



“十四五”职业教育国家规划教材

金属材料与热处理

JINSHU CAILIAO YU RECHULI

(第四版)

主 编 曹润平 王书田



大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

金属材料与热处理 / 曹润平, 王书田主编. -- 4 版.
大连: 大连理工大学出版社, 2024. 12. -- ISBN 978-7-5685-5322-3

I. TG14; TG15

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20242262MW 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

营销中心: 0411-84707410 84708842 邮购及零售: 0411-84706041

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <https://www.dutp.cn>

辽宁虎驰科技传媒有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm	印张: 15.5	字数: 376 千字
2011 年 1 月第 1 版		2024 年 12 月第 4 版
	2024 年 12 月第 1 次印刷	

责任编辑: 吴媛媛

责任校对: 陈星源

封面设计: 张莹

ISBN 978-7-5685-5322-3

定 价: 50.80 元

本书如有印装质量问题, 请与我社营销中心联系更换。

目 录

绪 论	1
模块一 金属的力学性能	4
学习任务一 金属的物理、化学和工艺性能	5
学习任务二 强度与塑性	9
学习任务三 硬 度	15
学习任务四 冲击韧性、疲劳极限及耐磨性	20
综合训练	25
小 结	27
模块二 金属的晶体结构	29
学习任务一 理想金属的晶体结构	29
学习任务二 实际金属的晶体结构	34
综合训练	38
小 结	38
模块三 金属的结晶	39
学习任务一 结晶现象	40
学习任务二 晶体的形核与长大	41
学习任务三 结晶的条件	44
学习任务四 晶粒大小的控制	45
综合训练	49
小 结	51
模块四 合金的相结构	52
学习任务一 固溶体	52
学习任务二 金属化合物	55
综合训练	57
小 结	57
模块五 合金的结晶	58
学习任务一 匀晶相图	59
学习任务二 共晶相图	64
学习任务三 包晶相图	68
学习任务四 铁碳相图	75
综合训练	89
小 结	96

模块六 钢的热处理	97
学习任务一 钢在加热和冷却时的组织转变	98
学习任务二 钢的热处理基本工艺	111
综合训练	130
小 结	140
模块七 金属的塑性变形与再结晶	142
学习任务一 金属与合金的塑性变形	143
学习任务二 冷变形金属在加热时的变化	153
学习任务三 金属的热变形加工	157
综合训练	160
小 结	161
模块八 工业用钢	163
学习任务一 工程结构用钢	165
学习任务二 机器零件用钢	169
学习任务三 工具钢	176
学习任务四 特殊性能钢	185
综合训练	195
小 结	197
模块九 铸 铁	198
学习任务一 铸铁的石墨化及影响因素	199
学习任务二 灰口铸铁	203
学习任务三 球墨铸铁	206
综合训练	216
小 结	217
模块十 非铁合金	218
学习任务一 铝合金	219
学习任务二 铜合金	224
学习任务三 滑动轴承合金及其他非铁合金简介	230
综合训练	233
小 结	233
参考文献	235
附 录	236

» 学习任务四 铁碳相图 <<

任务提出

钢铁材料是目前应用最广泛的金属材料,既然相图是研究合金的有力工具,那么钢铁材料的相图是什么样子的?这个相图有哪些特点?在钢铁材料的实际使用中有哪些作用?

任务分析

钢铁材料的基本相图就是铁碳合金相图,铁碳合金的结晶过程比较复杂,几乎包括了前面所介绍的所有相图的形式和结晶转变,铁碳相图对于钢铁材料的应用有重要的指导作用。

相关知识

一、铁碳合金的基本相

铁与碳是铁碳合金的两个组元。在固态下,铁与碳有两种结合方式:一种是碳溶于铁的晶格中形成固溶体,一种是铁与碳形成化合物。铁碳合金形成的固溶体是铁素体和奥氏体,形成的化合物是渗碳体,它们构成了铁碳合金的基本组成相,从而对铁碳合金的组织 and 性能产生影响。铁碳合金在不同的温度下具有不同的晶体结构,除上述三种单相组织外,铁碳合金基本组织还有珠光体、莱氏体两种复相组织以及液相组织。

1. 铁素体

碳溶于 α -Fe 中所形成的间隙固溶体称为铁素体,用符号 F 表示。铁素体仍然保持 α -Fe 的体心立方晶格。铁素体溶碳能力很低,在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时溶解碳的质量分数为 0.006% ;随着温度的升高,溶碳量逐渐增加,在 $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到最大值 0.0218% 。因此,铁素体在室温时的力学性能与纯铁差不多,强度、硬度低,塑性、韧性好($R_m=180\sim 280\text{ MPa}$, $R_{eL}=180\sim 280\text{ MPa}$, $A=30\%\sim 50\%$, $Z=70\%\sim 80\%$, $KU_2=128\sim 160\text{ J}$, 硬度为 $50\sim 80\text{ HBW}$)。铁素体的显微组织呈现明亮的多边形晶粒,晶界曲折,如图 5-25 所示。

2. 奥氏体

碳溶解于 γ -Fe 中所形成的间隙固溶体称为奥氏体,用符号 A 表示。奥氏体仍然保持着 γ -Fe 的面心立方晶格。一般情况下,奥氏体只有在高温下才能够稳定存在。奥氏体的溶碳能力较强,在 $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时溶解碳的质量分数为 0.77% ,随着温度的升高,溶碳量逐渐增加,在 $1148\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到最大值 2.11% 。奥氏体的强度、硬度低,塑性、韧性好($R_m=400\text{ MPa}$, $A=40\%\sim 50\%$, 硬度为 $160\sim 220\text{ HBW}$),易于塑性变形,所以,生产中常常将钢材加热到高温,使之处于奥氏体状态进行锻造,这就是趁热打铁的原因。奥氏体的显微组织与铁素体的显微组织相似,呈多边形,但是晶界较铁素体平直,如图 5-26 所示。

