

# 第三章 二元合金相图及应用



安徽机电职业技术学院 张新建



## 本章要求

- ❖ 1. **掌握**匀晶相图、共晶相图、共析相图、含稳定化合物的相图及其结晶的特征。
- ❖ 2. 了解合金的性能与相图的关系。
- ❖ **熟练掌握**铁碳合金的组元和相，**Fe—Fe<sub>3</sub>C**相图分析，典型铁碳合金的平衡结晶过程及其组织，铁碳合金的成分、组织、性能间的关系，
- ❖ 了解**Fe—Fe<sub>3</sub>C**相图应用。



## 本章教学重点、难点及关键知识点

- ❖ 教学重点：
  - ❖ 1. 合金相图类型及其结晶的特征。
  - ❖ 2. Fe-Fe<sub>3</sub>C相图各点和线的含义，典型铁碳合金的平衡结晶过程及其组织，
  - ❖ 铁碳合金的成分、组织、性能间的关系。
- ❖ 教学难点：
  - ❖ 1. 合金相图类型及其结晶的特征。
  - ❖ 2. 相图对合金性能的影响
  - ❖ 3. Fe-Fe<sub>3</sub>C相图分析，典型铁碳合金的平衡结晶过程及其组织。



## 第三章 二元合金相图的建立

### 一、基本概念

1、组元：组成合金最基本的，能够独立存在的物质。组元一般是元素，也可以是稳定的化合物，如 $Fe_3C$ 。

2、合金系 由两个或两个以上组元按不同比例配制而成的一系列不同成分的合金。

如： $Cu-Ni$ ， $Fe-Fe_3C$ ， $Cu-Zn$ 等。



3、相图：合金系的**温度-成分图**，表示合金系中各个合金的结晶过程的平衡图（或状态图）。

相图中的线条（相线）表示相转变温度和平衡相的成分。

**被相线所划分的区域称为相区。**

4、相变：一种相转变为其它相的过程。

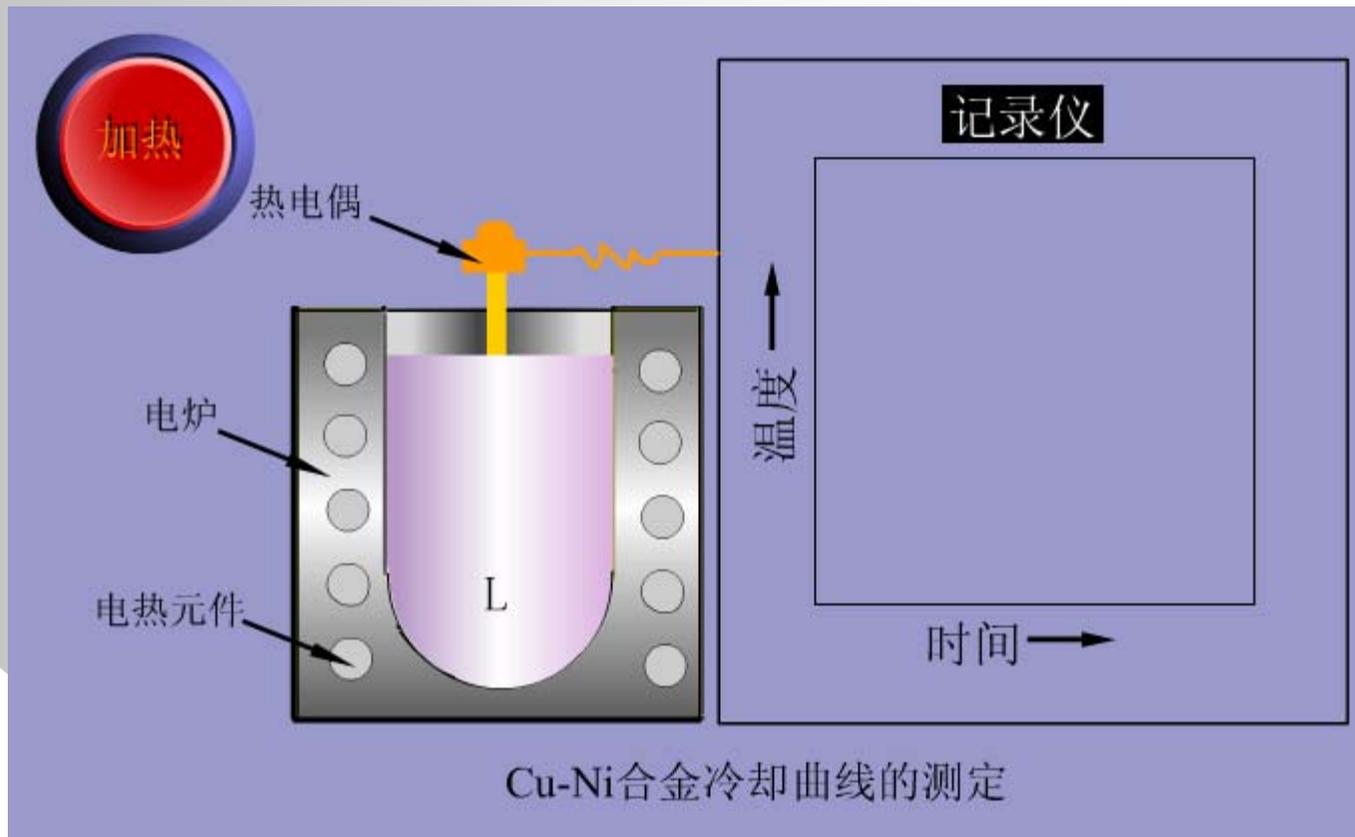
5、相平衡：系统中同时共存的各相在长时间内不互相转化——**动态平衡**。





## 二、二元合金相图的建立方法

几乎所有的相图都是通过实验得到的，最常用的是  
**热分析法。**





## 二、二元合金相图的建立方法

(1) 配制系列成分的铜镍合金。

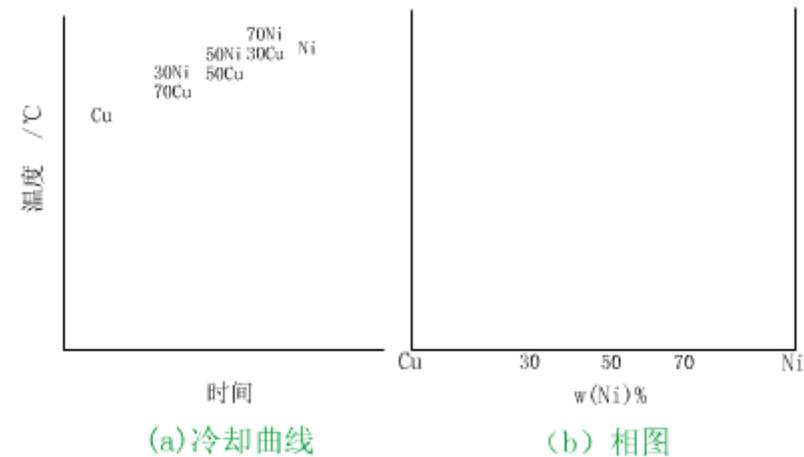
例如：合金 I：100%Cu；合金 II：70%Cu+30%Ni；合金 III：50%Cu+50% Ni；合金 IV：30%Cu+70% Ni；合金 V：100% Ni。

(2) 合金熔化后缓慢冷却，测出每种合金的冷却曲线，找出各冷却曲线上的**临界点**（合金从一种相态转变为另一种相态的起始温度）的温度。

(3) 画出温度—成分坐标系，在各合金成分垂线上标出临界点温度。

(4) 将具有相同意义的点连接成线，标明各区域内所存在的相，即得到 Cu-Ni 合金相图。

用热分析建立Cu-Ni相图



**注意：利用热分析法测定相图时，冷却速度应非常缓慢（平衡结晶）**



## 第二节 二元匀晶相图

当两组元在液相和固相均无限互溶时，构成的合金系相图为二元匀晶相图。属于此类的合金系有：Cu-Ni, Cu-Au, Au-Ag, Fe-Ni, W-Mo, Bi-Sb 等。



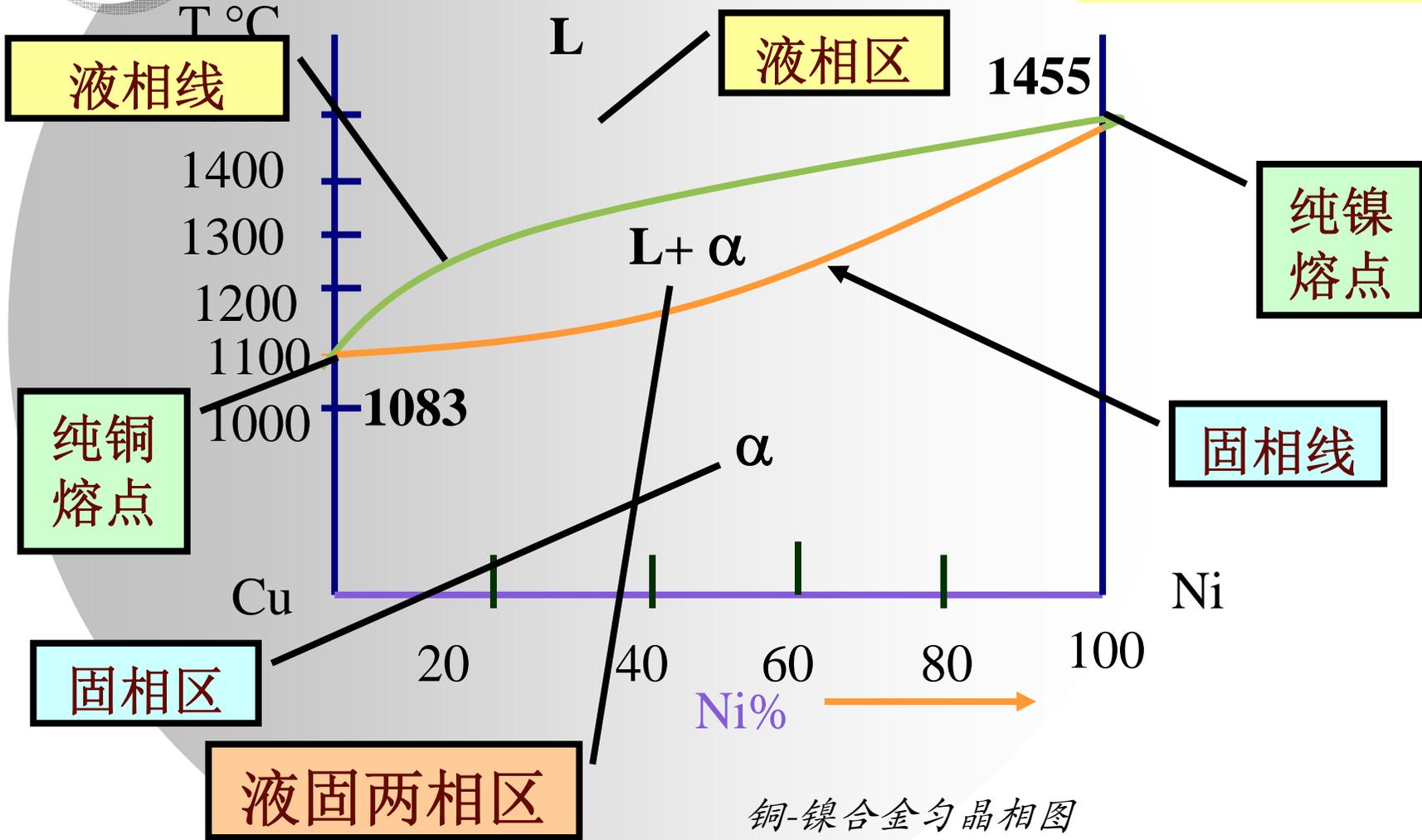
# 铜镍合金相图相区分析

相图分析(点、线、区)

两点：纯组元的熔点

两线：L, S相线

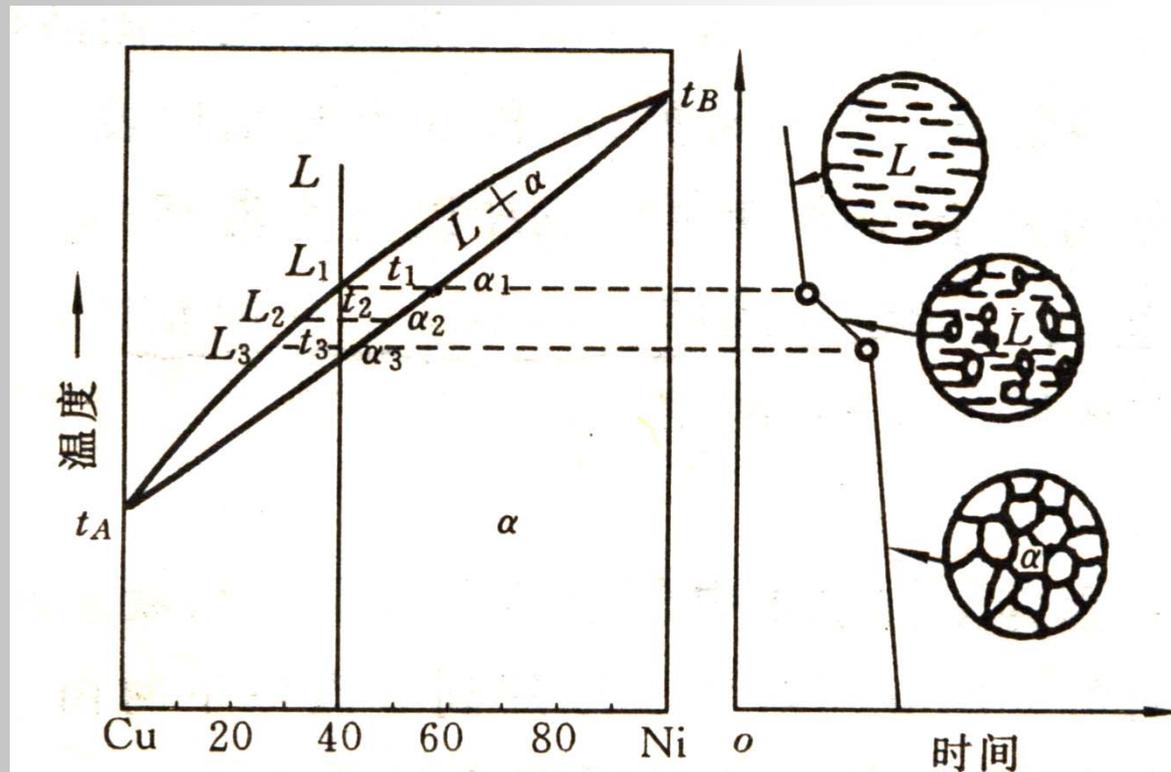
三区：L,  $\alpha$ , L+ $\alpha$ 。





## 二、合金的结晶过程

### 形核和晶粒的长大



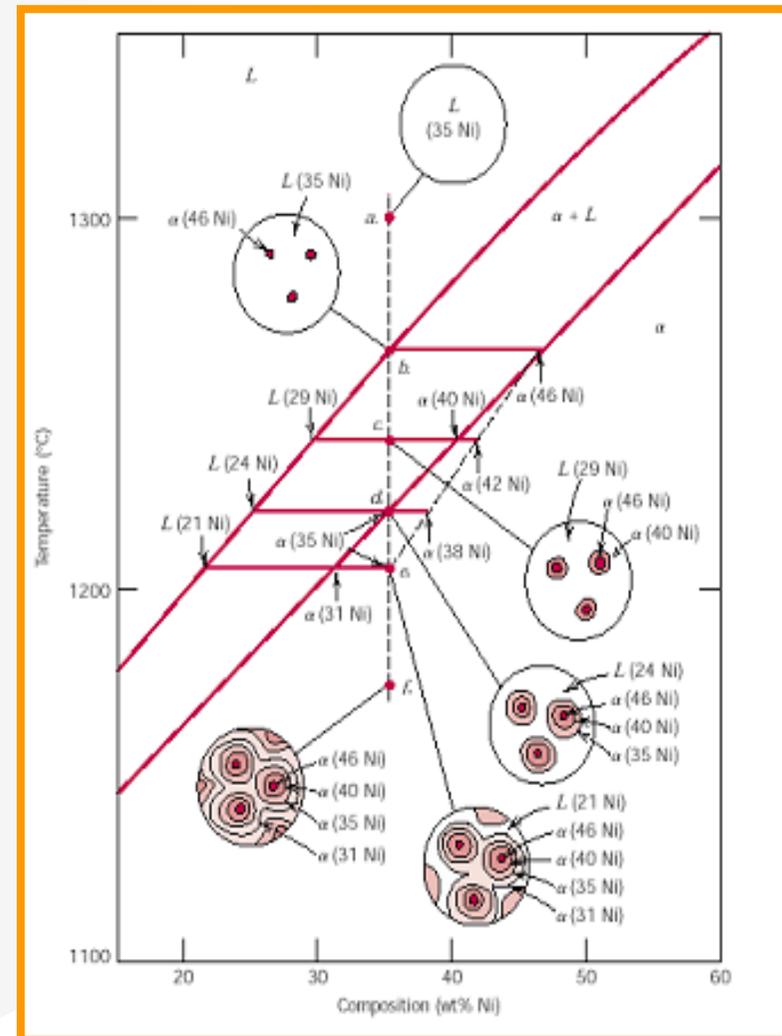
固溶体合金在平衡结晶过程中，固相成分沿固相线变化，液相成分沿液相线变化



## 五、枝晶偏析

合金相图中，合金的凝固过程是在无限缓慢的冷却条件下进行的，但实际上合金不可能无限缓慢冷却，一般冷却速度较快，由于原子来不及充分扩散，会出现先结晶出来的合金含Ni量高的现象，对于一个晶粒，心部含Ni量高，表层含Ni量低。

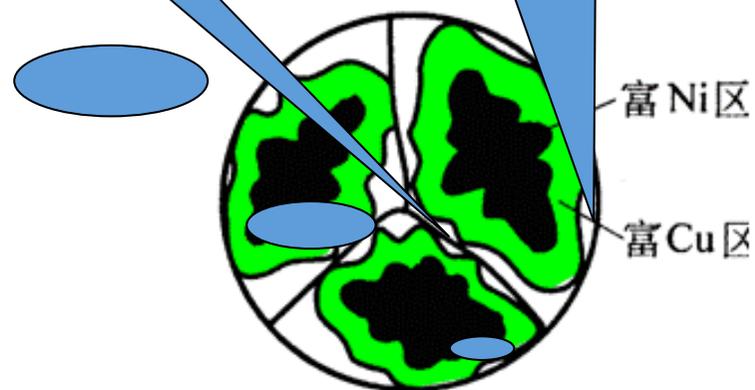
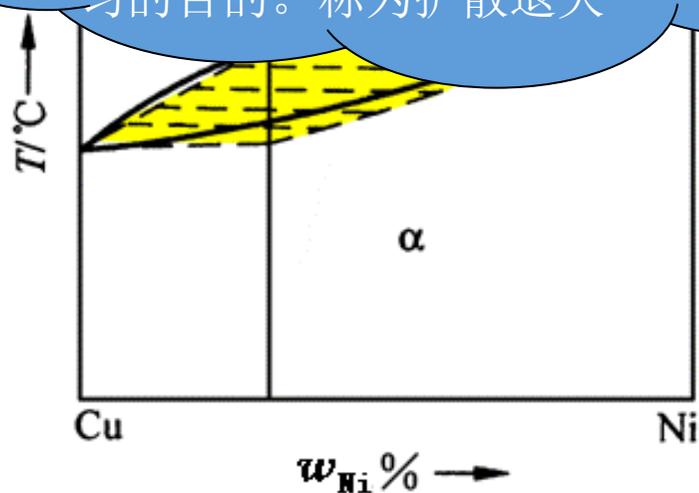
● 枝晶偏析 —— 冷速快 → 原子扩散不充分 → 成分不均。 扩散退火可消除。



枝晶偏析使合金的力学性能、工艺性能降低。

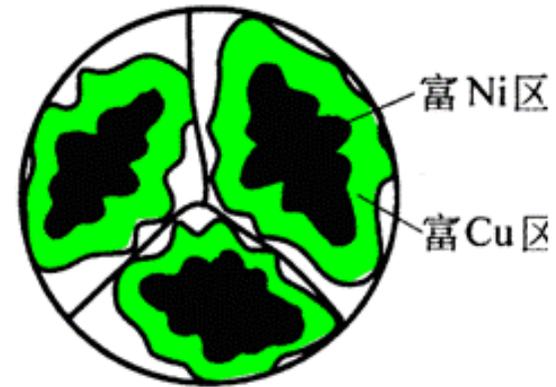
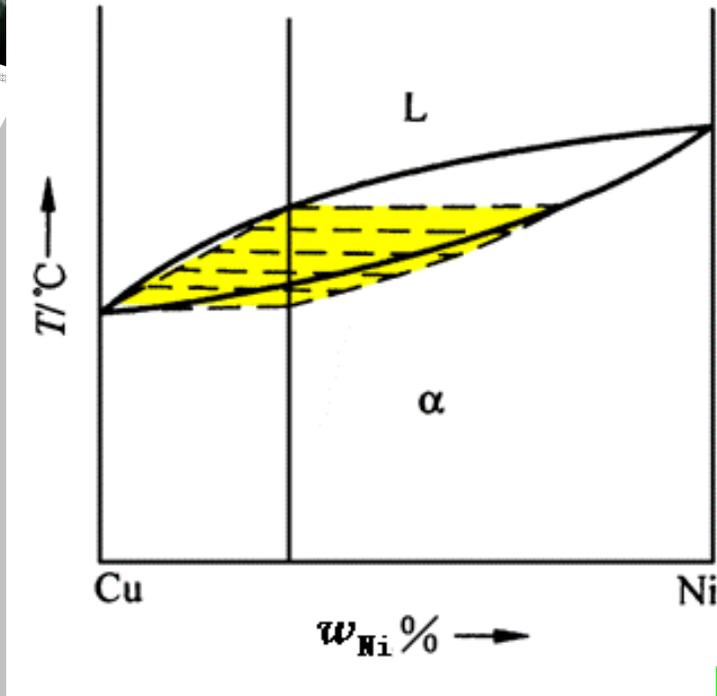
枝晶偏析程度取决于以下因素：  
 (1) 冷却速度愈大，扩散进行愈不充分，偏析程度愈大。  
 (2) 相图的结晶范围愈大，偏析成分的范围愈大。

消除或改善方法：将铸件加热到低于固相线 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的温度，进行较长时间的保温，使偏析元素进行充分的扩散，以达到使成分均匀的目的。称为扩散退火

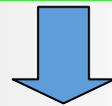


固溶体的非平衡结晶

Cu-Ni合金枝晶偏析示意图



成分不均匀



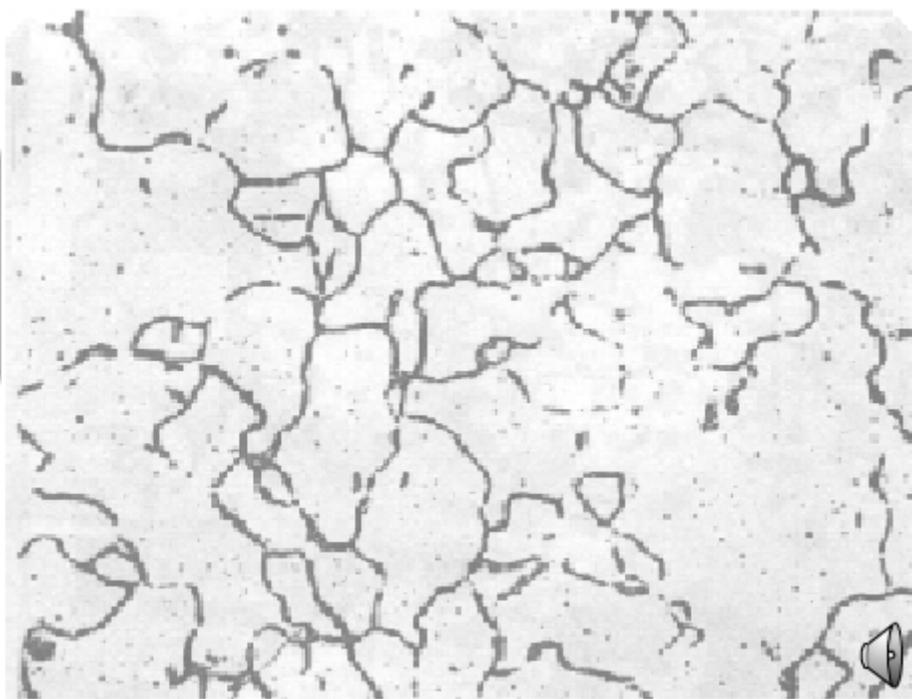
组织不均匀



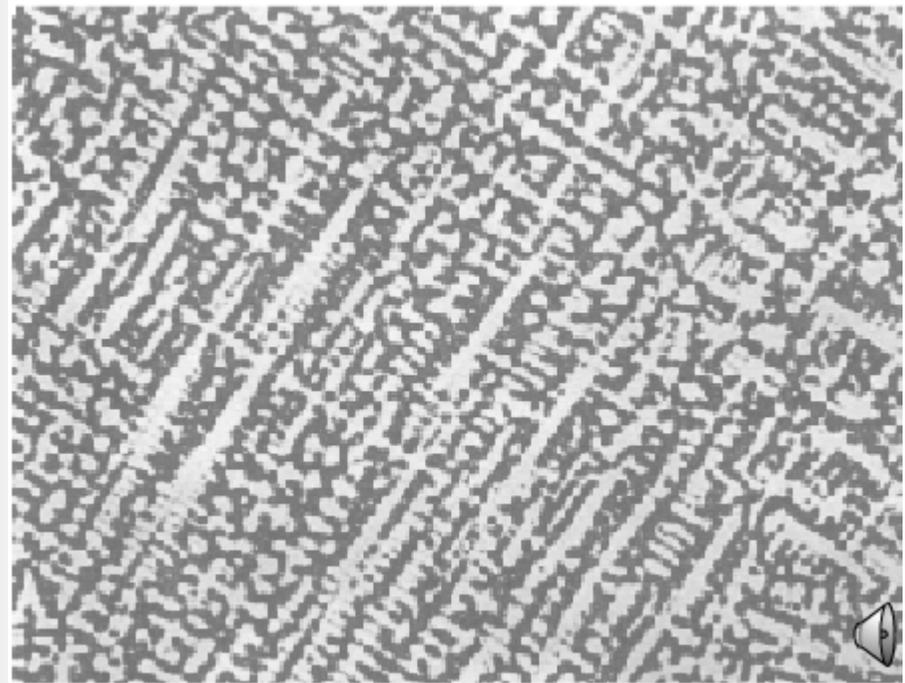
性能就不均匀



## Cu-Ni合金的平衡组织与枝晶偏析组织



平衡组织



枝晶偏析组织



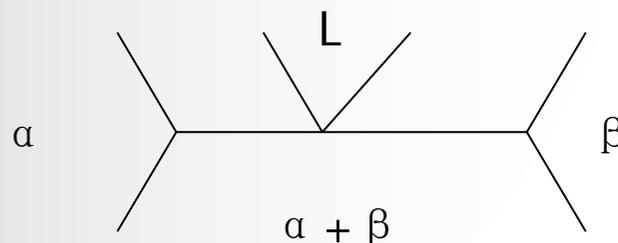
### 第三节 二元共晶相图

当合金的二组元在液态时**无限互溶**，  
在固态时**有限互溶**，且发生共晶反应，  
此合金系的相图为二元共晶相图。

属于此类相图的合金系有：

*Pb-Sn, Al-Si, Al-Sn, Zn-Sn*等。

相图特征为：



以Pb-Sn相图为例说明结晶过程



# 一、相图分析

## (一) 特点

当合金的二组元在液态时**无限互溶**，在固态时**有限互溶**，且发生共晶反应，此合金系的相图为二元共晶相图。

## (二) 共晶反应



## ❖ (三) 基本相

❖ L相: ACD线以上

❖  $\alpha$  相: 以Pb为溶剂，以Sn为溶质的固溶体

❖  $\beta$  相: 以Sn为溶剂，以Pb为溶质的固溶体

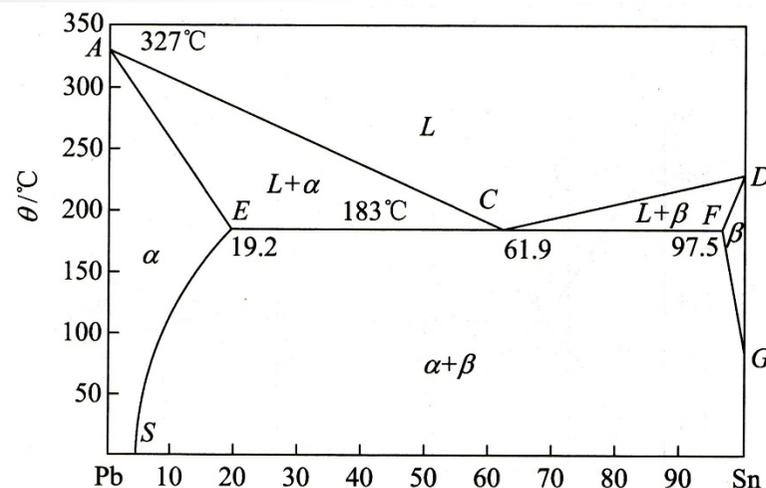


图 3-4 Pb-Sn 共晶相图



## ❖ (四)点、线、区意义

### 1、点:

**A:**Pb组元熔点

**D:**Sn组元熔点

**C:**共晶点: 共晶成分的合金冷却到此点所对应的温度(共晶温度), 共同结晶出  $\alpha_E$ 、 $\beta_F$ 。

$L_C \leftrightarrow (\alpha_E + \beta_F)$

**E:**Sn在Pb中的最大溶解度

**F:** Pb 在Sn 中的最大溶解度

**S:** Sn在Pb中的最小溶解度

**G:**Pb在Sn中的最小溶解度

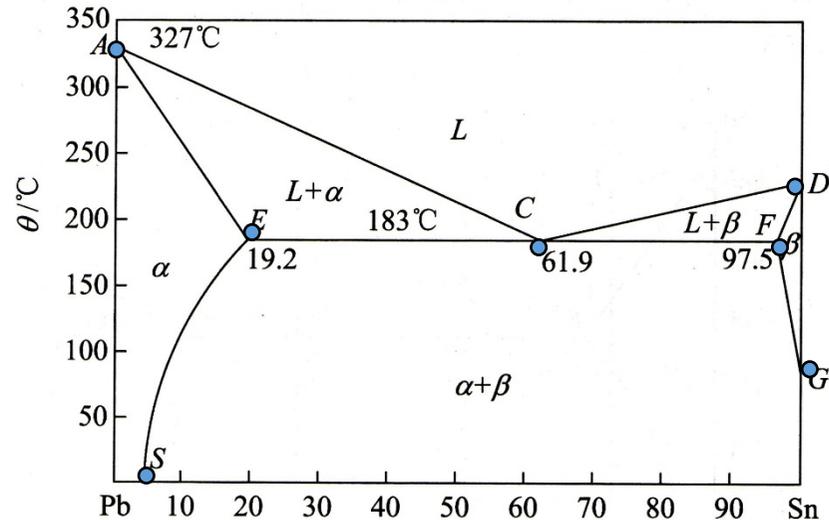


图 3-4 Pb-Sn 共晶相图



## (2) 线

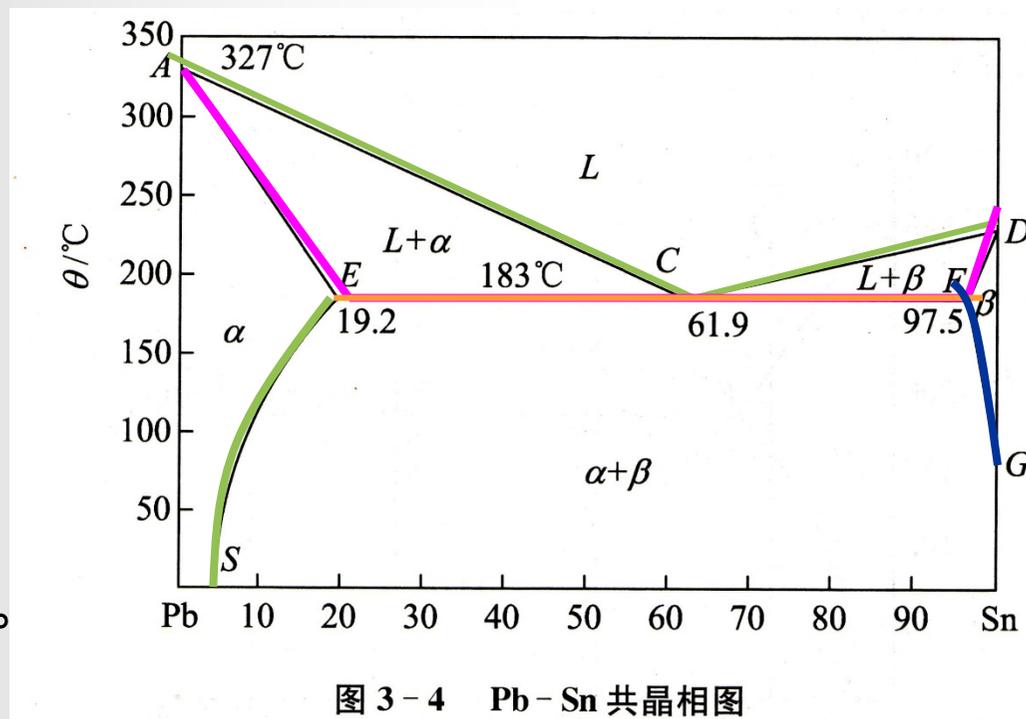
ACD : 液相线

AECFD : 固相线

ECF : 共晶线

ES: Sn在Pb的溶解度线

FG: Pb在Sn中的溶解度线。



## (3) 区:

三个单相区:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、L;

三个双相区:  $L+\alpha$ 、 $L+\beta$ 、 $\alpha+\beta$ ;

