

## 第3章 铁碳合金与铁碳相图

### 3.1 铁碳合金的组织结构

#### 3.1.1 铁碳合金的组元

在固态铁碳合金中,铁和  $\text{Fe}_3\text{C}$  分别是组成铁碳合金的两个基本组元。

##### 1. 纯铁

铁是过渡族元素,1个大气压下的熔点为  $1\ 538\ ^\circ\text{C}$ ,  $20\ ^\circ\text{C}$  时的密度为  $7.87\times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。

多数金属在结晶完成后其晶格类型不再变化,但有些金属(如铁、锰、锡、钛等)在结晶后继续冷却时,其晶格类型还会发生一定的变化。金属在固态下随温度的变化由一种晶格类型转变为另一种晶格类型的变化称为同素异构转变。由同素异构转变所得到的不同晶格类型的晶体叫同素异构体。铁是典型的具有同素异构转变的金属。

图 3.1 所示为纯铁的冷却曲线,它表示纯铁的结晶和同素异构转变过程。液态金属在  $1\ 538\ ^\circ\text{C}$  时结晶成为具有体心立方晶格的  $\delta\text{-Fe}$ ,继续冷却到  $1\ 394\ ^\circ\text{C}$  时发生同素异构转变,体心立方的  $\delta\text{-Fe}$  转变为面心立方晶格的  $\gamma\text{-Fe}$ ,转变完毕后再继续冷却到  $912\ ^\circ\text{C}$  时又发生同素异构转变,面心立方的  $\gamma\text{-Fe}$  转变为体心立方的  $\alpha\text{-Fe}$ ,再继续冷却,晶格类型不再发生变化。这种转变不仅体现在温度降低过程中,在加热过程中,随温度的升高,这些同素异构转变均能发生逆转变。

需要特别指出的是,同素异构转变不仅存在于纯铁中,而且还存在于以铁为基的钢铁材料中,这是钢铁材料性能呈现多种多样,用途广泛,并能通过热处理方法进一步改善其性能的重要原因。

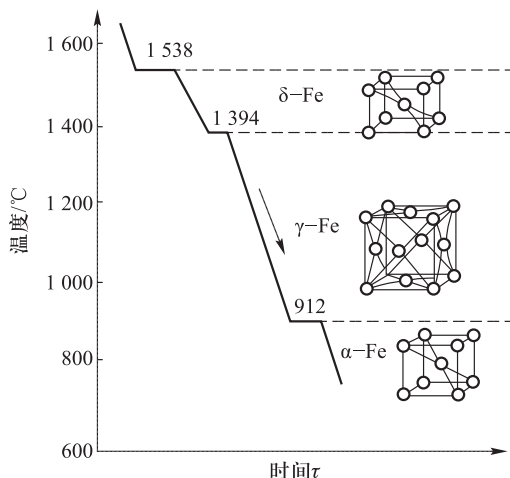


图 3.1 纯铁的冷却曲线

根据杂质含量和晶粒大小不同,工业纯铁的力学性能大致如下:抗拉强度  $R_m = 180 \sim 280$  MPa,屈服强度  $R_{p0.2} = 100 \sim 170$  MPa,断后伸长率  $A = 40\% \sim 50\%$ ,硬度为  $50 \sim 80$  HBW。纯铁强度低、硬度低、塑性好,很少作为结构材料来使用,由于纯铁具有高的磁导率,主要作为电工材料用于各种铁心。

## 2. $Fe_3C$

$Fe_3C$  是铁和碳形成的间隙化合物,晶体结构非常复杂,可参见图 2.21,通常称为渗碳体,可用符号  $C_m$  来表示。渗碳体具有很高的硬度,可达  $950 \sim 1\ 050$  HV,伸长率几乎为零。

### 3.1.2 铁碳合金的相结构

在固态铁碳合金中,铁和碳的相互作用有两种:一是碳原子溶解到铁的晶格中形成固溶体,如铁素体与奥氏体;二是铁和碳原子按一定的比例相互作用形成金属间化合物,如渗碳体。铁素体、奥氏体、渗碳体均是铁碳合金的基本相。

#### 1. 铁素体

碳溶于  $\alpha$  铁中的间隙固溶体称为铁素体,用符号  $F$  或  $\alpha$  表示。它仍保持  $\alpha$  铁的体心立方晶格。由于体心立方晶格原子间的空隙很小,因而溶碳能力极低。在  $727$  °C 时的最大溶碳量为  $w_c = 0.021\ 8\%$ ,在  $600$  °C 时溶碳量为  $w_c = 0.005\ 7\%$ ,室温下  $w_c = 0.000\ 8\%$ ,几乎为零。因此,其室温性能几乎和纯铁相同。铁素体的强度、硬度不高 ( $R_m = 180 \sim 280$  MPa,  $50 \sim 80$  HBW),但具有良好的

塑性和韧性,所以以铁素体为基体的铁碳合金适于塑性成形加工。

## 2. 奥氏体

碳溶于 $\gamma$ 铁中的间隙固溶体称为奥氏体,用符号A或 $\gamma$ 表示。它仍保持 $\gamma$ 铁的面心立方晶格。由于面心立方晶格原子间的空隙比体心立方晶格大,因此碳在 $\gamma$ 铁中的溶碳能力比在 $\alpha$ 铁中要大一些。在 $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的溶碳量为 $w_{\text{C}} = 0.77\%$ ,随着温度的升高溶解度逐渐增大, $1148\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时溶碳量达到最大, $w_{\text{C}} = 2.11\%$ 。奥氏体的力学性能与其溶碳量及晶粒大小有关。一般奥氏体的强度、硬度不高,但具有良好的塑性和韧性( $A = 40\% \sim 50\%$ ),无磁性。因为奥氏体的硬度较低而塑性较高,所以易于锻压成形。

## 3. 渗碳体

渗碳体是具有复杂晶格的间隙化合物,分子式为 $\text{Fe}_3\text{C}$ ,其 $w_{\text{C}} = 6.69\%$ ,熔点约为 $1227\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。渗碳体硬度很高,而塑性与韧性几乎为零,脆性很大。渗碳体不能单独使用,是碳钢<sup>①</sup>和铸铁的主要强化相。渗碳体在钢和铸铁中的存在形式有片状、球状、网状、板状,它的数量、形状、大小和分布状况对钢的性能影响很大。渗碳体是一种亚稳定相,在一定条件下会发生分解,形成石墨。

### 3.1.3 铁碳合金的组织

在铁碳合金中,除了以上的几种基本相之外,还有两种基本的组织,它们是珠光体和莱氏体。

#### 1. 珠光体

珠光体是由铁素体和渗碳体组成的机械混合物,其符号用P表示。珠光体中铁素体和渗碳体呈片层状分布,其力学性能介于铁素体和渗碳体之间。

#### 2. 莱氏体

莱氏体分为高温莱氏体和低温莱氏体,其符号分别用Ld和Ld'表示。高温莱氏体为奥氏体和渗碳体的机械混合物,高温莱氏体的存在温度区间为 $1148 \sim 727\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。低温莱氏体是由珠光体和渗碳体组成的机械混合物。由于莱氏体中渗碳体的量偏多,而渗碳体的脆性大,因此莱氏体的性能表现为硬度较高、塑性低、脆性较大。

