



机械工程材料及热加工工艺

安玉民

河北工业大学，机械工程学院

邮箱：anyumin@hebut.edu.cn

绪论

第1章 机械工程材料的性能

第2章 金属的晶体结构与结晶

第3章 合金的晶体结构与相图

第4章 铁碳合金相图和碳钢

第5章 钢的热处理

第6章 合金钢

第7章 铸铁

第8章 有色金属及其合金

第9章 非金属材料与新型材料

第10章 铸造成型

第11章 锻压成型

第12章 焊接与胶接成形

第13章 非金属材料成形

第14章 机械零件材料及毛坯的选择与质量检验

- **铁碳合金**: 碳钢和铸铁的统称，都是以**铁**和**碳**为基本组元的合金，是现代工业尤其是机械制造业用量最多、使用最广的工程材料。
根据**铁碳合金的含碳量不同**，又分为**碳钢**和**铸铁**。
含碳量为 $0.0218\% \sim 2.11\%$ 的铁碳合金为碳钢；
含碳量大于 2.11% 的铁碳合金为铸铁。
- **铁碳合金相图**: 研究铁碳合金的工具，是研究碳钢和铸铁成分、温度、组织和性能之间关系的理论基础，也是制定各种热加工工艺的依据。



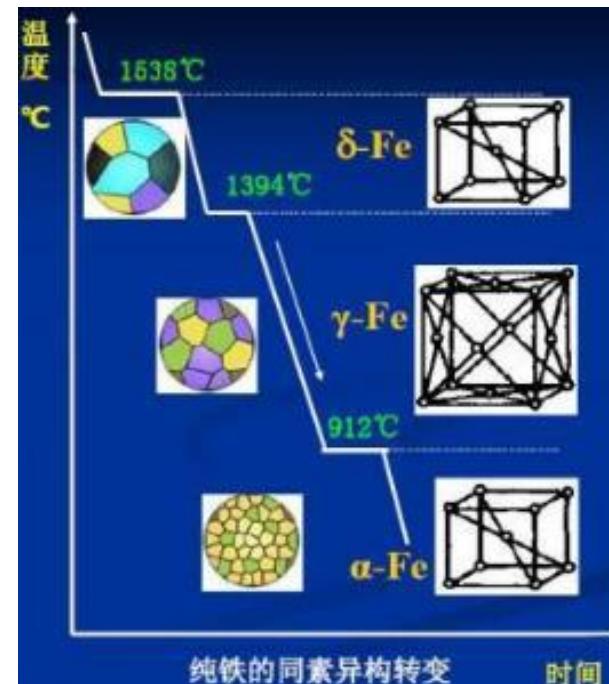
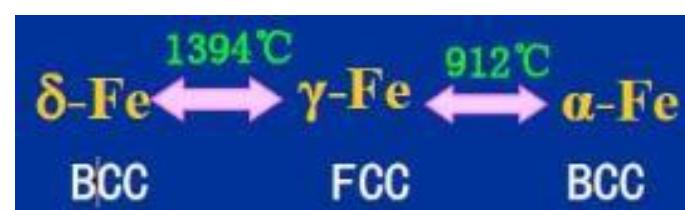
➤ 纯铁

Fe是元素周期表中的过渡族元素，常压下熔点为1538°C。

通常所说的工业纯铁指的是常温下的 α -Fe，常含有0.1~0.2%的杂质，含碳量很低。

纯铁强度、硬度低，塑性、韧性好，在工业生产中主要利用其高的导磁率，作电工材料，很少用来制造机械零件。

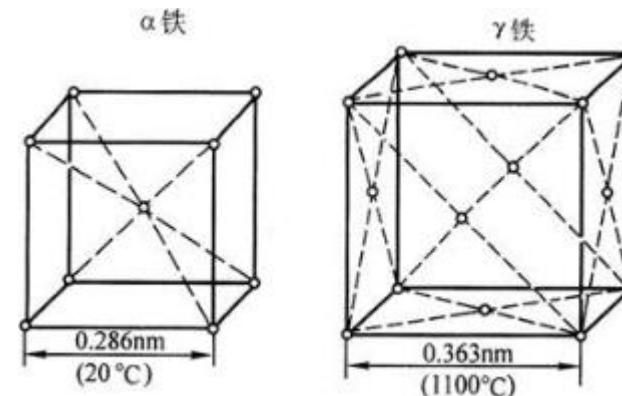
纯铁在固态不同温度下会发生晶格类型的转变，即具有同素异构转变。



»»» §4.1 铁碳合金的组元和相

纯铁从体心立方晶格到面心立方晶格再到体心立方晶格，不仅是晶体结构发生变化，同时Fe原子在不同晶体结构中原子半径不同，致密度和配位数也发生变化，这就意味着Fe原子在不同晶格条件下所反映的性能不同。

	原子数	原子半径	配位数	致密度
体心立方	2	$\frac{\sqrt{3}}{4}a$	8	0.68
面心立方	4	$\frac{\sqrt{2}}{4}a$	12	0.74



纯铁的同素异构转变是一个相变过程，有着很重要的实际意义，正是因为有了这种转变，才使钢铁通过热处理及合金化的途径实现组织性能的多种变化成为可能。

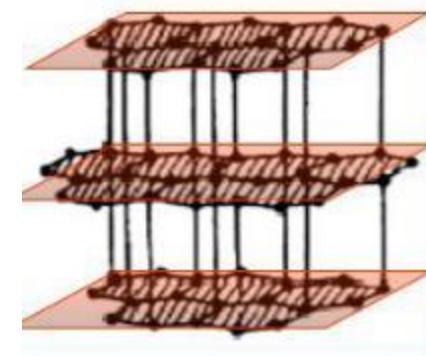
并不是所有的金属都有同素异构转变，许多金属在固态下只有一种晶体结构类型，如铝、铜、银等金属。

➤ 碳

碳是非金属元素，自然界存在的游离的碳有**金刚石**和**石墨**，

它们是同素异构体；

石墨具有简单的**六方晶格**，通常用字母 G 来表示，同一层晶面上结合力大，不同层之间结合力弱，石墨在形成过程中呈片状生长。由此使得石墨具有一定的**润滑性**，石墨的强度、硬度、塑性和韧性极低。





铁碳合金的基本相

- 铁碳合金的二个组元：Fe、C；
- L相：液态下无限互溶，成分均匀；
- 固态下：固溶体和金属间化合物；

1. 固溶体相
- 固溶体相：C溶于Fe的不同晶格中形成间隙固溶体。
 - 金属化合物相：C与Fe形成金属化合物 Fe_3C ，即渗碳体。

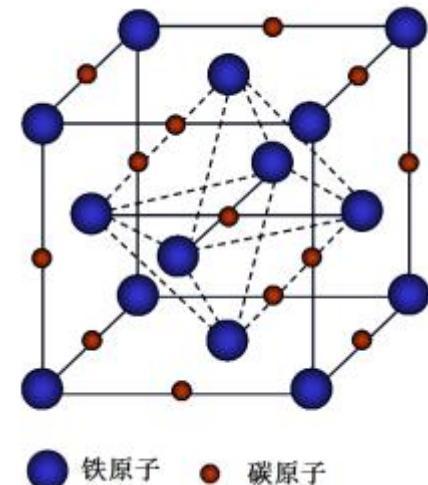
(1) 铁素体Ferrite

- C溶于 α -Fe中所形成的间隙固溶体，铁素体保持 α -Fe的体心立方晶格，符“F”或“ α ”表示。虽然BCC的间隙总体积较大，但单个间隙体积较小，所以它的溶碳量很小，最多只有0.0218%（727°C时），室温时的溶碳量仅为0.0008%，因此，铁素体性能与纯铁接近，强度和硬度低，塑性和韧性好。
- $\delta=30\% \sim 50\%$ ， $\sigma_b=180 \sim 280 \text{ MPa}$ ，50~80HBS
- 铁素体在室温下可稳定存在。

»»» §4.1 铁碳合金的组元和相

(2) 奥氏体Austenite

- C溶于 γ -Fe中所形成的间隙固溶体，面心立方晶格，符号“A”或“ γ ”表示。
- 虽然FCC的间隙总体积较小，但单个间隙体积较大，所以它的溶碳量较大，最多有2.11%（1148°C时），727°C时为0.77%。
- 奥氏体强度较低、硬度不高、塑性好，易于压力加工，钢材的热加工，如锻造都在奥氏体相区进行。所谓的“趁热打铁”正是这个意思。
- $\sigma_b=400\text{ MPa}$, 170~220HBS, $\delta=40\% \sim 50\%$
- 奥氏体在高温下可稳定存在，碳钢室温下的组织中无奥氏体，但当钢中含有某些合金元素时，可部分或全部转变为奥氏体组织，如奥氏体不锈钢。



