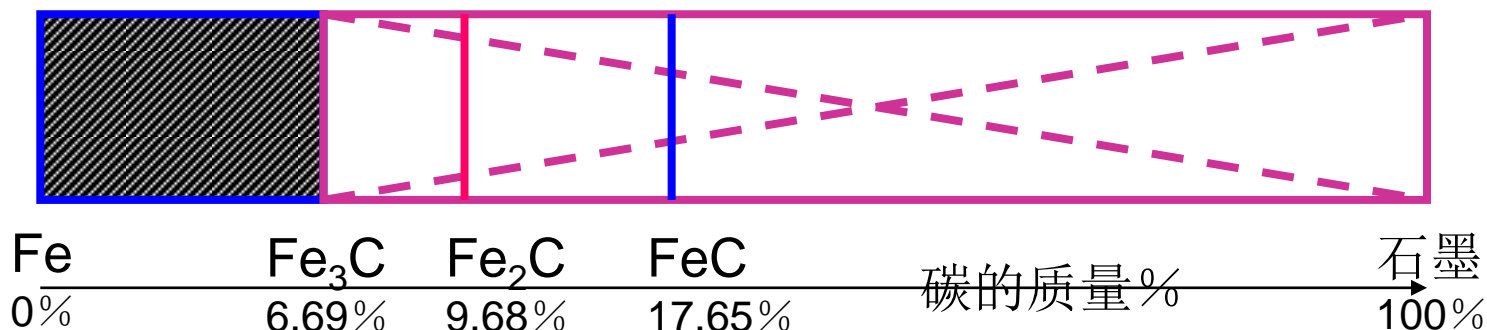


## 第四章 铁碳合金相图



# 引言

- 钢铁是现代工业中应用最广泛的金属材料。
- 钢铁材料属于铁碳合金。**碳素钢、工程铸铁是铁碳合金；低合金钢、合金钢**等实际上是有意加入合金元素的铁碳合金。
- 在铁碳合金中，铁与碳可以形成 $\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{C}$ 、 $\text{FeC}$ 等一系列化合物，随着碳的质量分数增加，合金的性能逐渐变脆，当**碳的质量分数大于5%之后，合金将失去使用价值**。所以，在铁碳合金中，一般只研究碳质量分数5%左右的合金。



## (1) 铁 (Fe)

铁是元素周期表上第 26 号元素，原子量为 55.85，属于过渡族元素。铁在 20°C 时的密度为 7.87g/cm<sup>3</sup>。

在常压小于 1538°C 熔化，2738°C 气化。纯铁熔点为 1538°C，在 1394°C 和 912°C 温度下发生两次同素异晶转变并在 770°C 以下具有磁性，为铁磁物质，770°C 以上磁性消失。

温度范围 (°C)	晶体符号	晶体结构
1538-1394	$\delta$ - Fe	体心立方 (BCC)
1394-912	$\gamma$ - Fe	面心立方 (FCC)
912-770	$\alpha$ - Fe	体心立方 (BCC)
770 以下	$\alpha$ - Fe	体心立方 (BCC)

## (2) 碳 (C)

---

碳的原子序数为 6，原子量为 12.01，原子半径 0.077nm，20℃时的密度为 2.25g/cm<sup>3</sup>。自然界中，碳以石墨和金刚石两种形态存在。

### (3) 铁碳合金的基本相

铁碳合金的相结构主要有固溶体和金属化合物两类。属于固溶体相的有铁素体和奥氏体，属于金属化合物相的主要为渗碳体。

相	符号	描述
液相 (Liquid)	L	-
$\delta$ -铁素体Ferrite	$\delta$ (F)	C在 $\delta$ -Fe中的间隙固溶体
奥氏体Austenite	$\gamma$ (A)	C在 $\gamma$ -Fe中的间隙固溶体
$\alpha$ -铁素体 Ferrite	$\alpha$ (F)	C在 $\alpha$ -Fe中的间隙固溶体 (室温，软，塑性好)
渗碳体	$\text{Fe}_3\text{C}$	Fe和C形成的金属化合物 硬，脆

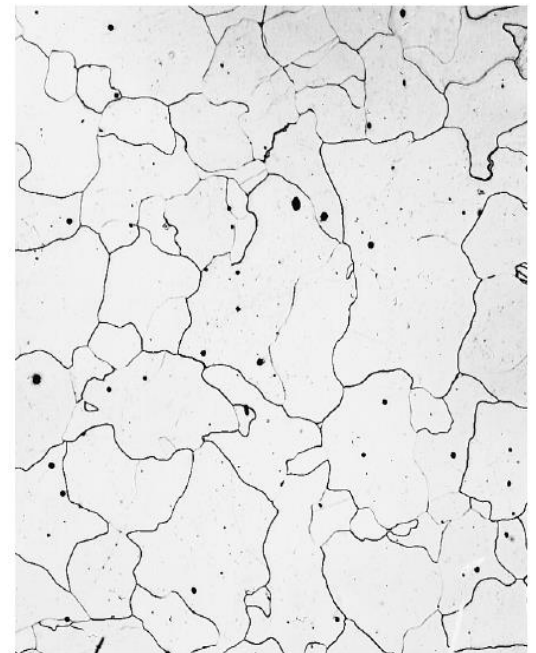
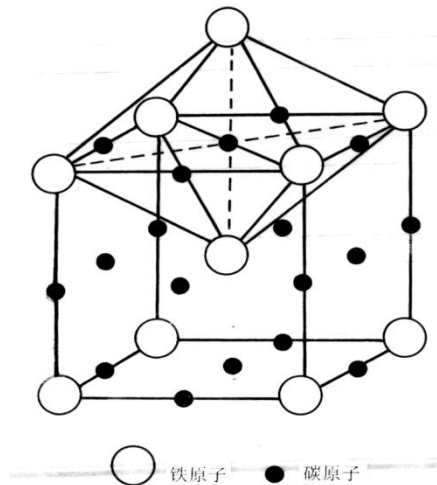
## ◆ 铁素体（Ferrite）—C在 $\alpha$ -Fe中的间隙固溶体

912℃以下时，纯铁为具有体心立方晶格的 $\alpha$ -Fe，碳溶于 $\alpha$ -Fe中形成的间隙固溶体称为铁素体，用符号“F”表示。

由于 $\alpha$ -Fe具有体心立方晶格，晶格间隙很小，所以溶碳能力很小，在727℃时溶碳最多（ $\omega_c = 0.0218\%$ ），室温下几乎约为零（ $\omega_c = 0.0008\%$ ）。