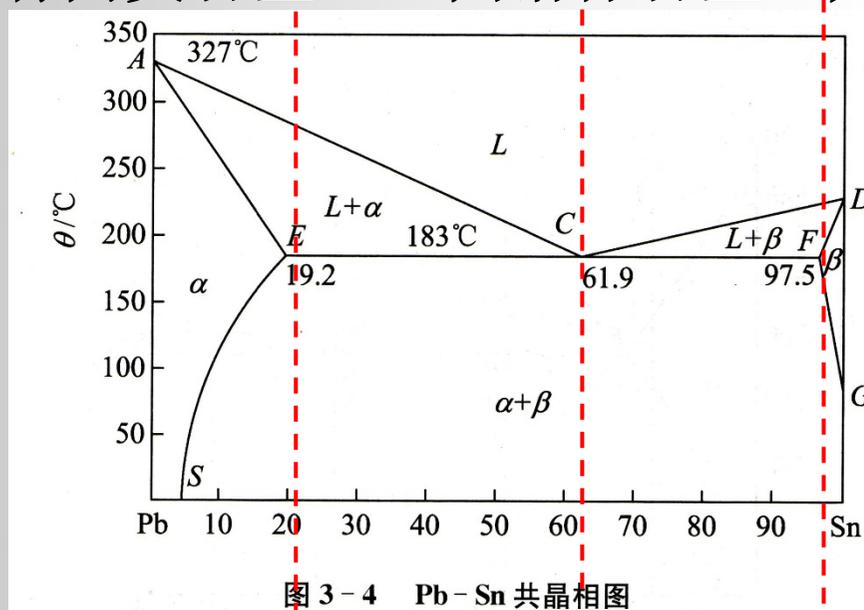
一个三相区:  $L+\alpha+\beta$ 。



## 二、典型合金的结晶过程分析

注意：在共晶线ECF上属于三相平衡区

该合金系有两类合金： 固溶体合金、共晶型合金

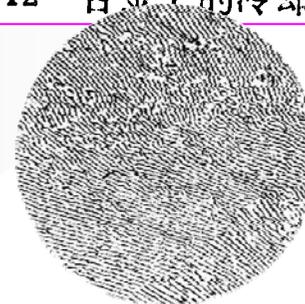
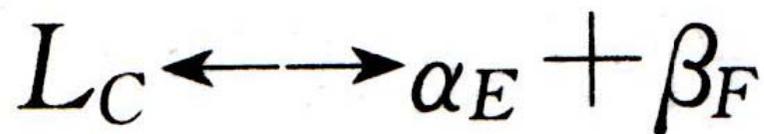
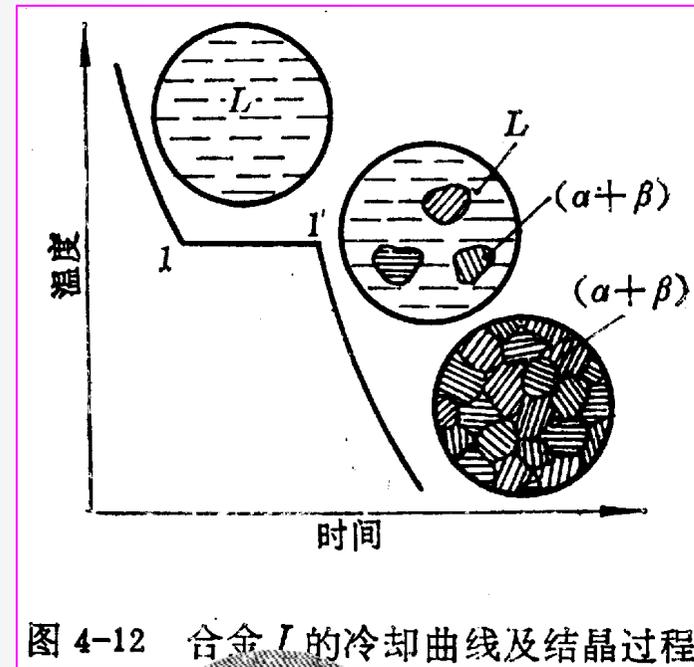
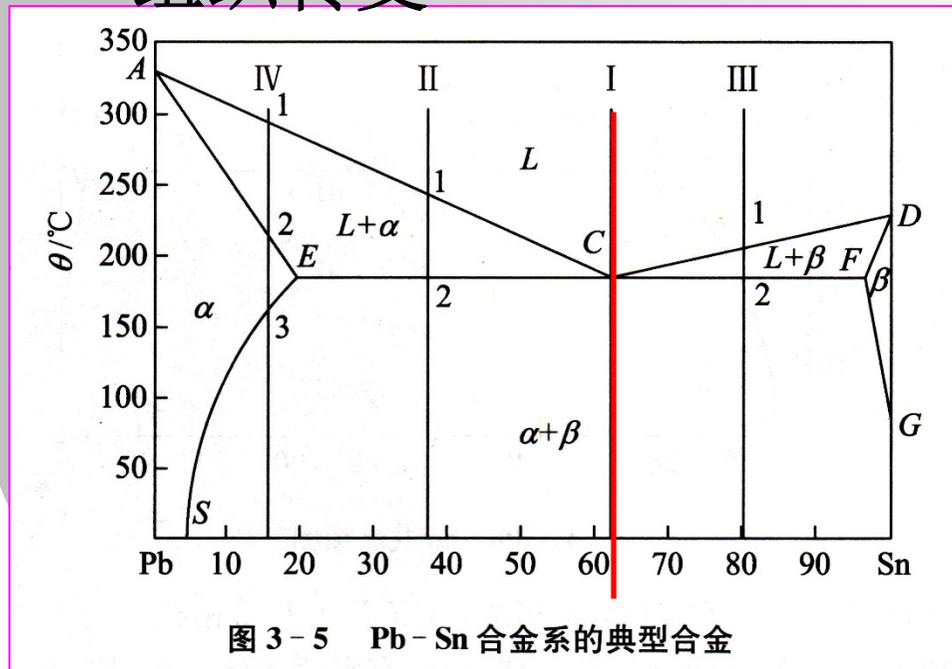


E点以左，F点以右的合金属于固溶体型合金；  
EF 之间的合金为共晶型合金，其中，C点以左为亚共晶合金  
C点以右为过共晶合金，C点合金为共晶合金。



# 结晶过程：共晶合金

- 冷却曲线
- 组织转变



# 合金 I 分析:

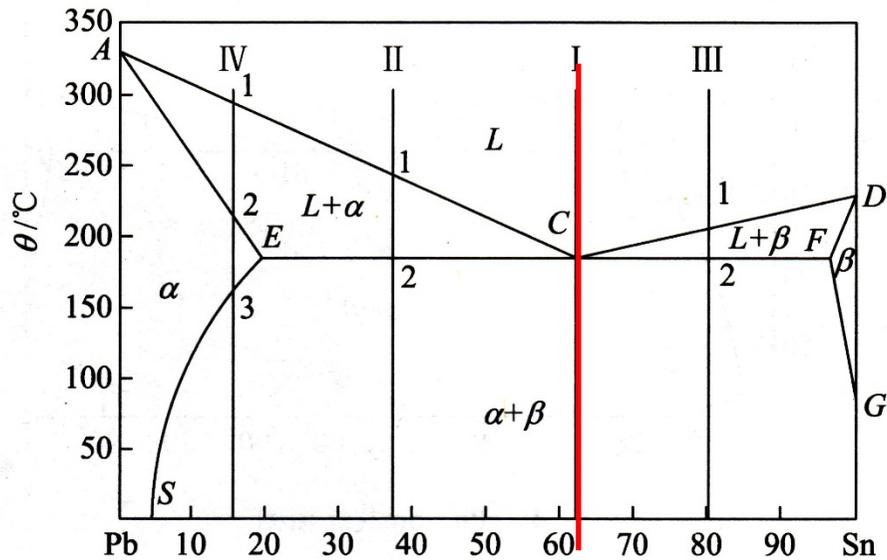


图 3-5 Pb-Sn 合金系的典型合金

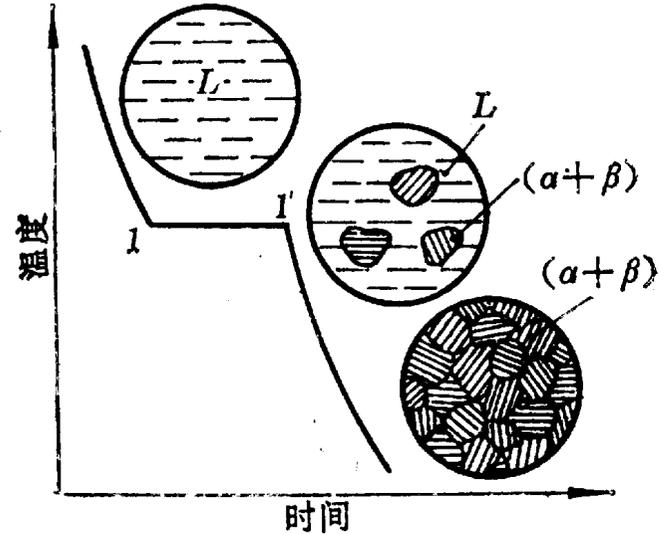


图 4-12 合金 I 的冷却曲线及结晶过程

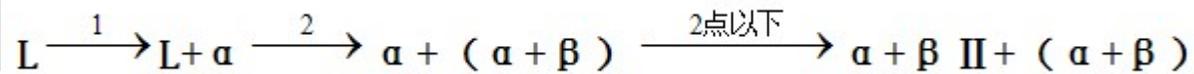
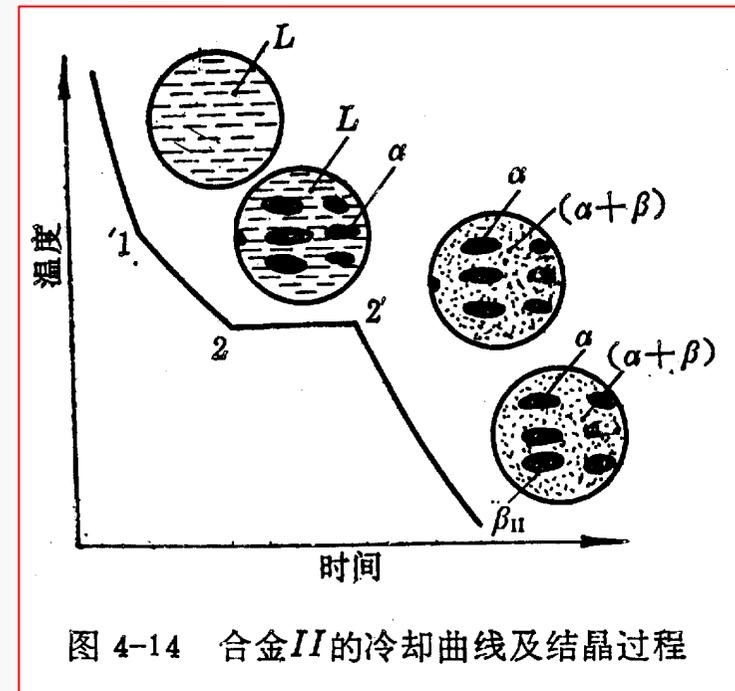
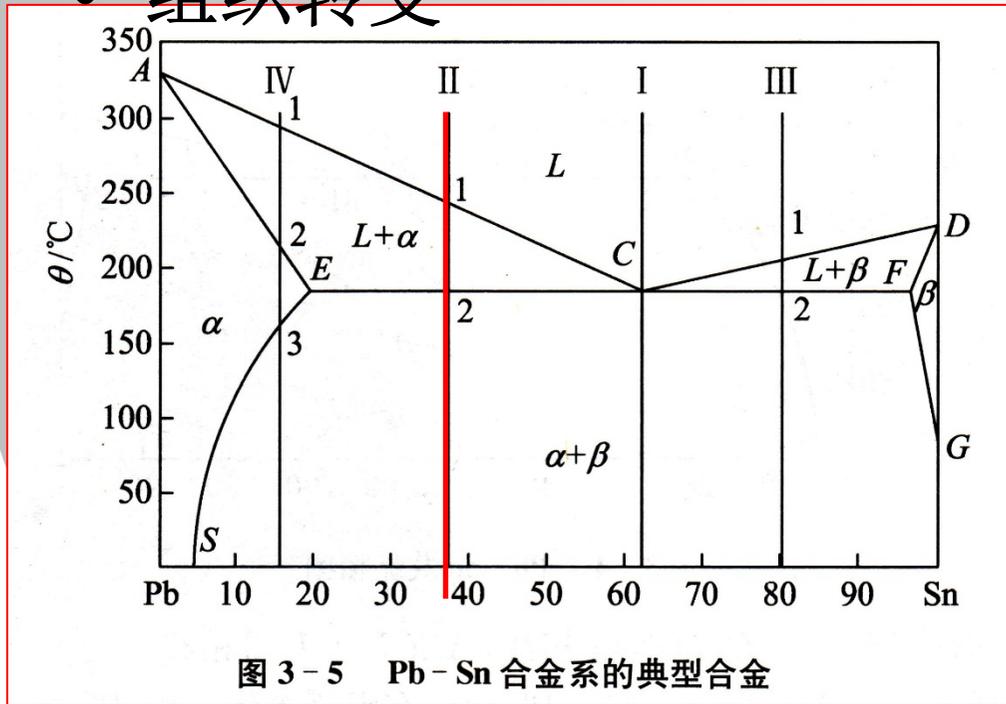
- 结晶过程:  $L \rightarrow (\alpha + \beta)$  ;
- 室温时的相:  $\alpha + \beta$  ;
- 室温时的组织:  $(\alpha + \beta)$  ;





# 结晶过程：亚共晶合金

- 冷却曲线
- 组织转变



# 合金 II 分析:

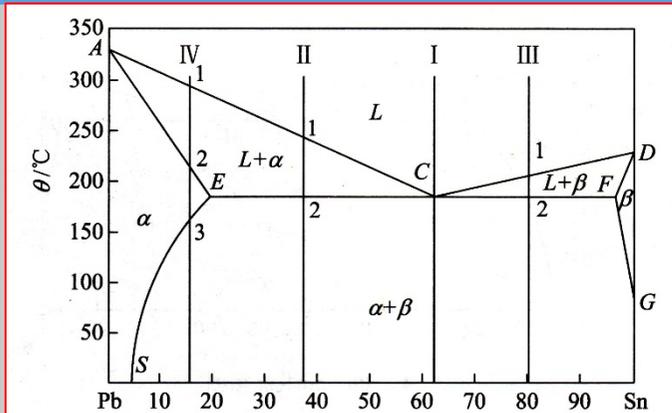


图 3-5 Pb-Sn 合金系的典型合金

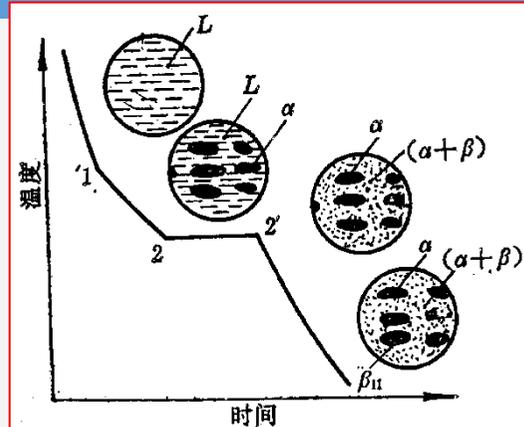
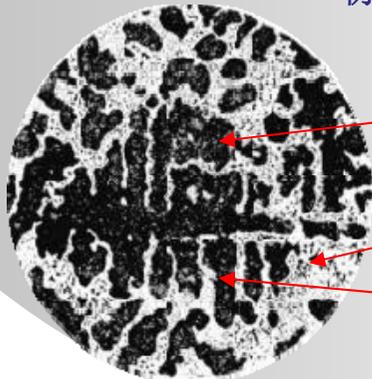


图 4-14 合金 II 的冷却曲线及结晶过程

- 结晶过程:  $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow \alpha + (\alpha + \beta) \rightarrow \alpha_{\text{初晶}} + \beta_{\text{II}} + (\alpha + \beta)_{\text{共晶}}$  ;
- 室温时的相:  $\alpha + \beta$  ;
- 室温时的组织:  $\alpha_{\text{初晶}} + \beta_{\text{II}} + (\alpha + \beta)_{\text{共晶}}$  ;

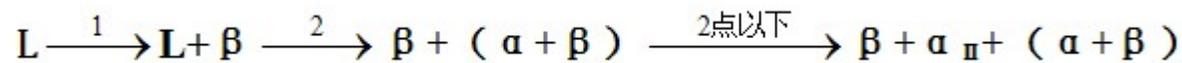
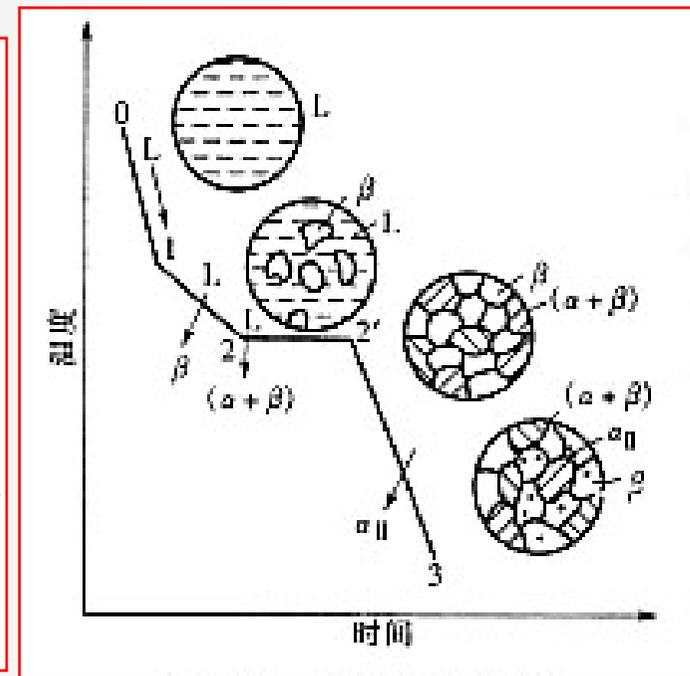
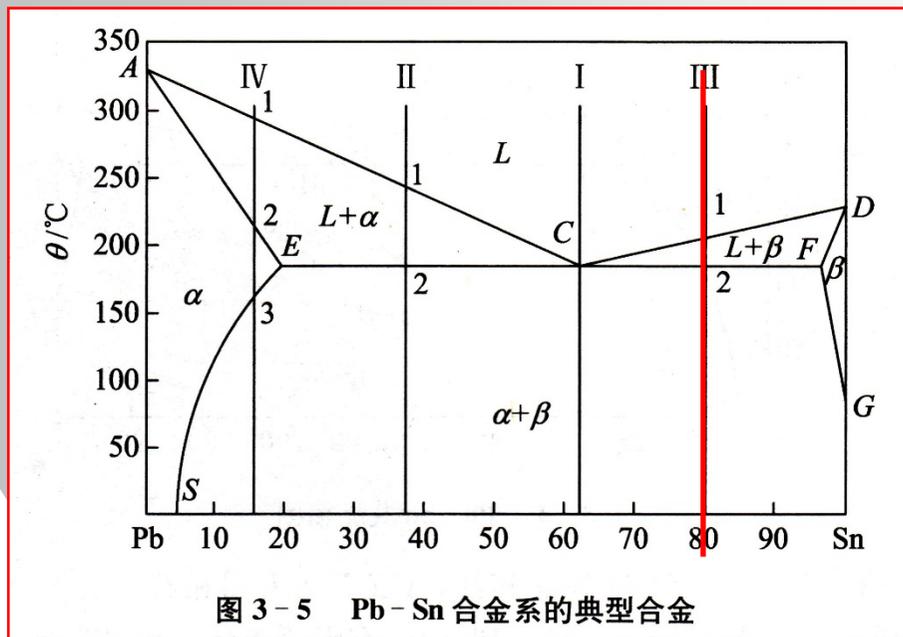


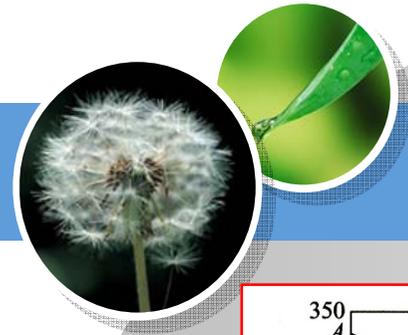
黑色树枝状为初晶  $\alpha$  固溶体,  
 黑白相间的为  $(\alpha + \beta)$  共晶体,  
 初晶  $\alpha$  内的白色小颗粒为  $\beta_{\text{II}}$  固溶体



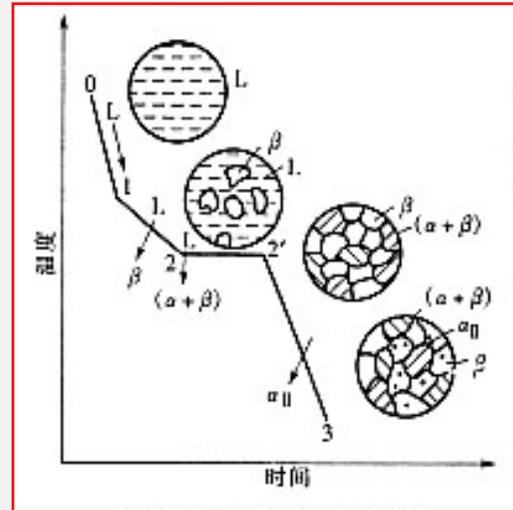
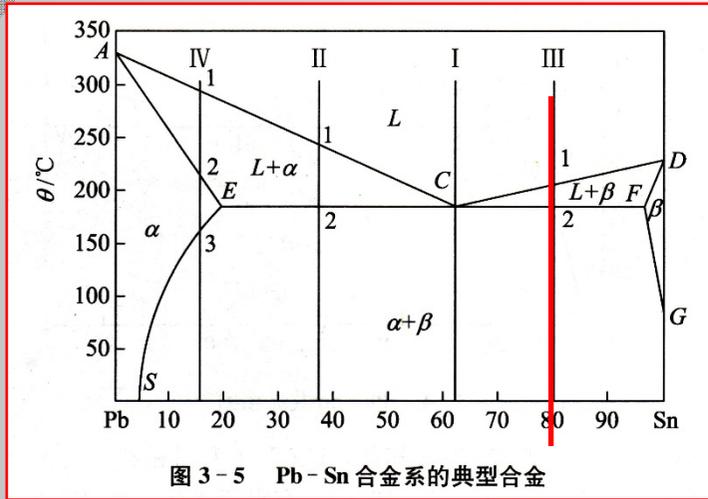
# 结晶过程：过共晶合金

- 冷却曲线
- 组织转变

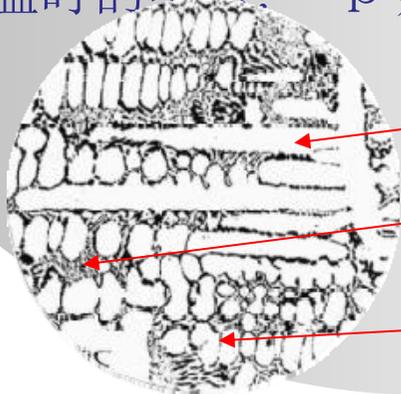




# 合金III分析:



- 结晶过程:  $L \rightarrow L + \beta \rightarrow \beta + (\alpha + \beta) \rightarrow \beta_{\text{初晶}} + \alpha_{\text{II}} + (\alpha + \beta)_{\text{共晶}}$
- 室温时的相:  $\alpha + \beta$ ;
- 室温时的组织:  $\beta_{\text{初晶}} + \alpha_{\text{II}} + (\alpha + \beta)_{\text{共晶}}$ ;



图中亮白色卵形为初晶  $\beta$  固溶体，  
黑白相间分布的为  $(\alpha + \beta)$  共晶体，  
初晶  $\beta$  内的黑色小颗粒是  $\alpha_{\text{II}}$  固溶体



# 固溶体合金

- 冷却曲线
- 组织转变

反应过程：匀晶反应 + 二次结晶

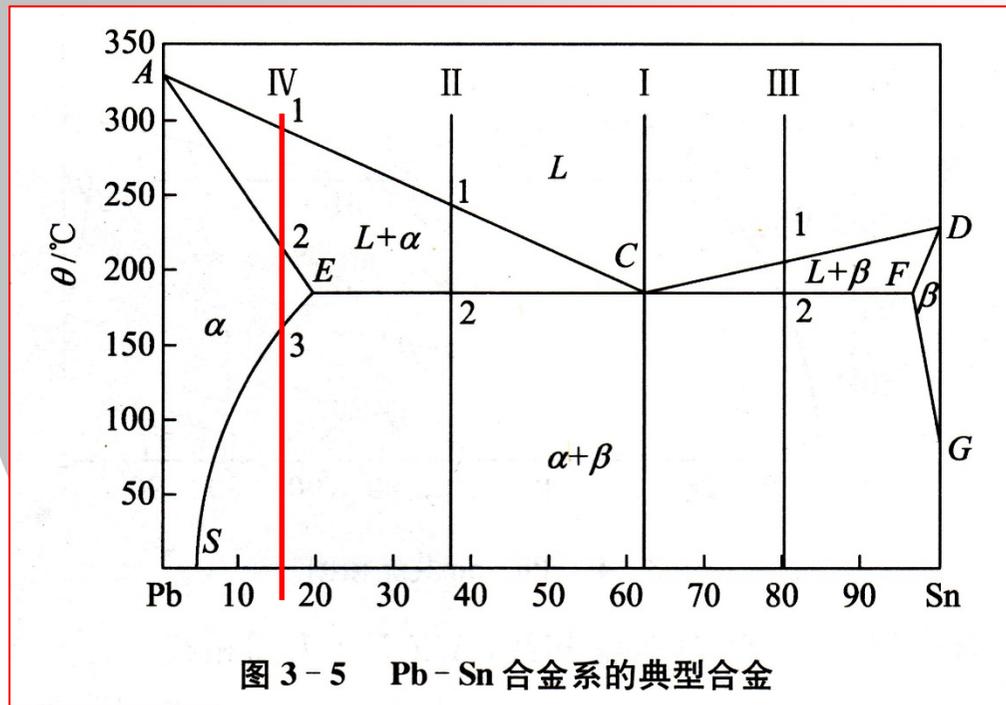
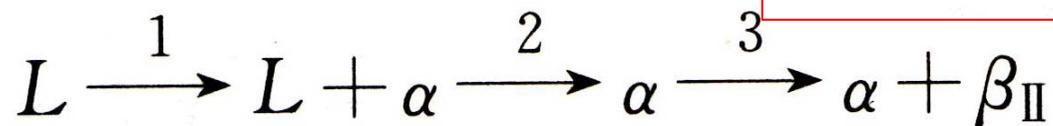
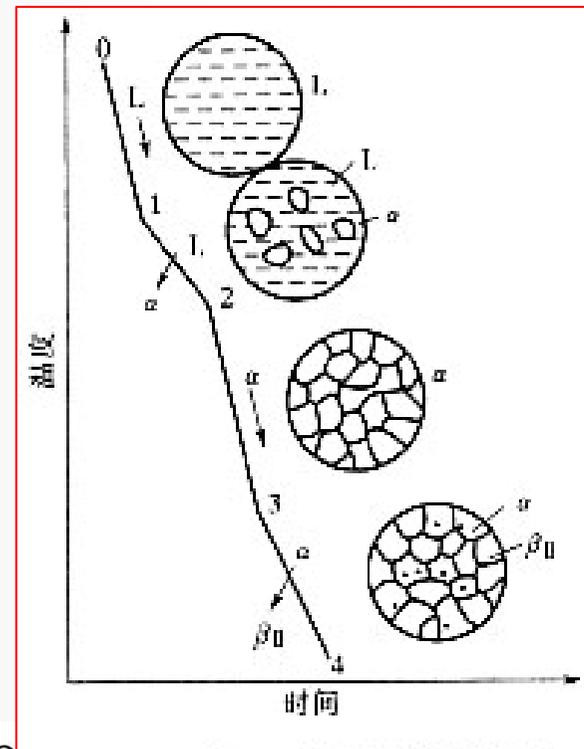
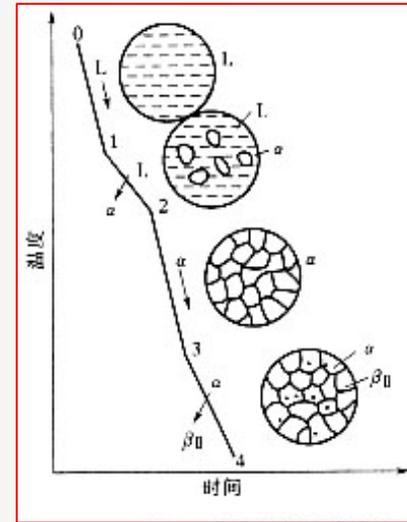
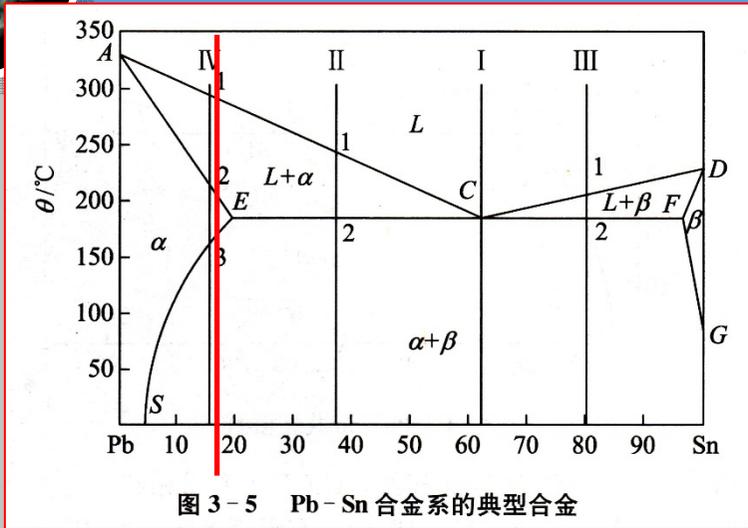


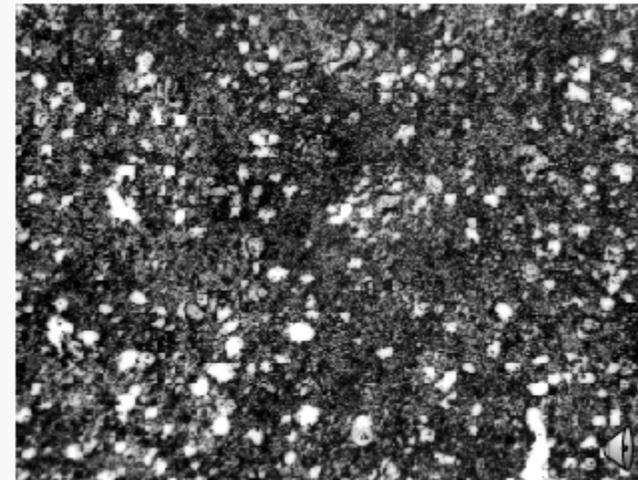
图 3-5 Pb-Sn 合金系的典型合金



# 合金IV分析



- 结晶过程：  
 $L \rightarrow L + \alpha \rightarrow \alpha \rightarrow \alpha + \beta_{II}$ ;
- 室温时的相： $\alpha + \beta$ ；
- 室温时的组织： $\alpha_{初晶} + \beta_{II}$ ；





