

前 言

在我国大量的高参数、大容量火电机组的投产，必然会对机组用钢提出愈来愈多的问题和要求，对机组的制造、运行、检修质量要求也愈来愈高。为确保机组安全经济稳定运行，必须学习掌握电厂金属技术知识，从而把金属技术监督工作做好。本着这一出发点，作者编写了《电厂金属实用技术问答》一书。本书采用问答形式，把有关人员需要掌握和了解的电厂金属技术知识贯穿起来，通俗易懂、突出实践性。书中引用的单位是国际单位制。

本书第四章由陈培生编写；第七、八两章和第三章的一部分由王荣华编写；其余章节由蒋玉琴编写。全书由蒋玉琴主编，全书由华北电力科学研究院蔡文河、李炳涛、胡先龙审阅。

在编写过程中，得到了有关单位的热情关注和支持。书中新颖实用的红外线热处理加热设备有关资料是由江苏吴江市电热器厂提供，所编写的红外线技术应用于热处理领域部分内容由该厂研究所副所长查火根审阅。书中有少数金相图谱借用上海科学技术出版社李炯辉等编辑的金相图谱。还有很多同志为本书提供了研究成果和实践经验以及资料等。在本书出版之际，特对本书作过支持和帮助的单位 and 同志表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，尽管主观上想对每一个问题给予尽可能满意的回答，但由于受实践领域局限，编写中错误、疏漏、不足在所难免，恳请读者指正。

作 者

1999年10月

第一章 金属材料的基础知识

第一节 金属的晶体结构

1-1 什么是晶体、晶格、晶胞和晶格常数？

所有固体物质按其内部原子（或分子）的分布情况可分晶体和非晶体两大类。

1. 晶体

是指其内部原子（或分子）在空间按一定几何形式规则排列的物质；非晶体是内部原子（或分子）在空间无规则地杂乱分布的物质。固态金属一般都是晶体，如图 1-1 所示，为晶体内部原子排列的示意图。

2. 晶格

实际上晶体内部所有原子都是紧密地堆积在一起的。为了看清晶体原子不同的空间排列方式，一般用假想的立体几何图形，将原子的中心点连接起来，并将每个原子看作一个几何质点，存在于各接点上，这样构成了假想的空间格架，这种表示原子在晶体中排列规律的空间格架，称为结晶格子，简称晶格。如图 1-2 (a) 所示。

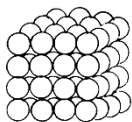


图 1-1 晶体内部原子排列的示意图

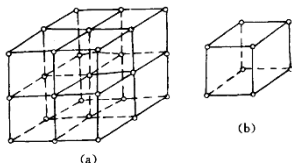


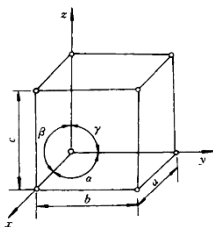
图 1-2 晶格和晶胞示意图
(a) 晶格；(b) 晶胞

3. 晶胞

在晶格中取出一个能代表原子在空间的排列规则的最小基本单位，简称晶胞。如图 1-2 (b)。由此可见，一个体积相当大的晶格，是由许多形状、大小相同的小几何单元重复堆积而成的。

4. 晶格常数

晶格的各棱边长度 a, b, c 称为晶格常数。其大小常用 \AA (埃) 为单位 ($1 \text{\AA} = 1 \times 10^{-8} \text{cm}$)。晶胞的各棱间夹角 α, β, γ 称为轴间夹角。如图 1-3 所示。



由于各种晶体物质具有不同的晶格常数和棱面夹角，也

图 1-3 晶格常数表示法

就是具有不同的晶格形式，于是不同的晶体具有不同的性能。

1-2 什么是晶粒和晶界？

1. 晶粒

金属组织是由无数个小晶体组成的，这个小晶体就是一个晶粒。如图 1-4 所示。图中的每一个小区即为晶粒。尽管晶粒外形不规则，但它的内部原子排列还是有规则的。而且各晶粒中晶格的方位是一定的，但不同的晶粒其晶格方位是不相同的。

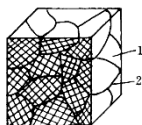


图 1-4 多晶体
结构示意图
1—晶粒；2—晶界

2. 晶界

晶粒与晶粒之间的分界面称为晶界。也就是说晶界是晶粒与晶粒相互接触的地方，也是金属最后凝固的部位，原子在这里排列象非晶体一样，是毫无规则的。原子在这些地方重叠啮合，在有些地方相互间隔形成微隙，有些地方聚集有杂质，晶界结构的这一特征对金属性能（强度、硬度、韧性、导电性、磁性等），有很大的影响。

1-3 金属中常见晶格有哪几种？研究晶格类型的目的是什么？

金属的晶格类型很多，但在 80 多种金属元素中，除少数金属具有复杂的晶体结构外，最常见的主要有三种：体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格。

1. 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞是一个立方体，如图 1-5 所示。其晶格常数 $a=b=c$ ，棱边间夹角 $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ，通常只用一个晶格常数 a 表示即可。