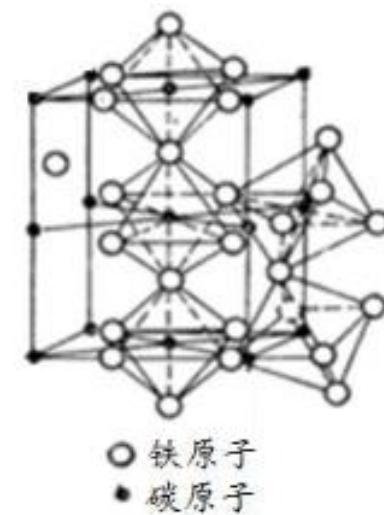
(3) δ 固溶体

δ 固溶体是C溶于 δ -Fe中所形成的间隙固溶体，具有体心立方晶格，又称 δ 铁素体，用字母 δ 表示。 δ 固溶体存在于 $1394^{\circ}\text{C} \sim 1538^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内，是相图中的高温相，在本课中不做详细讨论

2. 金属化合物相

(1) 渗碳体Cementite

- Fe与C组成的金属化合物，具有复杂的晶体结构，渗碳体的含碳量为6.69%，渗碳体以“ Fe_3C ”或“ Cm ”符号表示
- 渗碳体的熔点为 1227°C ，渗碳体在熔点以下可以稳定存在。
- 硬度很高（ $\text{HB}=800$ ）而脆，塑性几乎等于零
- 渗碳体在钢和铸铁中，一般呈片状、网状或球状存在。它的形状和分布对钢的性能影响很大，是铁碳合金的重要强化相。
- 渗碳体是一个亚稳定相，在一定条件下可发生分解成石墨。对铸铁有重要的意义。



»»» §4.1 铁碳合金的组元和相

总结：

- 在铁碳合金中一共有三个基本相，即铁素体（F或 α ）、奥氏体（A或 γ ）和渗碳体（ Fe_3C 或Cm）。
- 奥氏体一般仅存在于高温下，所以室温下所有的铁碳合金中只有两个相，就是铁素体和渗碳体。
- 由于铁素体中的含碳量非常少，所以可以认为铁碳合金中的碳绝大部分存在于渗碳体中，这一点是十分重要的。

»»» §4.2 铁碳合金相图

分析二元相图的步骤

1. 先分清图中包括哪些基本类型的相图

2. 相区的确定

相区接触法则：相邻两个相区的相数差为1

单相区的确定

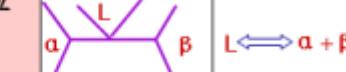
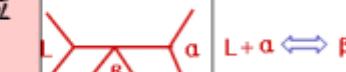
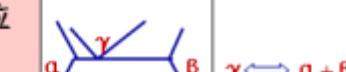
相图中液相线以上为液相区

相图中每一条水平线必定与3个单相区接触

两相区的确定：两个单相区之间夹有一个两相区，该两相区的相由两个相邻单相区的相组成

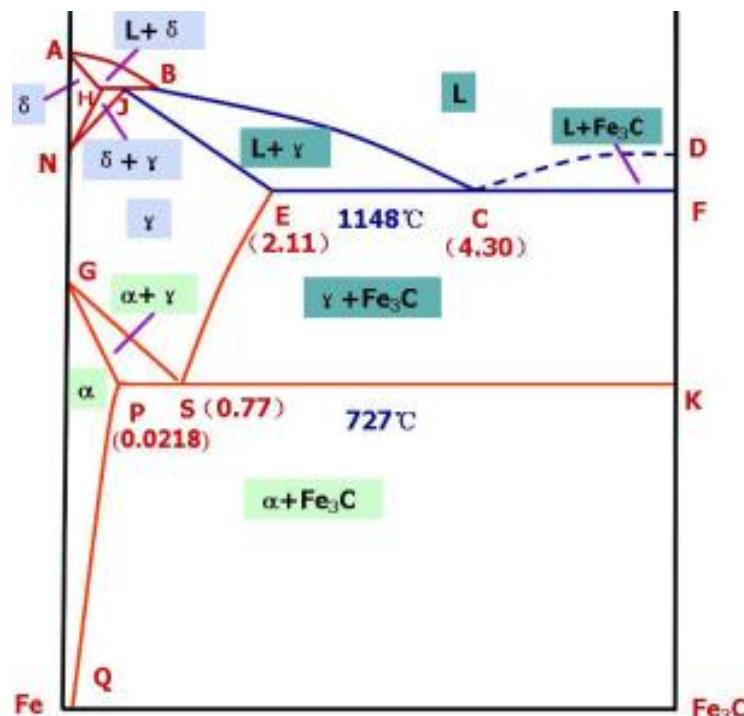
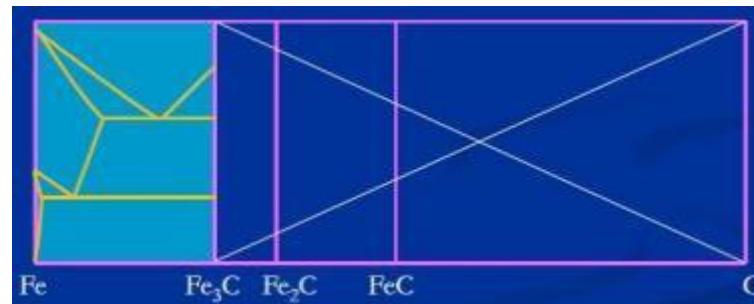
三相区的确定：二元相图中的水平线是三相区，其三个相由与该三相区点接触的三个单相区的相组成

常见三相等温水平线上的反应

反应名称	图形	反应式	说明
共晶反应		$L \rightleftharpoons \alpha + \beta$	恒温下由一个液相同时结晶出两个成分和结构都不同的固相
包晶反应		$L + \alpha \rightleftharpoons \beta$	恒温下由液相包着固相生成另一个新固相
共析反应		$\gamma \rightleftharpoons \alpha + \beta$	恒温下由一个固相同时析出两个成分和结构都不同的固相