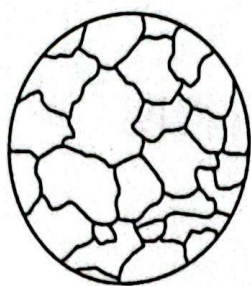


图 5-25 铁素体的显微组织示意图

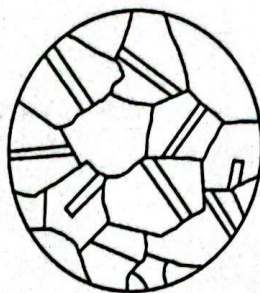


图 5-26 奥氏体的显微组织示意图

3. 渗碳体

铁与碳形成的具有复杂晶格的间隙化合物称为渗碳体,用分子式 Fe_3C 表示。渗碳体的碳质量分数为 6.69%,熔点为 1 227 °C,硬度很高(约 1 000HV),塑性、韧性几乎为零,脆性很大。渗碳体在铁碳合金中常以片状、球状、网状等形态与其他相共存,它的形态、大小、数量和分布对钢的性能影响很大,是钢中的主要强化相。

二、铁碳合金相图分析

铁碳合金相图是以温度为纵坐标、碳质量分数为横坐标的,反映铁碳合金中成分、温度和组织结构之间变化规律的图形。

铁碳合金相图中由于碳的质量分数为 6.69%时,铁和碳形成稳定的化合物 Fe_3C ,可以作为一个独立的组元,并且碳质量分数大于 6.69%后铁碳合金脆性极大,没有使用价值,所以铁碳合金相图实际上是 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图。横坐标从左到右表示合金成分的变化,即碳的质量分数由 0 向 6.69%逐渐增大。横坐标上的任何一点都代表一种成分。

铁碳合金相图如图 5-27 所示。下面以点、线、区进行相图分析。

1. 特性点

在铁碳合金相图中,用字母标出的点都有其特定的意义,称为特性点。

铁碳合金($\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$)相图各特性点的温度、碳质量分数及含义见表 5-2。

表 5-2 铁碳合金相图中的特性点说明

特性点	温度/°C	碳质量分数/%	含义	特性点	温度/°C	碳质量分数/%	含义
A	1 538	0	纯铁的熔点	H	1 495	0.09	碳在 $\delta\text{-Fe}$ 中最大溶解度点
B	1 495	0.53	包晶转变时液相成分点	J	1 495	0.17	包晶点
C	1 148	4.30	共晶点	K	727	6.69	共析渗碳体成分点
D	1 227	6.69	渗碳体熔点	N	1 394	0	$\delta\text{-Fe}$ 与 $\gamma\text{-Fe}$ 的相变点(A_4)
E	1 148	2.11	碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中最大溶解度点	P	727	0.021 8	碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中最大溶解度点
F	1 148	6.69	共晶渗碳体成分点	S	727	0.77	共析点(A_1)
G	912	0	$\alpha\text{-Fe}$ 与 $\gamma\text{-Fe}$ 的相变点(A_3)	Q	600	0.005 7	600 °C 时碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中溶解度点

2. 特征线

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图的特征线是不同成分的铁碳合金具有相同意义相变点的连接线,表示铁

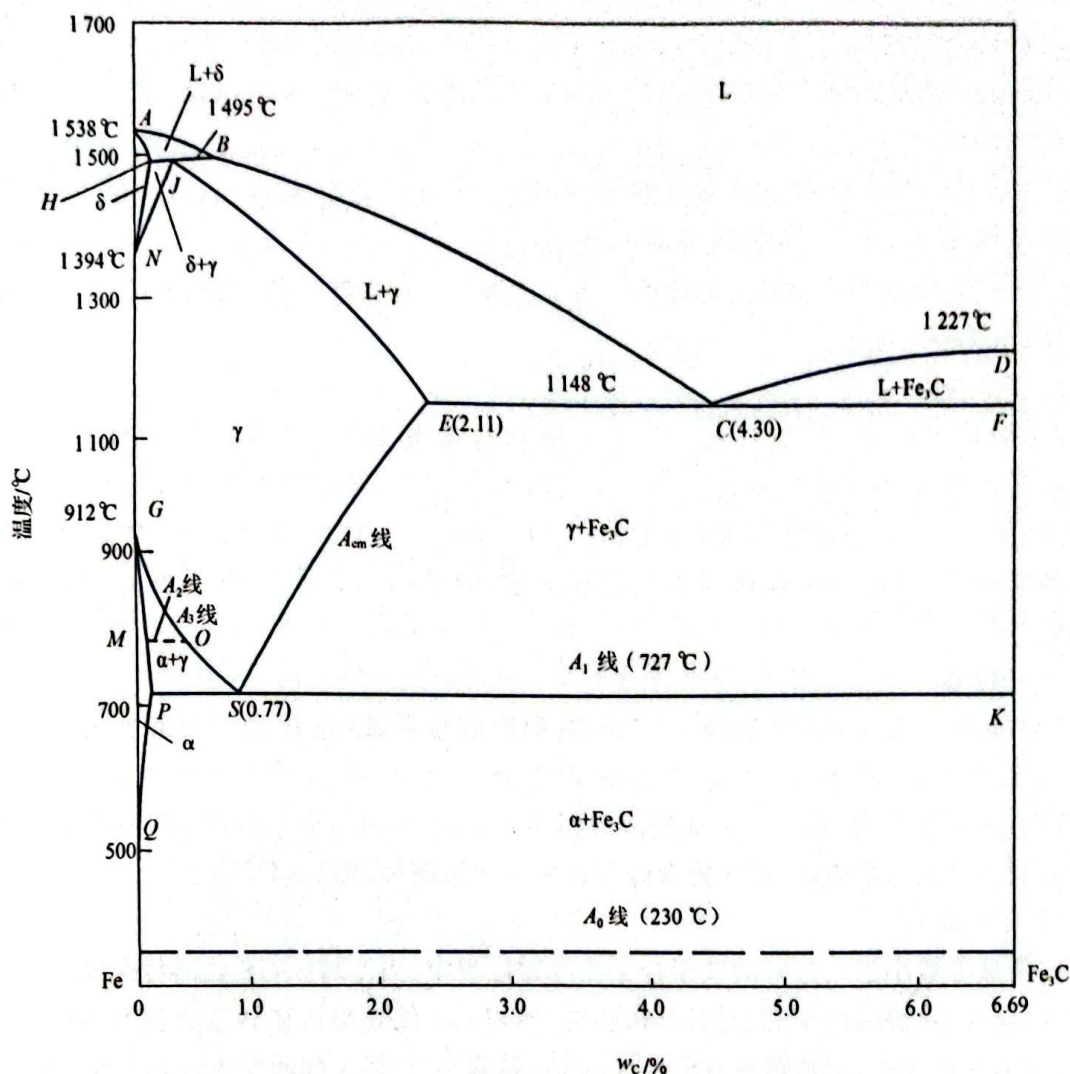
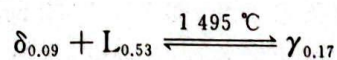


