



北京航空航天大学《材料综合911》考研辅导系列

《金属学原理》考点与典型题精讲

第9讲 铁碳相图

主讲人：何 蓓

网学天地
www.e-studysky.com

一、关于二元合金的凝固理论

1. 固溶体的凝固理论

(1) 正常凝固。正常凝固方程描述了在非平衡凝固条件下固相质量浓度随凝固距离的变化规律，即当 $k_0 < 1$ 时，溶质浓度呈现由锭表面向中心逐渐增加的不均匀分布，这种分布称为正偏析，它不利于材质的均匀性。

(2) 区域熔炼。当 $k_0 < 1$ 时，凝固前端部分的溶质浓度不断降低，尾端部分不断地富集，这使固溶体经区域熔炼后的前端部分因溶质减少而得到提纯，因此区域熔炼又称区域提纯。区域熔炼方程的推导过程中的假设与正常凝固过程相同，应注意的是该方程不能用于大于一次 ($n > 1$) 的区域熔炼后的溶质分布和最后一个熔区中的溶质分布。

(3) 成分过冷。在合金的凝固过程中，由于液相中溶质分布发生变化而改变了凝固开始的温度，界面前沿液体中的实际温度就有可能低于由溶质分布所决定的凝固开始温度，这时产生的过冷，称为成分过冷。纯金属在凝固时，其理论凝固温度 (T_m) 不变，当液态金属中的实际温度低于 T_m 时，就引起过冷，这种过冷称为热过冷。

(4) 成分过冷及其对晶体生长形态的影响。合金液相中的温度梯度 G 越小，就可能得到越大的成分过冷。随成分过冷度的增加，固溶体合金的生长形态由平面状向胞状和树枝状转变。成分过冷理论说明了合金为什么在正的温度梯度下能形成树枝晶，它不同于纯金属只有在负的温度梯度下才能出现树枝晶。

2. 合金铸锭的组织 and 缺陷

(1) 铸锭 (件) 的宏观组织。 铸锭 (件) 的宏观组织分为三个晶区：
表面细晶区，柱状晶区和中心等轴晶区。

表层细晶区存在于铸锭与铸模接触的区域，由于浇铸初始阶段液相处于强过冷状态，且由于铸模表面有利于非均匀形核，从而形成细小、方向杂乱的等轴晶粒区。表面细晶区始终存在，它在以后的机加工中被去除。

随着浇铸过程的进行，铸模温度快速上升，液相过冷度减小，形核困难，只有一次轴（即生长速度最快的晶向）垂直于型壁（散热最快方向）的晶粒快速生长。柱状晶的优点是组织致密和可被利用的“铸造织构”，其缺点是存在的脆弱界面。

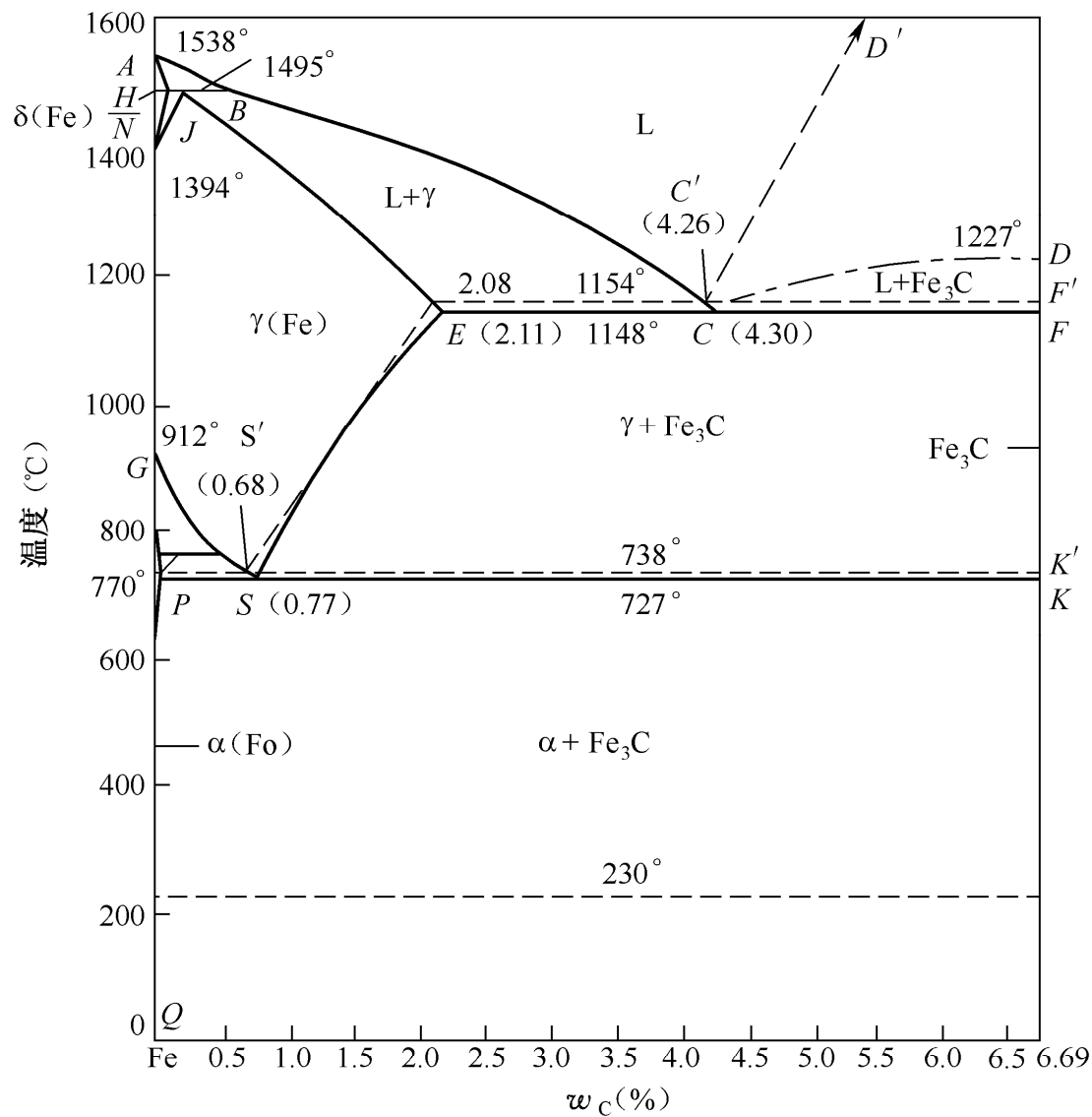
在铸锭凝固后期，由于液相区出现成分过冷、均匀散热、熔体对流导致细晶漂移或枝晶破碎从而成为铸锭中心部位的形核核心，形核率较高且各向长大速度均匀，从而形成中心等轴晶区。中心等轴晶无择优取向，没有脆弱的界面，但其致密度不如柱状晶。

通过浇注条件的改变可获得单一的柱状晶或单一的中心等轴晶，或者不同比例的柱状晶和中心等轴晶来满足不同性能的需要。

(2) 铸锭（件）的缺陷。铸锭（件）的缺陷主要有缩孔和偏析。缩孔的类型与合金凝固方式有关。几乎不产生成分过冷的“壳状凝固”形成致密的柱状晶，其主要为集中缩孔；而成分过冷显著的“糊状凝固”形成的树枝状方式生长的等轴晶，其主要为分散缩孔（疏松）；介于两者之间的为壳状-糊状混合凝固，获得柱状晶和等轴晶混合组织。