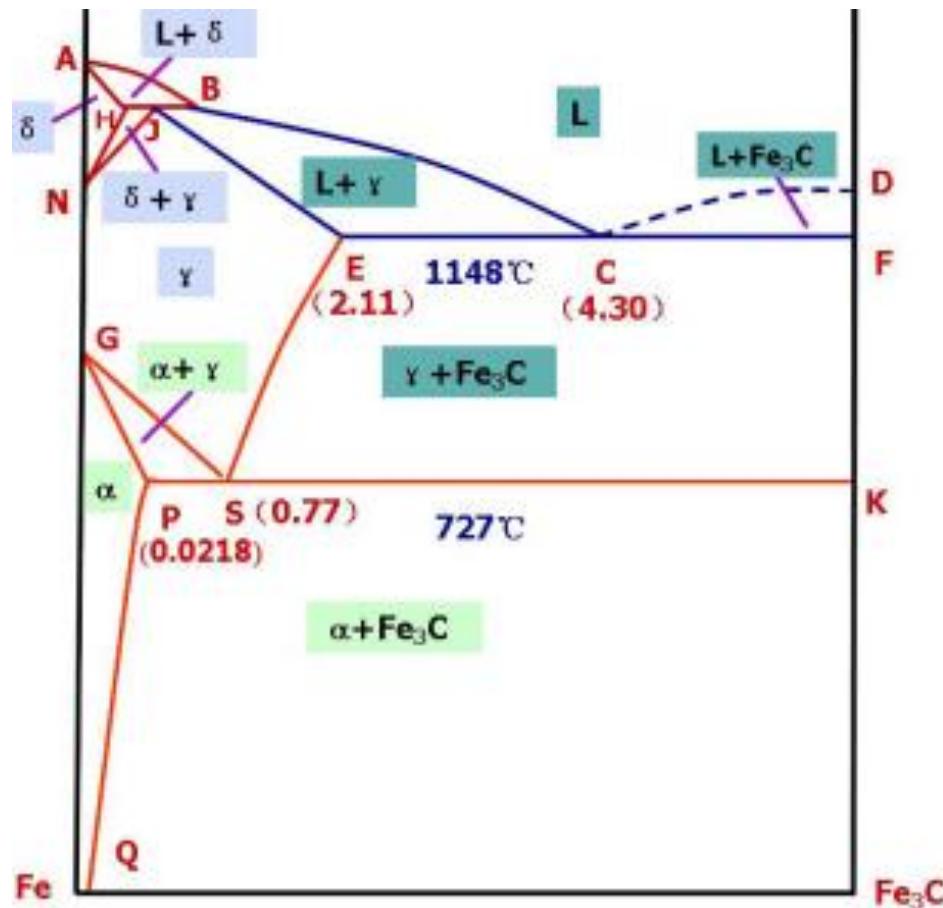
铁碳合金相图

- 铁和碳可形成一系列稳定的化合物如 Fe_3C 、 Fe_2C 、 FeC ，它们都可以作为纯组元看待。因此，整个的铁碳相图理论上包括 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_3\text{C}-\text{Fe}_2\text{C}$ 、 $\text{Fe}_2\text{C}-\text{FeC}$ 、 $\text{FeC}-\text{C}$ 等几个二元系相图。
 - 但由于含碳量大于 Fe_3C 的含碳量时，合金太脆，无实用价值。所以，此处讨论的相图为含碳量 $0\sim 6.69\%$ 的铁碳合金相图部分。此处， Fe_3C 可作为一个组元，组成 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图。
 - 需要指出的是，铁碳合金相图中的各点、线及相区的标注符号是国际统一规定的，不可随意更改。但图中的某些点、线的成分在不同的书刊上可能略有区别。



»»» §4.2 铁碳合金相图

相图中的点



符号	含义	温度 / °C	含碳量 / %
A点	纯铁的熔点	1538	0
B点	包晶转变时液态合金的成分	1495	0.53
C点	共晶点	1148	4.3
D点	Fe ₃ C的熔点	1227	6.69
E点	奥氏体中的最大溶碳量	1148	2.11
F点	渗碳体的成分点	1148	6.69
G点	同素异构转变点 $\alpha\text{-Fe} \leftrightarrow \gamma\text{-Fe}$	912	0
符号	含义	温度 / °C	含碳量 / %
H点	δ铁素体中的最大溶碳量	1495	0.09
J点	包晶点	1495	0.17
K点	渗碳体成分点	727	6.69
N点	同素异构转变点 $\delta\text{-Fe} \leftrightarrow \gamma\text{-Fe}$	1394	0
P点	铁素体中的最大溶碳量	727	0.0218
S点	共析点	727	0.77
Q点	室温下铁素体中的溶碳量	室温	0.0008

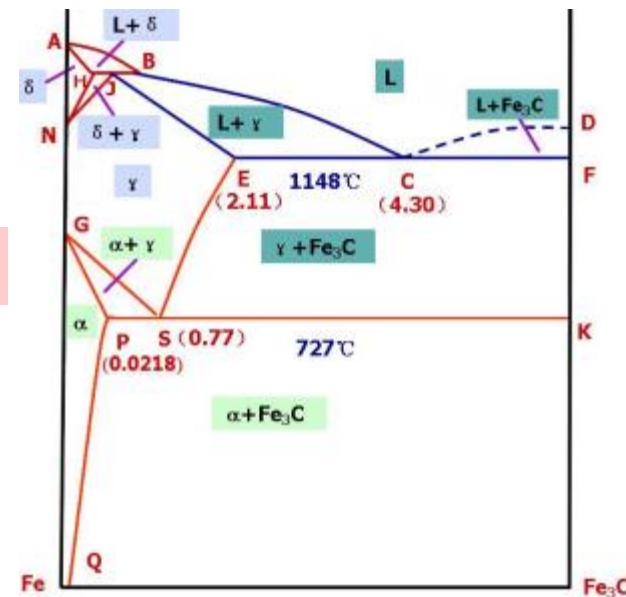


相图中的特性线

➤ HJB水平线：包晶反应线 $L_{0.53} + \delta_{0.09} \rightleftharpoons A_{0.17}$

➤ ECF水平线：共晶反应线 $L_{4.3} \rightleftharpoons A_{2.11} + Fe_3C$

➤ PSK水平线：共析反应线 $A_{0.77} \rightleftharpoons F_{0.0218} + Fe_3C$



图中的相区/7个两相区

五个单相区形成7个两相区

L+ δ ; 液相+高温铁素体

L+ γ ; 液相+奥氏体

L+Fe₃C; 液相+渗碳体

$\delta + \gamma$; 高温铁素体+奥氏体

$\gamma + Fe_3C$; 奥氏体+渗碳体

$\alpha + \gamma$; 铁素体+奥氏体

$\alpha + Fe_3C$; 铁素体+渗碳体

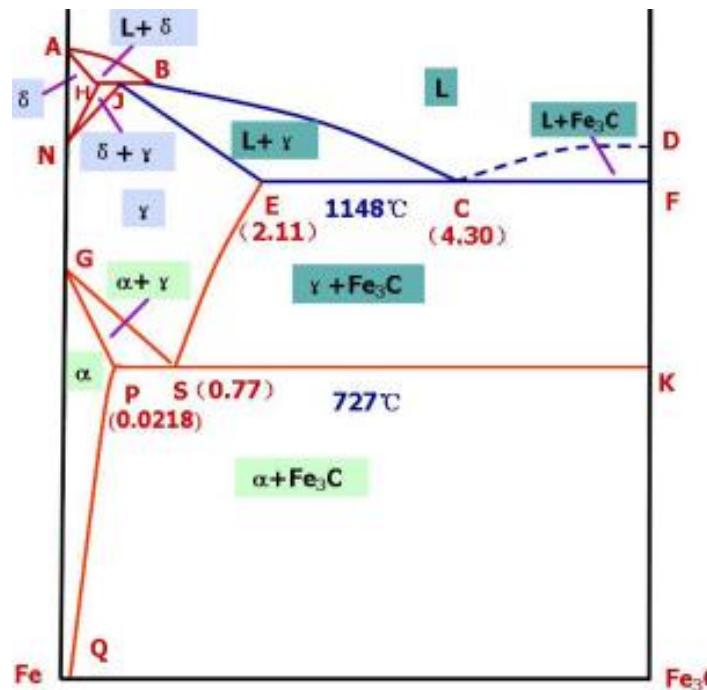
图中的相区/3个三相区

三条水平线分别对应三个三相区

HJB线为 L+ δ + γ 相区

ECF线为 L+ γ +Fe₃C 相区

PSK线为 γ + α +Fe₃C 相区



»»» §4.2 铁碳合金相图

铁碳合金是以铁Fe、碳C两种元素为基本组元的合金，是碳钢和铸铁的总称。

铁碳合金是现代工业，尤其是机械制造业中用量最多，使用最广，最重要的工程材料。

铁碳合金适用范围广的原因，首先在于可用的成分跨度大，从近于无碳的工业纯铁到含碳4%左右的铸铁，在此范围内合金的相结构和微观组织都发生很大的变化；同时，还可以采用各种热加工工艺，尤其是金属热处理技术，来大幅度地改变某一成分合金的组织和性能。

根据含碳量和组织状况可将铁碳合金分为纯铁、钢和白口铸铁三大类。

(1) 工业纯铁

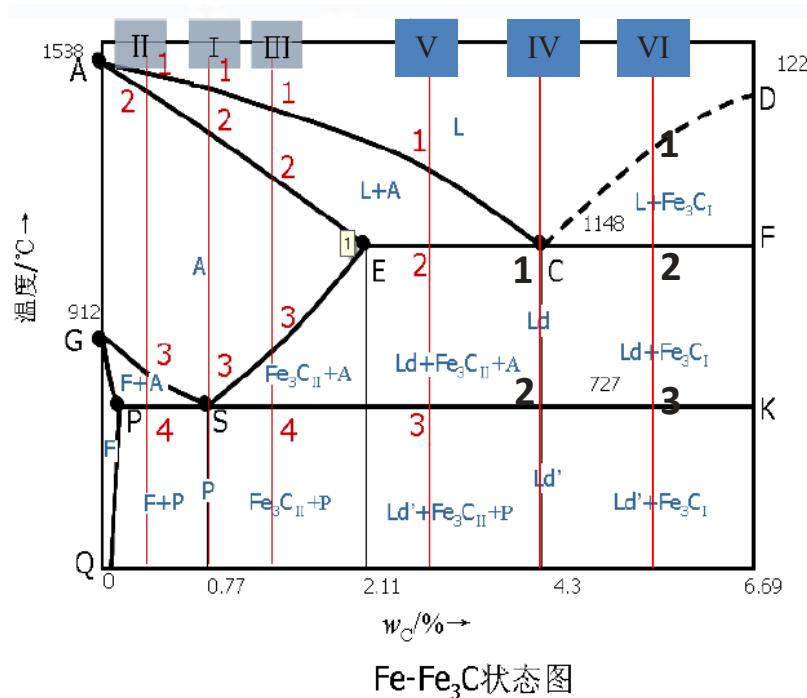
工业纯铁指的是室温下的平衡组织几乎全部为铁素体的铁碳合金，此类合金的含碳量小于0.0218%，位于 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图P点以左的区域。