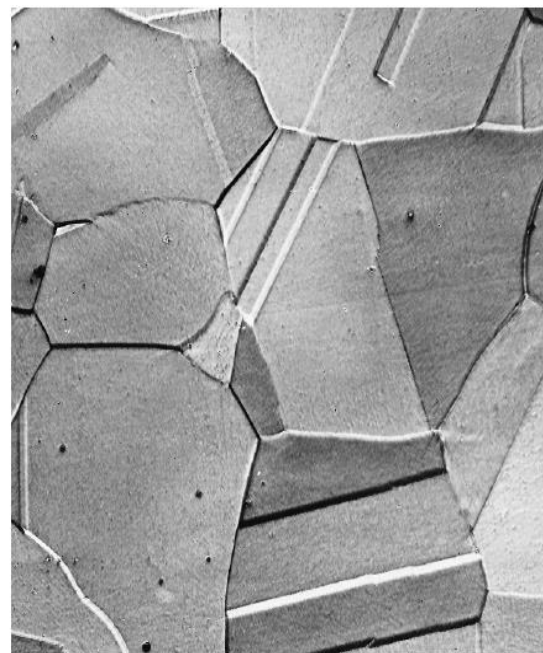
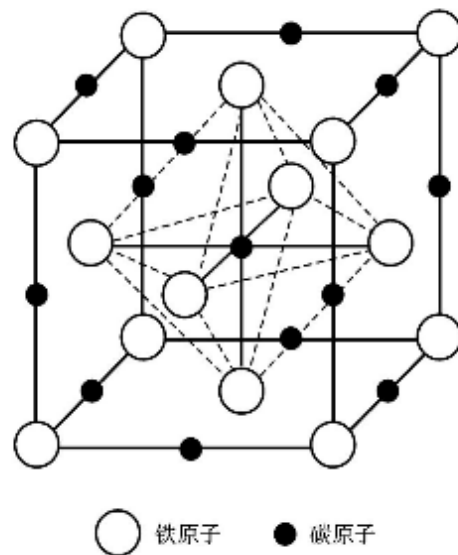
铁素体的强度、硬度不高，塑性和韧性好。

显微组织与纯铁相同，呈明亮的多边形晶粒组织。



## ◆ 奥氏体 (Austenite) -C在 $\gamma$ -Fe中的间隙固溶体

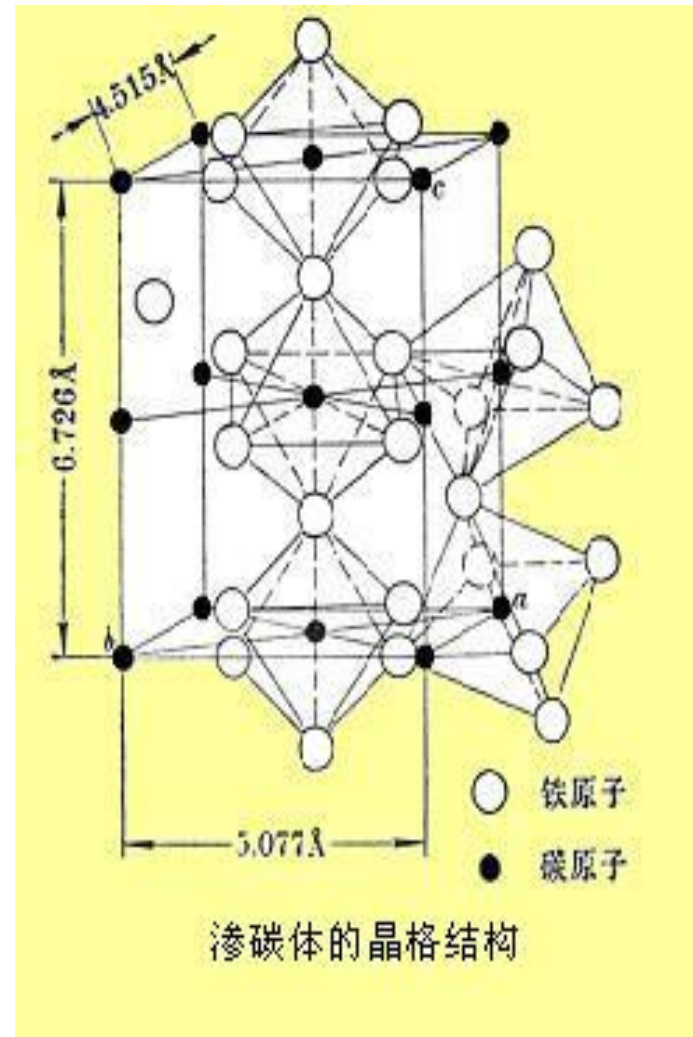
- C溶于 $\gamma$ -Fe中的间隙固溶体称为奥氏体，符号A
- 奥氏体的晶体结构为面心立方晶格
- 奥氏体是存在于 $727^{\circ}\text{C} \sim 1493^{\circ}\text{C}$ 下的高温组织，
- $\gamma$ -Fe的溶碳能力较强，在 $727^{\circ}\text{C}$ 时碳的溶解度为 $\omega_{\text{C}}=0.77\%$ ，随着温度的升高，溶解度增大，到 $1148^{\circ}\text{C}$ 时达到最大（ $\omega_{\text{C}}=2.11\%$ ），固溶强化效果较明显。