---

<sup>①</sup> 本书中“碳钢”一词均指碳素钢。

## 3.2 铁碳合金相图

### 3.2.1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图分析

铁碳合金相图是指在平衡(极其缓慢加热或冷却)条件下,不同成分的铁碳合金在不同温度所处状态或组织的图形。铁和碳可形成一系列稳定化合物(Fe<sub>3</sub>C、Fe<sub>2</sub>C、FeC),由于  $w_C > 6.69\%$  时的铁碳合金脆性极大,没有使用价值,而且 Fe<sub>3</sub>C 又是一个稳定的化合物,可以作为一个独立的组元,因此人们所研究的铁碳合金相图实际上是 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图,如图 3.2 所示。Fe-Fe<sub>3</sub>C 是二元合金相图,它的建立和二元合金相图的建立过程相同。

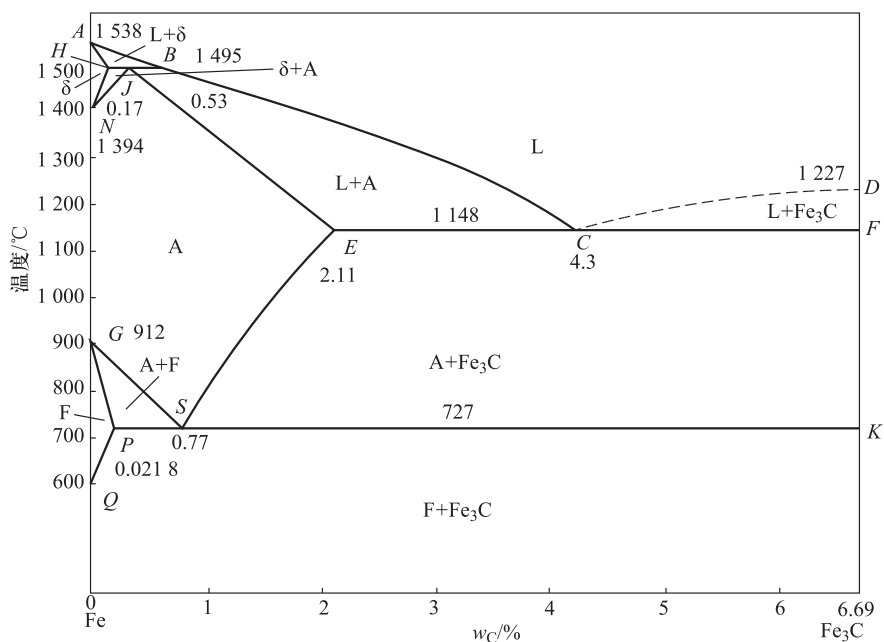


图 3.2 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

铁碳合金相图及相图中各重要点的温度、碳的质量分数见图 3.2 及表 3.1。

相图中 ABCD 线为液相线, AHJECF 线为固相线, 三条水平线分别表示三个恒温转变线。

表 3.1 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中各特性点的温度、碳的质量分数及含义

特性点	$T/^\circ\text{C}$	$w_c/\%$	含义
A	1 538	0	纯铁的熔点
B	1 495	0.53	包晶转变时液态合金的成分
C	1 148	4.3	共晶点, $L_C \xrightleftharpoons{1\,148\text{ }^\circ\text{C}} A_E + \text{Fe}_3\text{C}$
D	1 227	6.69	渗碳体的熔点
E	1 148	2.11	碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的固溶度
F	1 148	6.69	Fe <sub>3</sub> C 的成分
G	912	0	纯铁的同素异构转变点 $\alpha\text{-Fe} \rightleftharpoons \gamma\text{-Fe}$
H	1 495	0.09	碳在 $\delta\text{-Fe}$ 中的固溶度
J	1 495	0.17	包晶点 $L_B + \delta_H \xrightleftharpoons{1\,495\text{ }^\circ\text{C}} A_J$
K	727	6.69	Fe <sub>3</sub> C 的成分
N	1 394	0	$\gamma\text{-Fe} \rightleftharpoons \delta\text{-Fe}$ 同素异构转变点 ( $A_4$ )
P	727	0.021 8	碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的固溶度
S	727	0.77	共析点, $A_S \xrightleftharpoons{727\text{ }^\circ\text{C}} F_P + \text{Fe}_3\text{C}$
Q	600 室温	0.005 7 0.000 8	600 $^\circ\text{C}$ 或室温下碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的固溶度

### 1. 包晶转变

水平线  $HJB$  为包晶转变线, 表达式为  $L_B + \delta_H \xrightleftharpoons{1\,495\text{ }^\circ\text{C}} A_J$ 。

对于含碳量<sup>①</sup>较少的铁碳合金而言, 包晶转变温度较高, 碳原子扩散较快, 包晶偏析不严重。

<sup>①</sup> 本书中“含碳量”一词, 未特别说明时均指碳的质量分数  $w_c$ 。此外, 钢中其他成分的含量也均指该成分的质量分数, 如含硅量即  $w_{\text{Si}}$  等。

## 2. 共晶转变

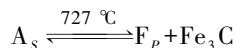
水平线  $ECF$  为共晶转变线,其表达式为  $L_c \xrightleftharpoons{1148\text{ }^\circ\text{C}} A_e + Fe_3C$ 。

共晶转变产物是奥氏体与渗碳体的机械混合物,称为莱氏体,以符号  $L_d$  表示。碳的质量分数在 2.11%~6.69% 的铁碳合金温度下降到 1148 °C 时都会发生共晶转变。

在光学金相显微镜下莱氏体中的奥氏体呈粒状或卵状分布在渗碳体的基底上,由于渗碳体硬而且脆,故莱氏体硬度较高且塑性很差。

## 3. 共析转变

合金表象点到达水平线  $PSK$  时( $A_1$ 线),发生如下恒温转变:



除了反应相是固相而不是液相之外,这个转变与共晶转变的形式完全相同,从一个固相中同时析出两个新的固相的转变过程称为共析转变。 $S$  点为共析转变点。铁碳合金共析转变的产物为铁素体与渗碳体的机械混合物,称为珠光体,用符号  $P$  表示。

共析转变形成的珠光体组织中  $F$  与  $Fe_3C$  两相呈片状交叠分布,这种组织做成金相试样后经腐蚀的断面呈现珠母色泽,故称为珠光体。珠光体碳的质量分数为 0.77%,其中共析铁素体  $F$  与共析渗碳体的质量分数可由杠杆定律计算。