工业纯铁强度、硬度低，塑性、韧性好，在工业生产中主要利用其高的导磁率，作电工材料，很少用来制造机械零件。

钢 (含碳量 $0.0218\% \sim 2.11\% C$)

钢指含碳量为 $0.0218\% \sim 2.11\%$ ，即位于铁碳合金相图中P点和E点之间。且高温固态组织为单相奥氏体的一类铁碳合金，此类合金具有良好的塑性，适于锻造、轧制等压力加工钢，根据室温组织的不同又把钢分为三大类

- (1) 亚共析钢 ($0.0218\% \sim 0.77\% C$)
- (2) 共析钢 ($0.77\% C$)
- (3) 过共析钢 ($0.77\% \sim 2.11\% C$)



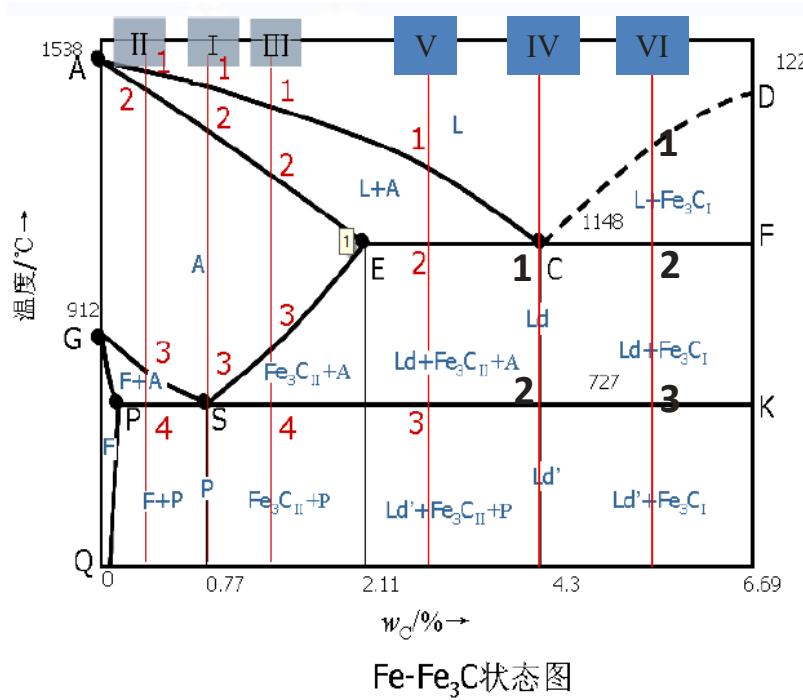
»»» §4.2 铁碳合金相图

白口铸铁（含碳量 $2.11\% \sim 6.69\% C$ ）

指液态结晶时都有共晶反应且室温下的平衡组织中皆含有变态莱氏体的一类铁碳合金，其断口白亮而得名，俗称生铁白口铸铁的含碳量在 $2.11\% \sim 6.69\%$ 之间，位于铁碳合金相图E点成分以右。白口铸铁具有较低的熔点，流动性好，便于铸造成形，但因组织中含有一定数量的莱氏体，硬度高、脆性大，不能承受锻造、轧制等压力加工，也不宜切削加工。

根据室温组织的不同可以分为三类

- (1) 亚共共晶白口铸铁 ($2.11\% \sim 4.3\% C$)
- (2) 共晶白口铸铁 ($4.3\% C$)
- (3) 过共晶白口铸铁 ($4.3\% \sim 6.69\% C$)



Fe-Fe₃C状态图

(1) 铁碳合金 I：共析钢（含碳量0.77%C）

指室温下的平衡组织为珠光体的铁碳合金，含碳量为0.77%（可以简化为0.8%），即为S点成分的合金，碳素工具钢中的T8钢即为共析钢。

- 1点以上：L
- 1点—2点：L+A
- 2点→3点：奥氏体A
- 3点发生共析反应： $A \rightarrow F + Fe_3C$
- 3点以下：珠光体P

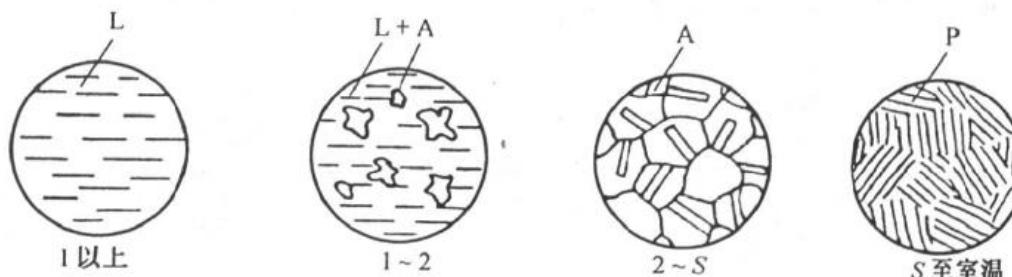
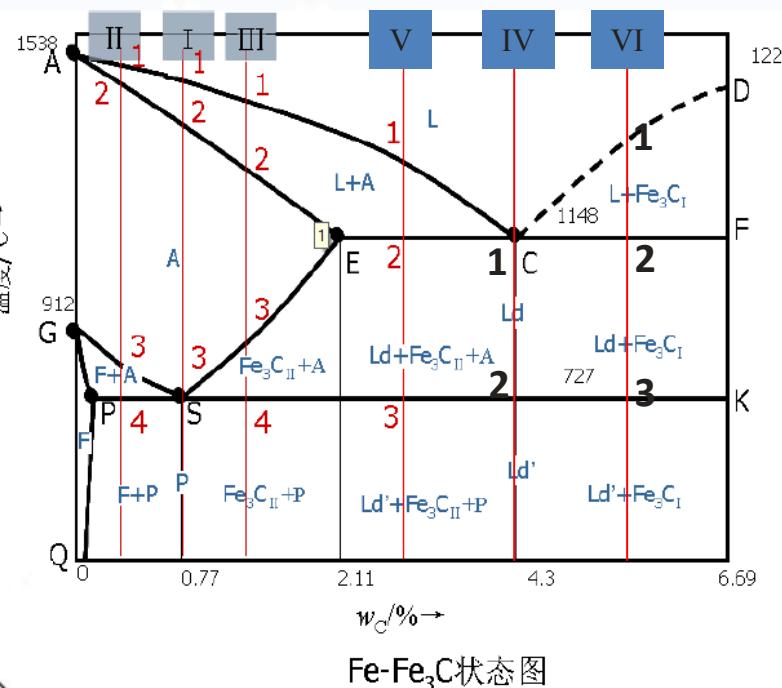


图 4.6 共析钢组织转变过程示意图



»»» §4.2 铁碳合金相图

(2) 铁碳合金 II: 亚共析钢 (含碳量 $0.0218\% \sim 0.77\% C$)