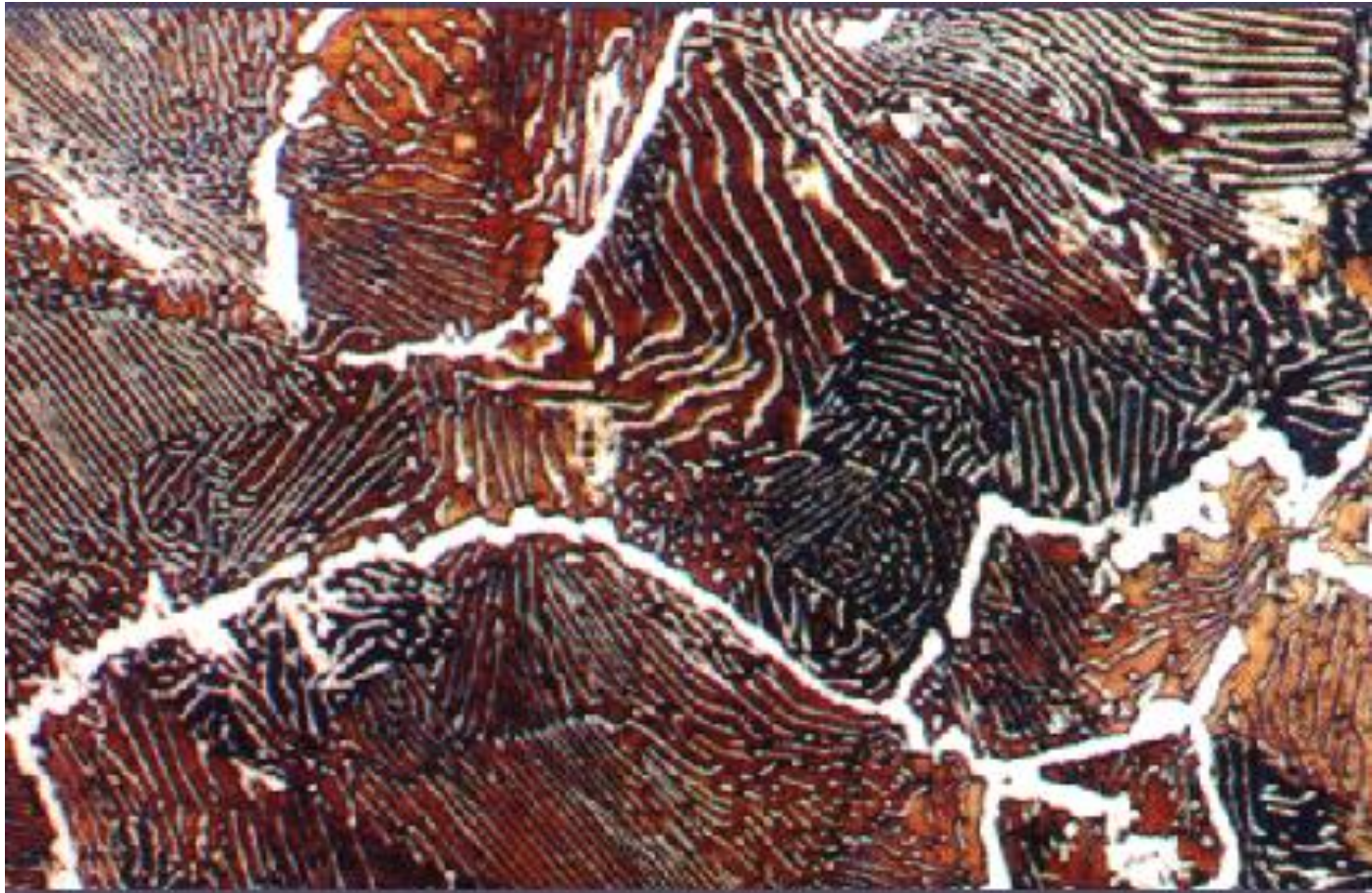
## ◆ 渗碳体 (Cementite)

- 渗碳体的分子式为 $\text{Fe}_3\text{C}$ ，它是一种具有复杂晶格的间隙化合物。可用符号 Cem 表示，是铁碳合金中重要的基本相。
- 渗碳体在钢和铸铁中与其他相共存时呈片状、球状、网状或板状。
- 渗碳体是碳钢中主要强化相，**硬度高，塑性和韧性几乎为0。**



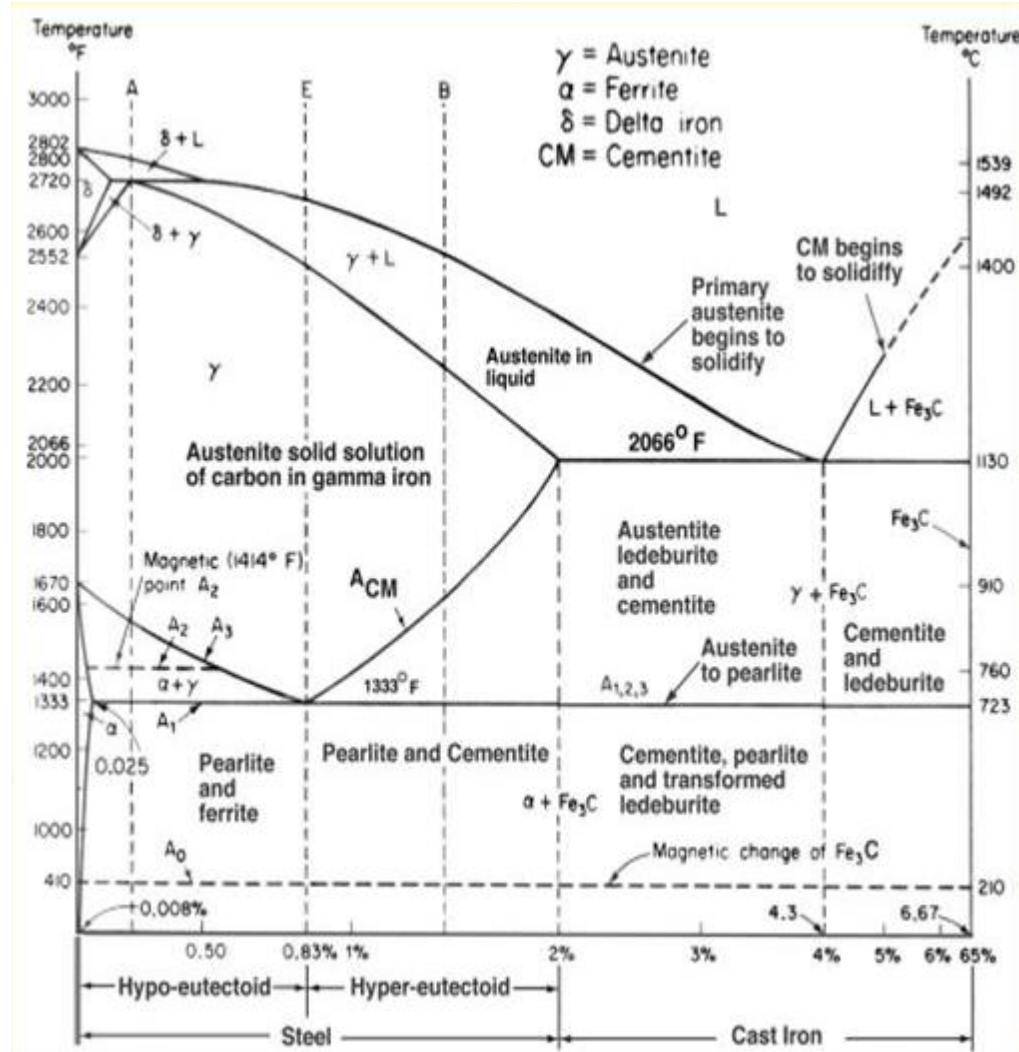
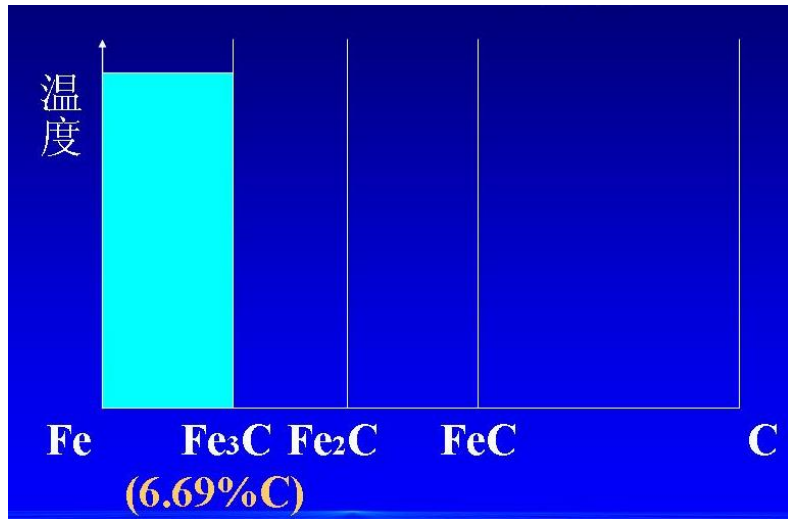


