

## 第四章 铁碳合金相图

碳钢与铸铁是使用最为广泛的金属材料，是铁和碳组成的合金，不同成分的碳钢和铸铁，组织和性能也不相同。在研究和应用钢铁材料、制定其热加工和热处理工艺以及分析工艺废品的原因时，都需要应用铁碳相图。

在铁碳合金中，根据结晶条件不同，组元碳可具有碳化物  $\text{Fe}_3\text{C}$ （渗碳体）和石墨两种形式，渗碳体在热力学上是一个亚稳定相（meta-stable phase），而石墨是稳定的相。在通常情况下，铁碳合金是按  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  系进行转变，本章我们讨论的铁碳相图实际上就是  $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$  相图。

### 4-1 铁碳合金的组元

#### 一、纯铁

纯铁的熔点为  $1538^\circ\text{C}$ ，其冷却曲线如图 7.1 所示。

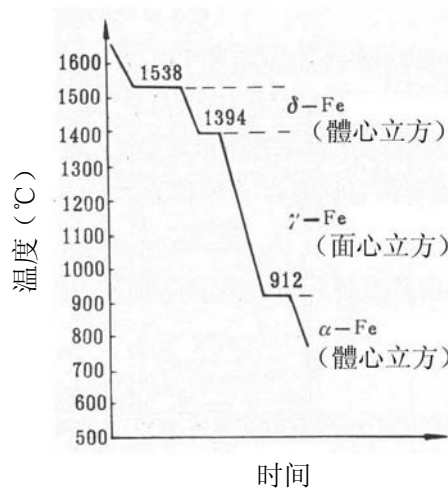
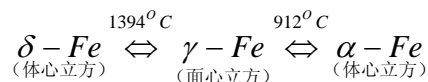


图 7.1 纯铁的冷却曲线及晶体结构的变化

纯铁由液态结晶为固态后，继续冷却到  $1394^\circ\text{C}$  及  $912^\circ\text{C}$  时，先后发生两次晶格类型的转变。金属在固态下发生的晶格类型的转变称为同素异晶转变（allotropic transformation）。同素异构转变伴有热效应产生，因此在纯铁的冷却曲线上，在  $1394^\circ\text{C}$  及  $912^\circ\text{C}$  处出现平台。铁的同素异晶转变如下：



温度低于  $912^\circ\text{C}$  的铁为体心立方晶格，称为  $\alpha\text{-Fe}$ ；温度在  $912\sim 1394^\circ\text{C}$  间的铁为面心立方晶格，称为  $\gamma\text{-Fe}$ ；温度在  $1394\sim 1538^\circ\text{C}$  间的铁为体心立方晶格，称为  $\delta\text{-Fe}$ 。

工业纯铁的机械性能特点是强度、硬度低，塑性好，其机械性能大致如下：

拉伸强度 $\sigma_b$	$18 \times 10^7 \sim 28 \times 10^7 \text{N/m}^2$
屈服强度 $\sigma_{0.2}$	$10 \times 10^7 \sim 17 \times 10^7 \text{N/m}^2$
延伸率 $\delta$	30~50%
断面收缩率 $\psi$	70~80%
冲击值	160~200J/cm <sup>2</sup>
布氏硬度 HB	50~80

## 二、碳在铁中的固溶体

碳的原子半径较小，在  $\alpha$ -Fe 和  $\gamma$ -Fe 中均可进入 Fe 原子间的空隙而形成间隙固溶体。

碳在  $\alpha$ -Fe 中形成的间隙固溶体称为**铁素体**(ferrite)，常用符号 **F** 或  $\alpha$  表示，其最大溶解度为 **0.0218wt%C**，发生于 **727°C**，碳多存在于体心立方  $\alpha$  结构的八面体空隙。铁素体与  $\alpha$ -Fe 在居里点 **770°C** 以下均具有铁磁性。

碳在  $\gamma$ -Fe 中形成的间隙固溶体称为**奥氏体** (austenite)，常用符号 **A** 或  $\gamma$  表示，其最大溶解度为 **2.11wt%C**，发生于 **1148°C**，碳多存在于面心立方  $\gamma$  结构的八面体空隙。奥氏体与  $\gamma$ -Fe 均具有顺磁性。

## 三、铁碳化合物

当铁碳合金中碳含量超过它在铁中的溶解限度时，多余的碳主要以碳化物 **Fe<sub>3</sub>C** 的形式存在。

**Fe<sub>3</sub>C** 称为**渗碳体**，是一种具有复杂结构的间隙化合物，其中含碳 **6.69wt%**，其硬度很高，塑性几乎为零。

## 4-2 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图分析

Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图如图 7.2 所示。

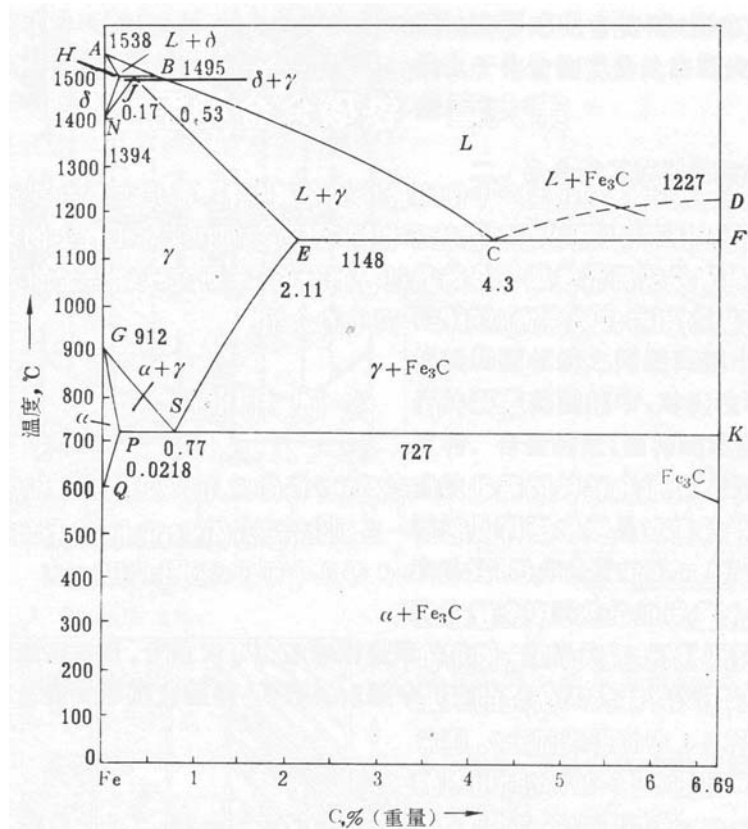
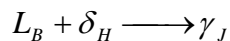


图 7.2 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

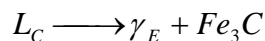
图中 ABCD 为液相线，AHJECF 为固相线。整个相图主要由包晶、共晶和共析三个恒温转变所组成：