图 5-27 铁碳合金相图

碳合金发生组织转变时的界限,这些线就是组织转变线。

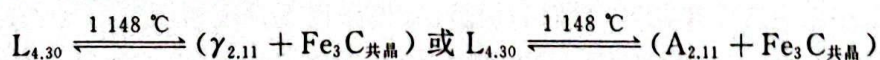
(1) 包晶转变线

铁碳合金相图中 HJB 线为包晶转变线,凡是碳的质量分数在 $0.09\% \sim 0.53\%$ 的铁碳合金缓慢冷却到 HJB 线上时均发生包晶转变,即



(2) 共晶转变线

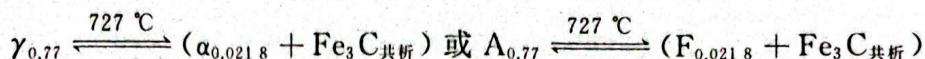
铁碳合金相图中 ECF 线为共晶转变线,凡是碳的质量分数超过 2.11% 的铁碳合金缓慢冷却到 ECF 线上时均发生共晶转变,即



共晶转变产物 $(\gamma_{2.11} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{共晶}})$ 或 $(A_{2.11} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{共晶}})$ 称为莱氏体,用 L_d 表示。发生共晶转变结晶出的渗碳体称为共晶渗碳体。

(3) 共析转变线

铁碳合金相图中 PSK 线为共析转变线,凡是碳的质量分数超过 0.0218% 的铁碳合金缓慢冷却到 PSK 线上时均发生共析转变,即



共析转变产物 ($\alpha_{0.0218} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{共析}}$) 或 ($\text{F}_{0.0218} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{共析}}$) 称为珠光体, 用 P 表示。发生共析转变析出的渗碳体称为共析渗碳体。PSK 线也称为 A_1 线。

(4) CD 线

CD 线是碳在液相中的饱和溶解度曲线, 碳质量分数最大为 6.69%, 最小为 4.30% (1 148 °C 时的 C 点)。凡是碳质量分数超过 4.30% 的铁碳合金, 从液相缓慢冷却到 1 148 °C 时, 均从液相中结晶出渗碳体。为了区别于其他的渗碳体, 把这种渗碳体称为一次渗碳体, 用 Fe_3C_I 表示。

(5) ES 线

ES 线是碳在 $\gamma\text{-Fe}$ (奥氏体 A) 中的饱和溶解度曲线, 碳质量分数最大为 2.11% (1 148 °C 时的 E 点), 最小为 0.77% (727 °C 时的 S 点)。凡是碳质量分数超过 0.77% 的铁碳合金, 从 1 148 °C 缓慢冷却到 727 °C 时, 均从 $\gamma\text{-Fe}$ (奥氏体 A) 中析出渗碳体。为了区别于其他的渗碳体, 把这种渗碳体称为二次渗碳体, 用 Fe_3C_{II} 表示。ES 线很重要, 故命名为 A_{cm} 线。

(6) PQ 线

PQ 线是碳在 $\alpha\text{-Fe}$ (铁素体 F) 中的饱和溶解度曲线, 碳质量分数最大为 0.021 8% (727 °C 时的 P 点), 600 °C 时 Q 点的碳质量分数为 0.005 7%。凡是碳质量分数超过 0.005 7% 的铁碳合金, 从 727 °C 缓慢冷却到 600 °C 时, 均从 $\alpha\text{-Fe}$ (铁素体 F) 中析出渗碳体。为了区别于其他的渗碳体, 把这种渗碳体称为三次渗碳体, 用 $\text{Fe}_3\text{C}_{III}$ 表示。

(7) GS 线

碳质量分数小于 0.77% 的铁碳合金在冷却过程中, 当冷却到 GS 线时将会发生 $\gamma\text{-Fe}$ (奥氏体 A) 向 $\alpha\text{-Fe}$ (铁素体 F) 的同素异构转变, 所以 GS 线是奥氏体转变为铁素体的开始线。同样, 在加热过程中, 当加热到 GS 线时, $\alpha\text{-Fe}$ (铁素体 F) 将全部转变为 $\gamma\text{-Fe}$ (奥氏体 A), 所以 GS 线也是铁素体转变为奥氏体的终了线。GS 线又叫作 A_3 线。

铁碳合金相图中其他线的含义为: ABCD 线为液相线, AHJECF 线为固相线。HN 线为冷却时 $\delta\text{-Fe}$ 转变为 $\gamma\text{-Fe}$ 的开始线和加热时 $\gamma\text{-Fe}$ 转变为 $\delta\text{-Fe}$ 的终了线; NJ 线是冷却时 $\delta\text{-Fe}$ 转变为 $\gamma\text{-Fe}$ 的终了线和加热时 $\gamma\text{-Fe}$ 转变为 $\delta\text{-Fe}$ 的开始线; GP 线为冷却时 $\gamma\text{-Fe}$ 转变为 $\alpha\text{-Fe}$ 的终了线和加热时 $\alpha\text{-Fe}$ 转变为 $\gamma\text{-Fe}$ 的开始线。

另外, 铁碳合金相图中还有两条水平线, 即 770 °C 的 MO 线和 230 °C 的一条虚线, 它们均称为居里点, 分别是铁素体和渗碳体的磁性转变线, 分别将其命名为 A_2 和 A_0 线, 当加热到这两条水平线以上温度时, 铁碳合金将失去铁磁性而转变为顺磁性。