铁素体与渗碳体的密度相差不大,因此珠光体组织中较厚的层片为铁素体,较薄的层片为  $Fe_3C$ 。在较低的放大倍数条件下(400×~500×),被腐蚀的  $Fe_3C$  层片两侧相界不能分辨, $Fe_3C$  看起来就成了一条黑线。在放大倍数更低的情况下(100×~200×),两相层片也难以分辨,珠光体组织区域呈现大块的灰黑色。

在  $Fe-Fe_3C$  相图中,有三条特征线。

### (1) $GS$

$GS$  线由  $G$  点演变而来,此线又称为  $A_3$  线,是冷却时  $A$  相向  $F$  相转变的开始线,也是加热时  $F$  相向  $A$  相转变的终了线。

### (2) $ES$

$ES$  线是碳在  $A$  中的溶解度曲线,铁碳合金冷却时温度低于此线时,碳以  $Fe_3C$  的形式从  $A$  中析出,从  $A$  中析出的次生  $Fe_3C$  又称为二次渗碳体,记为  $Fe_3C_{II}$ ,所以  $ES$  线是  $Fe_3C$  的开始析出线, $ES$  线也称为  $A_{cm}$  线。

### (3) $PQ$

$PQ$  线是碳在  $F$  中的溶解度曲线,当  $F$  相自 727 °C 冷却时,从  $F$  中将析出三

次渗碳体,记为  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ ,由于  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$  数量很少,往往不考虑其对组织和性能的影响。

需要说明的是,在实际工业生产中,图 3.2 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图左上角包晶转变部分很少用到,因此,可以将图 3.2 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图进行简化,简化后的 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图如图 3.3 所示。

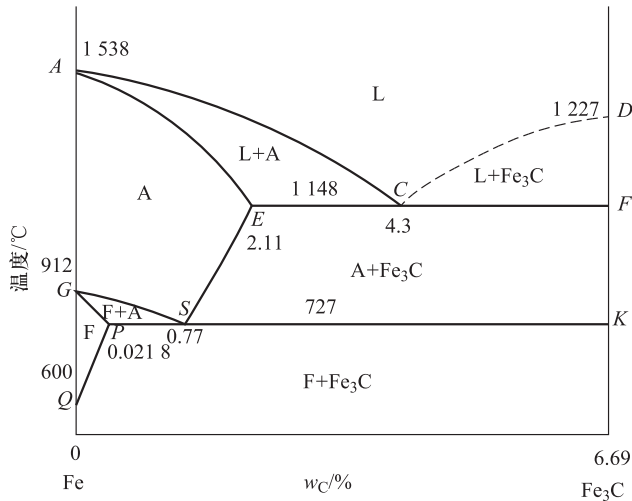


图 3.3 简化后的 Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  相图

### 3.2.2 铁碳合金的分类

根据铁碳合金中碳的质量分数和组织的不同,将铁碳合金分为

- 1) 工业纯铁:  $w_c \leq 0.0218\%$ , 室温组织: 铁素体和三次渗碳体。
- 2) 碳素钢:  $0.0218\% < w_c \leq 2.11\%$ 。根据室温组织不同,又可以分为:
  - (1) 亚共析钢:  $0.0218\% < w_c < 0.77\%$ , 室温组织: 铁素体和珠光体;
  - (2) 共析钢:  $w_c = 0.77\%$ , 室温组织: 珠光体;
  - (3) 过共析钢:  $0.77\% < w_c \leq 2.11\%$ , 室温组织: 珠光体和二次渗碳体。
- 3) 白口铸铁(白口铁):  $2.11\% < w_c \leq 6.69\%$ , 根据室温组织不同,又可以分为:
  - (1) 亚共晶白口铸铁:  $2.11\% < w_c < 4.3\%$ , 室温组织: 珠光体、低温莱氏体和二次渗碳体;
  - (2) 共晶白口铸铁:  $w_c = 4.3\%$ , 室温组织: 低温莱氏体;

(3) 过共晶白口铸铁:  $4.3\% < w_c \leq 6.69\%$ , 室温组织: 渗碳体和低温莱氏体。

### 3.2.3 典型合金平衡结晶过程及组织

下面对图 3.4 中所示的 6 种典型铁碳合金的平衡结晶过程进行简单分析。对于这 6 种典型铁碳合金的平衡结晶过程的理解有助于对任意成分的铁碳合金平衡结晶过程的理解。

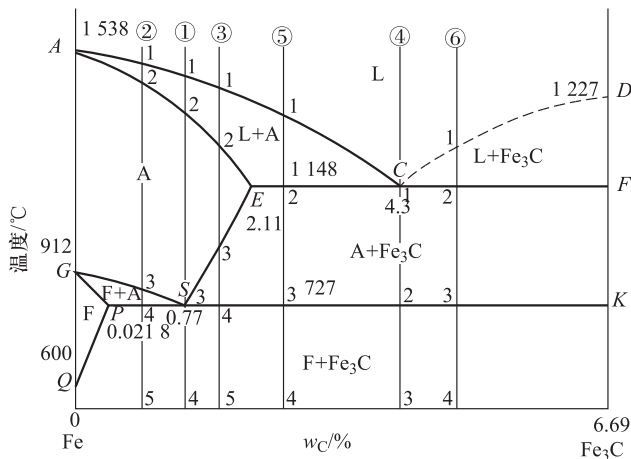


图 3.4 典型铁碳合金在 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图中的位置

#### 1. 共析钢的结晶过程

如图 3.4 中①所示,  $w_c = 0.77\%$  的铁碳合金在 1 点以上为液体(L), 当缓冷至稍低于 1 点温度时, 开始从液体中结晶出奥氏体(A), A 的数量随温度的下降而增多。温度降到 2 点时, 液体全部结晶为奥氏体。2~S(3 点)点之间, 合金是单一奥氏体相。继续缓冷至 S 点时, 奥氏体发生共析转变, 转变成 F 与 Fe<sub>3</sub>C 的混合物, 称为珠光体(P), 转变公式为  $A_s \xrightleftharpoons{727\text{ }^\circ\text{C}} F + \text{Fe}_3\text{C}$ , 727 °C 以下, P 基本上不发生变化。故室温下共析钢的组织为珠光体, 其结晶过程如图 3.5 所示。

#### 2. 亚共析钢的结晶过程

图 3.4 中②碳的质量分数介于 0.021 8%~0.77% 的铁碳合金, 其结晶过程为合金②在 3 点之前的结晶过程与合金①相同。缓冷至 3 点时, 铁素体开始从奥氏体中析出, 由于铁素体的碳的质量分数低, 多余的碳原子转移到奥氏体中, 引起未转变的奥氏体的碳的质量分数增加。随温度的下降, A 中的碳的质量