(1) 在 HJB 水平线（1495℃）发生包晶转变：



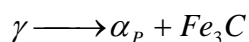
转变产物是  $\gamma$ 。此转变仅发生在含碳 0.09~0.53%的铁碳合金中。

(2) 在 ECF 水平线（1148℃）发生共晶转变：



转变产物是  $\gamma$  和  $Fe_3C$  的机械混合物，称为**莱氏体** (ledeburite)，用符号 **Ld** 或 **Le** 表示。含碳 2.11~6.69%的铁碳合金都发生此转变。

(3) 在 PSK 水平线（727℃）发生共析转变：



转变产物是  $\alpha$  和  $Fe_3C$  的机械混合物，称为**珠光体** (pearlite)，用符号 **P** 表示。所有含碳量超过 0.0218%的铁碳合金都发生这个转变。共析转变温度通常称为 **A<sub>1</sub> 温度**。

此外，Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中还有三条重要的固态转变线：

- (1) GS 线：γ 中开始析出 α 或 α 全部溶入 γ 的转变线，常称此温度为 **A<sub>3</sub> 温度**。
- (2) ES 线：碳在 γ 中的溶解度线。常称此温度为 **Acm 温度**。低于此温度时，γ 中将析出 Fe<sub>3</sub>C，称为**二次渗碳体 Fe<sub>3</sub>C<sub>II</sub>**，以区别于从液体中经 CD 线结晶出的一次渗碳体 Fe<sub>3</sub>C<sub>I</sub>。
- (3) PQ 线：碳在 α 中的溶解度线。α 从 727℃ 冷却下来时，也将析出 Fe<sub>3</sub>C，称为**三次渗碳体 Fe<sub>3</sub>C<sub>III</sub>**。

表 7.1 中还列出了相图中各特性点的温度、碳含量及其含义。

表 7.1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中各特性点的温度、碳含量及其含义

符号	温度 (°C)	碳含量 (wt%)	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 $L_C \longrightarrow \gamma_E + Fe_3C$
D	1227	6.69	Fe <sub>3</sub> C 的熔点
E	1148	2.11	碳在 γ-Fe 中的最大溶解度
F	1148	6.69	Fe <sub>3</sub> C 的成分
G	912	0	$\alpha - Fe \leftrightarrow \gamma - Fe$ 同素异晶转变点 (A <sub>3</sub> )
H	1495	0.09	碳在 δ-Fe 中的最大溶解度
J	1495	0.17	包晶点 $L_B + \delta_H \longrightarrow \gamma_J$
K	727	6.69	Fe <sub>3</sub> C 的成分
N	1394	0	$\gamma - Fe \leftrightarrow \delta - Fe$ 同素异晶转变点 (A <sub>4</sub> )
P	727	0.0218	碳在 α-Fe 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点 (A <sub>1</sub> ) $\gamma \longrightarrow \alpha_P + Fe_3C$
Q	600 (室温)	0.0057 0.0008	600℃ (或室温) 时碳在 α-Fe 中的溶解度

### 4-3 典型铁碳合金的平衡凝固

通常按有无共晶转变来区分碳钢和铸铁，即含碳量小于 2.11% 为**碳钢**，大于 2.11% 为**铸铁** (cast iron)，按 Fe-Fe<sub>3</sub>C 系结晶的铸铁，称为**白口铸铁** (white cast iron)。

根据组织特征，可参照 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图 (图 7.3) 将铁碳合金按含碳量划分为七种类型：

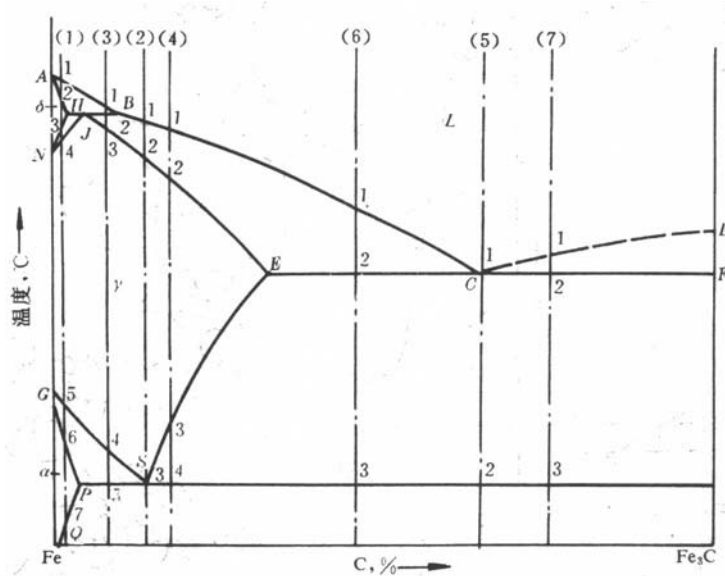


图 7.3 典型铁碳合金在 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的位置

- |   |               |
|---|---------------|
| (1) 工业纯铁 (pure iron)                        | <0.0218%C     |
| (2) 共析钢 (eutectoid steel)                   | 0.77%C        |
| (3) 亚共析钢 (hypoeutectoid steel)              | 0.0218~0.77%C |
| (4) 过共析钢 (hypereutectoid steel)             | 0.77~2.11%C   |
| (5) 共晶白口铸铁 (eutectic white cast iron)       | 4.30%C        |
| (6) 亚共晶白口铸铁 (hypoeutectic white cast iron)  | 2.11~4.30%C   |
| (7) 过共晶白口铸铁 (hypereutectic white cast iron) | 4.30~6.69%C   |