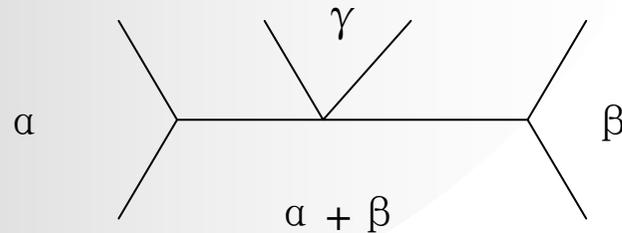
## 第四节 其他相图

### 一、二元共析反应:

从某种均匀一致的**固相**中同时析出两种化学成分和晶格结构完全不同的新固相的转变过程。

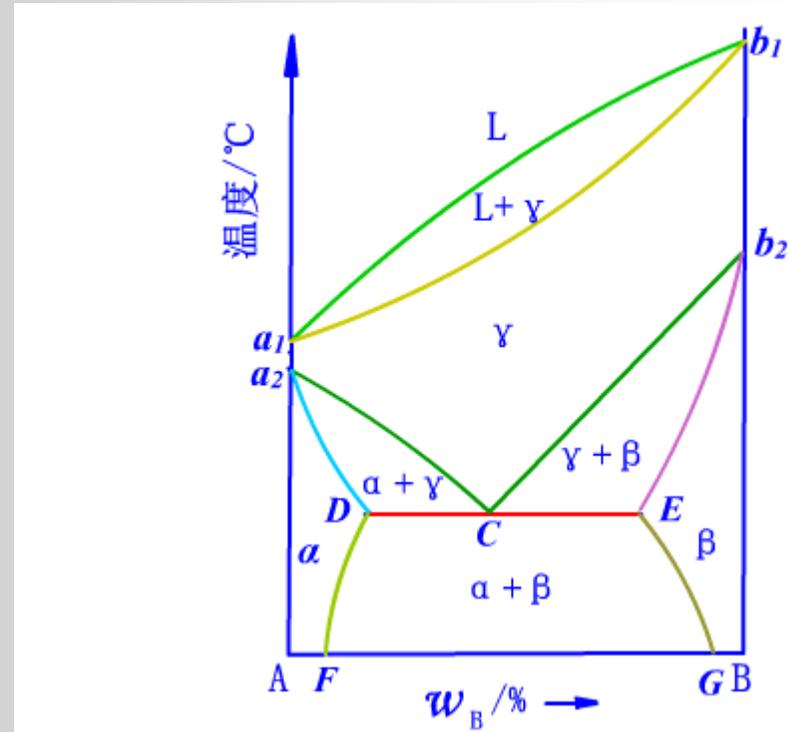


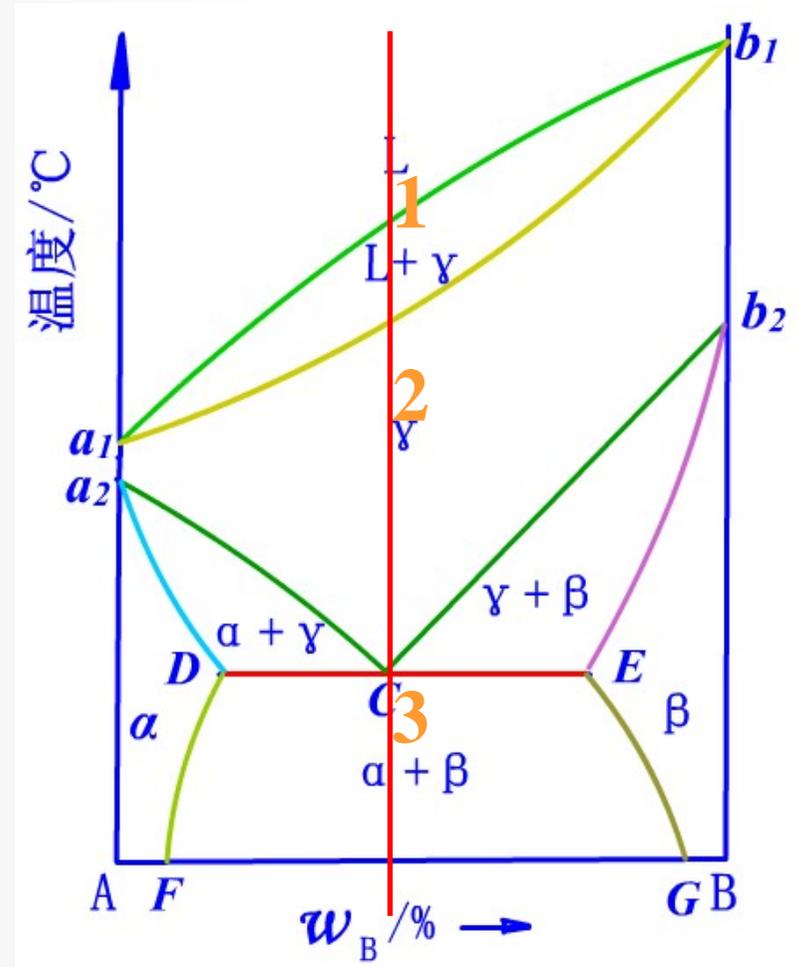
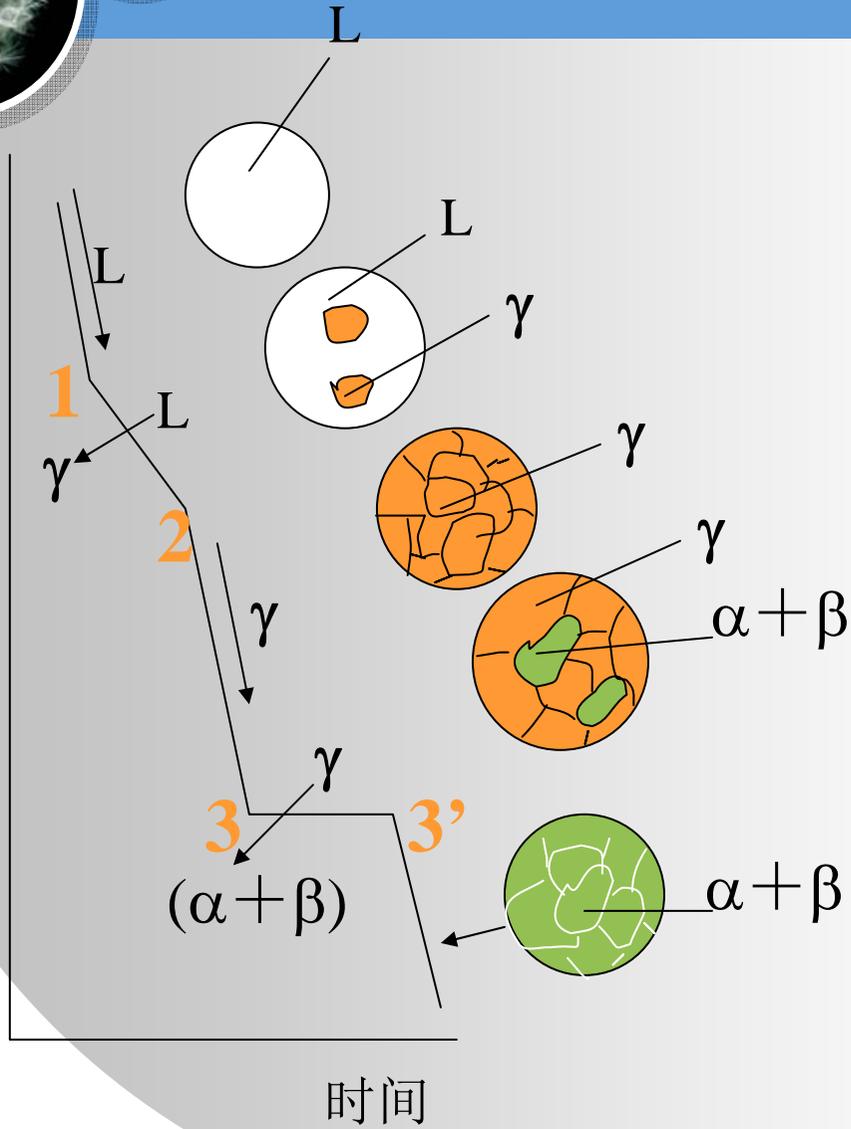
相图特征:





温度







## 二、形成稳定化合物的二元相图

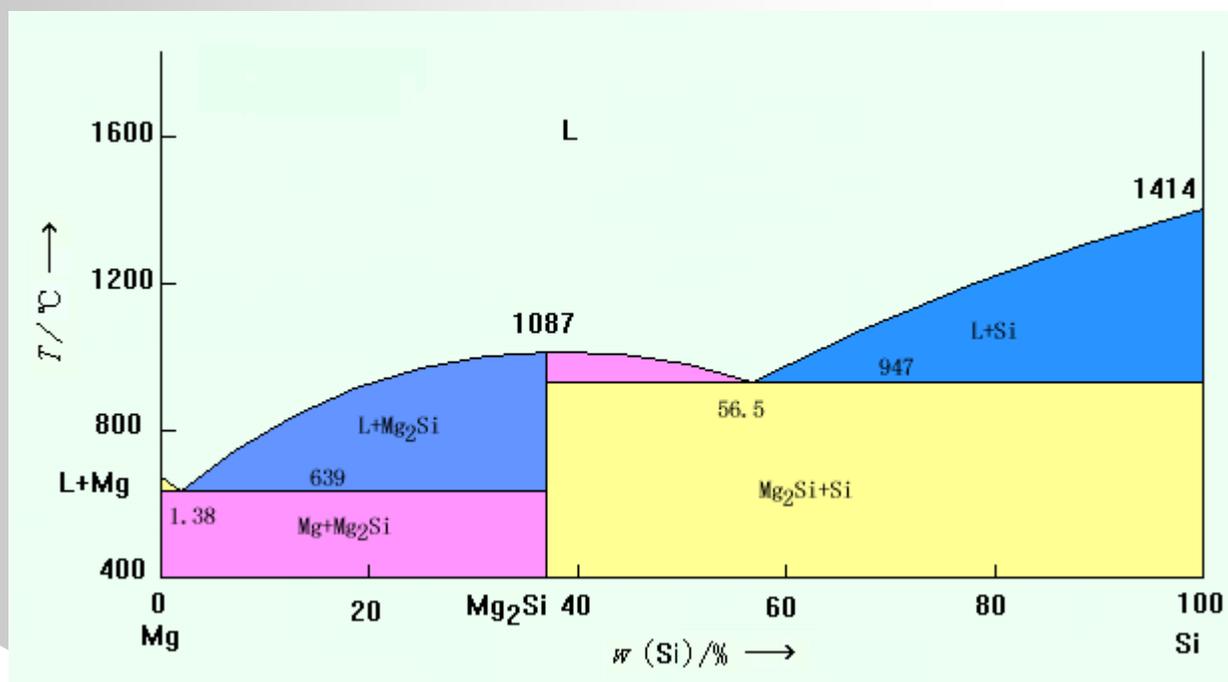
### Mg-Si合金相图

稳定化合物:

具有一定熔点、在熔点以下保持其固有结构而不发生分解的化合物。

形成稳定化合物的二元合金系:

Mg-Si、Mn-Si、Fe-P、Cu-Sb等。





## 二元合金相图读图法

只要熟练掌握上述基本图形的特点，同时掌握由基本反应构成复杂相图的规律，就能正确地读懂二元相图。

现将二元相图读图法简单归纳如下。

### (1) 相区分析的规律

① 首先确定单相区

② 相图中除代表两组元的垂直线以外，若出现另一条垂直线，该线即代表形成一定成分的化合物。如果该化合物具有固定熔点，就是稳定化合物。分析相图时，可将其视为纯组元。以它把相图分为几个单独部分来分析。

③ 当图中出现水平线时，一条水平线必然连着三个单相区，这三个单相区分别处于水平线的两端和中间。



## (2) 两相区的确定

①两个单相区之间，必夹有一个两相区，根据杠杆定律，该两相区必定由相邻相区的两个相所组成。

②两相区中如遇到固溶线倾斜的情况，会发生二次相的析出。

## (3) 三相水平线分析

在二元相图中，水平线是三相平衡线。

## (4) 相区接触法则

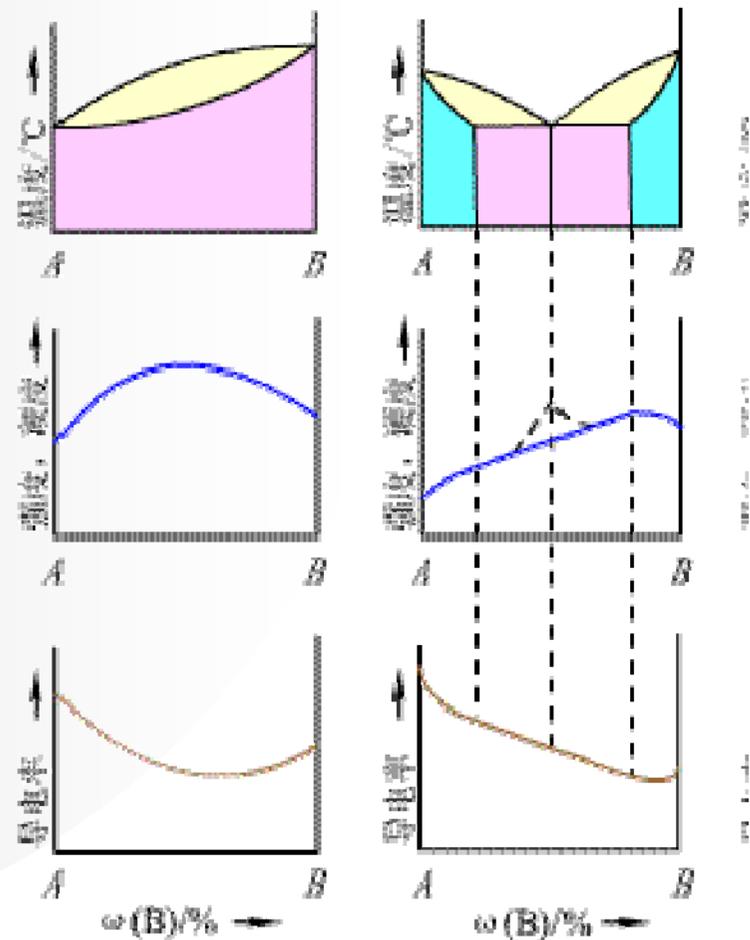
根据大量二元状态图分析，可得出如下规律：在二元合金状态图中，相邻相区的相数相差为一(点接触的情况除外)。这个规律在金属学中称为相区接触法则，可用它来检验二元图中相区标注是否正确。



## 第五节 相图与性能的关系

### 一、相图与合金物理、力学性能之间的关系

- 合金的性能取决于合金的化学成分和组织
- 合金的化学成分与组织间的关系体现在合金相图上
- 故合金相图与合金的性能之间必然存在着一定的联系。

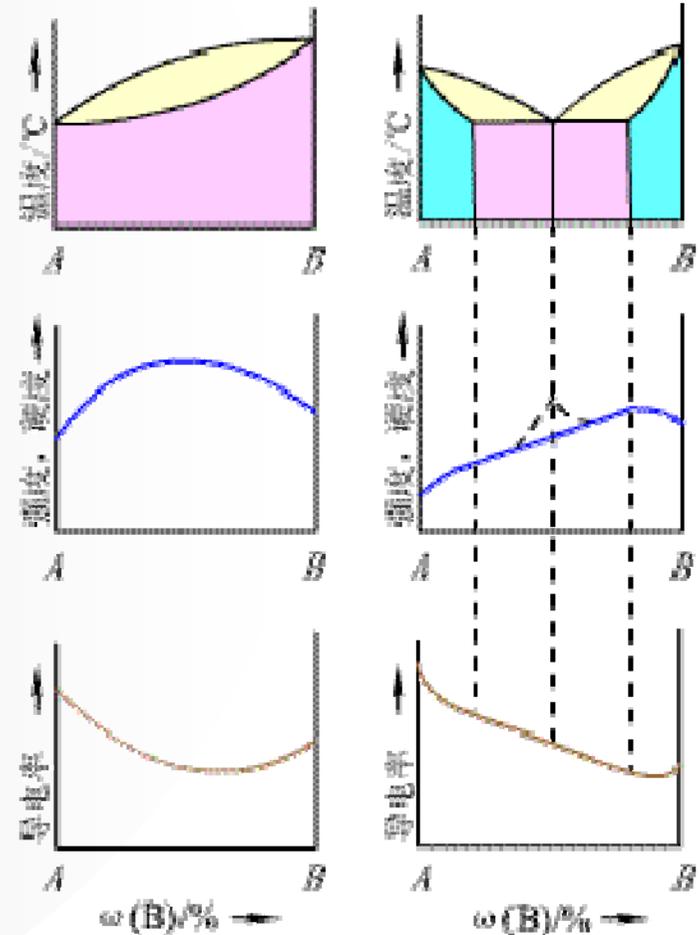


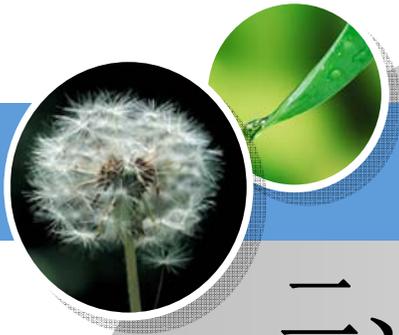


- ❖ 溶质元素 → 晶格畸变 → **强度、硬度** ↑ ( 浓度50%时最大 )
- ❖ **硬度**随成分的变化呈直线关系，大致是两相性能的算术平均值。

$$HB = HB_{\alpha} \times \alpha \% + HB_{\beta} \times \beta \%$$

- ❖ **强度**与组成相或组织组成物的**形态**有很大关系。组成相或组织组成物越细密，强度越高（共晶点处，共晶组织细小、均匀细密，强度达最高值。）



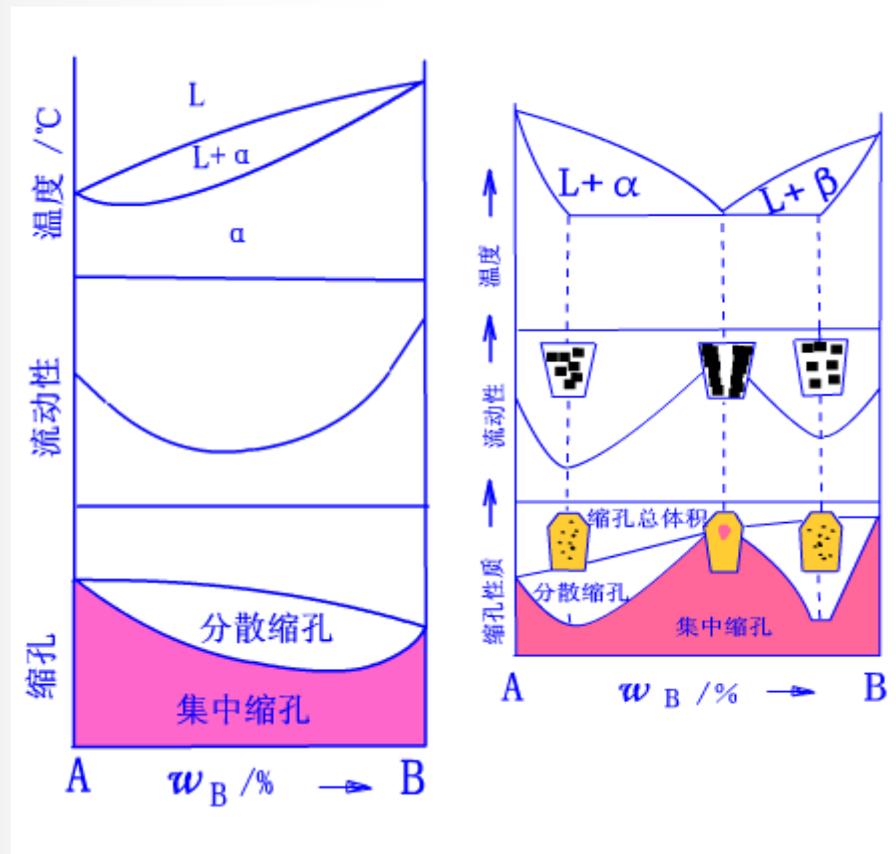


## 二、合金的工艺性能与相图之间的关系

**铸造性能：**根据液固相线之间的距离 $X$   
 $X$ 越大，成分偏析越严重（因为液固相成分差别大）；  
 $X$ 越大，流动性越差（因为枝晶发达）；  
 $X$ 越大，热裂倾向越大（因为液固两相共存的温区大）。

**塑性加工性能：**选择具有单相固溶体区的合金。

**切削加工性能：**单相合金的切削加工性能差，其原因是硬度低，容易粘刀，表现为不易断屑，表面粗糙度大等，而当合金为两相混合物时，得到改善。





## 第六节 铁碳合金相图

§ 1 铁碳合金的组元

§ 2 铁碳合金相图分析

§ 3 典型合金的结晶过程

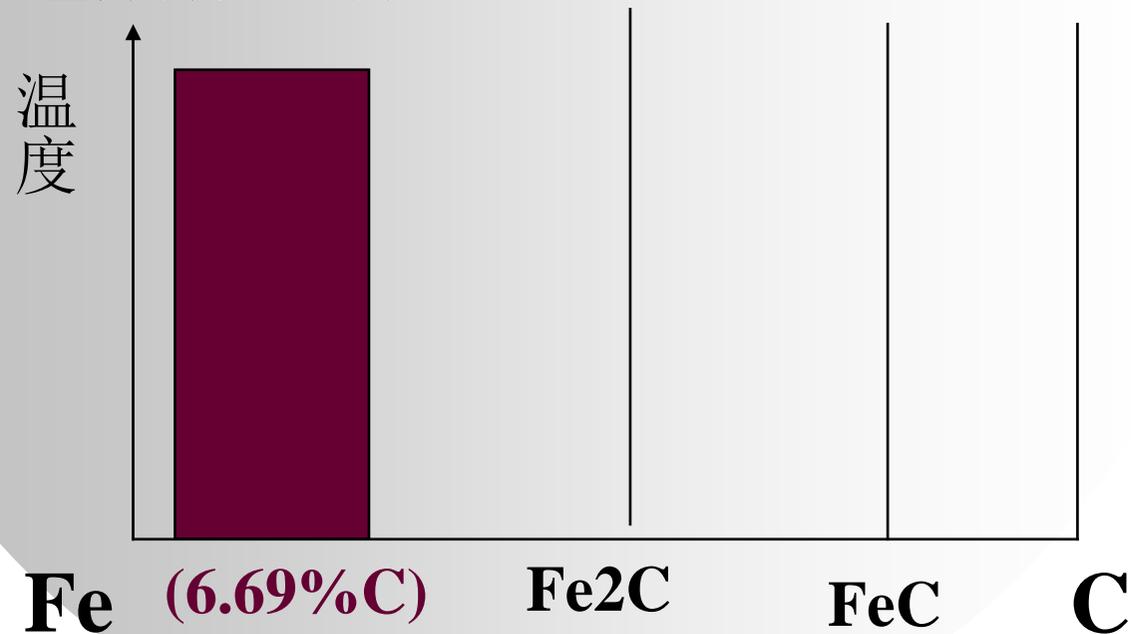
§ 4 铁碳合金的成分、组织和性能的关系

§ 5 铁碳合金相图的应用



钢铁材料  $\xrightarrow{\text{由Fe、C组元构成}}$  C钢与铸铁（纯Fe-C合金）  
合金钢与合金铸铁（Fe-C中加入合金元素）

因此，要研究钢铁材料，首先要熟悉Fe-C合金这一基础合金，而研究Fe-C合金离不开Fe-C相图。



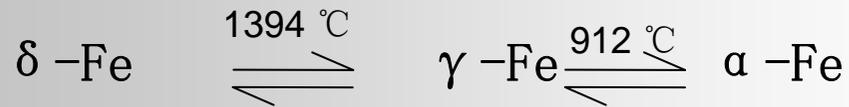
当 $>6.69\%C$ 后，性能很脆，无实用价值。故只研究Fe-Fe<sub>3</sub>C相图。



## 一、组元介绍

# 纯铁的同素异构转变

➤ 纯铁的同素异构转变



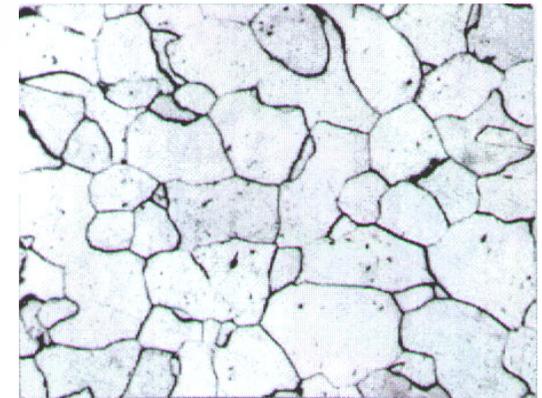
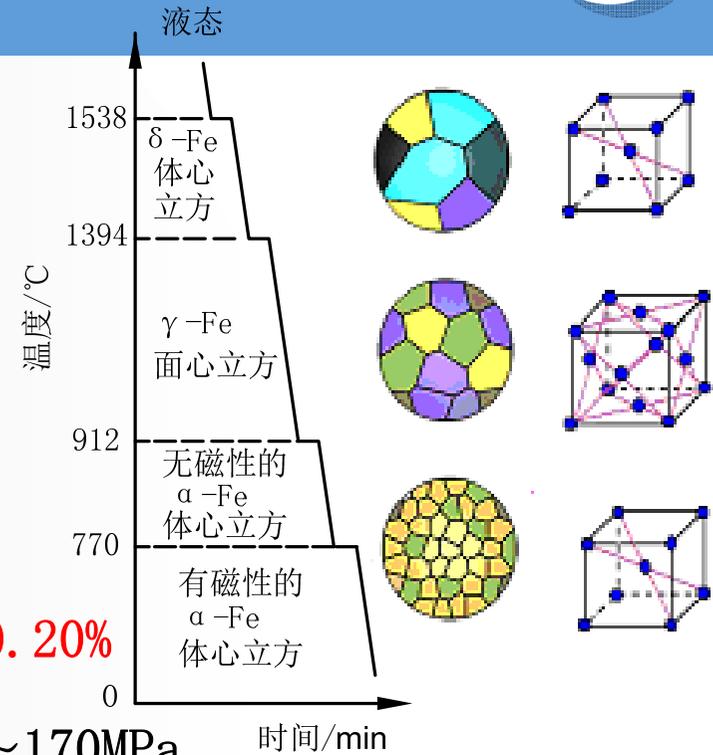
## ◆ 纯铁的成分及性能

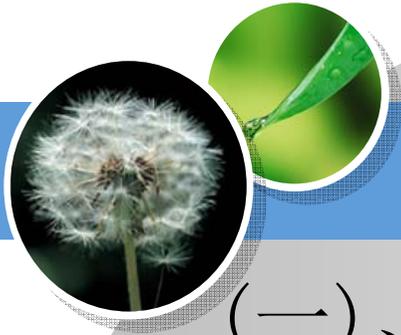
➤ 纯铁（工业纯铁）：含杂质 **0.10%~0.20%**

➤ 性能：  $\sigma_b=180\sim230\text{MPa}$      $\sigma_{0.2}=100\sim170\text{MPa}$

$\delta=30\%\sim50\%$      $\psi=70\%\sim80\%$

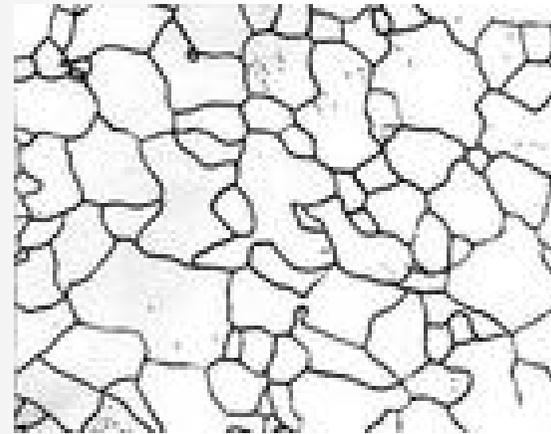
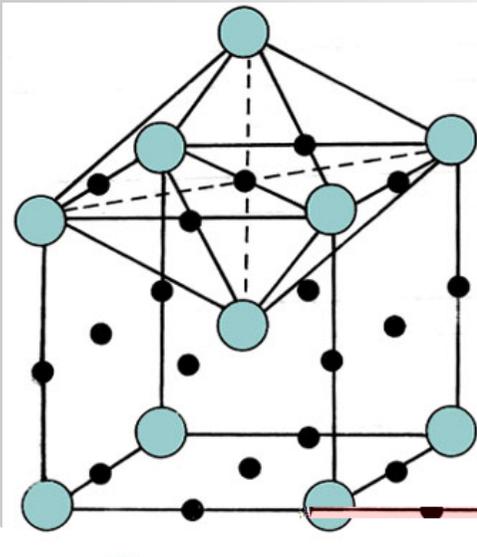
$A_k=128\sim160\text{J}$      $\text{HBS}=50\sim80$

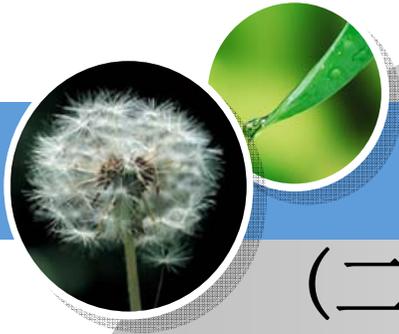




## (一)、 铁素体 (F或 $\alpha$ )

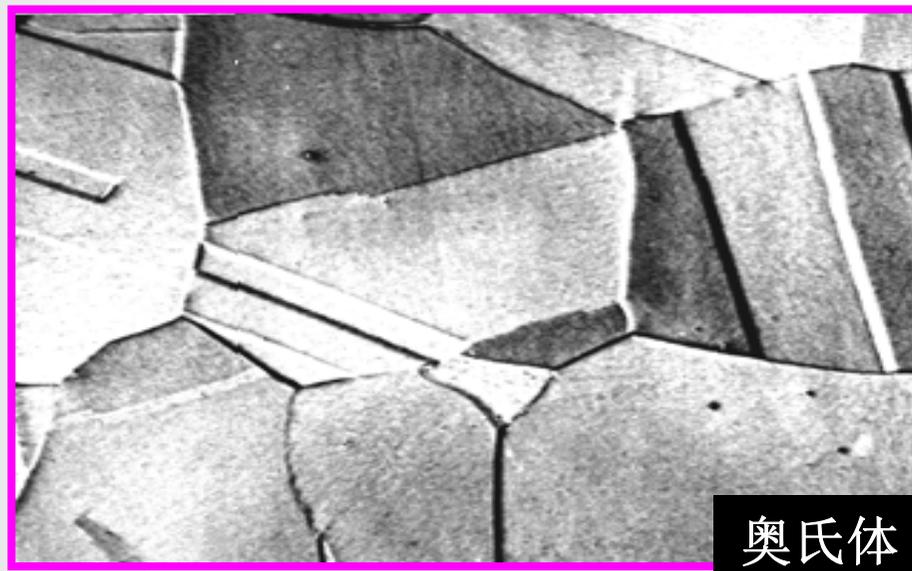
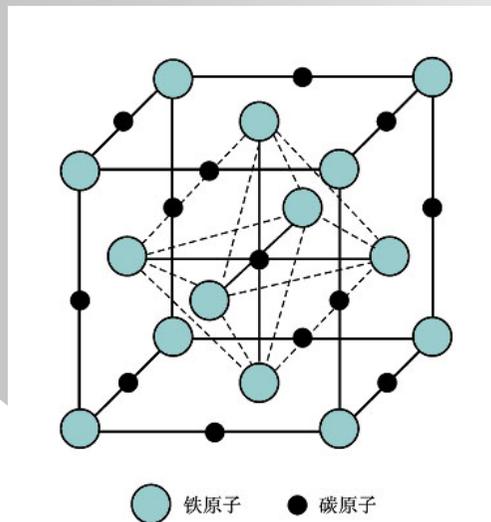
- 定义：碳溶于  $\alpha$ -Fe中所形成的间隙固溶体
- 晶格结构：bcc
- 最大溶解度：0.02% (727°C)
- 性能： $\sigma_b=180\sim 280\text{MPa}$     $\sigma_{0.2}=100\sim 170\text{MPa}$    HBS=50~80  
 $\delta=30\%\sim 50\%$     $\psi=70\%\sim 80\%$     $a_k=160\sim 200\text{J/cm}^2$





## (二)、奥氏体 (A或 $\gamma$ )

- 定义：碳溶于  $\gamma$ -Fe中所形成的间隙固溶体（高温组织）
- 晶格结构：fcc
- 最大溶解度：2.11%（1148℃）
- 性能： $\sigma_b \approx 400\text{MPa}$     HBS=170~220     $\delta = 40\% \sim 50\%$     高塑性、  
无磁



奥氏体



### (三)、渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

- 定义: Fe 与 C 所形成的金属化合物
- 晶格结构: 复杂正交
- 性能:  $\sigma_b \approx 30\text{MPa}$  HBS=800  $\delta \approx 0$   $\psi \approx 0$

硬而脆 (耐磨性好)

- $\text{Fe}_3\text{C} \xrightarrow{\text{高温}} 3\text{Fe} + \text{C}$  (石墨)

- 合金渗碳体:  $(\text{Fe}, \text{Me})_3\text{C}$

$\text{Fe}_3(\text{C}, \text{N})$  或  $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{B})$

#### ◆ 石墨碳

- 晶格结构: 简单六方

- 性能: 加工性能  $\uparrow$  机械性能  $\downarrow$

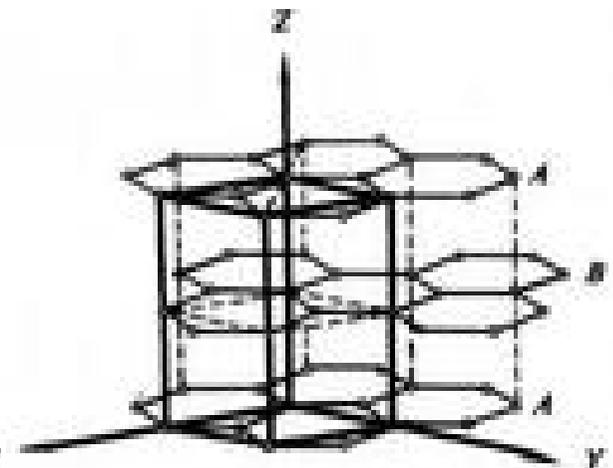
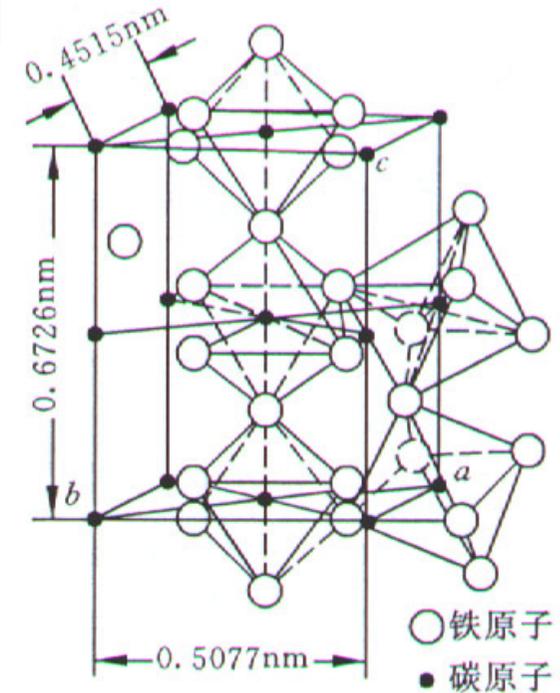
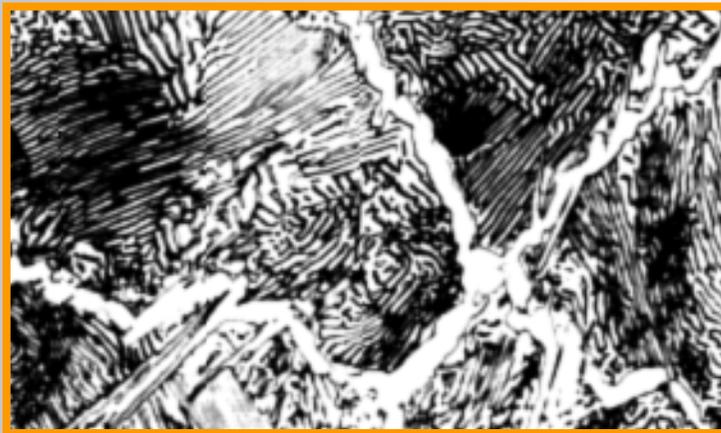


图1. 石墨的晶体结构



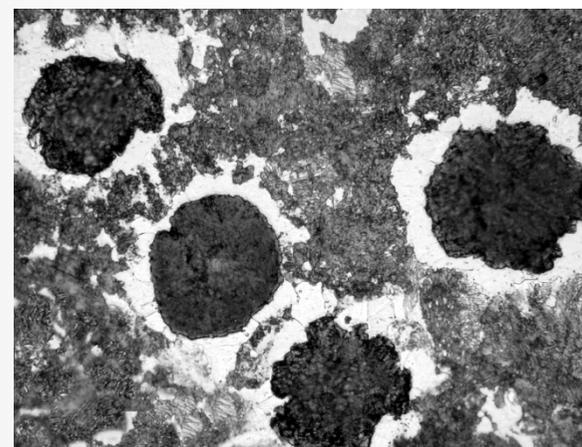
钢中的渗碳体



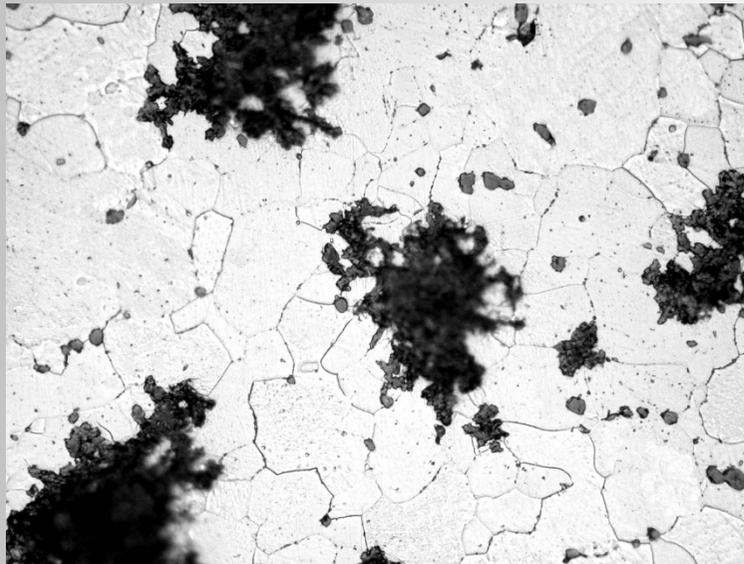
铸铁中的石墨



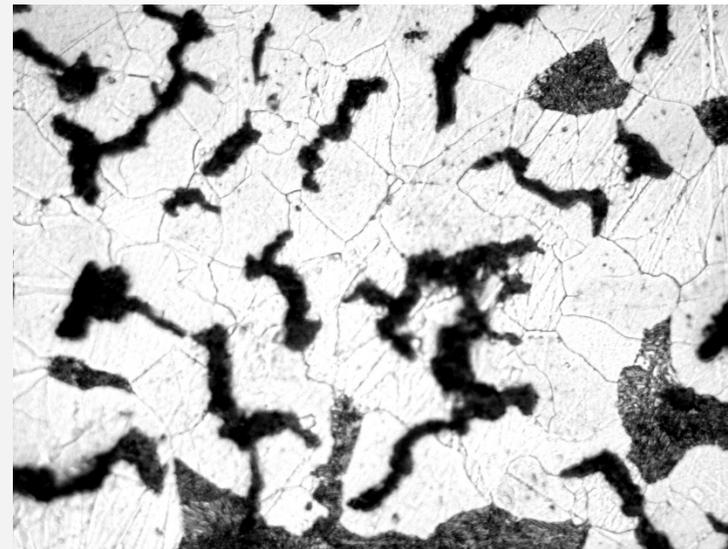
灰铸铁(珠光体+片状石墨)