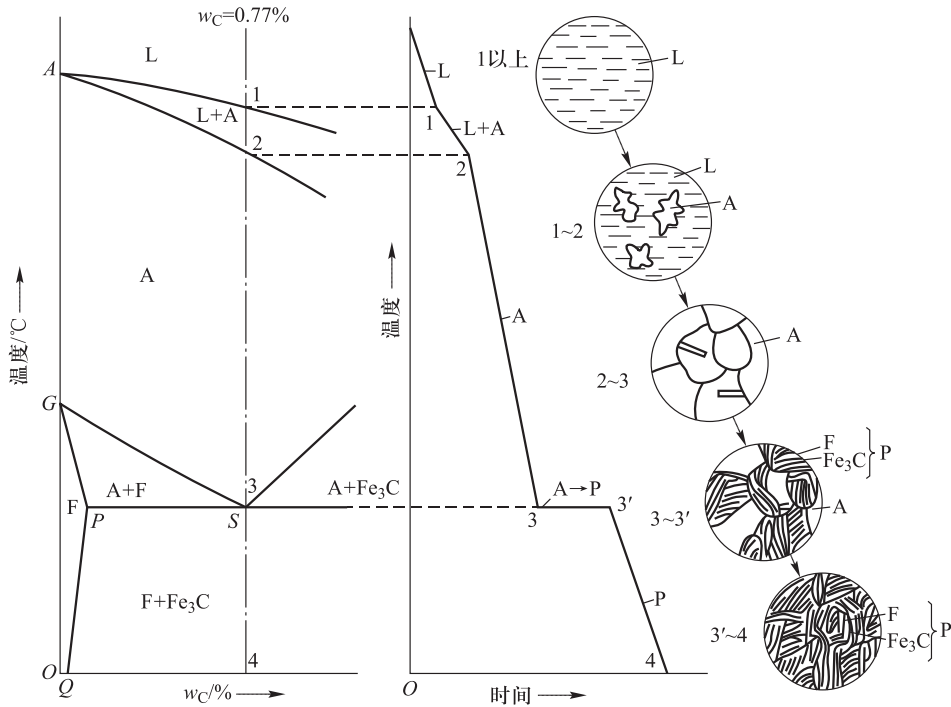


图 3.5 共析钢的冷却曲线及结晶过程示意图

分数沿着  $GS$  线变化。当温度降至 4 点 ( $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 时, 剩余奥氏体的碳的质量分数增加到了  $w_{\text{C}} = 0.77\%$ , 具备了共析转变的条件, 转变为珠光体。转变公式为  $A_s \xrightleftharpoons{727\text{ }^{\circ}\text{C}} \text{F} + \text{Fe}_3\text{C}$ 。原铁素体不变保留在基体中。4 点以下不再发生明显的组织变化, 故亚共析钢的室温组织为铁素体+珠光体。

### 3. 过共析钢的结晶过程

图 3.4 中③碳的质量分数介于  $0.77\% \sim 2.11\%$  的铁碳合金, 其结晶过程如图 3.6 所示。在 1 点以上为液体, 当缓冷至稍低于 1 点后, 开始从液体中结晶出奥氏体, 直至 2 点结晶终了。在 2~3 点之间合金为奥氏体组织。缓冷至 3 点时, 奥氏体中开始沿晶界析出渗碳体(即二次渗碳体)。随着温度不断降低, 由奥氏体中析出的二次渗碳体愈来愈多, 而奥氏体的碳的质量分数不断减小, 并沿着  $ES$  线变化。在 3~4 点之间的组织为奥氏体+二次渗碳体。降至 4 点 ( $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 时, 奥氏体的成分达到了共析成分, 于是这部分奥氏体发生共析反应, 转变为珠光体。在 4 点以下, 合金的组织不再发生明显变化。故室温组织为珠光体+二次渗碳体。

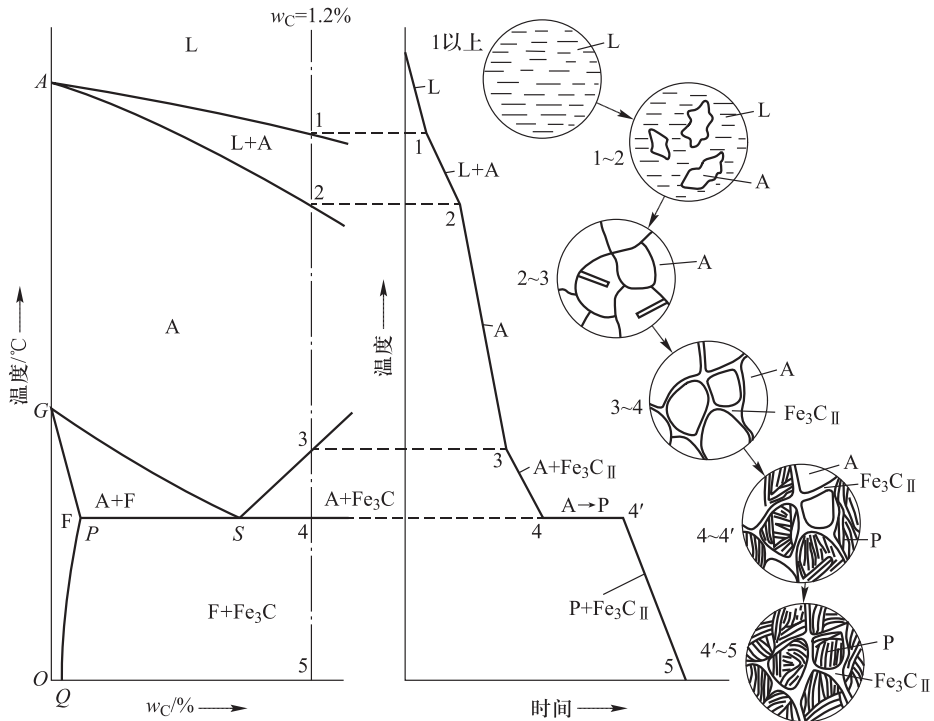


图 3.6 过共析钢的冷却曲线及结晶过程示意图

#### 4. 共晶白口铁的结晶过程

图 3.4 中④共晶白口铁 ( $w_c = 4.3\%$ ) 结晶过程如图 3.7 所示。在 C 点温度以上为液体, 当降至 C 点时, 液态合金将发生共晶转变, 结晶出奥氏体与渗碳体的机械混合物, 即高温莱氏体。

转变是在恒温下进行, 其中奥氏体的成分是 E 点的成分。转变公式为  $L_c \xrightarrow{1148\text{ }^\circ\text{C}} A_E + Fe_3C$ 。共晶转变完毕后, 一直到 2 点温度之间的组织为高温莱氏体, 是由奥氏体, 二次渗碳体和共晶渗碳体组成 ( $A + Fe_3C_{II} + \text{共晶 } Fe_3C$ )。温度下降时, 莱氏体中的奥氏体将不断析出二次渗碳体, 剩余奥氏体的碳的质量分数不断减小, 并沿着 ES 线变化。当温度降至 2 点 ( $727\text{ }^\circ\text{C}$ ) 时, 莱氏体中的奥氏体的碳的质量分数降到了  $w_c = 0.77\%$ , 发生共析转变, 生成珠光体, 即高温莱氏体 (Ld) 转变为低温莱氏体 (Ld'), 其组织由珠光体、二次渗碳体和共晶渗碳体组成 ( $P + Fe_3C_{II} + Fe_3C$  共晶)。