下面分别对每种类型的合金平衡凝固时的转变过程和室温组织进行分析。

### 一、工业纯铁

图 7.4 为工业纯铁的冷却曲线和平衡凝固过程示意图。

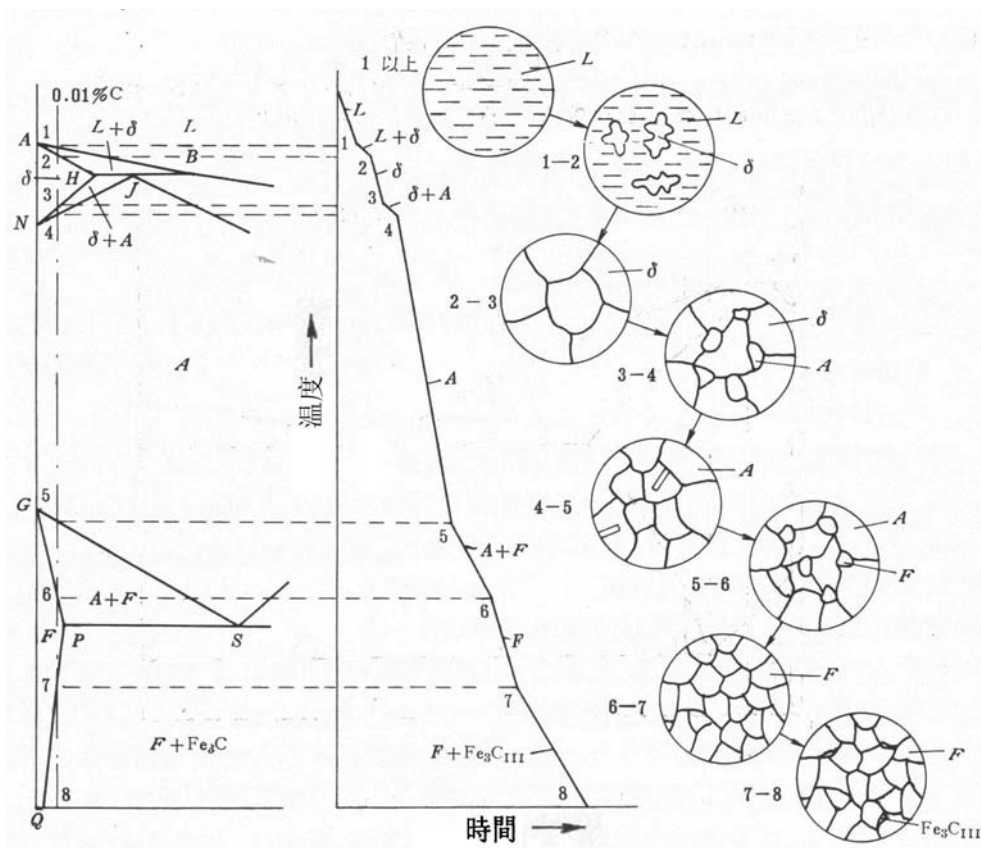


图 7.4 工业纯铁的冷却曲线和平衡凝固过程示意图

合金溶液在 1~2 点温度区间结晶出  $\delta$  固溶体。冷却至 3 点时，开始发生固溶体的同素异构转变  $\delta \rightarrow \gamma$ 。这一转变在 4 点结束，合金为单相  $\gamma$ 。冷至 5~6 点之间又发生同素异构转变  $\gamma \rightarrow \alpha$ ，6 点以下全部为  $\alpha$ 。冷却至 7 点时，碳在  $\alpha$  中的溶解度达到饱和，在 7 点以下，将从  $\alpha$  中析出三次渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ 。因此工业纯铁的室温组织为  $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ ，如图 7.5 所示。

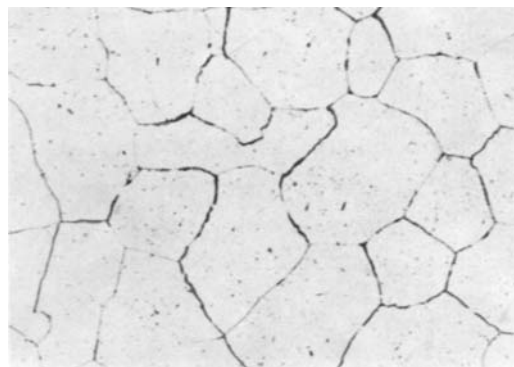
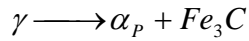


图 7.5 工业纯铁的室温平衡组织 250×

## 二、共析钢

图 7.6 为共析钢的冷却曲线和平衡凝固过程示意图。

合金溶液在 1~2 点温度区间结晶出  $\gamma$  固溶体，在 2 点凝固完毕，合金为单相  $\gamma$ 。冷至 3 点（727°C）时，在恒温下发生共析转变：



转变产物为珠光体，即 P，是  $\alpha$  和  $Fe_3C$  的层片状细密混合物，如图 7.7 所示。P 中的  $Fe_3C$  称为共析渗碳体。因此共析钢的室温组织为 P，如图 7.7 所示。