球墨铸铁(铸态)珠光体+铁素体+球状石墨 400X



可锻铸铁 400X (铁素体+团絮状石墨)



蠕墨铸铁 (铁素体+蠕虫状石墨) 400X

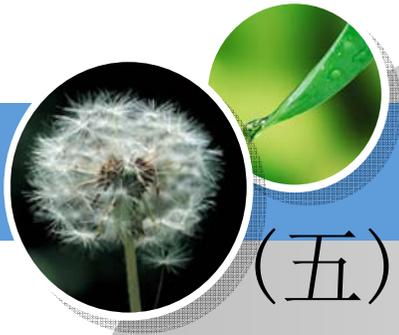


## (四)、珠光体 (P)

➤ 定义: F与  $\text{Fe}_3\text{C}$  所形成的机械混合物, 为层片状机械混合物, (平均含碳量: 0.77%)  $P = F + \text{Fe}_3\text{C}$ ,

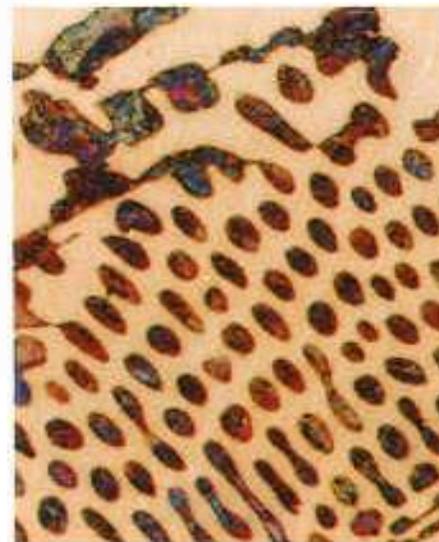
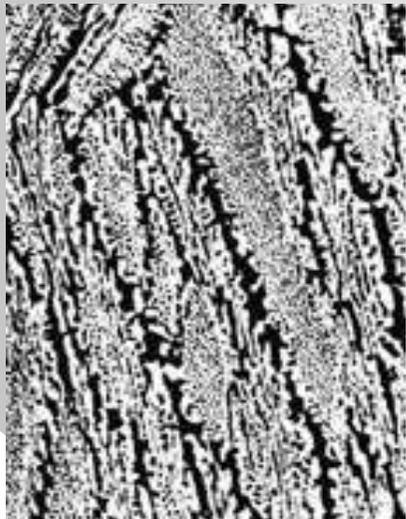
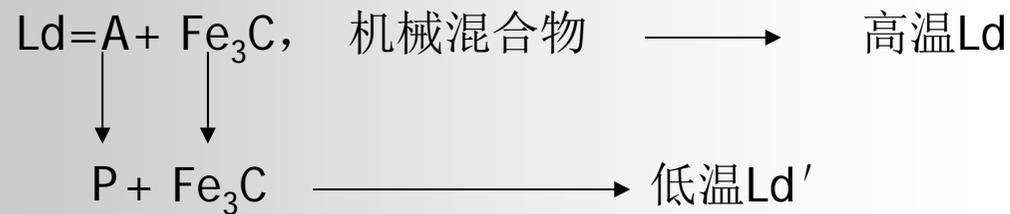
➤ 性能:  $\sigma_b \approx 750\text{MPa}$      $\text{HBS} = 180$      $\delta \approx 20\% \sim 25\%$      $a_k = 30 \sim 40\text{J/cm}^2$  综合性能 ↑





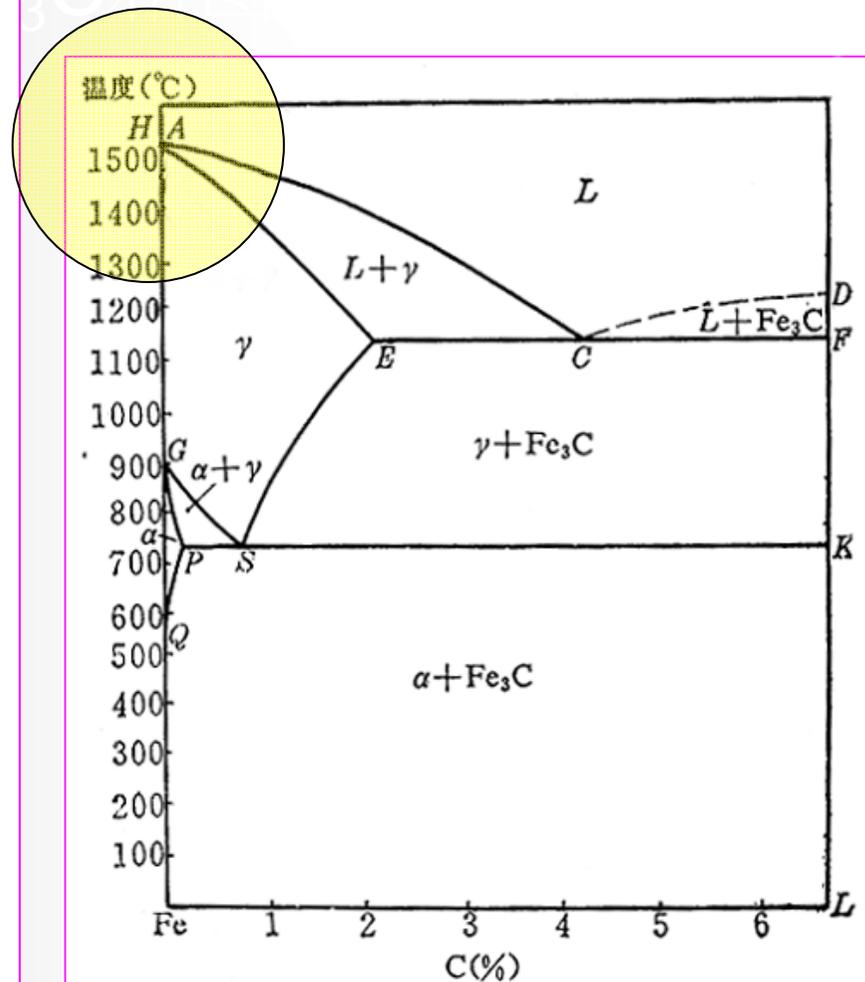
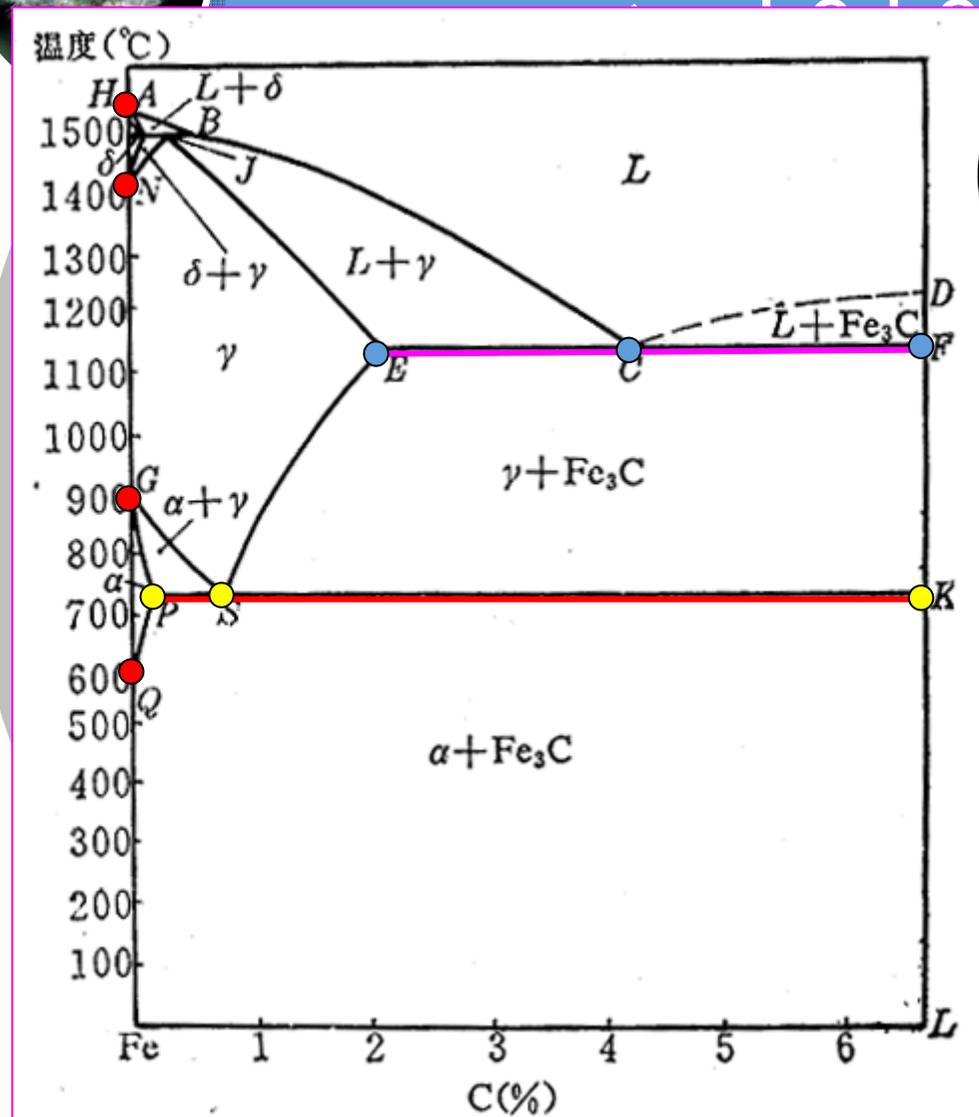
## (五)、莱氏体 ( $L_d$ 、 $L'_d$ 或 $L_e$ 、 $L'_e$ )

- 定义：A与  $Fe_3C$  所形成的机械混合物（平均含碳量：4.3%）
- 性能：硬而脆

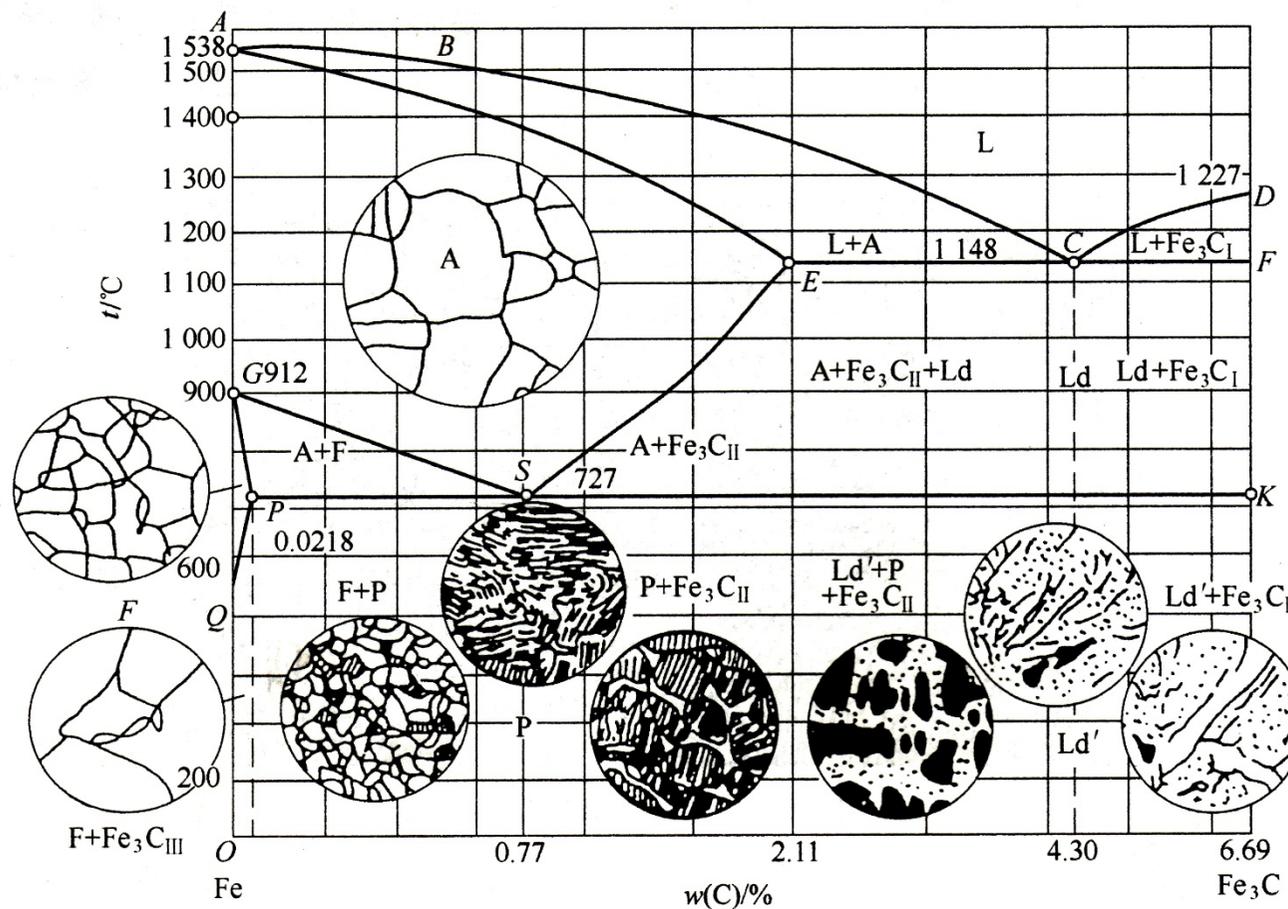


## 二 铁碳合金相图分析

### Fe-Fe<sub>3</sub>C相图



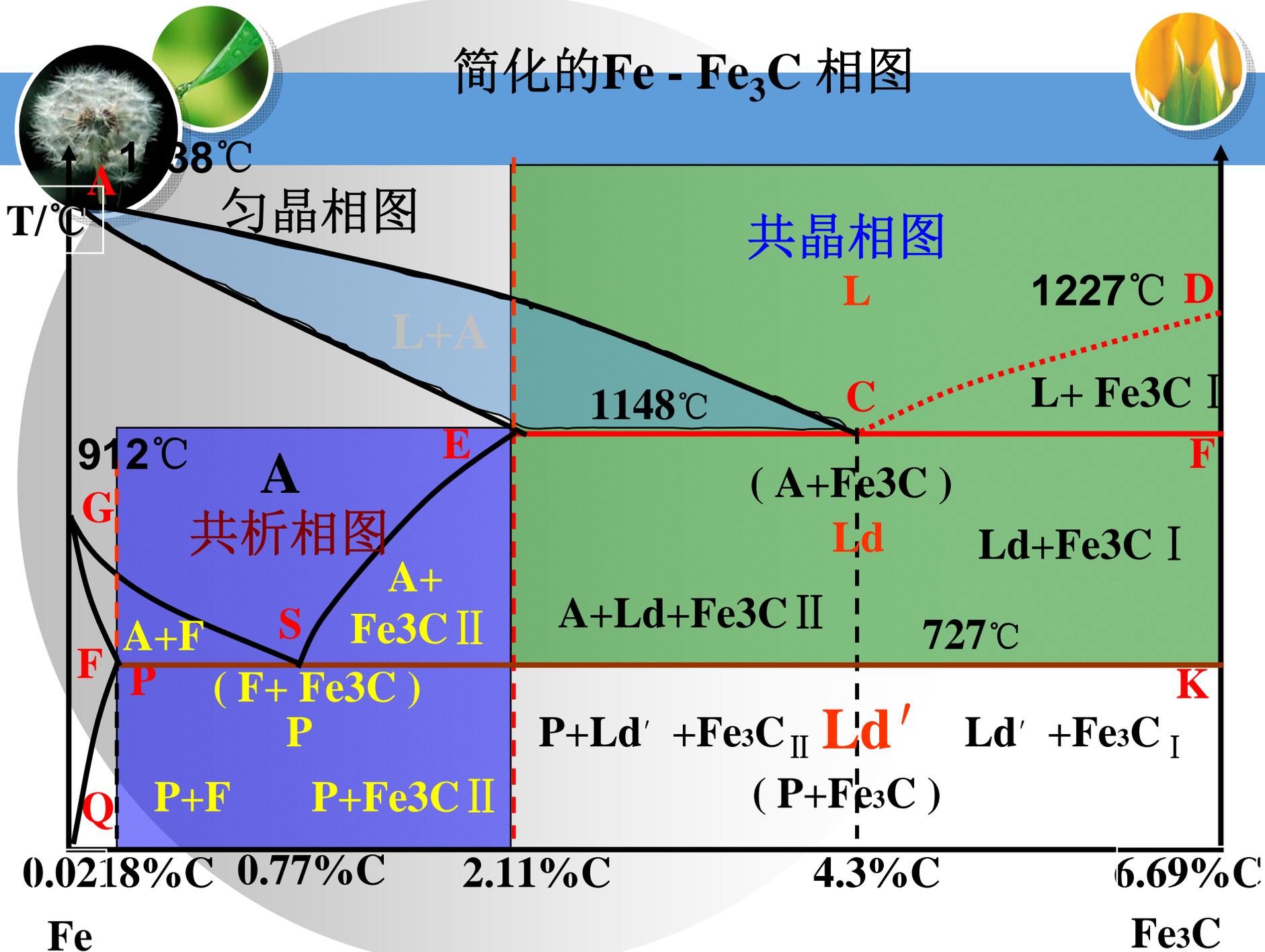
简化相图



Fe-Fe<sub>3</sub>C 状态图

# 简化相图

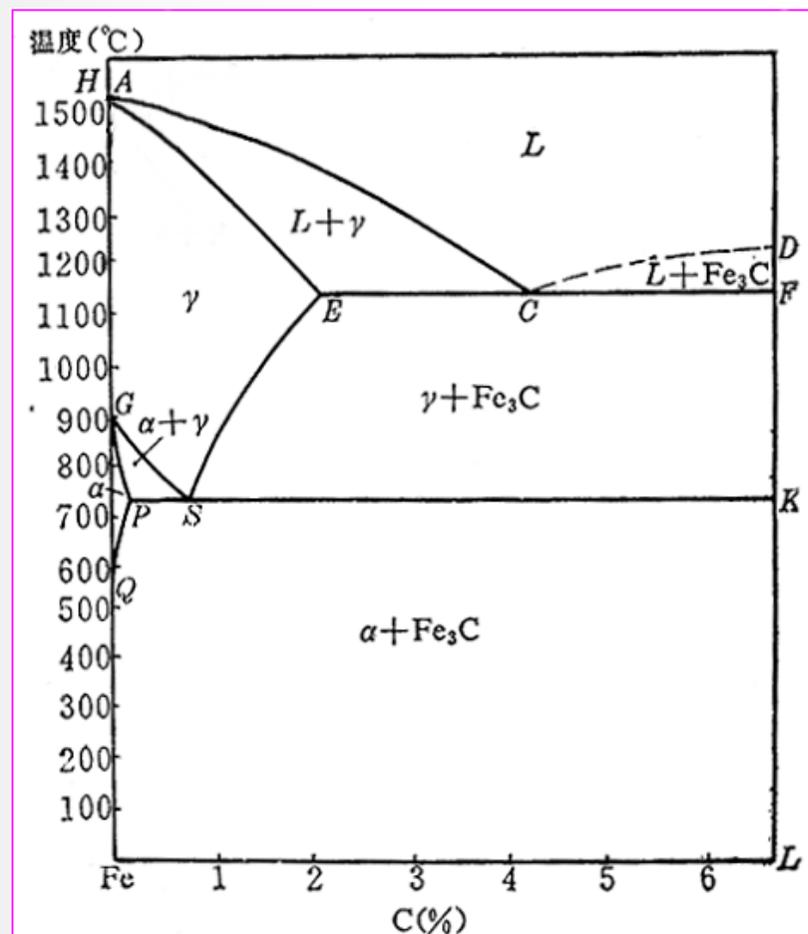
# 简化的Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图





## Fe-Fe<sub>3</sub>C相图分析

- ❖ 点: A、G、Q、D;  
E、P; C、S
- ❖ 线: ACD、AECF;  
ECF、PSK;  
ES、PQ;  
AE、GS;
- ❖ 区: 单相区  
两相区  
三相区



简化相图



### ❖ ACDEFGSPQ 的意义

符号	温度/°C	C%	说 明
A	1538	0	纯铁的熔点
C	1148	4.3	共晶点
D	1227	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.11	碳在 $\gamma$ -Fe中的最大溶解度
F	1148	6.69	渗碳体的成分
G	912	0	$\alpha$ -Fe $\leftrightarrow$ $\gamma$ -Fe的转变温度 ( $A_3$ )
K	727	6.69	渗碳体的成分
P	727	0.0218	碳在 $\alpha$ -Fe中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点 ( $A_1$ )
Q	室温	0.0008	室温下碳在 $\alpha$ -Fe中的溶解度



## (二) Fe-Fe<sub>3</sub>C相图中的特性线

### 1、液、固相线

液相线：ACD; [查看](#)

固相线：AEFCF [查看](#)

### 2、两条水平线

① ECF线：共晶线 (1148°C)

莱氏体 (ledeburite), 符号: L<sub>d</sub>

共晶反应:  $L_c \xrightleftharpoons{1148^\circ\text{C}} \gamma_E + \text{Fe}_3\text{C}$

[查看](#)

② PSK线：共析线 (727°C), 又标记为A<sub>1</sub>线

[查看](#)

共析反应:

$\gamma_s \xrightleftharpoons{727^\circ\text{C}} \alpha_p + \text{Fe}_3\text{C}$

珠光体 (pearlite), 符号: P



### 3、三条固态转变线

①GS线:

[查看](#)

$\overset{\text{加热}}{\gamma} \rightleftharpoons \alpha \overset{\text{冷却}}{\rightleftharpoons}$  转变温度线, 又标记为A<sub>3</sub>线

②ES线: 碳在奥氏体 ( $\gamma$ ) 中的固溶度曲线, 又标记为A<sub>cm</sub>线

$\overset{\text{加热}}{\gamma} \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} \overset{\text{冷却}}{\rightleftharpoons}$

[查看](#)

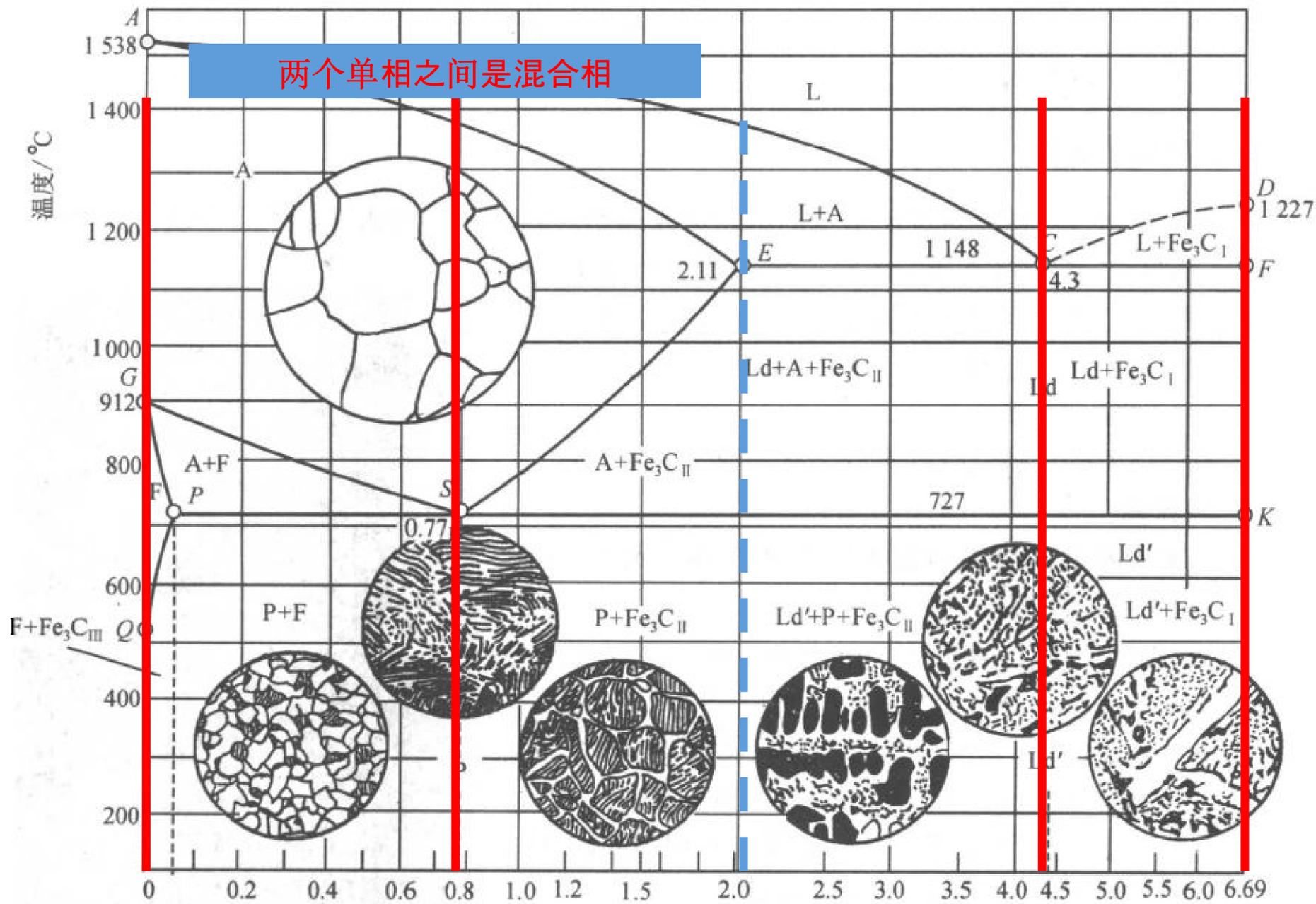
③PQ线: 碳在铁素体 ( $\alpha$ ) 中的固溶度曲线

$\overset{\text{加热}}{\alpha} \rightleftharpoons \text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}} \overset{\text{冷却}}{\rightleftharpoons}$

[查看](#)

### 五种形态不同的渗碳体:

- 一次渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$ ): 从液相中析出的渗碳体。
- 共晶渗碳体: 共晶反应中生成的渗碳体。
- 二次渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ): 从奥氏体中析出的渗碳体。
- 共析渗碳体: 共析反应中生成的渗碳体。
- 三次渗碳体 ( $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ ): 从铁素体中析出的渗碳体。



两个单相之间是混合相

铁素体

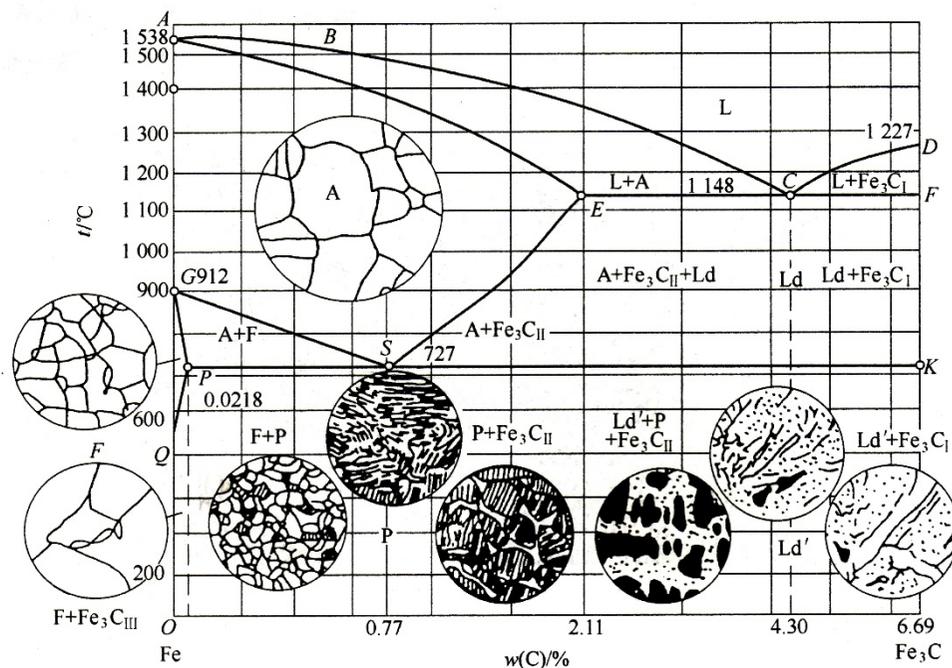
珠光体

钢铁分界线

$w_c/\%$  莱氏体

渗碳体

图 1-15 铁碳合金状态图



Fe-Fe<sub>3</sub>C 状态图

铁碳合金状态图中各主要相区的组织组成物

范 围	组 织	相 区
ACD 线以上	L	单相区
AESGA	A	单相区
AECA	L+A	两相区
DFCD	L+Fe <sub>3</sub> C <sub>I</sub>	两相区
GSPG	A+F	两相区
ESKF	A+Fe <sub>3</sub> C	两相区
PSK 以下	F+Fe <sub>3</sub> C	两相区



### 三、典型合金的结晶过程

#### 铁碳合金

根据相图，将Fe-C合金分为3大类7种

**工业纯铁**：<0.0218%C，

**钢**（0.0218~2.11%）：

亚共析钢（0.0218~0.77%）

共析钢（0.77%）

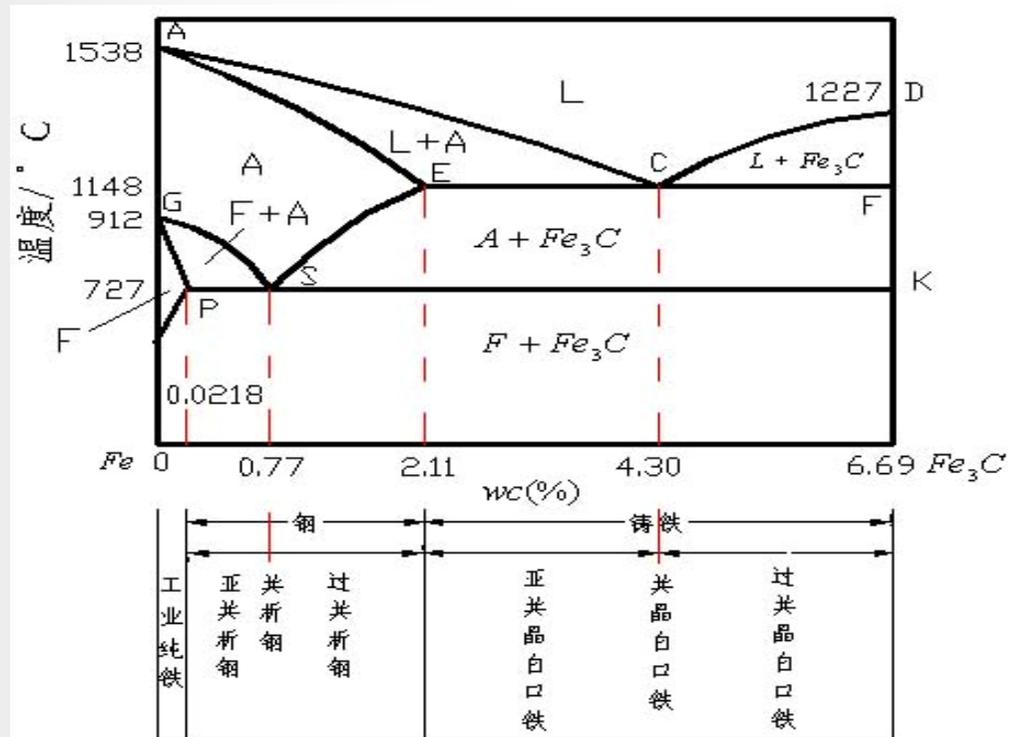
过共析钢（0.77%~2.11%）

**铸铁**（2.11~6.69%）

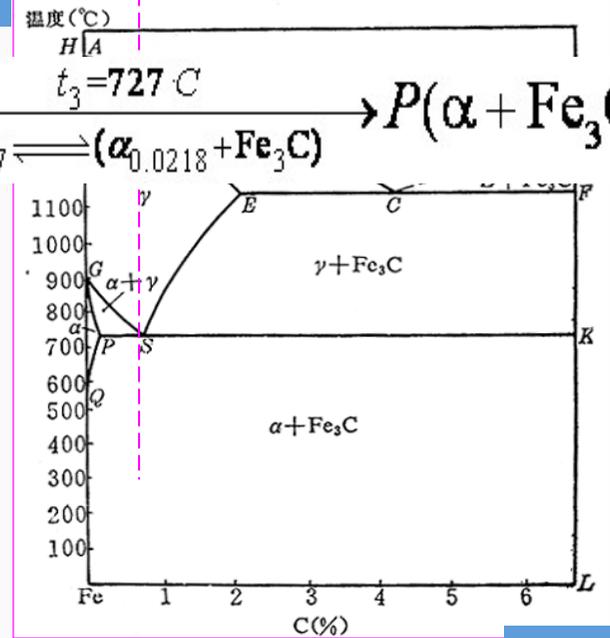
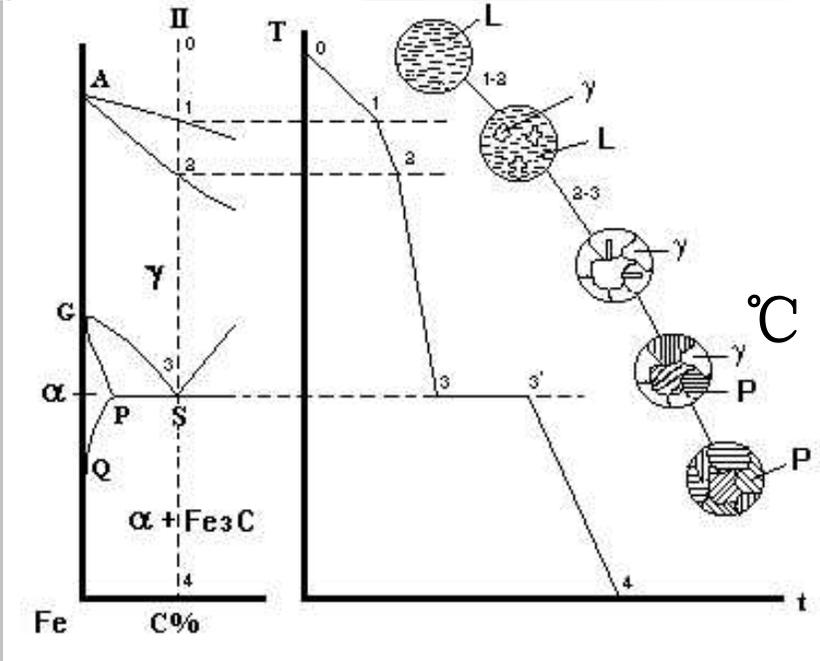
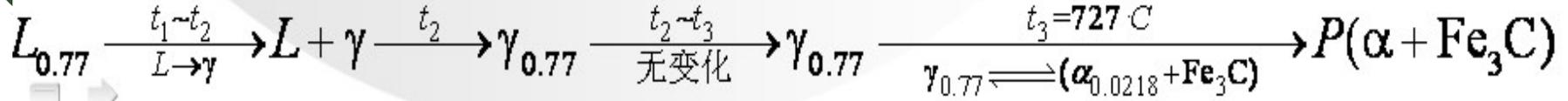
亚共晶铸铁（2.11~4.3%）