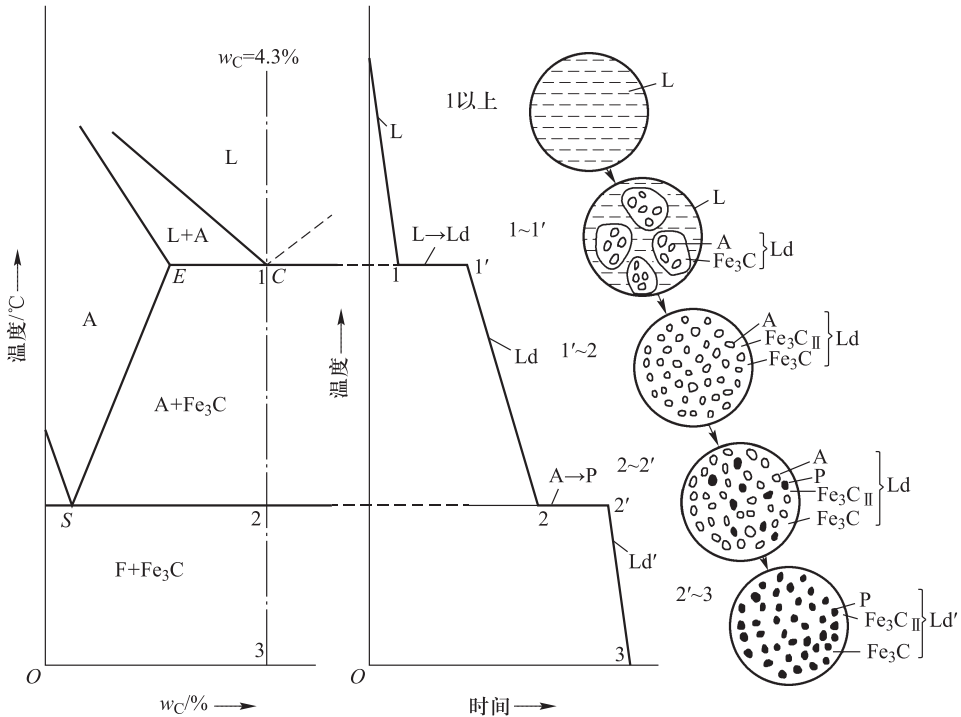


图 3.7 共晶白口铸铁的冷却曲线及结晶过程示意图

### 5. 亚共晶白口铁的结晶过程

图 3.4 中⑤碳的质量分数介于 2.11%~3.4% 的铁碳合金亚共晶白口铁, 结晶过程如图 3.8 所示。

在 1 点温度以上为液体, 缓冷至稍低于 1 点温度, 开始从液体中结晶出奥氏体。1~2 点温度之间合金为液体和奥氏体的混合状态。继续缓冷, 结晶出的奥氏体量不断增多, 而液体量不断减少; 而奥氏体的碳的质量分数不断沿  $AE$  线增加, 与此同时, 液体的碳的质量分数沿  $AC$  线增加。温度缓冷至 2 点 ( $1148\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 时, 奥氏体的碳的质量分数为  $E$  点的成分。液体的碳的质量分数为  $C$  点的成分, 且温度为  $1148\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 因此这部分液体发生共晶转变。转变公式为  $L_C \xrightleftharpoons{1148\text{ }^{\circ}\text{C}} A_E + \text{Fe}_3\text{C}$ 。在 2~3 点温度区间, 随着温度的不断下降, 奥氏体中不断析出二次渗碳体, 使自身的碳的质量分数沿  $ES$  线减小。因此 2~3 点温度区间内的组织为奥氏体、二次渗碳体和高温莱氏体的混合物 ( $A + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} + \text{Ld}$ )。缓冷至 3 点 ( $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 时, 奥氏体的碳的质量分数降低到 0.77%,  $w_C = 0.77\%$  的奥氏体发

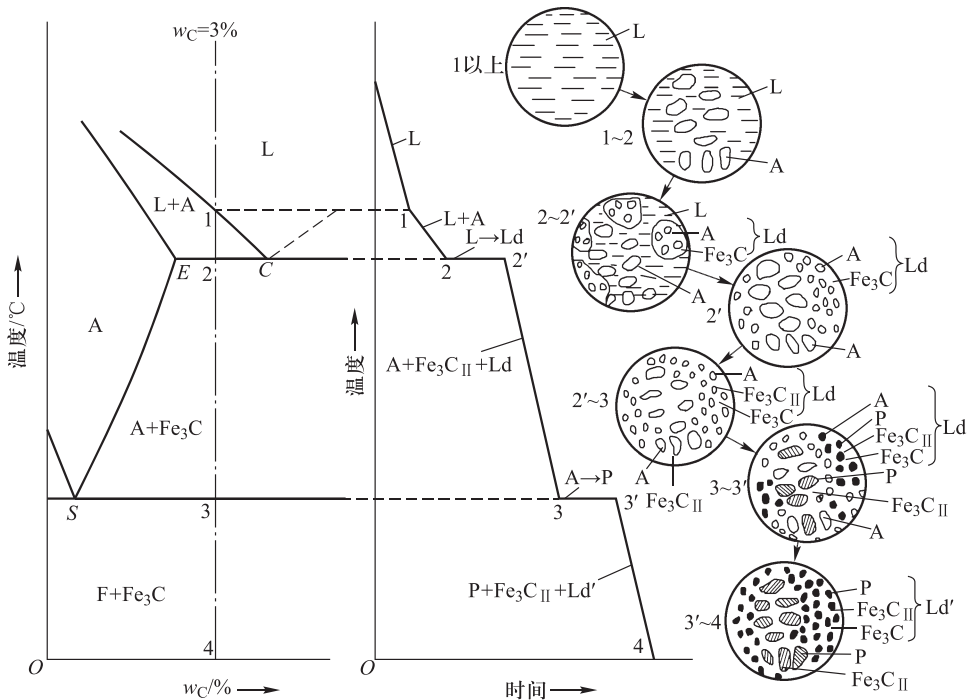


图 3.8 亚共晶白口铸铁的冷却曲线及结晶过程示意图

生共析转变,转变为珠光体。转变在 727 °C 进行。转变完毕后,组织为珠光体、二次渗碳体和低温莱氏体 ( $P+Fe_3C_{II}+Ld'$ ),随后随温度下降,组织没有明显变化。