## 共析渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}$ 共析



# 铁碳相图Phase diagram of Fe-C

铁碳合金相图是研究铁碳合金的重要工具。它是研究铁碳合金的化学成分、组织和性能之间关系的理论基础。



## 2. Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图分析

下图是 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图，图中各特征点的符号是国际通用的，不能随意更换。便于理解，将左上角 ( $\delta$ -Fe) 包晶反应部分省略

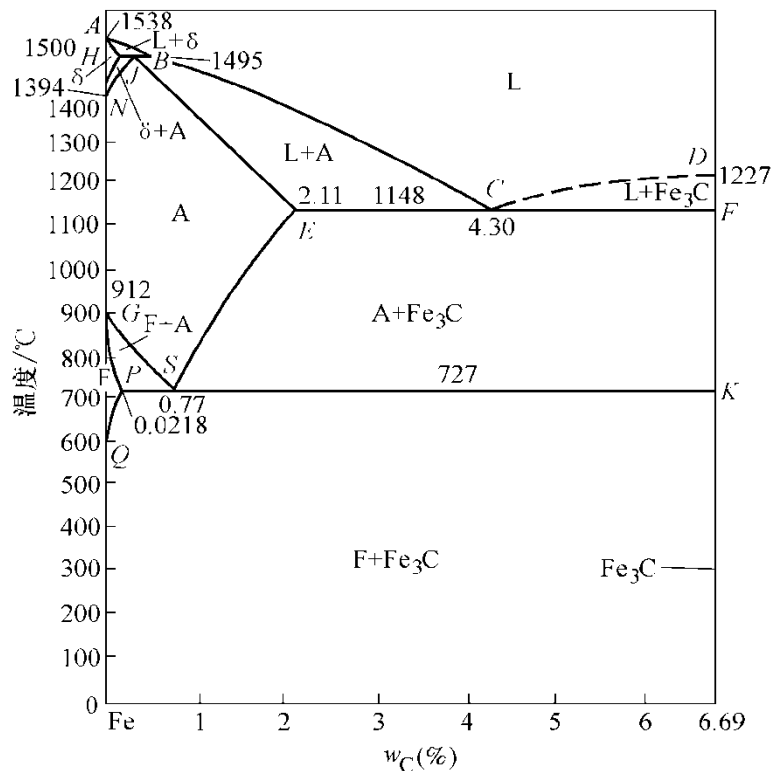


图4-2 Fe-Fe<sub>3</sub>C相图

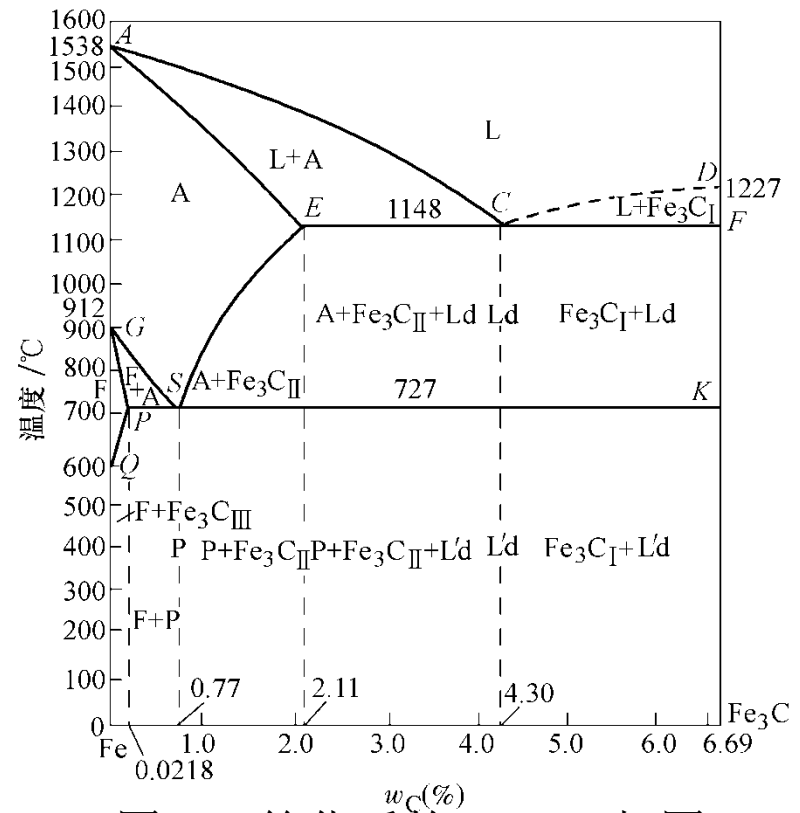
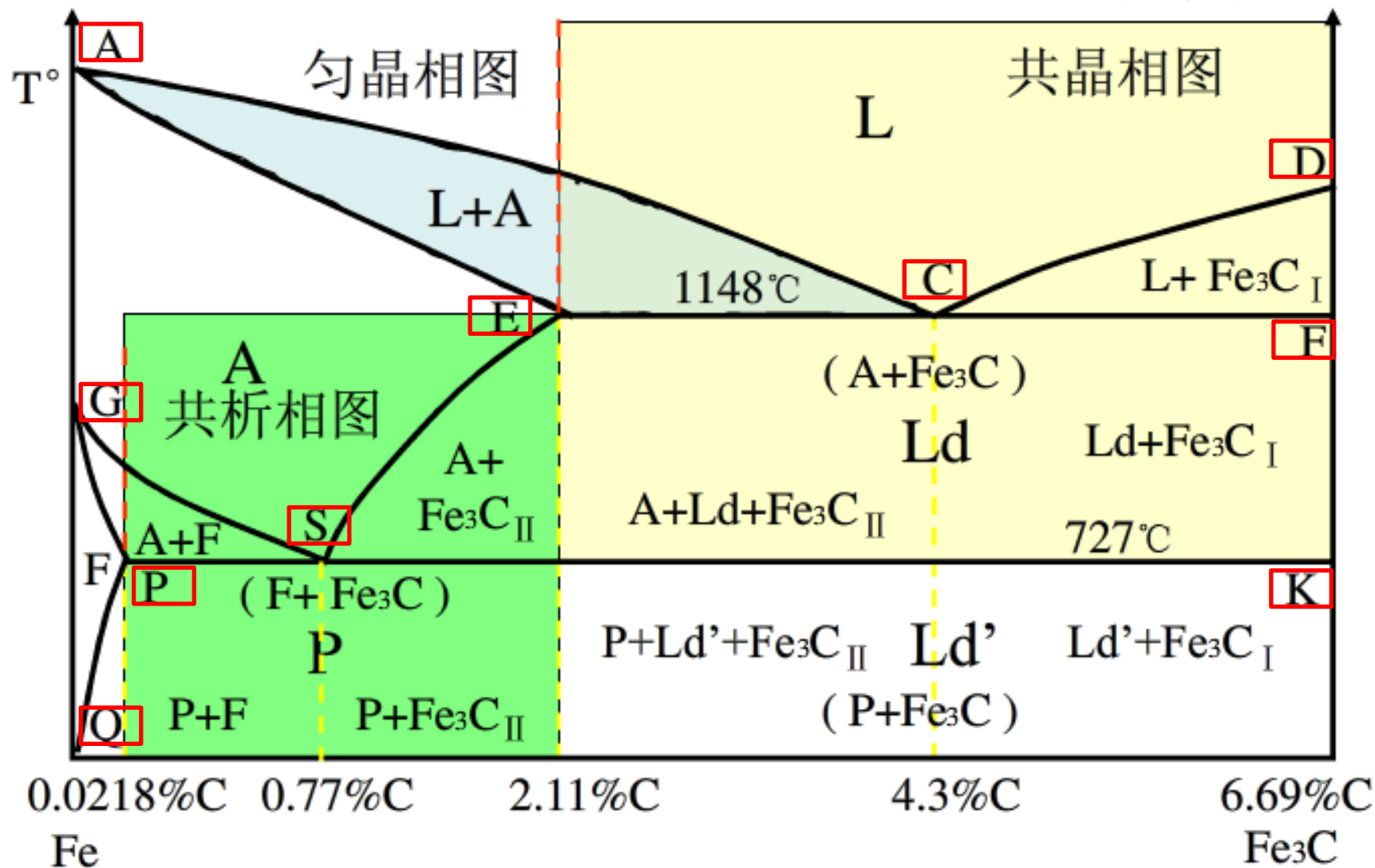


