

但当金属化合物呈细小颗粒均匀分布在固溶体基体上时,将使合金强度、硬度和耐磨性明显提高,这一现象称弥散强化。因此,金属化合物主要用来作为碳钢、合金钢、硬质合金及有色金属的重要组成相及强化相。

第二节 金属的结晶

金属由液态转变为固态晶体的过程称为结晶。结晶后的组织直接影响金属的性能,因此研究金属结晶的基本规律,对改善其组织和性能具有重要意义。

一、纯金属的结晶

1. 冷却曲线与过冷度

纯金属的结晶过程可用冷却曲线描述。图 2-13a 所示为用热分析法测绘的冷却曲线,即在金属液缓慢冷却的过程中,观察并记录温度随时间变化的数据,将其绘制在温度-时间坐标中而得到的。

由冷却曲线 1 可知,金属液缓慢冷却时,随着热量向外散失,温度不断下降,当温度降到 T_0 时,开始结晶。由于结晶时放出的结晶潜热补偿了其冷却时向外散失的热量,故结晶过程中温度不变,即冷却曲线上出现了一水平线段,水平线段所对应的温度称为理论结晶温度(T_0)。结晶结束后,固态金属的温度继续下降,直至室温。

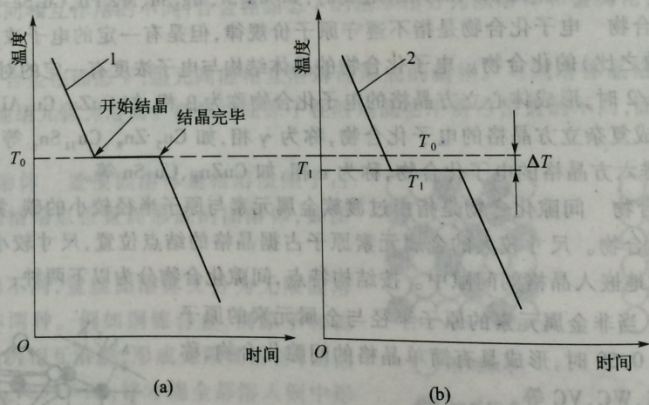


图 2-13 纯金属的冷却曲线

在实际生产中,金属结晶的冷却速度都很快。因此,金属液的实际结晶温度 T_1 总是低于理论结晶温度 T_0 (图 2-13 中的曲线 2),这种现象称为过冷现象。理论结晶温度与实际结晶温度之差 ΔT 称为过冷度,即 $\Delta T = T_0 - T_1$ 。

过冷度的大小与冷却速度、金属的性质和纯度等因素有关。冷却速度越快,过冷度越大。实际上,金属都是在过冷情况下结晶的,过冷是金属结晶的必要条件。

2. 纯金属的结晶过程

纯金属的结晶过程是晶核形成和长大的过程,如图 2-14 所示。液态金属中的原子进行着热运动,无严格的排列规则。但随着温度的下降,原子的热运动逐渐减弱,原子活动范围缩小,相互之间逐渐靠近。当冷却到结晶温度时,某些部位的原子按金属固有的晶格,有规则地排列成小晶体,这些细小的晶体称为晶核,也称自发晶核。晶核周围的原子按固有规律向晶核聚集,使晶核长大。在晶核不断长大的同时,又有新的晶核产生、长大,直至结晶完毕。因此,一般金属是由许多外形不规则,位向不同的小晶体(晶粒)所组成的多晶体。

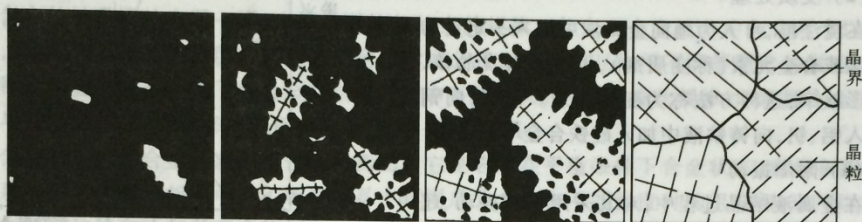


图 2-14 金属结晶过程示意图

金属中含有的杂质质点能促进晶核在其表面上形成,这种依附于杂质而形成的晶核称为非自发晶核。能起非自发形核作用的杂质,其晶体结构和晶格参数应与金属相似,这样它才能成为非自发晶核的基底。自发晶核和非自发晶核同时存在于金属液中,但非自发晶核往往比自发晶核更为重要,起优先和主导作用。