指室温下的平衡组织为铁素体与珠光体的铁碳合金，含碳量为 $0.0218\% \sim 0.77\%$ ，位于铁碳合金相图中P点和S点之间，有熟铁之称。

- 1点以上: L
- 1点—2点: L+A
- 2点→3点: 奥氏体A
- 3点→4点: 奥氏体A+铁素体F
- 4点以下: 珠光体P+铁素体F

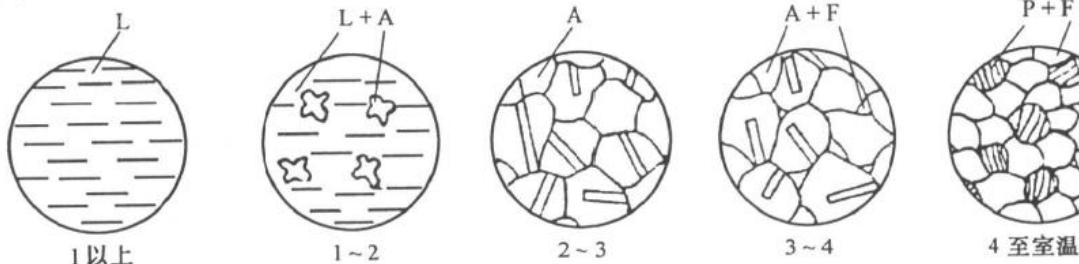
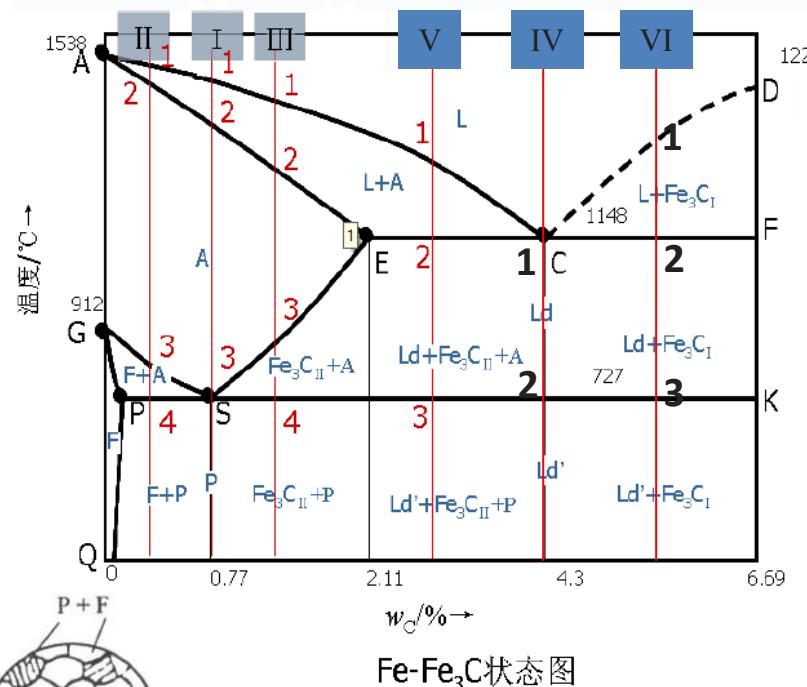


图 4.8 亚共析钢组织转变过程示意图



(3) 铁碳合金 III：过共析钢（含碳量 $0.77\% \sim 2.11\% C$ ）

指室温下的平衡组织为珠光体与二次渗碳体，含碳量为 $0.77\% \sim 2.11\% C$ ，位于铁碳合金相图中S点和E点成分之间的铁碳合金。

- 1点以上：L
- 1点—2点：L+奥氏体A
- 2点→3点：奥氏体A
- 3点→4点：奥氏体A+渗碳体 Fe_3C_{II}
- 4点以下：珠光体P+渗碳体 Fe_3C_{II}

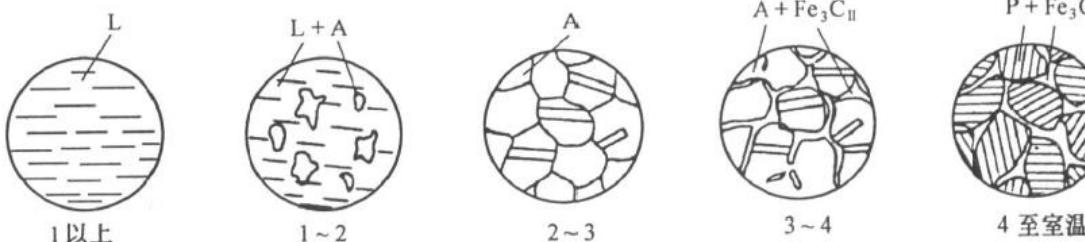
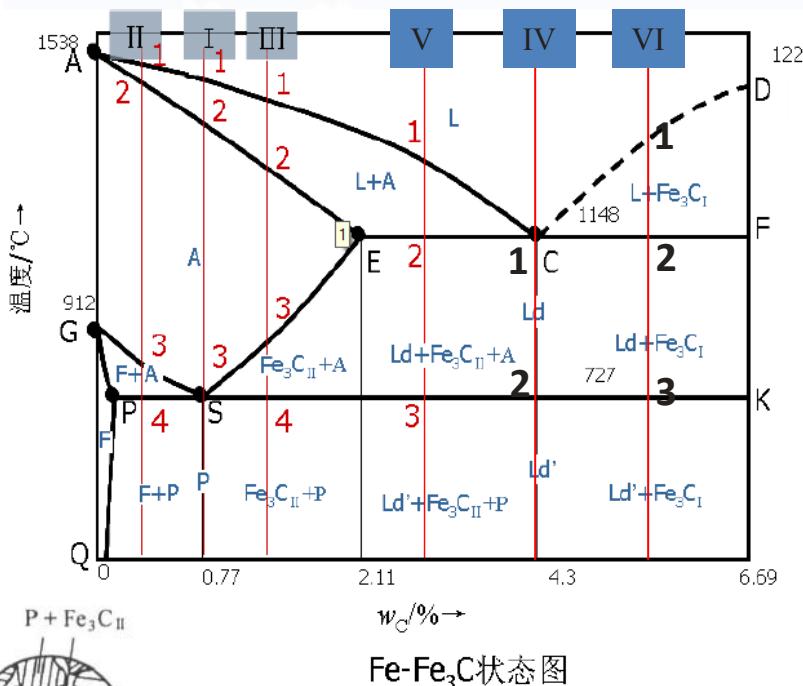


图 4.10 过共析钢组织转变示意图

»»» §4.2 铁碳合金相图

(4) 铁碳合金 IV：共晶白口铸铁（含碳量4.3%C）

室温下的平衡组织仅为**变态莱氏体**，含碳量为4.3%，即为铁碳合金相图上C点成分的铁碳合金。

- 1点以上：L
- 1点—2点：L_d（奥氏体A + 渗碳体Fe₃C_I）
- 2点以下：L'_d（珠光体P + 渗碳体Fe₃C_{II} + 渗碳体Fe₃C_I）

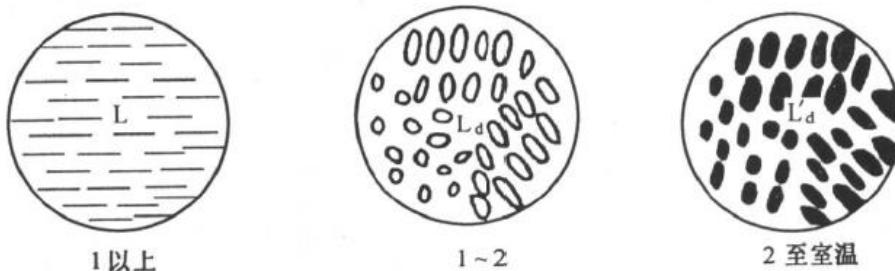
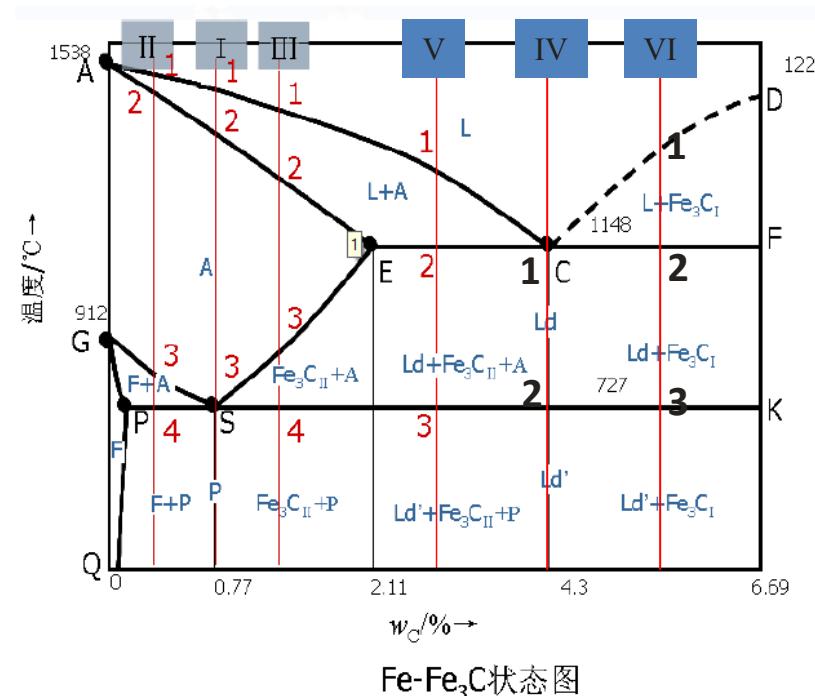