3. 区

铁碳合金相图有五个单相区, 它们分别是: ABCD 以上是液相 (L) 区、AHNA 是 $\delta\text{-Fe}$ 固溶体 (高温铁素体) 区、NJESGN 是 $\gamma\text{-Fe}$ 固溶体 (奥氏体) 区、GPQ 左边是 $\alpha\text{-Fe}$ 固溶体 (铁素体) 区、DFK 铅垂线是 Fe_3C (渗碳体) 区。

铁碳合金相图有七个两相区, 它们分别是 $L + \delta\text{-Fe}$ 、 $L + \gamma\text{-Fe}$ 、 $L + \text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\delta\text{-Fe} + \gamma\text{-Fe}$ 、 $\alpha\text{-Fe} + \gamma\text{-Fe}$ 、 $\gamma\text{-Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$ 、 $\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$ 。

另外, 三相共存水平线 HJB、ECF、PSK 可以看作“三相区”。

三、典型铁碳合金的平衡结晶过程及其组织

(一) 铁碳合金的分类

铁碳合金根据碳的质量分数不同可分为三大类、七小类。

铁碳合金	工业纯铁($w_c \leq 0.0218\%$)	
	钢($0.0218\% < w_c \leq 2.11\%$)	亚共析钢($0.0218\% < w_c < 0.77\%$)
		共析钢($w_c = 0.77\%$)
		过共析钢($0.77\% < w_c \leq 2.11\%$)
白口铸铁($2.11\% < w_c < 6.69\%$)		亚共晶白口铸铁($2.11\% < w_c < 4.30\%$)
		共晶白口铸铁($w_c = 4.30\%$)
		过共晶白口铸铁($4.30\% < w_c < 6.69\%$)

(二) 典型铁碳合金的平衡结晶过程

铁碳合金的典型合金就是上面分类中的七种合金,下面分别对七种合金在相图中的结晶及组织转变过程进行分析。典型合金的具体位置如图 5-28 所示。

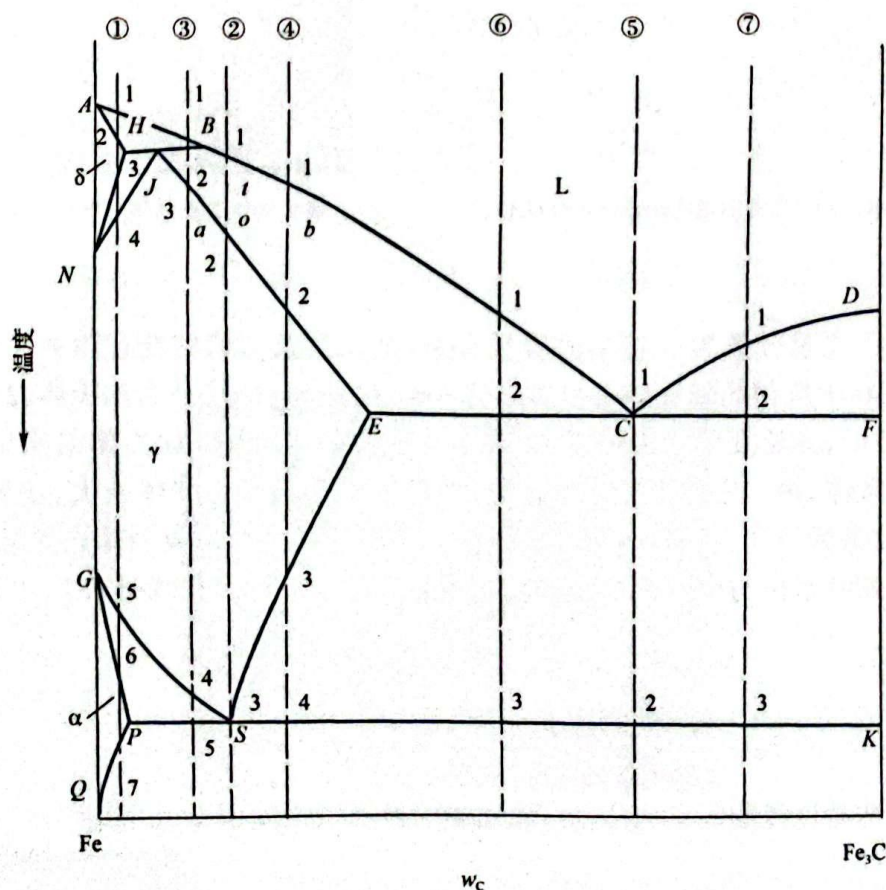


图 5-28 典型合金在铁碳合金相图中的具体位置

1. 工业纯铁

以碳质量分数为 0.01% 的①号合金为例,分析其结晶及组织转变过程。合金 1 点以上为液相,冷却到 1 点时按匀晶转变结晶出 δ 固溶体,2 点时结晶结束。冷却到 3 点时,开始发生固溶体的同素异构转变 $\delta \rightarrow \gamma$,奥氏体的晶核通常优先在 δ 相的晶界上形成,然后长大。

这一转变在 4 点时结束, 4~5 点合金全部呈单相奥氏体。冷却到 5~6 点间又发生同素异构转变 $\gamma \rightarrow \alpha$, 变为铁素体。铁素体同样是在奥氏体的晶界上优先形核长大, 6~7 点全部呈铁素体。冷却到 7 点时, 铁素体中的溶碳量达到饱和。在 7 点以下碳将从铁素体中析出三次渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$, 所以工业纯铁的室温组织为铁素体和沿铁素体晶界分布的片状三次渗碳体。随着碳含量的增加, 三次渗碳体的数量也相应增加, 在 P 点时达到最大值。根据杠杆定律可计算三次渗碳体的最大质量分数为

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}} \text{ max}} = \frac{0.0218}{6.69} \times 100\% \approx 0.33\%$$