结晶过程中,晶核各部位的长大速度不同,晶核的棱角处散热条件好,故以较快速度生成晶体的主干(也称一次晶轴)。在主干长大过程中,又不断生出分枝(二次、三次晶轴),此形态如同树枝,因此称为枝晶,如图 2-15 所示。

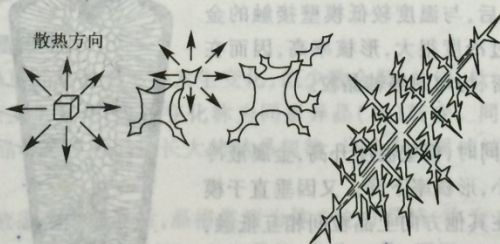


图 2-15 树枝状晶体长大过程示意图

3. 金属晶粒大小与控制

金属结晶后,其晶粒大小用晶粒度表示,即用单位面积或单位体积内的晶粒数目或晶粒平均直径定量表示。晶粒大小对金属材料的力学性能有很大影响。一般,晶粒越细小,金属的强度、塑性和韧性越高。

晶粒大小主要取决于形核速度 N (简称形核率) 和长大速度 G (简称长大率)。形核率是指单位时间内在单位体积中产生的晶核数。长大率是指单位时间内晶核长大的线速度。

凡是能促进形核率,抑制长大率的因素,都能细化晶粒。生产中为细化晶粒,提高金属的力

学性能,常采用以下方法:

(1) 增大过冷度

金属结晶时,随过冷度的增加,形核率(N)和长大率(G)均增加,但增加速度有所不同,如图2-16所示。当过冷度较小时,形核率增加速度小于长大率;过冷度较大时,形核率增加速度大于长大率。实践证明,金属结晶时的过冷往往只能处于该曲线的上升部分。因此,增大过冷度可使晶粒细化。

(2) 变质处理

在浇注前,可人为地向金属液中加入一定量的难熔金属或合金元素(称变质剂),增加非自发晶核,以增加形核率,这种方法称为变质处理。例如,向钢液中加入铝、钒,向铸铁液中加入硅铁合金等。

(3) 附加振动

在金属液结晶过程中,对其采用机械振动、超声波振动、电磁振动等措施,可使枝晶破碎、折断,这样不仅使已形成的晶粒因破碎而细化,而且破碎了的细小枝晶又可起到新晶核的作用,增加了形核率。

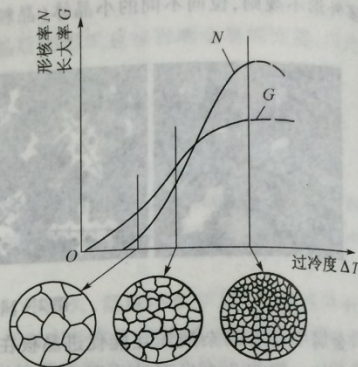


图2-16 形核率和长大率与过冷度的关系

4. 铸锭的组织

金属的结晶过程主要受过冷度和难熔杂质的影响,而过冷度的大小取决于结晶时冷却速度的快慢。因此,凡影响冷却速度的因素,如浇注温度、浇注方式、铸型材料及铸件大小等,均影响金属结晶后晶粒的大小、形态和分布。现以图2-17所示铸锭组织为例说明铸件的一般特点。

(1) 表层细晶粒区

金属液浇入铸锭模后,与温度较低模壁接触的金属液产生强烈的冷却,过冷度很大,形核率高,因而在铸锭表层形成细小、致密、均匀的等轴晶粒。

(2) 柱状晶粒区

在细晶粒区形成的同时,模壁温度升高,金属液冷却速度变慢,过冷度减小,形核率下降。又因垂直于模壁方向散热最快,而且在其他方向上晶粒间相互抵触,长大受限,故形成柱状晶粒。

(3) 中心粗大等轴晶粒区

柱状晶粒长大到一定程度,铸锭中心剩余的金属液内部温差减小,散热已无明显方向性,趋于均匀冷却状态。又由于中心处过冷度小,形核率下降,晶核等速长大,所以形成较粗大的等轴晶粒。

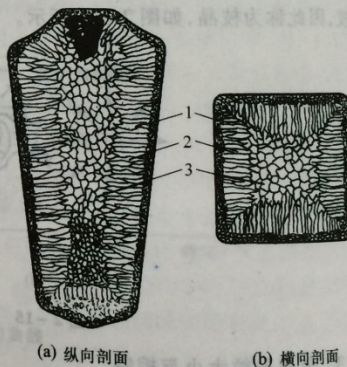


图2-17 铸锭组织示意图

1—表层细晶粒区; 2—柱状晶粒区;
3—中心粗大等轴晶粒区

铸锭表层细晶粒区的组织致密,力学性能好。但该区很薄,故对铸锭性能影响不大。柱状晶粒区的组织比中心等轴晶粒区致密,但晶粒间常存有非金属夹杂物和低熔点杂质而形成脆弱面,在轧制或锻造时,易产生开裂。因此,对塑性差,熔点高的金属,不希望产生柱状晶粒区。但由于