铸锭（件）的偏析有宏观偏析和显微偏析之分。宏观偏析又可分为正常偏析、反偏析和比重偏析；而显微偏析分为胞状偏析、枝晶偏析和晶界偏析。通过在低于固相线的高温下进行长时间的扩散退火可减轻成分偏析。

二、关于二元相图实例分析：铁碳二元相图



组织及其性能
 固态转变线

— Fe-Fe₃C相图
 - - - Fe₃C液相线 (计算)
 - - - Fe-石墨相图
 - - - 铁素体的居里温度
 — x (Fe_{2.2}C)转变 (计算)

参见：铁碳二元相图

(1) 铁碳合金的组织及其性能。碳钢和铸铁是最为广泛使用的金属材料，铁碳相图是研究钢铁材料的组织和性能及其热加工和热处理工艺的重要工具。

碳在钢铁中可以有四种形式存在：碳原子溶于 α -Fe形成的固溶体称为铁素体（体心立方结构）；或溶于 γ -Fe形成的固溶体称为奥氏体（面心立方结构）；或与铁原子形成复杂结构的化合物（正交点阵）称为渗碳体；碳也可能以游离态石墨（六方结构）稳定相存在。

在通常情况下，铁碳合金是按Fe-Fe₃C系进行转变的，其中Fe₃C是亚稳相，在一定条件下可以分解为铁和石墨，即 $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$ （石墨）。因此，铁碳相图可有两种形式：Fe-Fe₃C相图和Fe-C相图，为了便于应用，通常将两者画在一起，称为铁碳双重相图。

在Fe-Fe₃C相图中，存在三个三相恒温转变，即在1495℃发生的包晶转变： $L_B + \delta_H \rightarrow \gamma_J$ 转变产物是奥氏体；在1148℃发生的共晶转变： $L_C \rightarrow \gamma_E + \text{Fe}_3\text{C}$ ，转变产物是奥氏体和渗碳体的机械混合物，称为莱氏体；在727℃发生共析转变： $\gamma_s \rightarrow \alpha_p + \text{Fe}_3\text{C}$ ，转变产物是铁素体与渗碳体的机械混合物，称为珠光体。共析转变温度常标为A1温度。

参见：铁碳二元相图

此外，在Fe-Fe₃C相图中还有三条重要的固态转变线：

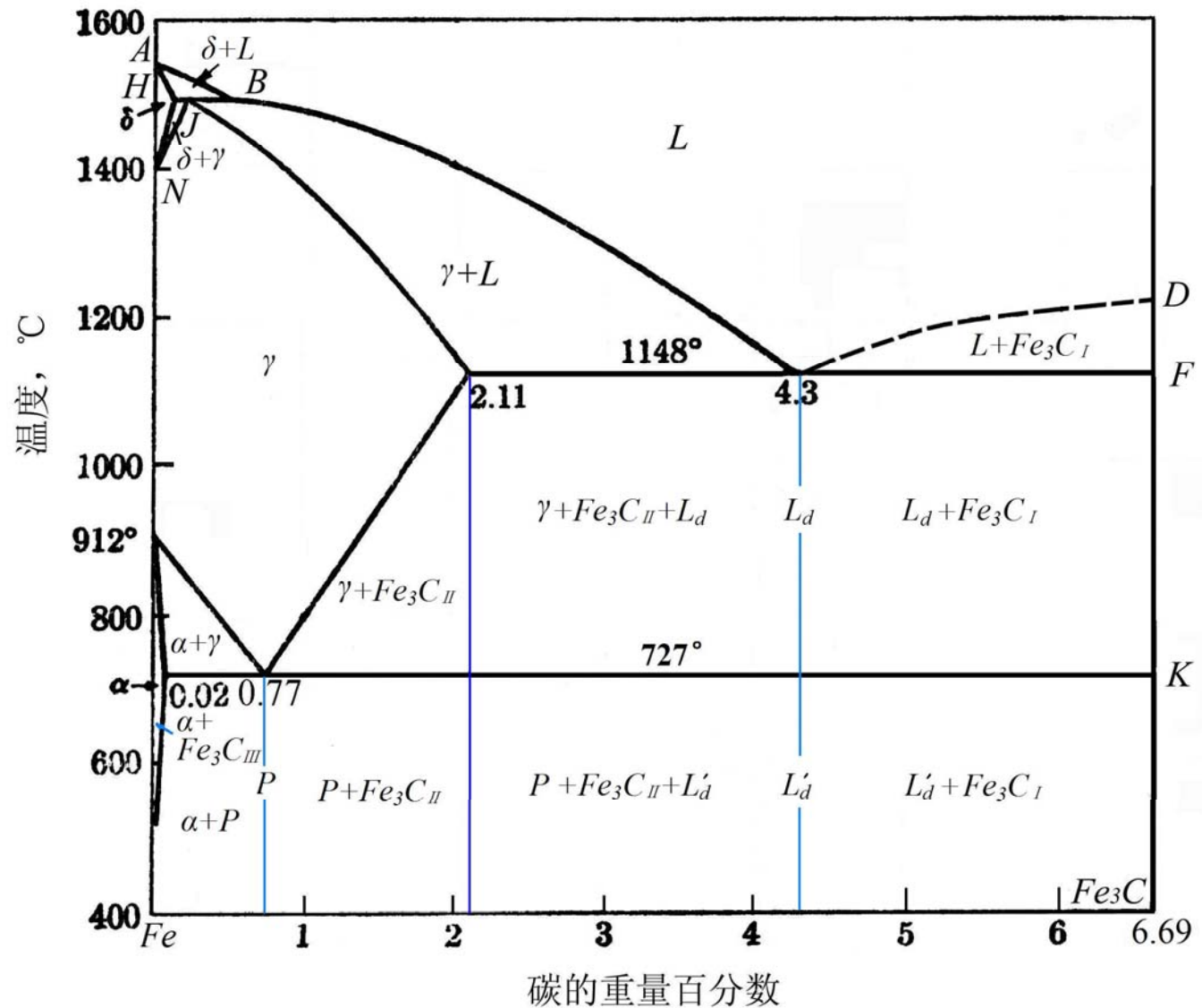
(a) GS线——奥氏体中开始析出铁素体（降温时）或铁素体全部溶入奥氏体（升温时）的转变线，常称此温度为A₃温度。

(b) ES线——碳在奥氏体中的溶解度曲线。此温度常称A_{cm}温度。低于此温度，奥氏体中将析出渗碳体，称为二次渗碳体，用Fe₃C_{II}表示，以区别于从液体中经CD线结晶出的一次渗碳体Fe₃C_I。

(c) PQ线——碳在铁素体中的溶解度曲线。在727℃时，碳在铁素体中的最大的w(C)为0.0218%，因此，铁素体从727℃冷却时也会析出极少量的渗碳体，以三次渗碳体Fe₃C_{III}称之，以区别上述两种情况产生的渗碳体。