工业纯铁的结晶过程如图 5-29 所示。工业纯铁的显微组织如图 5-30 所示。

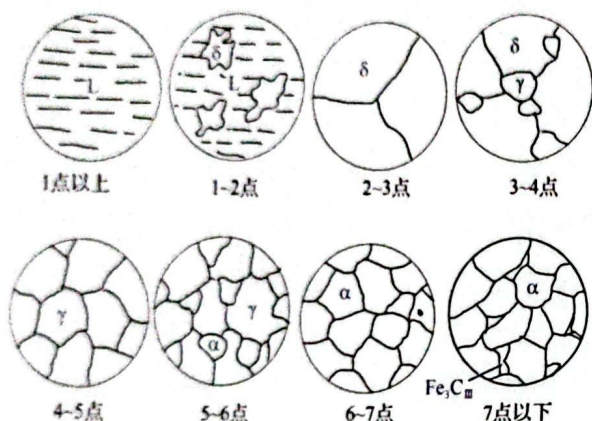


图 5-29 工业纯铁的结晶过程示意图

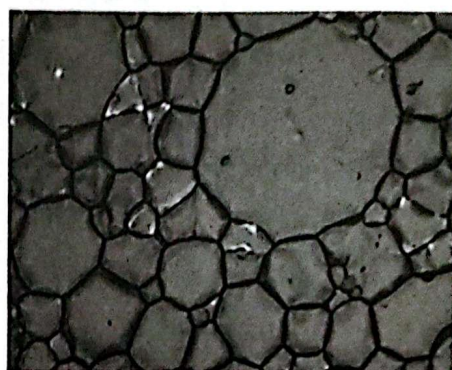


图 5-30 工业纯铁的显微组织(800×)

2. 共析钢

共析钢是碳质量分数为 0.77% 的②号合金, 其结晶及组织转变过程如下: 合金降温至 1 点, 开始从液相中按匀晶转变结晶出奥氏体。到 2 点时完全结晶为奥氏体, 2~3 点为奥氏体, 当达到 3 点时, 开始发生共析转变, 转变为珠光体。3 点以下珠光体组织中的铁素体开始析出三次渗碳体, 由于三次渗碳体量很少, 并且依附于共析渗碳体长大, 在显微镜下几乎观察不到, 所以最后得到由铁素体与渗碳体两相呈层片状排列形成的珠光体组织。

珠光体中的铁素体与渗碳体两相的相对质量分数可用杠杆定律计算:

$$w_F = \frac{SK}{PK} = \frac{6.69 - 0.77}{6.69} \times 100\% = 88.5\%$$

$$w_{\text{Fe}_3\text{C}} = \frac{PS}{PK} = \frac{0.77 - 0.0218}{6.69} \times 100\% = 11.2\%$$

共析钢的结晶过程如图 5-31 所示, 珠光体的显微组织如图 5-32 所示。

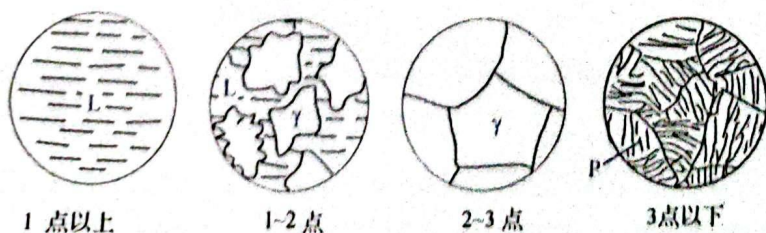


图 5-31 共析钢的结晶过程示意图



图 5-32 珠光体的显微组织(200×)

3. 亚共析钢

以碳质量分数为 0.45% 的③号合金为例,分析其结晶及组织转变过程。合金在 1 点以上为液相,在 1~2 点之间按匀晶转变结晶出 δ 固溶体,冷却到 2 点(1495 °C)时, δ 固溶体中碳的质量分数达到 0.09%,液相中碳质量分数达到 0.53%,此时液相与 δ 固溶体发生包晶转变,由于合金中碳的质量分数大于 0.17%,所以包晶转变终了以后,还有过剩的液相存在。从 2 点冷却到 3 点,剩余的液相又以匀晶转变的形式继续结晶出奥氏体,所有奥氏体成分均沿 JE 线变化。冷却到 3 点时,合金全部由碳质量分数为 0.45% 的奥氏体组成。单相奥氏体冷却到 GS 线上的 4 点时,开始在奥氏体晶界上析出铁素体,称为先共析铁素体。随着温度的下降,铁素体含量不断增多,而奥氏体含量不断减少。铁素体中碳质量分数沿 GP 线变化,而剩余奥氏体中碳质量分数则沿 GS 线变化。当温度接近 5 点时(727 °C),铁素体的成分接近 P 点,剩余奥氏体中碳质量分数接近 S 点,剩余的奥氏体发生共析转变,形成珠光体。此时,钢的组织就由先共析铁素体和珠光体组成。5 点以下,先共析铁素体将析出三次渗碳体,但其数量很少,可以忽略。故该合金的室温组织仍为铁素体与珠光体。所有亚共析钢的组织都是由铁素体与珠光体组成的,随着碳质量分数的增大,珠光体的含量增加而铁素体的含量减少,两者的相对含量可以根据杠杆定律求得。

亚共析钢的结晶过程如图 5-33 所示,亚共析钢的室温显微组织如图 5-34 所示。

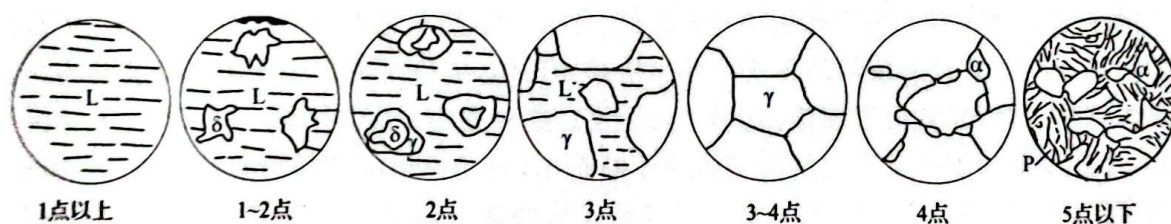


图 5-33 亚共析钢的结晶过程示意图

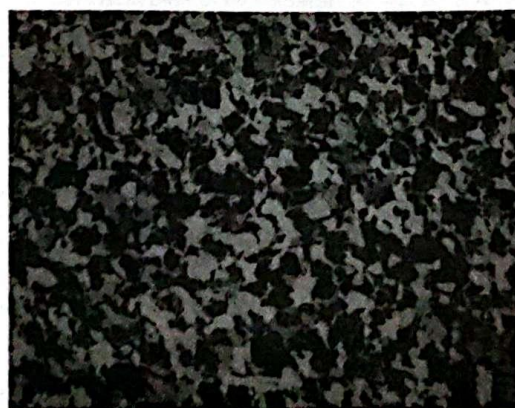


图 5-34 亚共析钢的室温显微组织($w_c=0.45\%$, 930 °C 退火, 200×)