柱状晶粒沿长度方向的力学性能较好,因此对塑性好的有色金属及其合金或承受单向载荷的零件,如汽轮机叶片等,常采用顺序凝固法而获得柱状组织。中心粗大等轴晶粒无脆弱面,但组织疏松,杂质较多,力学性能较低。

在铸锭中,除组织不均匀外,还存在成分偏析、气孔、缩孔、缩松、夹杂、裂纹等缺陷。这些缺陷也会影响铸锭或铸件的质量和性能。

二、合金的结晶

合金的结晶同纯金属一样,也遵循形核与长大的规律。但由于合金成分中包含两个以上的组元,其结晶过程除受温度影响外,还受到化学成分及组元间相互作用不同等因素的影响,故结晶过程比纯金属复杂。为了解合金在结晶过程中各种组织的形成及变化规律,以掌握合金组织、成分与性能之间的关系,必须利用合金相图这一重要工具。

合金相图又称合金状态图或合金平衡图。它是表示在平衡条件下合金状态、成分和温度之间关系的图形。根据相图可以了解合金系中不同成分合金在不同温度时的组成相,还可以了解合金在缓慢加热和冷却过程中的相变规律等。在生产实践中,相图可作为正确制订铸造、锻压、焊接及热处理工艺的重要依据。

第三节 铁碳合金相图

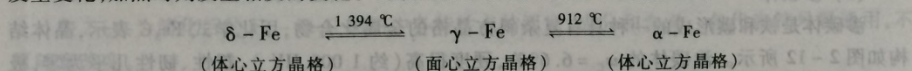
碳钢和铸铁是现代工业中应用最广泛的金属材料,形成碳钢和铸铁的主要元素是铁和碳,故又称铁碳合金。不同成分的铁碳合金具有不同的组织和性能。若要了解铁碳合金成分、组织和性能之间的关系,必须研究铁碳合金相图。

一、铁碳合金的基本相

1. 纯铁的同素异晶转变

大多数金属在结晶后晶格类型不再发生变化,但少数金属,如铁、钛、锆等在结晶后,其晶格类型会随温度的改变而发生变化,这种变化称为同素异晶(构)转变。同素异晶转变时,有结晶潜热产生,同时也遵循晶核形成和晶核长大的结晶规律,与液态金属的结晶相似,故又称为重结晶。

如图 2-18 所示,液态纯铁结晶后,晶格类型为体心立方晶格,称为 δ 铁,可用 δ -Fe 表示;继续冷却到 1394°C ,晶格类型转变为面心立方晶格,称为 γ 铁,可用 γ -Fe 表示;再继续冷却到 912°C ,晶格类型转变为体心立方晶格,称为 α 铁,可用 α -Fe 表示。如继续冷却晶格类型不再发生变化,加热时则发生相反的变化。纯铁的同素异晶转变过程概括如下:



金属的同素异晶转变将导致金属的体积发生变化,并产生较大的应力。由于纯铁具有同素异晶转变的特性,因此生产中才有可能通过不同的热处理工艺改变钢铁的组织和性能。

2. 铁碳合金的基本相

铁碳合金中,因铁和碳在固态下相互作用不同,所以可形成固溶体和金属化合物,其基本相

有铁素体、奥氏体和渗碳体。

(1) 铁素体

α 铁中溶入碳元素构成的固溶体称为铁素体,用符号 F 表示。铁素体仍保持 α 铁的体心立方晶格。

由于体心立方晶格的间隙很小,溶碳能力很低,在 600 $^{\circ}\text{C}$ 时溶碳量仅为 $w_c = 0.006\%$ 。随温度升高,溶碳量逐渐增加,在 727 $^{\circ}\text{C}$ 时,溶碳量为 $w_c = 0.0218\%$ 。因此,铁素体室温时的性能与纯铁相似,强度、硬度低,塑性和韧性好 ($\sigma_b = 180 \sim 270 \text{ MPa}$ 、 $\sigma_s = 100 \sim 170 \text{ MPa}$ 、 $\delta = 30\% \sim 50\%$ 、 $\psi = 70\% \sim 80\%$ 、 $A_k = 128 \sim 160 \text{ J}$ 、50 ~ 80 HBS)。