共晶铸铁（4.30%）

过共晶铸铁（4.30~6.69%）



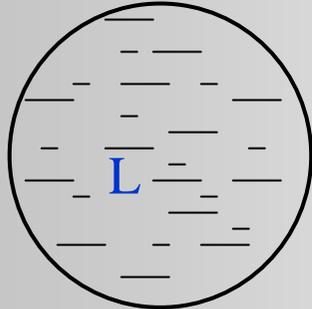
# 共析钢的结晶过程



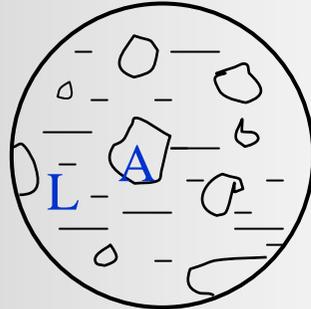
显微组织

共析转变产物称为**珠光体**，用**P**表示。

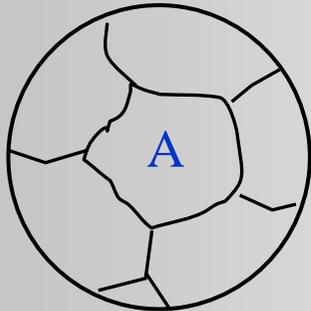
即  $P = F_{\text{共析}} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{共析}}$



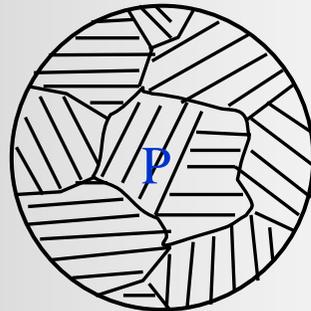
> 1



1~2

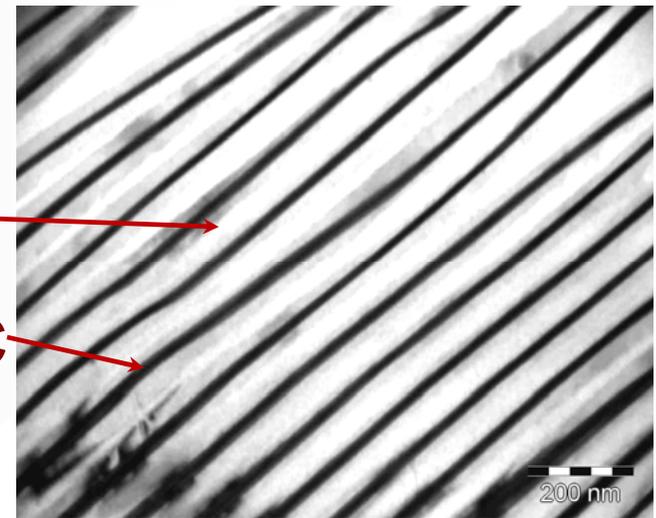
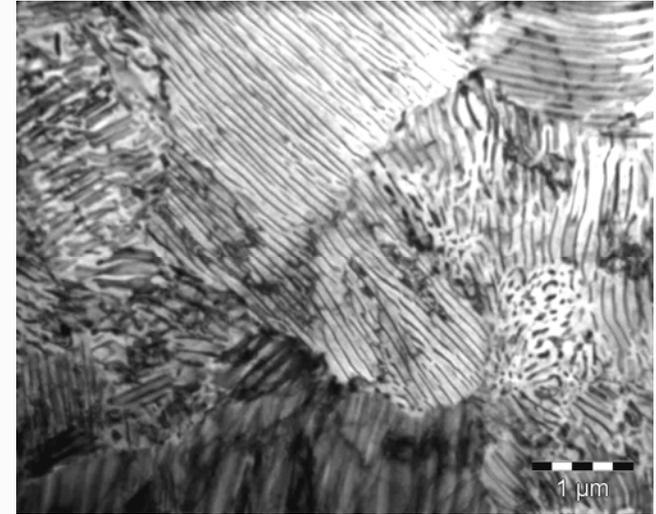


2~3



< 3

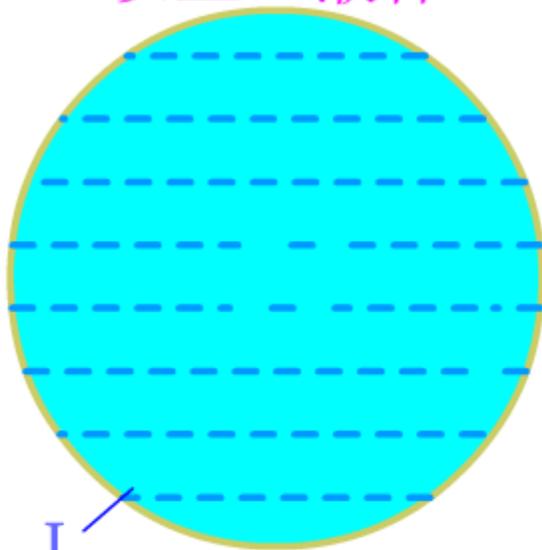
共析钢结晶过程



共析钢的室温组织P

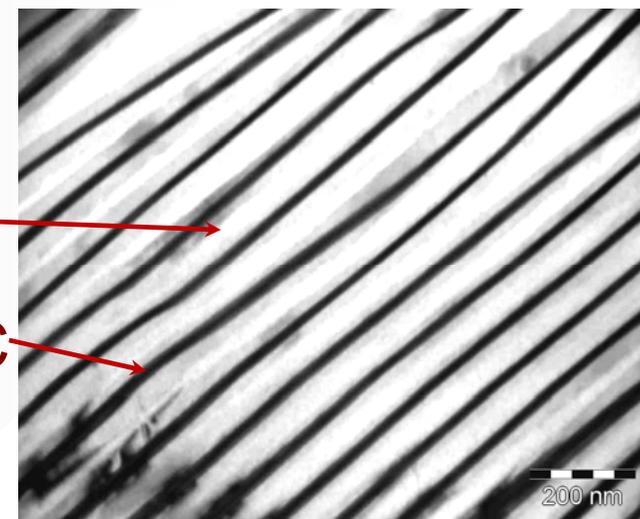
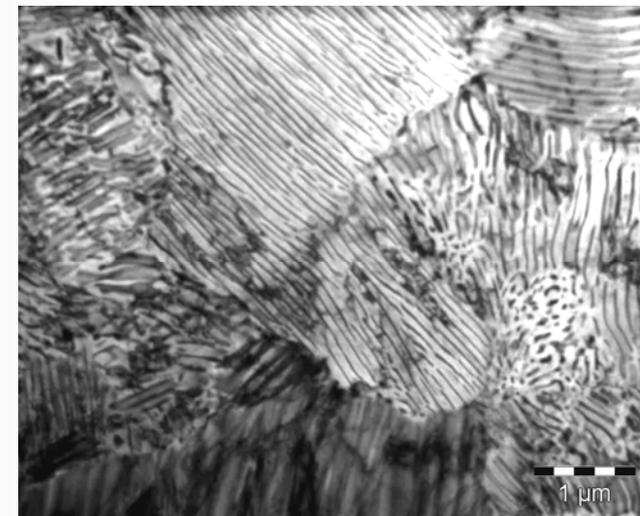


1以上: 液体L



L

1-2:  $L \rightarrow (A+L)$



P { F  
Fe<sub>3</sub>C

共析钢的室温组织P



相组成:  $\alpha + Fe_3C$

共析钢 ( $W_c = 0.77\%$ )

组织组成: P

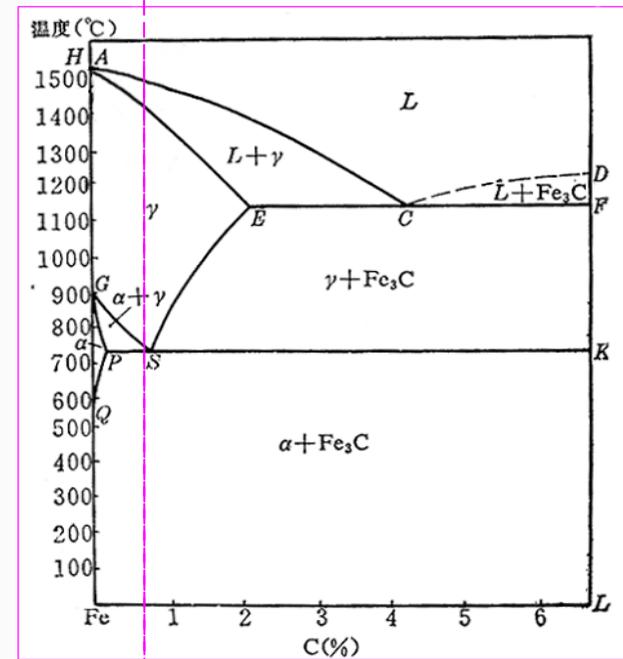
组织  
计算:

$$Fe_3C\% = Fe_3C_{共析}\% = \frac{0.77 - 0.0218}{6.69 - 0.0218} \times 100\% = 11.2\%$$

$$F\% = F_{共析}\% = \frac{6.69 - 0.77}{6.69 - 0.0218} \times 100\% = 88.8\%$$

室温  
组织

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{共析}\% = \frac{6.69 - 0.77}{6.69 - 0.0008} \times 100\% \\ \approx \frac{6.69 - 0.77}{6.69} \times 100\% = 88.5\% \\ Fe_3C_{共析}\% = 1 - 88.5\% = 11.5\% \end{array} \right.$$

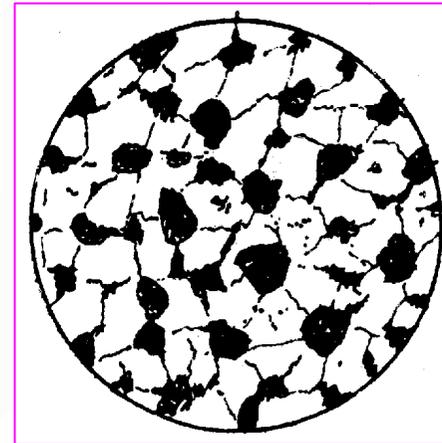
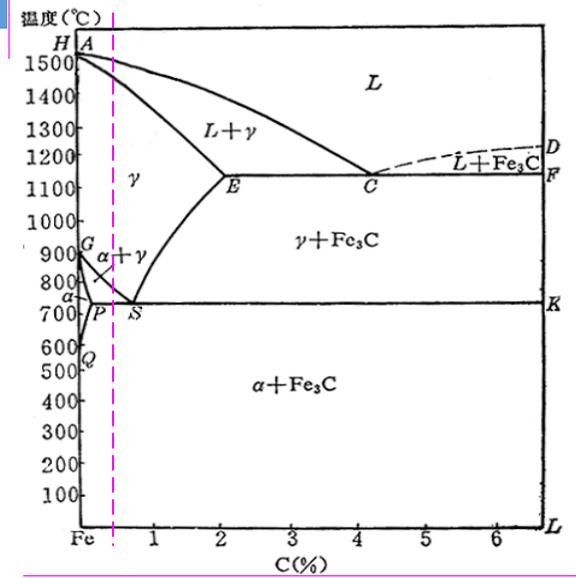
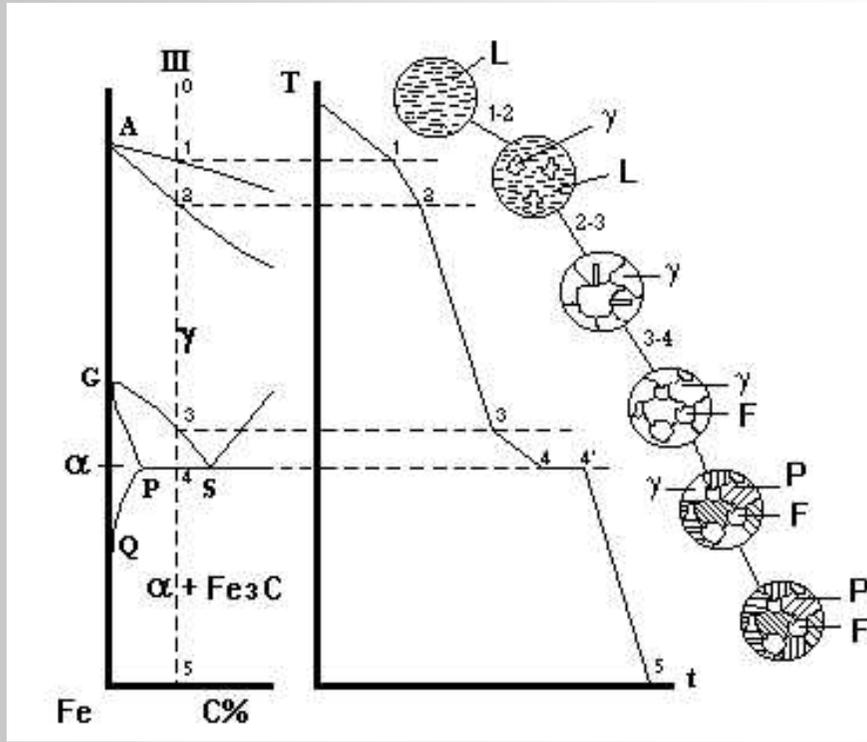




奥氏体转变为珠光体

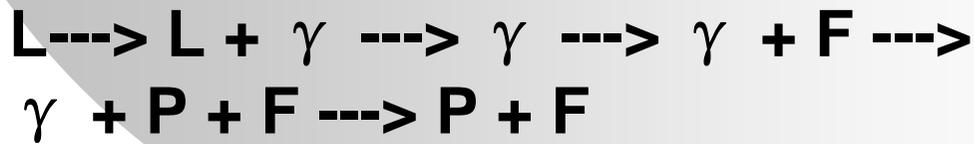


亚共析钢的结晶过程:



显微组织

亚共析钢结晶过程:





## 亚共析钢 ( $W_C = 0.45\%$ )



相组成:  $\alpha + Fe_3C$

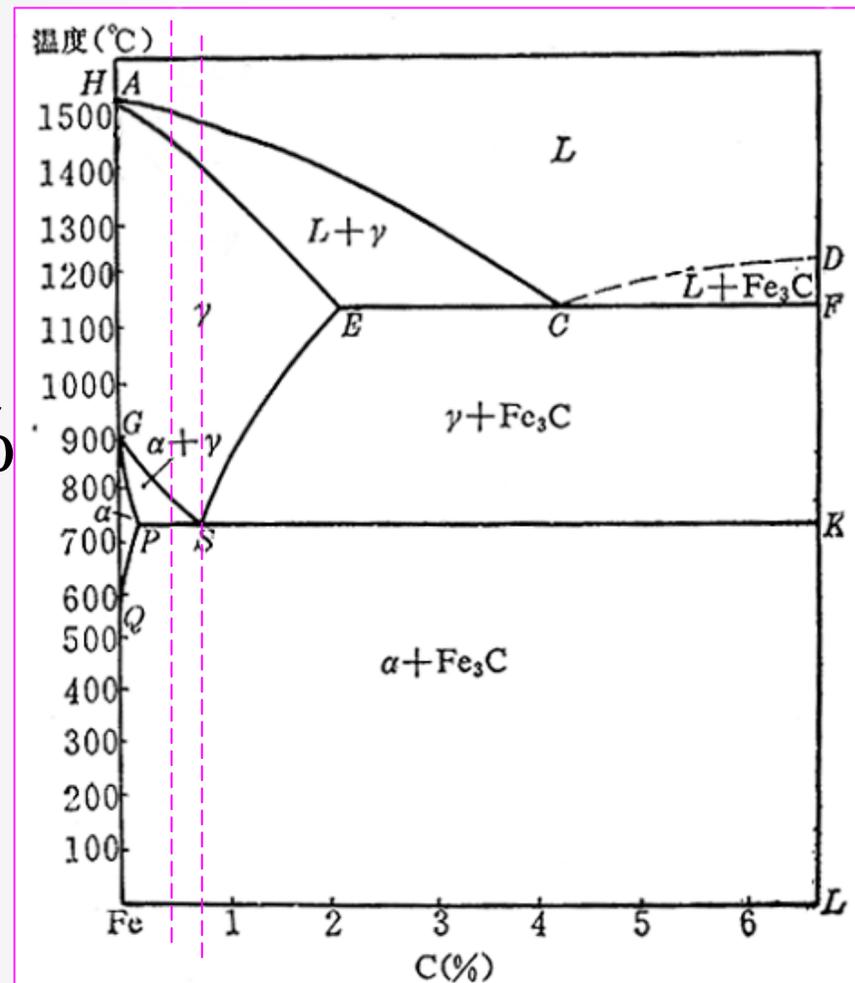
$$\alpha\% \approx \frac{6.69 - 0.45}{6.69} \approx 93.3\%$$

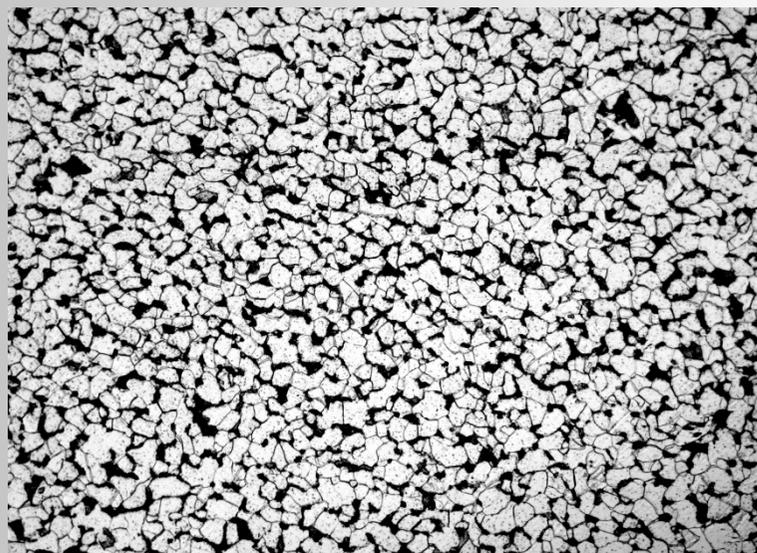
$$Fe_3C\% \approx 1 - 93.3\% \approx 6.7\%$$

组织组成:  $\alpha + P$

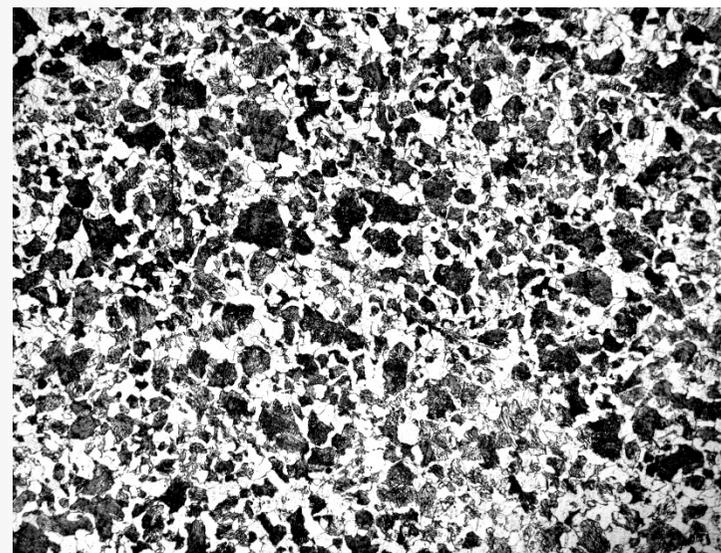
$$\alpha\% \approx \frac{0.77 - 0.45}{0.77} \approx 41.6\%$$

$$P\% \approx 1 - 41.6\% \approx 58.4\%$$





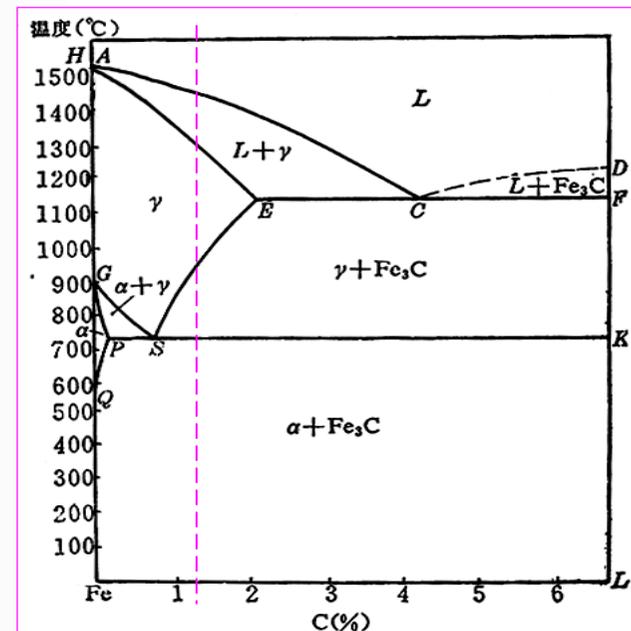
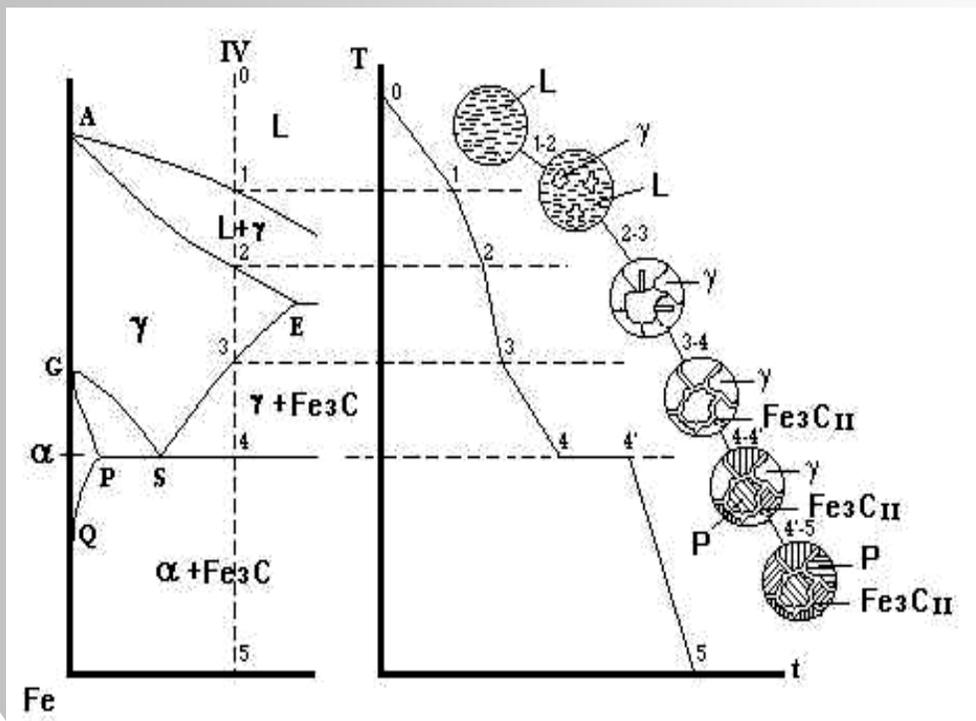
20钢 100X.



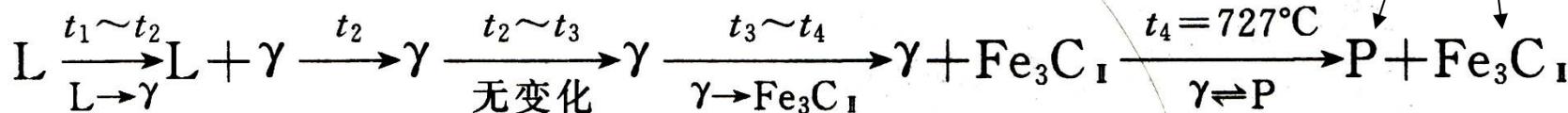
45钢 100X



## 过共析钢的结晶过程:



显微组织





## ❖ 过共析钢的显微组织:

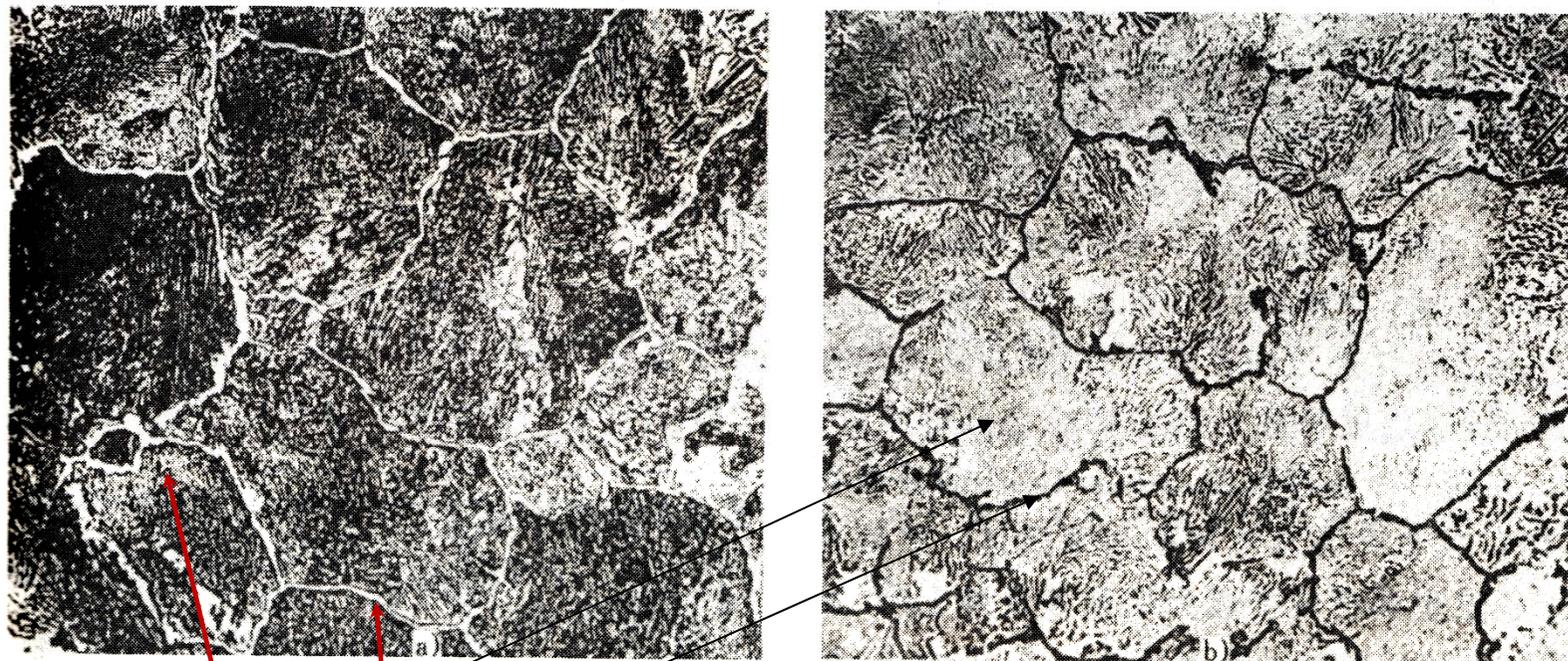


图 5-57  $w_c=1.2\%$  的过共析钢缓冷后的组织 500 $\times$

**P** **Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>**  
a) 硝酸酒精浸蚀, 白色网状相为二次渗碳体, 暗黑色为珠光体  
b) 苦味酸钠浸蚀, 黑色为二次渗碳体, 浅白色为珠光体



室温组织:  $P + Fe_3C_{II}$

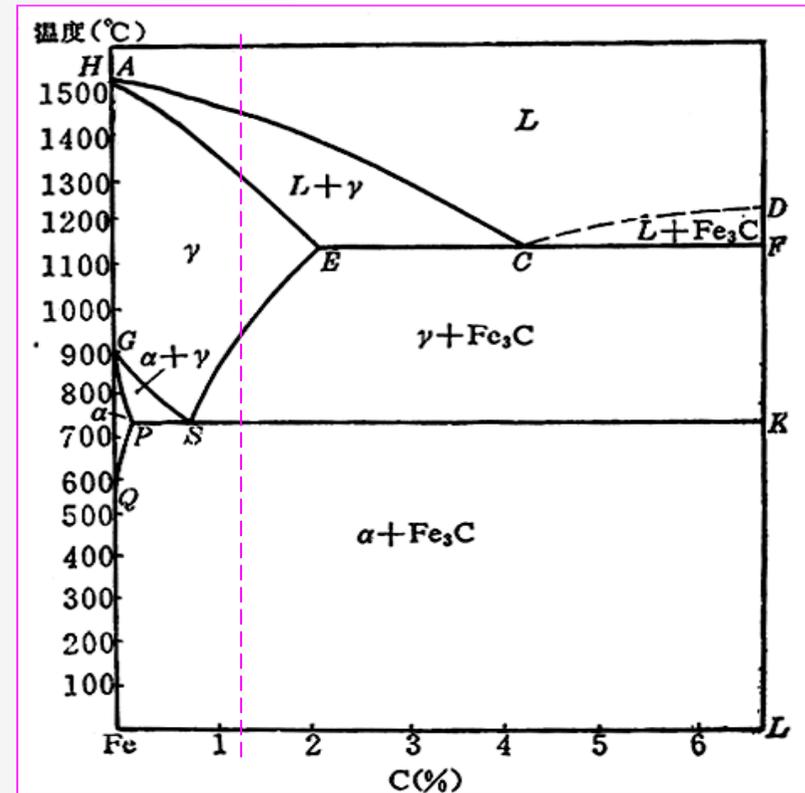
(假定  $w_C = 1.2\%$ )

$$P\% = \frac{6.69 - 1.2}{6.69 - 0.77} \times 100\% = 92.7\%$$

$$Fe_3C_{II}\% = \frac{1.2 - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\% = 7.3\%$$

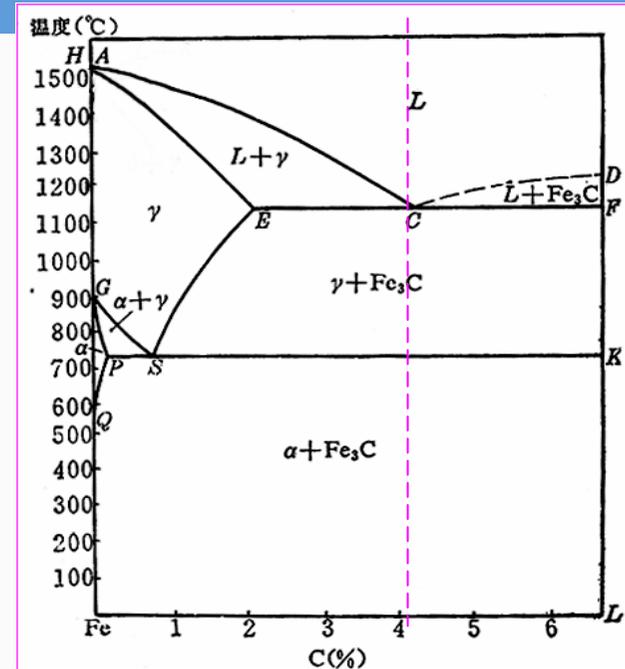
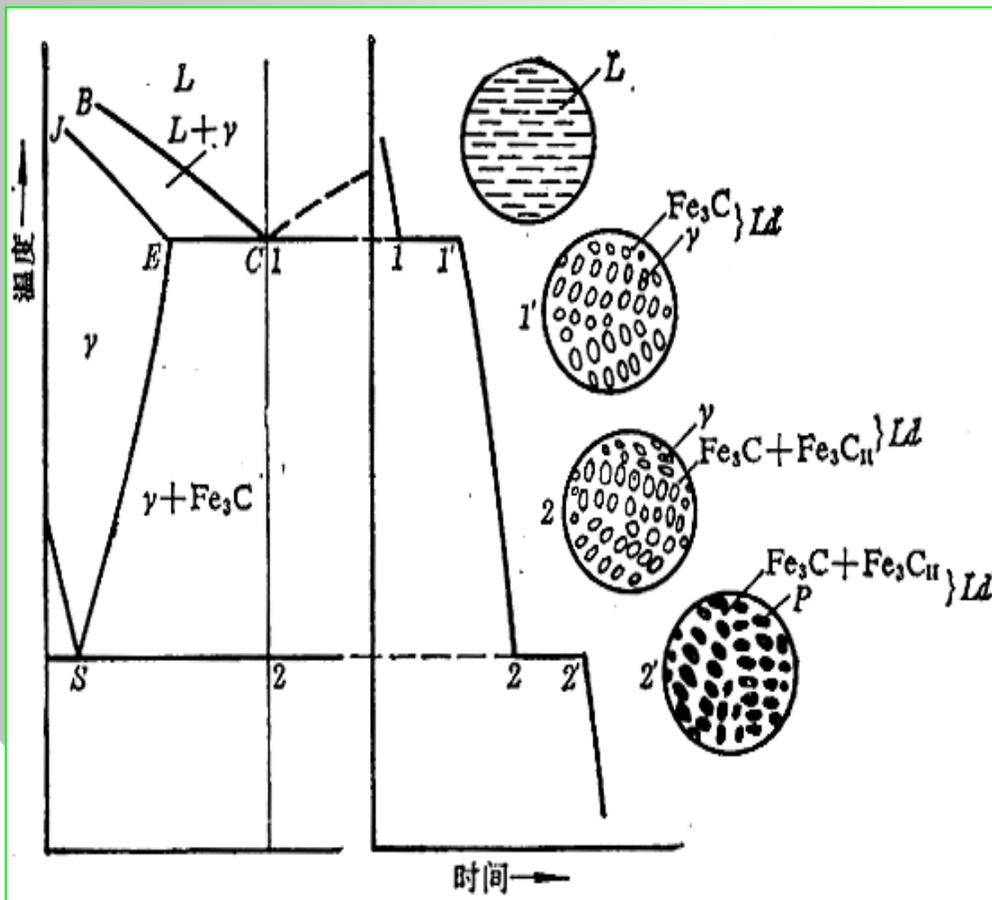
二次渗碳体最大量计算:

$$Fe_3C_{II} = \frac{2.11 - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\% \approx 22.64\%$$