P 中的  $\alpha$  和  $Fe_3C$  的相对量可用杠杆定律求得：

$$\alpha(\%) = \frac{6.69 - 0.77}{6.69} \times 100\% \approx 88\%$$

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

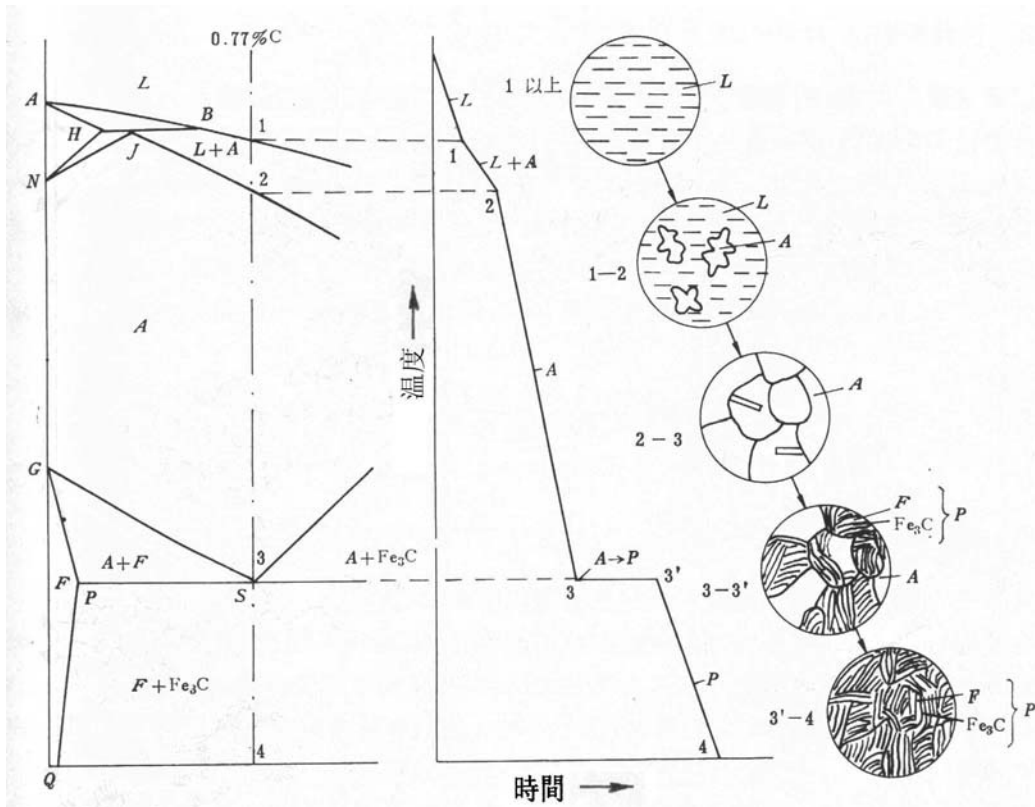


图 7.6 共析钢的冷却曲线和平衡凝固过程示意图

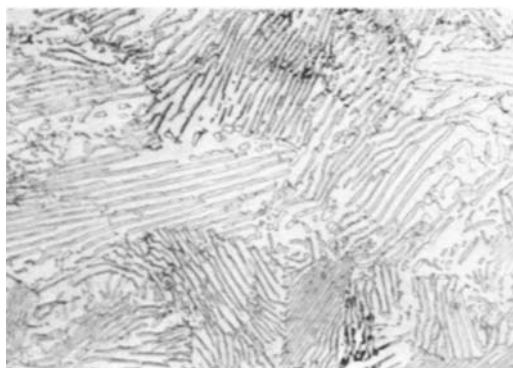


图 7.7 共析钢的室温平衡组织 1000×

### 三、亚共析钢

图 7.8 为亚共析钢的冷却曲线和平衡凝固过程示意图。

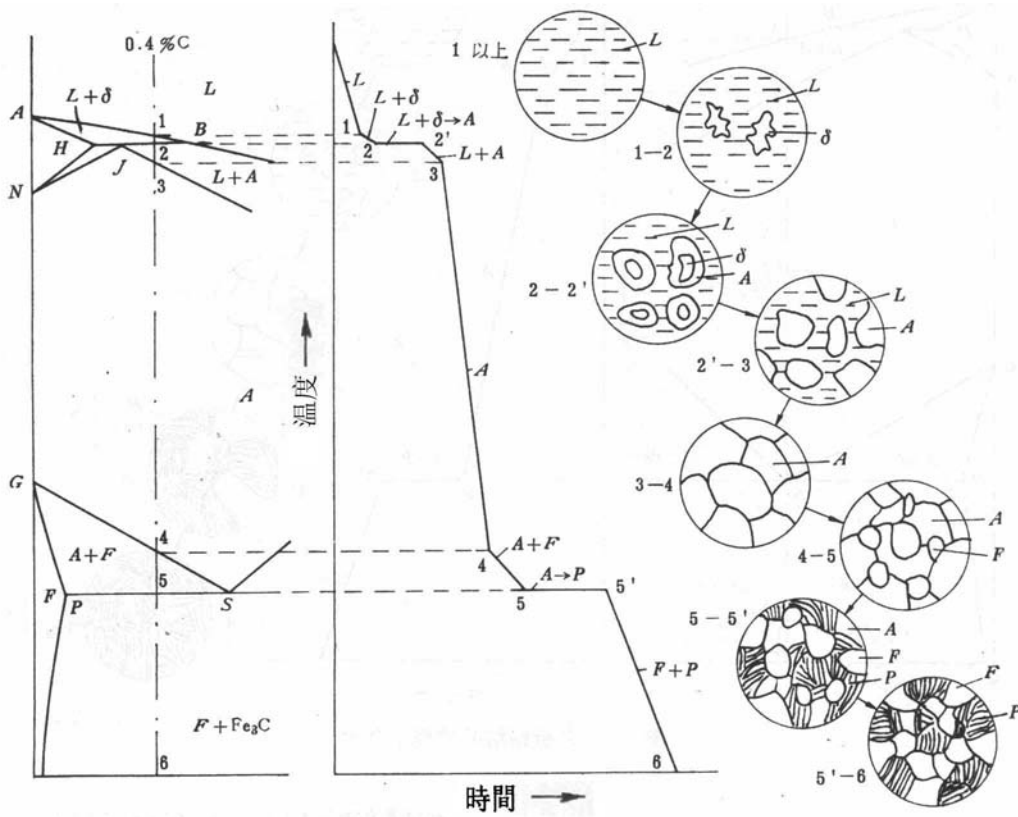
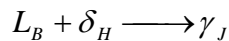


图 7.8 亚共析钢的冷却曲线和平衡凝固过程示意图

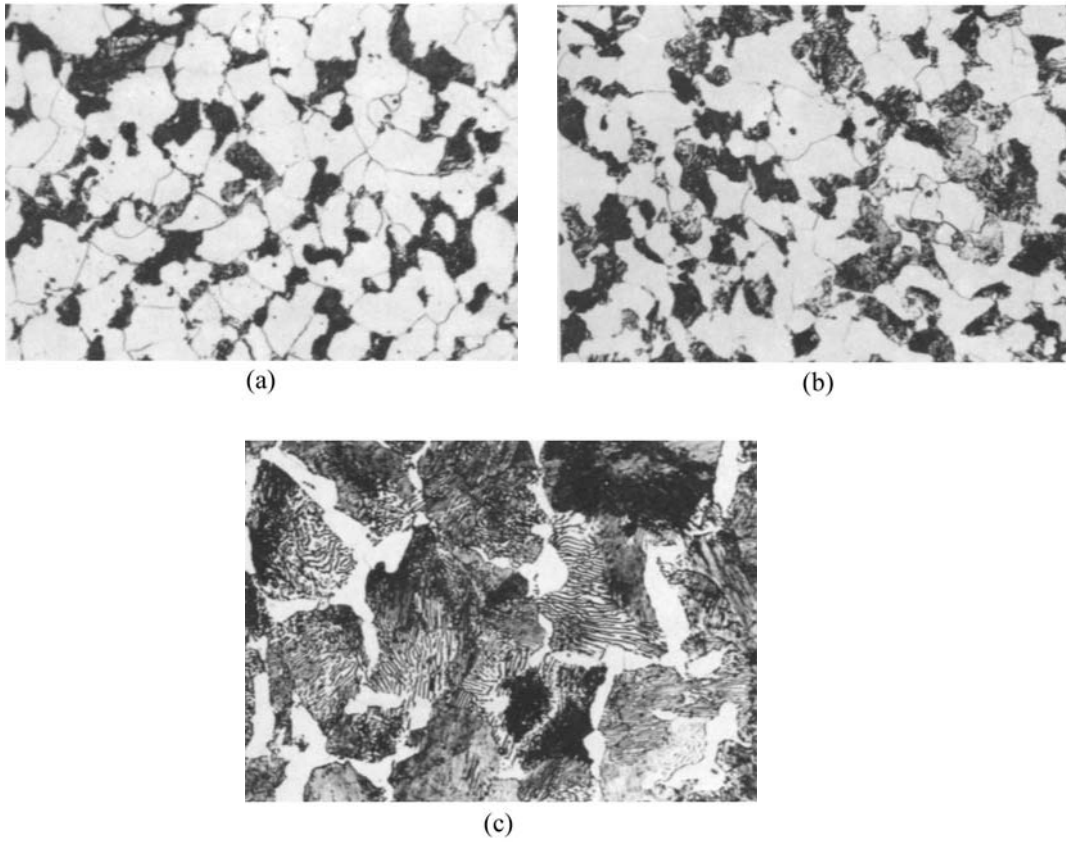
合金溶液在 1~2 点温度区间结晶出  $\delta$  固溶体。冷却至 2 点 ( $1495^{\circ}\text{C}$ ) 时， $\delta$  固溶体的含碳量为 0.09%，液相的含碳量为 0.53%，此时液相和  $\delta$  相发生包晶转变：