图4-5 简化后的Fe-Fe<sub>3</sub>C相图

# 特点点

## Fe - Fe<sub>3</sub>C 相图



# 特点

特点点	温度/℃	$w_c \times 100$	含 义 <sup>①</sup>
A	1538	0	纯铁熔点
B	1495	0.53	包晶转变时的液相成分
C	1148	4.30	共晶点。共晶转变反应式: $L_C \xrightleftharpoons{1148^\circ\text{C}} A_E + Fe_3C$
D	1227	6.69	$Fe_3C$ 熔点
E	1148	2.11	碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的最大溶解度, 也是碳钢与白口铸铁的分界点 (奥氏体的最高含碳量)
F	1148	6.69	共晶渗碳体成分点
G	912	0	$\alpha\text{-Fe} \rightleftharpoons \gamma\text{-Fe}$ 同素异构转变点 ( $A_3$ )
H	1495	0.09	碳在 $\delta\text{-Fe}$ 中最大溶解度
J	1495	0.17	包晶点成分。包晶反应式: $L_B + \delta_H \rightleftharpoons A_j$
K	727	6.69	共析渗碳体成分点
N	1394	0	$\gamma\text{-Fe} \rightleftharpoons \delta\text{-Fe}$ 同素异构转变点 ( $A_4$ )
P	727	0.0218	碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点。共析转变反应式: $A_S \xrightleftharpoons{727^\circ\text{C}} F_P + Fe_3C$
Q	600 室温	$\sim 0.0057$ $\sim 0.0008$	600℃时碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的溶解度

①表中各特点点含义, 均指合金在缓慢冷却或加热的相变。



# 特性线和相区

液相线 (liquidus): 相图上的液相线是 ACD

固相线(solidus): 相图上的固相线是 AECF,

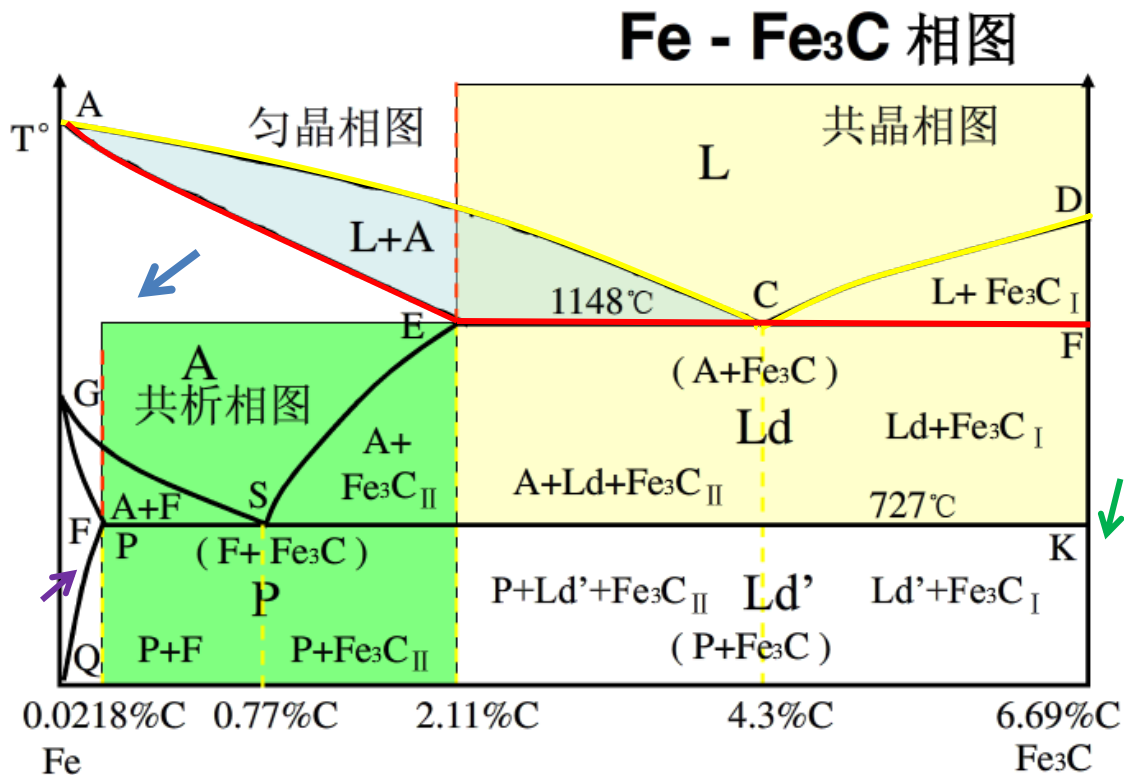
相图中有四个单相区分别是:

ACD 以上-液相区(L)

AESG-奥氏体区(A)

GPQ-铁素体区(F)

DFK以右-渗碳体区  
( $\text{Fe}_3\text{C}$  或 Cem)



## 两相区:

ACE——液相+奥氏体区( $L + A$ )

DCF——液相+渗碳体区( $L + Fe_3C$ )

GSP——铁素体+奥氏体区( $A + F$ )

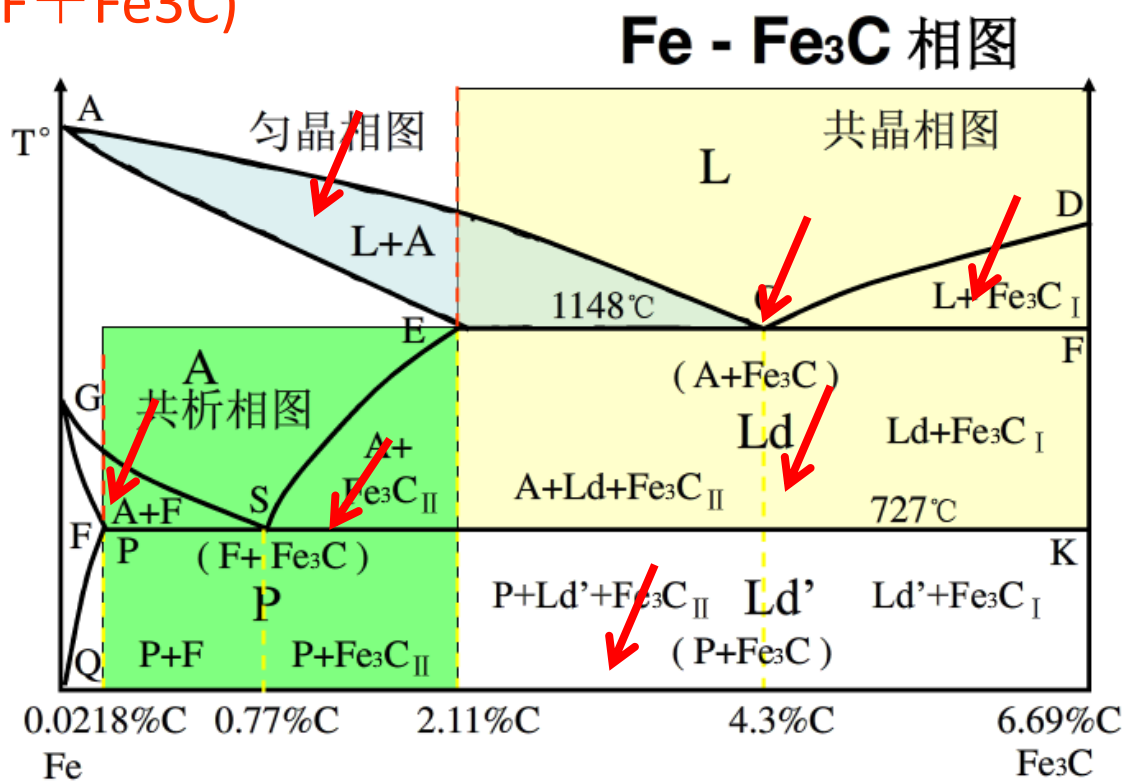
ECFKS——奥氏体+渗碳体( $A + Fe_3C$ )

QPSKL——铁素体+渗碳体( $F + Fe_3C$ )