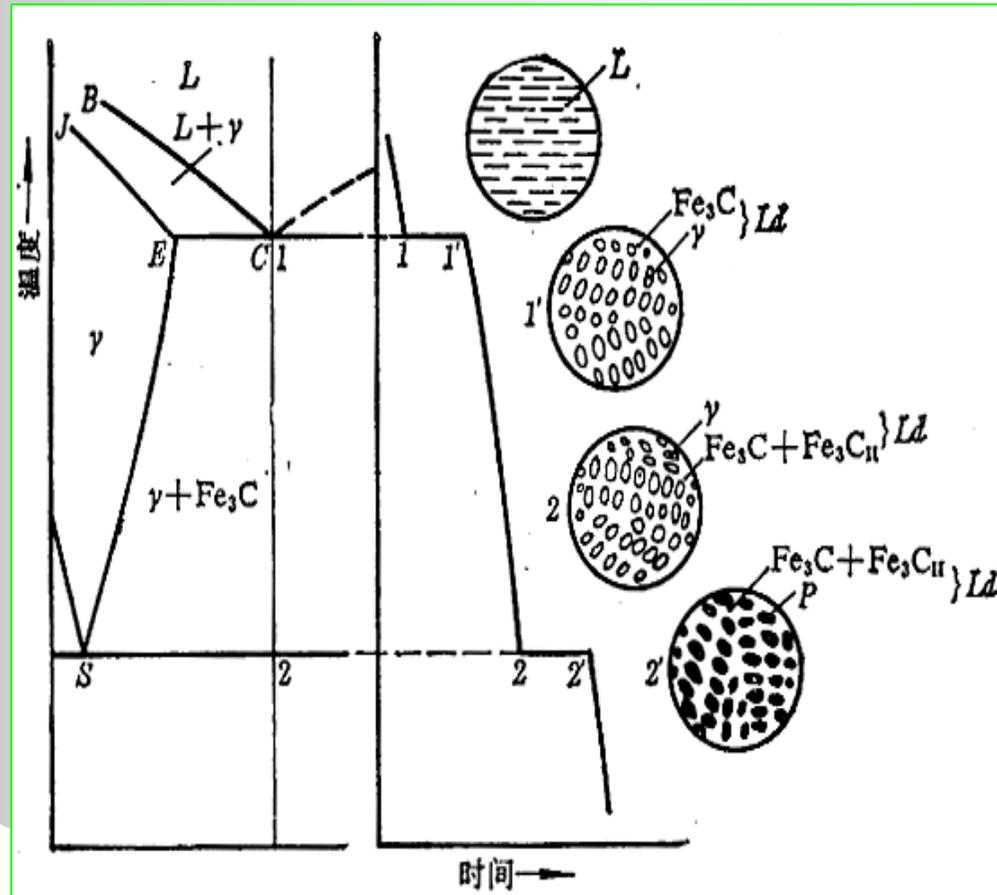
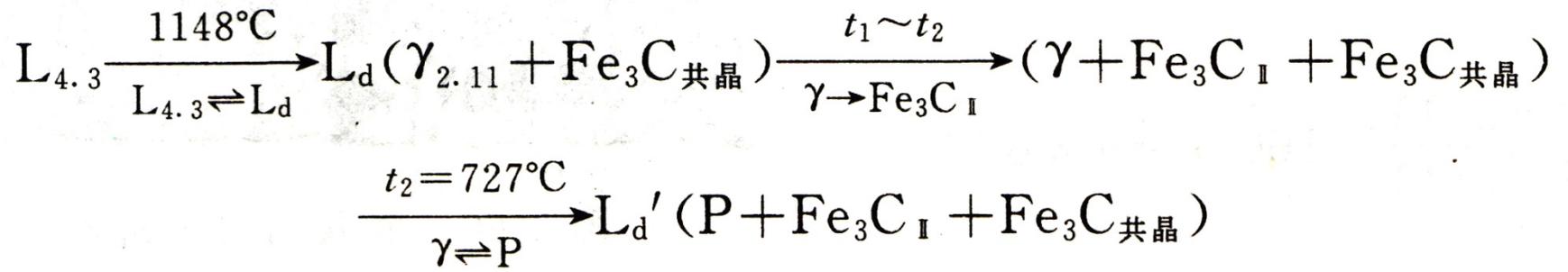
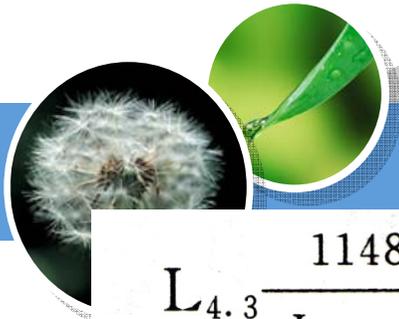




## ❖ 共晶白口铁的结晶过程:



显微组织



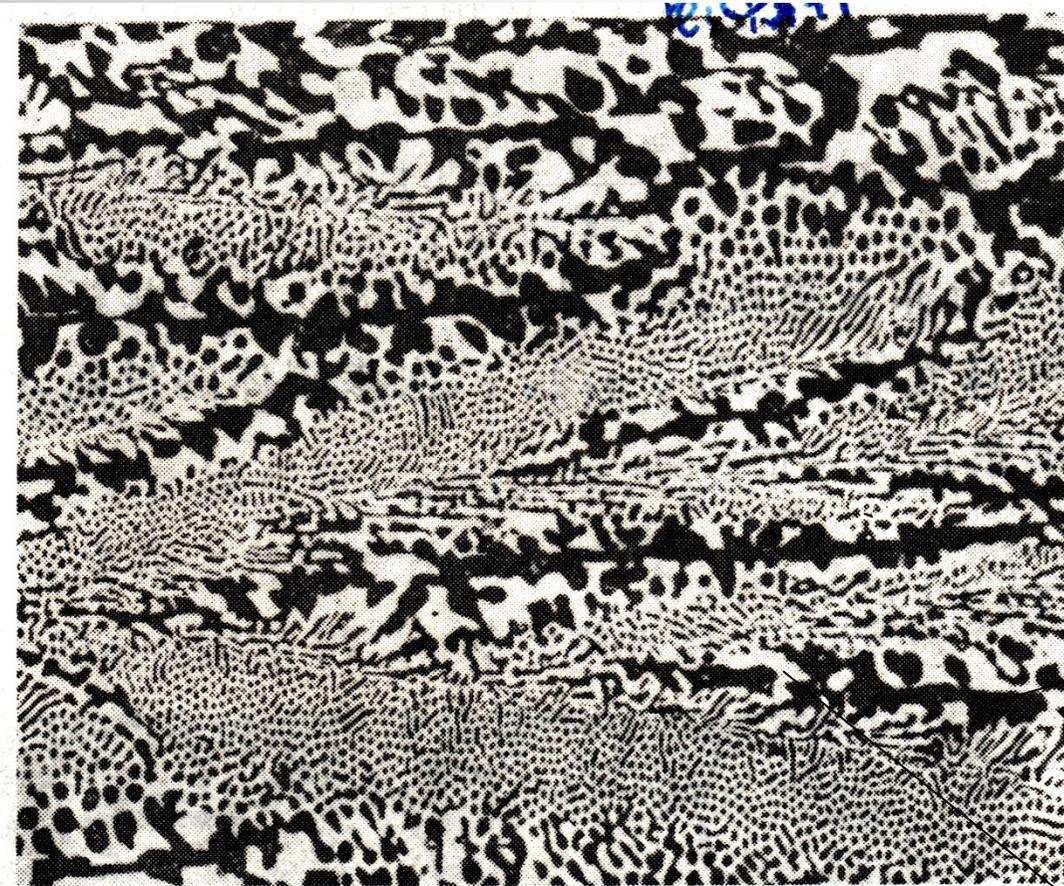


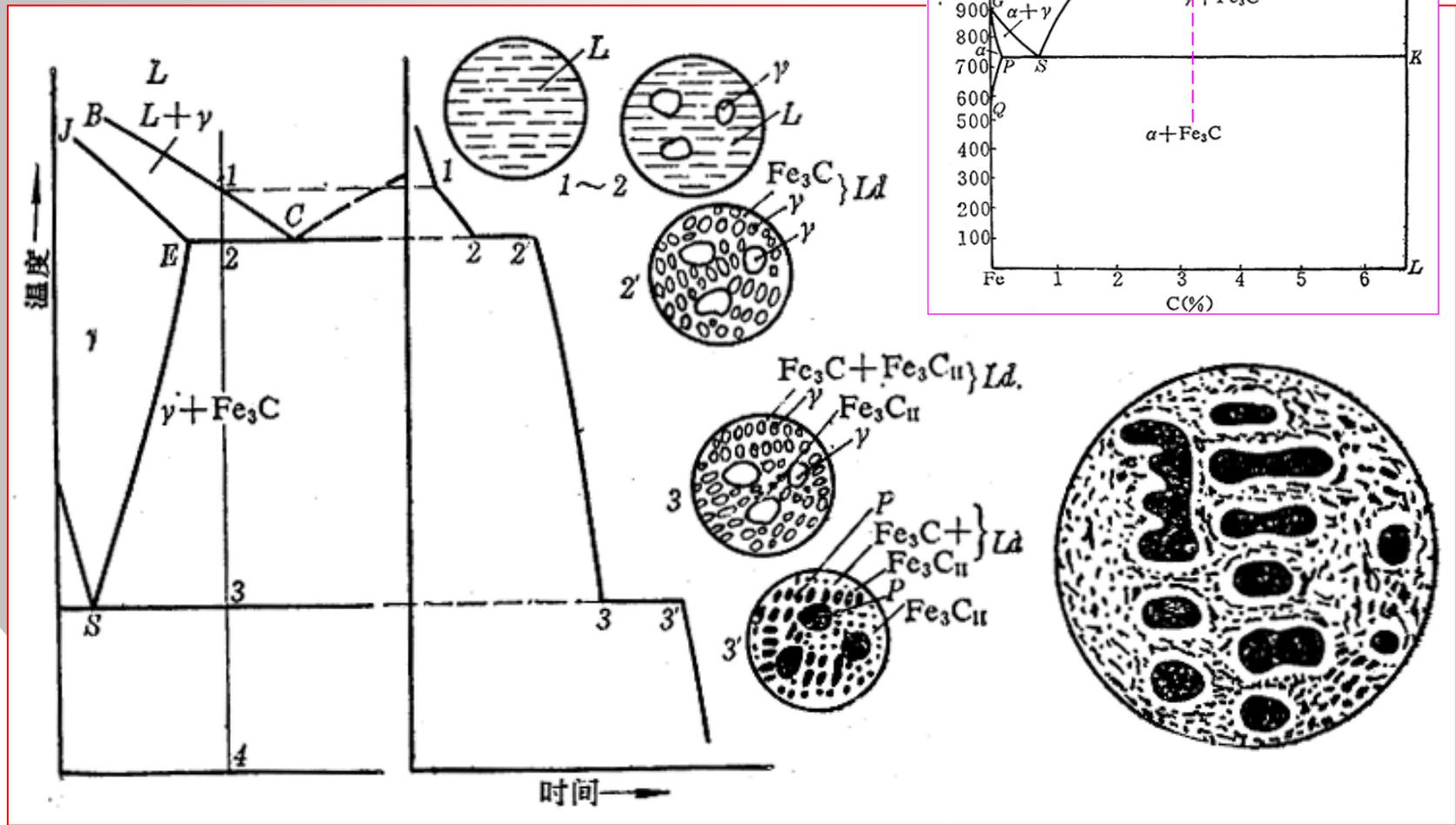
图 5-58 共晶白口铸铁的室温组织（白色基体是共晶渗碳体，黑色颗粒是由共晶奥氏体转变而来的珠光体） 200×

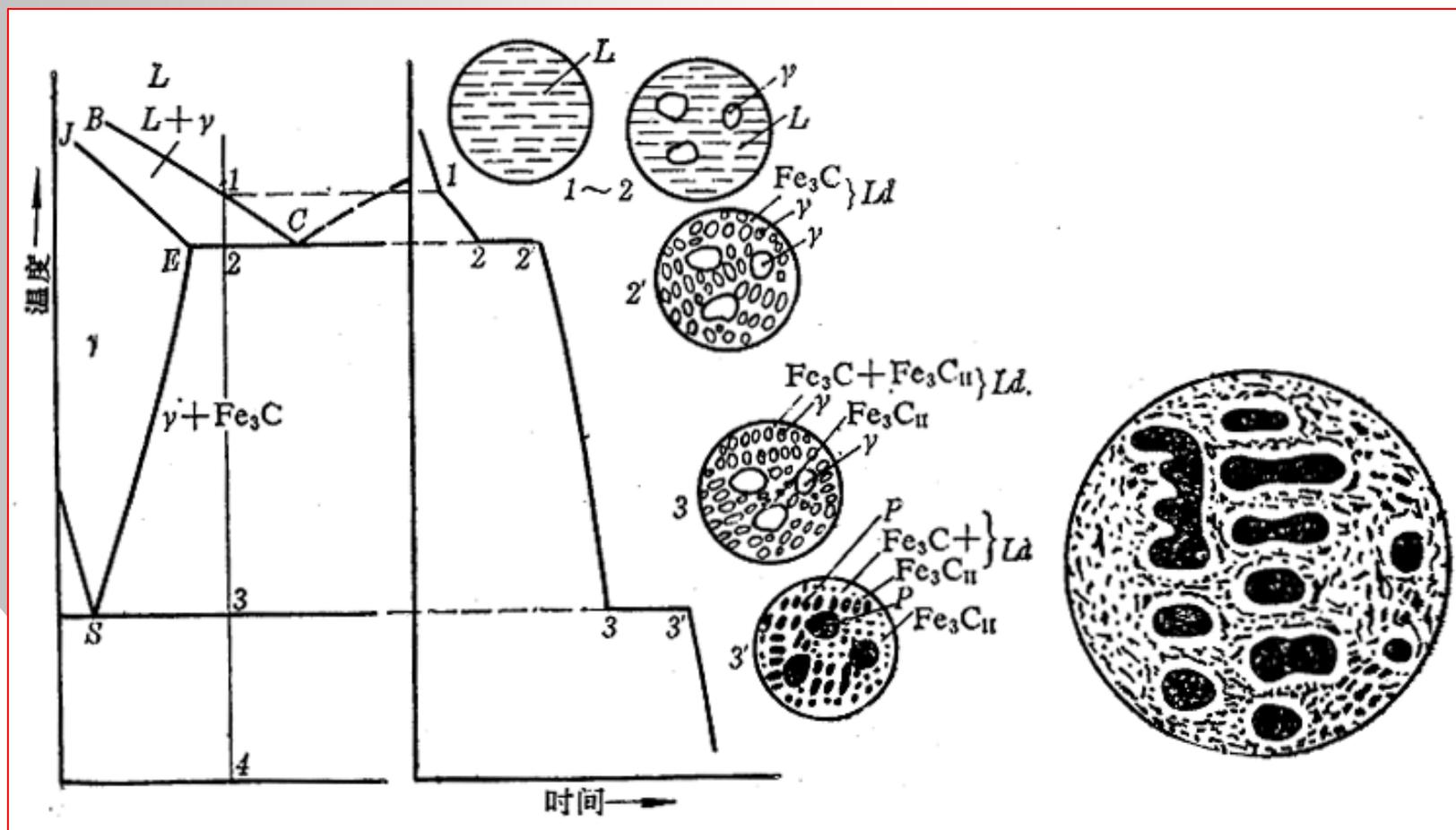
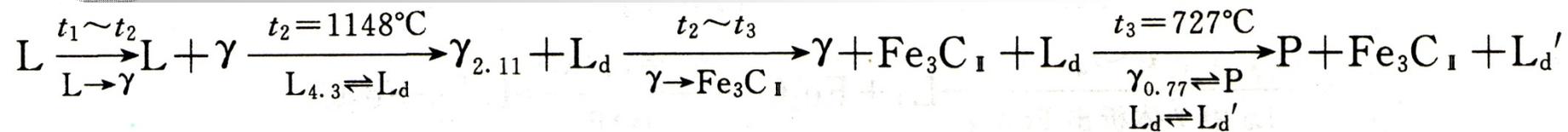
P

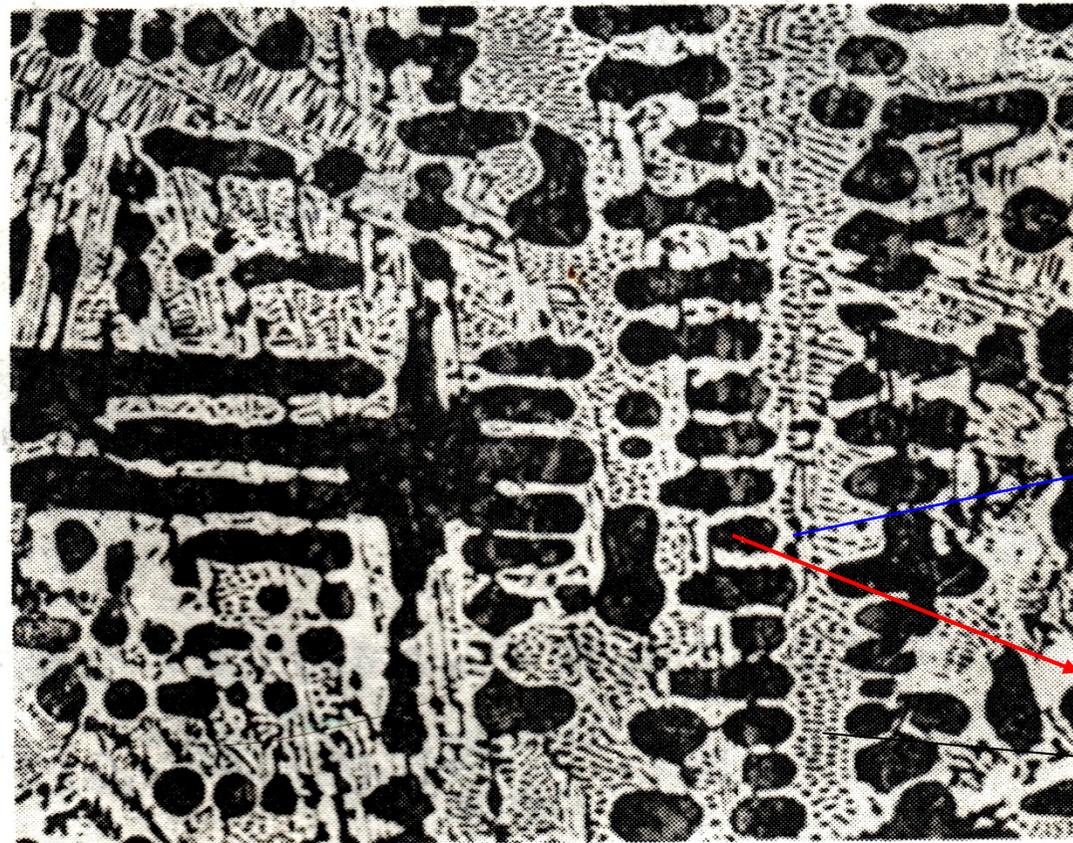
$\text{Fe}_3\text{C}$  共晶



❖ 亚共晶白口铁的结晶过程:





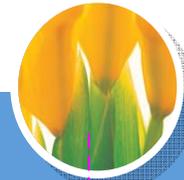


$\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$

P

Ld'

图 5-60 亚共晶白口铸铁在室温下的组织（黑色的树枝状组成体是珠光体，其余为莱氏体） $200\times$



## ❖ 过共晶白口铁的结晶过程:

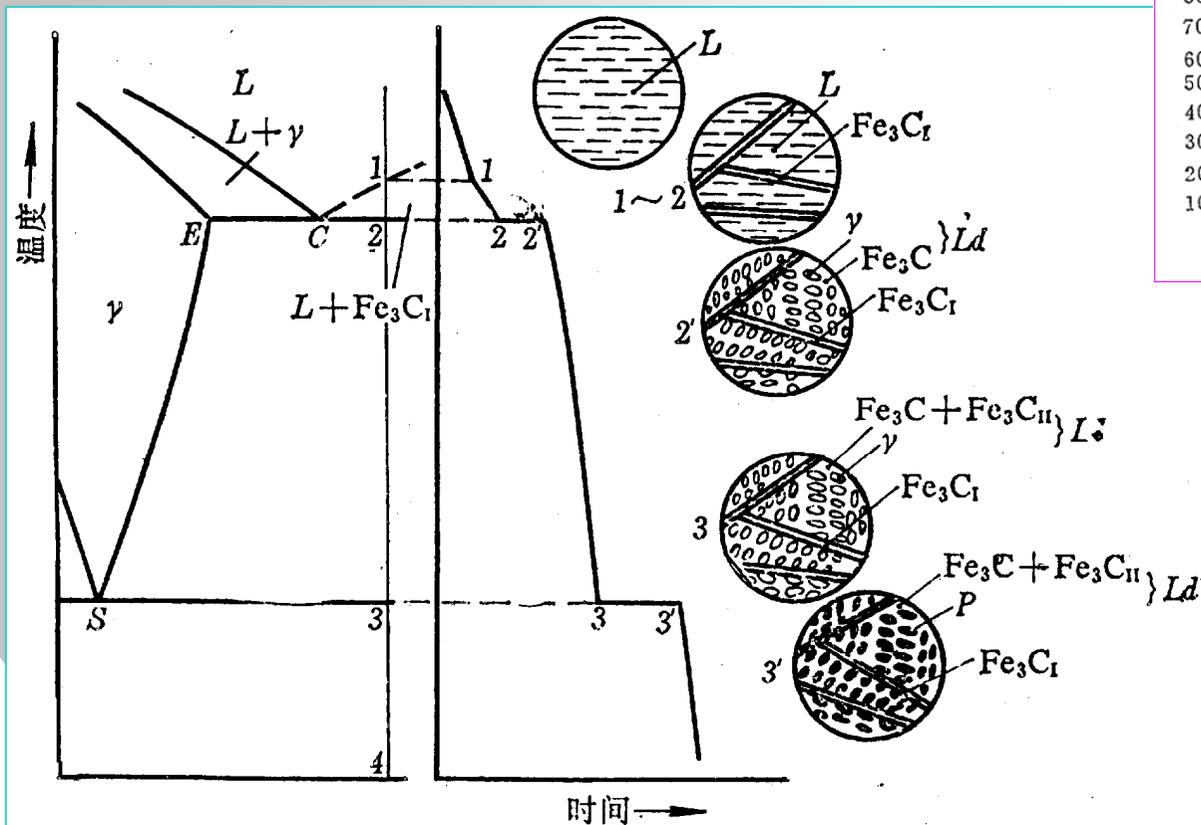


图 5-12 过共晶白口铁结晶过程示意图

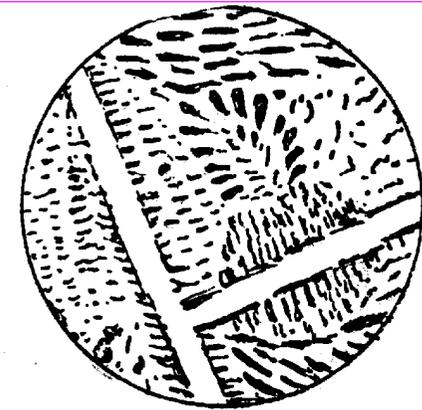
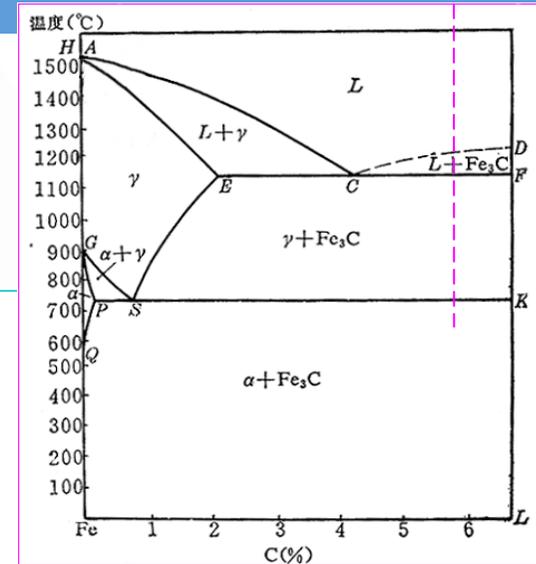


图 5-13 过共晶白口铁显微组织示意图

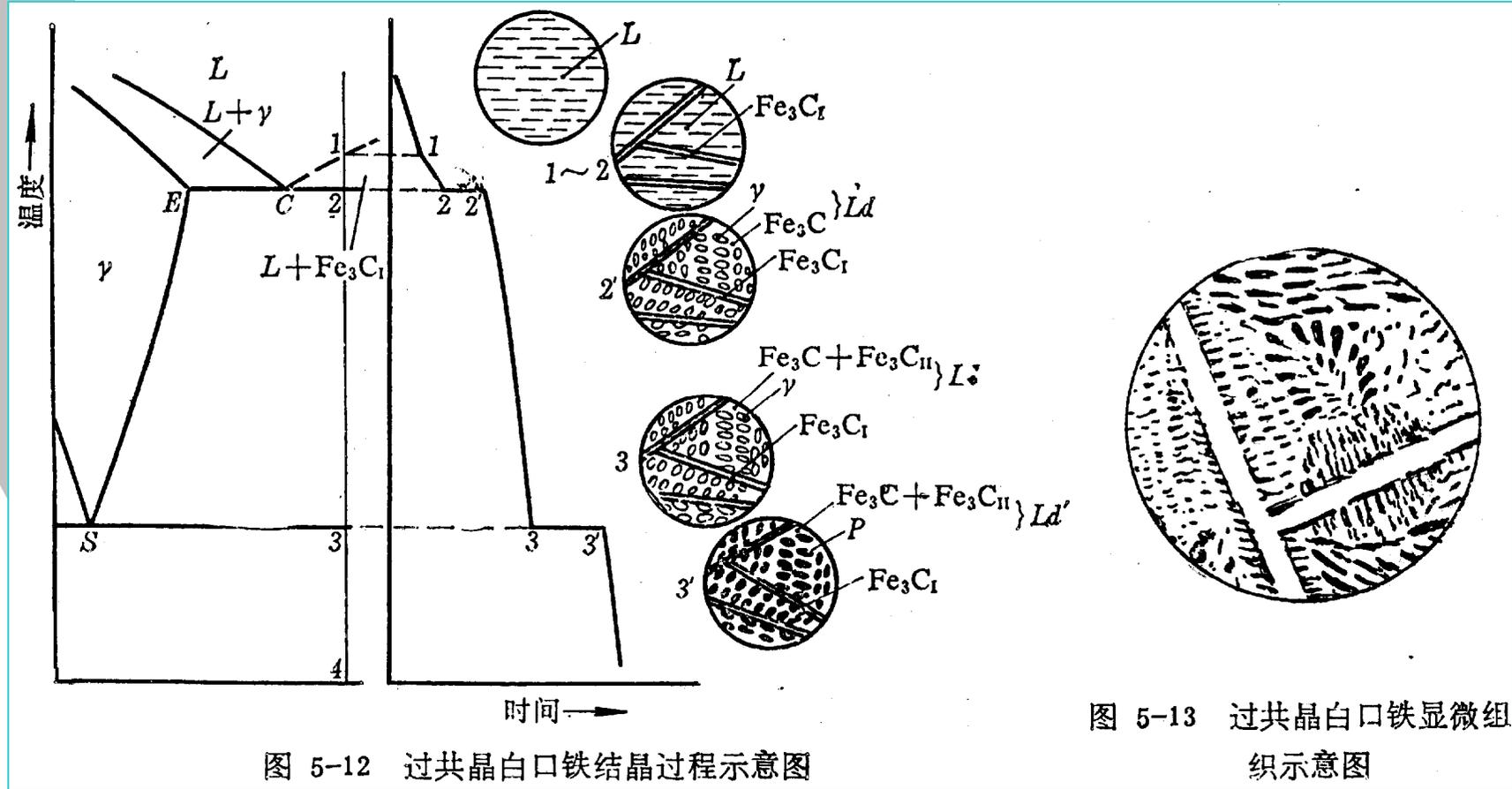
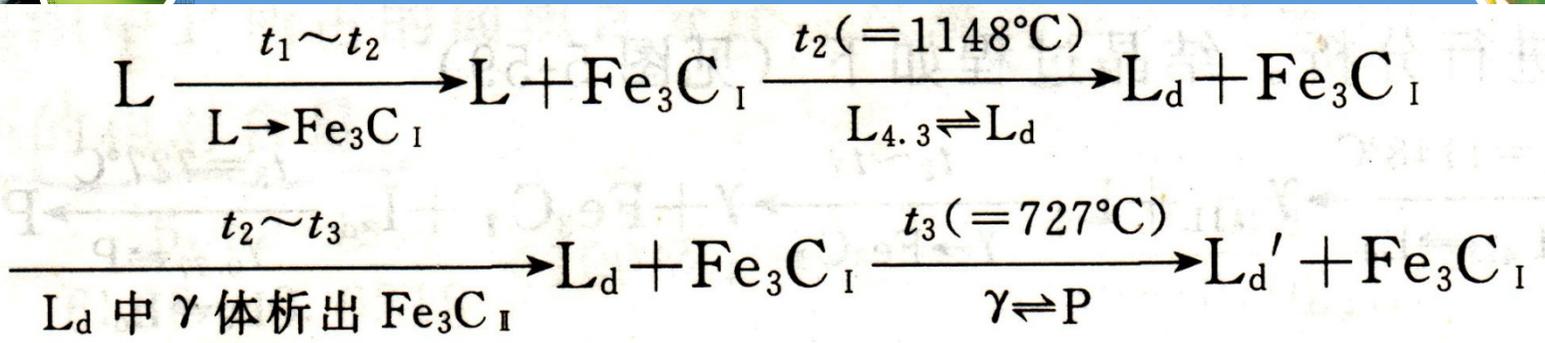