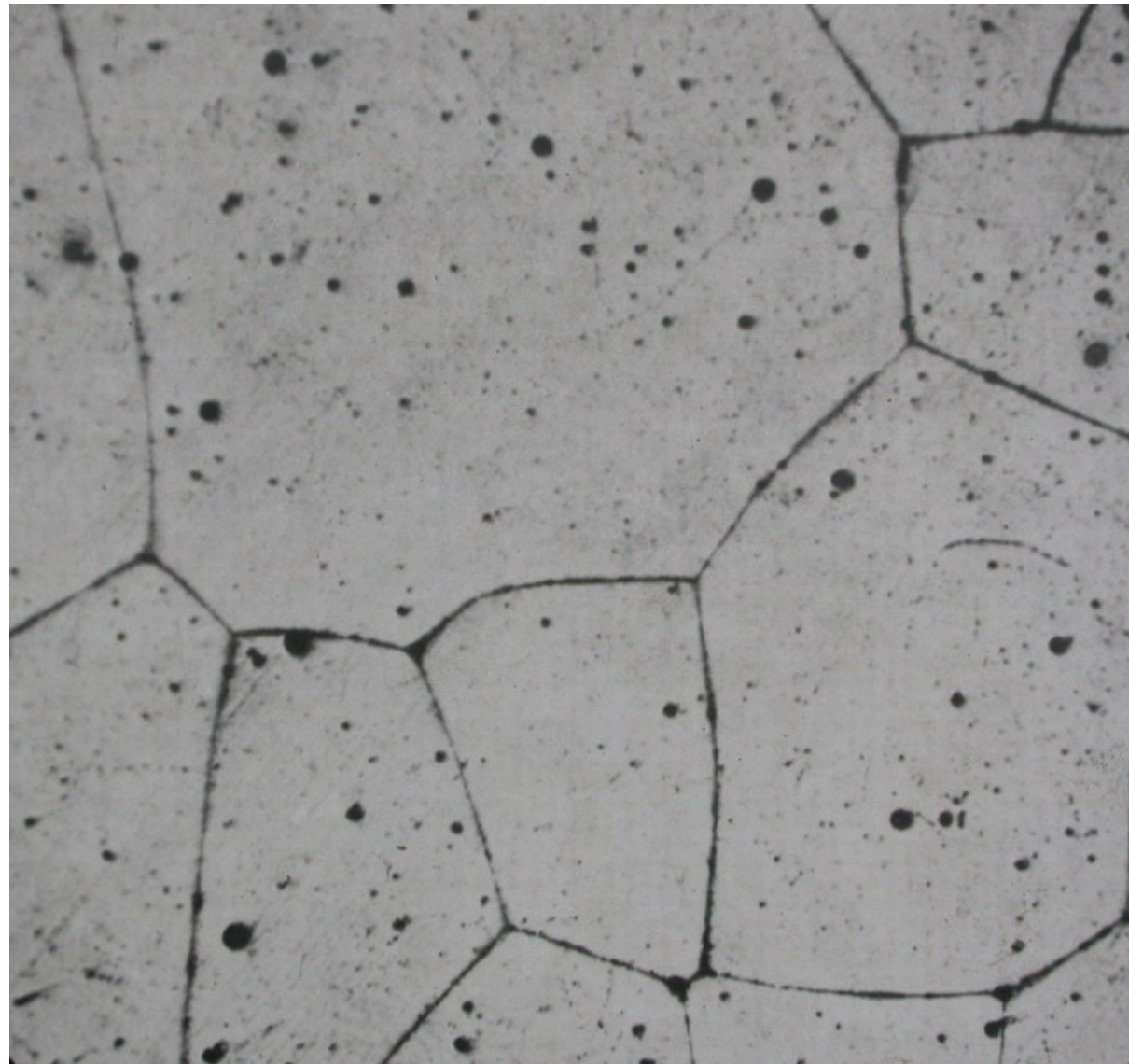
图中770℃的水平线表示铁素体的磁性转变温度，常称为A₂温度。230℃的水平线表示渗碳体的磁性转变。

(2) 典型铁碳合金的平衡组织。
 铁碳合金通常可按含碳量及其室温平衡组织分为三大类：工业纯铁、碳钢和铸铁。碳钢和铸铁是按有无共晶转变来区分的，无共晶转变，即无莱氏体的合金称为碳钢。在碳钢中，又分为亚共析钢、共析钢及过共析钢。组织组成如图。

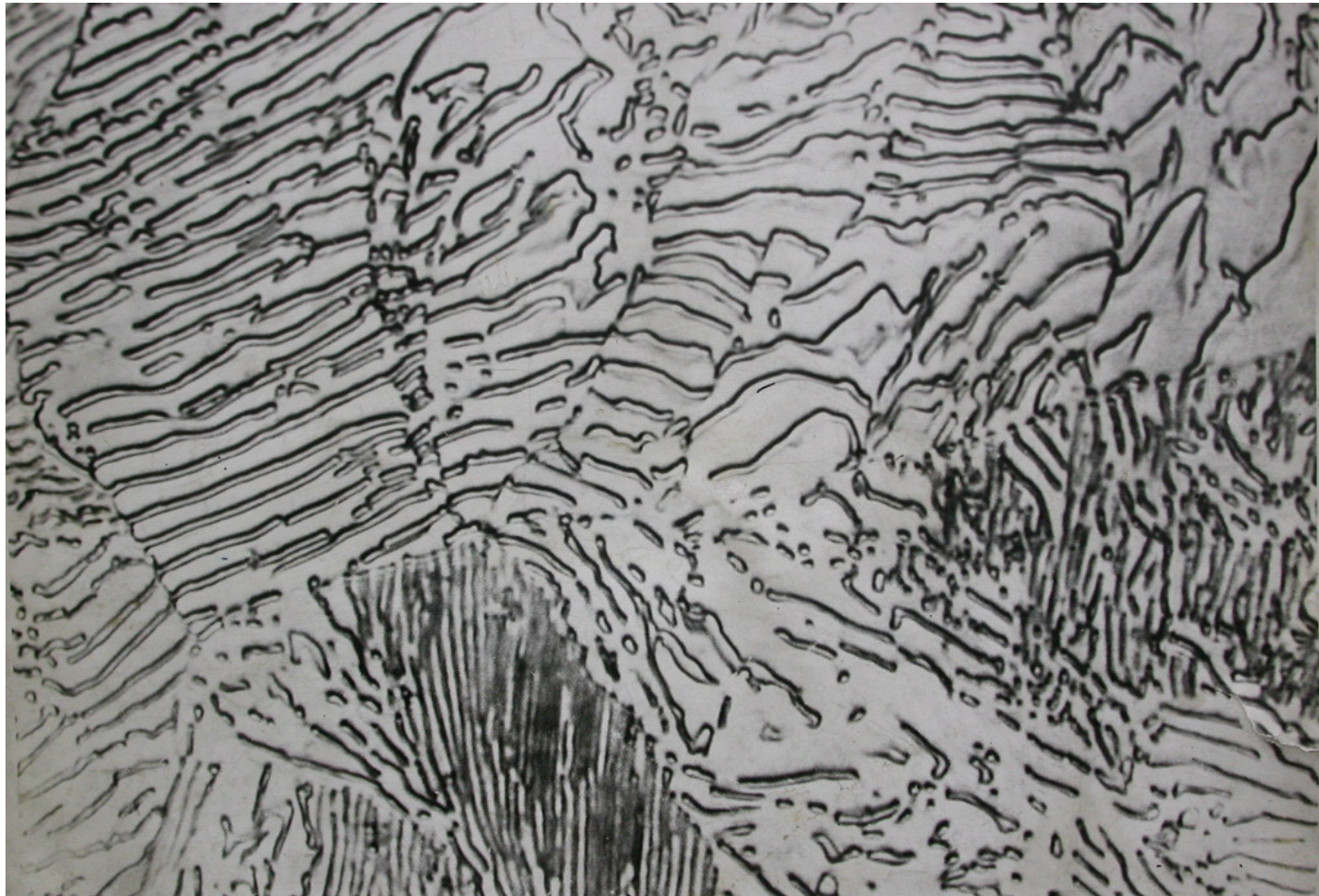


(3) 铁碳合金
按含碳量分为以下七种类型:

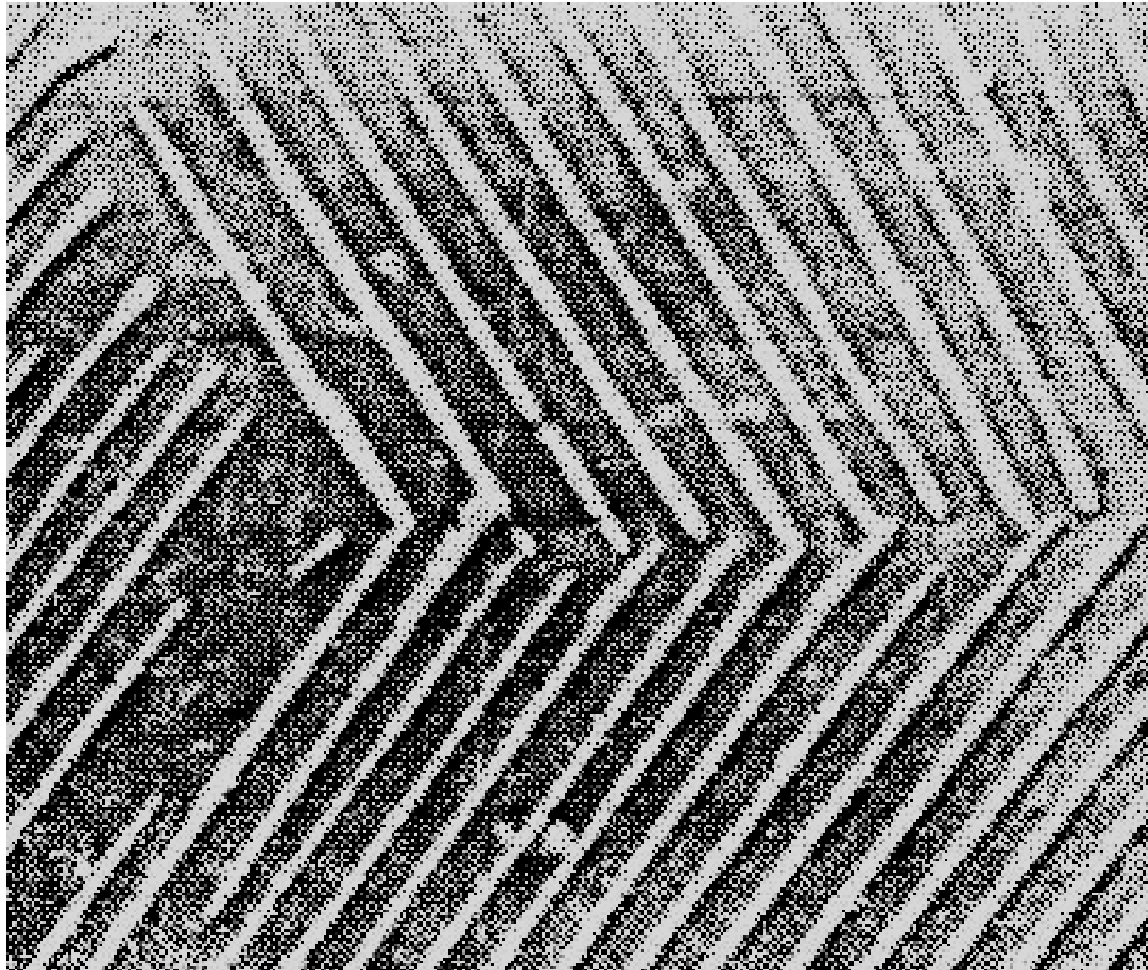
① 工业纯铁,
 $w(\text{C}) < 0.0218\%$,
室温组织如图。



② 共析钢, $w(\text{C})=0.77\%$, 如图。

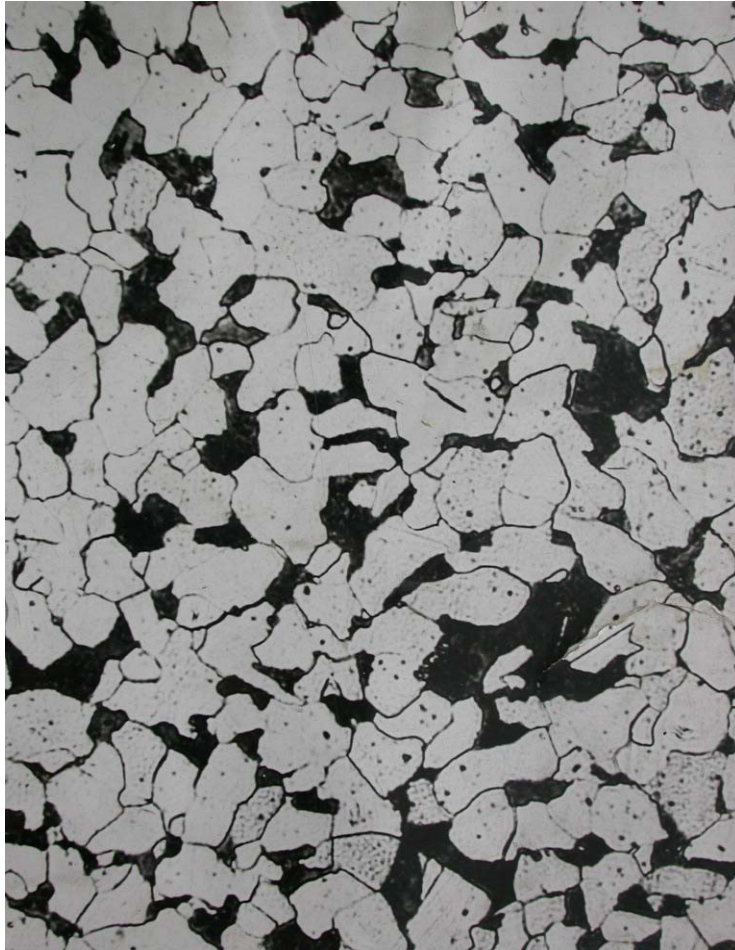


共析钢的室温组织 (OM)



共析钢的室温组织 (TEM)

③ 亚共析钢, $0.0218\% < w(C) < 0.77\%$, 如下:



$w_C = 0.20\%$



$w_C = 0.40\%$

④ 过共析钢, $0.77\% < w(C) < 2.11\%$;

