ )<sup>+</sup>
7. 当过冷度较大时，纯金属晶体主要以平面状方式长大。 ( ✗ )<sup>+</sup>
8. 当形成树枝状晶体时，枝晶的各次晶轴将具有不同的位向，故结晶后形成的枝晶是一个多晶体。 ( ✗ )<sup>+</sup>
9. 在工程上评定晶粒度的方法是在放大 100 倍的条件下，与标准晶粒度图作化较，级数越高、晶粒越细。 ( ✓ )<sup>+</sup>
10. 过冷度的大小取决于冷却速度和金属的本性。 ( ✓ )<sup>+</sup>

### (三) 选择正确答案<sup>+</sup>

1. 金属结晶时，冷却速度越快，其实际结晶温度将： a. 越高； b. 越低； c. 越接近理论结晶温度。 <sup>+</sup>
2. 为细化晶粒，可采用： a. 快速浇注； b. 加变质剂； c. 以砂型代金属型。 <sup>+</sup>
3. 实际金属结晶时，通过控制生核速率 N 和长大速度 G 的比值来控制晶粒大小，在下列情况下获得粗大晶粒： a.  $N/G$  很大时； b.  $N/G$  很小时； c.  $N/G$  居中时。 <sup>+</sup>

## ● 第二次作业解答

### (四) 综合分析题

1. 如果其它条件相同，试比较在下列铸造条件下铸件晶粒的大小：

1) 金属模浇注与砂模浇注； 前小后大。

2) 变质处理与不变质处理； 前小后大。

3) 铸成薄件与铸成厚件； 前小后大。

4) 浇注时采用震动与不采用震动。 前小后大。

←

2. 为什么钢锭希望尽量减少柱状晶区？

钢锭形成柱状晶区后，柱状晶的接触面常常含有低熔点的金属或非金属杂质。在热轧或热锻过程中，钢锭在这些杂质存在处容易开裂。同时，柱状晶的材料具有各向异性的特点，这对于需要各向同性的钢锭是不利的。因此，钢锭希望尽量减少柱状晶区。

2. 为什么钢锭希望尽量减少柱状晶区？

柱状是由外往里顺序结晶的，品质较致密。但柱状晶的接触面由于常有非金属夹杂或低熔点杂质而为弱面，在热轧、锻造时容易开裂。所以对于熔点高和杂质多的金属不希望生成柱状晶。

## (二) 是非题

铸造工艺过程

# ● 第二次作业解

1、金属的工艺性能是指金属在各种加工中所表现出来的性能。( X )

## 增加作业 1 金属材料的性能

### (一) 填空题

1、金属的性能可分类为两大类：一类叫 使用性能，反映材料在使用过程中表现出来的特性，另一类叫 工艺性能，反映材料在加工过程中表现出来的特性。

2、金属抵抗永久变形和断裂的能力称为强度，常用的强度判断依据是屈服点（屈服强度），抗拉强度等。

3、断裂前金属发生不可逆永久变形的能力成为塑性，常用的塑性判断依据是断后延伸率和断面收缩率。

4、常用的硬度表示方法有 布氏硬度、洛氏硬度 和维氏硬度。

### (二) 是非题

1、金属的工艺性能是指金属在各种加工中所表现出来的性能。( ✓ )

2、做布氏硬度试验时，当试验条件相同时，压痕直径越小，则材料的硬度越低。( X )

3、洛氏硬度值是根据压头压入被测材料的深度来确定的。( ✓ )

4、韧性是指金属在断裂前吸收变形能量的能力。( ✓ )

5、金属的使用性能包括力学性能、物理性能和铸造性能。( X )

6、材料抵抗局部变形、特别是塑性变形、压痕或划痕的能力，称为硬度。( ✓ )

7、在工程上，在一定的应力循环次数下不发生断裂的最大应力称为疲劳强度。( ✓ )

8、用淬火钢球作压头的硬度试验都是布氏硬度试验。( X )

9、经外力作用，金属发生塑性变形；当外力去除后，变形会自动消失。( X )

10、金属的工艺性能好，表明加工容易，加工质量容易保证，加工成本也较低。( ✓ )

## ● 第二次作业解答

### (三) 选择正确答案

- c 1、下列不是金属力学性能的是： a.强度 b.硬度 c.压力加工性能
- b 2、根据拉伸实验过程中拉伸实验力和伸长量关系，画出的力-伸长曲线（拉伸图）可以确定出金属的： a.强度和硬度 b.强度和塑性 c.强度和韧性
- b 3、试样拉断前所承受的最大标称拉应力为： a.屈服强度 b.抗拉强度 c.疲劳强度
- a 4、拉伸实验中，试样所受的力为： a. 静态力 b.冲击力 c.交变载荷
- c 5、属于材料物理性能的是： a.强度 b. 耐腐蚀性 c.热膨胀性
- a 6、不宜用于成品与表面薄层硬度测试的方法是： a.布氏硬度 b.洛氏硬度 c.维氏硬度
- b 7、用金刚石圆锥体作为压头的硬度测试方法为： a.布氏硬度 b.洛氏硬度 c.维氏硬度
- b 8、金属的韧性通常随温度降低、应力集中程度加剧而： a.提高 b.降低 c.不变
- c 9、金属疲劳的判断依据是： a.塑性 b.抗拉强度 c.疲劳强度

### (四) 简答题

1、什么叫金属的力学性能？常用的金属力学性能有哪些？

答：材料在各种载荷作用下表现出来的抵抗力。常用的力学性能有强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等。

2、什么是疲劳断裂？如何提高零件的疲劳强度？

答：在交变载荷作用下，虽然零件所受应力远低于材料的屈服点，但在长期使用中往往会产生突然发生断裂，这种破坏过程成为疲劳断裂。措施：避免应力集中，减少内部组织缺陷，降低表面粗糙度值，表面强化（提高表面压应力）。