图 5-12 过共晶白口铁结晶过程示意图

图 5-13 过共晶白口铁显微组织示意图



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

$\text{Ld}'$

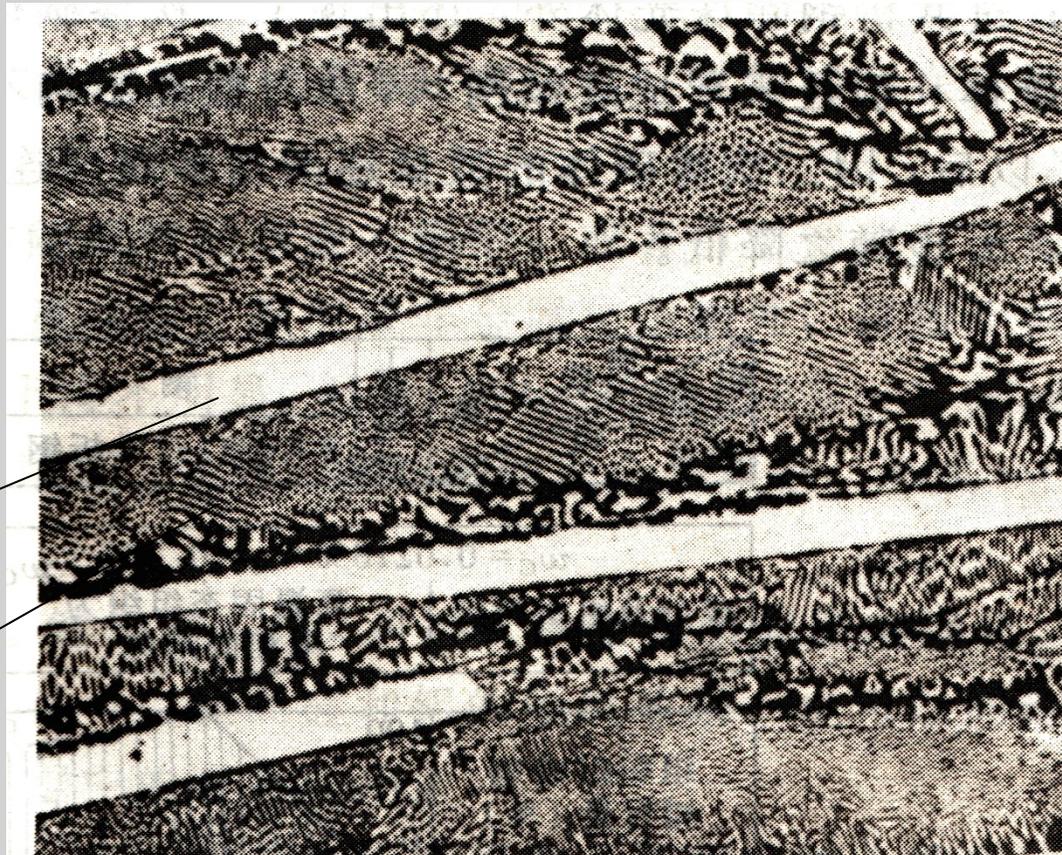
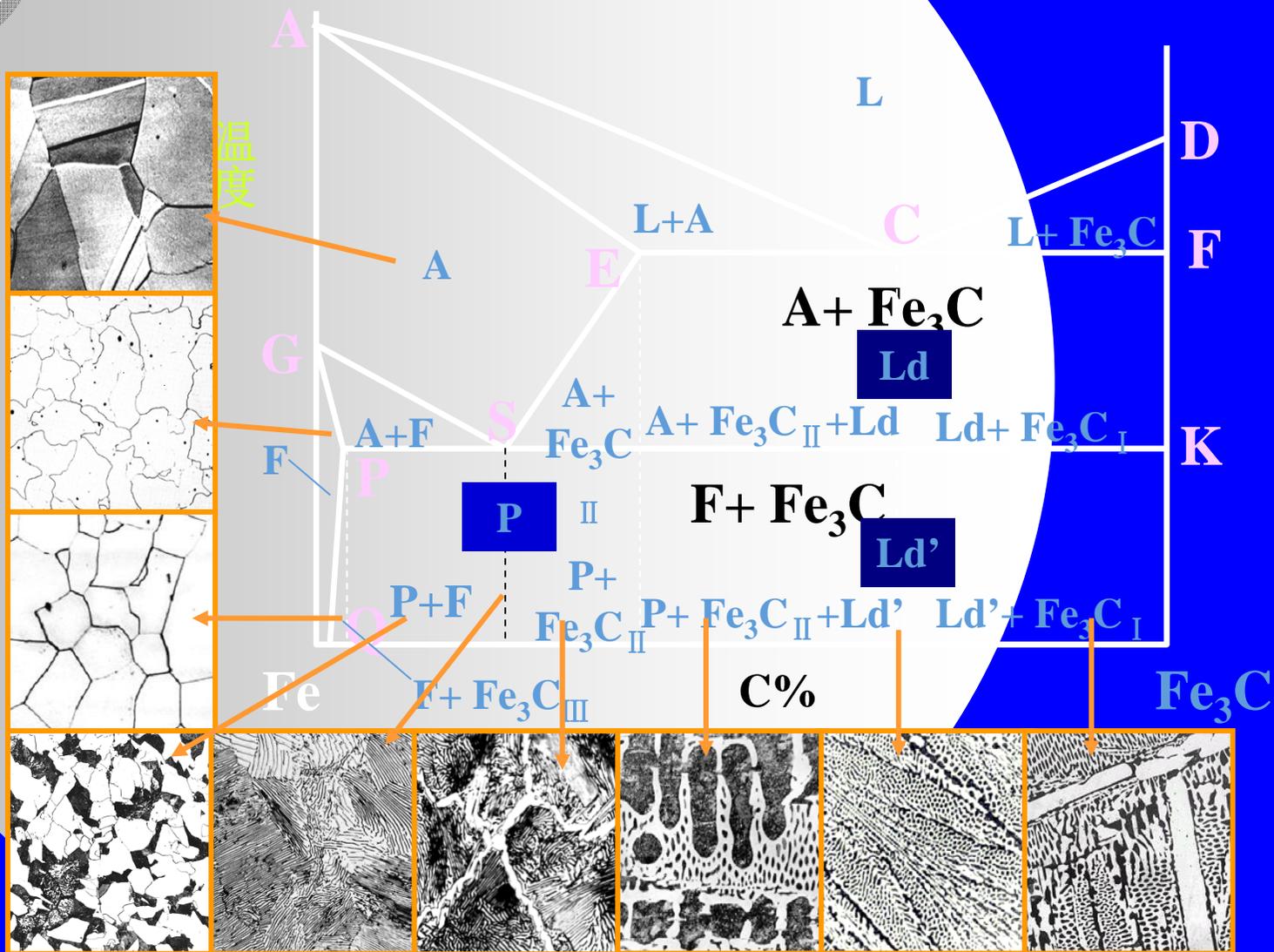
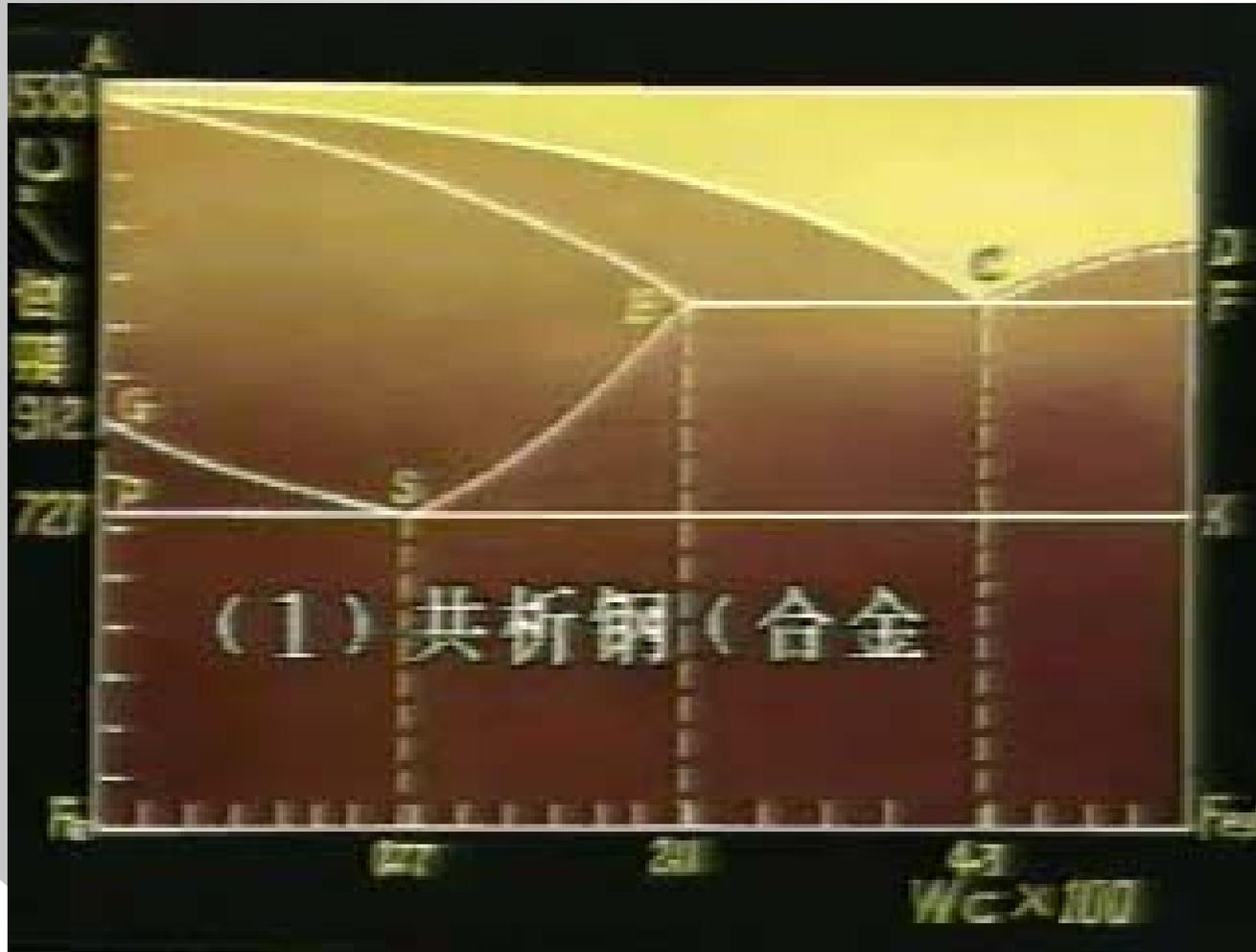


图 5-61 过共晶白口铸铁冷却到室温后的组织(白色条片是一次渗碳体,其余为莱氏体)100×



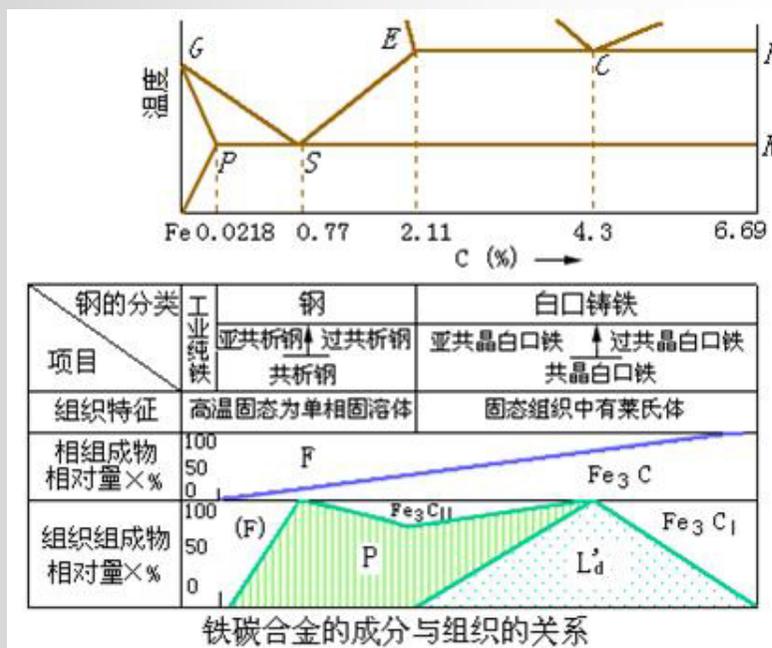




## 四、铁碳合金的成分与性能的关系

### 1. 含碳量对室温平衡组织的影响

含碳量与缓冷后相及组织组成物之间的定量关系为：

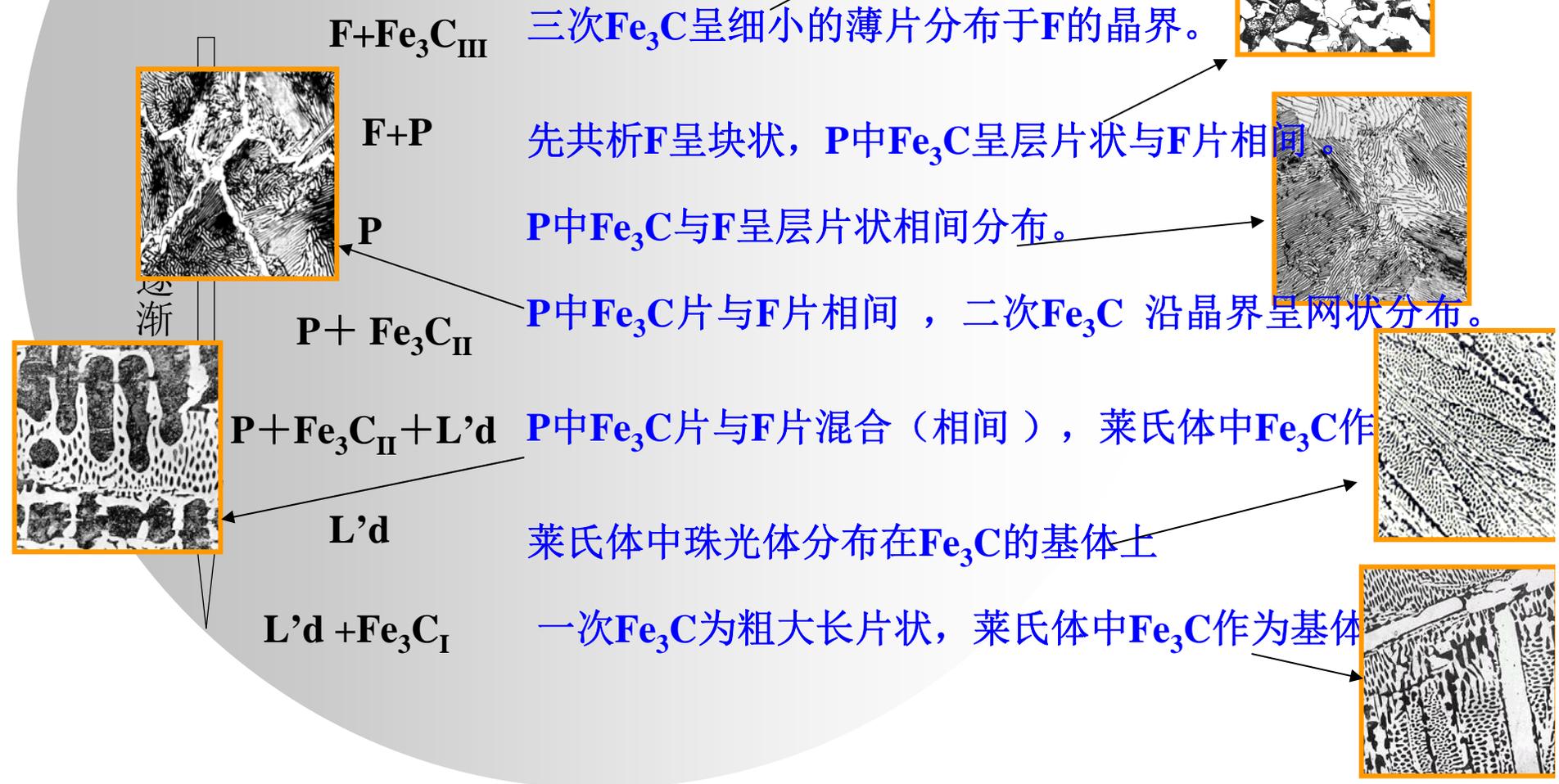


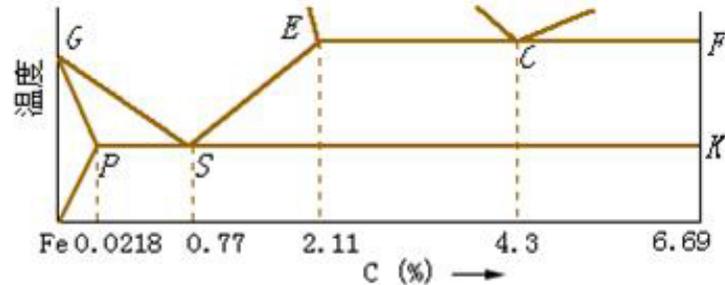
室温组织： $F \rightarrow F+P \rightarrow P \rightarrow P+Fe_3C_{II} \rightarrow$

$P+Fe_3C_{II}+Ld' \rightarrow Ld' \rightarrow Fe_3C_I+Ld'$



## ❖ Fe<sub>3</sub>C的形态:





项目	工业纯铁	钢		白口铸铁	
		亚共析钢	过共析钢	亚共晶白口铁	过共晶白口铁
组织特征	高温固态为单相固溶体	固态组织中有莱氏体			
相组成物 相对量×%	100 50 0	F		Fe <sub>3</sub> C	
组织组成物 相对量×%	100 50 0	(F)	P	Fe <sub>3</sub> C <sub>II</sub>	L <sub>d</sub>

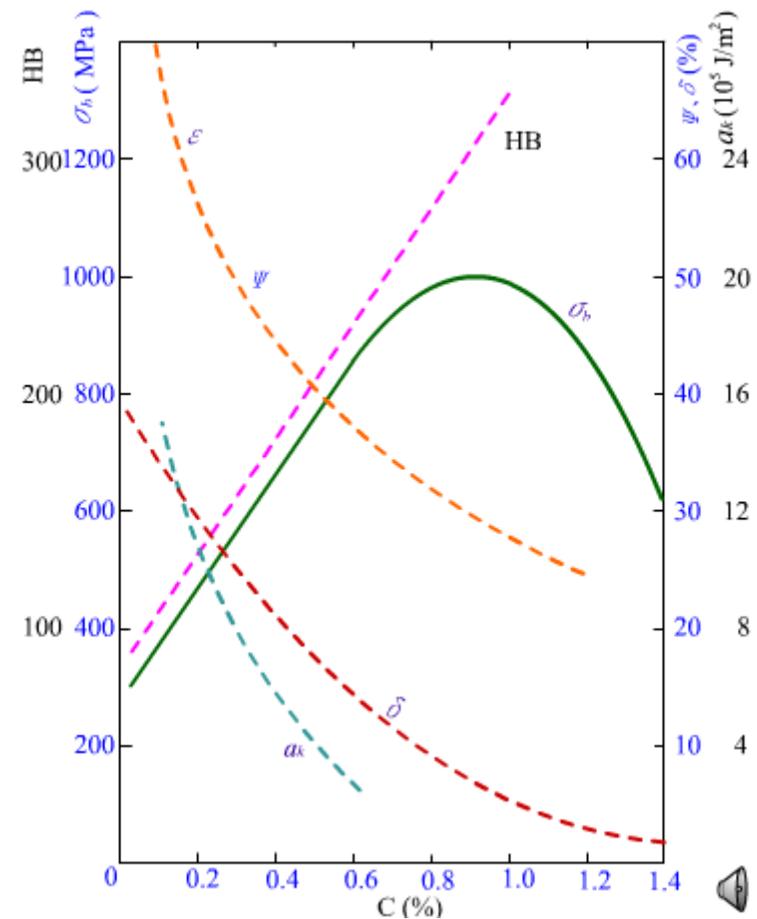
铁碳合金的成分与组织的关系

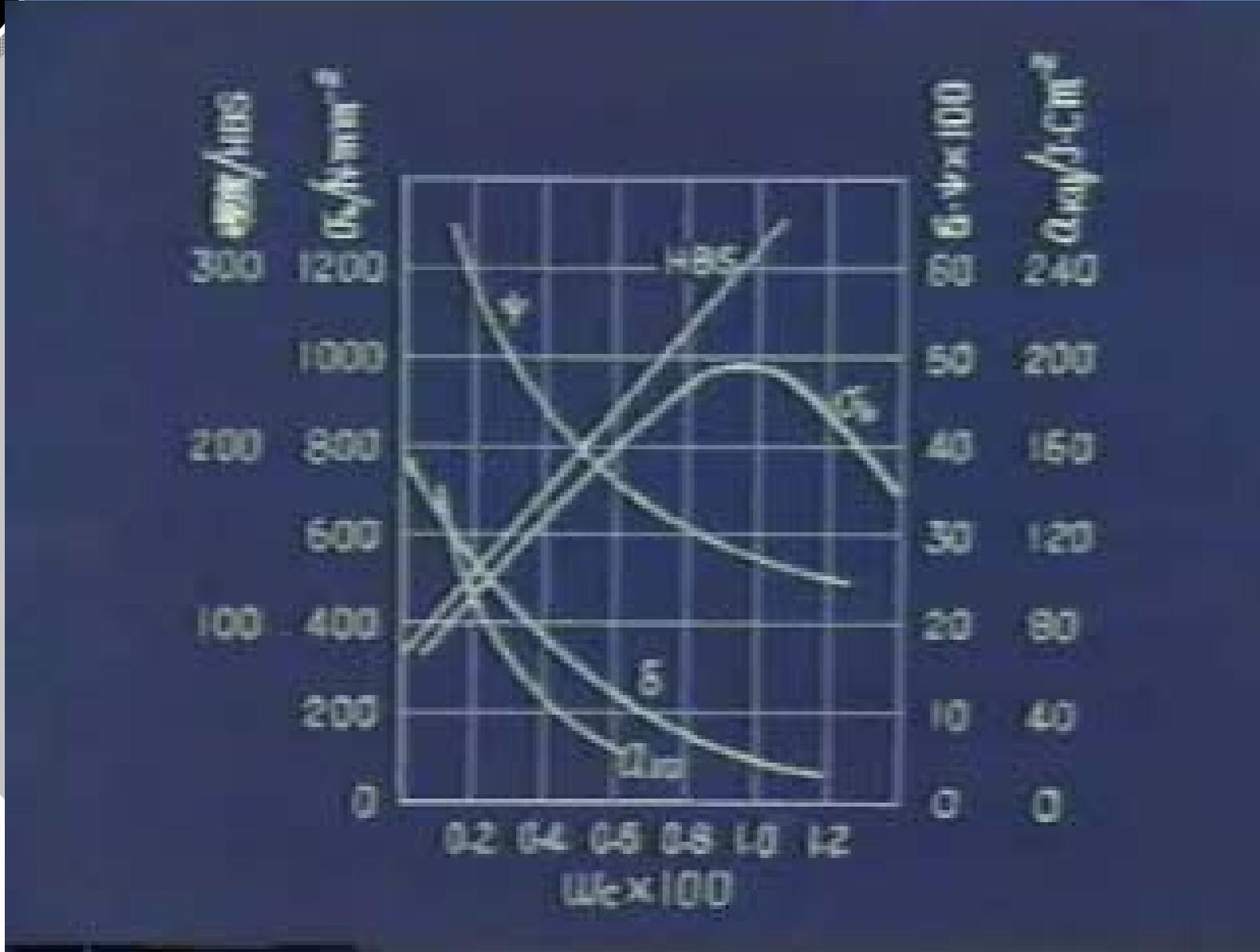
- ❖ 含碳量↑，钢的平衡组织中**F↓**，**Fe<sub>3</sub>C↑**；
- ❖ 在亚共析钢中，随碳含量↑，**F↓**，**P↑**；
- ❖ 在过共析钢中，**P↓**，**Fe<sub>3</sub>C↑**；
- ❖ 到白口铸铁时，组织中以**Fe<sub>3</sub>C**作为基体。



## 2. 含碳量对力学性能的影响

1. 硬度：取决于相及相对量。  
随 $w(\text{C})\%$   $\uparrow$ ，由于硬度高的 $\text{Fe}_3\text{C}$   $\uparrow$ ，硬度低的 $\text{F}$   $\downarrow$ ，合金的硬度呈直线关系增大，由全部为 $\text{F}$ 的硬度约80HB增大到全部为 $\text{Fe}_3\text{C}$ 时的约800HB。
2. 强度： $w(\text{C})\% \uparrow \rightarrow \sigma \uparrow$  ——  
 $0.9\% \uparrow \rightarrow \sigma \downarrow$ （因网状 $\text{Fe}_3\text{C}_{\parallel}$ 的存在）
3. 塑性、韧性： $w(\text{C})\% \uparrow \rightarrow$  塑性 $\downarrow$ 、韧性 $\downarrow$







### 3. 含碳量对工艺性能的影响

- ①切削性能：中碳钢合适，过高或过低都会降低切削性能。
- ②可锻性能：低碳钢好，一般是在单项奥氏体状态下进行。
- ③焊接性能：低碳钢好。含碳量越低，焊接性越好。
- ④铸造性能：共晶合金好。
- ⑤热处理性能：第四章介绍







## 五、Fe- Fe<sub>3</sub>C相图在工业中的应用

### 1、在选材方面的应用

1) 桥梁、船舶、车辆及各种建筑材料，需要塑性、韧性好的材料，可选用**低碳钢**（ $\omega_c < 0.25\%$ ）；

14MnNbq





❖ 2) 对工作中承受冲击载荷  
和要求较高强度的各种机械  
零件，希望强度和韧性都较  
较好，可选用**中碳钢**（ $\omega\text{C}$   
 $=0.25\%-0.60\%$ ）；

圆锥  
齿轮



柴油机曲轴



火车螺旋弹簧



3) 制造各种切削工具、模具及量具时，需要高的硬度、高耐磨性，可选用**高碳钢** ( $\omega_c > 0.6\%$ )。





❖ (4)对于形状复杂的箱体、机器底座等，可选用熔点低、流动性好的**铸铁材料**。



变速箱体



重型机床床身(HT-250)



大型船用柴油机汽缸体(HT-300)

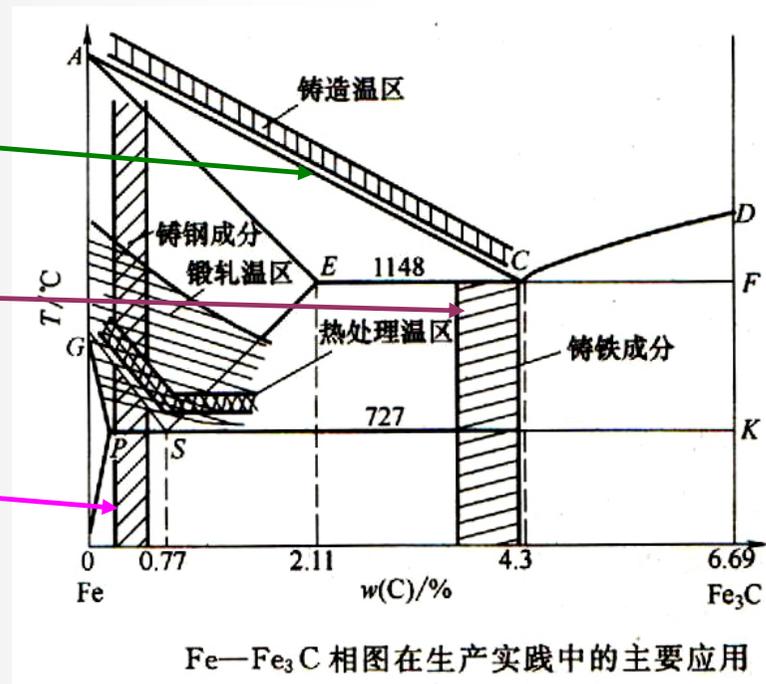


## 2、在铸造生产上的应用

浇注温度的确定和铸造合金成分的确定。

(1) 浇注温度的确定，浇注温度一般在液相线以上 $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 铸造合金成分的确定。在铸造生产中，经常选用接近共晶成分的铸铁。在铸钢生产中，碳质量分数在 $0.15\%\sim 0.6\%$ 之间。





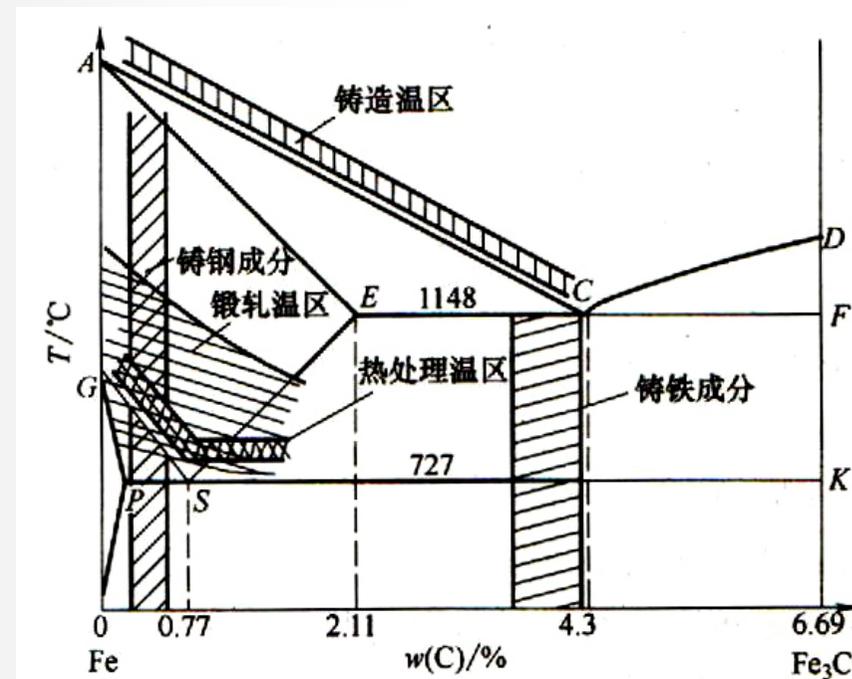
### 3、在锻压生产上的应用

确定始锻温度和终锻温度。

各种碳钢较合适的锻轧加热温度范围是：

始锻轧温度为固相线以下100-200℃ (1150 - 1250 ℃) ；

终锻轧温度为800-850℃。



Fe—Fe<sub>3</sub>C 相图在生产实践中的主要应用



#### ❖ 4. 在焊接工艺方面的应用

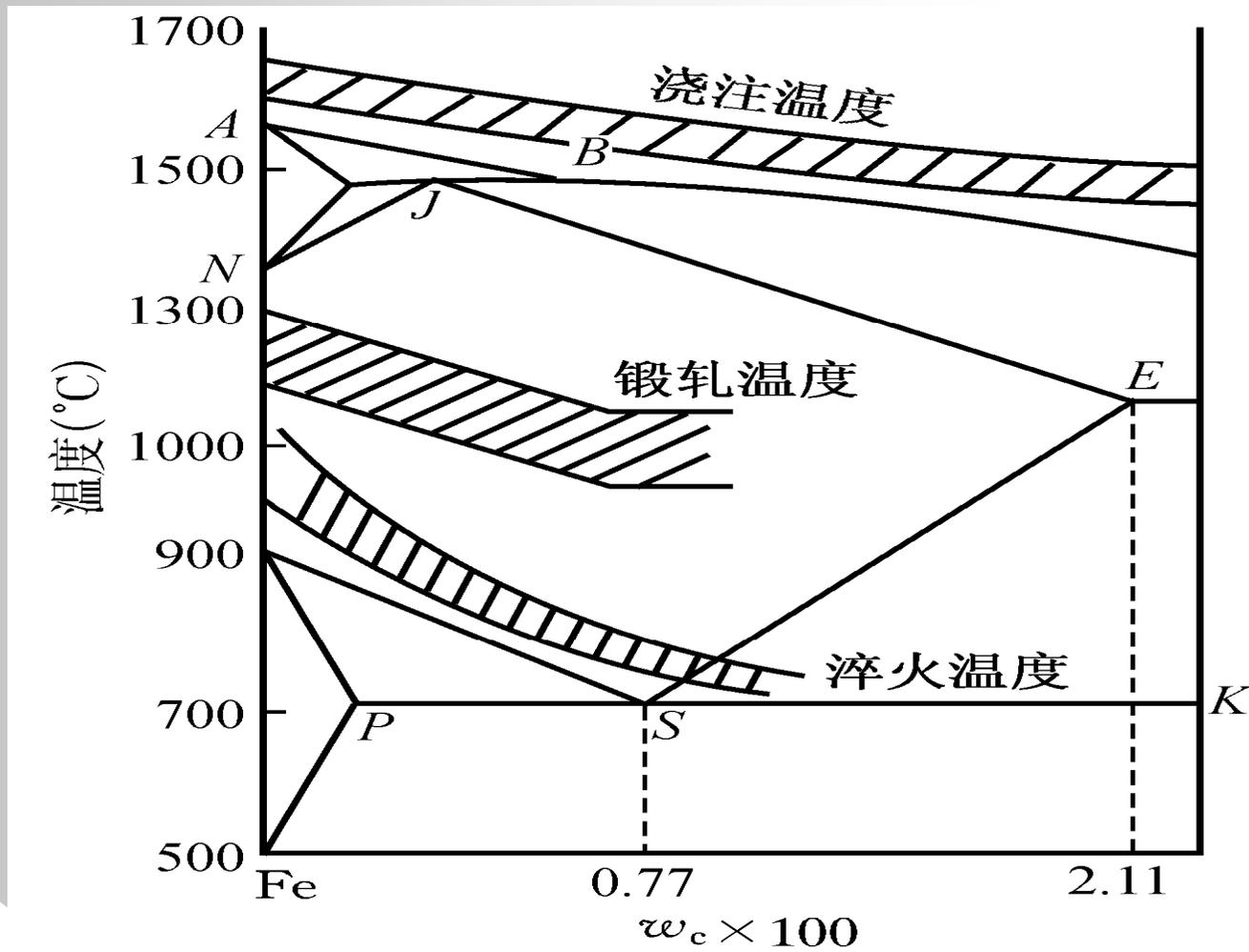
分析热影响区的组织，随着含碳量的增加，可焊性变差，故焊接用钢主要是低碳钢和低合金钢，铸铁主要是修复和焊补。

#### ❖ 5. 在切削加工方面的应用

一般认为钢的硬度在170~230HBS时，切削加工性能最好。

#### ❖ 6. 在热处理工艺方面的应用

Fe-Fe<sub>3</sub>C相图对于制订热处理工艺有着特别重要的意义。一些热处理工艺如退火、正火、淬火的加热温度都是依据Fe-Fe<sub>3</sub>C相图确定的。这将在热处理一章中详细阐述。