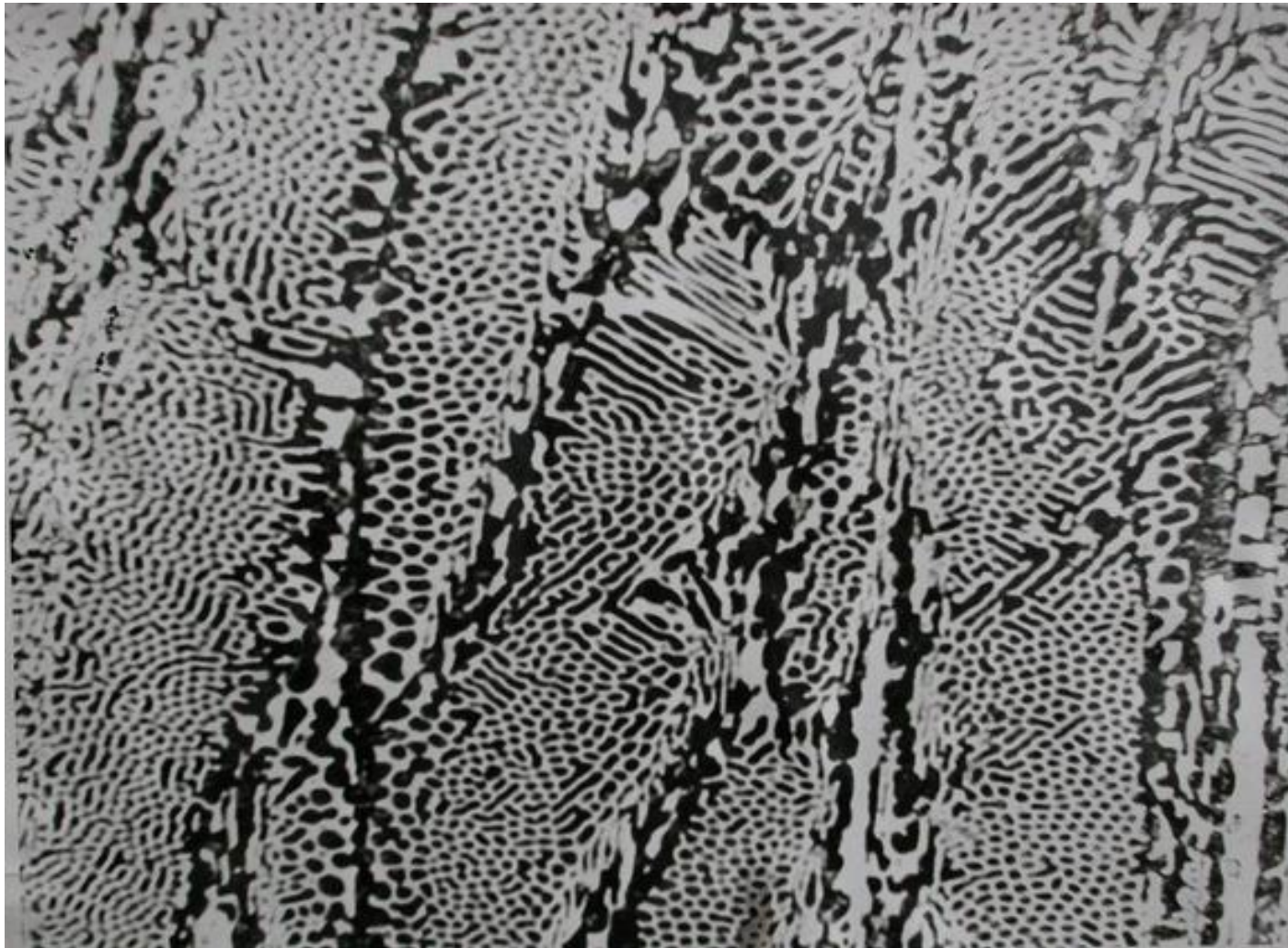


硝酸酒精浸蚀

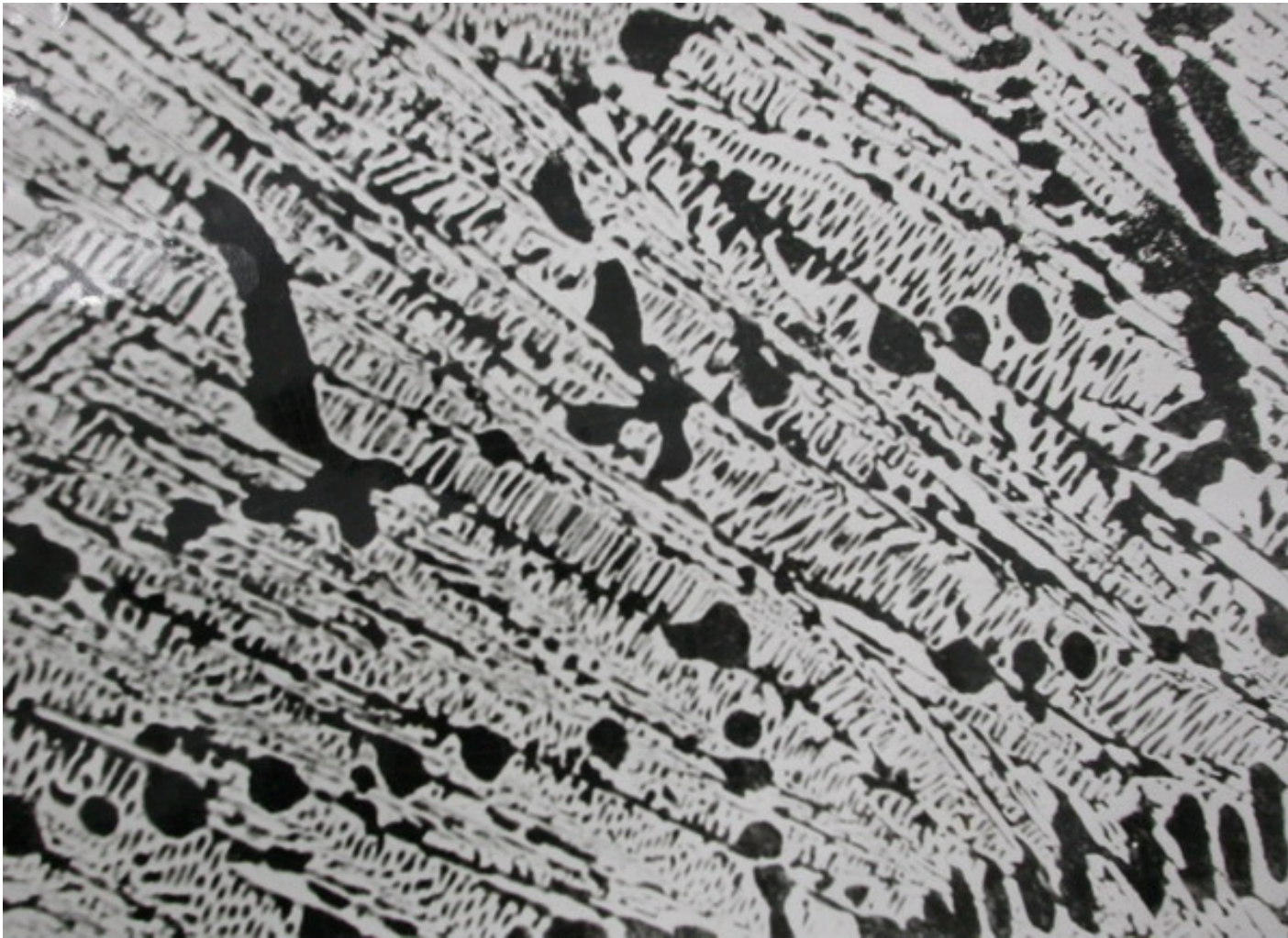


苦味酸浸蚀

⑤ 共晶白口铁, $w(\text{C})=4.30\%$ 。



⑥亚共晶白口铁, $2.11\% < w(C) < 4.30\%$ 。



⑦过共晶白口铁, $4.30\% < w(C) < 6.69\%$ 。



(4) 含碳量对平衡组织和性能的影响。

①对平衡组织和相相对含量的影响：随碳含量增加，渗碳体含量增加，铁素体含量下降。但对于平衡组织含量的变化则较为复杂，对于亚共析钢，随碳含量增加，珠光体含量增加，铁素体含量下降；对过共析钢，随碳含量增加，珠光体含量下降，二次渗碳体含量增加；对亚共晶白口铁，随碳含量增加，珠光体含量下降，莱氏体含量增加；对过共晶白口铁，随碳含量增加，莱氏体含量下降，一次渗碳体含量增加。