在体心立方晶格的八个顶角和立方体中心各有一个原子。

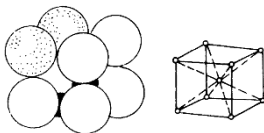


图 1-5 体心立方晶格

具有体心立方晶格的常见金属有 α -Fe（铁）、Cr（铬）、Mo（钼）、W（钨）、V（钒）、Nb（铌）等。

2. 面心立方晶格

它的晶胞也是一个立方体，如图 1-6 所示。晶格常数也只用一个常数 a 表示。

在面心立方晶胞的八个顶角和六个面的中心各有一个原子。

具有面心立方晶格的常见金属有 γ -Fe（铁）、Al（铝）、Cu（铜）、Ni（镍）、Au（金）、Ag（银）、Pb（铅）等。

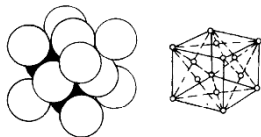


图 1-6 面心立方晶胞

3. 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞是一个六方柱体，如图 1-7 所示。

六方柱体是由六个呈长方形的侧面和二个呈六边形的底面构成的，因此需要用两个晶格常数来表示，即六方体底面的边长 a 和六方柱体的高度 c 来表示。

在密排六方晶胞中，除了位于六方柱体的十二个

顶角和上下两底面中心各有一个原子外，六方体的中间还有三个原子。

具有密排六方晶格的常见金属有 Mg (镁)、Zn (锌)、Cd (镉)、Be (铍) 等。

金属的性能和它的晶格类型有很大关系。如体心立方晶格原子排列的紧密程度比面心立方晶格小。金属抗磨粒磨损的耐磨性与晶格类型有关，体心立方晶格的金属耐磨性较好，密排六方晶格次之，面心立方晶格最差。但体心立方晶格很脆，六方晶格则韧性较好。由于晶格在各个方向上原子排列的紧密程度不一样，所以也就表现出各向异性。

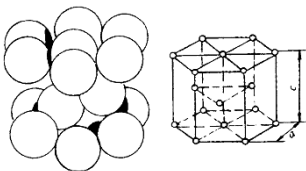


图 1-7 密排六方晶格

第二节 金属的结晶

1-4 什么是金属的结晶？

金属的结晶是指金属由液态转变为固态的过程，也就是金属原子由不规则排列的液体逐步过渡到原子有规则排列成晶体的过程。

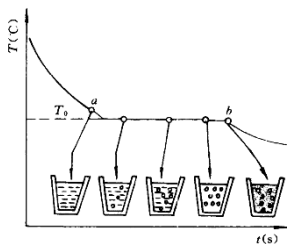


图 1-8 纯金属冷却曲线的绘制过程示意图

金属由液体转变为固体是在一定温度下进行的。其结晶过程可用热分析法进行研究，如图 1-8 所示。它是将纯金属熔化成液体，然后缓慢冷却。在冷却过程中，每隔一定时间测定一次温度，最后将实验数据绘制在温度——时间坐标中，便得图 1-8 所示的纯金属冷却曲线。

由冷却曲线可见，液态金属随时间的推移，温度将不断下降，当液态金属冷却到 a 点时开始结晶。由于金属结晶过程是释放出结晶潜热，补偿了冷却时散失在空气中的热量，因而液体金属的温度并不随时间的延长而下降，直到 b 点结晶终止时才继续下降。 ab 两点之间称结晶阶段。在冷却曲线上表现为一水平线段，它所对应的温度就是这种金属的结晶温度（也称临界点），即冷却时的凝固点和加热时的熔点。理论上二者应在同一温度，即金属的理论结晶温度 (T_0)。

纯金属的结晶过程是由晶核的产生和晶核不断地长大这两个基本过程所组成，并且两个过程又是先后或同时进行的。图 1-9 是描述纯金属结晶时形核及核长大过程的示意图。当液体金属冷却到结晶温度时，先在液体中某些局部的微小体积内，原子有规则地排列成细微的晶核 [图 1-9 (a)]，然后这些晶核依靠吸附周围液体中的原子逐渐成长 [图 1-9 (b)]。在此同时，还会有新的晶核不断从液体中产生和成长 [图 1-9 (c)]。直到全部液体转变为固体为止。最后形成由外形不规则的许多晶粒所组成的晶体 [图 1-9 (f)]。

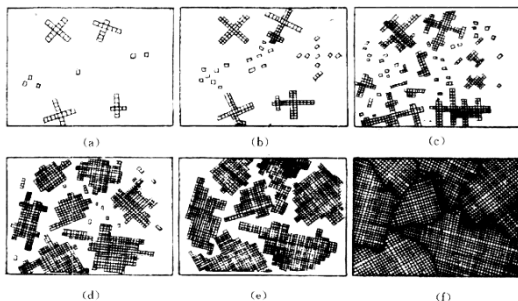


图 1-9 纯金属结晶过程示意图

1-5 什么是金属的同素异晶转变？

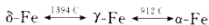
金属在固态下随着温度的改变，由一种晶格转变为另一种晶格的现象，称为同素异晶转变。

大多数金属结晶后的晶格类型不再发生变化，但有些金属如铁、钛、锰、钴、锡等结晶成固体后，随着温度的下降，其晶格类型还会发生变化。

图 1-10 是纯铁的冷却曲线和不同温度范围内的晶格类型变化。

由此可见，液态纯铁冷却到 1538℃ 时，结晶为体心立方晶格，叫作 δ -Fe；继续冷却至 1394℃ 时， δ -Fe 转变为面心立方晶格，叫做 γ -Fe；再继续冷却到 912℃ 时， γ -Fe 又转变成体心立方晶格，叫做 α -Fe；此后直到室温，晶格不再发生转变。纯铁的同素异晶转变可用

下列表示



式中表示，在加热过程中，转变可向相反方向进行。

同素异晶转变是晶体结构中的原子重新作规则排列的过程，这一过程与液体金属的结晶相似，也遵循生核和核长大的规律。

经研究证实， α -Fe 与 δ -Fe 均为体心立方晶格，两者性能相仿，只是后者的晶格常数比前者稍大些。

发生同素异晶转变前后，由于晶格类型不同，材料的性能有较大的差异。如碳原子在面心立方晶格 γ -Fe 中排列紧

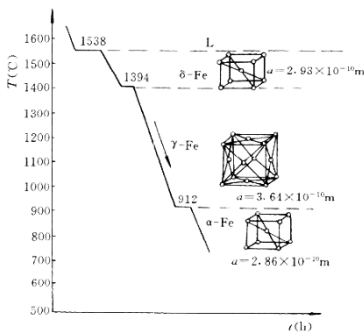


图 1-10 纯铁的冷却曲线和晶格类型变化

密程度要比体心立方晶格 α -Fe 大, 当 γ -Fe 向 α -Fe 转变时, 铁的体积会膨胀约 1%, 这就是钢在热加工后快冷和热处理淬火时引起内应力, 导致变形和开裂的重要因素之一。

第三节 合金的结构

1-6 什么是固溶体? 什么是间隙固溶体? 什么是置换固溶体?