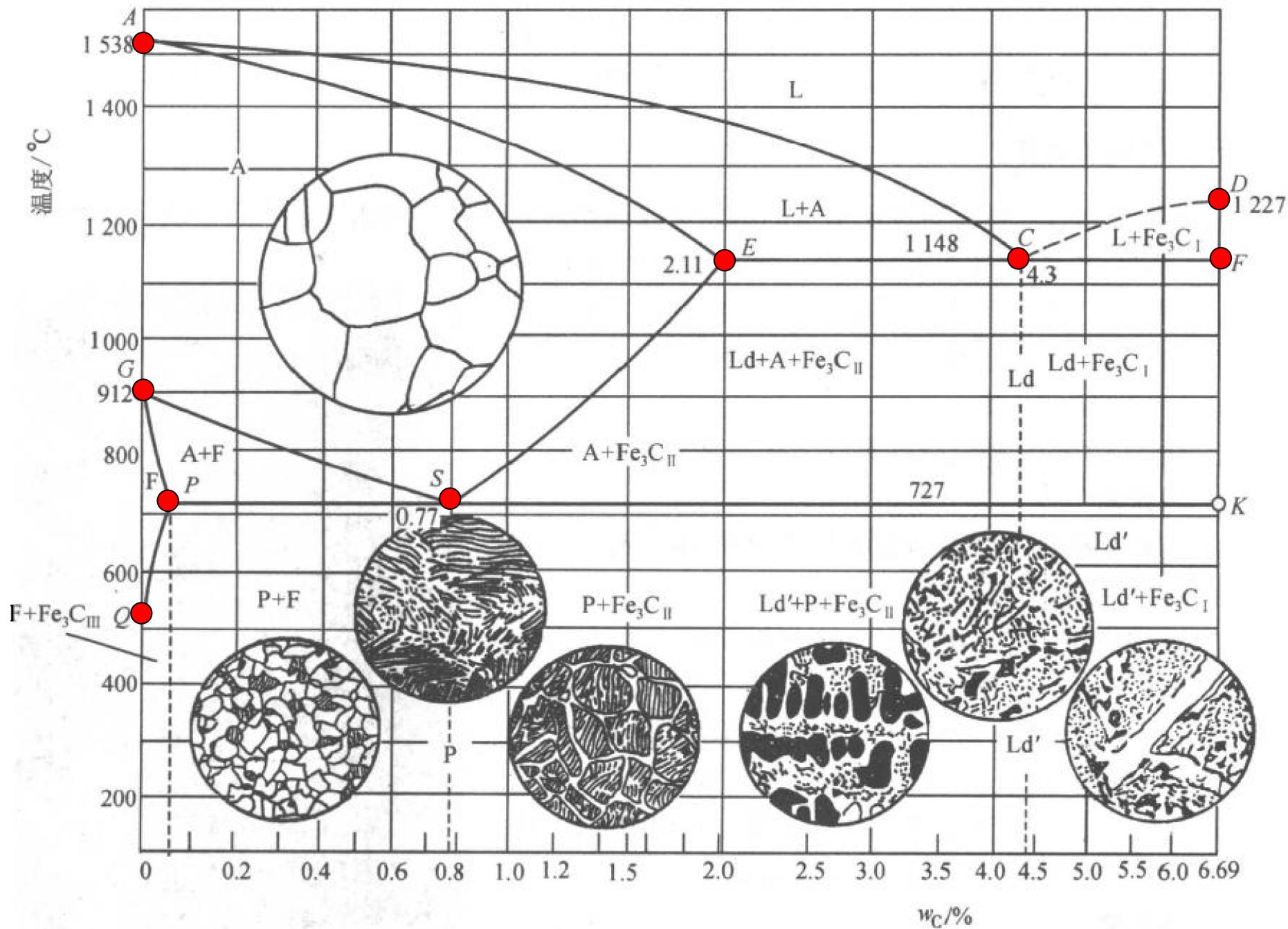


图 1-15 铁碳合金状态图

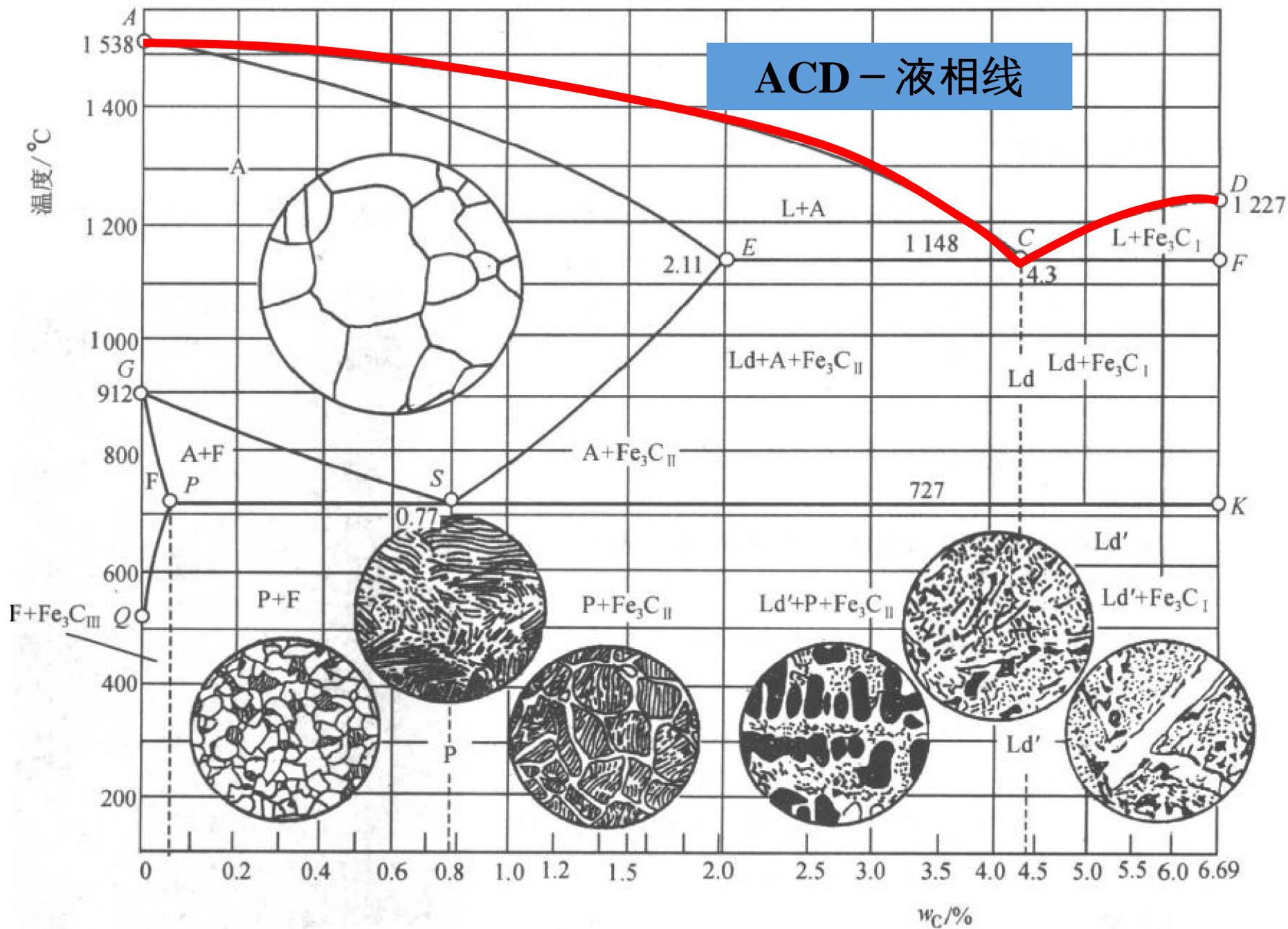
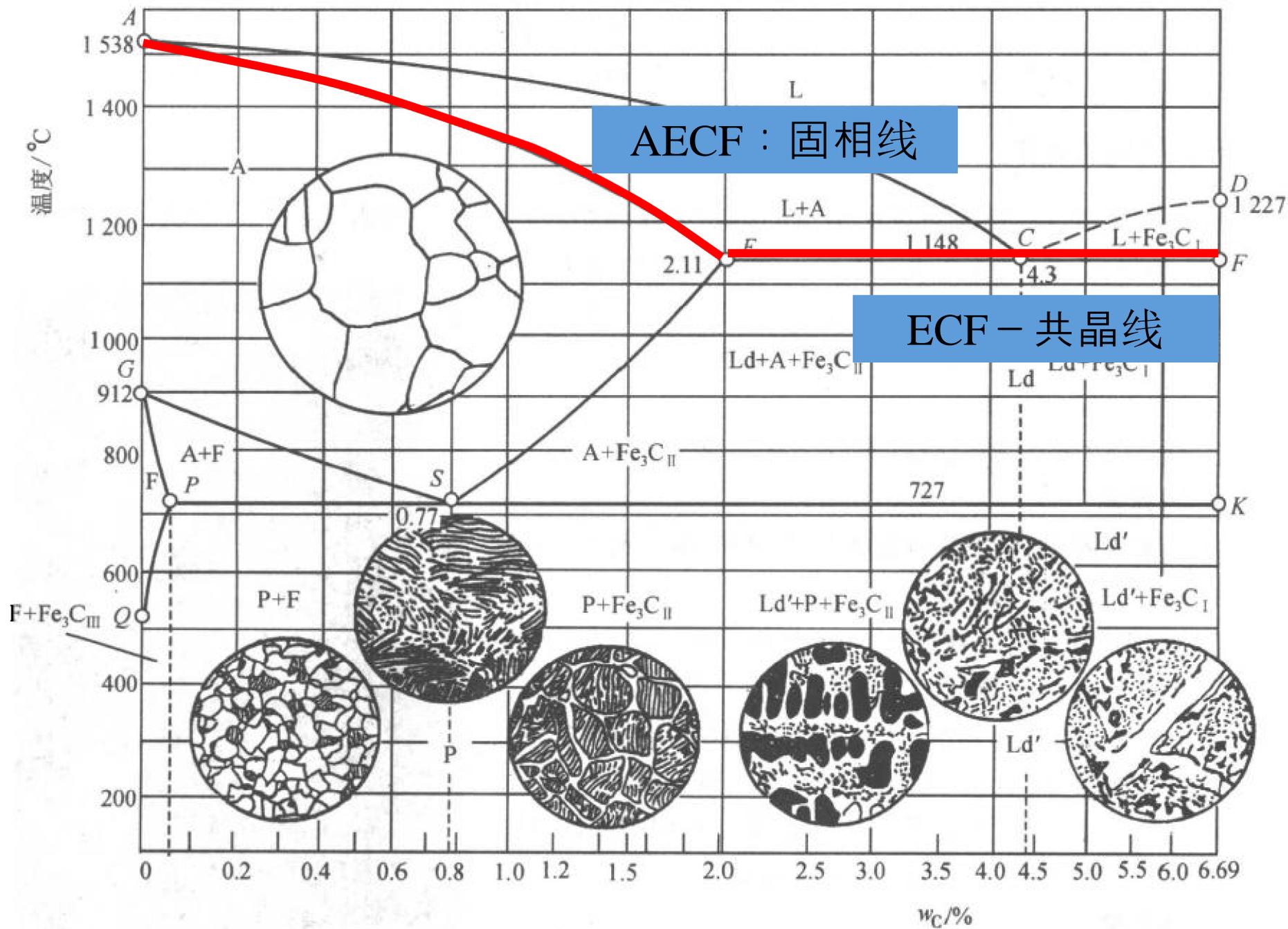


图 1-15 铁碳合金状态图



AECF : 固相线

ECF - 共晶线

图 1-15 铁碳合金状态图

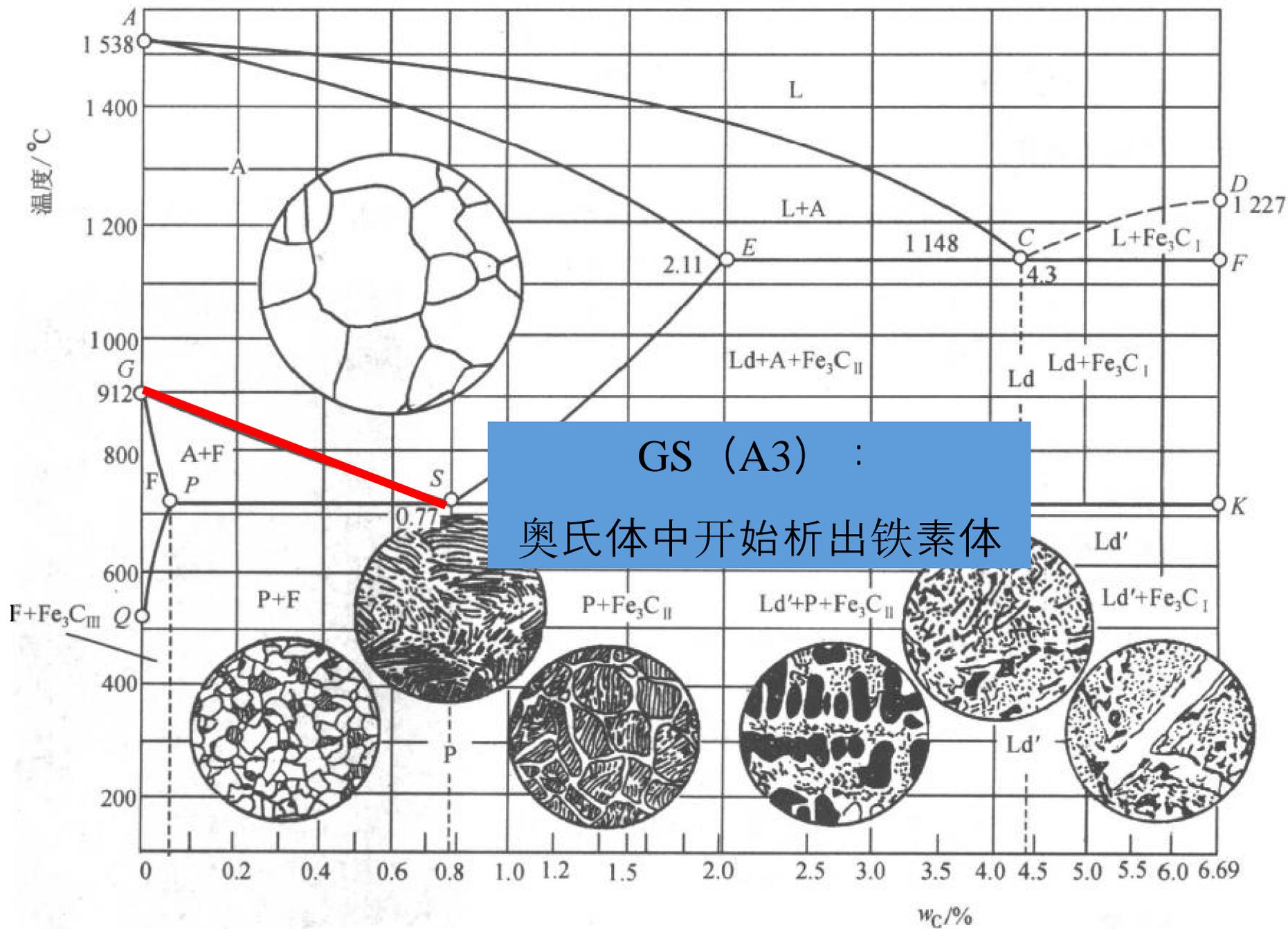
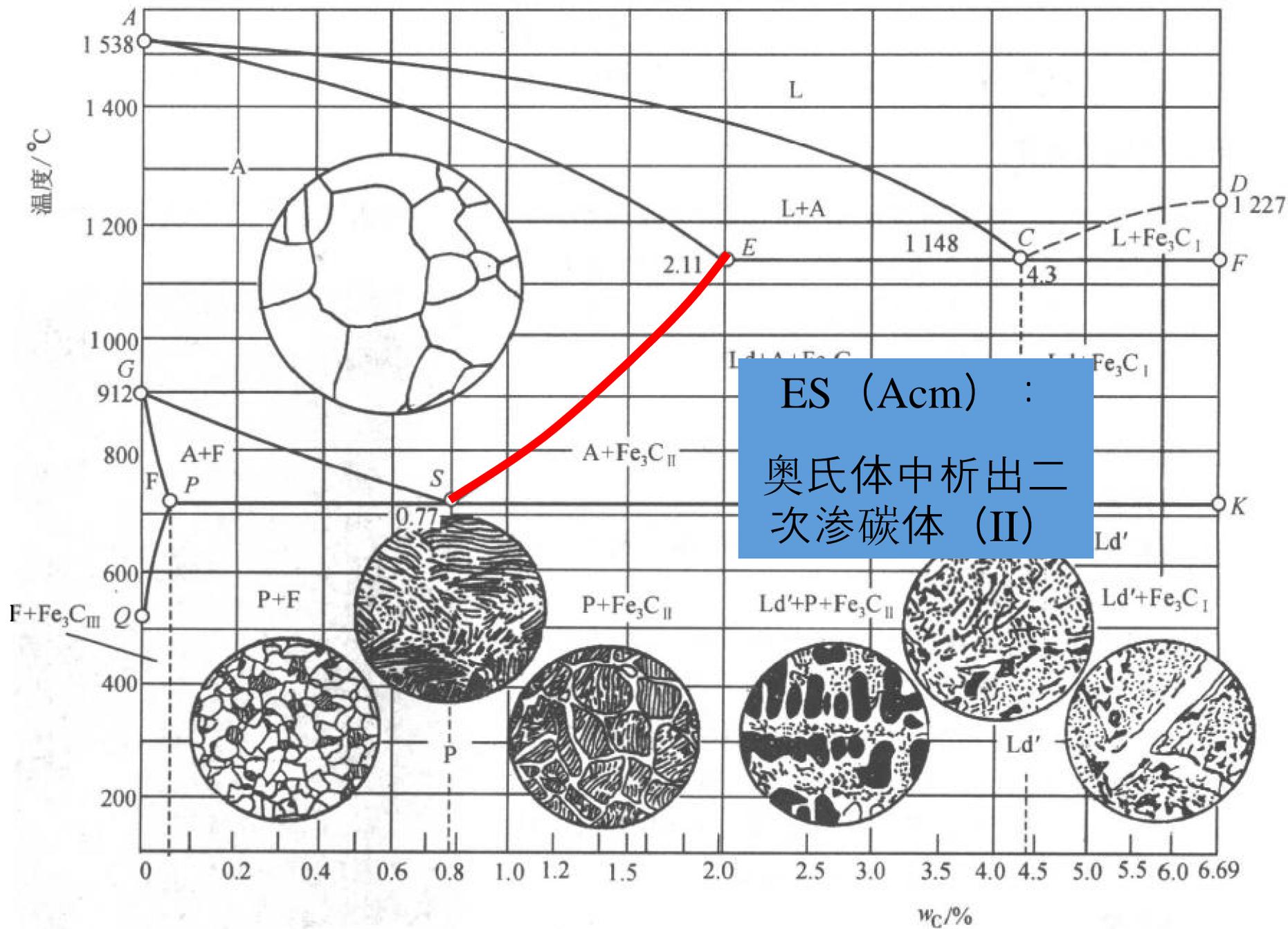


图 1-15 铁碳合金状态图



ES (Acm) :  
奥氏体中析出二次渗碳体 (II)

图 1-15 铁碳合金状态图

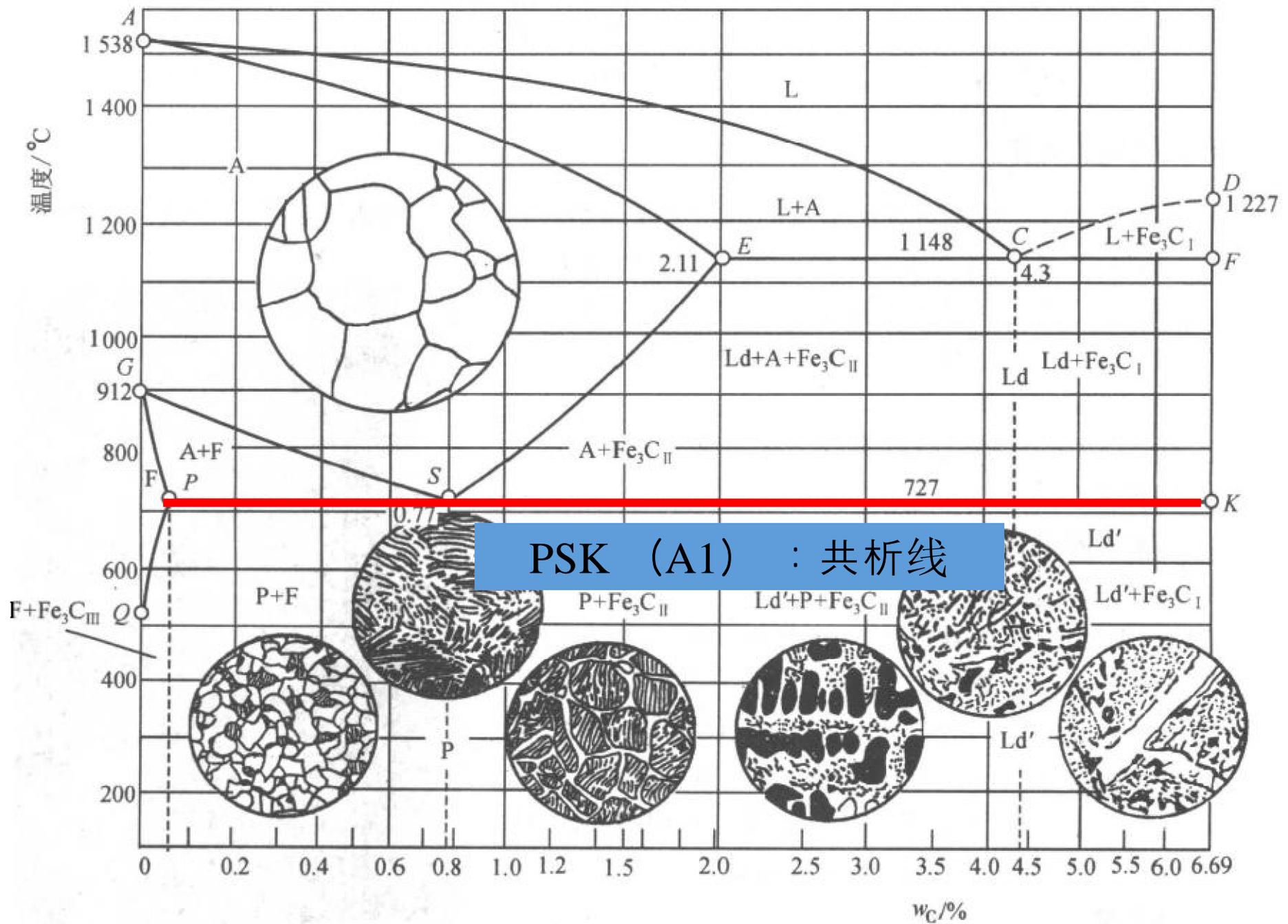


图 1-15 铁碳合金状态图

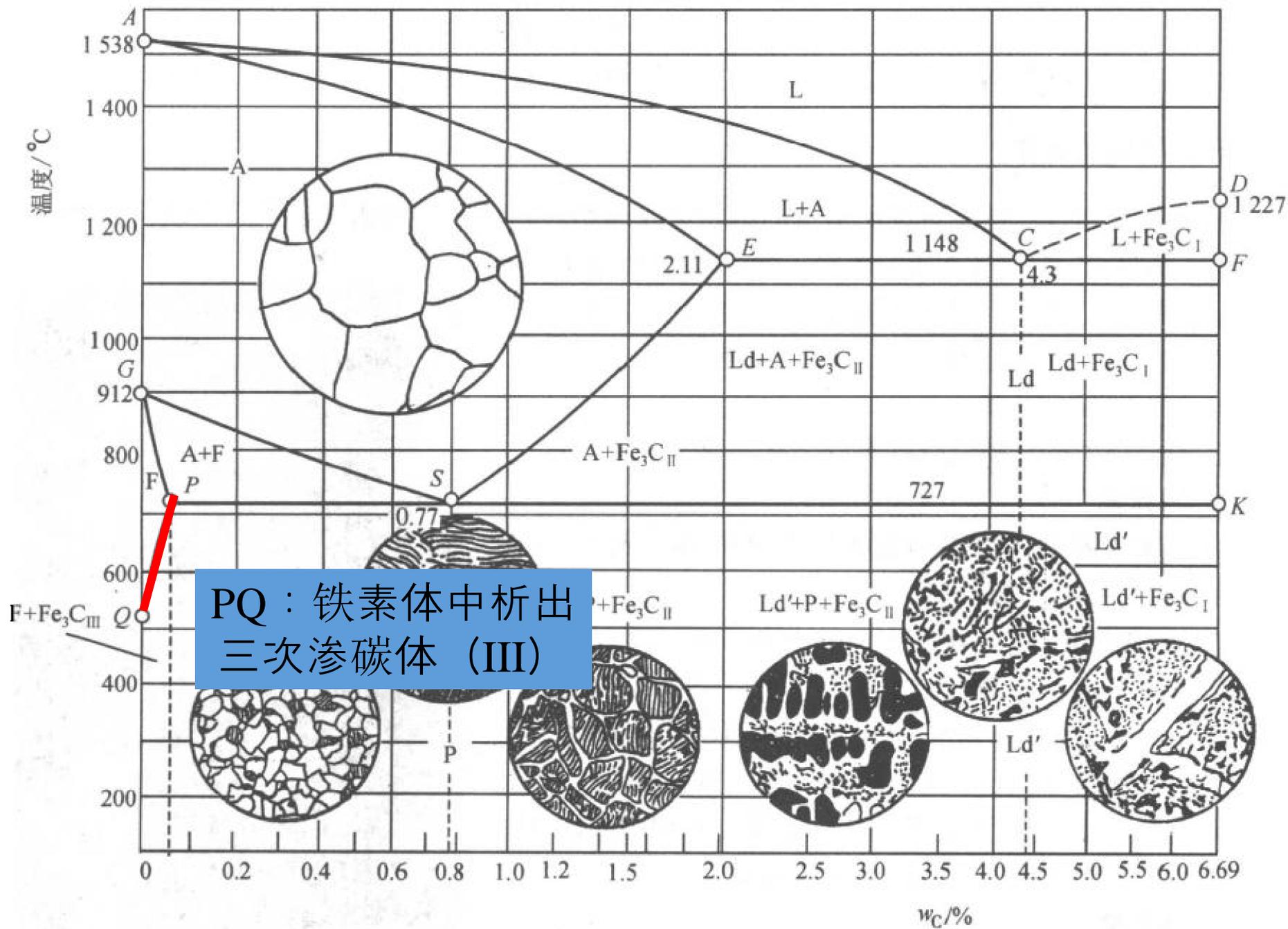


图 1-15 铁碳合金状态图

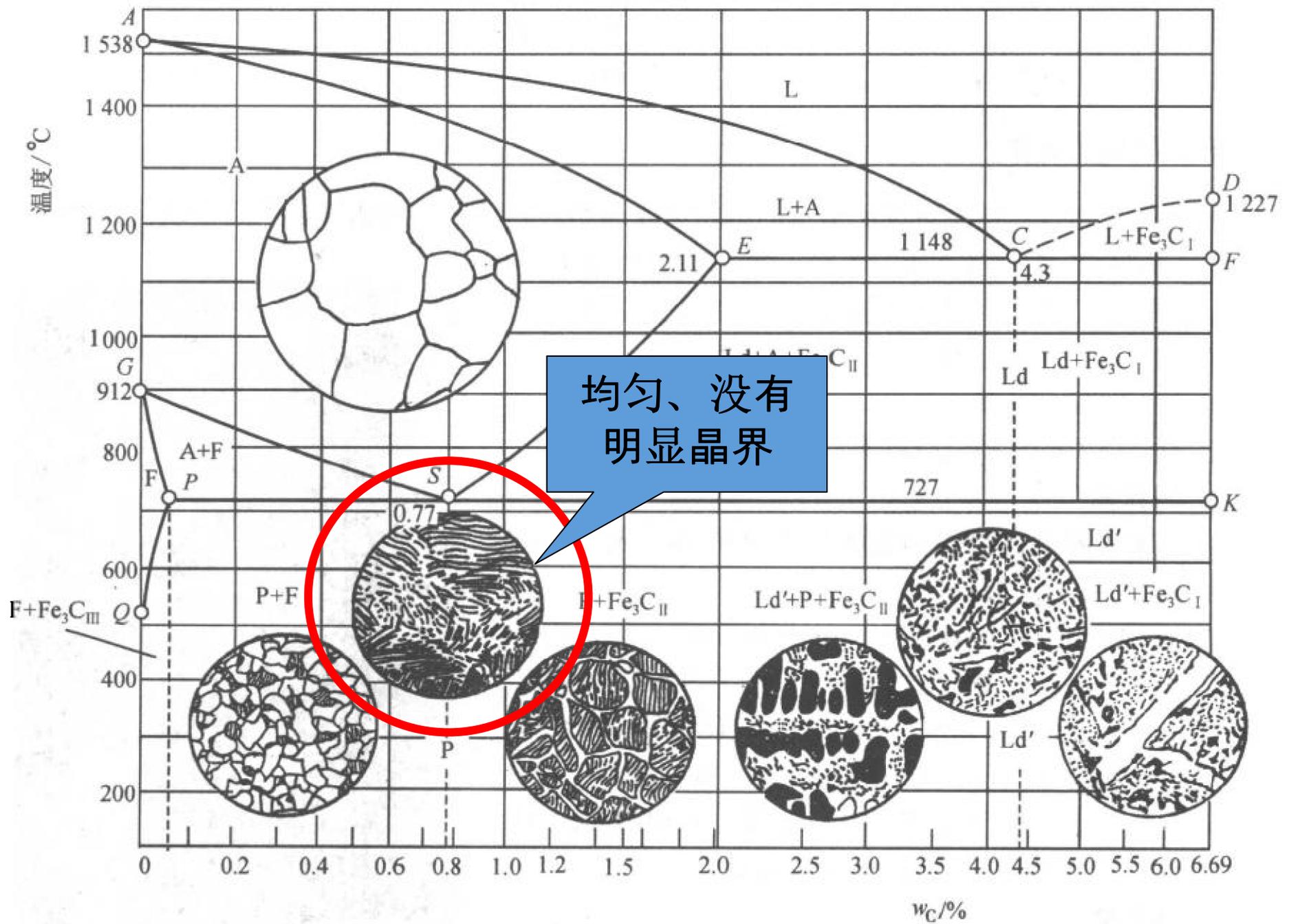


图 1-15 铁碳合金状态图

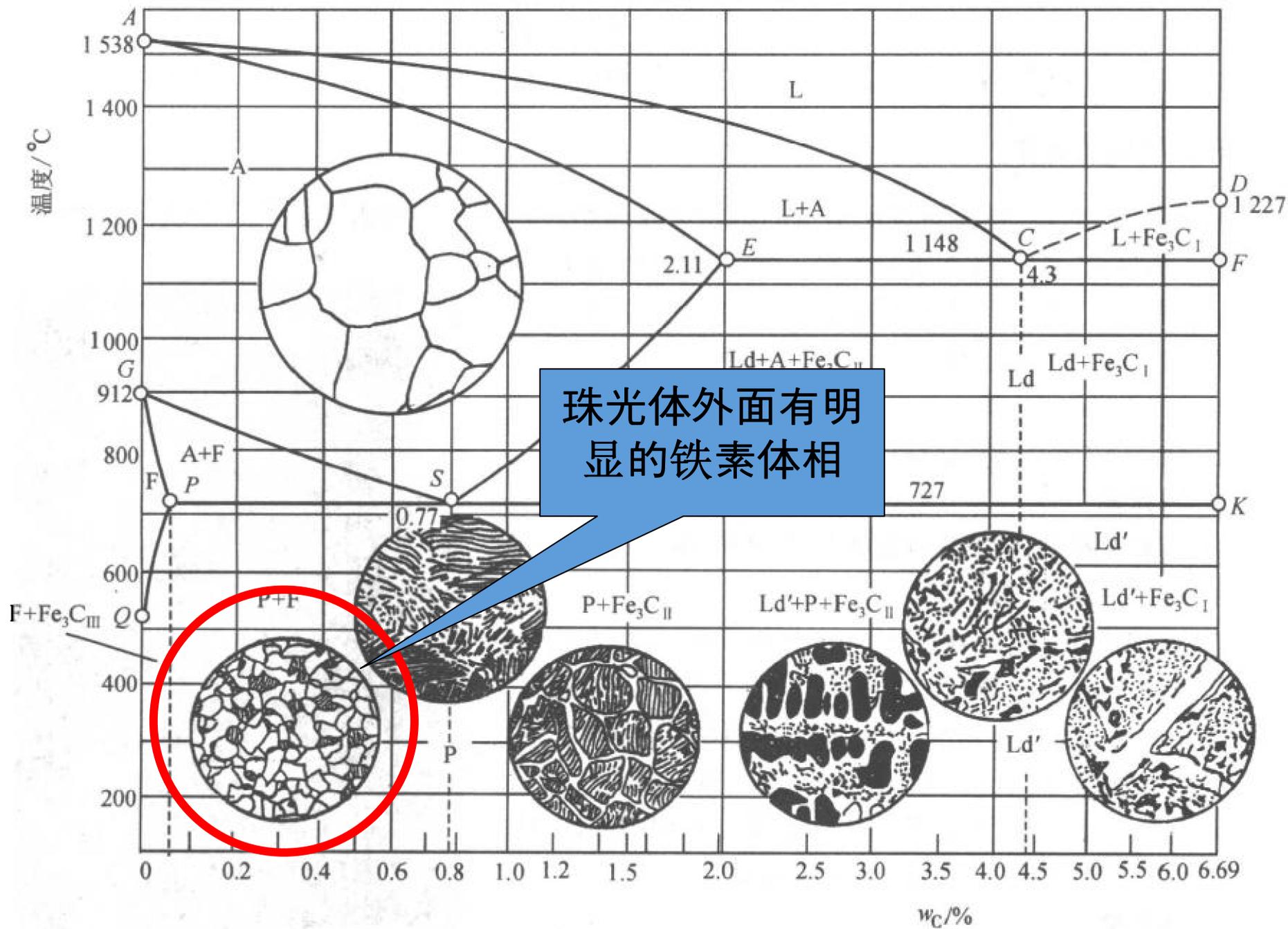


图 1-15 铁碳合金状态图

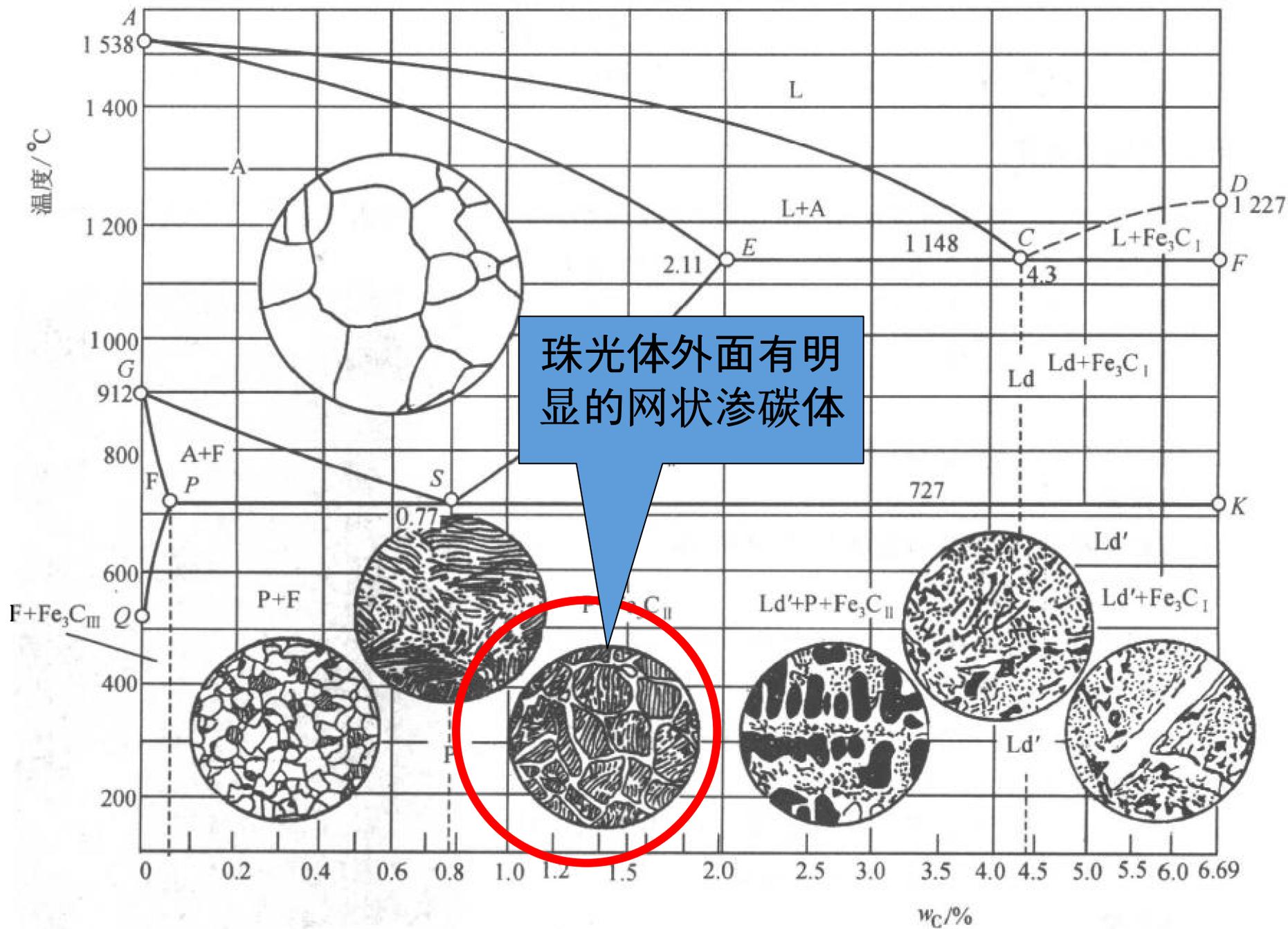


图 1-15 铁碳合金状态图