### 6. 过共晶白口铁的结晶过程

图 3.4 中⑥碳的质量分数介于 3.4%~6.69%的铁碳合金过共晶白口铁,其结晶过程如图 3.9 所示。

在 1 点温度以上为液体。当温度缓冷至稍低于 1 点时,从液体中开始结晶出一次渗碳体 ( $Fe_3C_I$ )。温度不断下降,结晶出的一次渗碳体不断增多,剩余液体量相应减少。同时,液体的碳的质量分数沿着  $CD$  线不断降低,至 2 点时,剩余液体中碳的质量分数  $w_C = 4.3\%$ ,于是发生共晶转变,形成高温莱氏体。此时的组织为一次渗碳体+高温莱氏体。随后继续冷却时的转变情况与共晶白口铁相同,最终组织为一次渗碳体+低温莱氏体。白口铁因有共晶转变,所以组织中出现了莱氏体基体,莱氏体的存在,使得白口铁硬度很高,脆性很大,所以实际生产中很少直接使用,一般用作炼钢原料。

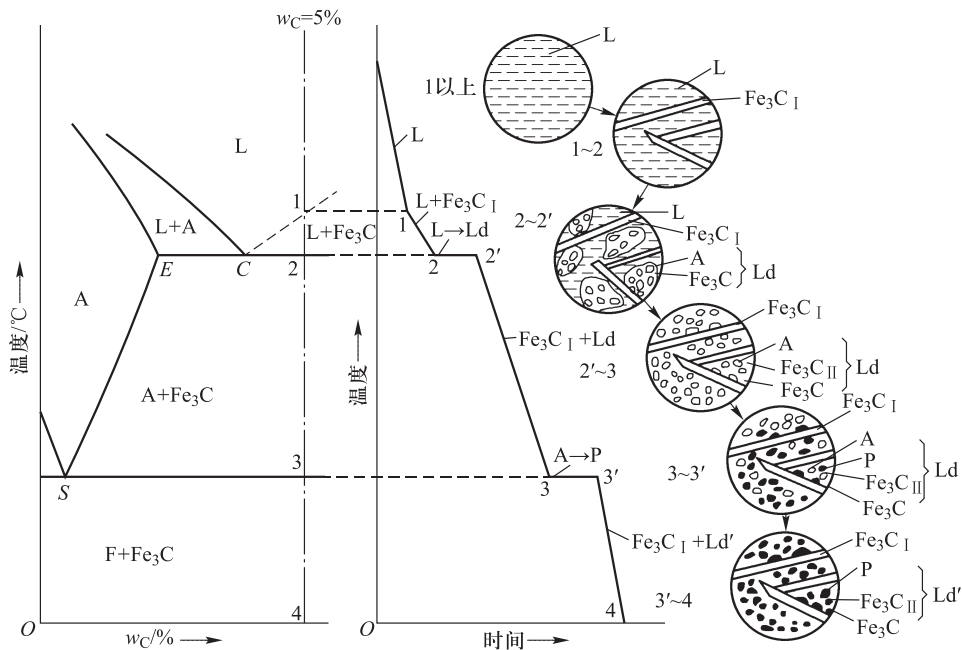


图 3.9 过共晶白口铸铁的冷却曲线及结晶过程示意图

综上所述,可以画出按照组织分区的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图,如图 3.10 所示。