渗碳体在不同铁碳合金组织中的形态也有很大差异：在亚共析钢中，三次渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ 呈薄网状或点状；在珠光体组织中，共析 Fe_3C 呈层片状；在过共析钢中，二次渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ 呈网状分布在珠光体周围；铸铁中的共晶渗碳体 Fe_3C 以白色连续相基体的形式存在；而过共晶白口铁中的一次渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{I}}$ 呈粗大片状。

②对力学性能的影响：随碳含量提高，碳钢强度、硬度升高，塑韧性下降。

③对工艺性能的影响：适合锻造的 $w(C) < 2.11\%$ ，得到单相组织；适合铸造的 $w(C)$ 为 $2.11\% \sim 4.3\%$ ，流动性好；适合冷塑变的 $w(C) < 0.25\%$ ，变形阻力小；适合热处理的 $w(C)$ 为 $0.0218\% \sim 2.11\%$ ，有固态相变。

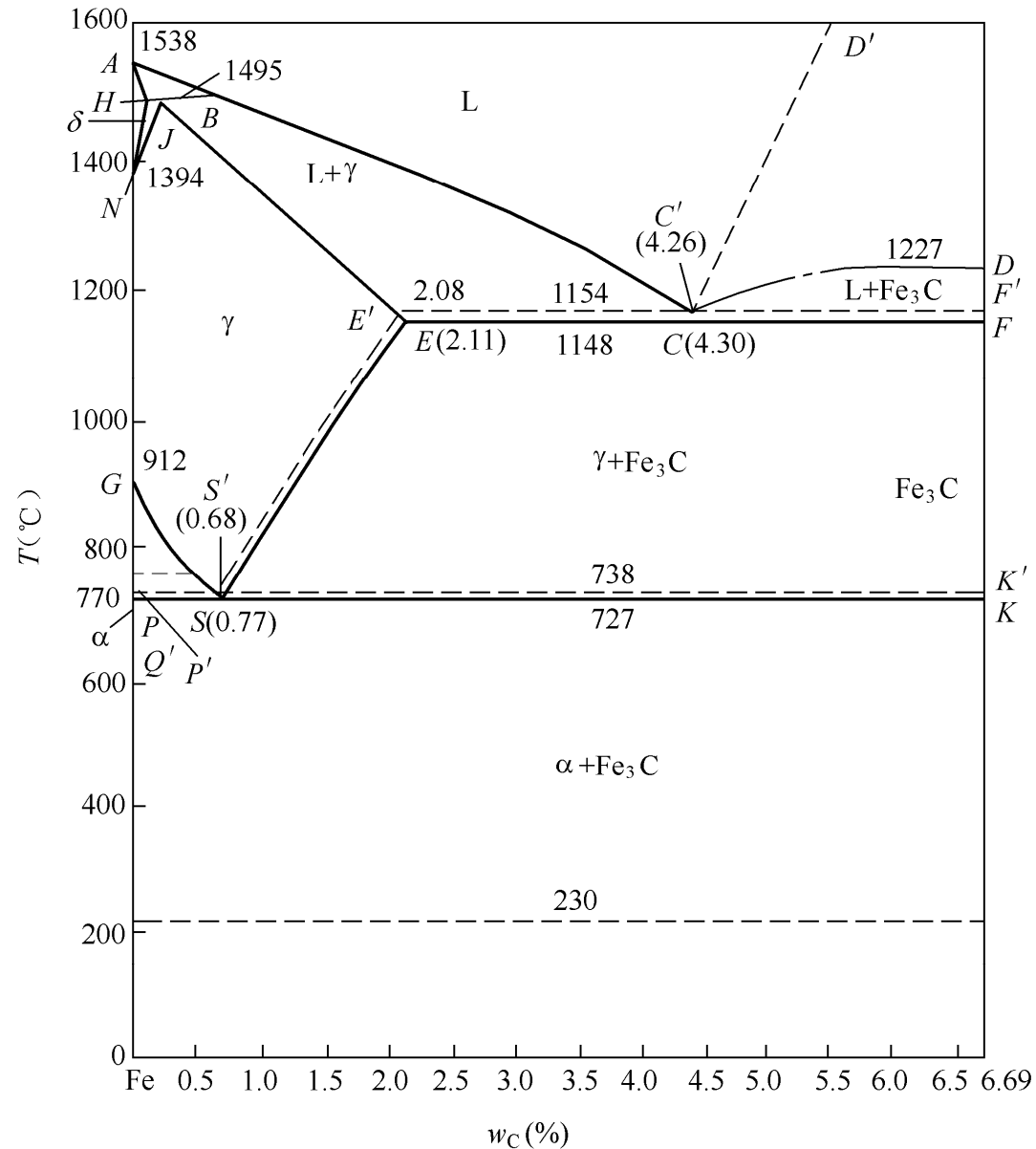
典型题精讲

1. (清华大学2008年考研试题)

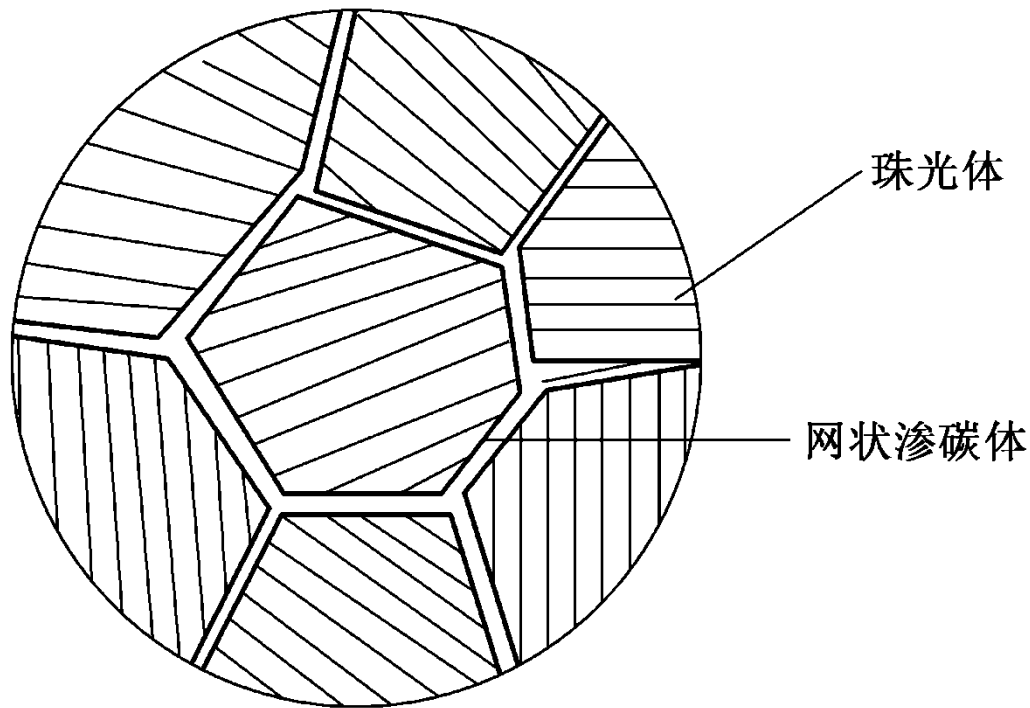
(1) 画出Fe-Fe₃C相图;