1. 固溶体

所谓固溶体, 就是溶质原子溶入固态溶剂的晶格中而仍然保持溶剂晶格类型的一种金属晶体。例如铁碳合金的碳原子能溶入铁的晶格里, 这时铁是溶剂, 碳是溶质。也就是说, 当铁碳合金形成固溶体后, 晶格保持不变的组元(组成合金的最基本的、独立的物质称为组元, 简称元)称为溶剂, 晶格消失的组元称为溶质。固溶体的晶格类型与溶剂组元相同。

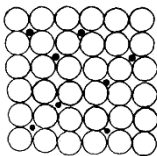


图 1-11 间隙固溶体

2. 固溶体类型

(1) 间隙固溶体。通常把溶质原子溶入溶剂晶格的间隙中所形成的固溶体, 叫做间隙固溶体。如图 1-11 所示。

在间隙固溶体中, 溶质原子的直径相差较大, 因此, 溶质原子只能处于溶剂晶格的间隙位置。由于溶剂晶格间隙有限, 所以间隙固溶体能溶解的溶质原子数量也是有限的。而且只有溶质原子尺寸很小, 溶剂的晶格间隙较大的条件下, 才能形成间隙固溶体。如碳、氮、硼等非金属材料溶入铁中形成的间隙固溶体即属于这种类型。

(2) 置换固溶体。溶剂晶格结点上的部分原子被溶质原子所代替的固溶体, 叫置换固溶体。图 1-12 是置换固溶体的晶格结构示意图。大多数合金元素溶入铁中形成的固溶体都属于这种类型。

无论是间隙固溶体还是置换固溶体, 都因溶质原子的加入而使溶剂晶格发生歪扭, 从而使合金的塑性变形抗力增加。这种通过溶入溶质原子形成固溶体, 使金属材料强度、硬度增高现象, 称为固溶强化。固溶强化是提高金属材料机械性能的一种重要途径。

实践证明, 只要适当控制固溶体中溶质的含量, 就能在显著提高金属材料强度、硬度的同时, 仍然保持相当高的塑性和韧性。例如, 在钢中加入镍量 19%, 可使合金的强度由 220 MPa 升高到 380~400 MPa, 硬度由 44HBS 升高到 70HBS, 而伸长率 (δ) 仍保持在 50% 左右。

晶格歪扭除了引起固溶强化之外, 还会使固溶体的某些物理性能也发生变化。一般规律是随着溶质原子的溶入, 金属的电阻升高。

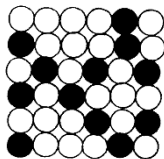


图 1-12 置换固溶体的结构示意图

1-7 什么是金属化合物? 什么是间隙相和具有复杂晶格的间隙化合物?

1. 金属化合物

金属化合物是合金组元间相互作用生成的、具有明显金属特性的化合物。

金属化合物的晶格类型跟组成化合物各组元的晶格类型完全不同。例如铁和碳组成的化合物 Fe_3C ，其晶体结构既不同于铁的体心立方晶格，也不同于石墨碳的六方晶格，而属于一种复杂的晶体结构。如图 1-13 (a)、(b)、(c) 所示。

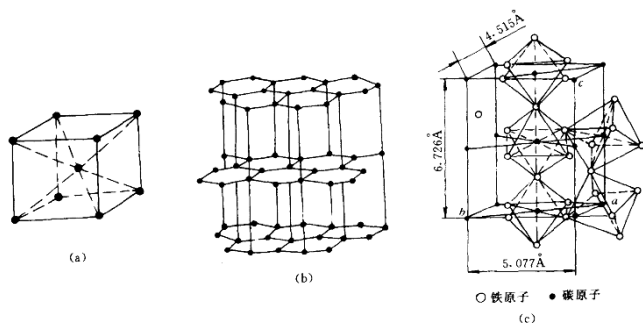


图 1-13 铁、碳、渗碳体（金属化合物）三种晶体结构比较图
(a) 铁的体心立方晶格；(b) 碳的六方晶格；(c) 金属化合物 Fe_3C 晶体结构

金属化合物的性能是熔点高，硬而脆。当合金中出现金属化合物时，通常能提高合金的强度、硬度和耐磨性，但塑性和韧性会降低。所以，金属化合物是各类合金钢、有色金属合金以及硬质合金的重要组成相。

2. 间隙相

当非金属元素原子半径与过渡族金属元素（如 H、N、C、B 等）原子半径的比值小于 0.59 时，间隙化合物具有比较简单的晶格（它与间隙固溶体形成条件是一样的。但它是化合物，具有化合物的特点，并且有与组元完全不同的晶体结构。而间隙固溶体却保持了溶剂元素的晶体结构）。这种结构称间隙相。钢中常见的间隙为： M_nX ，面心立方结构，如： Nb_4C 、 Fe_4N （M 表示金属原子；X 表示非金属原子）； M_2X ，密排六方结构，如： W_2C 、 Mo_2C 、 Fe_2N ； MX ，面心立方结构，如： VC 、 ZrC 、 TiC 、 WC ； MX_2 ，面心立方结构，如 VC_2 、 CeC_2 、 ZrH_2 。

间隙相虽然含有许多非金属元素，但却具有金属的性能。它们是合金钢的重要组成相，也是高温金属、硬质合金，陶瓷材料的重要组成相。

3. 具有复杂晶格的间隙化合物

当非金属元素原子与过渡族金属元素原子半径之比大于 0.59 时，形成具有复杂晶格的间隙化合物，统称为间隙化合物。如碳钢中 Fe_3C 、合金钢中的 Cr_7C_3 、 Mn_3C 、 Fe_5W_2C 、 Fe_2W_2C 等都属这一类。间隙化合物具有更高的硬度和熔点。所以间隙化合物在钢中是重要的组成相。如在工具钢中加入少量钒而形成 VC，可提高钢的耐磨性；在结构钢中加入少量的钛形成 TiC，在加热时可阻止钢中奥氏体晶粒度的长大；而高速钢之所以能在比较高的温度下仍