## 两个水平线:

ECF——共晶转变线

PSK——共析转变线



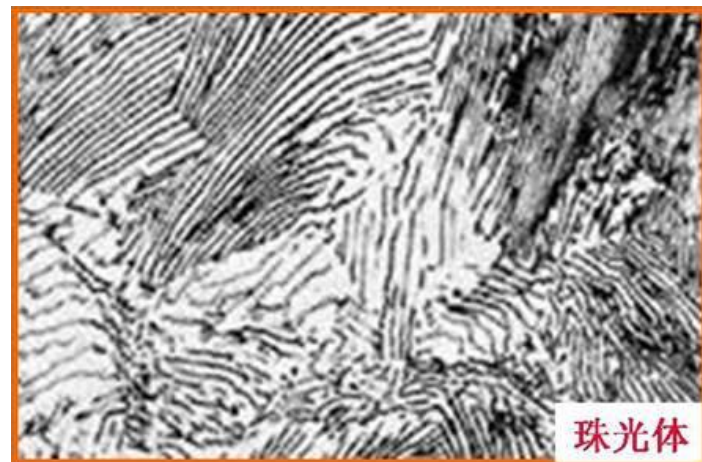


- 注意：

珠光体转变（共析反应产物）



机械混合物，珠光体P



珠光体是一种组织，不是一种新相。

珠光体为铁素体和渗碳体的机械混合物。性能介于铁素体和渗碳体之间。

• 注意：

莱氏体（**共晶反应产物**）

**$L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$**

**机械混合物，珠光体P**

莱氏体是一种组织，不是一种新相。

莱氏体为奥氏体和渗碳体的机械混合物。（高温组织）

温度降低， **$L_d \rightarrow P + \text{Fe}_3\text{C}$** ，即 **$L_d'$** 低温莱氏体

**莱氏体中因为含有大量渗碳体，因此，是一种硬脆的组织，延伸率几乎为0。**

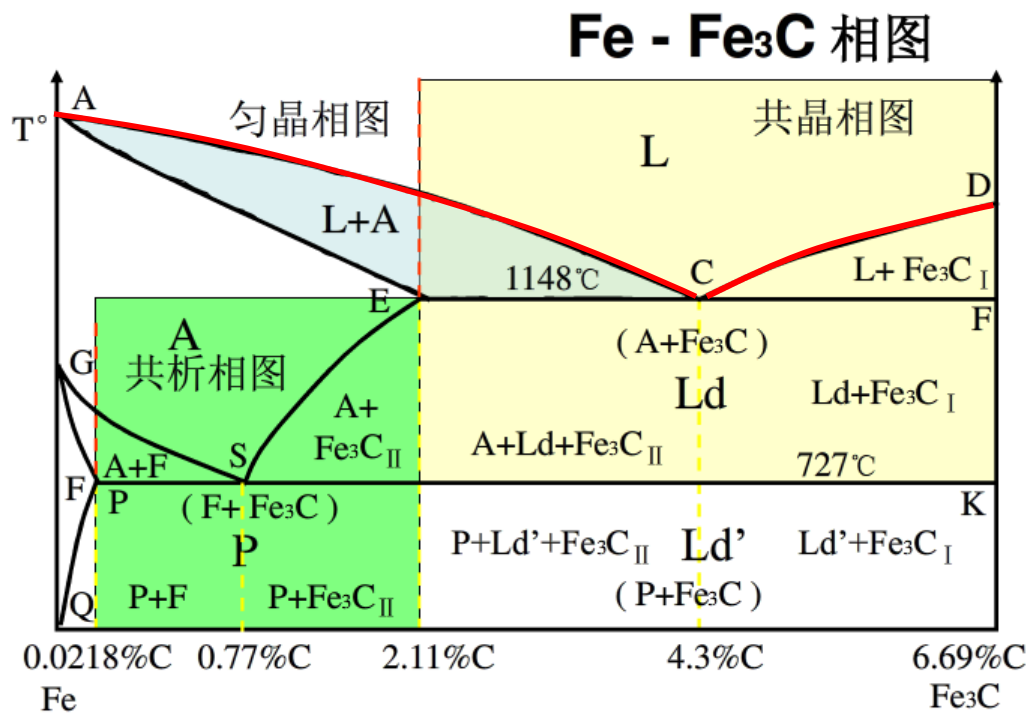


## 关键温度线转变介绍

◆ **AC线** 为液体向奥氏体转变的开始线。 $\omega_c < 4.3\%$ 铁碳合金在此线之上为均匀液相，冷却至该线时，液体中开始结晶出固相奥氏体，即： $L \rightarrow A$

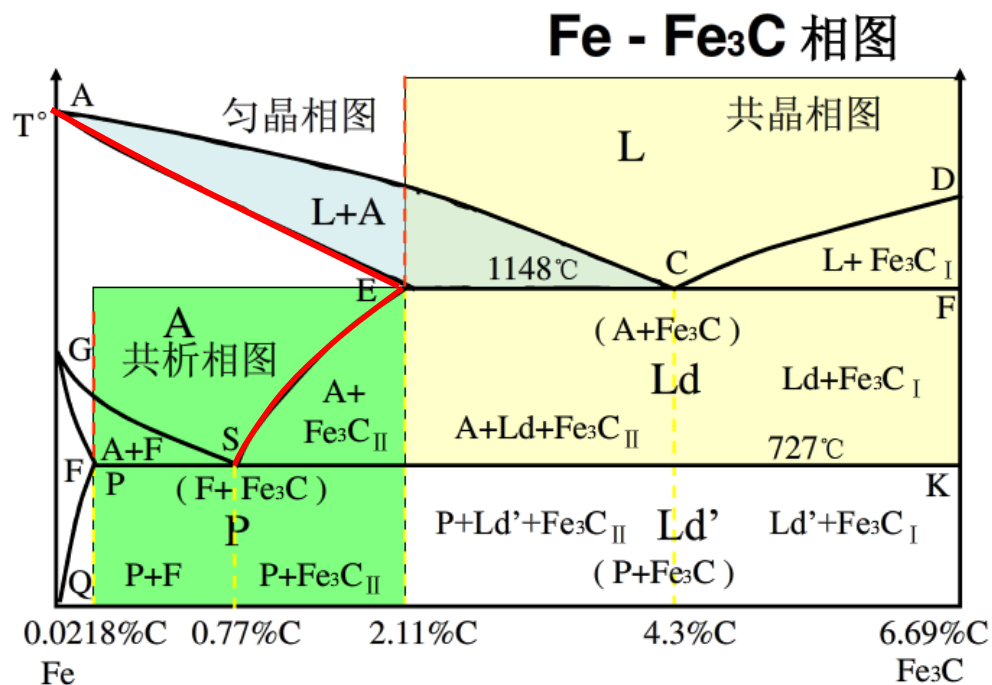
◆ **CD线** 为液体向渗碳体转变的开始线。 $\omega_c > 4.3\% \sim 6.69\%$ 间的铁碳合金在此线之上为均匀液相，冷却至该线时，液体中开始结晶出渗碳体，称为一次渗碳体，用“ $Fe_3C_I$ ”表示。