亚共析钢的室温组织是 F+P, 而珠光体是 $(F+Fe_3C)$ 两相的混合组织, 因此, 亚共析钢的组织又可以写成为 $F+(F+Fe_3C)$, F+P 称为组织组成物, $F+(F+Fe_3C)$ 称为相组成物, 组织组成物和相组成物均可由杠杆定律来计算相对含量。

以碳质量分数为 0.45% 的亚共析钢为例, 分别计算组织组成物和相组成物的相对含量。

组织组成物由 F+P 组成,按照杠杆定律计算:

$$w_F = \frac{S_5}{PS} = \frac{0.77 - 0.45}{0.77 - 0.0218} \times 100\% = 42.8\%$$

$$w_P = \frac{P_5}{PS} = \frac{0.45 - 0.0218}{0.77 - 0.0218} \times 100\% = 57.2\%$$

即碳质量分数为 0.45% 的亚共析钢分别由质量分数为 42.8% 的铁素体组织和质量分数为 57.2% 的珠光体组织组成。

相组成物由 F+Fe₃C 组成,这里的 F 不仅包括先共析铁素体,也包括珠光体里共析转变形成的共析铁素体,按照杠杆定律计算:

$$w_F = \frac{K_5}{PK} = \frac{6.69 - 0.45}{6.69 - 0.0218} \times 100\% = 93.6\%$$

$$w_{Fe_3C} = \frac{P_5}{PK} = \frac{0.45 - 0.0218}{6.69 - 0.0218} \times 100\% = 6.4\%$$

即碳质量分数为 0.45% 的亚共析钢分别由质量分数为 93.6% 的铁素体相和质量分数为 6.4% 的渗碳体相组成。

由此可见,组织组成物和相组成物完全不同。

4. 过共析钢

以碳质量分数为 1.20% 的④号合金为例,分析其结晶及组织转变过程。合金在 1 点以上为液相,在 1~2 点间按匀晶转变结晶出单相奥氏体,冷却到 3 点时,开始从奥氏体中析出二次渗碳体,又称先共析渗碳体,直到 4 点为止。这些先共析渗碳体多沿奥氏体晶界呈网状分布,随着温度的下降及先共析渗碳体的不断析出,奥氏体中碳的质量分数沿 ES 线降低。当温度到达 4 点(727℃)时,奥氏体中碳的质量分数降为 0.77%,因而在恒温下发生共析转变,奥氏体转变为珠光体,最后得到的组织是网状的二次渗碳体和珠光体。过共析钢的结晶过程如图 5-35 所示,过共析钢的室温显微组织如图 5-36 所示。

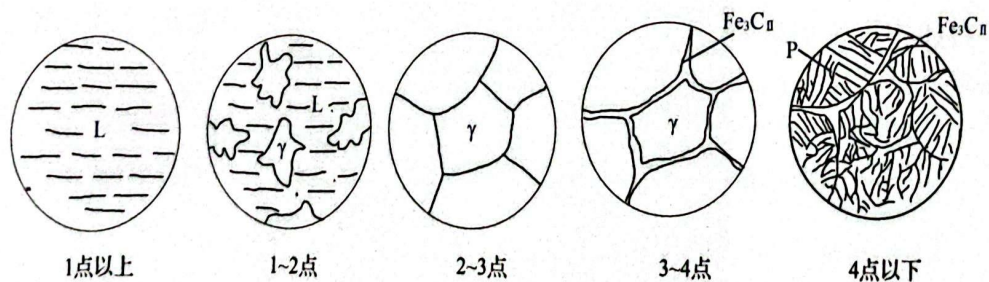


图 5-35 过共析钢的结晶过程示意图

在过共析钢中,随着碳质量分数的增加,组织中二次渗碳体的含量不断增加,网状趋于完整并逐渐增厚。当碳质量分数达到 2.11% 时,二次渗碳体的含量达到最大值,其相对质量分数可由杠杆定律计算。

$$w_{Fe_3C_{II} \max} = \frac{ES}{SK} = \frac{2.11 - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\% = 22.6\%$$

过共析钢的室温组织是 P+Fe₃C_{II},而珠光体是(F+Fe₃C)两相的混合组织,因此,过共析钢的组织又可以写成(F+Fe₃C)+Fe₃C_{II},P+Fe₃C_{II}称为组织组成物,(F+Fe₃C)+Fe₃C_{II}称为相组成物,组织组成物和相组成物均可由杠杆定律来计算相对质量分数。

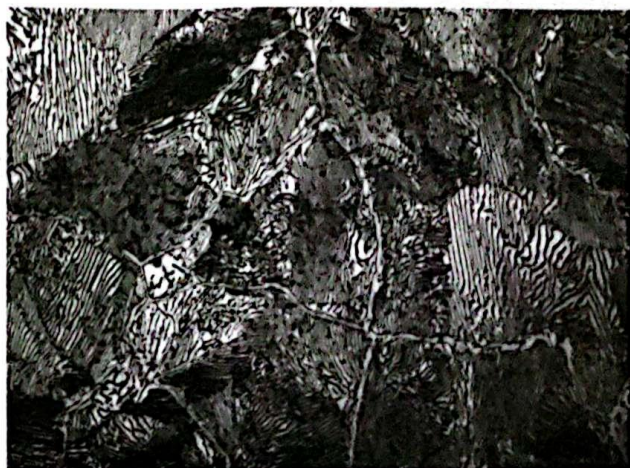


图 5-36 过共析钢的室温显微组织 ($w_c=1.13\%$, $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火, $400\times$)