然保持高硬度，正是因为高速钢中，含有弥散分布的 W_6C 和 VC 等间隙化合物所致。钢中加入 V 、 Nb 、 Ti 等元素，能形成 V_4C_3 、 NbC 、 TiC 碳化物，在高温时组织比较稳定，有利于提高钢的高温性能。

1-8 什么是机械混合物？

机械混合物是由两种以上的晶体结构混合在一起而组成的一种组织。它可由两种（或多种）固溶体组成，也可由固溶体和金属化合物组成。机械混合物中各个晶体结构仍保持各自晶格和性能，因此整个机械混合物的性能，基本上是组成相性能的平均值。而且机械混合物往往比单一固溶体有更高的强度、硬度、耐磨性和良好的切削加工性能。但是塑性、压力加工性、抵抗腐蚀的能力等不及单一固溶体。

许多合金中其晶体结构是属于机械混合物型的，如钢、铸铁、铝合金、青铜、轴承等。

第四节 钢和生铁的基本组织

1-9 什么是铁素体？

碳在体心立方晶格 α 铁中的固溶体称为铁素体，用符号 F 表示。在 727C 时碳在铁素体中最大溶解度为 0.02% ，在 0C 时碳在铁素体中溶解度下降到仅有 0.008% 。铁素体和纯铁一样，具有强的铁磁性，很好的塑性和韧性 ($\alpha_k = 20\text{ J/cm}^2$) 而强度 ($\sigma_b = 300\text{ MPa}$) 和硬度 ($HBS = 80$) 较低。铁素体是绝大多数钢种在室温下的主要组织。在显微镜下铁素体呈灰白色，并有明显的、大小不一的晶核如图 1-14 所示。

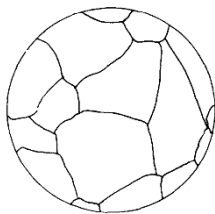


图 1-14 铁素体显微组织

1-10 什么是奥氏体？

碳在面心立方晶格 γ 铁中的固溶体称为奥氏体，用符号 A 表示。在 1147C 时碳在奥氏体中最大溶解度为 2.06% 。随着温度的降低，其溶解度逐渐减小。在 727C 时溶解度仅为 0.77% 。

奥氏体没有磁性，强度和硬度比铁素体高。但奥氏体仍是单一的固溶体，故塑性良好，韧性好，变形抗力较低，绝大多数钢种在高温压力加工和热处理时，都要求在奥氏体区进行。在火电厂有些设备上运用奥氏体组织特性，采用奥氏体钢。此种钢室温组织也是奥氏体。

1-11 什么是渗碳体？什么是一次、二次、三次渗碳体？怎样区别？特点如何？

1. 渗碳体

渗碳体是铁和碳的化合物，分子式 Fe_3C 。碳在铁中的溶解能力是有一定限度的。并且随温度的变化而变化。当碳的含量超过其在铁中的溶解度时，多余的碳就会和铁按一定比例化合而形成 Fe_3C 。渗碳体的含碳量为 6.69% 。

2. 一次渗碳体

过共晶白口铸铁在液态结晶时，从铁碳合金液相中析出的渗碳体，称为一次渗碳体。一次渗碳体是从液态中析出的，长大很少受阻，所以一般比较粗大。

3. 二次渗碳体

铁碳合金冷却时，从奥氏体中析出的渗碳体称为二次渗碳体。二次渗碳体一般沿奥氏体晶界析出，所以一般呈网状分布。

4. 三次渗碳体

铁碳合金冷却时，从铁素体中析出的渗碳体称为三次渗碳体。由于铁素体溶碳量很低，析出三次渗碳体很少，往往可忽略不计。

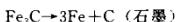
5. 渗碳体的鉴别

渗碳体硬而脆，硬度为 HBW800，（相当于 HRC72~75）很耐磨；无延展性，强度很低，塑性、韧性几乎为零。渗碳体在钢和铸铁中与其它相共存时，可以呈片状、粒状、网状或板状。

6. 渗碳体的特点

渗碳体是钢中主要强化相，它的形态、大小及分布对相的性能有很大影响。

渗碳体是一种不稳定的相，在一定条件下，能分解而形成石墨状的自由碳，即



这一分解过程对于研究钢和铸铁具有重大意义。火电厂动力设备使用的碳钢的低合金耐热钢，在高温和应力的长期作用下，渗碳体会发生分解，形成铁和石墨，这个过程称为石墨化。严重的石墨化会导致锅炉炉管爆破。

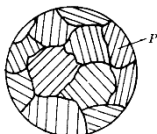
1-12 什么是珠光体？片状珠光体和球状珠光体有什么不同？

1. 珠光体

含碳量为 0.77% 的共析钢，它是由铁素体和渗碳体组成的机械混合物如图 1-15 所示。

2. 片状珠光体

若珠光体中的渗碳体呈片状分布，称为片状珠光体。其性能如下



$$\sigma_b = 804 \sim 862 \text{ (MPa)}$$

$$\delta = 11\% \sim 12\%$$

$$\text{HBS} = 190 \sim 255$$

注：HBS——布氏硬度，试验压头用淬硬钢球；HBW——布氏硬度，试验压头用硬质合金。

3. 球状珠光体

若珠光体中的渗碳体呈球状分布，称为球状珠光体。其性能如下

$$\sigma_b = 617 \text{ MPa}$$

$$\delta = 20\% \sim 25\%$$

$$\text{HBS} = 160 \sim 190$$

与片状珠光体相比，球状珠光体的强度、硬度低，塑性好。为使高碳钢便于切削加工，希望获得球状珠光体。

1-13 珠光体、索氏体、屈氏体有何相同和不同点？

1. 珠光体

铁素体与渗碳体的片间距为 $0.6 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ，通常用符号 P 表示。