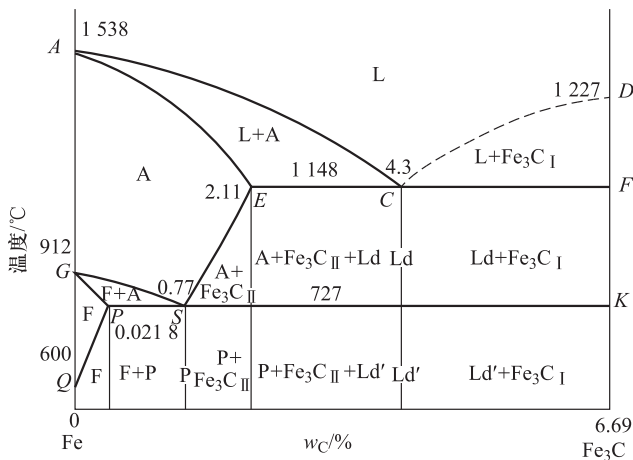


图 3.10 按照组织分区的 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

以上几种铁碳合金的金相照片分别见图 3.11a~f。

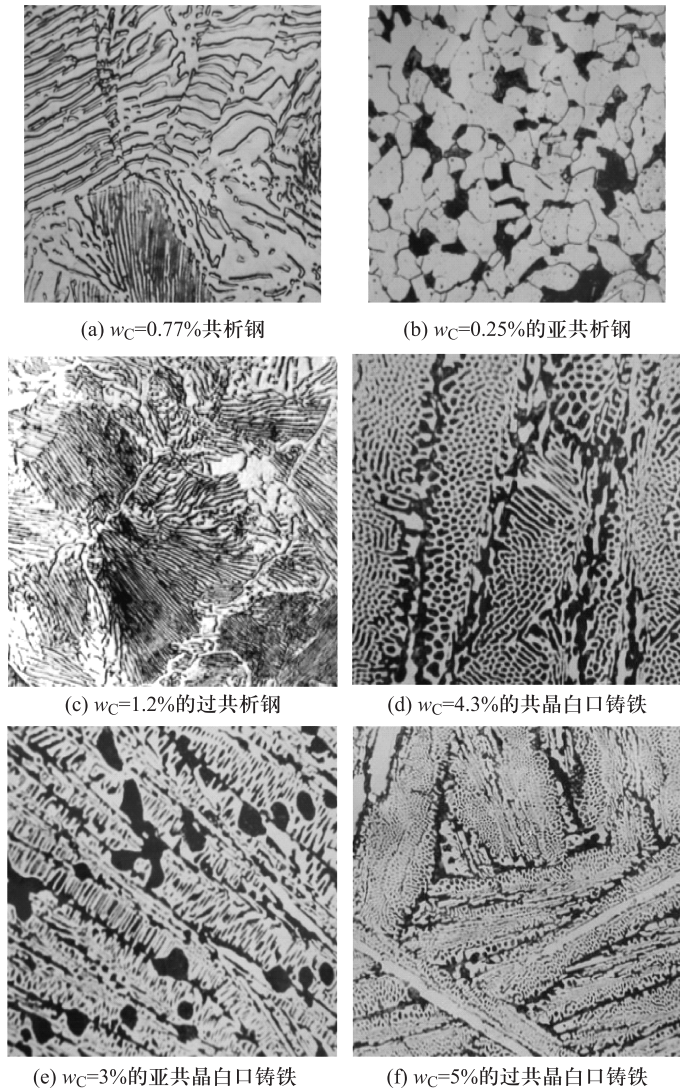


图 3.11 几种典型铁碳合金的金相照片

### 3.2.4 铁碳合金相图的应用

#### 1. 碳的质量分数对铁碳合金平衡组织和性能的影响

随着碳的质量分数的增加,合金的室温组织中不仅渗碳体的数量增加,其形态、分布也有变化,因此,合金的力学性能也相应发生变化。铁碳合金的成分、组

织、相组成、组织组成、力学性能等变化规律如图 3.12 和图 3.13 所示。

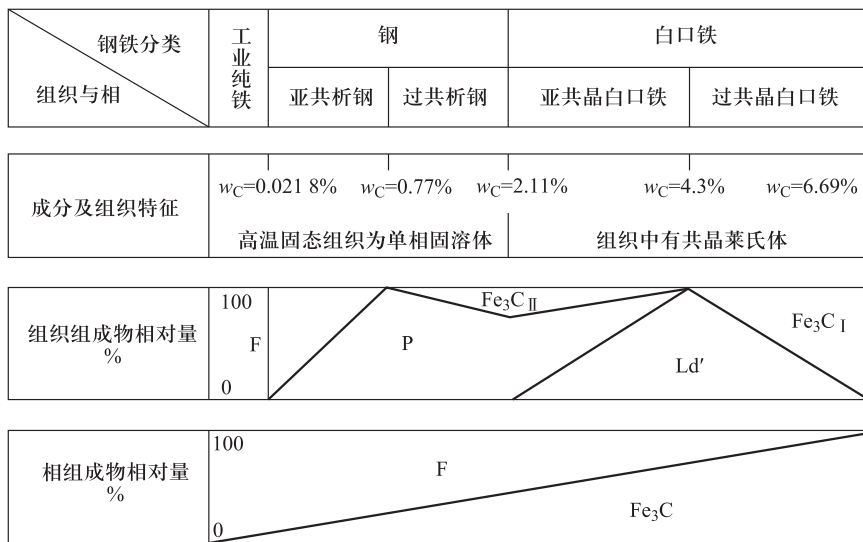


图 3.12 铁碳合金成分与相组成、组织组成之间的关系

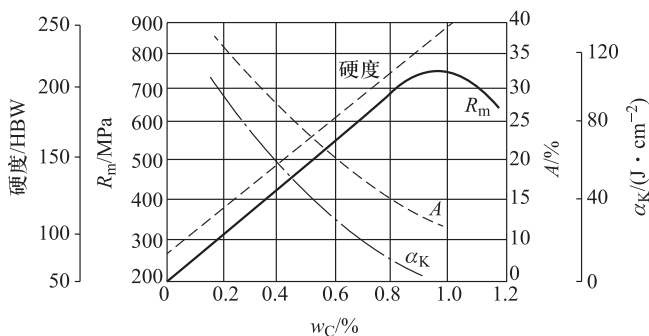


图 3.13 碳的质量分数的变化对力学性能的影响

亚共析钢的组织是由铁素体和珠光体组成的,随碳的质量分数的增加,其组织中珠光体的数量随之增加,因而强度、硬度也升高,塑性、韧性不断下降。过共析钢的组织由珠光体和网状二次渗碳体组成,随着钢中碳的质量分数的增加,其组织中珠光体的数量不断减少,而网状二次渗碳体的数量相对增加,因此强度、硬度上升,而塑性、韧性值不断下降。但是,当钢中  $w_C > 0.9\%$  时,二次渗碳体将沿晶界形成完整的网状形态,此时虽然硬度继续增高,但因网状二次渗碳体割裂基体,使钢的强度呈迅速下降趋势。至于塑性和韧性,则随着碳的质量分数的增加而不断降低。实际生产中为了保证碳素钢具有足够的强度、一定的塑性和韧

性,  $w_c$  一般不应超过 1.3% ~ 1.4%。  $w_c > 2.11\%$  的铁碳合金脆性很大, 强度很低, 塑性和韧性随渗碳体相对量的增加呈迅速下降趋势。

## 2. 铁碳相图在工业中的应用

铁碳相图从客观上反映了钢铁材料的组织随成分和温度变化的规律, 因此在工程上为选材、用材及铸、锻、焊、热处理等热加工工艺提供了重要的理论依据, 如图 3.14 所示。

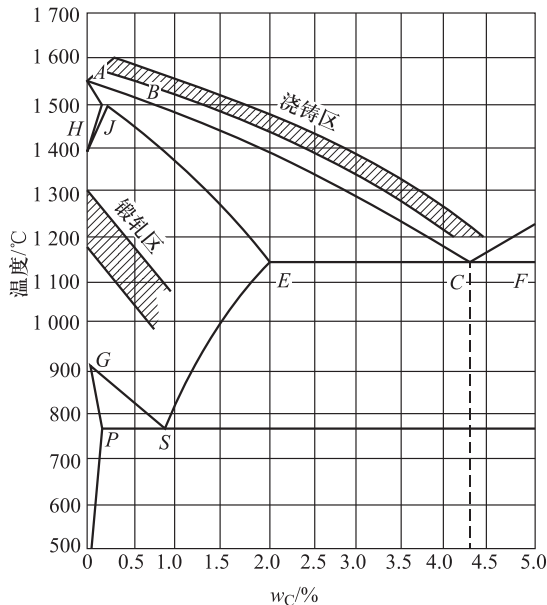


图 3.14 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图与铸造、锻压工艺的关系

(1) 在选材方面的应用。由铁碳相图可知, 铁碳合金中随着碳的质量分数的变化, 其平衡组织各不相同, 从而导致其力学性能不同。因此, 可以根据零件的不同性能要求来合理地选择材料。

(2) 在铸造生产上的应用。参照铁碳相图可以确定钢铁的浇铸温度, 通常浇铸温度在液相线以上 50~60 °C。

(3) 在锻压生产上的应用。钢在室温时的组织为两相混合物, 塑性较差, 变形困难, 只有将其加热到单相奥氏体状态, 才具有较低的强度、较好的塑性和较小的变形抗力, 易于成形。参照相图有助于正确选择压力加工时的温度。

(4) 在焊接生产上的应用。焊接时, 由于局部区域被快速加热, 故从焊缝到母材各处的温度是不相同的。焊缝及焊缝周围的热影响区温度各异, 成分及组织都会发生相应的变化, 从而对冷却后的力学性能造成影响。对铁碳相图的认

识有助于把握焊缝及其热影响区的组织及力学性能变化情况,对焊接生产具有指导意义。

(5) 在热处理生产上的应用。从铁碳相图可知铁碳合金在固态加热或冷却过程中均有相的变化,所以对钢和铸铁可以进行相应的热处理工艺操作,从而达到改性的目的。

## 3.3 碳 素 钢

### 3.3.1 常存杂质元素对碳素钢性能的影响

由于原料和冶炼工艺的限制,实际使用的碳素钢(简称碳钢)中除了碳之外,还含有少量的硅(<0.50%)、锰(<1.00%),并且含有少量的磷、硫以及微量的气体元素氧、氢、氮等。硅、锰是炼钢时作为脱氧剂加入的,其余的元素主要是从原料或大气中带入钢中而冶炼时不能除尽的有害杂质。上述这些元素的存在对钢的组织及力学性能影响很大。