由于图 7.8 中的合金碳含量大于 0.17%，所以包晶转变终了以后，还有过剩的液相存在。在 2'~3 点之间，液相中继续结晶出  $\gamma$ ，所有  $\gamma$  固溶体的成分均沿 JE 线变化。冷却至 3 点时，合金全部由  $\gamma$  组成。冷至 4 点时，开始从  $\gamma$  中析出  $\alpha$ ， $\alpha$  的含碳量沿 GP 线变化，而剩余  $\gamma$  的含碳量沿 GS 线变化。当冷却至 5 点 ( $727^{\circ}\text{C}$ ) 时，剩余  $\gamma$  的含碳量达到 0.77%，在恒温下发生共析转变成珠光体。在 5' 点以下，先共析铁素体中将析出三次渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ ，但因其数量少，一般可忽略。



因此亚共析钢的室温组织为  $P + \alpha$  ,如图 7.9 所示。由图(a)(b)(c)可见，亚共析钢的碳含量越高，室温组织中的 P 含量越多。



(a)0.20%C 410× (b)0.45%C 400× (c)0.60%C 300×

图 7.9 亚共析钢的室温平衡组织

#### 四、过共析钢

图 7.10 为过共析钢的冷却曲线和平衡凝固过程示意图。

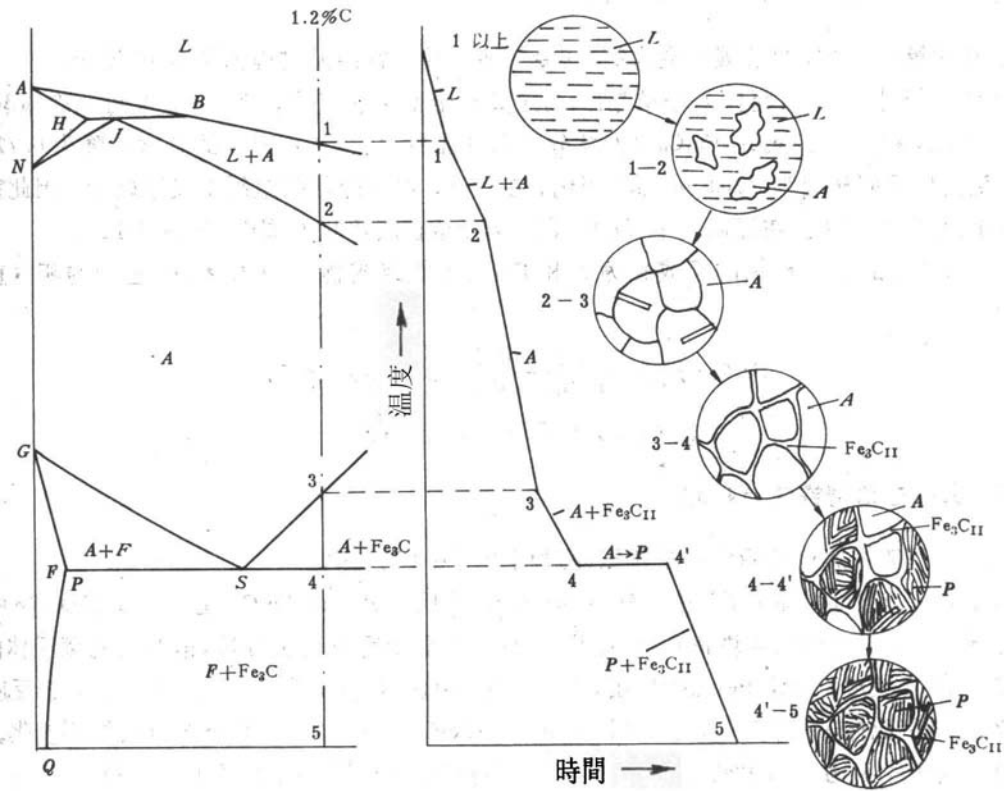


图 7.10 过共析钢的冷却曲线和平衡凝固过程示意图

合金溶液在 1~2 点温度区间结晶出  $\gamma$  固溶体，在 2 点凝固完毕，合金为单相  $\gamma$ 。冷至 3 点开始从  $\gamma$  中析出二次渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ，直到 4 点为止。这种先共析  $\text{Fe}_3\text{C}$  多沿  $\gamma$  晶界呈网状分布，量较多时还在晶内呈针状分布。温度降到 4 点 ( $727^\circ\text{C}$ ) 时，剩余  $\gamma$  的含碳量达到 0.77%，在恒温下发生共析转变成珠光体。

因此过共析钢的室温组织为  $\text{P}+\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ，如图 7.11 所示。