2. 索氏体

索氏体也是铁素体和渗碳体组成的机械混合物，但是片间距比珠光体小，约为 $0.25 \mu\text{m}$ 。用金相显微镜放大 600 倍能分辨出铁素体和渗碳体的片层结构。这种组织在铁碳合金状态图上找不到它，因为它是一种不稳定组织。碳钢和低合金钢采用正火或奥氏体等温分解，就能获得索氏体组织。索氏体具有良好的综合机械性能。通常用符号 S 代表索氏体。

$$\sigma_b = 686 \sim 1372 (\text{MPa})$$

$$\delta = 10\% \sim 20\%$$

$$\text{HBS} = 250 \sim 320$$

3. 屈氏体

屈氏体也是一种珠光体型组织，铁素体和渗碳体的片层间距为 $0.1 \mu\text{m}$ ，可用金相显微镜放大 1000 倍以上就能分辨清铁素体和渗碳体的片层，它比索氏体更细。其性能如下

$$\sigma_b = 1372 \sim 1666 (\text{MPa})$$

$$\delta = 5\% \sim 10\%$$

$$\text{HBS} = 400 \sim 500$$

屈氏体亦称托氏体，通常用符号 T 表示。

由此可见，索氏体、屈氏体都为珠光体型组织，区别点在于铁素体与渗碳体的片层间距大小不一，片间距愈小，相界面愈多，强度、硬度愈高，但塑性下降。

1-14 什么是莱氏体？

莱氏体是由奥氏体和渗碳体组成的共晶体。共晶体是从一种液体中同时结晶出两种晶体所组成的机械混合物。这种结晶过程称为共晶反应。铁碳合金的液体冷却到 1148°C 取得了含碳为 4.3% 成分时，发生共晶反应而结晶成莱氏体。

由于奥氏体在 727°C 时转变为珠光体，所以在室温时，莱氏体由珠光体和渗碳体组成。为区别起见，一般将 727°C 以上的莱氏体，称为高温莱氏体；在 727°C 以下的莱氏体称为低温莱氏体。在铁碳状态图中常将以上两种莱氏体用符号表示，即 L_d 代表高温莱氏体， L_d' 代表低温莱氏体。无论哪一种莱氏体，它的性能和渗碳体相似，硬度高 ($\text{HBS} > 700$)，塑性很差。

第五节 铁碳合金状态图

1-15 什么是铁碳合金状态图？

铁碳合金状态图是表示在极缓慢加热（或冷却）条件下，不同成分的铁碳合金在不同温度时具有的状态或组织的图形。通过合金状态图，可以了解铁碳合金成分—组织—性能的变化规律及组织随温度变化而转变的规律。

含碳量高于 6.69% 的铁碳合金脆性大，没有实际使用价值。在铁碳合金状态图中有实

用意义并被深入研究的是含碳量从0%~6.69%部分,即Fe-Fe₃C这一部分,通常为铁—渗碳体相图或简写成Fe-Fe₃C状态图,如图1-16所示。

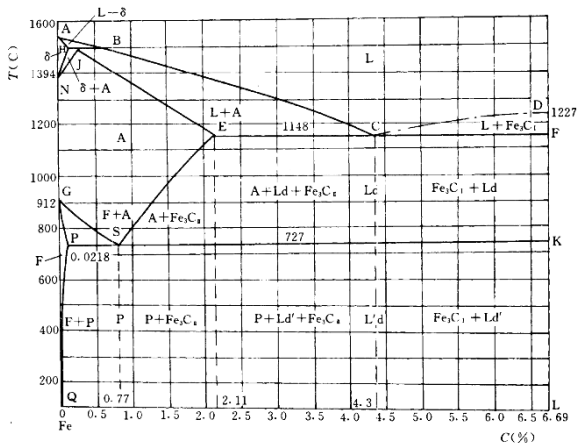


图 1-16 Fe-Fe₃C 状态图

Fe-Fe₃C 状态图中各交点、各线的表示符号是国际统一规定的,不能随意改变。

1-16 Fe-Fe₃C 状态图中各相区、特性点和特性线的意义是什么?

1. 相区

因 Fe-Fe₃C 状态图左上角包晶部分的实际意义不大,可将它省略简化。简化后的 Fe-Fe₃C 状态图如图 1-17 所示。

(1) 简化后的 Fe-Fe₃C 状态图上有四个单相区:

ACD 以上: 液相区 (L);

AESGA 区: 奥氏体区 (A 或 γ);

GPQG 区: 铁素体区 (F 或 α);

DFKL 垂线: 渗碳体区 (Fe₃C)。

(2) 简化后的 Fe-Fe₃C 状态图上还有五个双相区,它们分别存在于相邻两单相区之间,这些两相区是: L+A; L+Fe₃C; F+A; A+Fe₃C; F+Fe₃C。

(3) 简化后的 Fe-Fe₃C 状态图上两条水平线为三相平衡线:

共晶线 (ECF 线): L+A+Fe₃C 三相平衡。

共析线 (PSK): F+A+Fe₃C 三相平衡。

2. 特性点

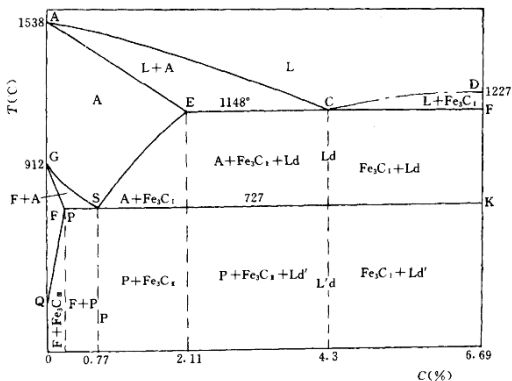


图 1-17 简化后的 Fe-Fe₃C 图

在 Fe-Fe₃C 状态图上特点很多，但常用的特点主要有以下几点：

C 点	共晶点	1148 °C	C 4.3%
S 点	共析点	727 °C	C 0.77%
A 点	纯铁的熔点	1538 °C	C 0.0%
D 点	渗碳体的熔点	1227 °C	C 6.69%
G 点	称 $\alpha\text{-Fe} \rightleftharpoons \gamma\text{-Fe}$ 同素异构转变点	912 °C	C 0.0%
F 点	共晶渗碳体的成分	1148 °C	C 6.69%

3. 特性线

(1) ACD 线为液相线，在此线以上铁碳合金呈液态，冷却至此线，合金开始结晶。

(2) AECF 线为固相线，铁碳合金冷却到此线时，全部结晶完毕，因此在此线以下的合金全部呈固态。

(3) ECF 线为共晶线，含碳为 2.11%~6.69% 的合金在此线上发生共晶反应。转变产生 A+Fe₃C 叫莱氏体 (Ld)。

(4) PSK 线为共析线，含碳 0.0218%~6.69% 的合金在此线上发生共析反应。转变产物 F+Fe₃C 叫珠光体。

(5) ES 线为碳在奥氏体中的溶解度曲线，通常称为 A_{cm} 线，合金冷却时沿此线从奥氏体中析出渗碳体 (Fe₃C₁)。

(6) GS 线，合金在冷却过程中从奥氏体中开始析出铁素体的线，或者说在加热时，铁素体溶入奥氏体的终了线，通常称为 A₃ 线。

(7) PQ 线，碳在铁素体中的溶解度变化线，冷却时沿此线从铁素体中析出渗碳体 (Fe₃C₁)，因其数量极少，故在讨论含碳较高的铁碳合金时通常可以忽略不计。

1-17 铁碳合金怎样分类？

铁碳合金状态图上的各种合金，按其成分（含碳量%）及组织的不同通常分为下列三种：

(1) 工业纯铁含碳量小于 0.0218%，室温组织为铁素体（F）。

(2) 钢含碳量为 0.0218%~2.11%，其特点是加热至高温时可获得均匀的单相奥氏体组织，塑性好，可进行锻造、轧制等加工。钢根据室温组织的不同，又可分为三种：

1) 亚共析钢：含碳量小于 0.77%，组织是 F+P。

2) 共析钢：含碳量为 0.77%，组织是 P。

3) 过共析钢：含碳量大于 0.77%，组织是 P+Fe₃C。

(3) 白口铸铁含碳量为 2.11%~6.69%，其特点是结晶时都有共晶反应，铸造性能较好。但因高温组织中渗碳体量大，性质很脆，不能锻造。

根据室温组织的不同，白口铁又分为三类：

1) 亚共晶白口铸铁：含碳量为 2.11%~4.3% 组织是：P+Fe₃C₁+Ld'。

2) 共晶白口铸铁：含碳量为 4.3%，组织是 Ld。

3) 过共晶白口铸铁：含碳量为 4.3%~6.69%，组织是：Fe₃C₁+Ld。

1-18 铁碳合金状态图有什么用途？应用方面有局限性吗？

Fe-Fe₃C 状态图较全面地总结了铁碳合金的组织，性能和随成分和温度变化的规律，从而为选材和制定铸、锻、焊及热处理等加工工艺提供了重要理论依据，如图 1-18 所示。

1. 选材方面的应用

根据成分—组织—性能之间的规律，含碳量 < 0.25% 的钢具有良好的塑性、韧性和焊接性能。可用于制造钢板、容器、锅炉钢管、冲压件和焊接件等，这类钢是电厂锅炉的主要材料，如汽包、水冷壁、空气预热器以及省煤器、过热器、给水管道等；含碳量为 0.30%

~0.55% 的碳钢，强度较高，韧性和塑性不是很低，加工性也较好，是齿轮、轴类等零件的重要材料；含碳量为 0.6%~1.3% 的碳钢有很高的硬度和耐磨性，常用于制造刀具、量具和模具以及弹簧等。含碳量 > 2.11% 的白口铸铁可用作耐磨性好，不受冲击的工作。

2. 铸造方面的应用

根据铁碳状态图的液相线，可以确定铸铁的浇注温度一般在液相线以上 50~100℃。由图 1-18 可知，共晶成分的铁碳合金的结晶温度最低，并在恒温下结晶，具有很好的铸造性，所以铸铁的成分应尽量选在共晶点（C 点）附近。

3. 锻、轧方面的应用

奥氏体呈面心立方晶格，强度较低，塑性好，变形抗力较低，有利于变形加工，所以钢材的轧制和锻造，

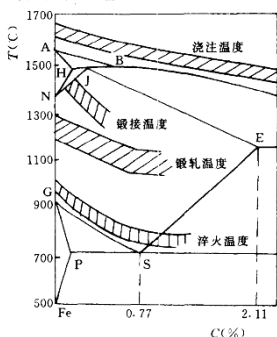


图 1-18 Fe-Fe₃C 状态图与热加工的加热温度之间的关系

常选择在单相奥氏体区适当温度范围内进行。一般锻轧开始变形(称始锻或始轧温度)温度控制在固相线以下 $100\sim 200^{\circ}\text{C}$, 终止锻、轧温度一般应控制在 800°C 左右。锻轧温度过高, 钢氧化严重。锻轧温度过低, 则塑性较差, 易导致锻轧件开裂。

4. 焊接方面的应用

由 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图知, 低碳钢塑性好, 容易焊接, 而含碳量高的钢则不易焊接。因此, 铁碳合金状态图为焊接工艺提供了很重要的依据。

5. 热处理方面的应用

$\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图对制定热处理工艺有重要的指导意义, 这些将在热处理部分讨论。但亦有一定的局限性, 具体表现在以下几个方面。

(1) $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图是表示平衡条件下, 不同成分的铁碳合金在不同温度时所具有的组织。然而, 实际生产中是不平衡加热和冷却的, 因而该图不能反映出非平衡组织。

(2) $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 状态图只反映铁碳二元合金相的平衡状态。实际应用的钢铁材料中, 还有其它元素, 如 Si 、 Mn 、 P 、 S 等, 它们对状态图有很大影响。如果在铁碳合金中加入其它品种繁多的合金元素, 状态图变化更大。

虽然如此, 铁碳合金状态图不失其参考价值, 它仍是研究其它钢铁材料的基础。

1-19 合金元素对铁碳合金状态图有什么影响?