图 4.12 w(C)=4.3% 的共晶白口铸铁结晶过程示意图

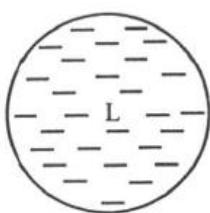


(5) 铁碳合金 V: 亚共晶白口铸铁 (含碳量2.11%~4.3 %C)

室温下的平衡组织仅为**变态莱氏体**, **珠光体**和**二次渗碳体**, 含碳量为2.11%~4.3 %C, 即为铁碳合金相图上E点和C点成分之间的铁碳合金。

- 1点以上: L
- 1点—2点: L+A
- 2点—3点: L_d+奥氏体A+渗碳体Fe₃C_{II}
- 3点以下: L'_d+珠光体P+渗碳体Fe₃C_{II}

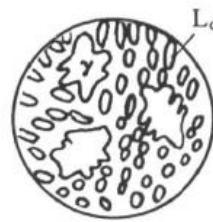
渗碳体Fe₃C_{II}与共晶渗碳体在一起, 难以分辨。



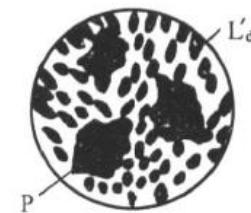
1以上



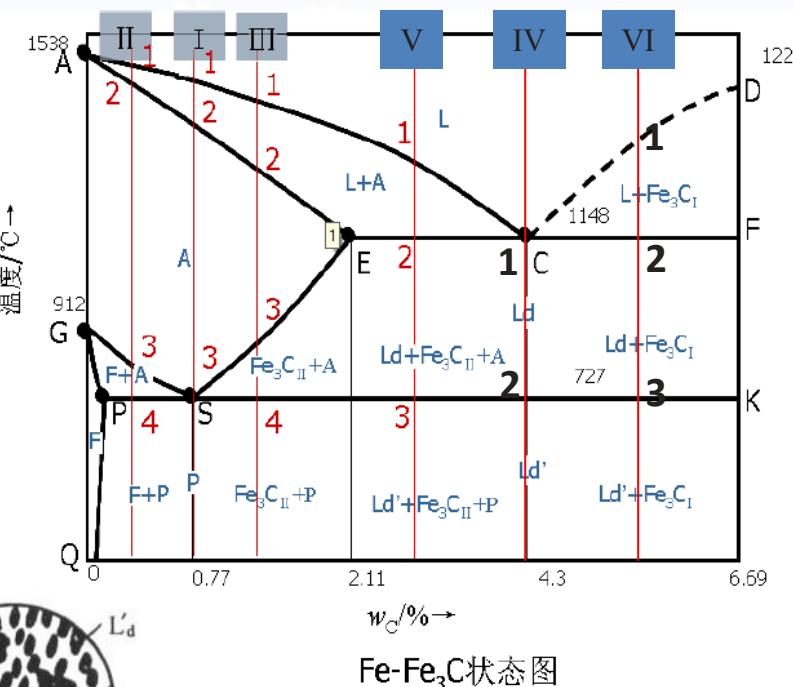
1~2



2~3



3至室温

图 4.14 $w(C)=3.0\%$ 的亚共晶白口铸铁结晶过程示意图

(6) 铁碳合金 VI: 过共晶白口铸铁 (含碳量4.3%~6.69%C)

室温下的平衡组织为**变态莱氏体与一次渗碳体**, 含碳量为4.3%~6.69%C, 即为铁碳合金相图上C点成分以右的铁碳合金。

- 1点以上: L
- 1点—2点: L+渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$
- 2点—3点: L'_{d} +渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$
- 3点以下: L'_{d} +渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$

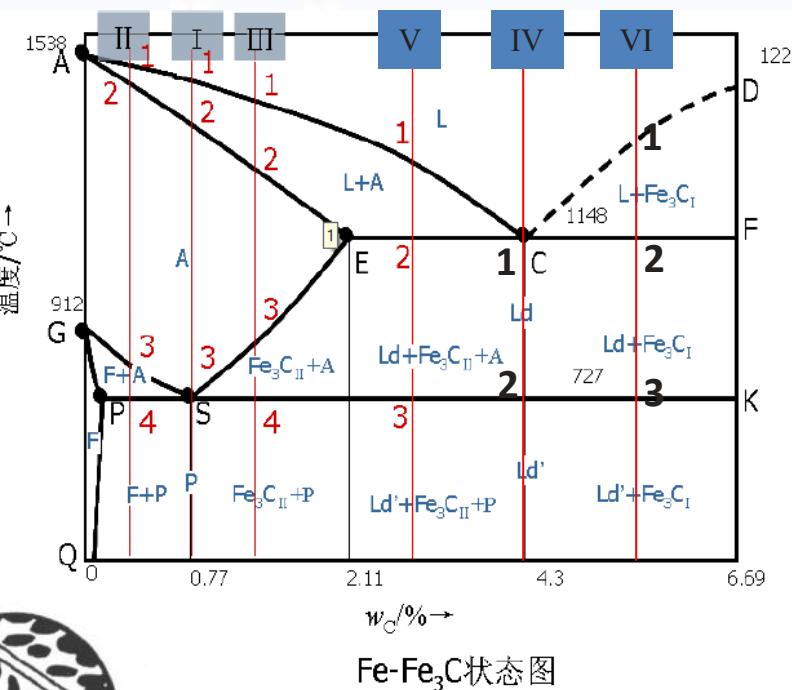
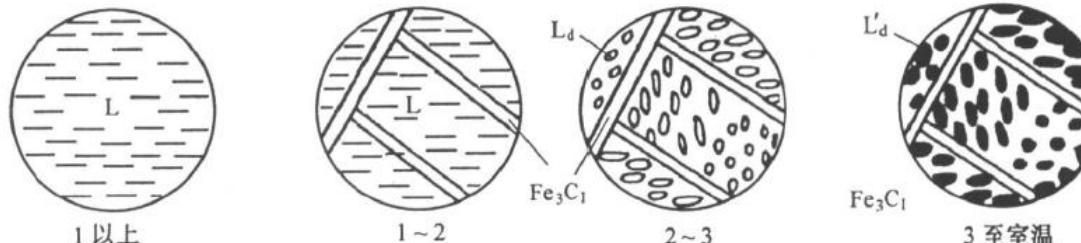
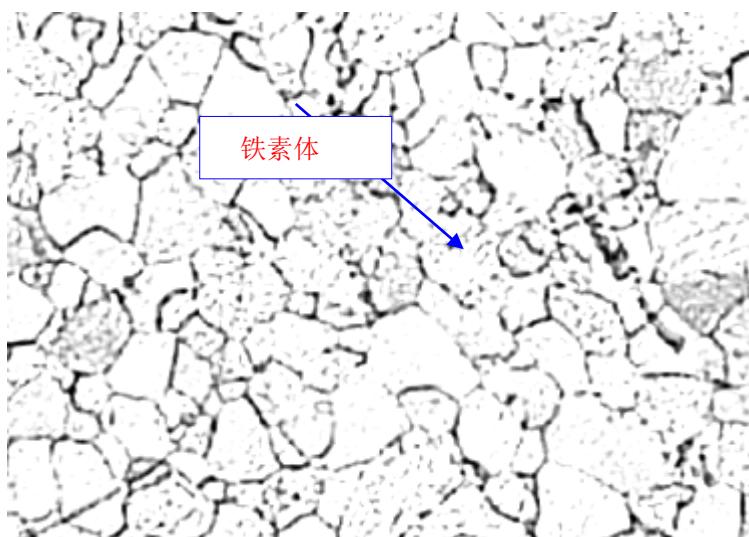
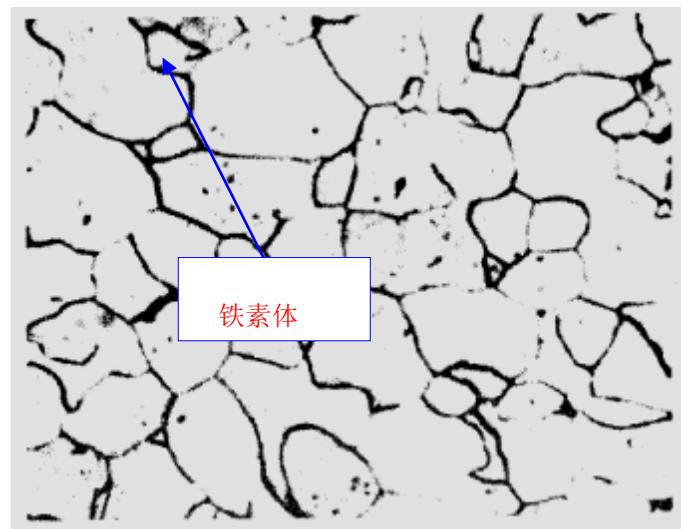