以碳质量分数为 1.20% 的过共析钢为例, 分别计算组织组成物和相组成物。

组织组成物由 $P+Fe_3C_{II}$ 组成, 按照杠杆定律计算:

$$w_{Fe_3C_{II}} = \frac{S4}{SK} = \frac{1.20 - 0.77}{6.69 - 0.77} \times 100\% = 7.3\%$$

$$w_P = \frac{K4}{SK} = \frac{6.69 - 1.20}{6.69 - 0.77} \times 100\% = 92.7\%$$

即碳质量分数为 1.20% 的过共析钢分别由质量分数为 7.3% 的二次渗碳体组织和质量分数为 92.7% 的珠光体组织组成。

相组成物由 $F+Fe_3C$ 组成, 这里的 Fe_3C 不仅包括二次渗碳体, 也包括珠光体里共析转变形成的渗碳体, 按照杠杆定律计算:

$$w_F = \frac{K4}{PK} = \frac{6.69 - 1.20}{6.69 - 0.0218} \times 100\% = 82.3\%$$

$$w_{Fe_3C} = \frac{P4}{PK} = \frac{1.20 - 0.0218}{6.69 - 0.0218} \times 100\% = 17.7\%$$

即碳质量分数为 1.20% 的过共析钢分别由质量分数为 82.3% 的铁素体相和质量分数为 17.7% 的渗碳体相组成。

5. 共晶白口铸铁

共晶白口铸铁是碳质量分数为 4.30% 的⑤号合金, 其结晶及组织转变过程如下: 合金溶液冷却到 1 点 ($1148\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 在恒温下发生共晶转变, 转变为莱氏体。由共晶转变而结晶出的奥氏体与渗碳体, 分别称为共晶奥氏体与共晶渗碳体, 莱氏体即它们的混合物, 其形态是呈颗粒状的奥氏体分布在渗碳体的基体上。当冷却到 $1\sim 2$ 点之间时, 组织中的共晶渗碳体不再发生变化, 而奥氏体却因碳的溶解度不断降低而在其周围不断析出二次渗碳体, 它通常依附在共晶渗碳体上长大, 从而使二者不易分辨。在该温度区间, 奥氏体析出渗碳体后成分将沿 ES 线变化, 当温度降至 2 点 ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 共晶奥氏体中碳的质量分数将降至 0.77% , 在恒温下发生共析转变, 产物为珠光体。在室温下, 共晶白口铸铁的组织是由珠光体与渗碳体组成的共晶体, 这种组织叫作低温莱氏体或变态莱氏体。共晶白口铸铁的结晶过程如图 5-37 所示, 共晶白口铸铁的显微组织如图 5-38 所示。

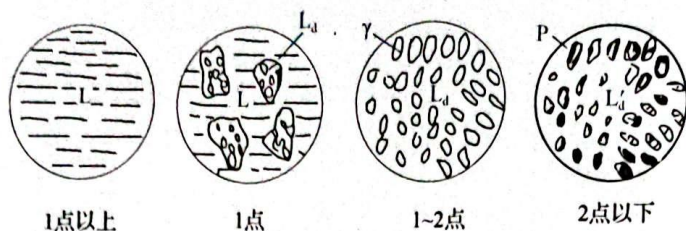


图 5-37 共晶白口铸铁的结晶过程示意图

6. 亚共晶白口铸铁

以碳质量分数为 3.0% 的⑥号合金为例,分析其结晶及组织转变过程。合金溶液在 1~2 点之间时,结晶出初晶奥氏体,此时液相成分沿 BC 线变化,而奥氏体成分沿 JE 线变化。温度降到 2 点 (1 148 °C) 时,剩余液相的成分达到共晶成分,发生共晶转变,转变为莱氏体。2 点以下,奥氏体和共晶奥氏体均析出二次渗碳体。随着二次渗碳体的析出,所有奥氏体的成分将沿 ES 线变化,当温度降至



图 5-38 共晶白口铸铁的显微组织 (200×)

3 点 (727 °C) 时,奥氏体和共晶奥氏体中碳的质量分数将降至 0.77%,在恒温下发生共析转变,产物为珠光体。室温时亚共晶白口铸铁的组织为:珠光体+二次渗碳体+低温莱氏体。初晶奥氏体中析出的二次渗碳体,也依附在共晶渗碳体上成长而难于分辨,只能见到大块树枝状珠光体和低温莱氏体,亚共晶白口铸铁的结晶过程如图 5-39 所示,亚共晶白口铸铁的显微组织如图 5-40 所示。

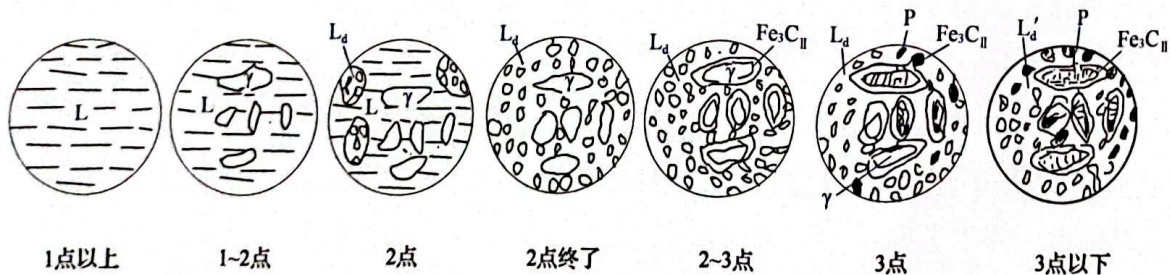


图 5-39 亚共晶白口铸铁的结晶过程示意图

7. 过共晶白口铸铁

以碳质量分数为 5.0% 的⑦号合金为例,分析其结晶及组织转变过程。合金溶液冷却到 1 点时,开始结晶出一次渗碳体,在 1~2 点之间,一次渗碳体继续结晶长大,液相的成分沿 DC 线变化。一次渗碳体呈条片状。在 2 点 (1 148 °C) 时,剩余液相已达到共晶成分,发生共晶转变,转变为莱氏体。2~3 点之间,共晶奥氏体中析出二次渗碳体,到 3 点 (727 °C) 时,奥氏体成为共析成分,转变为珠光体。3 点以下直到室温,组织再无什么变化。因此,