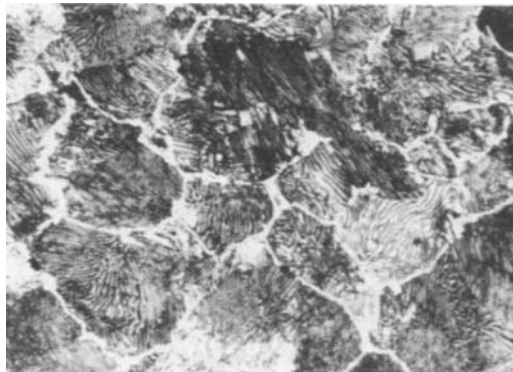


图 7.11 过共析钢的室温平衡组织 500×

过共析钢的碳含量越高，室温组织中的  $Fe_3C_{II}$  含量越多。

## 五、共晶白口铸铁

图 7.12 为共晶白口铸铁的冷却曲线和平衡凝固过程示意图。

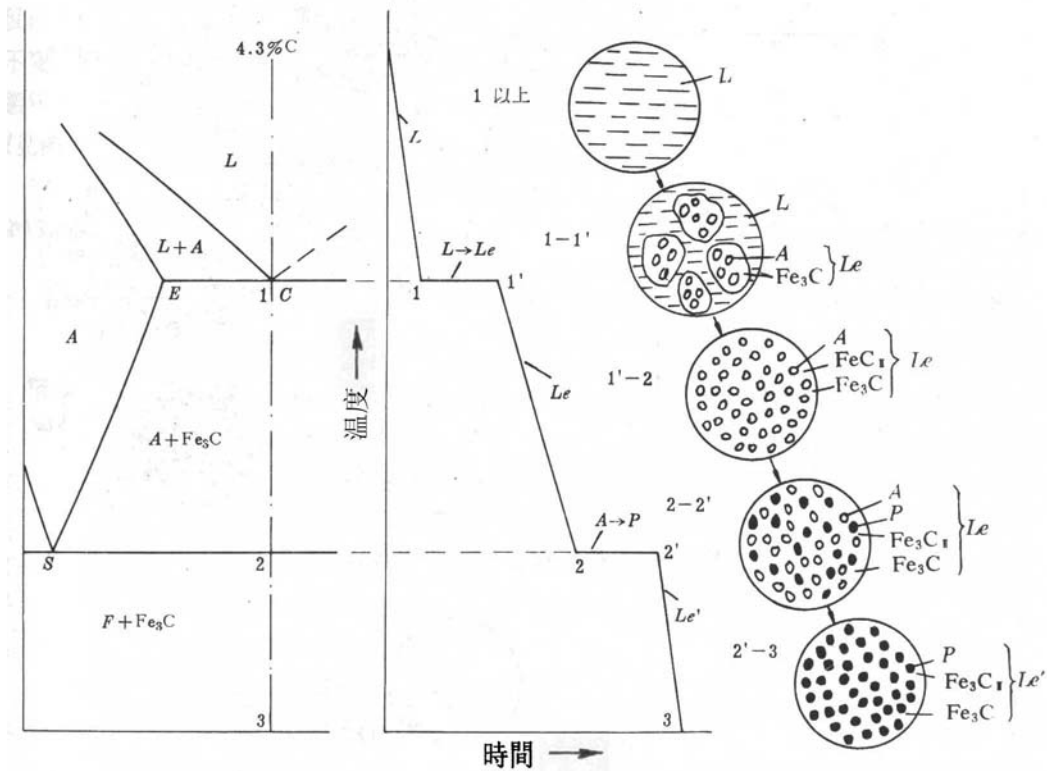


图 7.12 共晶白口铸铁的冷却曲线和平衡凝固过程示意图

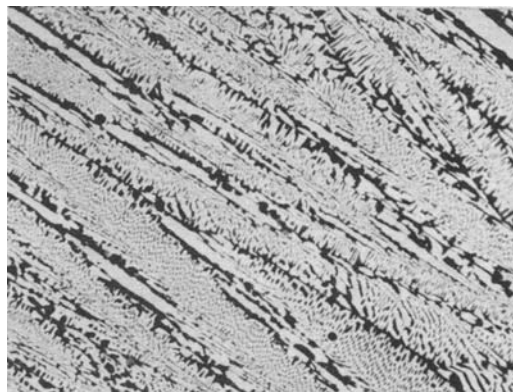
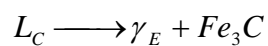


图 7.13 共晶白口铸铁的室温平衡组织 100×

合金溶液冷却至 1 点 ( $1148^{\circ}C$ ) 时，在恒温下发生共晶转变：



转变产物为  $\gamma$  和  $\text{Fe}_3\text{C}$  的机械混合物，即莱氏体  $\text{Ld}$ ，其形态为短棒状的  $\gamma$  分布在  $\text{Fe}_3\text{C}$  基体上。冷至 1 点以下，共晶  $\gamma$  中不断析出二次渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ，它通常依附于共晶  $\text{Fe}_3\text{C}$  上而不能分辨。温度降到 2 点 ( $727^\circ\text{C}$ ) 时，共晶  $\gamma$  的含碳量达到 0.77%，在恒温下发生共析转变成珠光体。最后得到的组织由 P 分布在共晶  $\text{Fe}_3\text{C}$  上所组成，如图 7.13 所示。这种室温下的组织保留了高温下共晶转变产物  $\text{Ld}$  的形态特征，但组成相  $\gamma$  已发生了转变，因此称为变态莱氏体，用符号  $\text{Ld}'$  表示。

因此共晶白口铸铁的室温组织为  $\text{Ld}'$ ，如图 7.13 所示。

## 六、亚共晶白口铸铁

图 7.14 为亚共晶白口铸铁的冷却曲线和平衡凝固过程示意图。

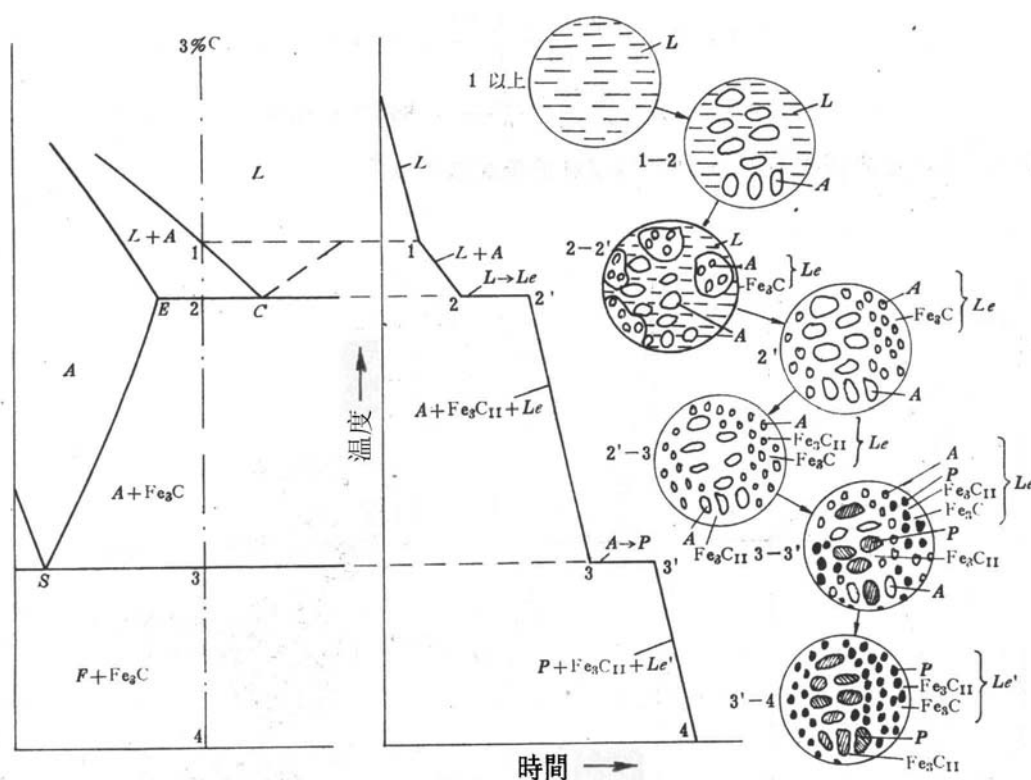


图 7.14 亚共晶白口铸铁的冷却曲线和平衡凝固过程示意图

合金溶液在 1~2 点温度区间结晶出  $\gamma$  固溶体，此时液相成分沿 BC 线变化，而  $\gamma$  固溶体的成分沿 JE 线变化。冷却至 2 点 ( $1148^\circ\text{C}$ ) 时，剩余液相的成分达到共晶成分，在恒温下发生共晶转变，形成  $\text{Ld}$ 。在 2 点以下，初晶  $\gamma$  和共晶  $\gamma$  中都析出二次渗碳体  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ 。随着  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$  的析出， $\gamma$  固溶体的成分沿 ES 线降低。温度降到 3 点 ( $727^\circ\text{C}$ ) 时，所有  $\gamma$  都发生共析转变成珠光体。