在铁碳合金中, 若再加入一种或几种合金元素之后, 将成为三元合金或多元合金。那么, 相应地就应有三元合金状态图或多元合金状态图。

如果把每一种合金元素对铁碳合金状态图的影响进行分析, 找出其规律, 从而帮助分析和判断合金钢的组织 and 性能变化。

目前对于三元合金状态图或多元合金状态图的研究, 仍以铁碳合金状态图为基础, 再考虑合金元素的影响, 从而了解合金元素的作用。

合金元素对铁碳合金状态图的影响, 主要可分为以下两大类:

(1) 扩大奥氏体相区, 使 S 点和 E 点向左下方移动。加入合金元素 Mn 、 Ni 、 Cu 时, 使 A_1 、 A_3 温度线下降。将奥氏体相区扩大, 与此同时, 使 S 点和 E 点向左下方移动。若在钢中的锰、镍之类的元素达到一定值时, 可使钢在室温下获得奥氏体组织, 这种钢称为奥氏体钢。如典型的不锈钢(如 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 耐热不锈钢)和耐磨钢(如 $\text{Mn}13$ 型高锰耐磨钢)等。

(2) 缩小奥氏体相区, 使 S 点和 E 点向左上方移动。若在钢中加入 Si 、 Cr 、 W 、 Mo 、 V 、 Ti 等元素, 使 A_1 、 A_3 点上升, 并使 S 点和 E 点向左上方移动。图 1-19 和图 1-20 所示为 Si 、 Cr 对铁碳相区 E 点的影响。由图可知, 含有这些元素的钢, 热处理时加热温度都应该比碳钢高。此外, 当 Si 、 Cr 等元素的含量足够时, 可使奥氏体相区完全消失, 使钢在室温和高温时都是铁素体组织, 这种钢称为铁素体钢。由图还知, 合金元素含量越多, E 点愈往左移, 而奥氏体区缩小越大。 E 点左移后, 即使含量 $< 2.11\%$ 的钢, 也能出现莱氏体组织。例如, 高速钢(如 $\text{W}18\text{Cr}4\text{V}$) 中含碳量虽然只有 0.80% , 却属于莱氏体钢。

以上所述单一奥氏体组织的钢或单一组织的铁素体组织的钢, 均具有特殊的物理、化学性能(如耐酸、耐热、耐碱等)。因此, 在电厂热力设备上某些特殊要求的零部件需用这类钢。

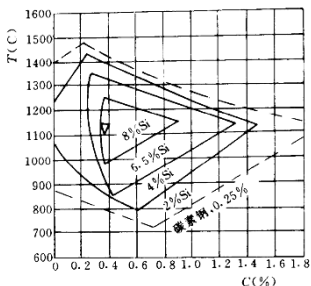


图 1-19 硅对铁碳相图单一奥氏体相区的影响

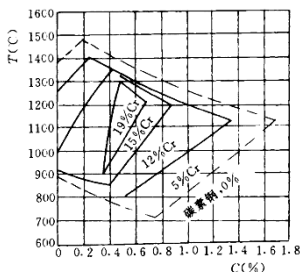


图 1-20 铬对铁碳相图单一奥氏体相区的影响

1-20 合金元素对钢的热处理有什么影响？

合金元素对钢的热处理的影响归纳起来有以下几点。

1. 合金元素对钢加热时奥氏体形成的影响

合金钢加热时的奥氏体化过程，包括奥氏体晶核形成和长大、碳化物的分解和溶解以及奥氏体的均匀化等三个阶段。

(1) 对奥氏体形成的影响：大多数合金元素（除 Co、Ni 外）都减缓奥氏体化过程。

(2) 对碳化物溶解的影响：奥氏体形成后，组织中还有未溶解的各种类型的碳化物，要使稳定性高的碳化物，进行分解并溶入奥氏体中，需要提高加热温度。例如，含 Cr 的碳化物在 850 C 才会大量溶解，含 W、Mo 的碳化物要在 950 C 才显著溶解，含 V、Ti、Nb 的碳化物要高达 1050 C 才溶解。因此，为了保证合金钢中合金元素作用的充分发挥，合金钢就需要更高的加热温度和较长的保温时间。

(3) 对奥氏体均匀化的影响：奥氏体形成后由于碳化物的陆续溶入，不均匀度更加严重。要使奥氏体均匀化，碳和合金元素都要扩散。但由于合金元素的扩散速度很慢，即使在 1000 C 的高温下，也仅为碳扩散速度的万分之几或千分之几。为保证奥氏体的均匀化，必须采取较高的加热温度和较长的保温时间。但有些高碳合金钢为提高钢的耐磨性，允许钢中有未溶解的碳化物存在。

(4) 合金元素对奥氏体晶粒长大的影响：除 Mn、P 元素之外，几乎大多能不同程度阻止奥氏体晶粒的长大。

2. 合金元素对过冷奥氏体转变的影响

对 C 曲线的影响：除 Co 元素之外，其它大多数合金元素总是不同程度地延缓珠光体和贝氏体的转变。即增加过冷奥氏体的稳定性，使 C 曲线右移。淬火临界冷却速度降低，从而提高钢的淬透性。使淬火后工件的变形和开裂倾向减少，也使整个工件截面的组织、性能趋于均匀。