(2) 分析碳含量 $w_C=1.1\%$ 的铁碳合金从液相平衡凝固到室温时的转变过程, 画出组织转变示意图, 并计算出室温时各组织的相对含量。

答：（1）Fe-Fe₃C
相图如图所示。



(2) 转变过程: 由液相冷却时先进入L+ γ 奥氏体两相区, 形成枝晶状或等轴状 γ 奥氏体, 然后进入奥氏体单相区; 继续冷却到约760℃时, 沿晶界析出二次渗碳体, 在727℃时剩余的奥氏体转变为珠光体, 最后的组织是珠光体+网状渗碳体, 组织转变示意图如图所示。



室温时, 珠光体、网状渗碳体的相对含量分别为:

$$w_{\text{珠}} = \frac{6.67 - 1.1}{6.67 - 0.77} \times 100\% = 94.4\%$$

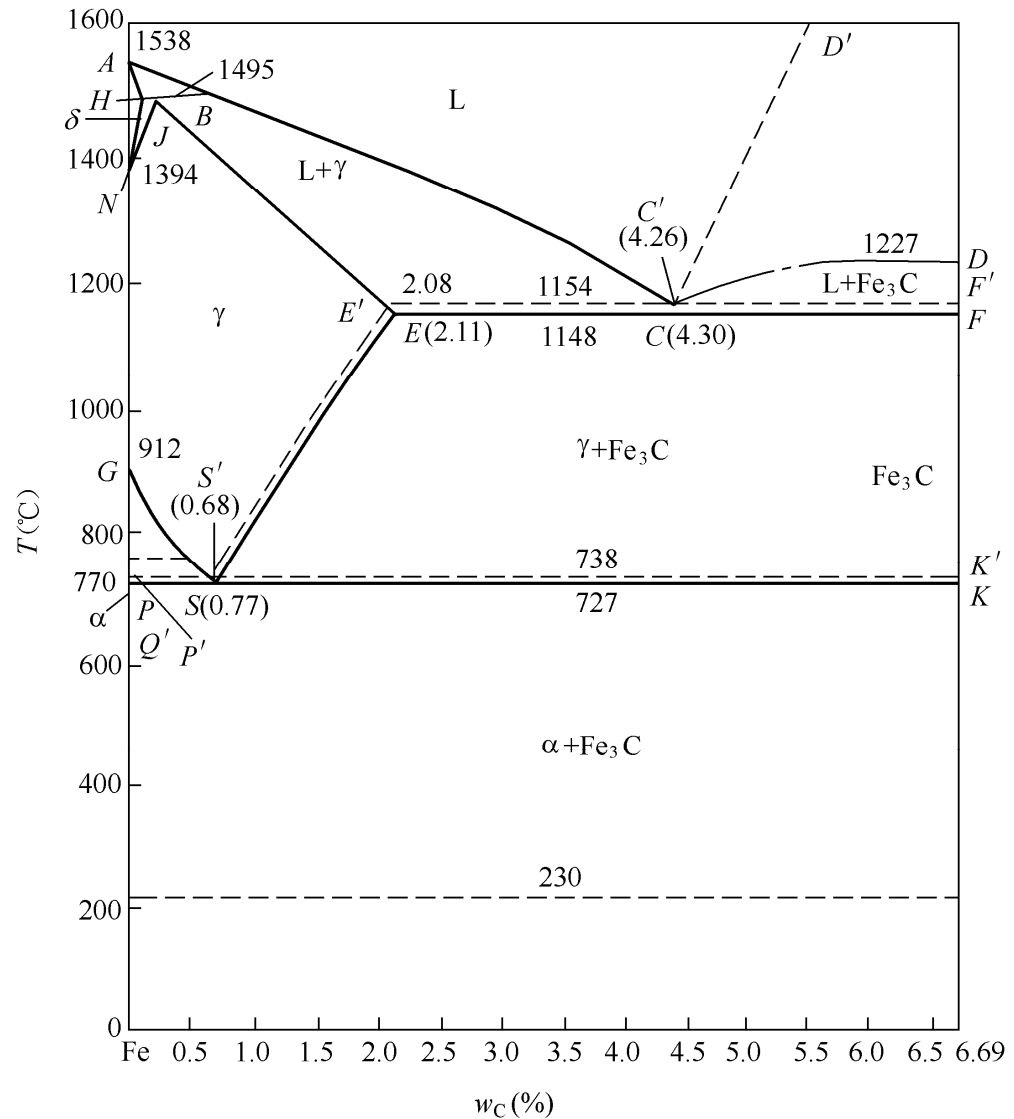
$$w_{\text{网}} = \frac{1.1 - 0.77}{6.67 - 0.77} \times 100\% = 5.6\%$$

2. (清华大学2007年考研试题) 根据如下图所示的铁碳平衡相图, 回答以下问题:

(1) 写出在1495°C、1154°C、1148°C、738°C和727°C发生的三相平衡反应的反应式;

(2) 画出含碳量 $w_C=1.2$ 的过共析钢在室温下的平衡组织, 并计算二次渗碳体的百分数;

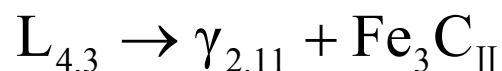
(3) 含碳量 $w_C=3.5\%$ 的亚共晶白口铸铁在从液相平衡冷却到室温时会发生什么三相平衡反应和两相平衡反应(可用热分析曲线表示)? 室温下该成分的铸铁中有没有二次渗碳体? 如有的话, 计算其百分数。



答：（1）当冷却到1495℃时在三相平衡线 HJB 处发生包晶转变，反应式为：
$$L_{0.53} + \delta_{0.09} \rightarrow \gamma$$

当冷却到1154℃时在三相平衡线 $E'C'F'$ 处发生共晶转变，反应式为：
$$L_{4.26} \rightarrow \gamma_{2.08} + C$$