图 4.16 $w(\text{C}) = 5.0\%$ 的过共晶白口铸铁结晶过程示意图

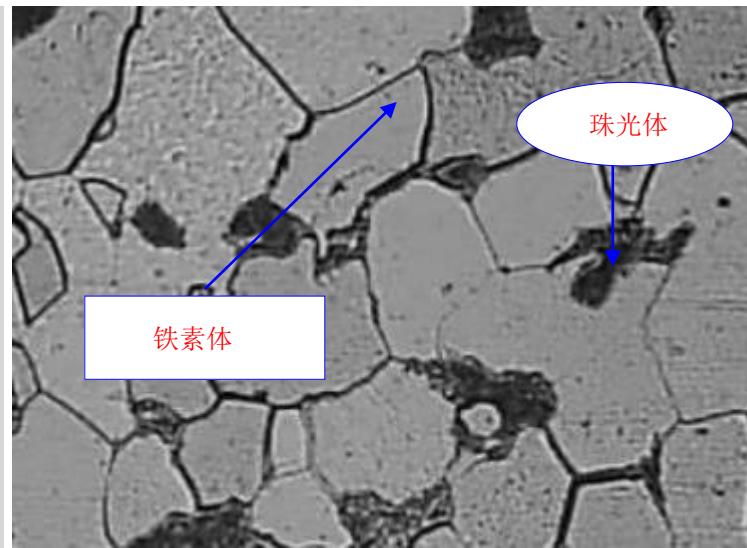
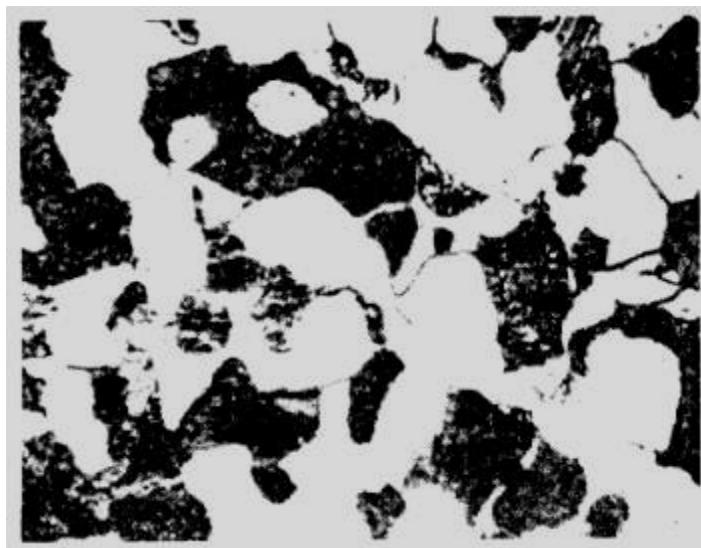
»»» §4.3 典型铁碳合金金相图



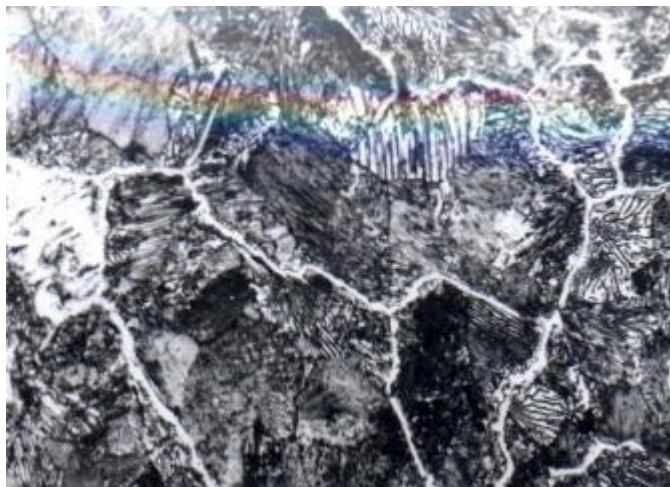
1# 工业纯铁



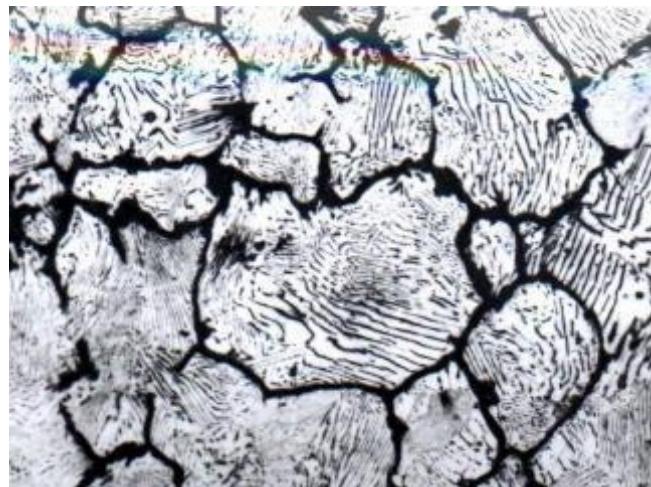
工业纯铁



45钢（亚共析钢）的显微组织：珠光体P+铁素体F



a 用4%硝酸酒精浸蚀



b用碱性苦味酸钠热蚀

过共析钢室（T12钢）温下的组织：层片状珠光体和二次渗碳体

用4%硝酸酒精浸蚀，二次渗碳体呈白色网状分布在珠光体周围。

用碱性苦味酸钠溶液热蚀后，渗碳体呈黑色。

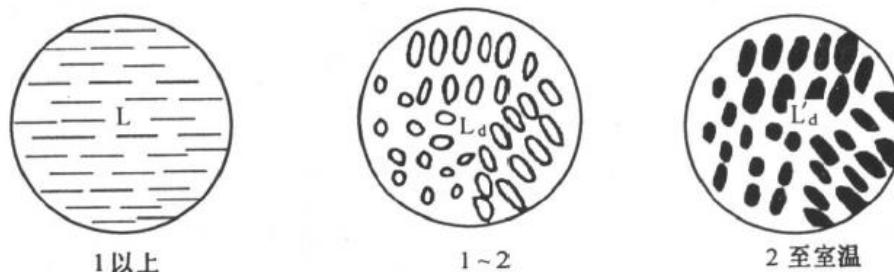
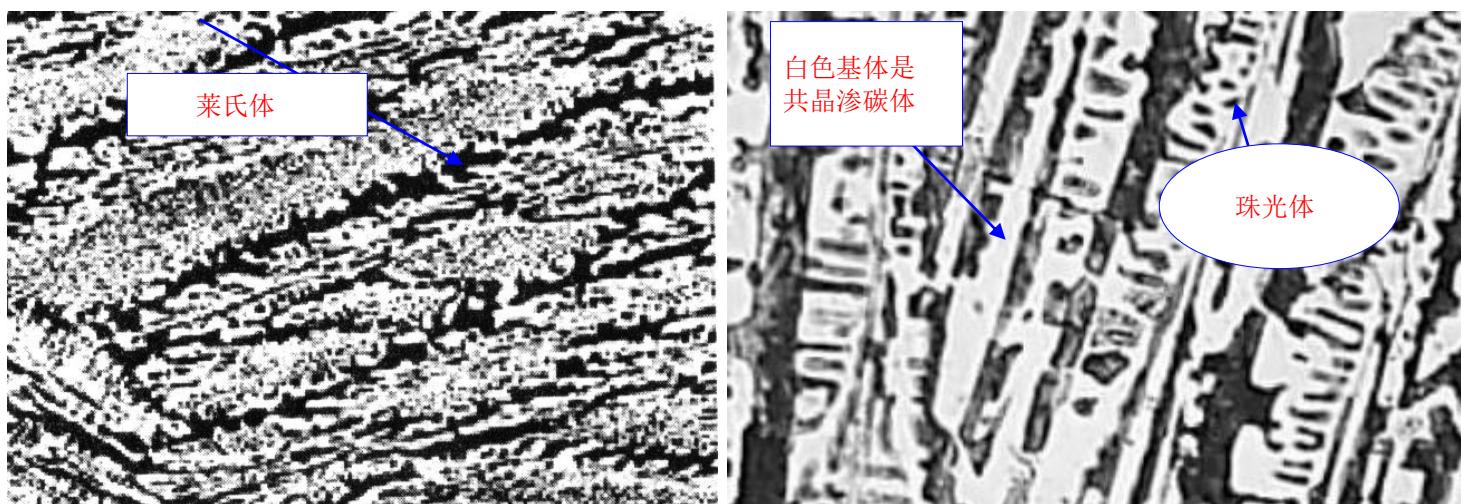