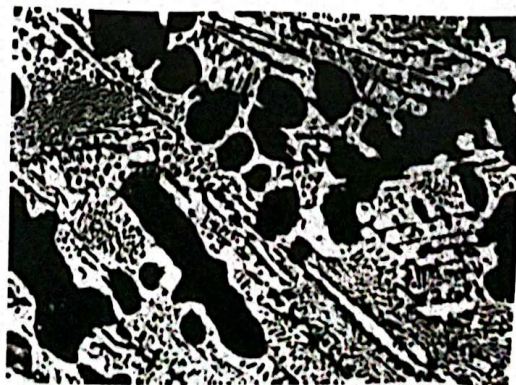


图 5-40 亚共晶白口铸铁的显微组织 (400×)

过共晶白口铸铁的室温组织为一次渗碳体+低温莱氏体。过共晶白口铸铁的结晶过程示意图如图 5-41 所示,过共晶白口铸铁的显微组织如图 5-42 所示。

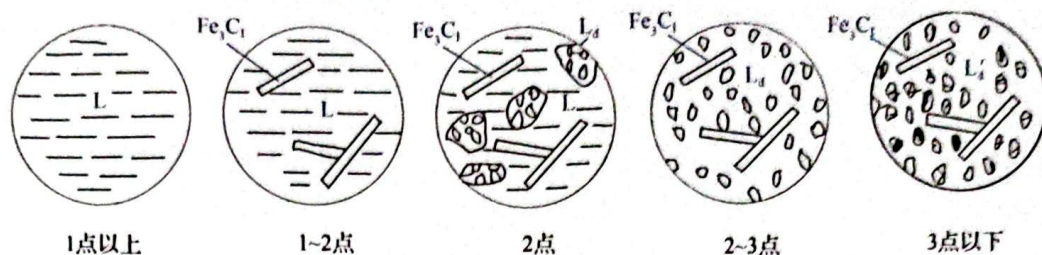


图 5-41 过共晶白口铸铁的结晶过程示意图

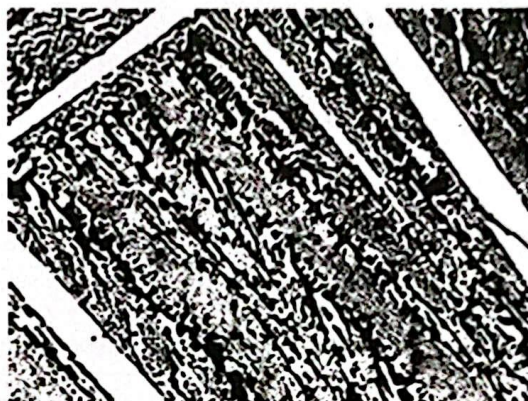


图 5-42 过共晶白口铸铁的显微组织(400×)

将上述各类典型铁碳合金结晶过程中的组织变化填入铁碳合金相图中,则得到按组织分区的铁碳合金相图,如图 5-43 所示。从该图上可以看出,在常温下,亚共析钢的组织是:铁素体和珠光体;过共析钢的组织是:珠光体和二次渗碳体;亚共晶白口铸铁的组织是:珠光体、莱氏体和二次渗碳体;而过共晶白口铸铁的组织是:莱氏体和一次渗碳体。

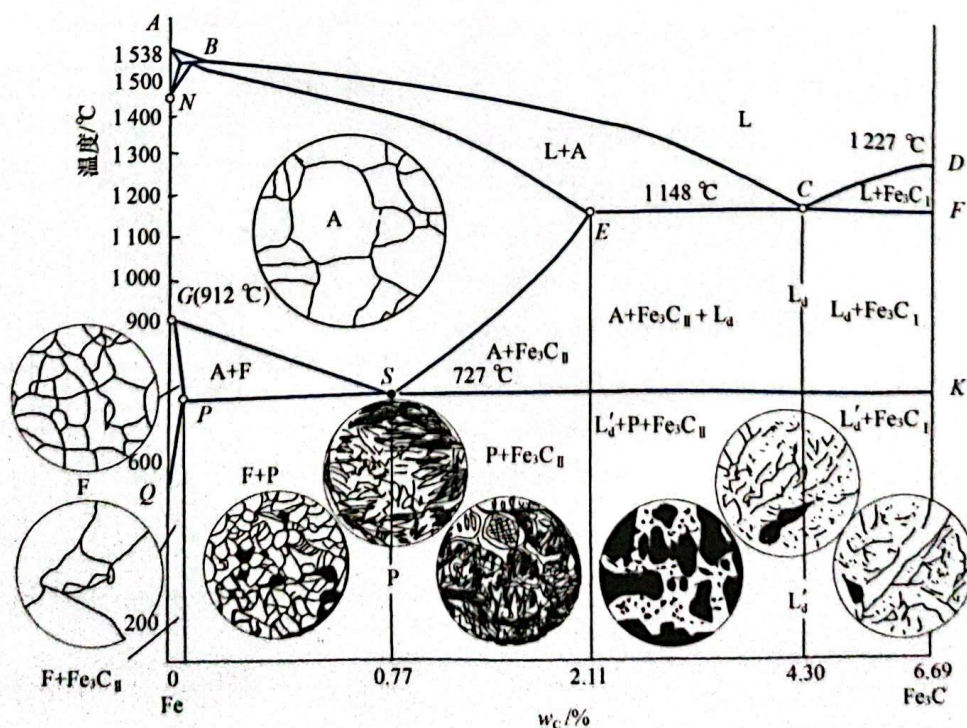


图 5-43 按组织分区的铁碳合金相图