因此亚共晶白口铸铁的室温组织为  $\text{Ld}' + \text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ，如图 7.15 所示。

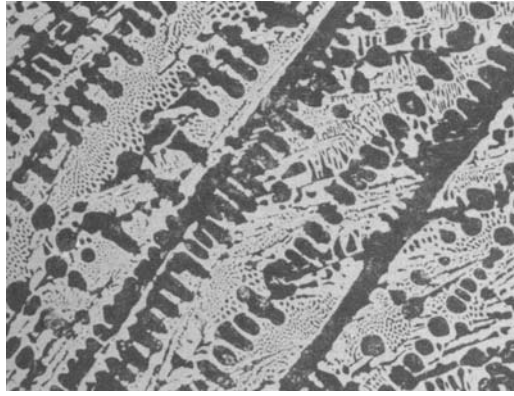


图 7.15 亚共晶白口铸铁的室温平衡组织 100×

### 七、过共晶白口铸铁

图 7.16 为过共晶白口铸铁的冷却曲线和平衡凝固过程示意图。

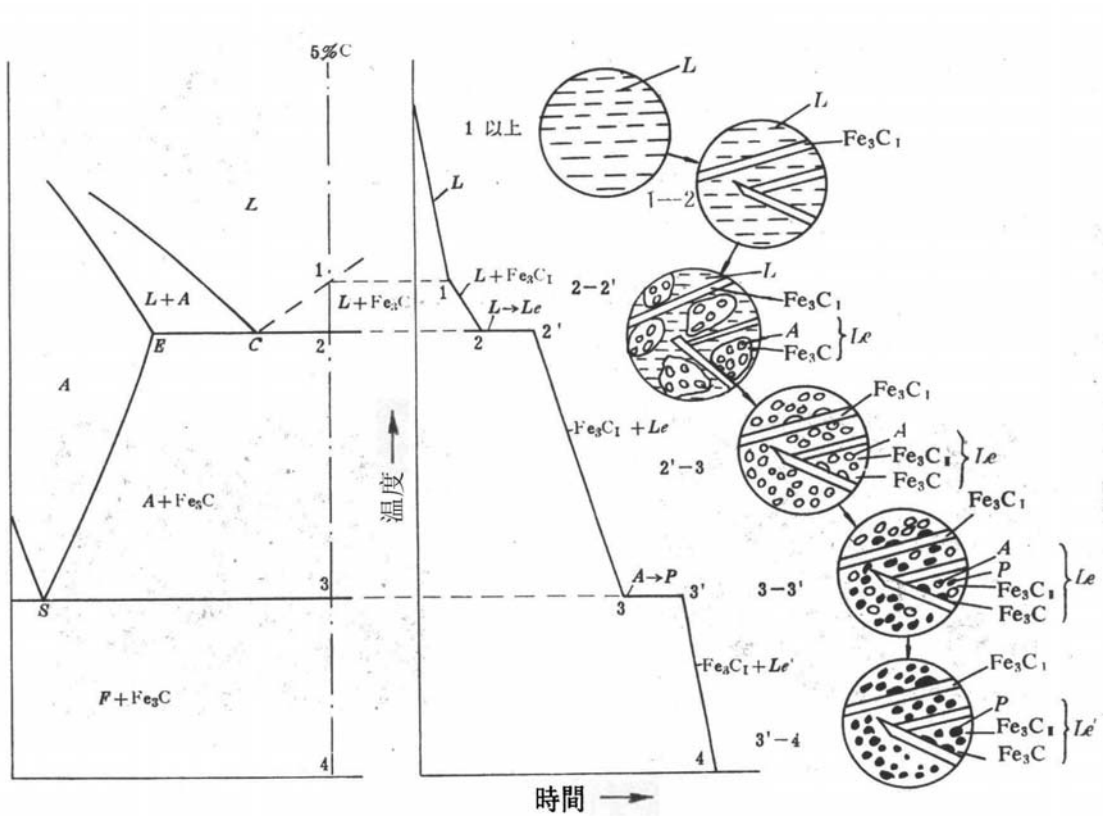


图 7.16 过共晶白口铸铁的冷却曲线和平衡凝固过程示意图

过共晶白口铸铁平衡凝固时，初晶相是  $\text{Fe}_3\text{C}$ ，其余的转变同共晶合金。过共晶白口铸铁的室温组织为  $\text{Ld}' + \text{Fe}_3\text{C}_1$ ，如图 7.15 所示，初晶  $\text{Fe}_3\text{C}_1$  呈板片状。