即： $L \rightarrow Fe_3C_I$ 。



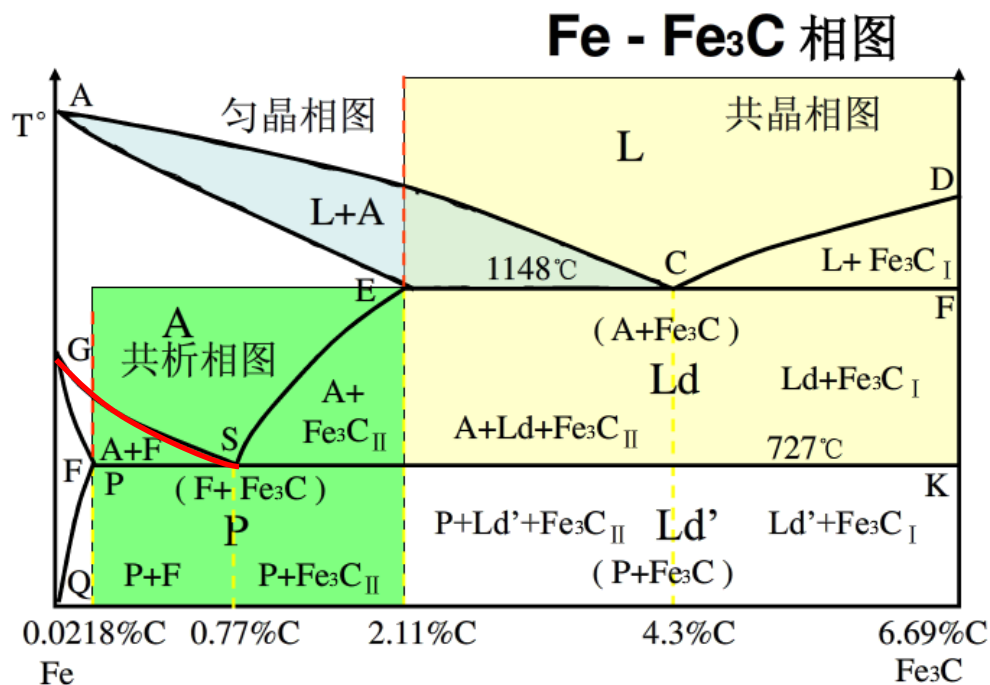
## 关键温度线转变介绍

◆ **AE线** 为液体向奥氏体转变的终了线。 $\omega_C < 2.11\%$  的液体合金冷至此线，全部转变为单相奥氏体组织。



◆ **ES线** 碳在奥氏体中的固溶度曲线。此温度常称为Acm线。低于此温度，奥氏体中将析出渗碳体，称为二次渗碳体（Fe<sub>3</sub>C II）

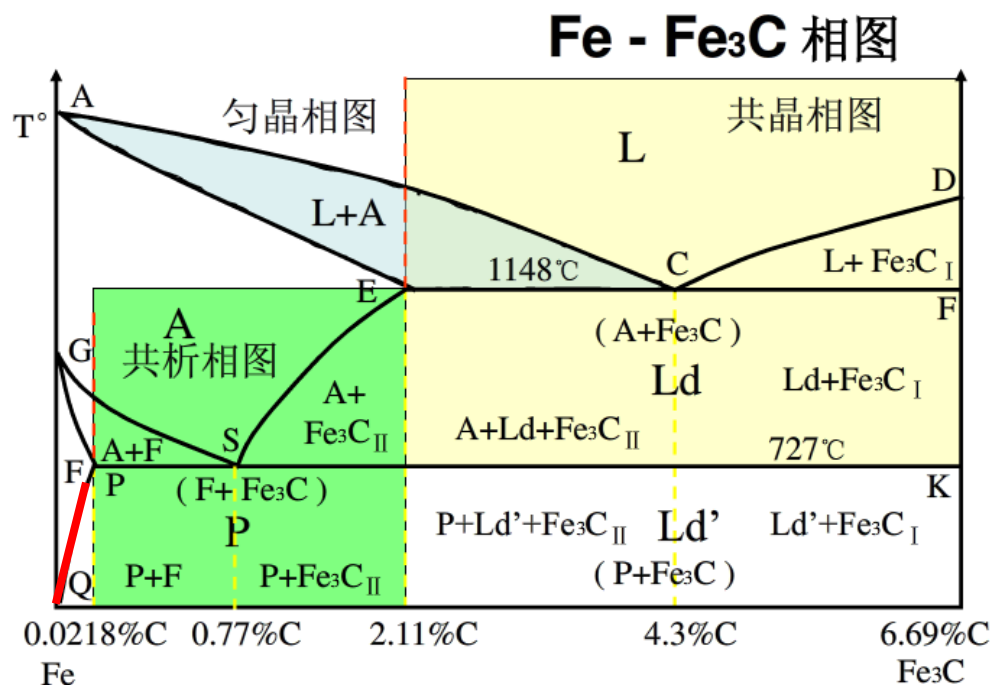
◆ **GS线** 又称**A3线**，是 $\omega_c < 0.77\%$ 的铁碳合金固态冷却时，奥氏体向铁素体转变的开始线。随着温度的下降，转变出的铁素体量不断增多，剩余奥氏体的碳质量分数不断降低。（每增加0.1%C， $A_3$ 温度约降低 $24^\circ\text{C}$ ）



## ◆ PQ线

是碳在铁素体中的溶解度曲线。

- ✓ 727℃时铁素体溶碳量最大为0.0218%。
- ✓ 随着温度的降低，溶碳量不断减小，当温度降至室温时，溶碳量降至0.0008%。
- ✓  $\omega_C > 0.0218\%$ 的铁碳合金，从727℃降至室温时，均会由铁素体析出渗碳体，称为三次渗碳体，用“ $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ ”表示。



# 小结-相区

## 四个单相图区：

液相区 (L)      奥氏体相区 (A)

铁素体相区 (F)      渗碳体相区 (指DFK线)

## 两条三相共存线：

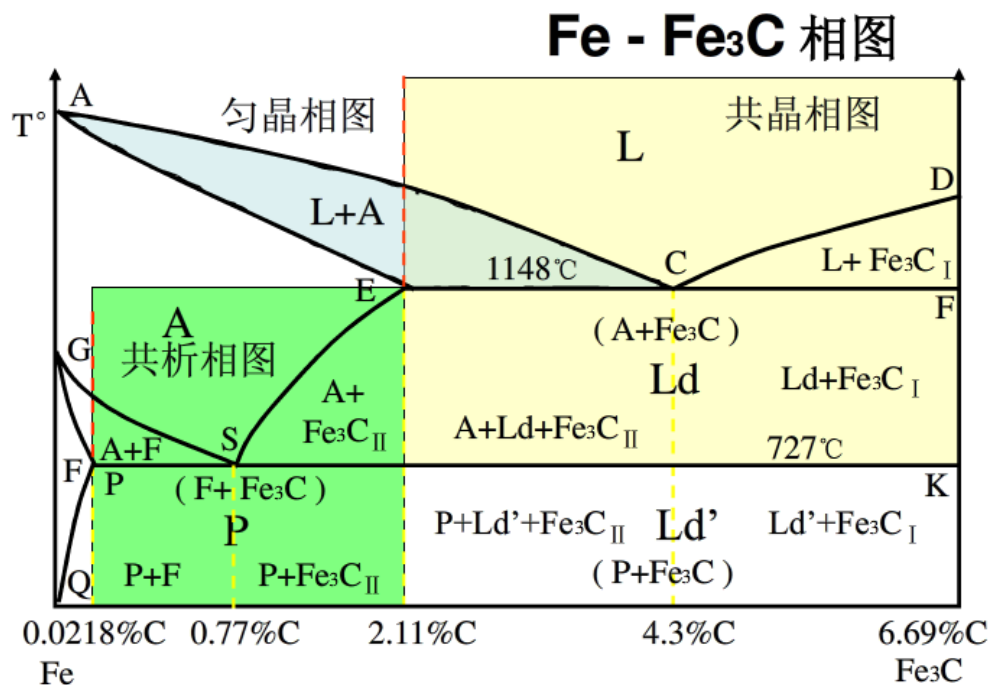
共晶线ECF，L、A和Fe<sub>3</sub>C三相共存

共析线PSK，A、F和Fe<sub>3</sub>C三相共存。

## 五个两相区：

L+A、L+Fe<sub>3</sub>C<sub>I</sub>

A+F、A+Fe<sub>3</sub>C、F+Fe<sub>3</sub>C

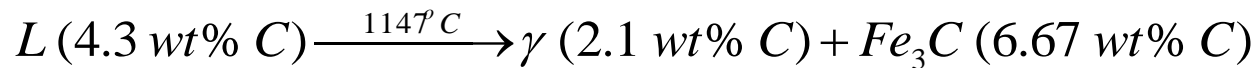




# 小结-三反应

## 两个反应

### 共晶反应



### 共析反应