当冷却到1148℃时在三相平衡线 ECF 处发生共晶转变（莱氏体 L_d ），反应式为：

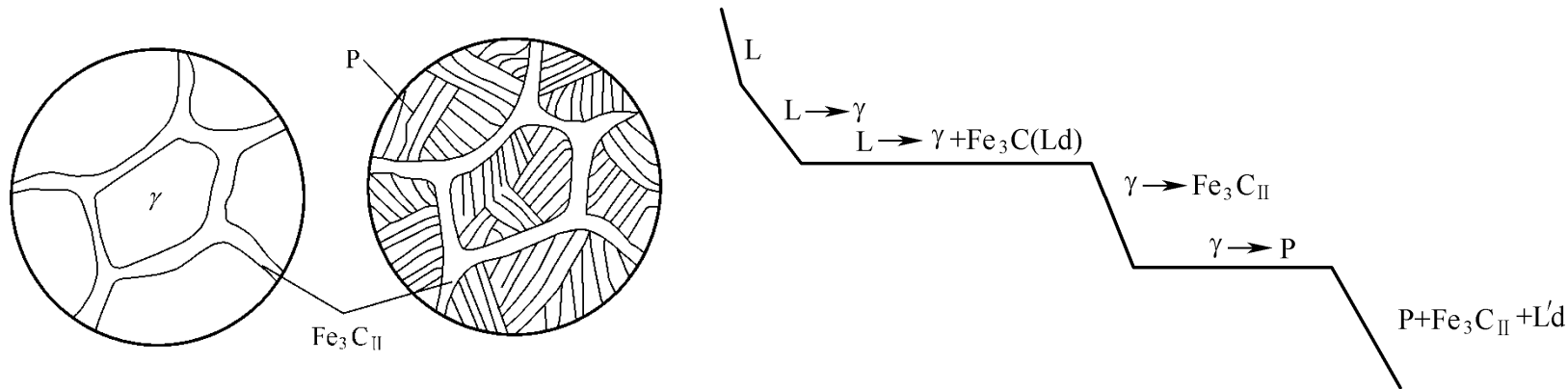


当冷却到738℃时在三相平衡线 $P'S'K'$ 处发生共析转变，反应式为：
$$L_{0.68} \rightarrow \alpha_{0.0218} + C(G)$$

当冷却到727℃时在相平衡线 PSK 处发生共析转变，其反应式为：
$$\gamma_{0.77} \rightarrow \alpha_{0.0218} + Fe_3C$$

(2) 室温下的平衡组织如图所示, 其中二次渗碳体的百分数为:

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{1.2 - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\% = 7.26\%$$



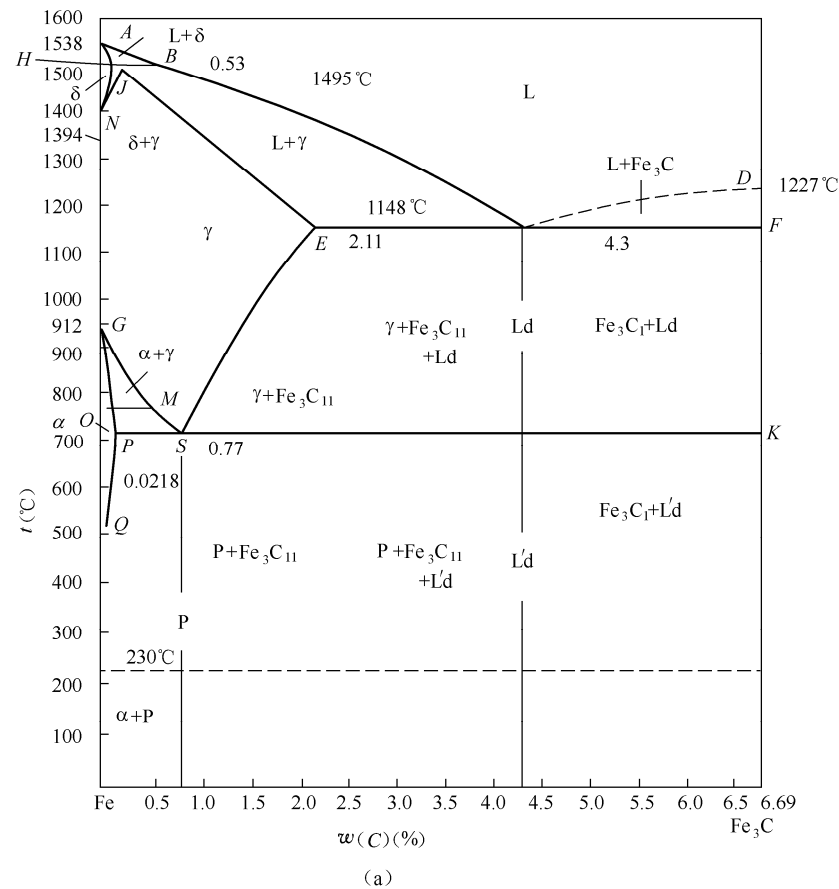
(3) 含碳量 $w_{\text{C}}=3.5\%$ 的亚共晶白口铸铁在从液相平衡冷却到室温时所发生的三相平衡反应和两相平衡反应如图所示。

室温下该成分的铸铁中有二次渗碳体, 其百分数为:

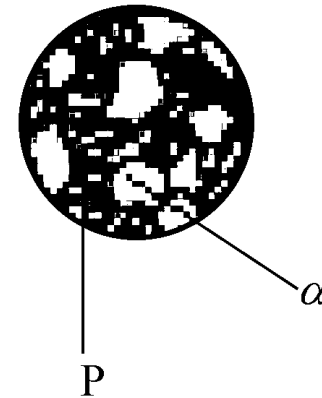
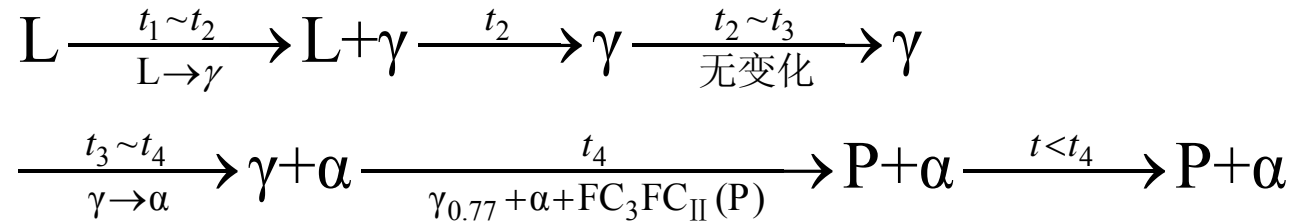
$$w_{\text{Fe}_3\text{C}_{\text{H}}} = \frac{4.3 - 3.5}{4.3 - 2.11} \times \frac{2.11 - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\% = 8.3\%$$

3. (华中科技大学2006年考研试题) 画出Fe-Fe₃C平衡相图, 标注各点的字母代号、温度。
- (1) 分析成分为0.6%C的合金缓慢冷却过程组织变化 (画出组织示意图并指出图中各部分的名称);
 - (2) 计算室温时各相组成物及组织组成物的相对含量;
 - (3) 两块同样形状和大小的铁碳合金, 一块是低碳钢、一块是白口铸铁。试问用什么简便的方法可迅速将它们区分开来?

答: $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$
 平衡相图如图
 所示。



(1) 结晶过程为:



室温组织为 $\text{P} + \alpha$ ，其组织示意图如图所示。

(2) 室温时相的组成物为 $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ ，且有:

$$w_{\alpha} = \frac{6.69 - 0.6}{6.69 - 0.0218} = 91.3\%, \quad w_{\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}} = 1 - w_{\alpha} = 1 - 91.3\% = 8.7\%$$

室温下组织组成物为 $\text{P} + \alpha$ ，且有:

$$w_{\alpha} = \frac{0.77 - 0.6}{0.77 - 0.0218} = 21.4\% \Rightarrow w_{\text{P}} = 1 - w_{\alpha} = 78.6\%$$

(3) 由于它们含碳质量分数不同，使得它们具有不同的特性，最显著的是硬度不同，低碳钢硬率低，韧性好；白口铸铁硬度高，脆性大。

可以采用如下方法来区分它们：①用钢锉试锉，硬者为白口铸铁；易锉者应为低碳钢；②用榔头敲砸，易破断者为白口铸铁，砸不断者为低碳钢。

谢谢!