图 7.17 过共晶白口铸铁的室温平衡组织 100×

## 4-4 含碳量对铁碳合金的组织与性能的影响

一般说来，铁碳合金的成分决定其组织，而组织（包括数量、形态和分布等）又决定了铁碳合金的性能。

### 一、含碳量对铁碳合金室温平衡组织的影响

根据上一节的结晶过程分析并运用杠杆定律计算的结果，可把铁碳合金的成分与组织的关系总结如图 7.18。

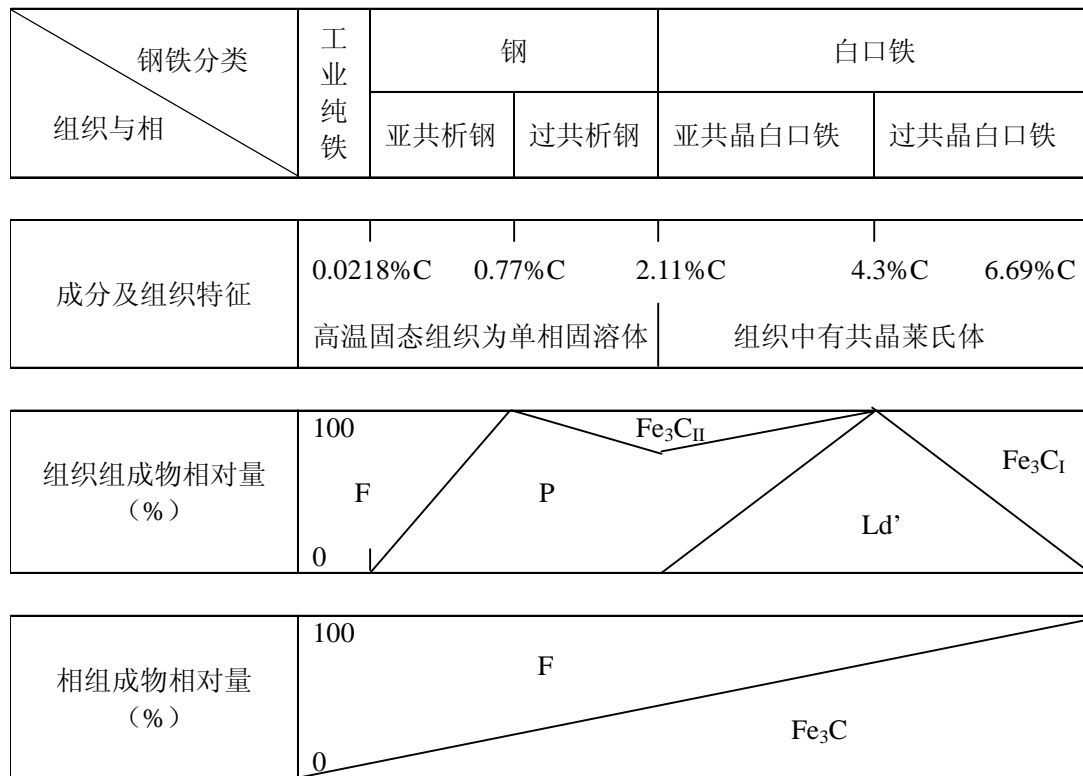
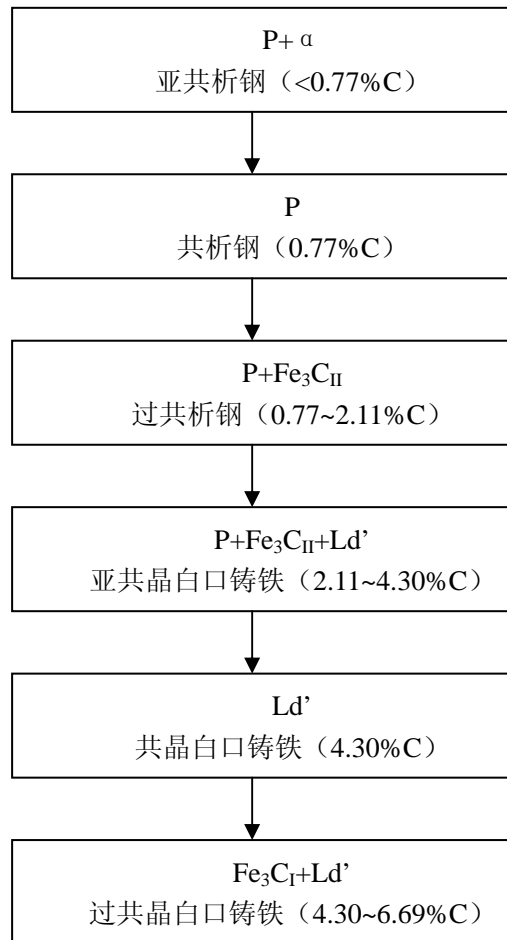


图 7.18 铁碳合金的成分与相组成物及组织组成物之间的关系

由图 7.18 可见，随含碳量的增加，合金室温组织变化如下：



当含碳量增高时，组织中不仅  $\text{Fe}_3\text{C}$  的数量增加，而且  $\text{Fe}_3\text{C}$  的存在形式也在变化，由分布在  $\alpha$  的基体内（如 P），变为分布在  $\gamma$  的晶界上（ $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ），最后当形成 Ld 时， $\text{Fe}_3\text{C}$  已作为基体出现。可见，不同含碳量的铁碳合金具有不同的组织，而这也正是决定它们具有不同性能的原因。

## 二、含碳量对铁碳合金机械性能的影响

由前面的分析可见，铁碳合金的室温平衡组织均由  $\alpha$  和  $\text{Fe}_3\text{C}$  两相组成，其中  $\alpha$  是软韧的相，而  $\text{Fe}_3\text{C}$  是硬脆相。它们的机械性能大致如下：

$\alpha$ :		
	拉伸强度 $\sigma_b$	100~240MN/m <sup>2</sup>
	屈服强度 $\sigma_{0.2}$	100~180MN/m <sup>2</sup>
	延伸率 $\delta$	30~50%
	断面收缩率 $\psi$	70~80%
	布氏硬度 HB	50~80

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

布氏硬度 HB	800
延伸率 $\delta$	0

因此,  $\text{Fe}_3\text{C}$  是个强化相。如果合金的基体是  $\alpha$ , 则若  $\text{Fe}_3\text{C}$  的量越多, 分布越均匀, 材料的强度就越高。但是当这种硬脆的  $\text{Fe}_3\text{C}$  相分布在晶界, 特别是作为基体时, 材料的塑性和韧性就将大大下降。这也正是高碳钢和白口铁脆性高的原因。

图 7.19 表示了含碳量对碳钢的机械性能的影响。

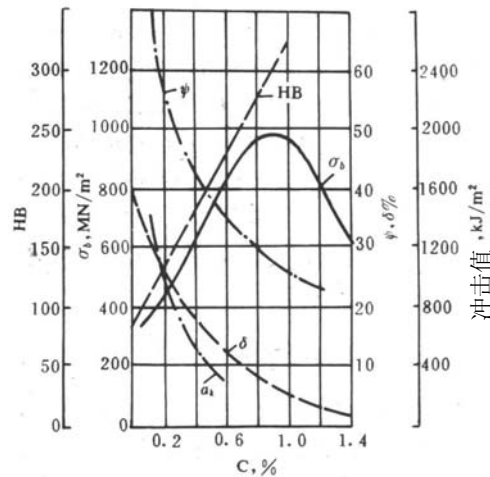


图 7.19 碳钢的机械性能与含碳量的关系

由图 7.19 可见, 含碳量很低的纯铁, 由于是由单相  $\alpha$  构成, 因此其性能就是  $\alpha$  的性能, 即塑性好, 硬度和强度都很低。

亚共析钢的组织是由不同数量的  $\alpha$  与  $\text{P}$  组成的。随着含碳量的增加, 组织中  $\text{P}$  的数量相应地增加, 钢的硬度、强度直线上升, 而塑性指标 ( $\delta$ 、 $\psi$ 、冲击值) 相应降低。

共析钢的缓冷组织是由片层状的  $\text{P}$  构成。由于  $\text{Fe}_3\text{C}$  是一个强化相, 它以薄片状分散地分布于软韧的  $\alpha$  基体上, 起到了强化作用, 因而使  $\text{P}$  具有较高的强度和硬度, 但塑性较差。

过共析钢缓冷后的组织由  $\text{P}$  和  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$  所组成。随着含碳量的增加,  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$  的数量逐渐增加。当含碳量不超过 1.0% 时, 由于在晶界上析出的  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$  一般还不连成网状, 故对性能影响不大。当含碳量大于 1.0% 以后, 因  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$  数量的增多并呈连续网状分布, 故使钢具有很大的脆性, 塑性很低, 强度也随之降低。