#### 1. 锰和硅的影响

锰和硅以锰铁、硅铁的形式加入钢液中,起到脱氧的作用,可以将钢中的FeO还原成Fe,并形成MnO和SiO<sub>2</sub>。Mn还可以与钢中的S发生作用形成MnS,大大减轻硫的有害作用。这些反应产物大部分进入炉渣,小部分残留在钢液中,凝固后存在于钢中,成为钢中的非金属夹杂物。

其中的锰和硅总会有一部分溶入钢液中,凝固后溶入铁素体,起到固溶强化的作用。在含量不高的前提下(<1%),可以提高钢的强度而不降低钢的塑性和韧性。因此一般认为,锰和硅在钢中是有益元素。

#### 2. 硫的影响

固态下,S不溶于Fe,以FeS的形式存在。FeS与Fe能形成低熔点的共晶体(Fe+FeS),熔点为985℃,且分布在晶界上。当钢材在1000~1200℃进行热加工时,晶界上的共晶体熔化,钢材沿晶界开裂,使钢变脆,这种现象称为热脆性或红脆性。所以钢中含硫量必须严格控制,但S量的增加可以形成易切削钢(易断屑)。

#### 3. 磷的影响

P在钢中能全部溶于铁,提高了钢的强度、硬度,但会使钢的韧脆转变温度提高,导致冷脆性。

#### 4. 氧、氢、氮的影响

O 在钢中会使塑性和韧性下降;而 H 会引起氢脆,造成钢中白点(微裂纹);N 能够使钢的强度、硬度增加,脆性提高,塑性下降。

### 3.3.2 常用碳素钢的分类

#### 1. 按化学成分分类

- 1) 低碳钢: $w_c \leq 0.25\%$ 。
- 2) 中碳钢: $w_c = 0.25\% \sim 0.6\%$ 。
- 3) 高碳钢: $w_c > 0.6\%$ 。

#### 2. 按钢的冶金质量及钢中有害杂质含量的多少分类

- 1) 普通碳素钢: $w_s \leq 0.050\%$ 、 $w_p \leq 0.045\%$ 。
- 2) 优质碳素钢: $w_s \leq 0.030\%$ 、 $w_p \leq 0.035\%$ 。
- 3) 高级优质碳素钢: $w_s \leq 0.020\%$ 、 $w_p \leq 0.030\%$ 。
- 4) 特级优质碳素钢: $w_s \leq 0.015\%$ 、 $w_p \leq 0.025\%$ 。

#### 3. 按用途分类

根据碳素钢的使用性能和用途,可将碳素钢分为碳素结构钢、碳素工具钢和铸造碳钢。

### 3.3.3 碳素钢的牌号、性能及用途

#### 1. 普通碳素结构钢

这种钢中杂质较多,但性能上能满足一般工程结构和普通零件要求,应用较广,一般以热轧空冷态供应。其表示方法由代表屈服强度的“屈”字汉语拼音的首字母 Q、屈服强度的数值、质量等级(A、B、C、D, A→D 质量等级依次提高)及脱氧方法(F、Z、TZ)四个部分按照顺序组成。例如 Q235A·F 表示屈服强度为 235 MPa、质量等级为 A 级的沸腾钢。F、Z、TZ 分别表示沸腾钢、镇静钢、特殊镇静钢。一般情况下 Z、TZ 在牌号表示中可省略。

#### 2. 优质碳素结构钢

此类钢中的有害杂质较少,综合性能好,广泛用于机械制造行业。其牌号用两位数字表示,两位数字即是钢中平均碳的质量分数(以万分之几计)。例如 45 钢,表示  $w_c = 0.45\%$ ,08 钢表示  $w_c = 0.08\%$ 。优质碳素结构钢按照锰量的不同,

可分为普通含锰量钢(含锰量为 0.25%~0.8%)和较高含锰量钢(含锰量为 0.7%~1.2%)两组。较高含锰量钢的牌号数字最后加上“Mn”,如 45Mn。

### 3. 碳素工具钢

这类钢的牌号冠以“T”,“T”为碳字汉语拼音的首位字母。后面的数字表示平均碳的质量分数(以千分之几计)。如 T8 钢为碳素工具钢,其平均碳的质量分数为 0.8%。碳素工具钢分为优质碳素工具钢和高级优质碳素工具钢,若为高级优质钢,则在数字后面加“A”,例如 T8A 钢表示平均碳的质量分数为 0.8%的高级优质碳素工具钢。对含锰量较高(锰的质量分数为 0.4%~0.6%)的碳素工具钢,则在数字后面加上“Mn”,如 T8Mn。这类钢硬度高、韧性差,用于制造一些锉刀、手工锯条等要求高硬度,且对韧性要求不高的零件。

### 4. 铸钢

其牌号以铸钢二字汉语拼音的首位字母“ZG”开头,后面第一组数字为屈服强度数值(单位为 MPa),第二组数字为抗拉强度数值(单位为 MPa)。例如 ZG200-400,表示  $R_{eL} \geq 200$  MPa、 $R_m \geq 400$  MPa 的铸造碳钢。这类钢用于对力学性能要求较高,同时形状较为复杂的零件。

## 复习思考题

3.1 按照 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图分析  $w_C = 0.6\%$ ,  $w_C = 1.2\%$ ,  $w_C = 3.5\%$  的铁碳合金从液态缓慢冷却到室温的转变过程。用冷却曲线和组织示意图说明各阶段的组织,并分别计算室温时的相组成及组织组成物的含量。

3.2 计算铁碳合金中二次渗碳体的最大可能含量。

3.3 写出 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图的三个基本反应的反应式,注明反应温度、各相碳的质量分数及产物名称。

3.4 有一碳素钢试样,金相观察室温平衡组织时,珠光体区域面积占到 93%,其余为网状渗碳体,铁素体与渗碳体的密度基本相同,室温时铁素体的碳的质量分数几乎为零,试估算这种钢的碳的质量分数。

3.5 碳的质量分数增加,碳素钢的力学性能如何变化?分析其原因。

3.6 计算低温莱氏体中共晶渗碳体、二次渗碳体和共析渗碳体的含量。

3.7 试述钢和白口铸铁中碳的质量分数、组织和性能的差异。

3.8 薄壁铸件采用激冷能力大的金属型铸造工艺进行铸造时,为什么容易得到细等轴晶组织?如果厚壁铸件采用金属型铸造工艺,情况会如何?如果采用砂型铸造,情况又如何?

3.9 一碳素钢在平衡冷却条件下所得显微组织中,含有 60%的珠光体,其余为铁素体,试回答:

1) 此钢的碳的质量分数为多少? 2) 若将此钢加热到 730 °C 时,在平衡条件下将获得什么组织? 3) 若加热到 850 °C 时,又将得到什么组织?

3.10 同样形状的一块碳的质量分数为 0.15%的碳素钢和一块白口铸铁,不做成分检验,如何区分它们?