铁素体的显微组织呈明亮的多边形晶粒,晶界曲折,如图 2-19 所示。

(2) 奥氏体

γ 铁中溶入碳元素形成的固溶体称为奥氏体,用符号 A 表示。奥氏体仍保持 γ 铁的面心立方晶格。

由于面心立方晶格的间隙较大,因此溶碳能力也较大,在 727 $^{\circ}\text{C}$ 时溶碳量为 $w_c = 0.77\%$,随温度升高溶碳量逐渐增大,到 1148 $^{\circ}\text{C}$ 时,溶碳量可达 $w_c = 2.11\%$ 。奥氏体的塑性、韧性好,强度、硬度较低 ($\sigma_b = 400 \text{ MPa}$ 、 $\delta = 40\% \sim 50\%$ 、170 ~ 220 HBS)。因此,生产中常将工件加热到奥氏体状态进行锻造。

奥氏体的显微组织与铁素体的显微组织相似,呈多边形晶粒,晶界较铁素体平直,如图 2-20 所示。

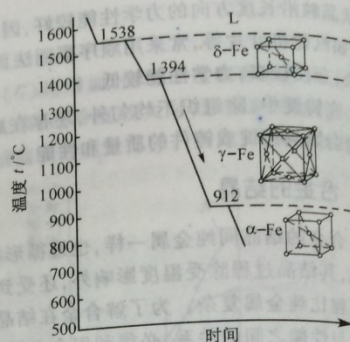


图 2-18 纯铁的冷却曲线

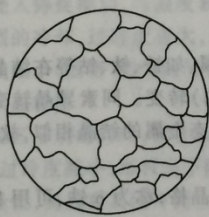


图 2-19 铁素体的显微组织示意图

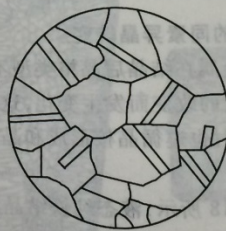


图 2-20 奥氏体的显微组织示意图

(3) 渗碳体

渗碳体是铁和碳形成的一种具有复杂斜方晶格的金属化合物,用化学式 Fe_3C 表示,晶体结构如图 2-12 所示。渗碳体的 $w_c = 6.69\%$,硬度很高(约 1000 HV),塑性、韧性几乎为零,极脆。熔点为 1227 $^{\circ}\text{C}$ 。渗碳体是钢和铸铁中常见的固相。

渗碳体在铁碳合金中常以片状、球状、网状等形式与其他相共存,它是钢中的主要强化相,其形态、大小、数量和分布对钢的性能有很大影响。

除上述基本相外,铁碳合金中还有由基本相组成的复相组织珠光体(P)和莱氏体(Ld)。

二、铁

铁

下所处的

铁

大,没有

究的铁

部分已

1.

Fe

$w_c = 6.$

0.77%

二、铁碳合金相图

铁碳合金相图是指在平衡条件下(极其缓慢加热或冷却),不同成分的铁碳合金在不同温度下所处的状态或组织的图形。

铁和碳可形成一系列稳定化合物(Fe_3C 、 Fe_2C 、 FeC),由于 $w_{\text{C}} > 6.69\%$ 时的铁碳合金脆性极大,没有实用价值,而且 Fe_3C 又是一个稳定的化合物,可以作为一个独立的组元,因此这里所研究的铁碳合金相图实际上是 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图,如图 2-21 所示。为便于分析和研究,图中左上角部分已简化。

1. $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图分析

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图的纵坐标表示温度,横坐标表示成分。左端原点 $w_{\text{C}} = 0\%$,即纯铁;右端点 $w_{\text{C}} = 6.69\%$,即 Fe_3C 。横坐标上任一点均代表一种成分的铁碳合金,例如图中 S 点,表示 $w_{\text{C}} = 0.77\%$ ($w_{\text{Fe}} = 99.23\%$) 的铁碳合金。