3. 合金元素对马氏体开始转变温度 M_s 的影响

由图 1-21 知，除少数元素如 Co、Al 使马氏体转变温度提高外，大多数合金元素都能

不同程度地降低马氏体转变温度 M_s 。并增加残余奥氏体量，如图 1-22 所示。

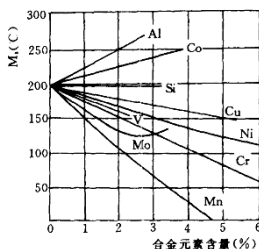


图 1-21 合金元素对马氏体转变温度 M_s 的影响

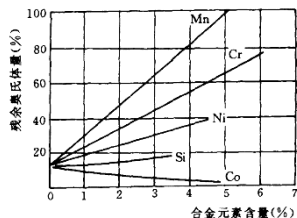


图 1-22 合金元素对残余奥氏体量的影响 (C=1.0% 的钢在 1150°C 淬火)

4. 合金元素对回火转变的影响

合金元素在淬火时溶入马氏体中，在回火过程中，大多数合金元素都能减慢马氏体的分解，提高了淬火钢的回火稳定性。回火稳定性是钢抵抗回火软化的能力。合金钢比碳钢有更好的回火稳定性。在相同温度回火时，合金钢比碳钢稳定，强度、硬度比碳钢高。若达到相同的强度，则合金钢可在更高的温度下回火，使钢的韧性提高。所以合金钢与碳钢相比，有更高的综合机械性能。

除此之外含有合金元素如 Cr、Mo、W、V、Nb 等的合金钢，随着回火温度的升高，硬度并不相应下降，而在某一温度后，硬度反而回升或停止下降，这种现象称为二次硬化。二次硬化对于需要有较高热硬性（高温下保持硬度的性能）的工具钢，具有重要意义。

第六节 金属的塑性变形和再结晶

1-21 什么是塑性变形？

塑性变形是指金属在外力作用停止后不能恢复原状的变形。金属变形有三种基本形式即弹性变形、塑性变形和断裂三种形式，也是金属在外力作用下变形的三个阶段。

具有一定塑性的金属材料，无论承受多么小的外力，都会毫不例外地引起变形。图 1-23 为晶体在正应力作用下的变形示意图。图 1-23(a) 为变形前示意图，1-23(b) 所示为弹性变形，这种变形只发生晶格的简单的弹性歪曲和拉长。由于所加外力未超过原子间的结合力，所以外力去除后，晶格会自动地恢复到变形前的形状，如图 1-23(a) 所示。如受载金属应力继续增大，超过了弹性极限，则变形进入塑性变形阶段。这时，若将应力消除，变形将不能完全消失，只恢复其弹性变形部分，有一部分变形被保留下来，这部分变形即为塑性变形，如图 1-23(c) 所示。如果应力继续增大，变形量也将不断增加，同时由于变形使晶体得到强化（又称加工硬化）。当应力达到材料的断裂强度时，便发生破裂。

研究金属的塑性变形，对于改变金属材料的加工工艺，提高生产效率，改善产品质量

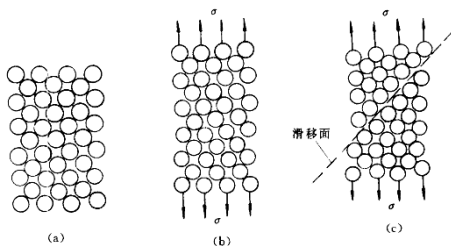


图 1-23 晶体受正应力作用时的变形示意图

(a) 变形前；(b) 弹性变形；(c) 塑性变形

和合理使用金属材料等方面都具有重要的意义。

1-22 金属塑性变形的特点有哪些？

(1) 塑性变形的主要方式是滑移。滑移是指在切应力作用下，晶体的一部分沿一定晶面和晶向相对于另一部分的滑动，如图 1-23(c)所示。滑移总是沿着金属内原子排列最紧密的晶面和最密的晶向进行，这些晶面称为滑移面，这些晶向称为滑移方向。常见金属晶体的滑移面与滑移方向见表 1-1。滑移系数目多，产生滑移的可能性愈大，金属塑性愈好。

表 1-1 常见金属晶体的滑移面和滑移方向

晶体结构	金属举例	滑移面	滑移方向	滑移系数目
面心立方	Cu, Al, γ -Fe	{111}	[110]	12
体心立方	α -Fe	{110} {112} {123}	[111]	48
密排六方	Zn	{0001} {1010}	[1120]	3

(2) 塑性变形在外力去除后，不能恢复原状，而保留变形。

(3) 只有切应力才能引起塑性变形，而正应力只能引起弹性变形或断裂。

(4) 塑性变形使工件产生加工硬化。金属加工硬化现象，对金属材料的使用具有重要的意义。它是提高金属强度的重要方法之一。

1-23 塑性变形对金属有什么影响？

塑性变形不但可以改变金属材料的形状，而且可使金属的性能发生明显的变化。

(1) 金属性能的变化。塑性变形后金属性能变化最显著的是机械性能，如图 1-24 所示为工业纯铜与 45 钢的变形度和强度、硬度、塑性之间的关系。从这两个图可以看到，金属材料经冷加工变形后，强度、硬度显著提高，而塑性很明显下降，即产生了加工硬化现象。这是金属材料的一项重要特性，是强化金属材料的途径之一。在金属材料中，有些是不能用热处理方法来强化的，但可以用冷加工（冷塑性变形）方法进行强化，如某些不锈钢，经过冷轧可以使其强度提高近一倍。金属的冷冲压成型正是利用了加工硬化这一特性。

(2) 组织结构的变化。金属在冷塑性变形后，随着变形量的增大，金属的晶粒将沿变形方向被拉长为纤维状，并且晶界也变得模糊，形成了纤维组织。如图 1-25 所示。经过冷