图 4.12 $w(C) = 4.3\%$ 的共晶白口铸铁结晶过程示意图



共晶白口铸铁的显微组织: L'_d (珠光体P + 渗碳体 Fe_3C_{II} + 渗碳体 Fe_3C_I)

图中黑色的粒状短杆状为珠光体，白色基体为渗碳体。

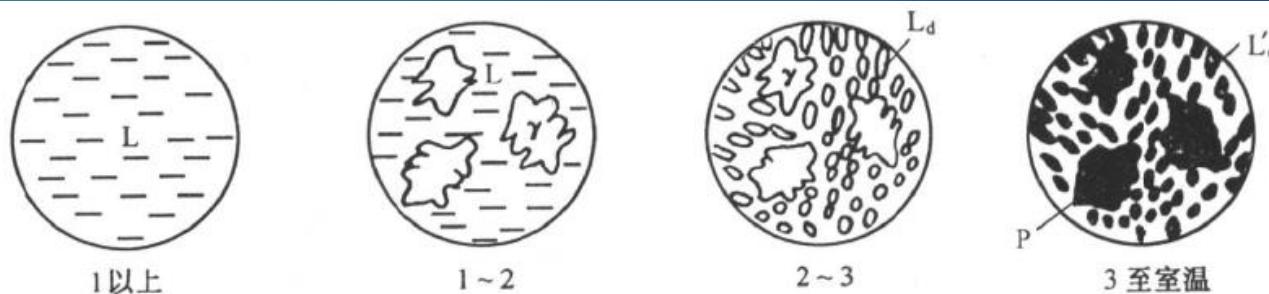
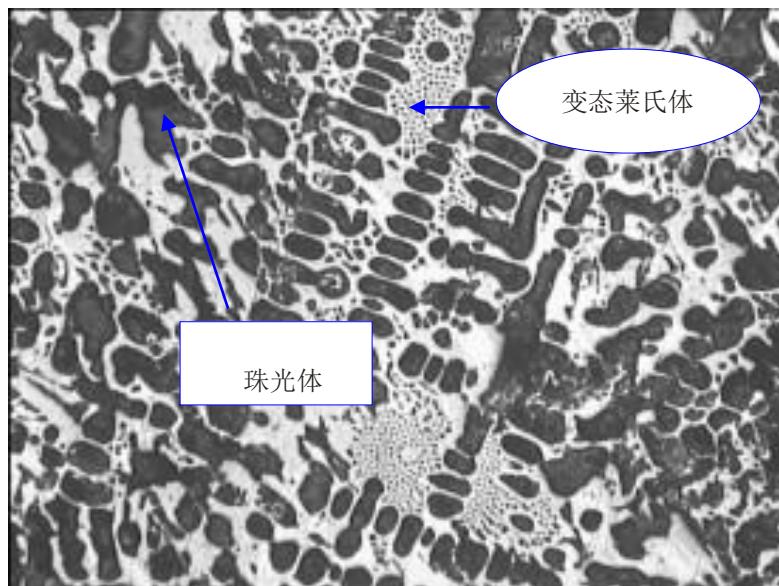


图 4.14 $w(C) = 3.0\%$ 的亚共晶白口铸铁结晶过程示意图



亚共晶白口铸铁的显微组织：

$L'_d + \text{珠光体} P + \text{渗碳体 } Fe_3C_{II}$

渗碳体 Fe_3C_{II} 与共晶渗碳体在一起，难以分辨。

黑色树枝状为初生奥氏体转变的珠光体，其周围白色网状物为二次渗碳体。
其余为莱氏体，莱氏体中的黑色粒状或短杆状物为共晶珠光体。

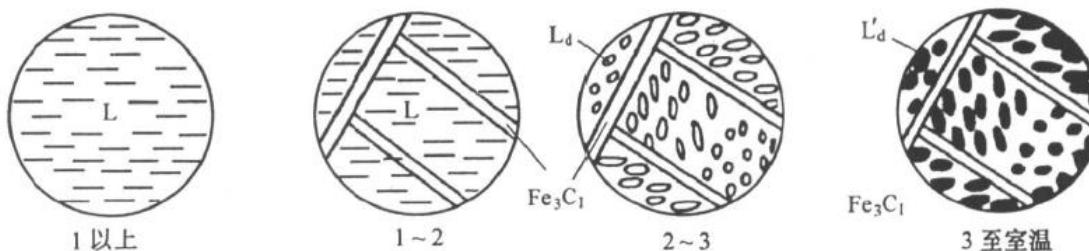
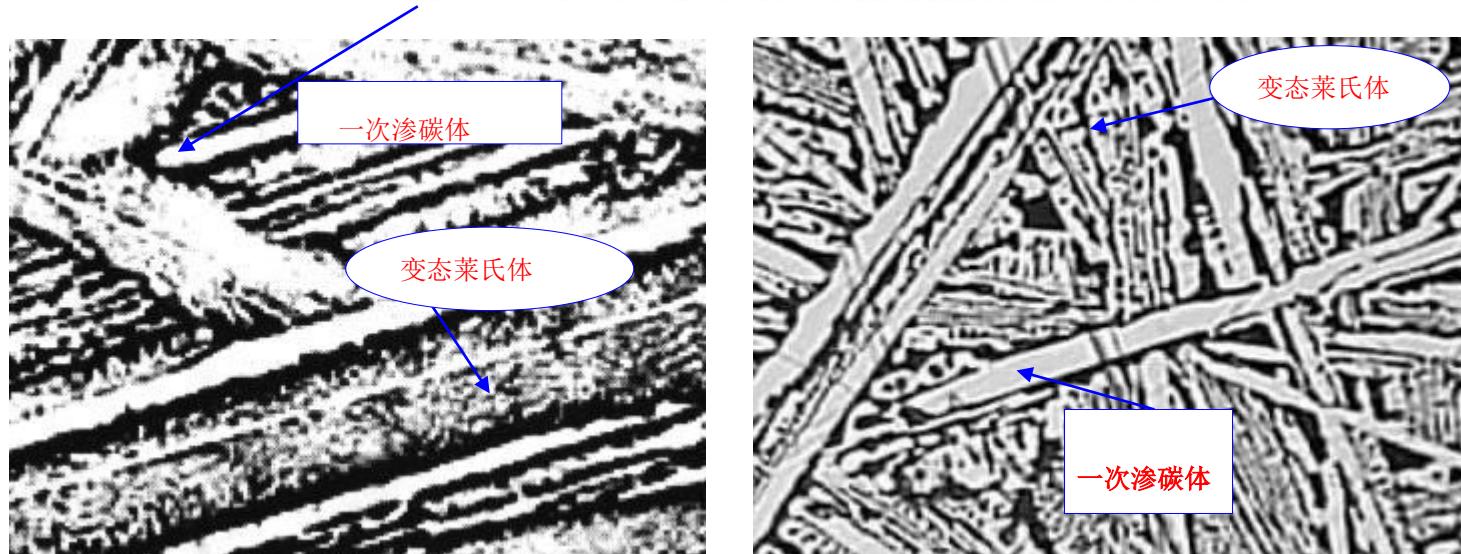


图 4.16 $w(C) = 5.0\%$ 的过共晶白口铸铁结晶过程示意图



过共晶白口铸铁的显微组织: $L'_d +$ 渗碳体 Fe_3C_I

一次渗碳体呈白色长条状，贯穿在莱氏体基体上，其余为共晶莱氏体。



感谢同学们的聆听！



河北工业大学
HEBEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

勤慎公忠