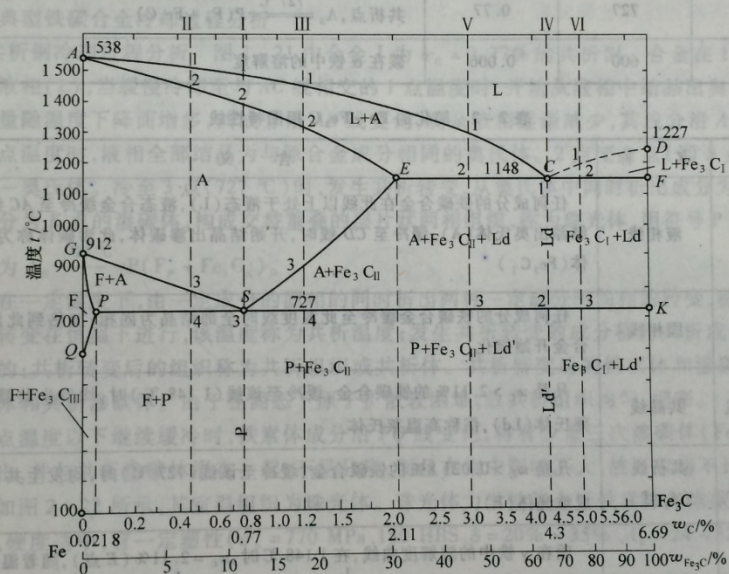


图 2-21 简化的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图(以组织组成物标注)

(1) $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中的特点

表 2-1 为简化后的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中各特点的温度、成分和含义。各代表符号属通用,不可随意改变。

(2) $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中的特性线

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图的特性线是不同成分合金具有相同意义相变点的连接线。简化的 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中各特性线的符号、名称及含义见表 2-2。

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 相图中一次、二次、三次渗碳体的含碳量、晶体结构和性能均相同,没有本质区别,

只是来源、分布、形态不同,因而对铁碳合金性能的影响有所不同。

表 2-1 简化的 Fe-Fe₃C 相图的特性点

特性点	t/℃	w _c /%	含 义
A	1 538	0	纯铁的熔点
C	1 148	4.3	共晶点, $L_c \xrightarrow{1\,148\,^{\circ}\text{C}} Ld(A_e + Fe_3C)$
D	1 227	6.69	渗碳体的熔点
E	1 148	2.11	碳在 γ 铁中的最大溶解度
G	912	0	纯铁的同素异晶转变点, $\alpha - Fe \xrightarrow{912\,^{\circ}\text{C}} \gamma - Fe$
P	727	0.021 8	碳在 α 铁中的最大溶解度
S	727	0.77	共析点, $A_s \xrightarrow{727\,^{\circ}\text{C}} P(F_p + Fe_3C)$
Q	600	0.006	碳在 α 铁中的溶解度

表 2-2 简化的 Fe-Fe₃C 相图特性线

特性线	名 称	含 义
ACD 线	液相线	任何成分的铁碳合金在此线以上处于液态(L),液态合金缓冷至 AC 线时,开始结晶出奥氏体(A);缓冷至 CD 线时,开始结晶出渗碳体,此渗碳体称为一次渗碳体(Fe ₃ C _I)
AECF 线	固相线	任何成分的铁碳合金缓冷至此温度线时全部结晶为固相;加热到此温度线时,合金开始熔化
ECF 水平线	共晶线	凡是 w _c > 2.11% 的铁碳合金,缓冷至该线(1 148 ℃)时,均发生共晶转变生成莱氏体(Ld),俗称高温莱氏体
PSK 水平线	共析线 (A ₁ 线)	凡是 w _c > 0.021 8% 的铁碳合金,缓冷至该线(727 ℃)时,均发生共析转变,生成珠光体(P)
ES 线	A _{cm} 线	碳在 γ 铁中的溶解度曲线,在 1 148 ℃ 时, w _c = 2.11% (E 点),随着温度降低,溶碳量减少,727 ℃ 时, w _c = 0.77% (S 点)。它也是 w _c > 0.77% 的铁碳合金由高温缓冷时,从奥氏体中析出渗碳体的开始温度线,此渗碳体称为二次渗碳体(Fe ₃ C _{II})。另外,它还是缓慢加热时,二次渗碳体溶入奥氏体的终了温度线
PQ 线		碳在 α 铁中的溶解度曲线。在 727 ℃ 时, w _c = 0.021 8% (P 点),随着温度降低,溶碳量减少,至 600 ℃ 时, w _c = 0.006% (Q 点)。因此,由 727 ℃ 缓冷时,铁素体中多余的碳将以渗碳体形式析出,此渗碳体称为三次渗碳体(Fe ₃ C _{III})
GS 线	A ₃ 线	w _c < 0.77% 的铁碳合金,缓冷时,由奥氏体中析出铁素体的开始线;也是缓慢加热时,铁素体转变为奥氏体的终了线

2. 身

(1)

按 E

1)

2)

①

②

③

3)

①

②

③

(2

1)

上全部

奥氏体

冷却至

围内为

素体和

析转变

变。

分是

共析

素体

冷却

强度

素体

冷却

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度

强度